

工程材料基础

制作人 潘希德 教授

西安交通大学 材料学院

绪论

- 材料科学的重要地位
- 什么是材料科学
- 工程材料简介

0.1 材料科学的重要地位

- 材料是人类社会生活中广泛使用的物质，是社会发展和进步的重要标志；
- 人类使用材料的七个时代；

人类使用材料的七个时代

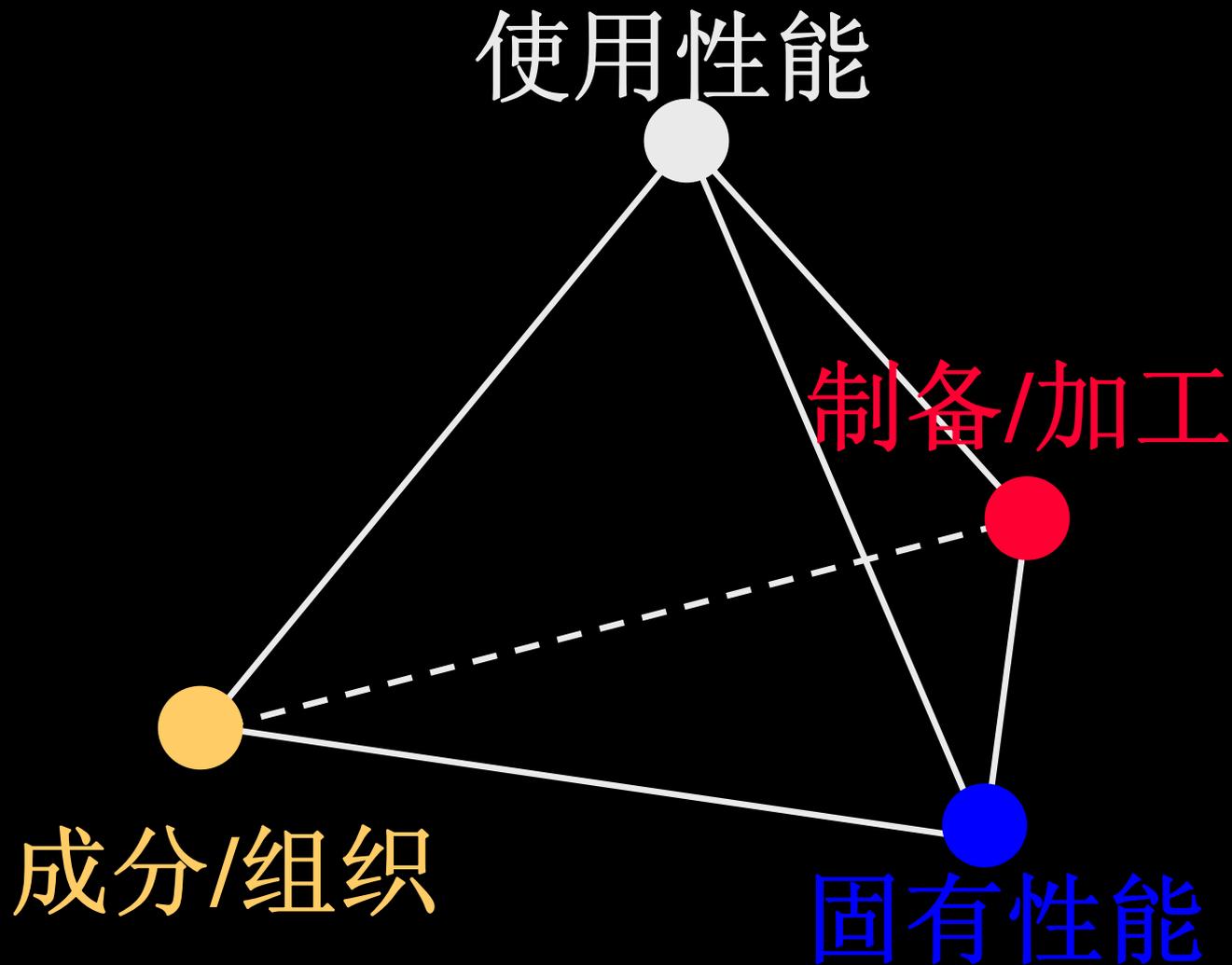
起始时间	时代名称
100,000 BC	石器时代
3,000 BC	青铜器时代
1,000 BC	铁器时代
0 AD	水泥时代
1800 AD	钢时代
1950 AD	硅时代
1990 AD	新材料时代

- 现代技术的三大支柱：能源、信息、材料；
- 材料的品种、数量和质量已成为衡量一个国家科技和国民经济水平及国防力量的重要标志。

02 什么是材料科学

材料科学是研究材料的结构、制备加工工艺与性能之间关系的科学。

材料科学与工程的四要素



成分/组织

材料结构所包括的四个层次：
原子结构、结合键、原子排列
方式和组织

制备/加工

制备、加工方法及其对性能的影响

固有性能

材料本身所具有的物理、化学及力学性能

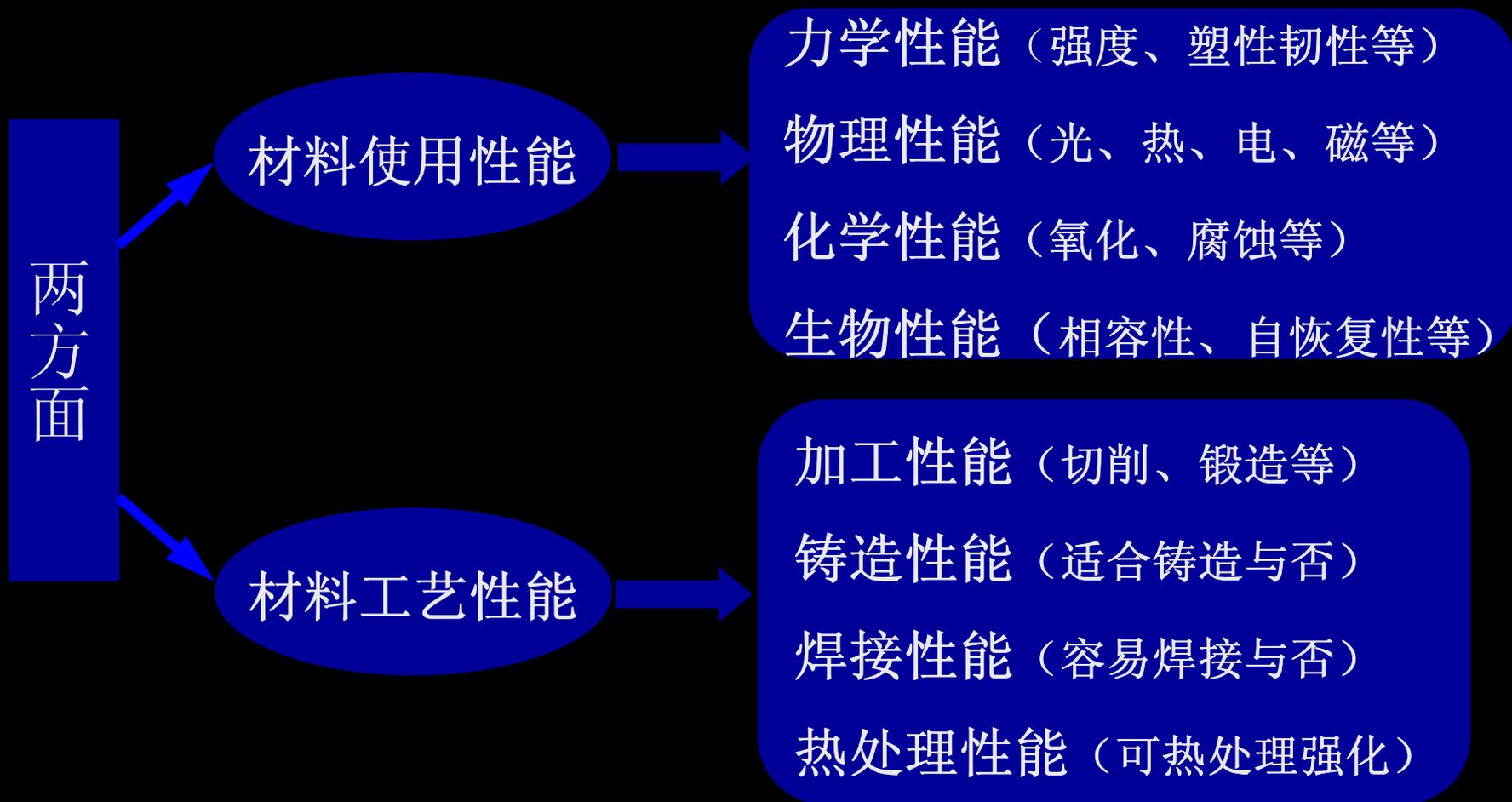
使用性能

将材料的固有性能和产品设计、工程应用能力等联系起来。如寿命、速度、能量利用率、安全可靠

机械工程材料

机械工程材料主要指用于机械工程、电器工程、建筑工程、化工工程、航空航天工程等领域的材料。

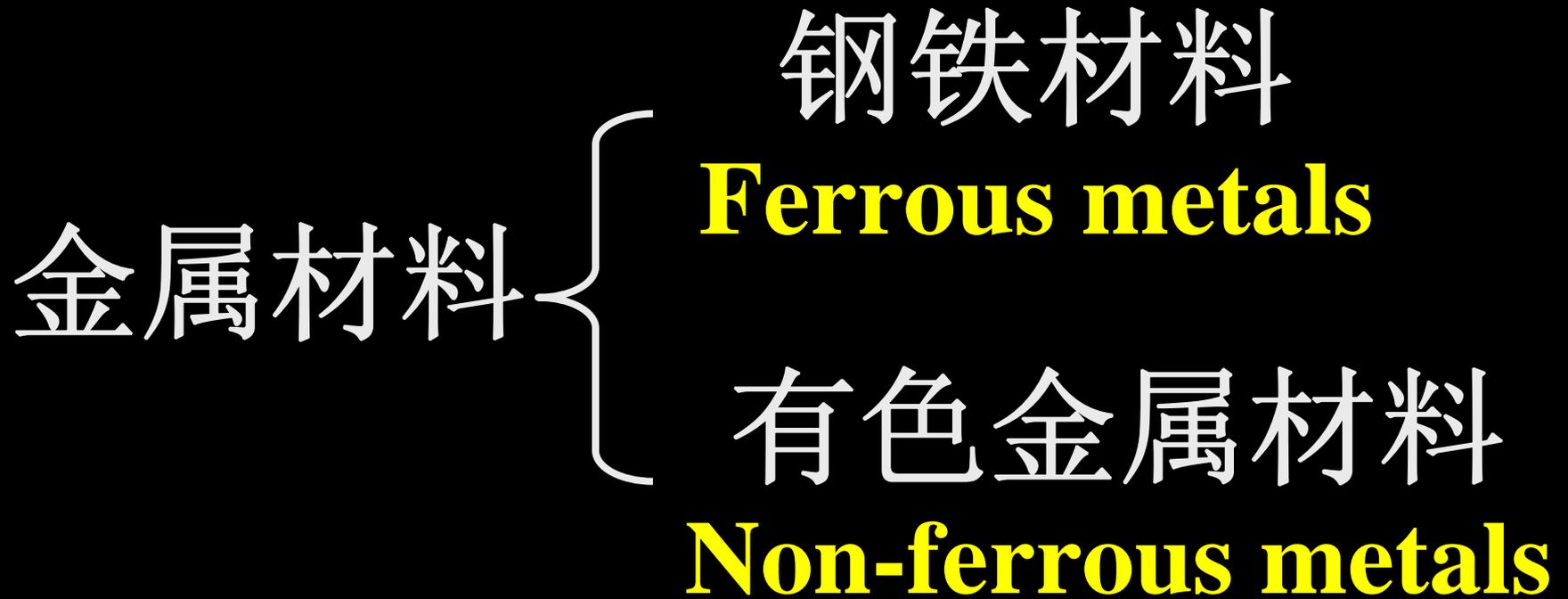
机械工程材料的常用性能



03 工程材料简介



金属材料 Metallic Materials



用量占80%

非金属材料 Non-metallic Materials

分类

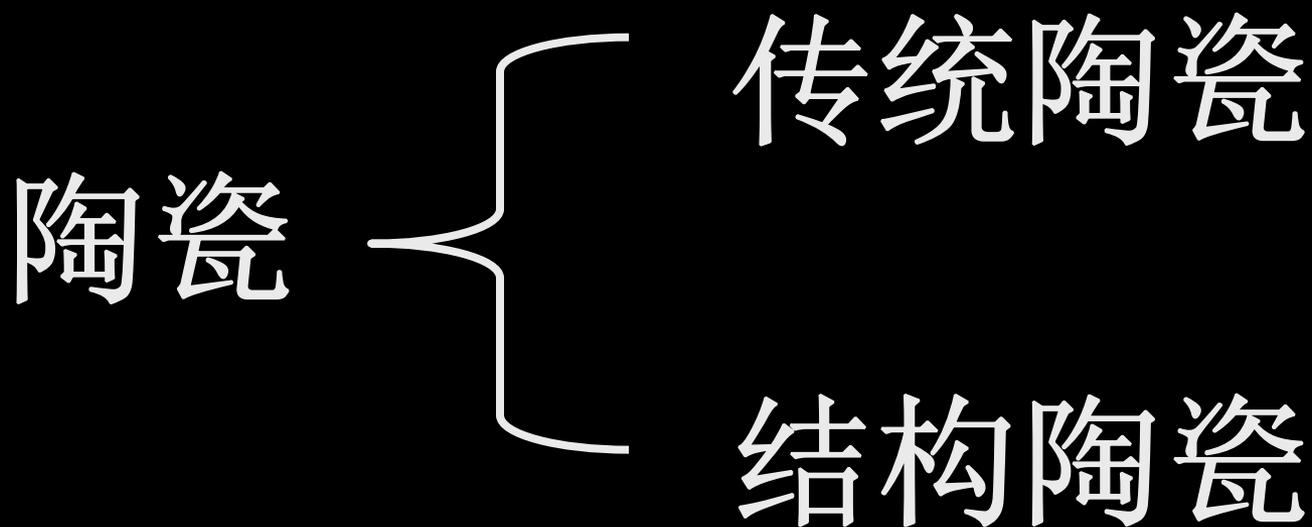
陶瓷材料

高分子材料

复合材料

功能材料

陶瓷材料 Ceramic Materials



高分子材料 **Polymeric Materials**

又称聚合物，按照用途可分为：

塑料 **Plastic Materials**

合成纤维 **Synthetic fibres**

橡胶 **Rubbers**

复合材料 Composite Materials

金属、聚合物、陶瓷优点缺点都非常明显，如果把两种材料结合在一起，发挥各自的长处，又可以在一定程度上克服了它们的弱点，就产生了复合材料。

功能材料 **Functional Materials**

- ◆ 电功能材料
- ◆ 磁功能材料
- ◆ 热功能材料
- ◆ 光功能材料
- ◆ 其它功能材料简介

材料性能与内部结构的关系

材料的不同性能都是由其内部结构来决定的，从材料的内部结构来料加工看，可分为四个层次：

原子结构——结合键——

原子排列方式——显微组织

四层次的关系

- 原子结构是基础；
- 结合键不同性能也不同；
- 原子排列方式（晶体和非晶体）的差别，可以改变材料的整个性能；
- 显微组织是研究材料性能的基础。

本课程的要求和基本内容

要求

- A. 获得常用材料的基础理论知识，了解各种机械工程材料的基本特性和应用范围；
- B. 在了解材料成分、组织、性能关系的基础上，可根据零件的工作条件和失效形式，正确设计和合理选材；
- C. 了解结构、工艺、外界条件（温度、环境介质）对材料性能的影响，正确制定零件的冷、热加工工艺路线。

基本内容

- A.** 金属学、热处理原理，基础与工艺；
- B.** 材料（钢铁材料，有色金属及其合金，高分子材料，陶瓷材料，复合材料）；
- C.** 重点 成分—组织—性能。

教材



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

普通高等教育机电类规划教材

机械工程材料

第2版

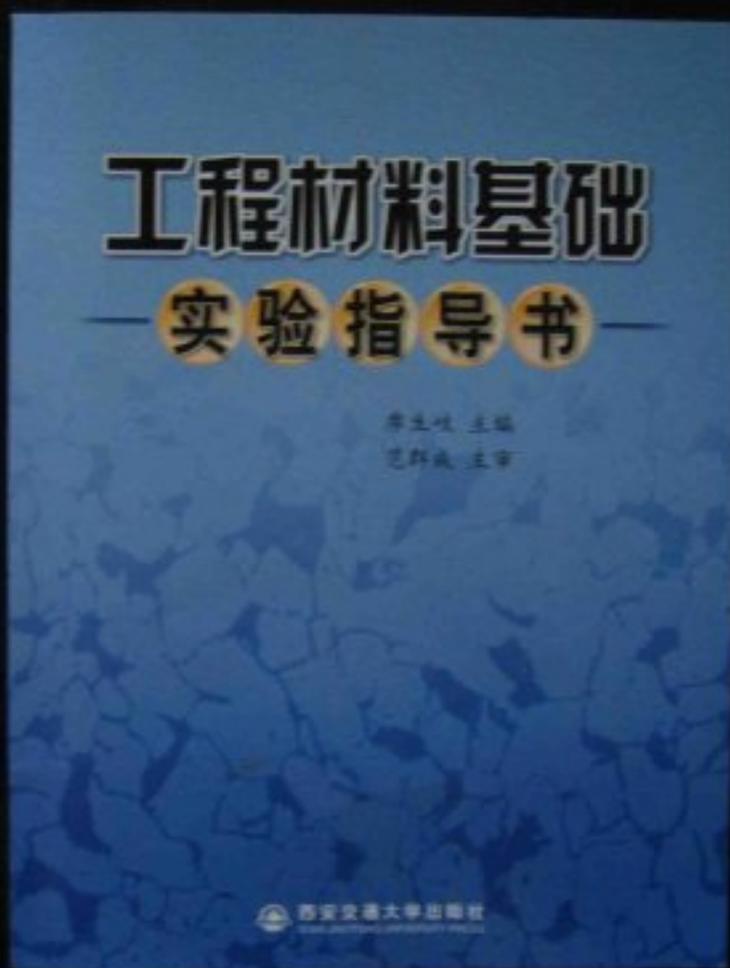
西安交通大学 沈 莲 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

实验

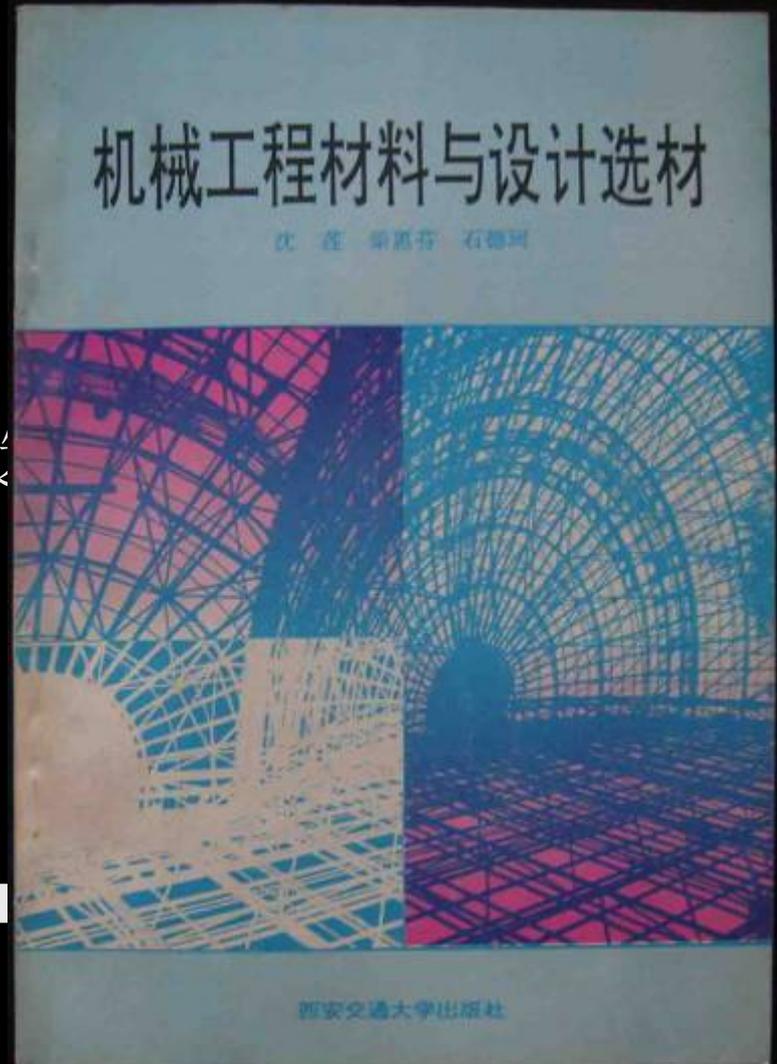
- 实验一 金
显微镜的
- 实验二 钋
察与分析
- 实验三 综



金相
的观

主要参考书

- 材料科学基础
- 工程材料学
- 工程材料性能
- 机械工程材料与设计选材
- 金属学及热处理
- 材料工程基础
- 物理冶金学原理
- **The science and design of materials**



第一章 机械零件的失效分析

零件（构件）的功能

在一定的压力、温度、介质下，

- 保持规定的形状和尺寸；
- 实现规定的机械运动；
- 传递力和能。

零件失去设计所要求的效能（功能）称为失效。

常见的失效形式：过量变形、断裂、磨损、腐蚀

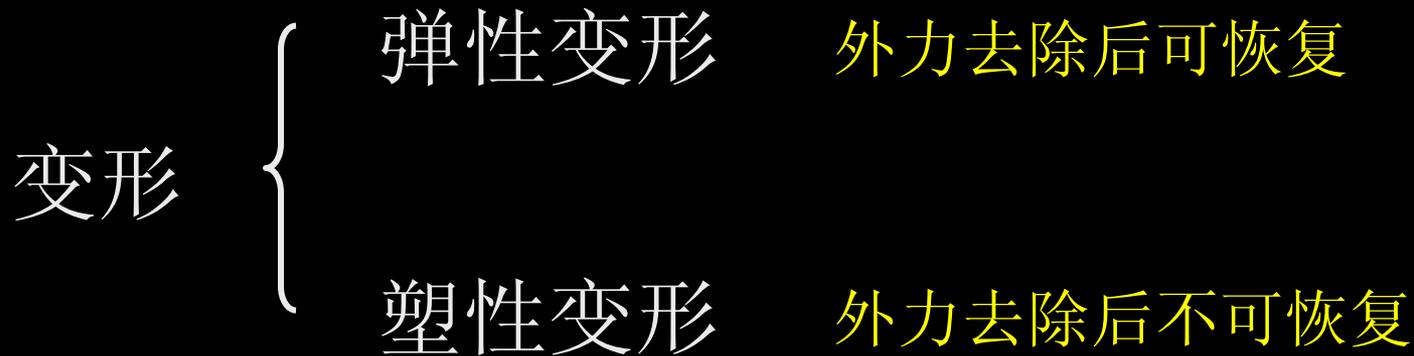
本章的内容

- 常温静载下的过量变形失效
- 静载和冲击载荷下的断裂失效
- 交变载荷下的疲劳断裂失效
- 磨损失效
- 高温下的蠕变变形和断裂失效

第一节 零件在常温静载下的过量变形

变形

材料在外力作用下产生的形状或尺寸的变化。



常温静载试验方法

- 静拉伸
- 压缩
- 弯曲
- 扭转
- 硬度

一、工程材料静拉伸时的应力-应变行为

$\sigma < \sigma_e$: 弹性变形

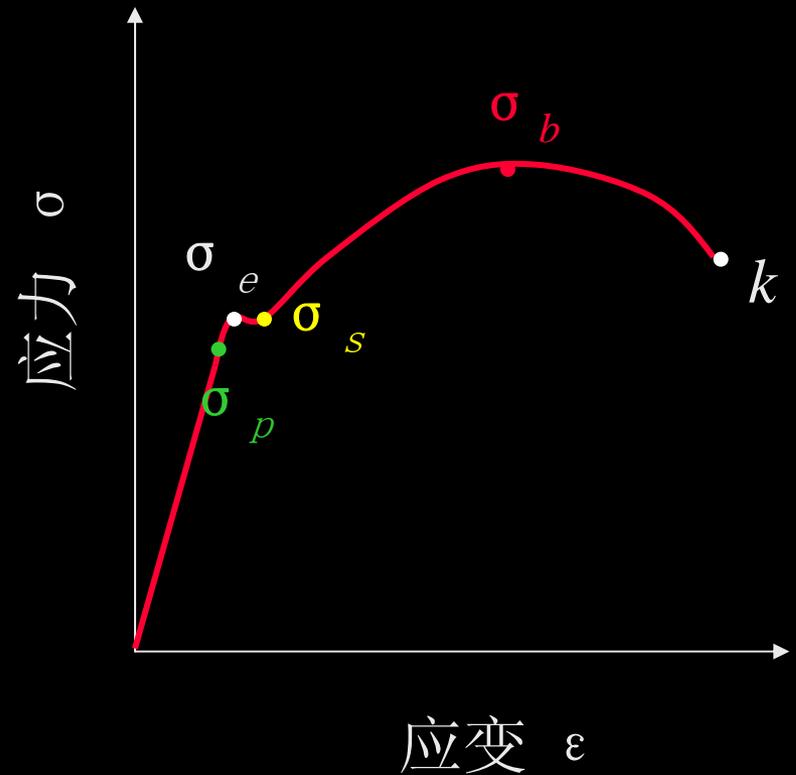
$$\sigma < \sigma_p: \sigma = E \varepsilon$$

$\sigma = \sigma_s$: 屈服塑性变形

$\sigma_b > \sigma > \sigma_s$: 均匀塑性变形

σ 达到 σ_b : 集中塑性变形, 产生颈缩

变形量达 k 点后, 发生断裂



低碳钢拉伸应力-应变曲线

屈服
塑性
变形

均匀
塑性
变形

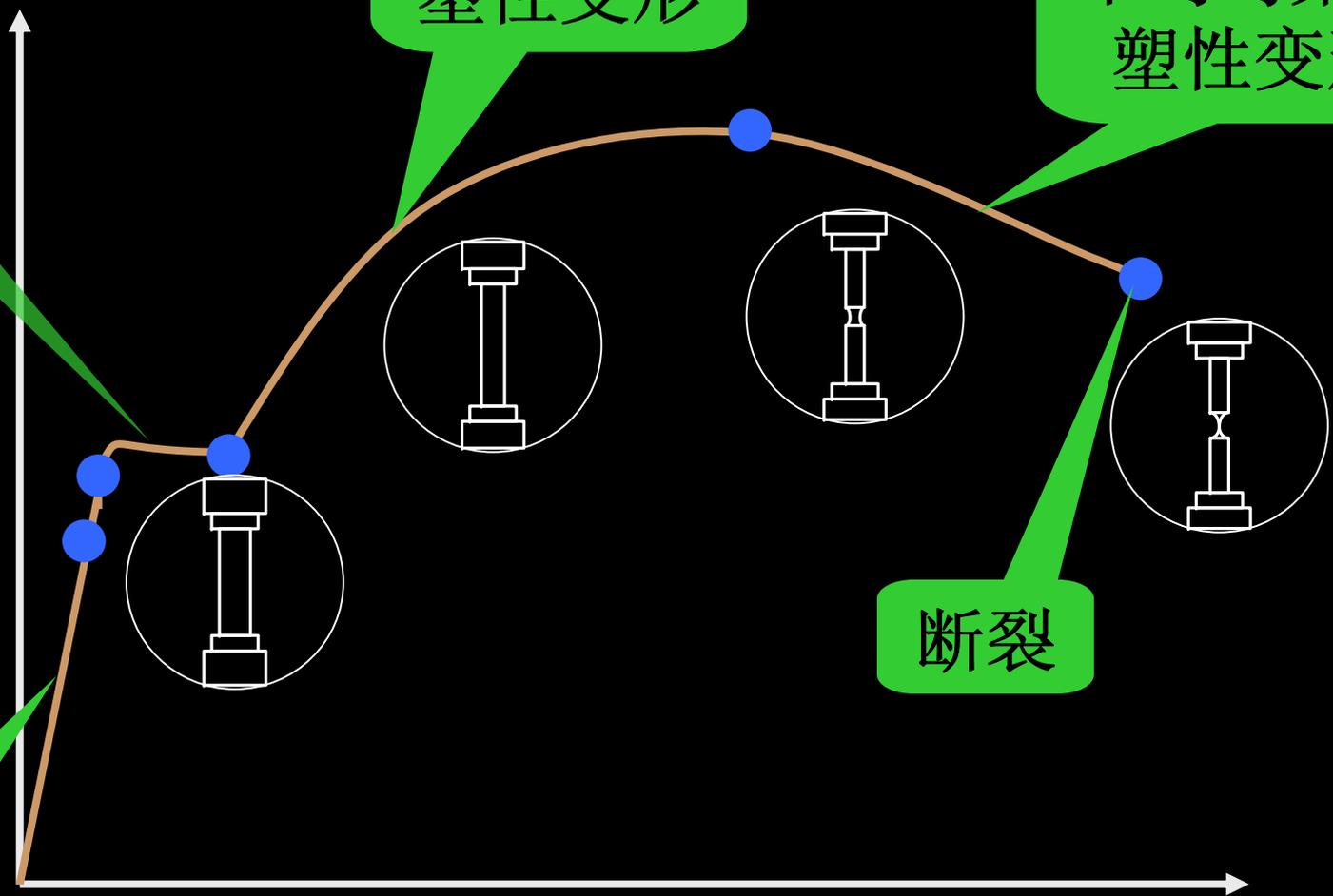
不均匀集中
塑性
变形

断裂

弹性
变形

应力 σ

应变 ϵ



- σ_e : 弹性极限
- σ_p : 比例极限
- σ_s : 屈服极限, 屈服强度
- σ_b : 强度极限, 抗拉强度

以上力学性能指标均对成分、组织敏感

低碳钢，正火、退火、调质态的中碳钢或低、中碳合金钢和有些铝合金及某些高分子材料都具有上图所示的应力-应变行为。即在拉伸应力的作用下的变形过程分为四个阶段：弹性变形、屈服塑性变形、均匀塑性变形、不均匀集中塑性变形。

大多数纯金属(Al, Cu, Au, Ag)

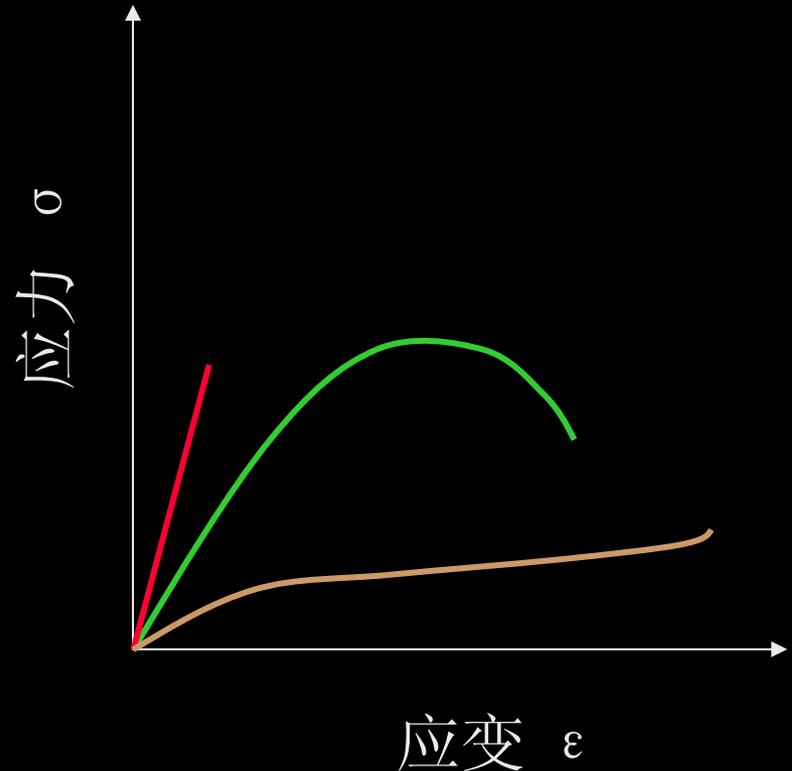
变形分为三个阶段，无屈服塑性变形阶段

脆性材料 (陶瓷、白口铸铁、淬火高碳钢及高碳合金钢)

只有弹性变形阶段

高弹材料 (橡胶)

只有非线性弹性变形一个阶段，且弹性变形能力强，弹性变形率可达100~1000%。



其它类型材料的应力-应变曲线

衡量材料塑性的指标

伸长率 δ 、断面收缩率 ψ

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

L_0 、 A_0 : 拉伸试样的原始标距长度、原始截面积;

L 、 A : 拉伸试样断裂后的标距长度、颈缩处最小截面积

二、过量变形失效

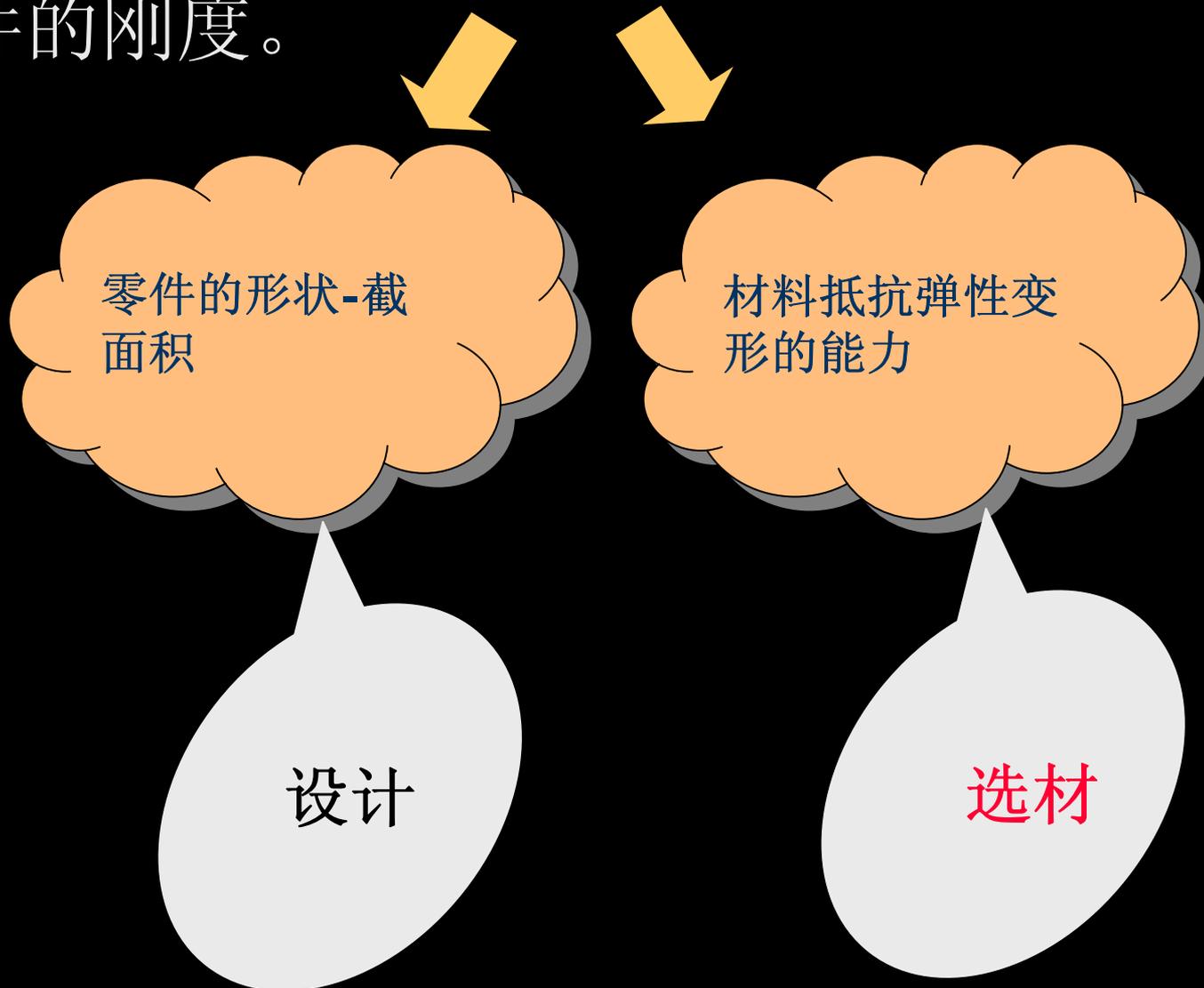
- 过量弹性变形
- 过量塑性变形

（一）过量弹性变形

零件在在一定载荷作用下，只允许一定量的弹性变形，过量弹性变形会造成零件失效。

- 镗床的镗杆的过量弹性变形会降低被加工零件的精度甚至造成废品；
- 齿轮轴的过量弹性变形会影响齿轮的正常啮合，加速磨损，增加噪声；
- 弹簧的过量弹性变形会影响其减振和储能驱动作用。

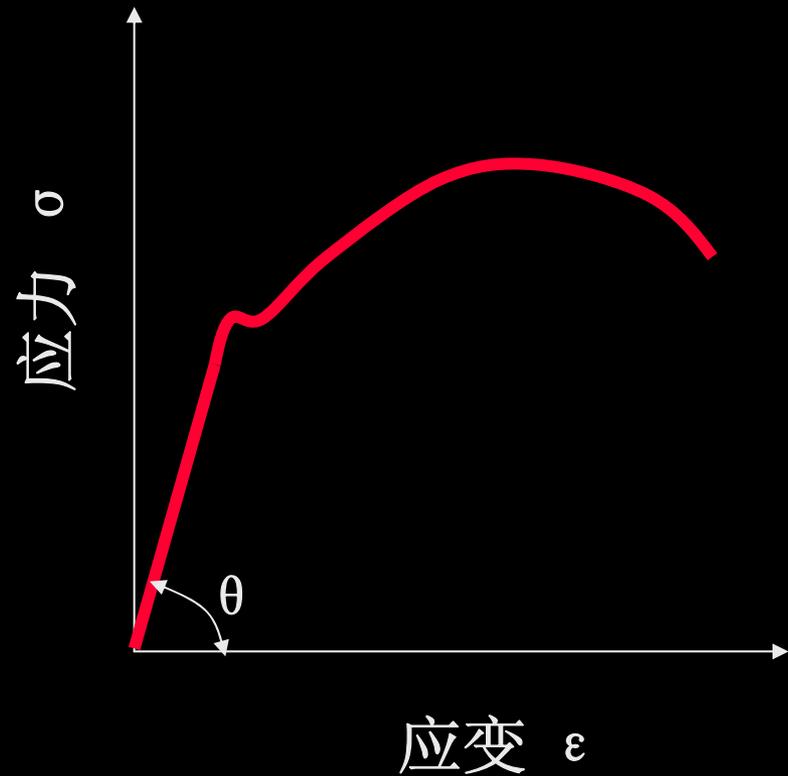
零件在受力时抵抗弹性变形的能力称为零件的刚度。



材料抵抗弹性变形的性能指标

弹性变形阶段， $\sigma - \varepsilon$ 曲线的斜率 $\tan \theta = E$ ，称为材料的拉伸弹性模量，它表示材料抵抗弹性变形的能力。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



当材料受纯剪切时，同样有：

$$\tau = G\gamma$$

G 为切变弹性模量

表1-1 各类材料室温弹性模量

材料	E/GPa	材料	E/GPa
金刚石	1020	Cu	126
硬质合金	460~670	Al	70
SiC	460	混凝土	45~51
W	410	木材（纵向）	9~17
镍合金	130~240	聚酯塑料	1~5
铁及低碳钢	200	有机玻璃	3.4
铸铁	173~194	聚乙烯	0.2~0.7
低合金钢	204~210	橡胶	0.01~0.1

影响弹性模量的因素

- 材料的原子本性和原子间结合力决定 E/G ；材料熔点高低反映了原子间结合力的强弱，也反映了 E/G 的大小
- $T \uparrow \rightarrow$ 原子间结合力 $\downarrow \rightarrow E/G \downarrow$ ；
- 金属材料的 E/G 对成分、组织不敏感；
- 陶瓷、高分子、复合材料的 E/G 对成分、组织敏感。

(二) 过量塑性变形

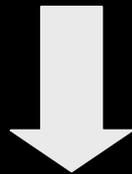
多数零件在使用过程中都处于弹性变形状态，不允许产生塑性变形。

零件设计准则

$$\sigma < [\sigma]$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{k}$$

多数工程材料为弹塑性材料，弹性变形和塑性变形间无明显的分界点。



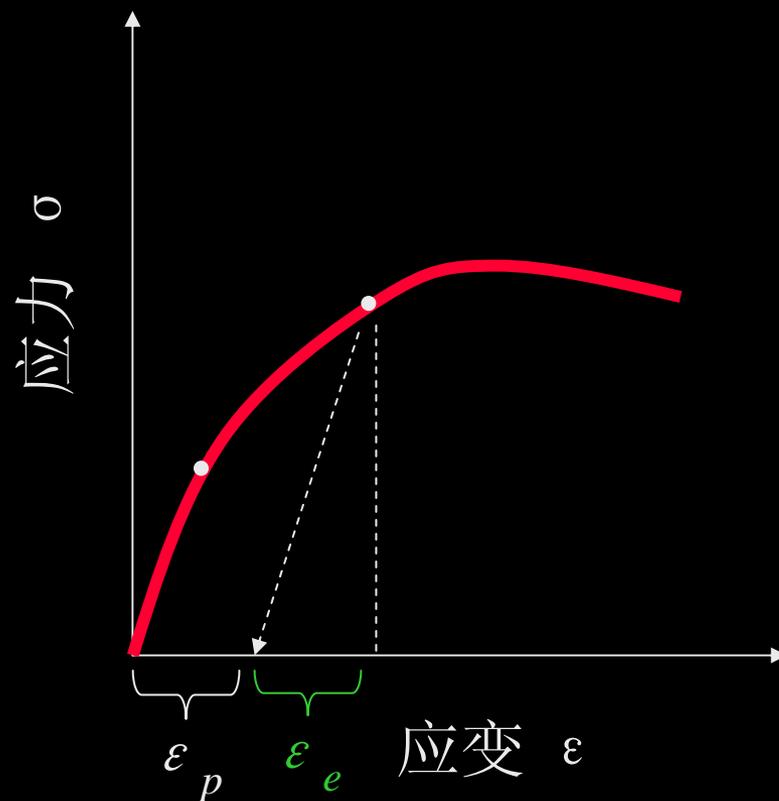
- 条件比例极限
- 条件弹性极限
- 条件屈服极限

• σ_p : $\varepsilon_p=0.001\sim 0.01\%$

• σ_e : $\varepsilon_p=0.005\sim 0.05\%$

• σ_s : $\varepsilon_p=0.01\sim 0.5\%$

ε_p 塑性应变变量



材料抵抗塑性变形的抗力指标

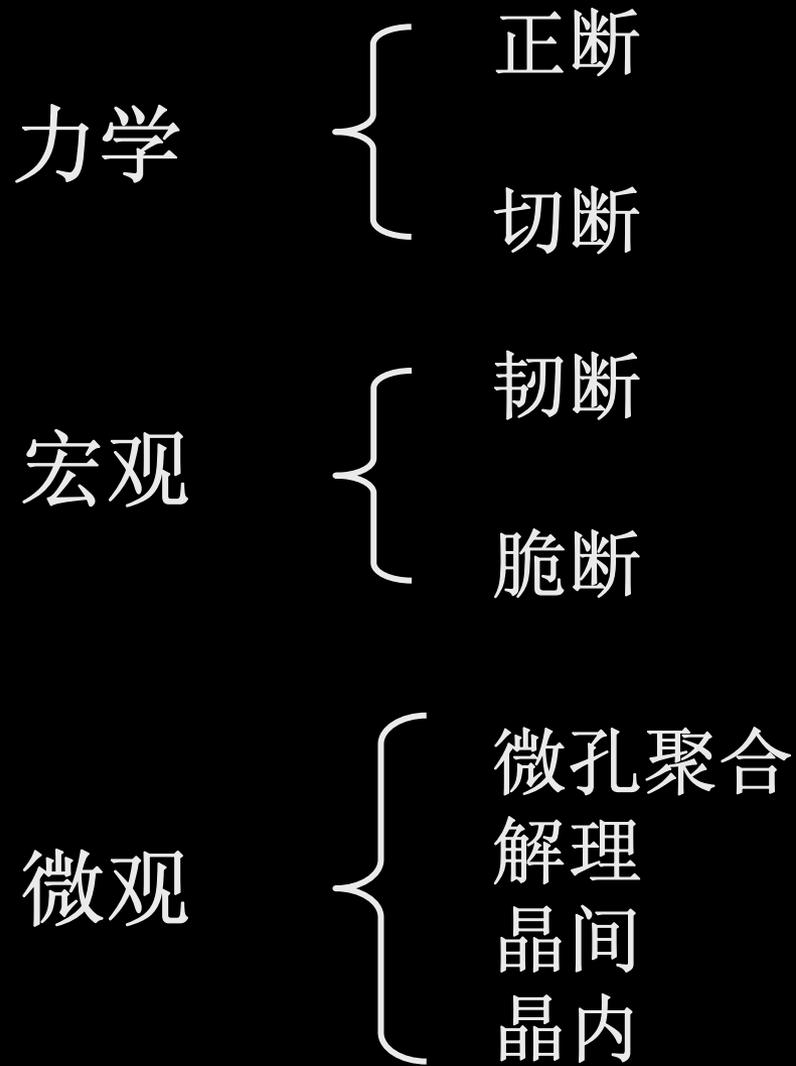
- 比例极限
- 弹性极限
- 屈服极限

第二节 零件在静载和冲击载荷下的断裂



一、基本概念

- 静载荷和冲击载荷
- 断裂：材料在外力作用下分为两个或者两个以上部分的现象。
- 断裂的分类



綦江彩虹桥垮塌案

- “虹桥”系綦江县形象工程，形似彩虹而得名，该桥跨越长江支流—綦河，连接城东城西，于1994年11月5日动工建设，1996年2月16日竣工，桥净空跨度120米，耗资368万元。
- 1999年1月4日晚6时50分左右，彩虹桥整体垮塌，包括18名年轻武警战士在内的40人遇难。
- 调查组认为，这次垮塌事件由两方面的原因造成。一是工程质量问题；二是工程承发包不合法。调查结果表明，这次惨剧不是天灾，而是人祸。其根本原因，是由于政府在工程开发建设上没有遵循法律，履行必要的审核、论证程序，采取了“特事特办”的方式，盲目追求效率营造“献礼工程”，从而酿成大祸。

1999年3、4月，重庆第一中级人民法院对“綦江彩虹桥垮塌案”14名责任被告人进行一审宣判。其中10人不服，并上诉。同年12月，重庆市高院作出终审判决。

林世元 男，原綦江县委员会副书记，因受贿罪、玩忽职守罪，被高级人民法院终审判处死刑，缓期2年执行。

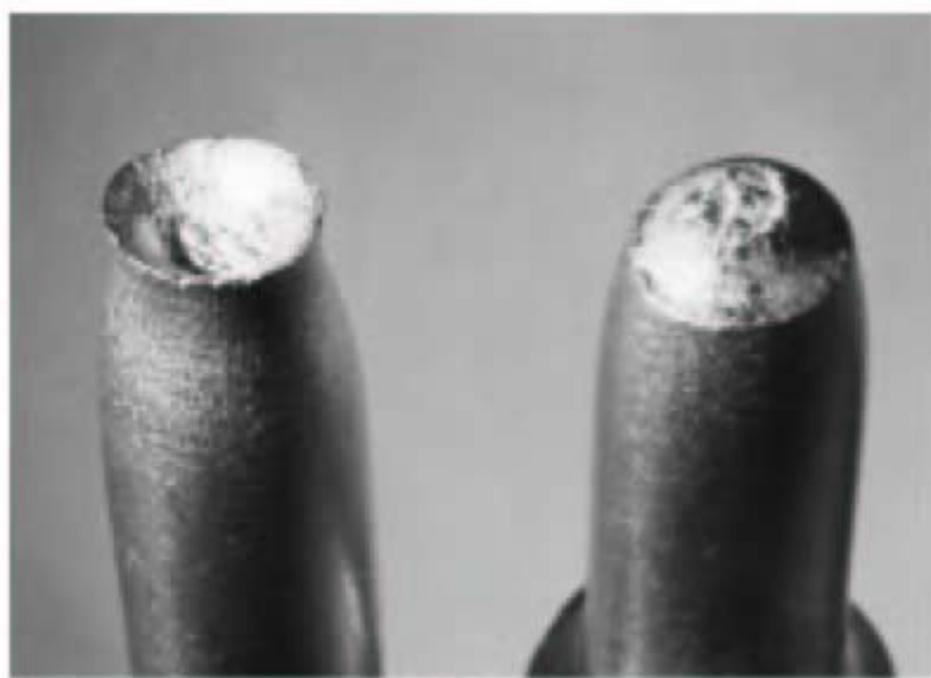
张基碧 男，原綦江县城建设管理委员会主任，因玩忽职守罪，被判处有期徒刑6年。

赵祥忠 男，原重庆市市政工程质量监督站站长，因工程重大安全事故罪，被判处有期徒刑5年，并处罚金2万元。

贺际慎 女，原綦江县人大常委会副主任，因玩忽职守罪，被判处有期徒刑3年。

费上利 男，“虹桥”工程组织承建者，因工程重大安全事故罪，被判处有期徒刑10年，并处罚金50万元。

此外，李蒙泽、孙立、段浩、夏福利、阎珂、刘泽均、胡开明、王远凯等人，及重庆通用工业技术服务部，因重大工程重大安全事故罪、玩忽职守罪、生产销售不符合安全标准的产品罪等罪名，被判处6年至10年的有期徒刑，并处罚金。

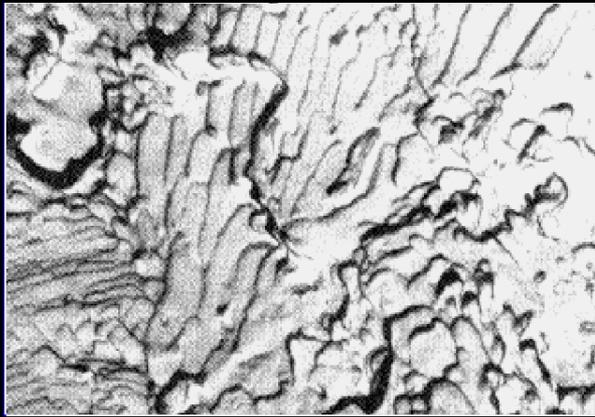


(a)

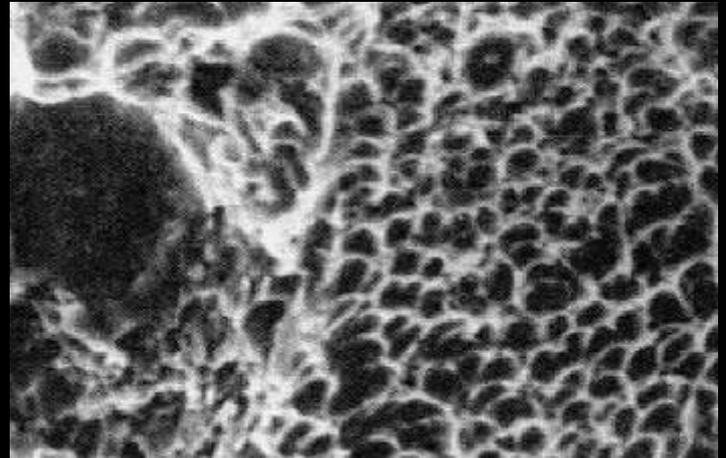


(b)

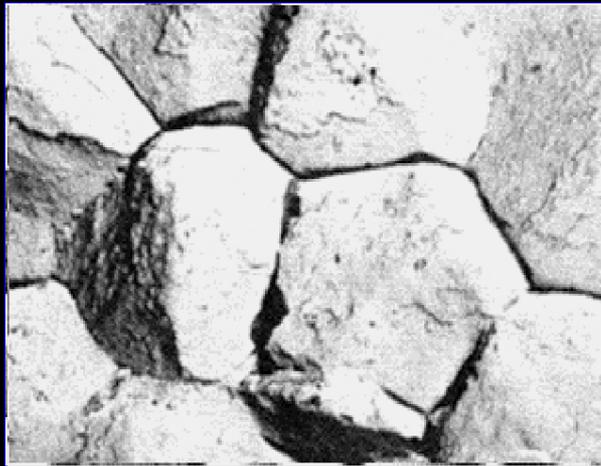
FIGURE 9.3 (a) Cup-and-cone fracture in aluminum. (b) Brittle fracture in a mild steel.



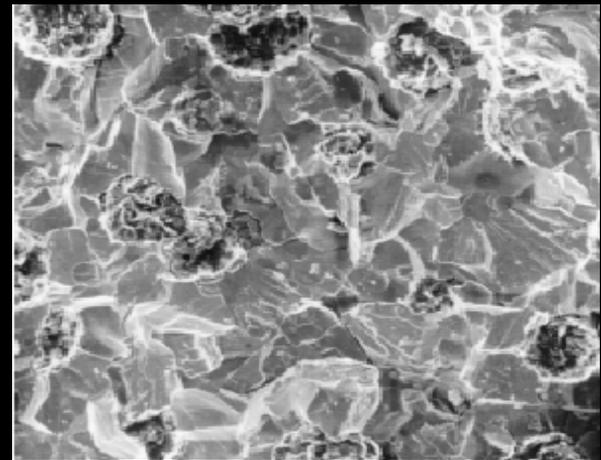
解理型断口



微孔聚合型断口



晶间断裂



晶内断裂

断裂过程

- 裂纹形成（萌生）阶段
- 裂纹扩展阶段

裂纹萌生：材料在外力作用下，形成微裂纹或以内部缺陷作为裂纹源。

裂纹扩展：微裂纹或裂纹源逐渐扩展至一临界尺寸时，立即发生断裂。前者称裂纹亚稳扩展阶段，后者称裂纹失稳扩展阶段。

裂纹亚稳扩展时，裂纹扩展阻力大， da/dt 较小；

裂纹失稳扩展时，裂纹扩展阻力小， da/dt 大，最大可达该材料的声速。

- 韧断时，裂纹的亚稳扩展阶段较长，裂纹的扩展与塑性变形同时进行，故有明显的塑性变形，断裂慢。
- 脆断时，几乎没有亚稳扩展阶段，故无明显塑性变形，断裂快。

韧性

材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力，是材料强度和塑性的综合表现。

- 韧性越好，脆断倾向越小；
- 力学性能指标：

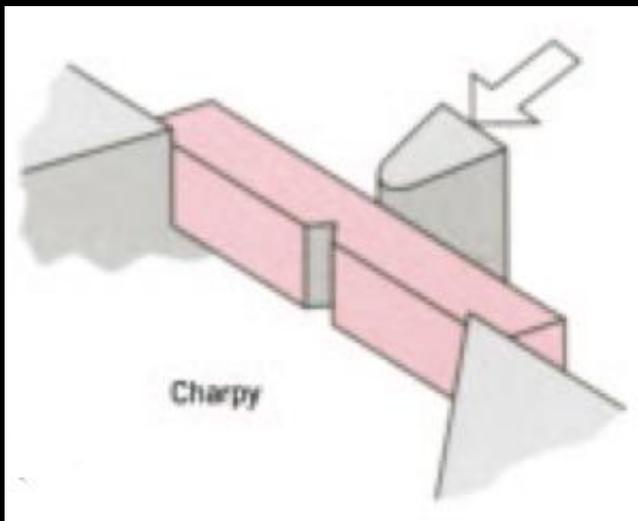
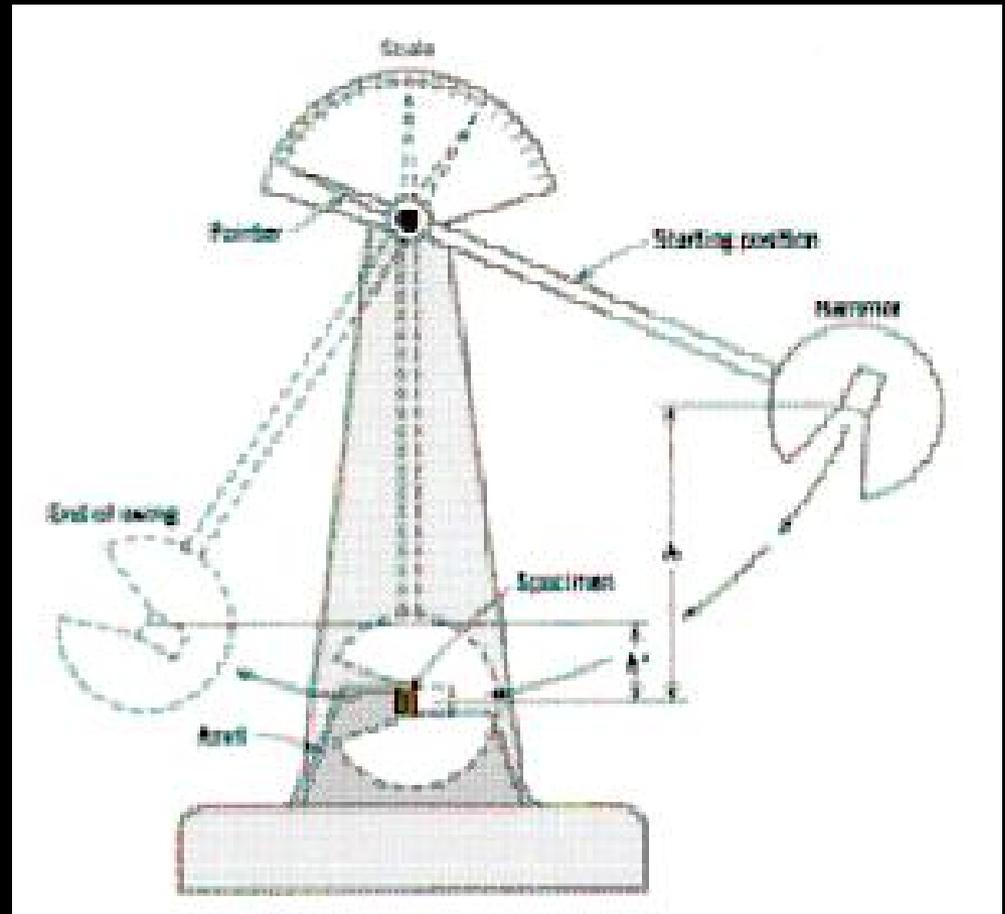
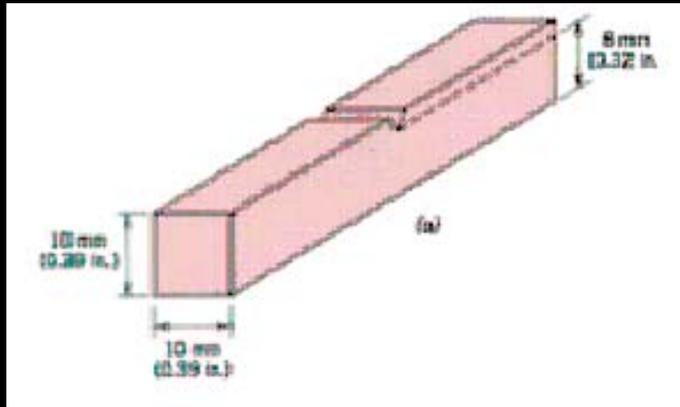
冲击韧性

断裂韧性

二、冲击韧性

材料在冲击载荷下吸收塑性变形功和断裂功的能力。是材料强度和塑性的综合表现。

衡量指标：冲击吸收功 A_k
冲击韧度 $a_k (a_k = A_k/F_k)$



$$A_k = mg(h - h')$$

冲击韧性的应用

工程中常将材料的屈服强度与冲击韧性结合在一起用于零件及结构的设计。

焊接结构设计中，除了强度的要求外，规定焊接接头冲击吸收功

$$A_k > 27\text{J}$$

-59°C

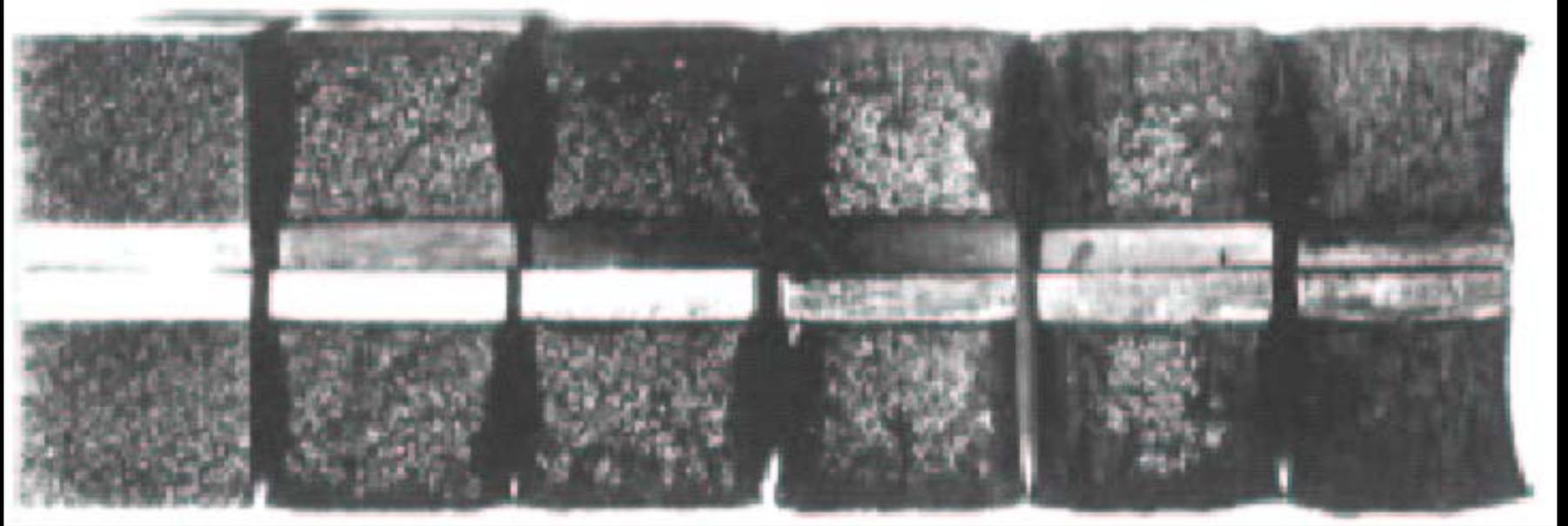
-12°C

4°C

16°C

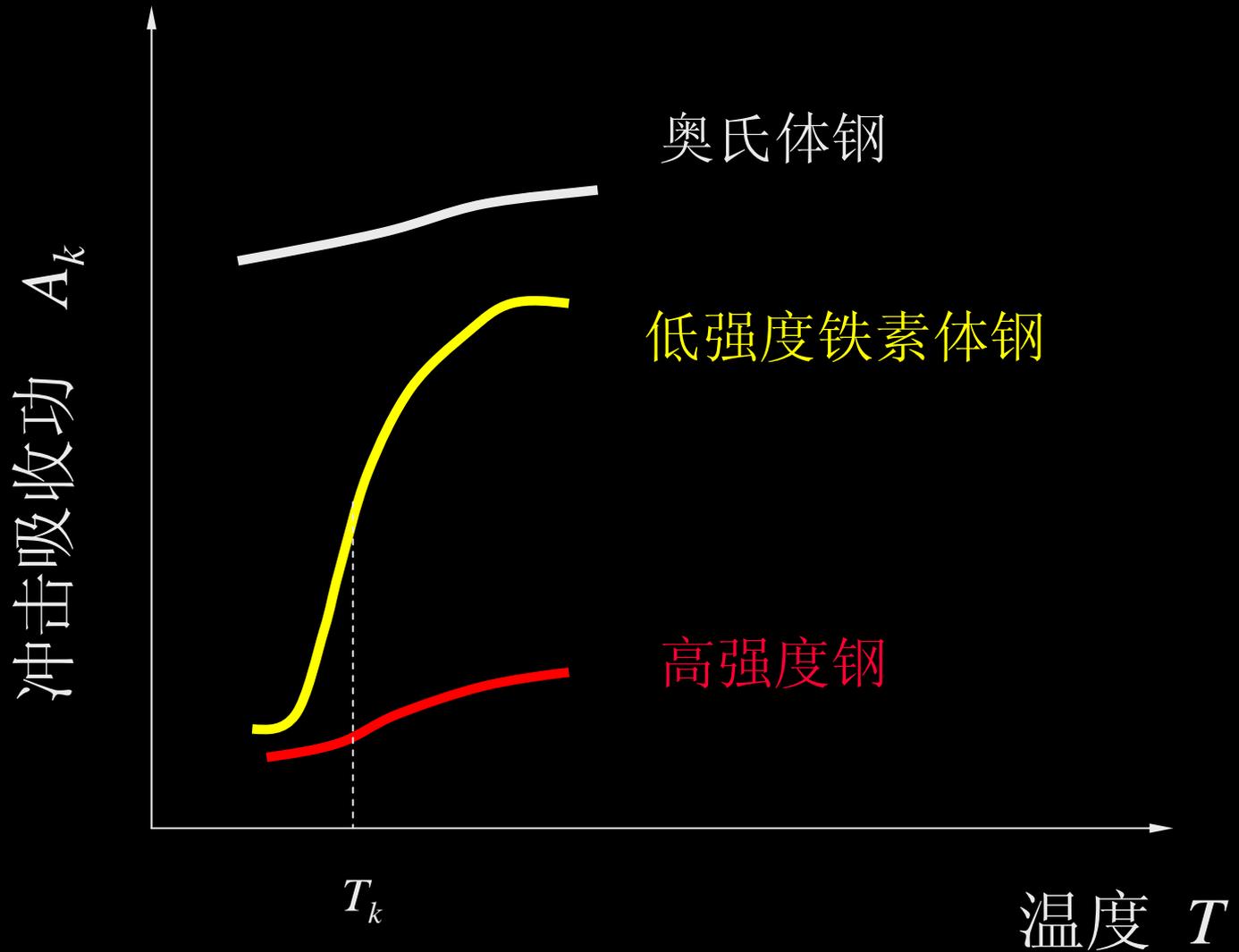
24°C

79°C



低强度铁素体钢冲击断口照片

系列冲击试验



温度对材料的韧性影响很大，材料由韧性状态转变为脆性状态的温度称为韧脆转变温度， T_k 。

A_k 越高， T_k 越低，则材料的韧性越好。

A_k 是对材料的成分和组织敏感的力学性能指标。 γ 钢韧性最高，无明显的 T_k ，低温韧性好；低强度铁素体钢韧性次之，有明显的 T_k ，低温韧性差；高强度M钢韧性最差，即使室温韧性好很低。

三、断裂韧性

传统的零件及结构设计是基于“材料是一个连续均质的整体”假设之上的，为防止脆性断裂，除强度要求之外，还加上了材料的塑性和韧性指标。

五大力学
性能指标

强度 σ_b, σ_s

塑性 δ, ψ

韧性 A_k/a_k

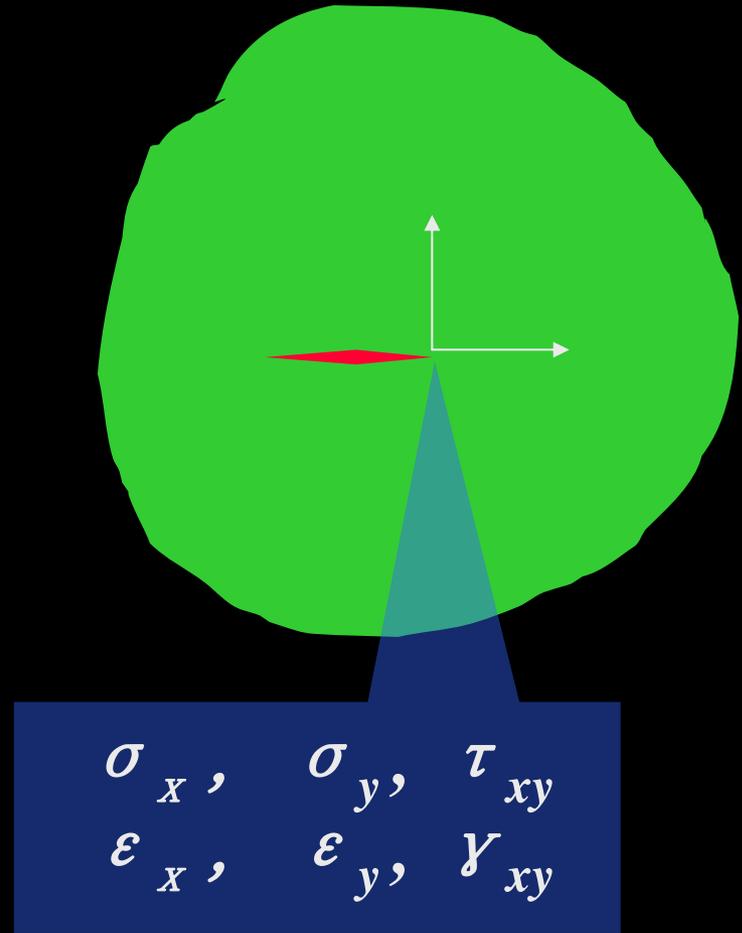
实际材料中是存在微裂纹及各种冶金缺陷的，而其中裂纹是最危险的一类缺陷，因此有必要研究带裂纹体的问题。

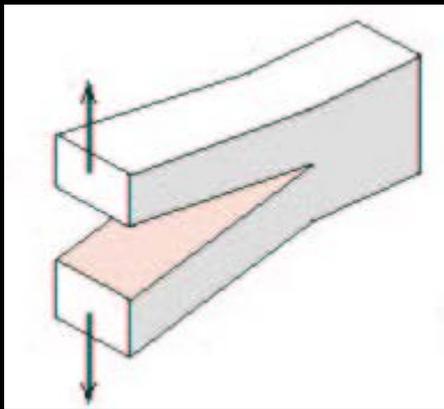


断裂力学

应力强度因子

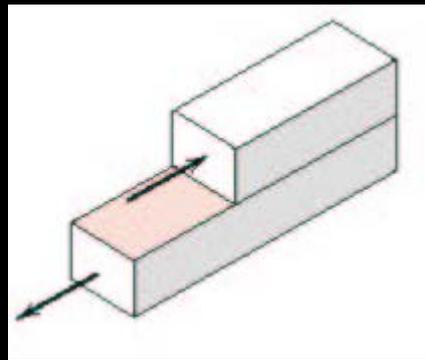
断裂力学研究表明：裂纹尖端的应力应变场可用物理量 K 来表征。





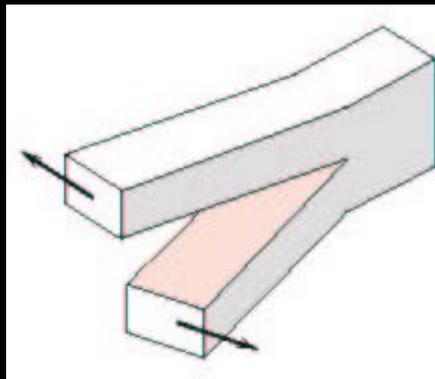
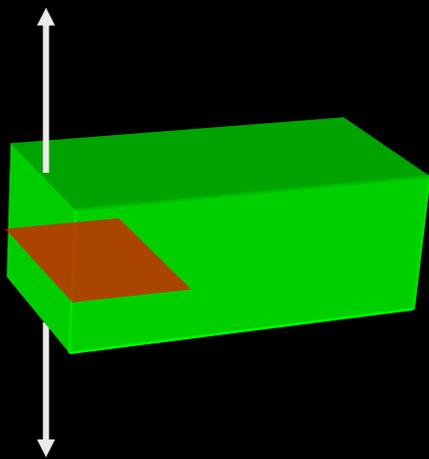
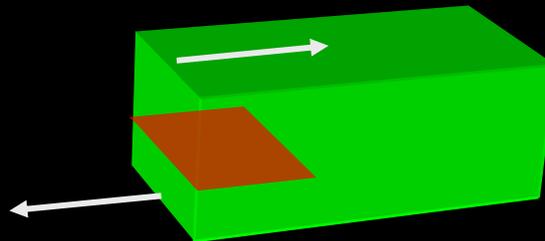
张开型裂纹

I型



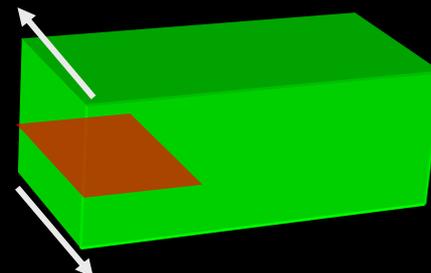
滑移型裂纹

II型



撕裂型裂纹

III型

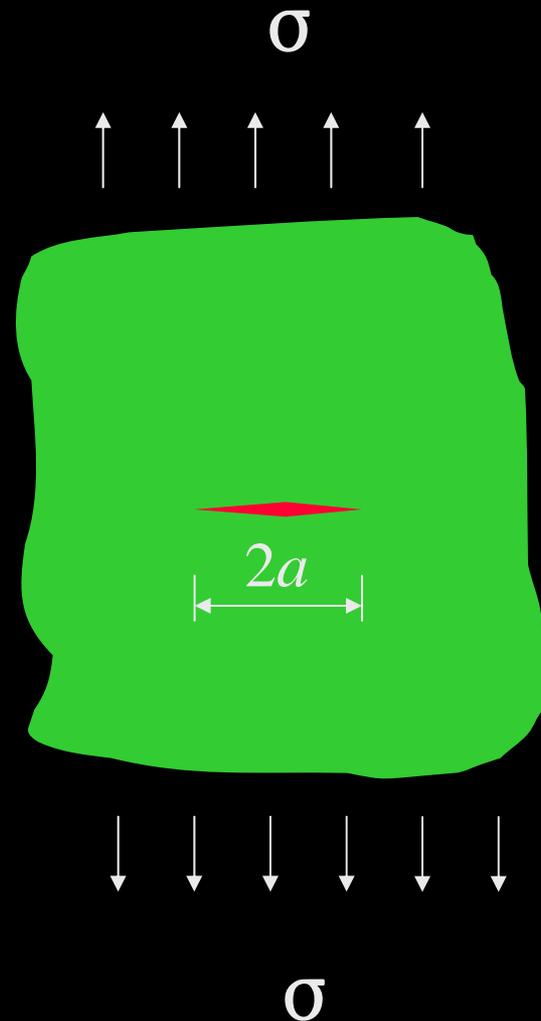


$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

Y : 几何形状因子,
 $Y=1\sim 2$;

σ : 工作应力;

a : 裂纹半长度。



研究表明：当 K_I 较小时，裂纹不会扩展，零件是安全的；当 K_I 达到一个临界值时，裂纹才会扩展，这个临界值 K_{IC} 是材料的性质。

断裂韧度

断裂韧度 K_{IC} ： 是评定材料抵抗脆性断裂的力学性能指标，指的是材料抵抗裂纹失稳扩展的能力。

单位： $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 或者 $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$

断裂判据

$K_I < K_{IC}$	构件安全
$K_I > K_{IC}$	构件发生脆性断裂
$K_I = K_{IC}$	构件发生低应力脆性断裂的临界条件

应用

- ① 已知应力，材料，确定结构安全的最大裂纹长度

$$a_c = \left(\frac{K_{IC}}{Y \sigma} \right)^2$$

- ② 已知裂纹长度，材料，确定结构安全的最大应力

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y \sqrt{a}}$$

③ 已知应力，裂纹长度，确定结构安全的材料

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} < K_{IC}$$

断裂韧度是用高强度钢制造的飞机、导弹和火箭的零件，及用中低强度钢制造气轮机转子、大型发电机转子等大型零件的重要性能指标。

四、影响脆性断裂的因素

- 加载方式
- 材料本质
- 温度和加载速度
- 应力集中
- 零件尺寸

(一) 加载方式和材料本质

材料力学知识

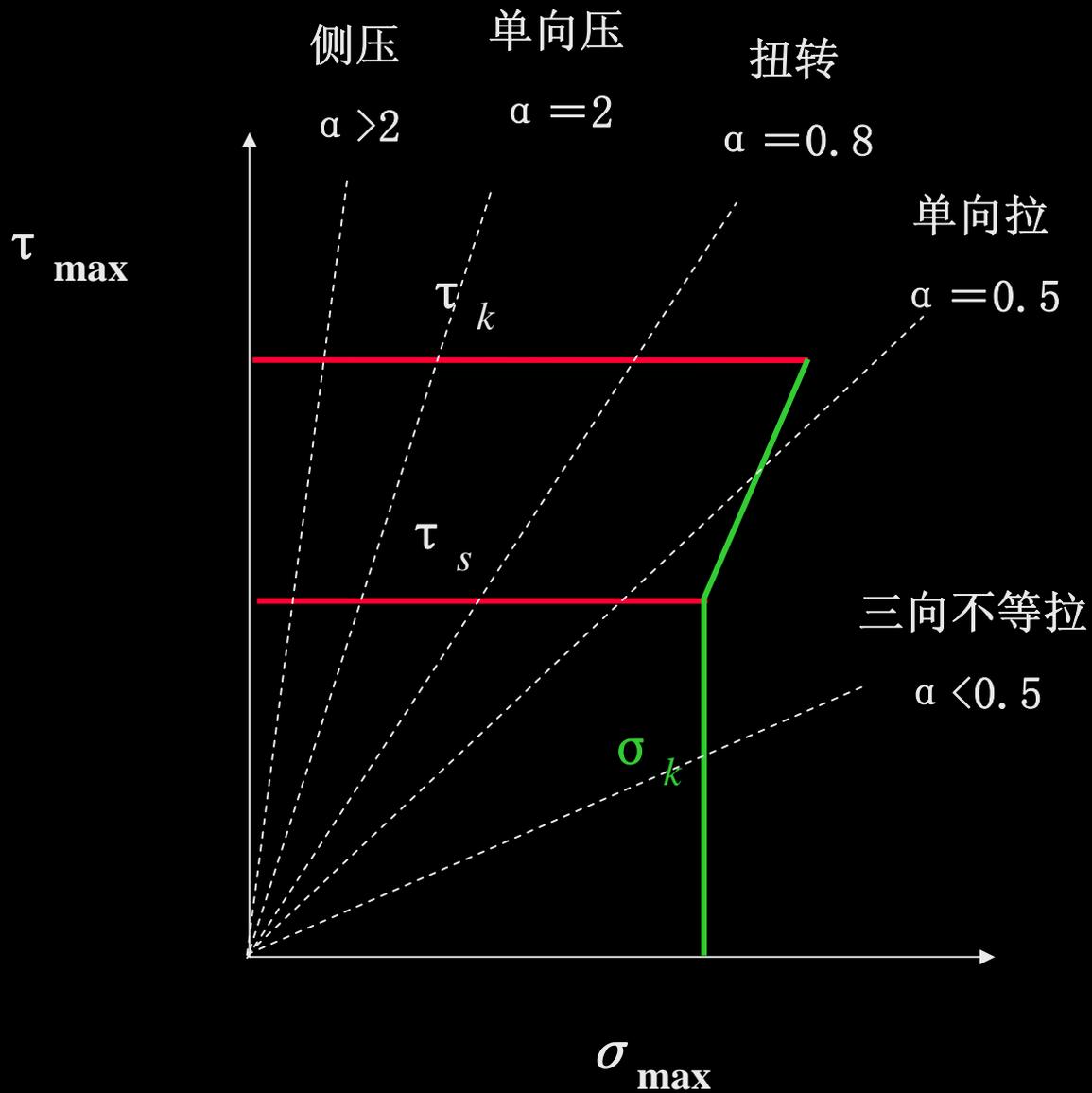
零件受外力作用时，其内部各点的应力状态可用三个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 来 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) 来表示。

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)$$

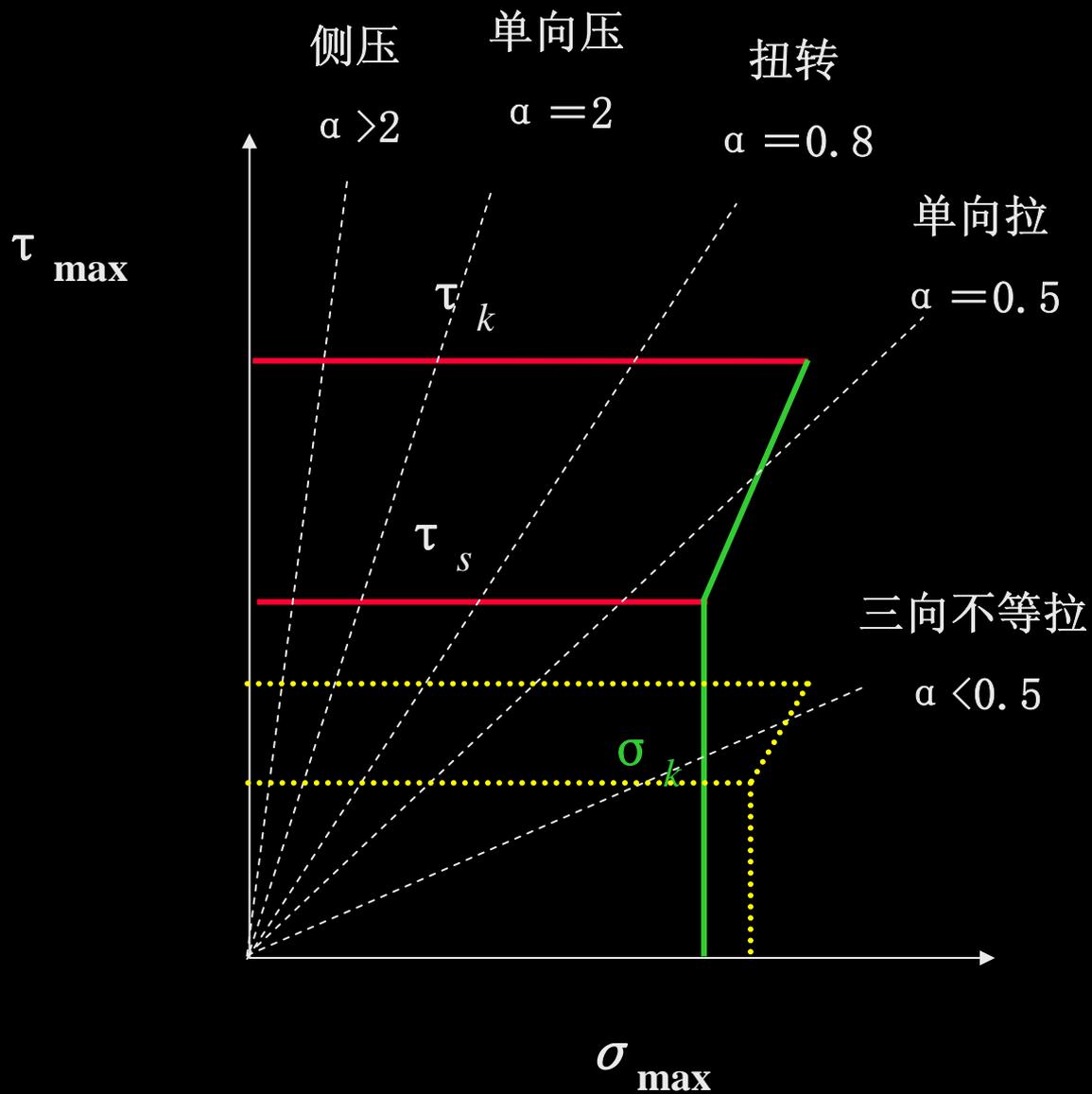
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}}$$

α ：应力状态软性系数，零件加载方式由 α 表示。

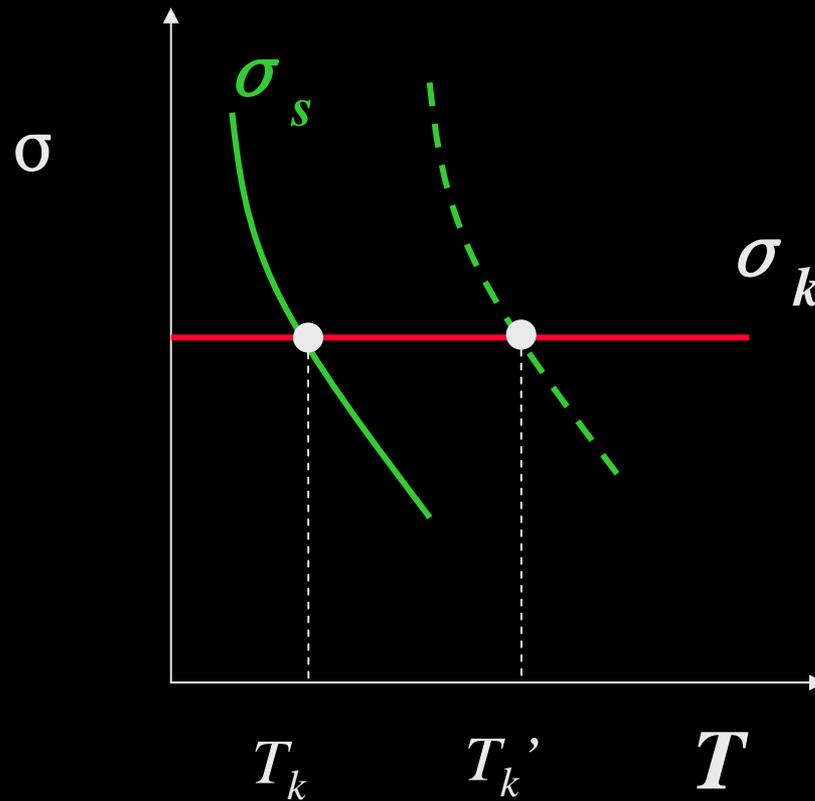


加载方式不同，断裂方式不同



加载方式相同，材料本质不同，断裂方式不同

(二) 温度和加载速度



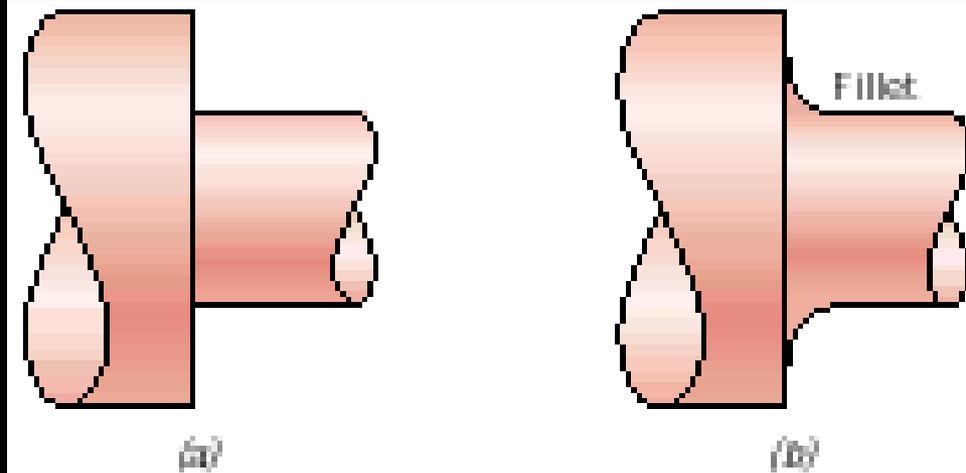
(三) 应力集中

应力集中改变了应力状态，

$$\sigma_{\max} \uparrow, \tau_{\max} \downarrow, \alpha \downarrow。$$

单向拉伸 $\alpha = 0.5$ ，而缺口拉伸试样 $\alpha < 0.5$ ，易引起脆断。

因此，应力集中会引起材料脆化。



(a)

(b)

FIGURE 9.37 Demonstration of how design can reduce stress amplification. (a) Poor design: sharp corner. (b) Good design: fatigue lifetime improved by incorporating rounded fillet into a rotating shaft at the point where there is a change in diameter.

（四）零件尺寸

- 薄板处于平面应力状态， α 较大；
- 厚板处于平面应变状态， α 较小，易产生脆断。

第三节 零件在交变载荷下的疲劳断裂

- 基本概念
- 断口特征
- 抗力指标

一、基本概念

交变载荷：载荷大小和方向随时间发生周期变化的载荷。

疲劳断裂：零件在交变载荷下经过长时间工作而发生断裂的现象成为疲劳断裂。

最大应力 σ_{\max}

最小应力 σ_{\min}

幅应力 σ_a

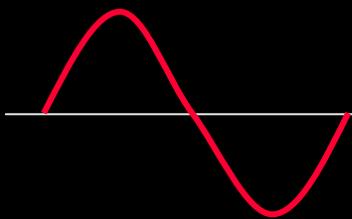
平均应力 σ_m

应力比 r

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$$

$$\sigma_m = 0$$

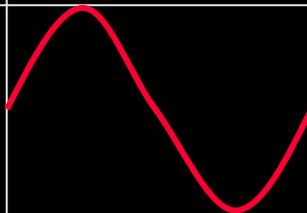
火车轴（弯曲）
曲轴（扭转）



$$r = \frac{0}{\sigma_{\max}} = 0$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

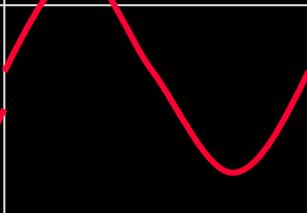
齿轮齿根
（弯曲）



$$r = \frac{\sigma_{\min}}{0} = -\infty$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min}}{2} < 0$$

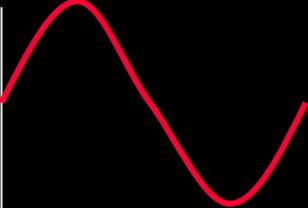
球轴承
（压缩）



$$r < 0$$

$$\sigma_m < 0$$

连杆
（小拉大压）



$$0 < r < 1$$

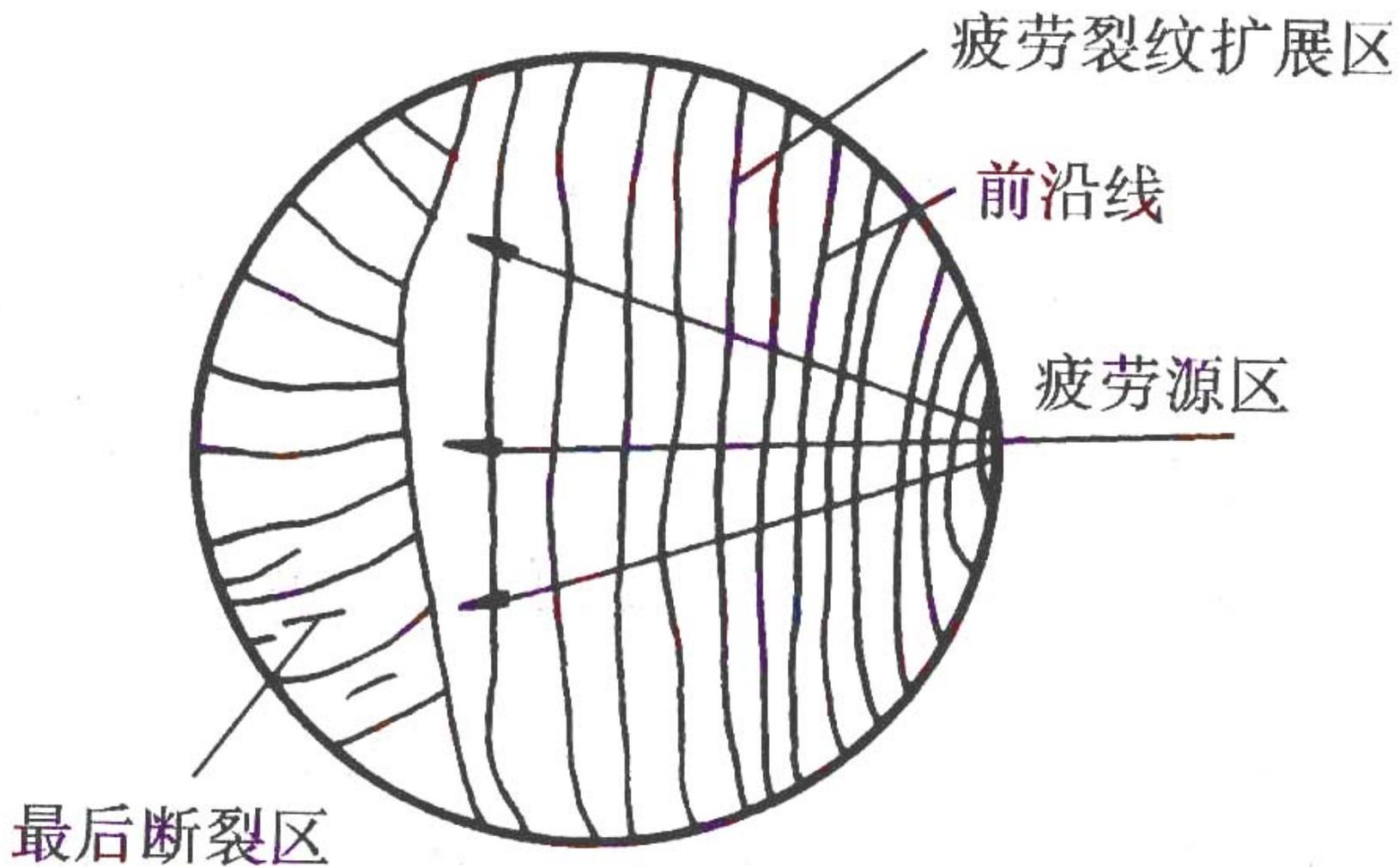
$$\sigma_m > 0$$

缸盖螺钉
（大拉小拉）

疲劳断裂的特点

- 应力很低，常小于静载屈服强度；
- 断裂时无明显宏观塑性变形，脆断；
- 断口显示出裂纹形成、扩展和最后断裂三个阶段。

二、疲劳断口的特征



疲劳源区

零件所用材料的内部缺陷、加工缺陷、设计欠缺等引起局部应力集中，这些局部区域成为裂纹的产生地，即疲劳裂纹源区。

疲劳裂纹扩展区

疲劳裂纹形成后，在交变应力的作用下，裂纹口不断张开和闭合，裂纹表面相互摩擦，裂纹向前扩展的同时留下一条条光亮的弧线，称疲劳线。

疲劳线呈“贝壳状”或“海滩状”，这是疲劳断裂的重要特征。

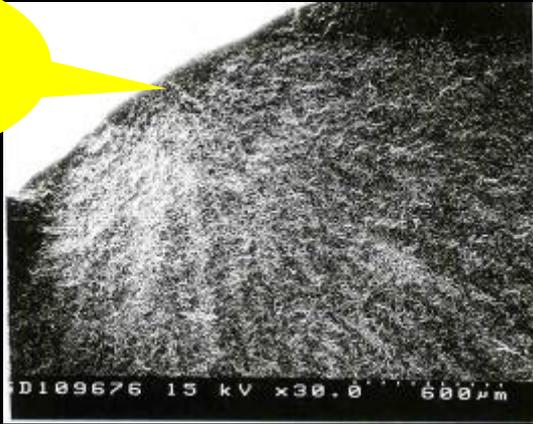
最后断裂区

随着裂纹的扩展，有效承载面积减小，应力增加，当应力超过材料的断裂强度时，即发生快速断裂。

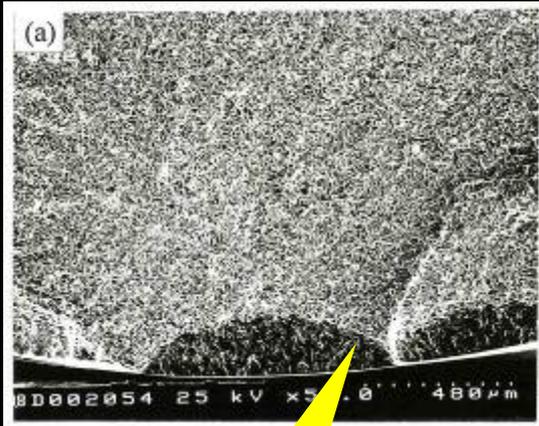
此区同静载脆断断口，呈放射状。

疲劳源区和疲劳裂纹扩展区的微观形貌

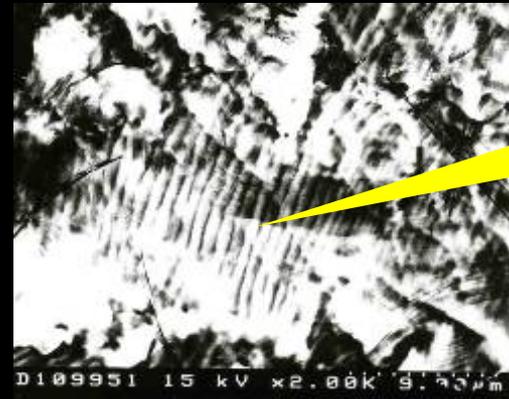
一个疲劳源



疲劳源区

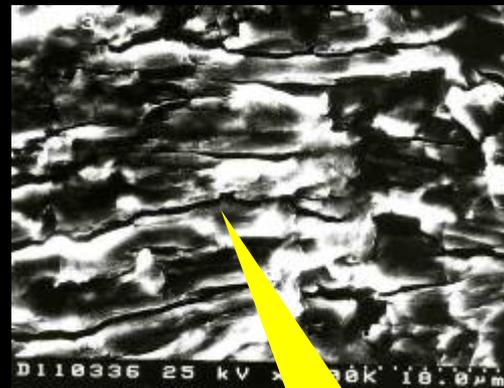


两个疲劳源



疲劳条纹

疲劳裂纹扩展区



微裂纹

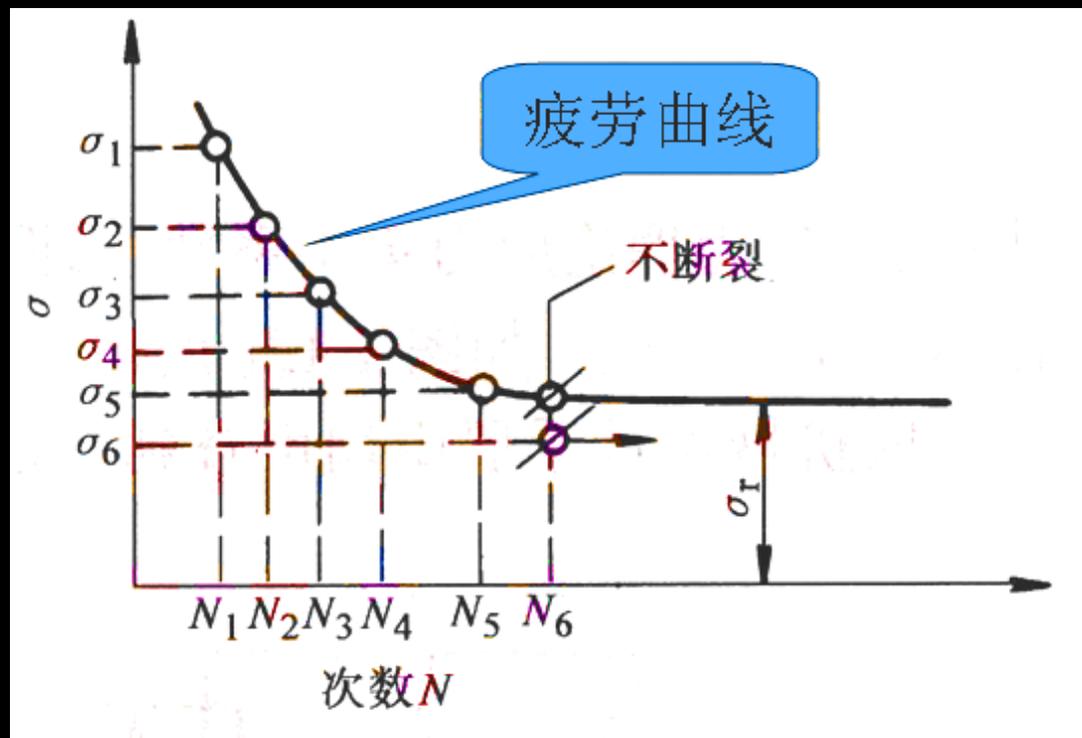
三、疲劳抗力指标及其影响因素

- 无裂纹零件的疲劳抗力指标
疲劳极限、过载持久值、缺口敏感度
- 带裂纹零件的疲劳抗力指标
疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th}
- 影响疲劳裂纹抗力的因素
载荷类型、材料本质、表面状态、温度、介质

(一) 无裂纹零（构）件的疲劳抗力指标

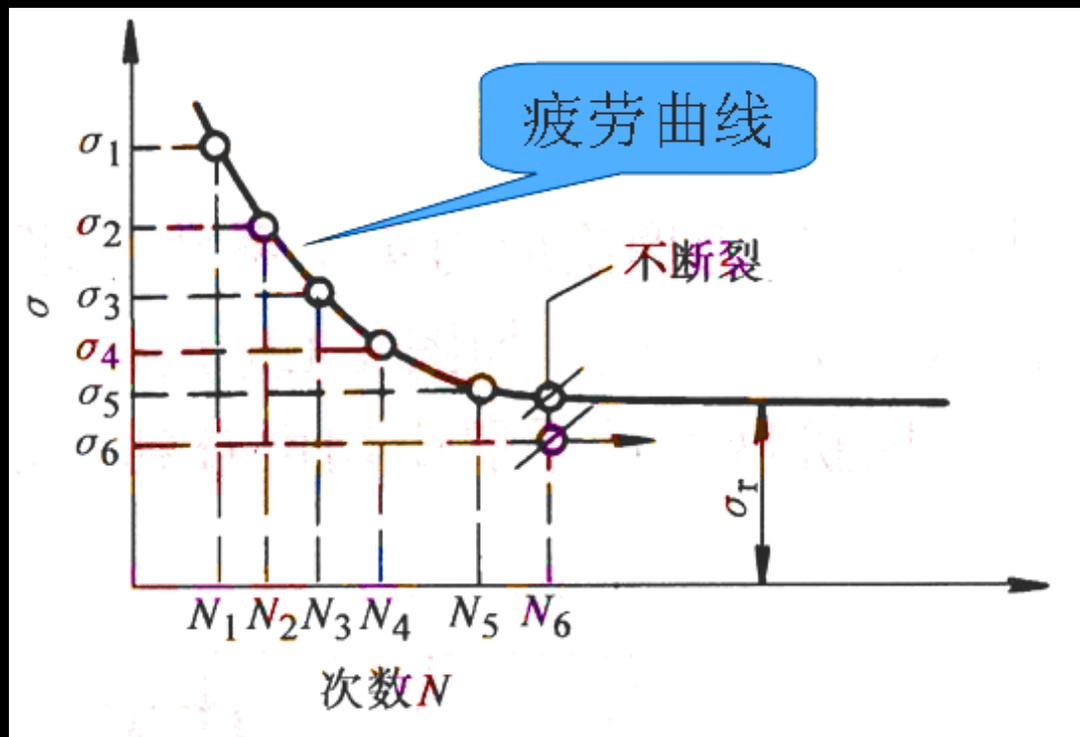
疲劳极限

材料经过无限次应力循环不发生断裂的最大应力。对应于疲劳曲线上水平部分对应的应力值。



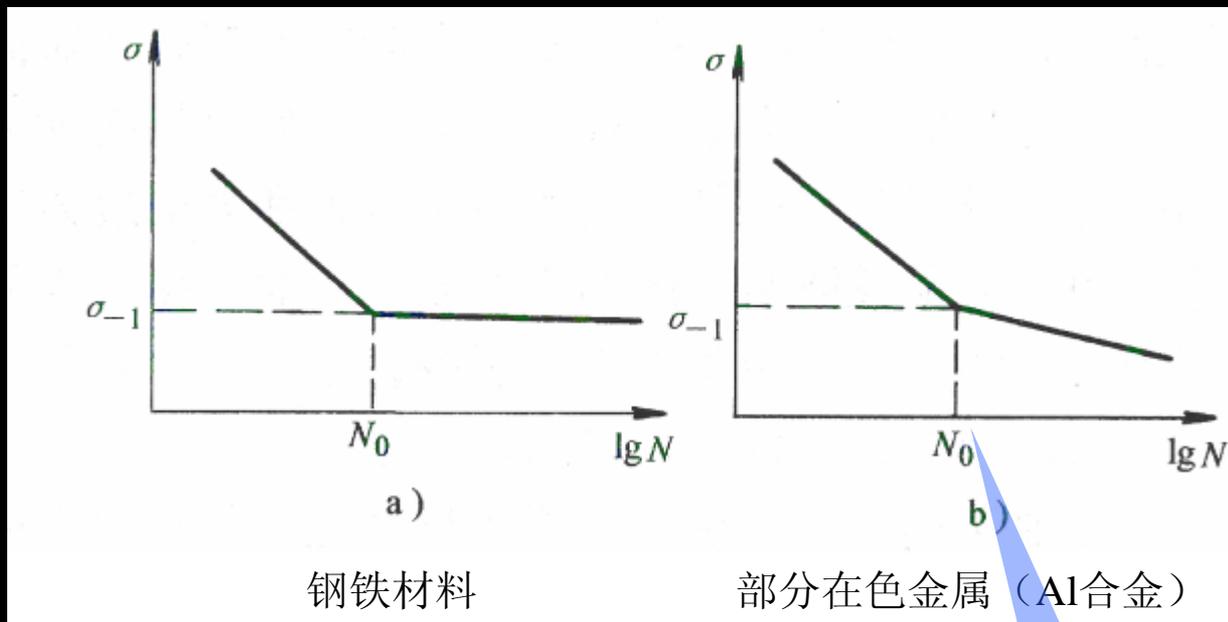
过载持久值

材料在高于疲劳极限的应力作用下发生疲劳断裂的循环周次。



N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 均为疲劳过载持久值。

试验测定材料疲劳极限常用旋转弯曲疲劳试验， $r=-1$ ，结果用 σ_{-1} 表示。



条件疲劳极限

应用

- 多数零件按疲劳极限进行设计；
- 有些零件承受的交变应力远高于疲劳极限，用过载持久值进行设计。
- 低周疲劳 $N < 10^5$ ；
- 高周疲劳 $N > 10^5$ 。

疲劳缺口敏感度

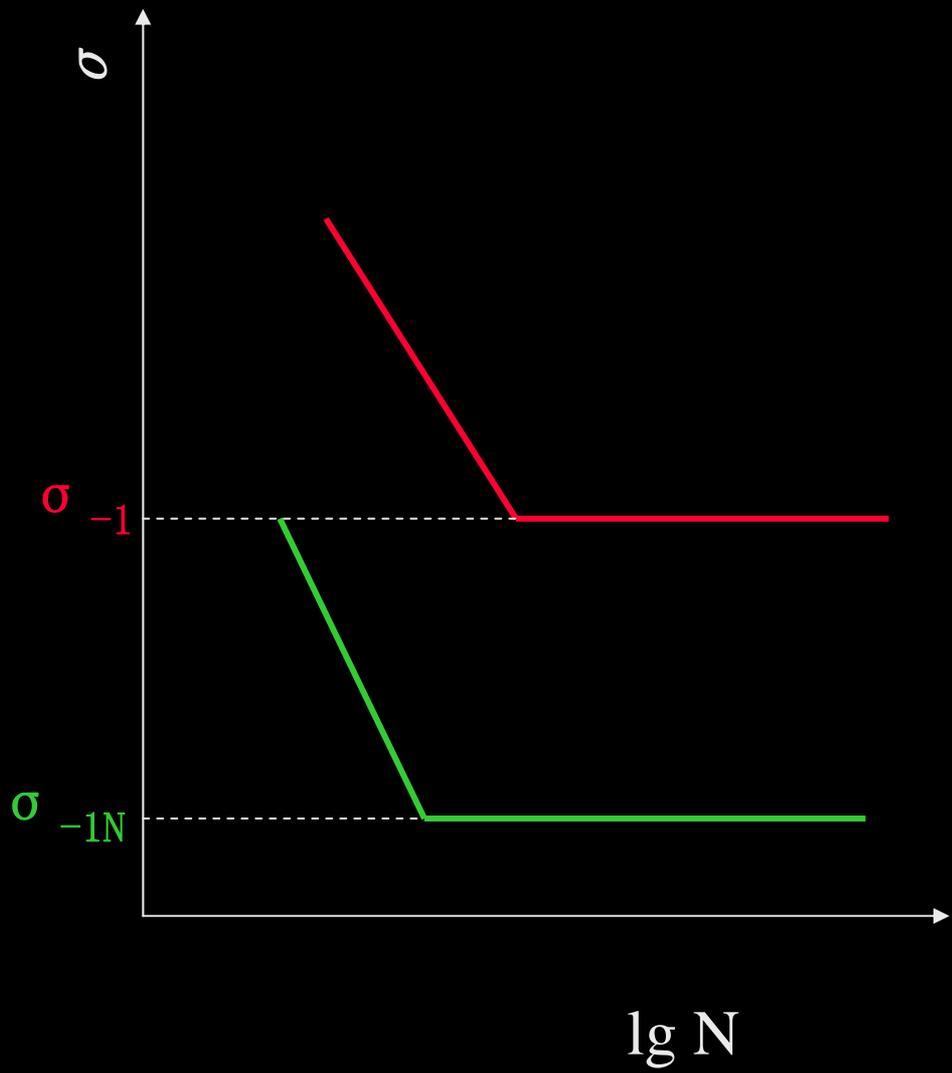
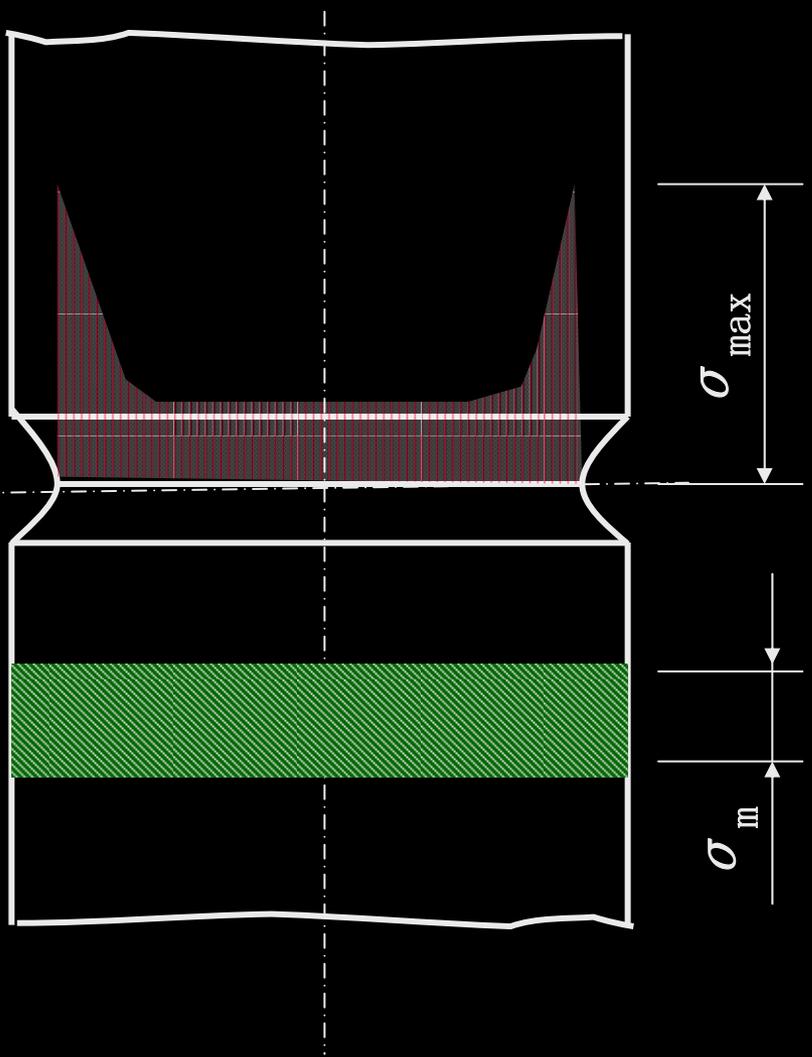
常用 q 来衡量
缺口对疲劳极
限的影响

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

其中， K_t 为理论应力集中系数，与零件的几何形状有关，与材料无关，可从手册中查到；

K_f 为有效应力集中系数，即光滑试样和缺口试样疲劳极限之比，与零件几何形状及材料有关。

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} ; \quad K_f = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1N}}$$



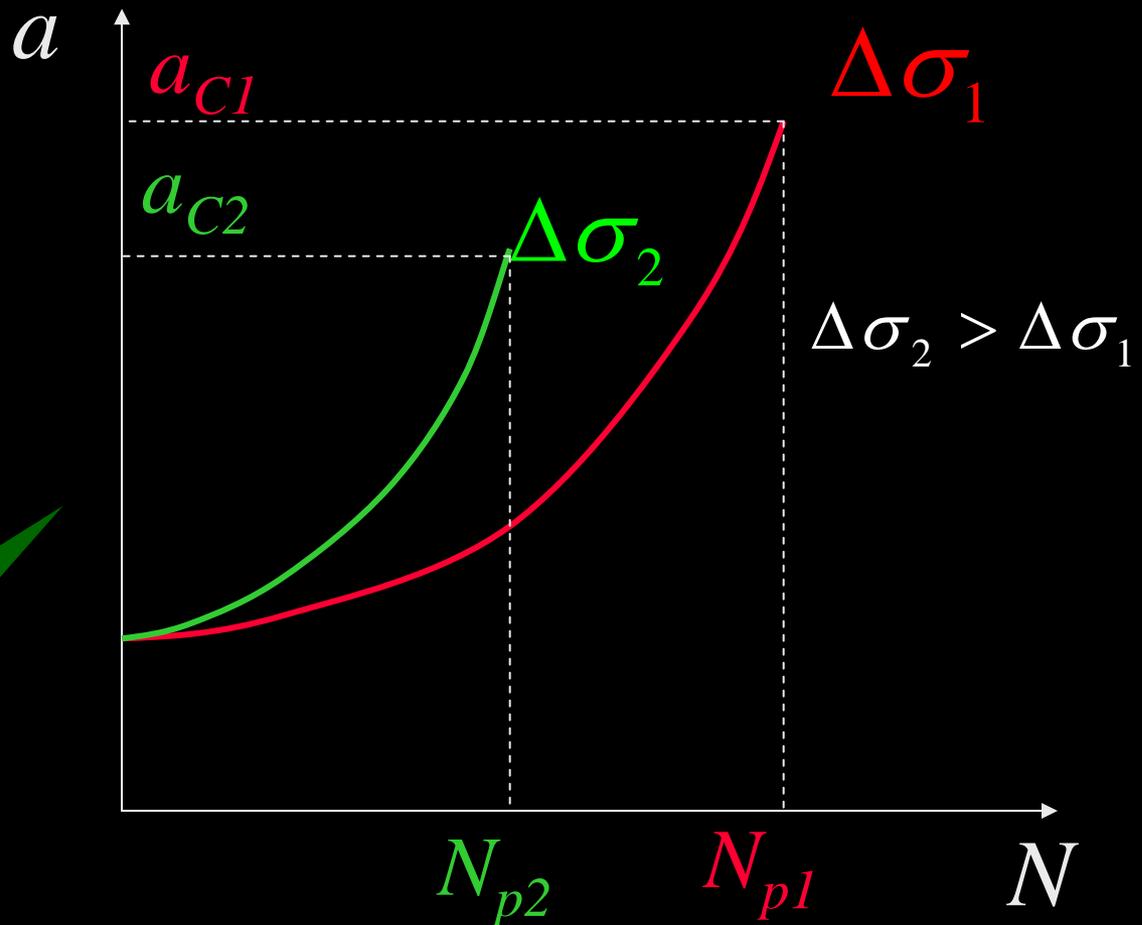
- $0 < q < 1$;
- $K_f \rightarrow 1$, $\sigma_{-1N} \rightarrow \sigma_{-1}$, 即缺口不降低疲劳极限, 对缺口不敏感, 此时 $q = 0$;
- $K_t = K_f$ 时, $q = 1$, 缺口严重降低疲劳极限;
- q 越小越好。

(二) 带裂纹零构件的疲劳抗力指标

在固定应力比和应力幅时，可测得 $a-N$ 曲线，裂纹扩展速率 da/dN 随 a 增加而增大；

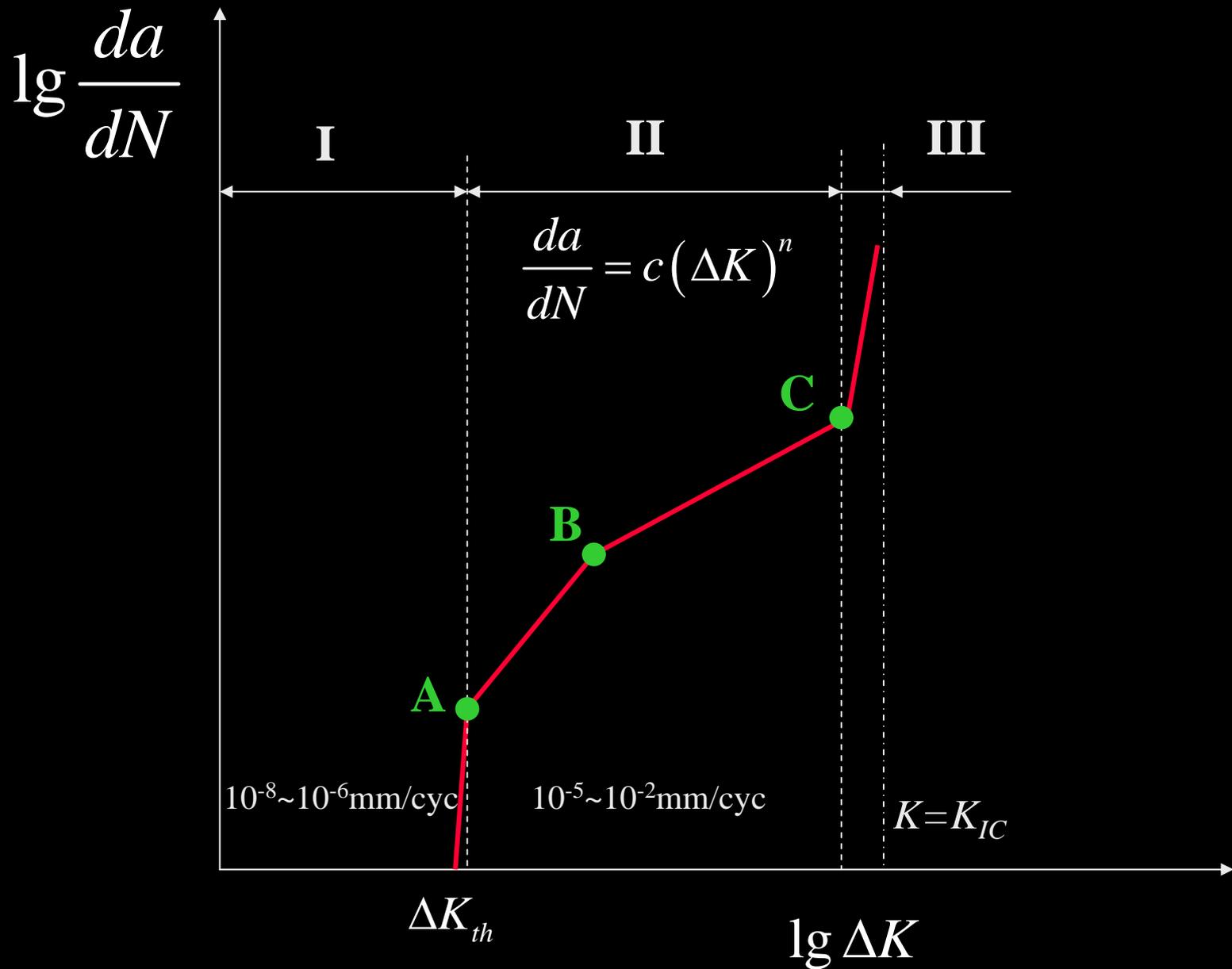
增加应力幅，在相同循环次数下， da/dN 增大；

da/dN 与
 a 、 $\Delta\sigma$ 有关



$$K = Y\sigma\sqrt{a}$$

$$\begin{aligned}\Delta K &= K_{\max} - K_{\min} \\ &= Y\sigma_{\max}\sqrt{a} - Y\sigma_{\min}\sqrt{a} \\ &= Y\Delta\sigma\sqrt{a}\end{aligned}$$



应用

- 选材 $\Delta K = Y\sigma\sqrt{a} \leq \Delta K_{th}$
- 确定带裂纹零（构）件的最大承载能力

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta K_{th}}{Y\sqrt{a}}$$

- 确定零（构）件的允许的最大裂纹长度

$$a_c = \frac{1}{Y^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma} \right)^2$$

（三）影响疲劳抗力的因素

- 载荷类型
- 材料本质
- 零件表面状态
- 工作温度
- 腐蚀介质

1. 载荷类型

- 载荷类型对疲劳极限及疲劳裂纹扩展门槛值均有重要影响。

拉-压疲劳

$$\sigma_{-1p} = \begin{cases} 0.85 \sigma_{-1} & (\text{钢}) \\ 0.65 \sigma_{-1} & (\text{铸铁}) \end{cases}$$

扭转疲劳

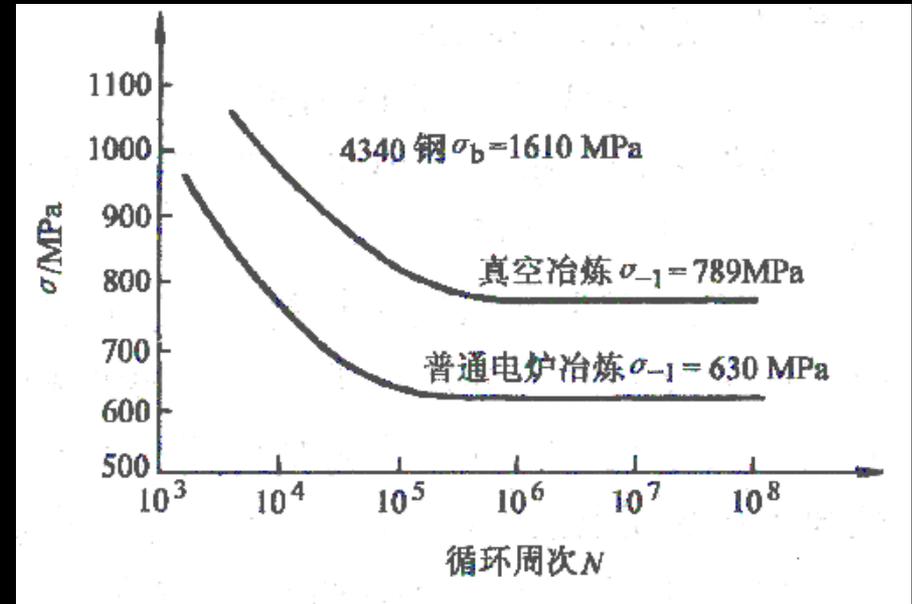
$$\tau_{-1p} = \begin{cases} 0.55 \sigma_{-1} & (\text{钢}) \\ 0.8 \sigma_{-1} & (\text{铸铁}) \end{cases}$$

2. 材料本质

- 不同材料有不同的疲劳曲线， σ_r 、 q 、 da/dN 、 K_{IC} 及 K_{th} 不同；

$$\sigma_{-1} = \begin{cases} 0.5 \sigma_b & \text{中、低强度钢} \\ 0.42 \sigma_b & \text{灰铸铁} \\ 0.48 \sigma_b & \text{球墨铸铁} \\ 0.35 \sim 0.4 \sigma_b & \text{铸铁铜合金} \end{cases}$$

- 材料的纯度及组织状态对疲劳抗力有显著影响



40Cr钢组织类型对疲劳极限的影响

组织状态	σ_b /MPa	σ_{-1} /MPa
退火（铁素体+珠光体）	650	314
淬火（马氏体）	2080	775

3. 零件的表面状态

零件的表面缺陷（如裂纹、刀痕等）对其强度影响不大，但疲劳极限有显著影响。

材料	表面状态	σ_b /MPa	σ_{-1} /MPa
45钢（正火）	光滑	656	280
	有刀痕	654	145
40Cr（淬火+200℃回火）	光滑	1947	780
	有刀痕	1922	300

4. 工作温度

$$T \uparrow \rightarrow \sigma \downarrow, \sigma_r \downarrow, \Delta K_{th} \downarrow, da/dN \uparrow$$

5. 腐蚀介质

在腐蚀介质作用下, $\sigma_r \downarrow, \Delta K_{th} \downarrow,$
 $da/dN \uparrow$

腐蚀疲劳

小结

- 疲劳断裂是零构件常见的一种失效形式，它是一种脆性断裂，危害很大；
- 疲劳断口上可清楚显示疲劳裂纹源、裂纹扩展区和最后断裂区，断口是判断是判断疲劳断裂的重要依据；
- 无裂纹零构件设计中常用的疲劳抗力指标是疲劳极限、过载持久值和疲劳缺口敏感度；

- $\sigma < \sigma_r$ ，构件不发生疲劳断裂；
- $\sigma > \sigma_r$ ，构件在一定的周次下断裂，该周次称为过载持久值，工作应力越大，过载持久值越低；
- 带裂纹零构件的疲劳抗力指标是 ΔK_{th} ；
- σ_r 与 ΔK_{th} 均为材料无限寿命的疲劳性能，前者表示材料阻止裂纹形成的能力，后者表示材料阻止裂纹扩展的能力。

綦江彩虹桥垮塌-脆性断裂分析



坍塌的彩虹桥

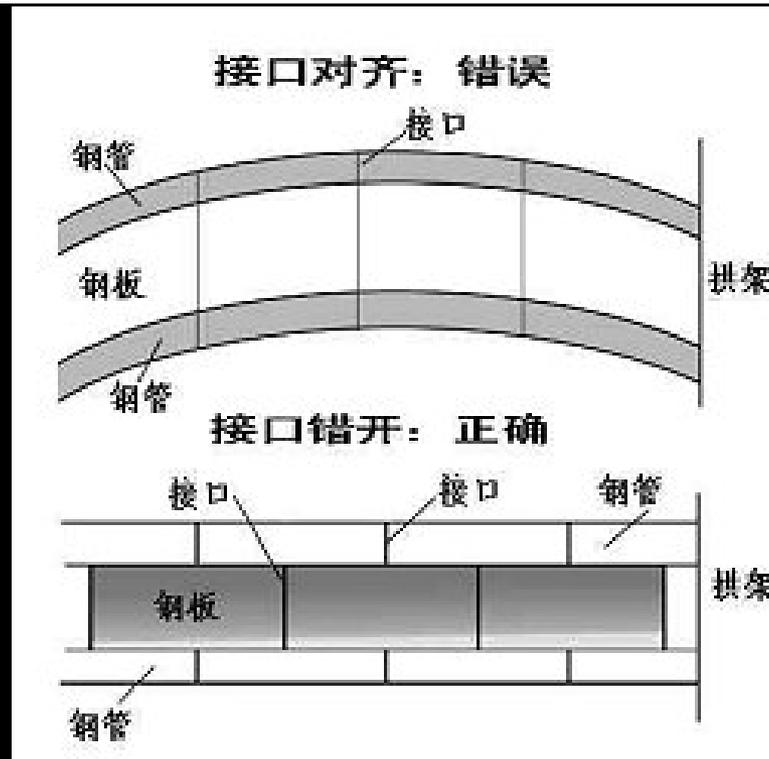
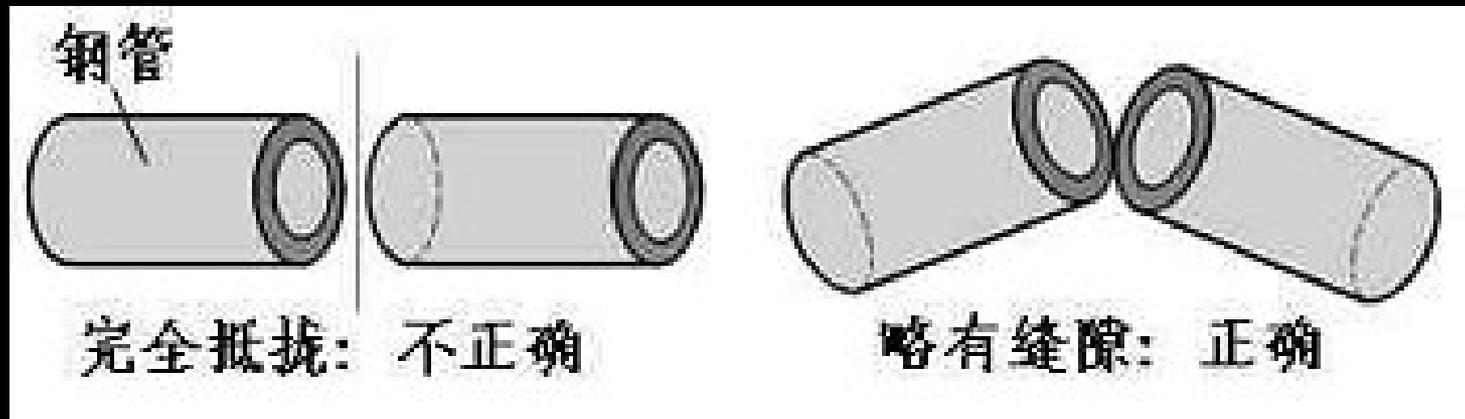
调查组结论

坍塌原因有二，一是工程质量问题，二是工程承发包不合法。此工程无设计专用章，设计手续不全，实际上是私人设计；施工承包者是一个挂靠国有的个体业主，其组织的施工队伍不具备进行市政工程建设的技术力量和设备，不具有合法的市政工程施工资质。

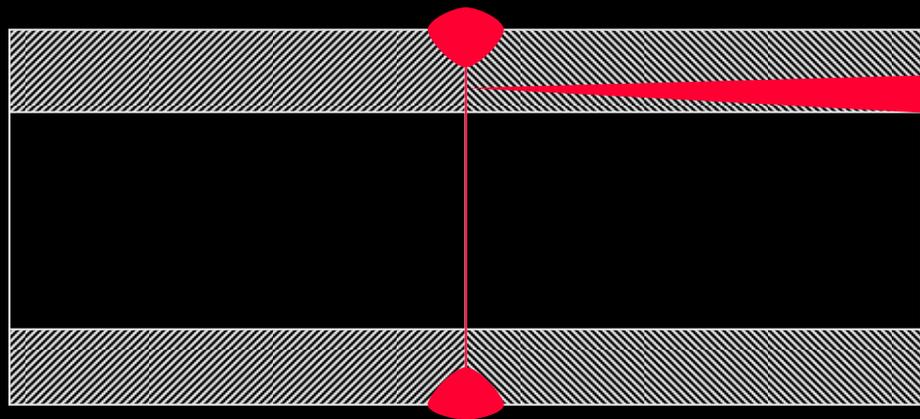
工程质量问题

彩虹桥的主要受力拱架钢管焊接质量不合格，存在严重缺陷，个别焊缝并有陈旧性裂痕；钢管内混凝土抗压强度不足，低于设计标号的三分之一；连接桥梁、桥面和拱架的拉索、锚具和镗片严重锈蚀。

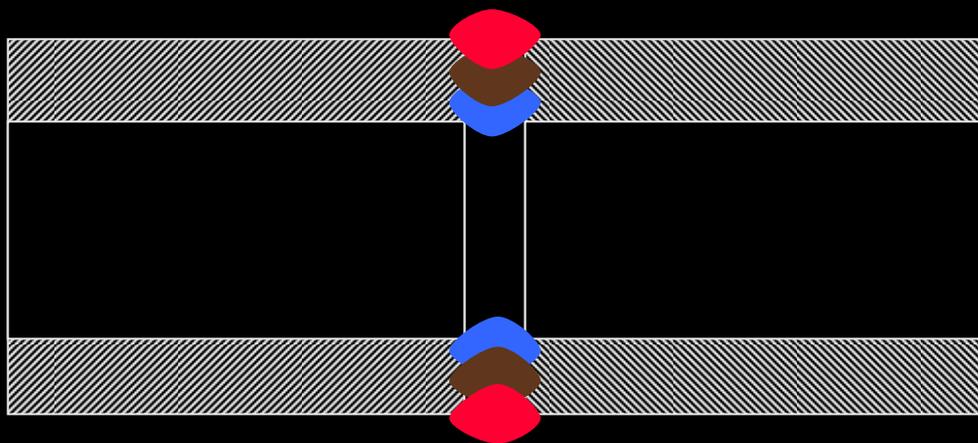
记者的报道



专业分析

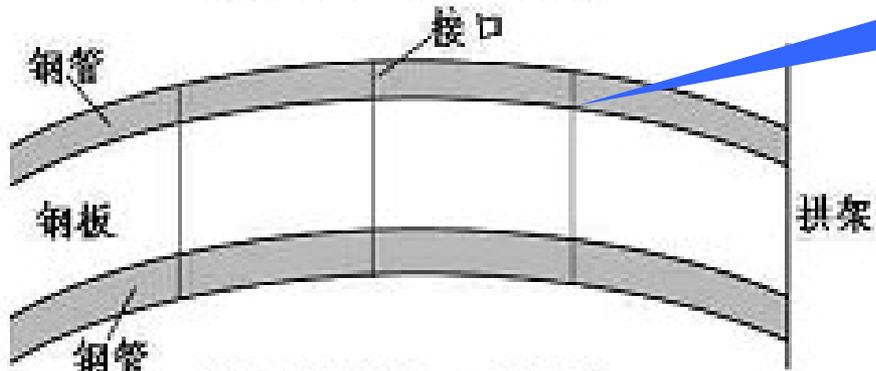


裂纹

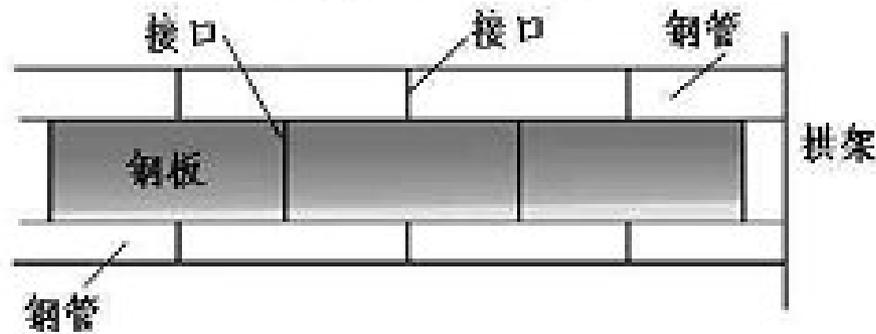


三向应力

接口对齐：错误



接口错开：正确



三向应力
裂纹



脆化



结构脆性断裂

第四节 零件的磨损失效

相互接触的零件间会发生摩擦，在摩擦过程中零件表面发生的尺寸变化和物质耗损现象称为磨损。

- 粘着磨损
- 磨粒磨损
- 疲劳磨损

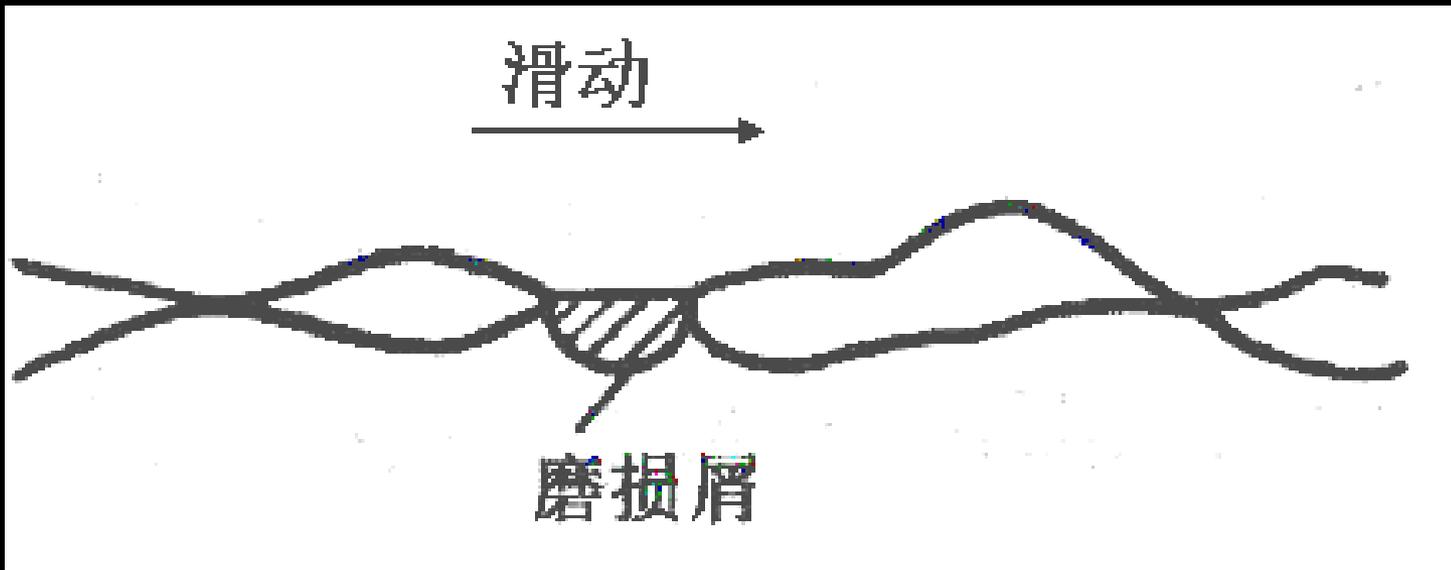
产生过程、机理以及防止措施

一、磨损的基本类型

- 粘着磨损
- 磨粒磨损
- 腐蚀磨损
- 麻点磨损（接触疲劳）

（一）粘着磨损（咬合磨损）

在滑动摩擦条件下，摩擦幅的接触面发生金属粘着，在随后的相对滑动中粘着处被破坏，有金属屑粒被拉拽下来或者是金属表面被擦伤的一种磨损形式。



特点

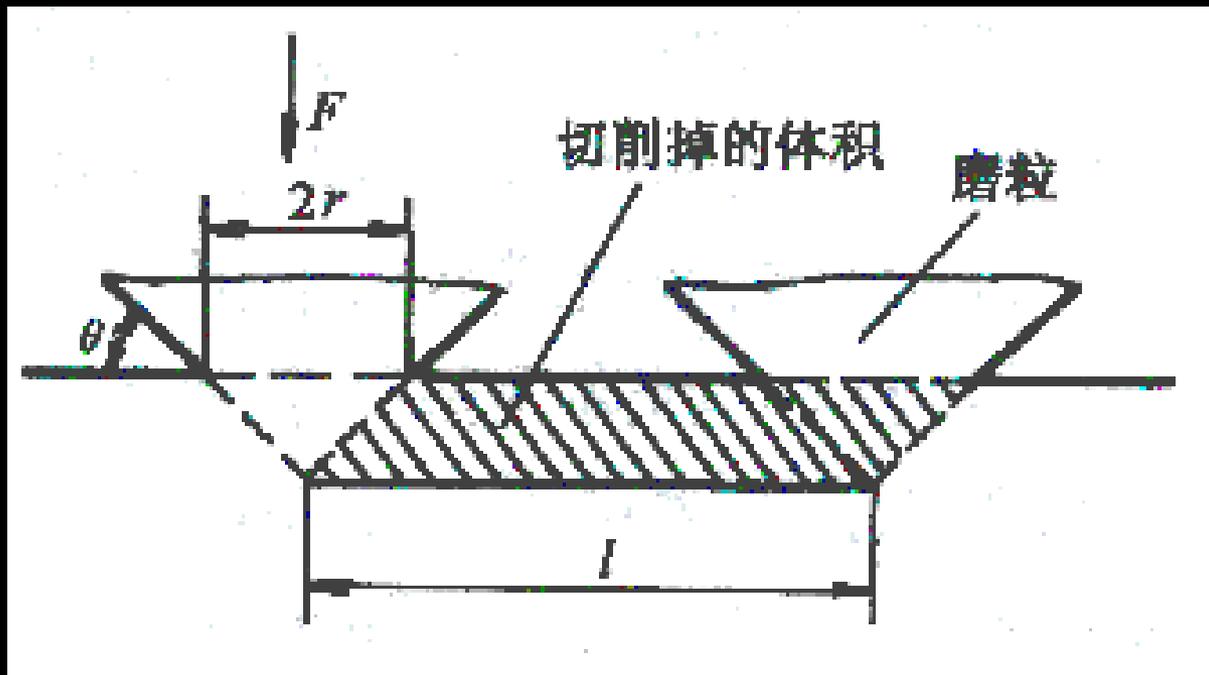
- 在滑动摩擦条件上产生；
- 摩擦副的两种金属力学性能相差不大；
- 磨损速度大， **$10 \sim 15 \mu \text{ m/h}$** ，破坏严重。

防止措施

- 合理选材，摩擦幅配对材料选用硬度差较大的异类材料；
- 提高表面硬度；
- 合理设计减小接触压应力；
- 减小表面粗糙度。

（二）磨粒磨损（磨料磨损）

在滑动摩擦时零件表面存在硬质磨粒，使磨面发生局部塑性变形，磨粒嵌入、切割金属表面从而导致零件表面逐渐损耗的一种磨损。



金属表面
发生局部
塑性变形



磨粒嵌入金属
表面，切割金
属表面



表面被划伤

特点

- 普遍存在于机件中；
- 磨损速度较大， $0.5\sim 5 \mu\text{m/h}$

防止措施

- 提高表面硬度（从选材方面）；
- 减少磨粒数量（从工作状况方面）。

（三）腐蚀磨损

在摩擦力和介质联合作用下，金属表层的腐蚀产物剥落与金属磨面间的机械磨损（粘着磨损和磨粒磨损）合的一种磨损。

- 氧化磨损
- 微动磨损
- 冲蚀磨损

（四）接触疲劳

零件工作面作滚动或滚动加滑动摩擦时，在交变接触压应力的长期作用下引起的表面疲劳剥落破坏的现象。

特点

- 产生接触疲劳的零件表面上出现许多针状或痘状的凹坑，称麻点，故得名麻点磨损，亦称疲劳磨损。
- 接触疲劳是裂纹形成和扩展的过程。

防止措施

- 提高材料硬度；（以增加塑性变形的抗力，延缓裂纹形成和扩展）
- 提高材料纯度；（减少裂纹源）
- 提高零件心部强度和硬度，增加硬化层深度，细化硬化层组织；
- 减小表面粗糙度，以减小摩擦力。

小结

- 磨损是机械零件常见的一种失效形式，总是从零件表面开始发生。各种磨损的过程和机理不同，因此其预防措施也不同。
- 提高零件表面硬度，合理设计减小压应力，以及提高表面光洁度等对降低磨损都有利。

第五节 零件的腐蚀失效

材料表面和周围介质发生化学反应或者电化学反应所引起的表面损伤现象。

- 化学腐蚀
- 电化学腐蚀

化学腐蚀过程中不产生腐蚀电流，如金属在高温氧化性气氛中、在干燥空气中、在石油及酒精中的腐蚀.....都属于化学腐蚀。

电化学腐蚀过程中会产生腐蚀电流，如金属在潮湿空气、海水、或电解质溶液中的腐蚀都是电化学腐蚀。

- 高温氧化腐蚀
- 电化学腐蚀
- 应力腐蚀

一、高温氧化腐蚀

除Au、Pt外，金属中在空气中都会发生氧化，高温会加速氧化过程。

腐蚀会导致零件有效截面积减小，承载能力降低。

在高温含氧气氛中工作的零件的抗高温氧化能力是一项重要指标。

氧化过程（三个步骤）

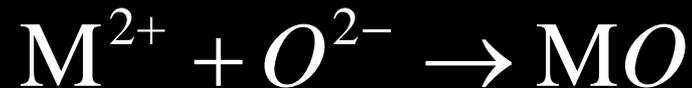
- 金属失去电子成为金属离子



- 氧原子吸收电子成为氧离子



- 金属离子和氧离子结合为金属氧化物



氧化膜形成后，将金属基体与氧隔开，金属要继续氧化必须：

- 金属离子及电子（由内向外）穿过氧化膜
- 氧原子或离子（由外向内）穿过氧化膜

氧化膜层阻止原子、离子及电子穿过氧化膜的能力，决定了材料的抗氧化性能。

Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 SiO_2 等氧化膜的熔点高，致密，阻力大；

FeO 、 Cu_2O 等氧化膜的熔点低，疏松，阻力小；

在钢中加入Al、Cr、Si等元素，因其与氧的亲合力比Fe大，故可优先形成氧化物，从而阻Fe的氧化。

二、电化学腐蚀

产生条件

- 不同金属或同一金属的不同部分存在电极电位差；
- 相互接触；
- 有电介质溶液。

电化学腐蚀的过程

- 阳极：失去电子发生氧化反应（被腐蚀）



- 阴极：得到电子发生还原反应



腐蚀原电池

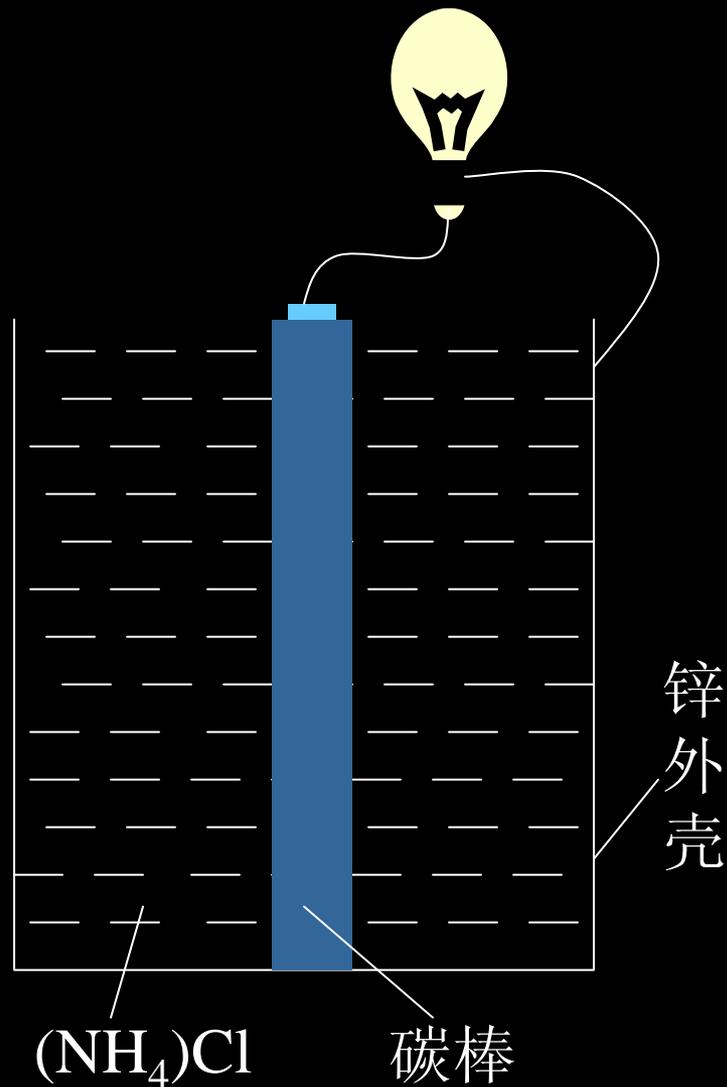
- 在锌壳上的阳极反应



- 在碳棒上的阴极反应

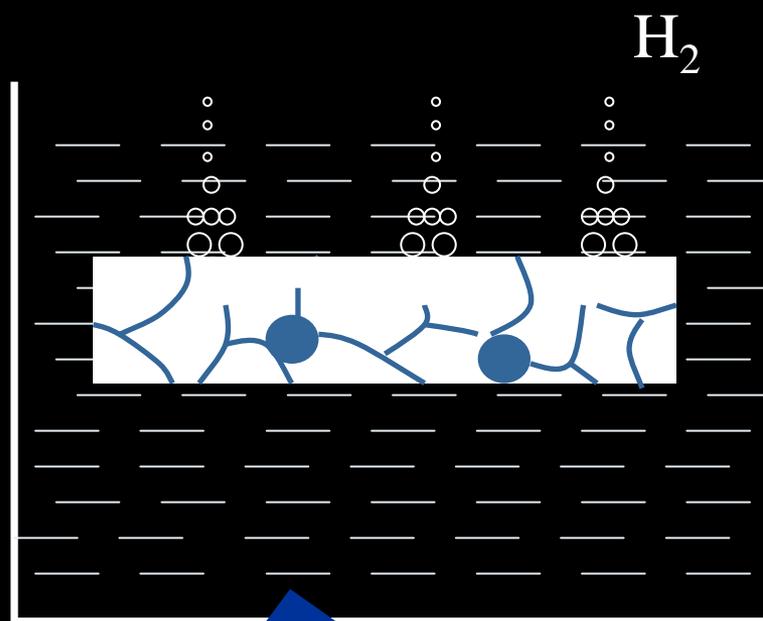


结果： Zn被离子化
(腐蚀)。



F基球墨铸铁在HCl中的电化学腐蚀

F基体的电极电位比G低，故为阳极，被腐蚀；而在阴极G上析出 H_2 气体。



HCl水溶液

三、应力腐蚀（SCC）

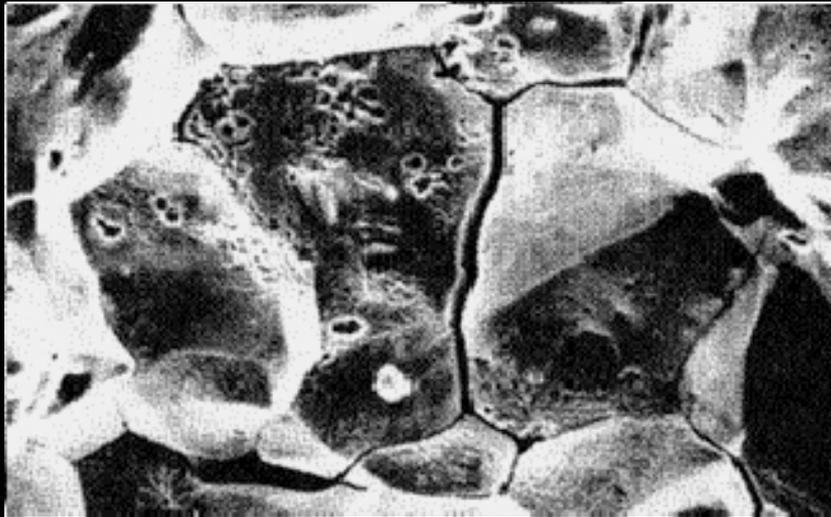
材料在应力和特定介质联合作用下产生的低应力脆性断裂。

特点

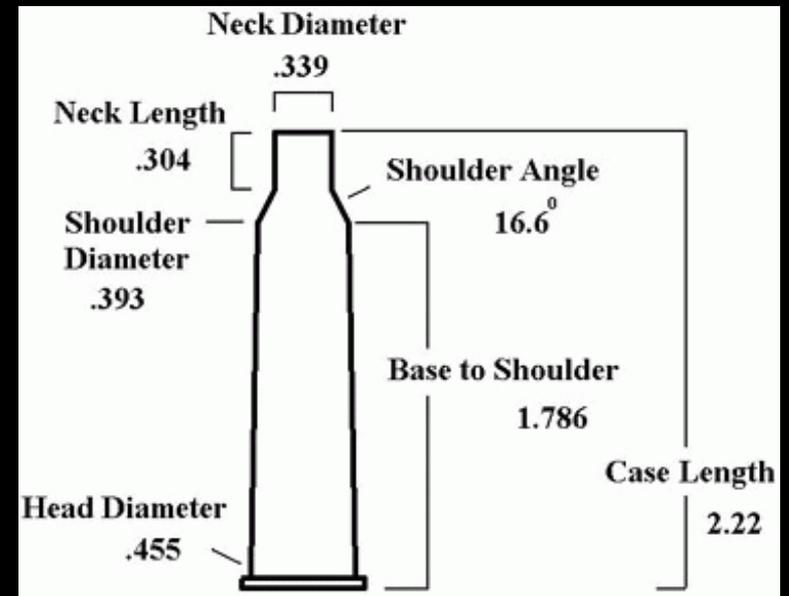
- 应力低
- 介质的腐蚀性小
- 特定介质

常用金属材料发生应力腐蚀的敏感介质

金属材料	化学介质	金属材料	化学介质
低碳钢和低合金钢	NaOH、沸腾硝酸盐溶液，海水、海洋及工业气氛	铝合金	氯化物、海水及海洋大气、潮湿工业大气
奥氏体不锈钢	酸性和中性氯化物、熔融氯化物、海水	钢合金	氨蒸气、含氨气体、含胺离子水溶液
镍基合金	热浓 NaOH、HF 蒸气和溶液	钛合金	发烟硝酸、300℃以上的氯化物，潮湿空气及海水



18-8奥氏体不锈钢 Intergranular-SCC



四、改善零件耐蚀性的措施

- 对于化学腐蚀，常采用以下方式：选择抗氧化材料如耐热钢、高温合金、陶瓷材料等；零件表面涂层。
- 对于电化学腐蚀：选择耐腐蚀材料；表面涂层；电化学保护；加缓蚀剂

第六节 零件在高温下的蠕变变形和断裂失效

- 材料在高温下的力学行为
- 蠕变和蠕变曲线
- 材料高温力学性能指标
- 高温下零件的失效和防止

一、材料在高温下的力学行为

高温下材料的力学性能与常温下有很大不同

20钢

- 室温抗拉强度: 410MPa
- 450°C短时抗拉强度: 330MPa
- 450°C持续工作300h断裂应力230MPa
- 450°C持续工作1000h断裂应力120MPa

- 材料的强度随温度的升高而降低
- 高温下材料的强度随时间的延长而降低
- 高温下材料的变形量随时间的延长而增加

二、蠕变和蠕变曲线

蠕变

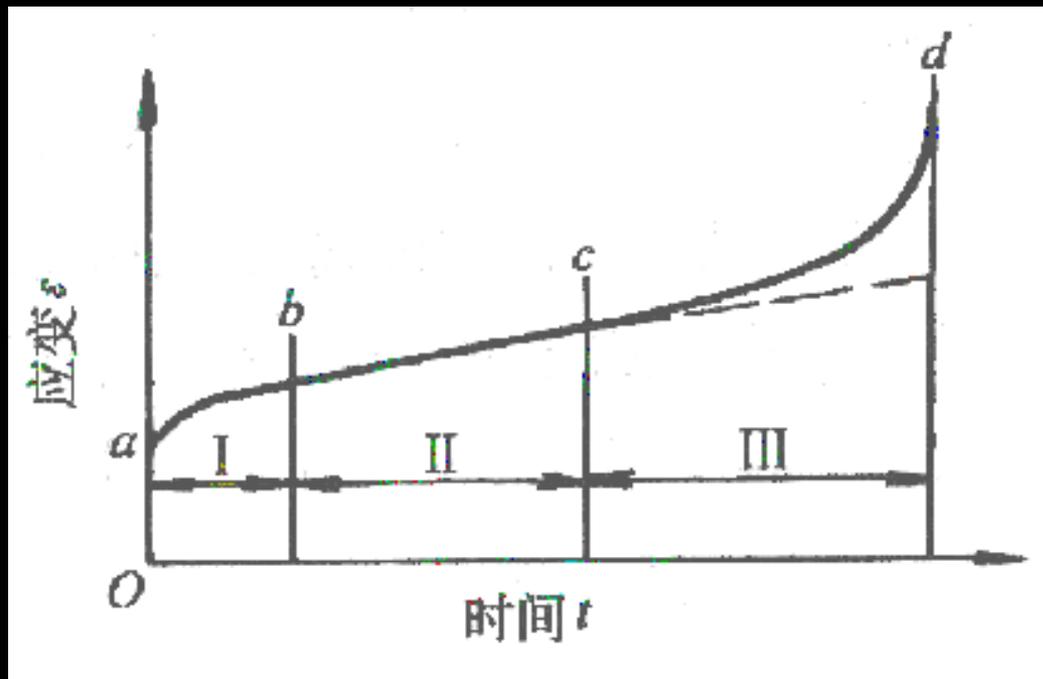
材料在长时间恒应力作用下缓慢产生塑性变形的现象称为。

产生蠕变的最低温度

- 碳钢 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$
- 合金钢 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$
- 一般金属材料 $0.3\sim 0.4T_m$
- 陶瓷材料 $0.3\sim 0.4T_m$

蠕变曲线

根据蠕变速率的变化
可将蠕变曲线分为三个
阶段

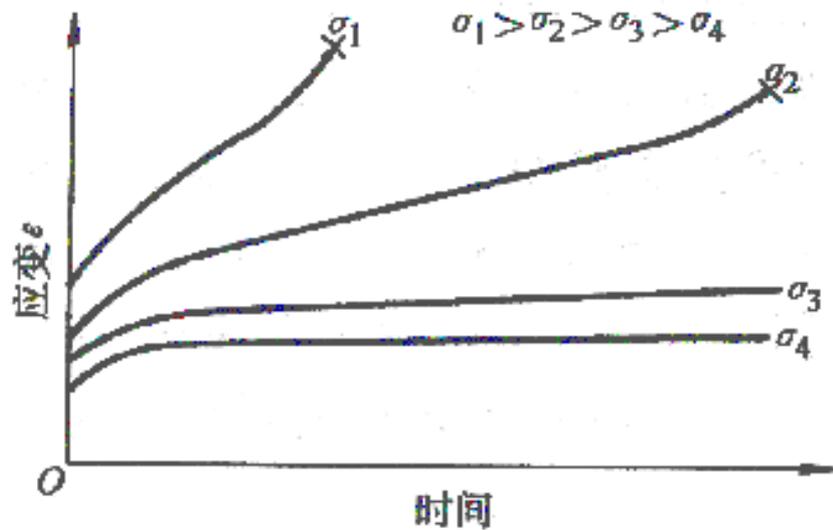


I 减速蠕变阶段

II 恒速蠕变阶段

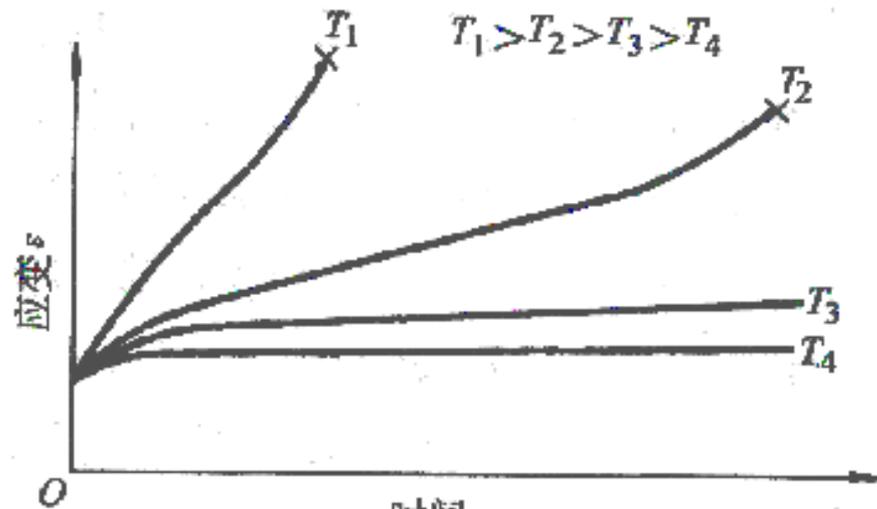
III 加速蠕变阶段

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$$



时间

a)



时间

b)

- 在应力较小或温度较低时，蠕变第II阶段持续时间长，无第III阶段，即不发生蠕变断裂；
- 在应力较大或温度较高时，蠕变第II阶段很短，甚至消失，即发生短时断裂。

三、材料高温力学性能指标

蠕变极限

高温长期载荷作用下材料对塑性变形的抗力指标。

表示方法

1. 在规定温度下使试样产生规定**稳态蠕变速率**的应力值

$$\sigma_{\dot{\varepsilon}}^T$$

$$\sigma_{1 \times 10^{-5}}^{600} = 60 \text{MPa}$$

600°C 温度下，稳态蠕变速度为 $1 \times 10^{-5} \% / \text{h}$ 的蠕变极限为 60MPa

2. 给定温度下，在规定时间内使试样产生一定蠕变**总变形量** δ 的应力值

$$\sigma_{\delta/t}^T$$

$$\sigma_{1/10^5}^{500} = 100$$

500°C温度下， 10^5 h后总变形量为1%的蠕变极限为100MPa

持久强度

材料在高温长期载荷作用下抵抗断裂的能力。

表示方法

用给定温度和规定时间内试样发生断裂时的应力表示

$$\sigma_t^T$$

$$\sigma_{1 \times 10^3}^{700} = 300 \text{MPa}$$

700°C温度下，经1000h的持久强度为300MPa

四、高温下零件的失效和防止

高温下零件的失效形式

- 过量塑性变形（蠕变变形）
- 断裂（包括蠕变断裂、冲击载荷及疲劳载荷下的断裂）
- 磨损
- 氧化腐蚀

防止措施

- 正确选材；
选熔点高、组织稳定的材料
- 表面处理
表面镀硬铬、热喷涂铝和陶瓷等

作业

习题与思考题

1、3、4、5、9、12、13

第二章 碳钢

- 纯铁的组织 and 性能
- 铁碳合金中的相 and 组织组成物
- **Fe-Fe₃C**相图
- 杂质元素对钢性能的影响
- 钢锭的组织 and 缺陷
- 压力加工对钢组织和性能的影响
- 碳钢的分类 and 牌号及用途

第一节 纯铁的组织 and 性能

铁是晶体

- 什么是晶体？
- 晶体与非晶体的本质区别是什么？

晶体指原子在三维空间做有规则的周期性重复排列的物质。

特点：

- 1) 有确定的熔点
- 2) 各向异性

- 非晶体的原子或分子排列无序。更严格意义上来说，不存在长周期性的排列。
- 特点：
 - 1)无确定的熔点
 - 2)各向同性

一、纯铁的结晶

结晶：晶体由液态变成固态的过程。

（一）过冷现象和过冷度

液体的结晶和固体的熔化是一对可逆过程， $T \uparrow$ 有利于熔化， $T \downarrow$ 有利于结晶过程。

液体结晶的速度与晶体熔化的速度相等时的温度称为平衡结晶温度（理论结晶温度）常用 T_0 表示。

$$T_0 = 1539^\circ\text{C}$$

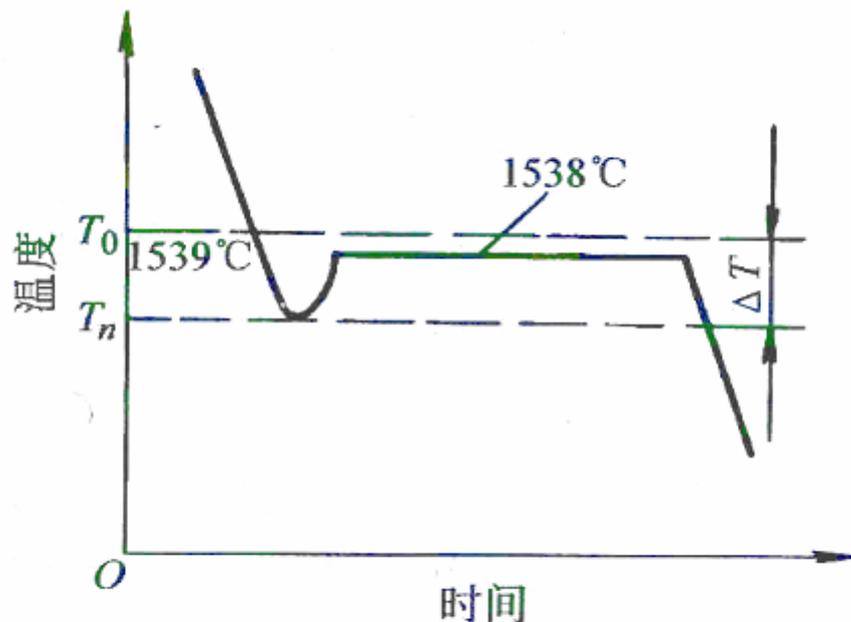
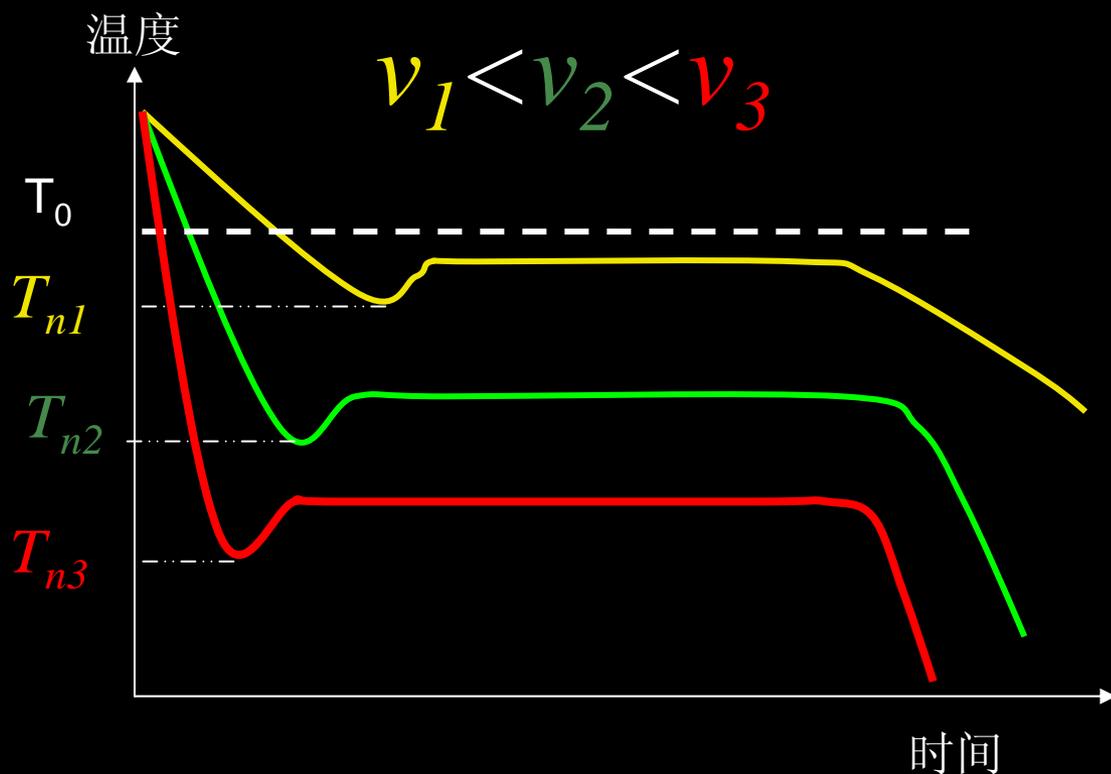


图 2-1 纯铁的冷却曲线（部分）

温度降低到 T_0 时，由于结晶速度与熔化速度相等，故不会结晶，只有当温度继续下降到 T_n 时，才开始结晶。因结晶潜热的释放，液体的温度又会回升，并出现了低于 T_0 的“平台” 1538°C 。

T_n 称为实际结晶温度

T_n 不是固定的，与材料的性质、纯度以及冷却速度有关



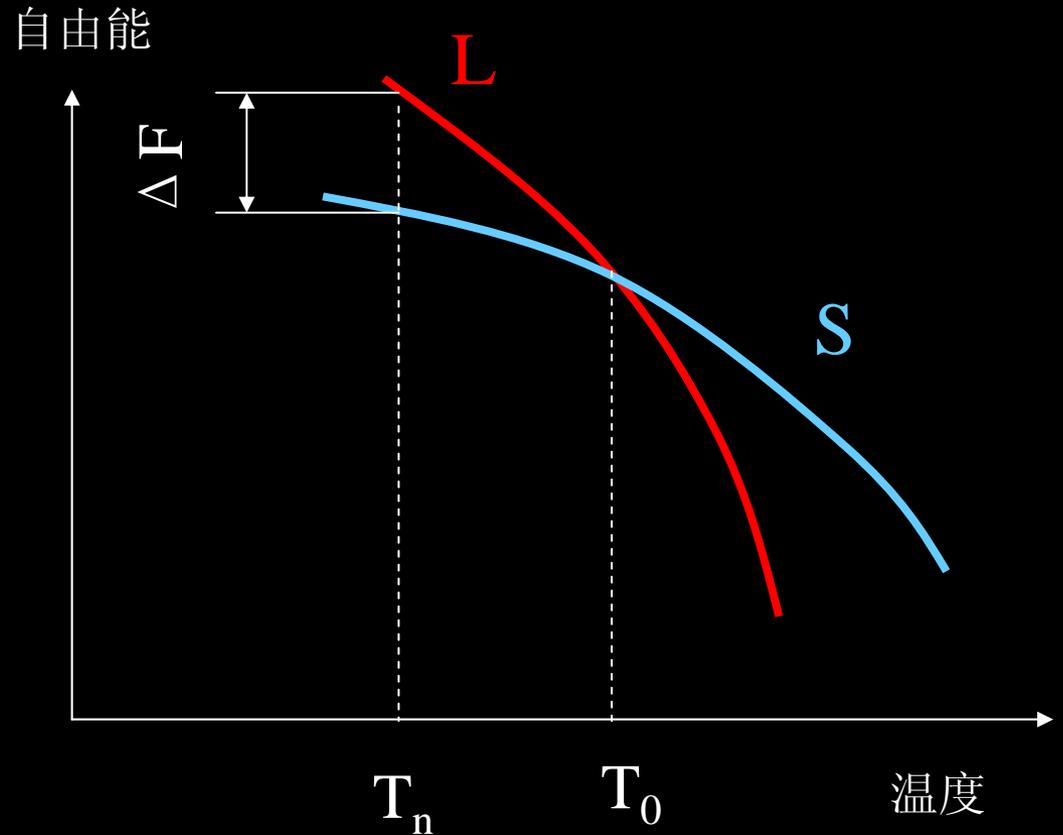
冷却速度越快，实际结晶温度越低

热力学定律：自然界一切自发转变过程总是从能量较高的状态趋向能量较低的状态。

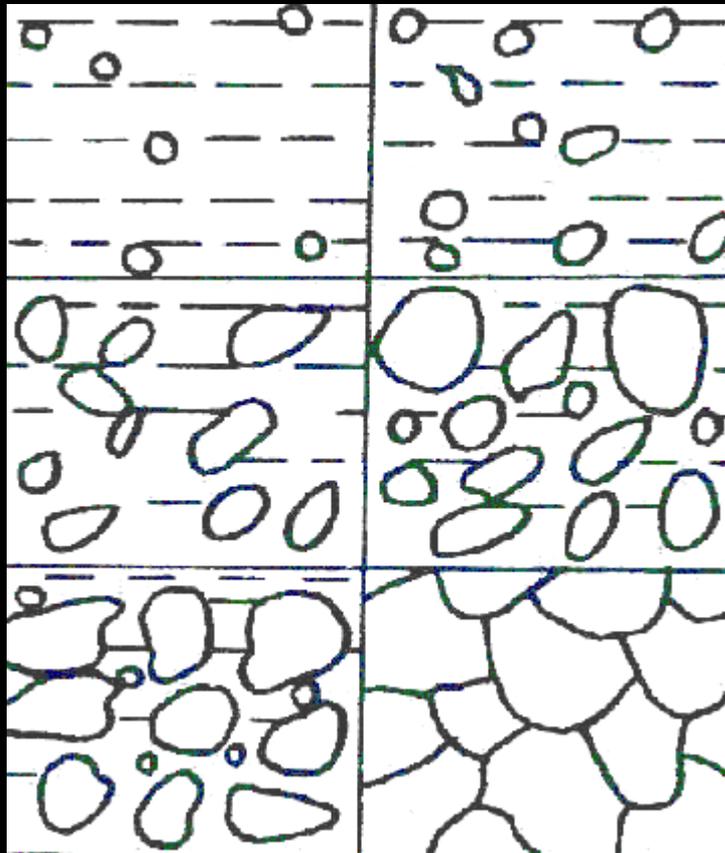
$$\Delta T = T_0 - T_n$$

过冷度

过冷是结晶的必要条件



(二) 结晶过程—形核与长大



- 单晶
- 多晶
- 细化晶粒

二、晶体结构

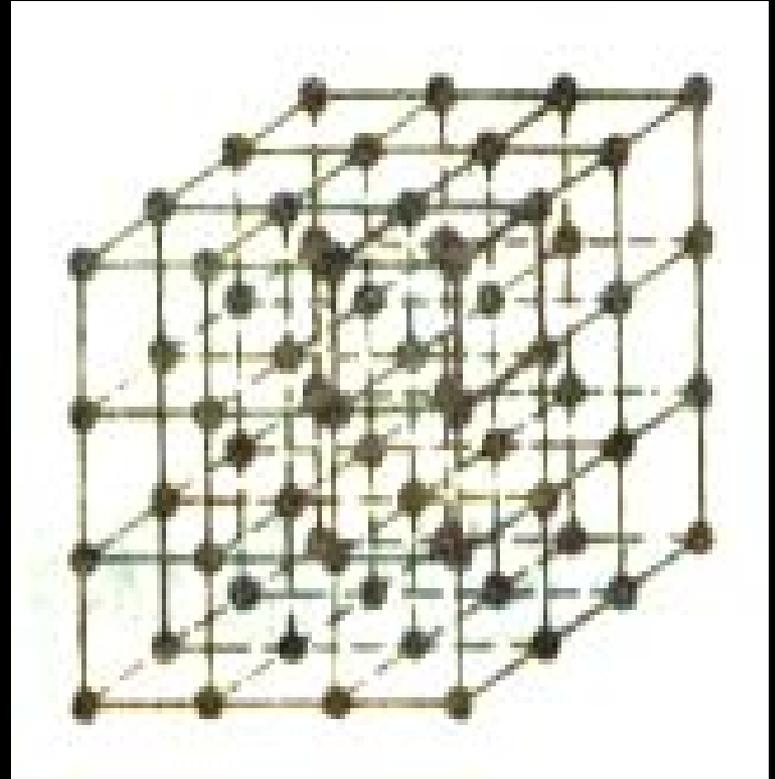
晶体结构: 晶体中原子（或分子）在三维空间呈规则排列的具体方式。

在晶体学中，原子（或分子）常被抽象为刚性小球，晶体就是由这些小球堆砌而成的。



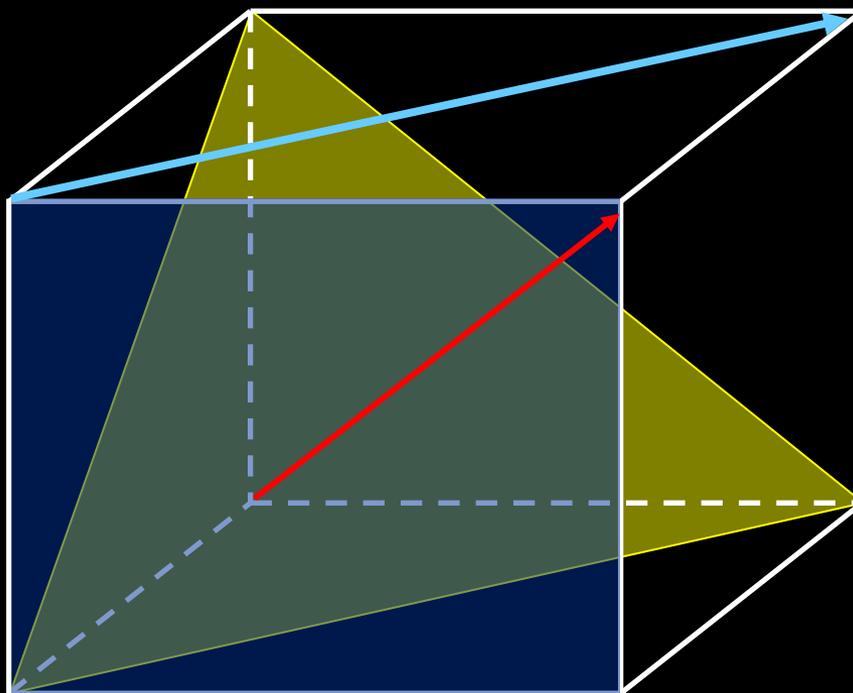
晶格

为了表示小球的排列规律，将小球中心用平行的直线连接起来，形成的空间格子，称为晶格。直线间的交点称为结点（阵点）。



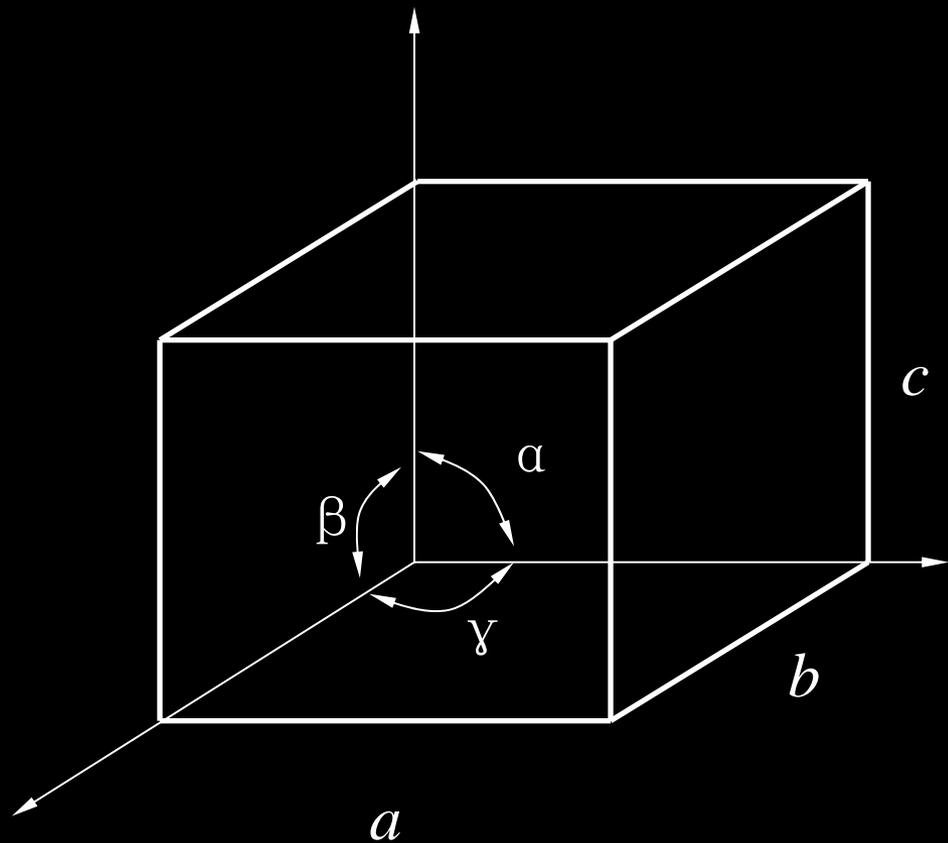
晶面与晶向

- 晶格中结点所组成的平面称**晶面**
- 连接结点所表示的方向称**晶向**



能够完全反映晶格特性的最小、最基本的几何单元称晶胞。

晶胞的棱边长度： a , b , c 。确定了晶胞的大小。晶胞棱边夹角： α , β , γ 确定了晶胞的形状。

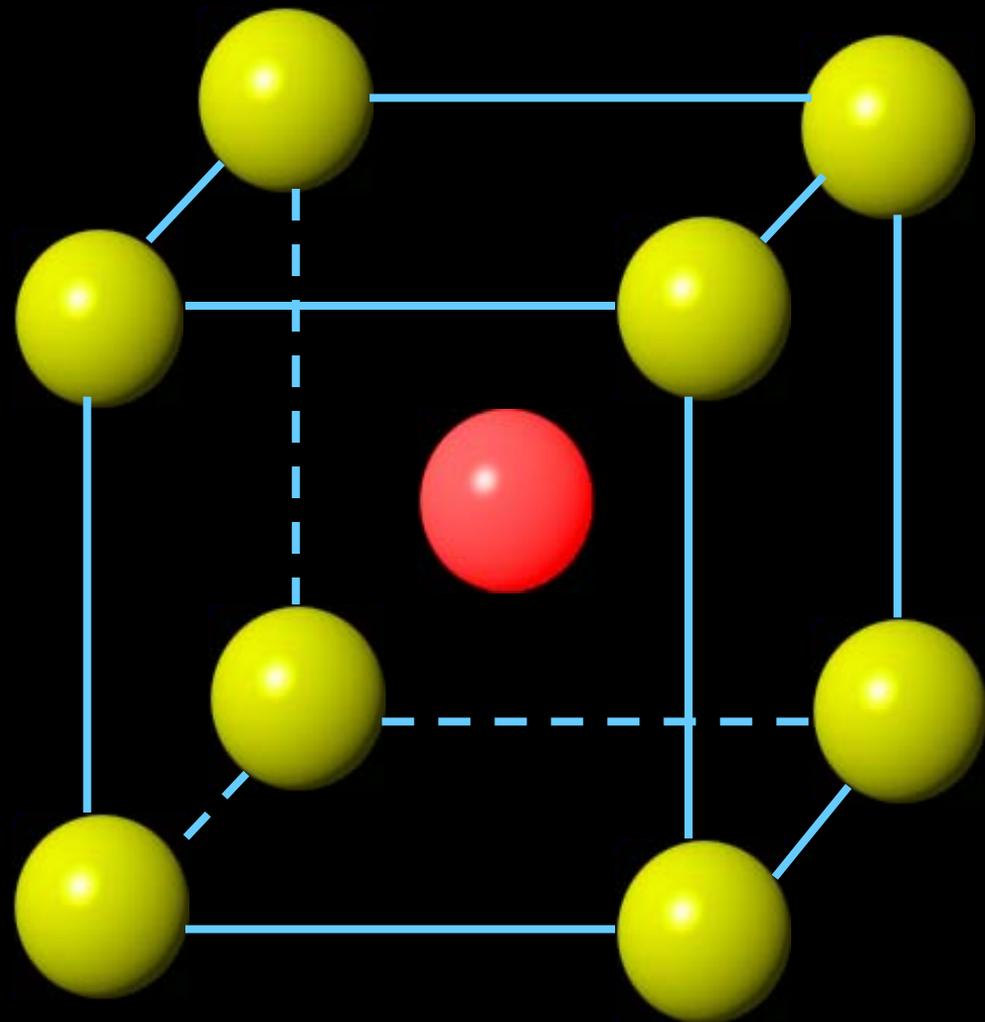
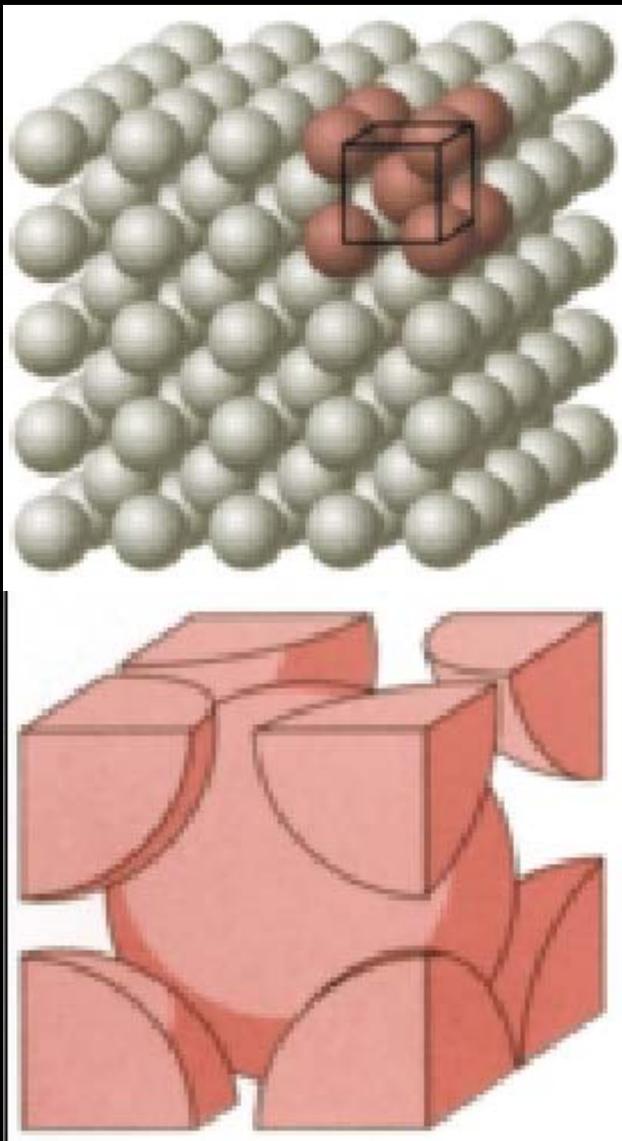


a , b , c 及 α , β , γ 称为晶格参数

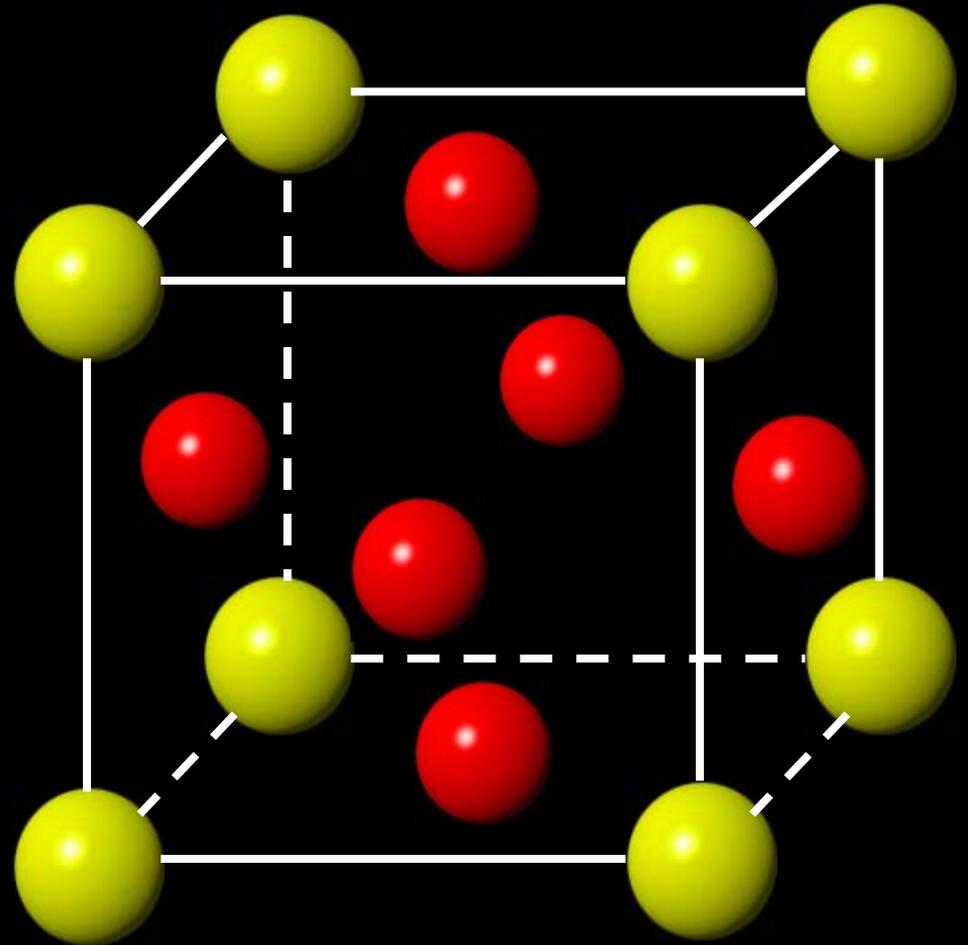
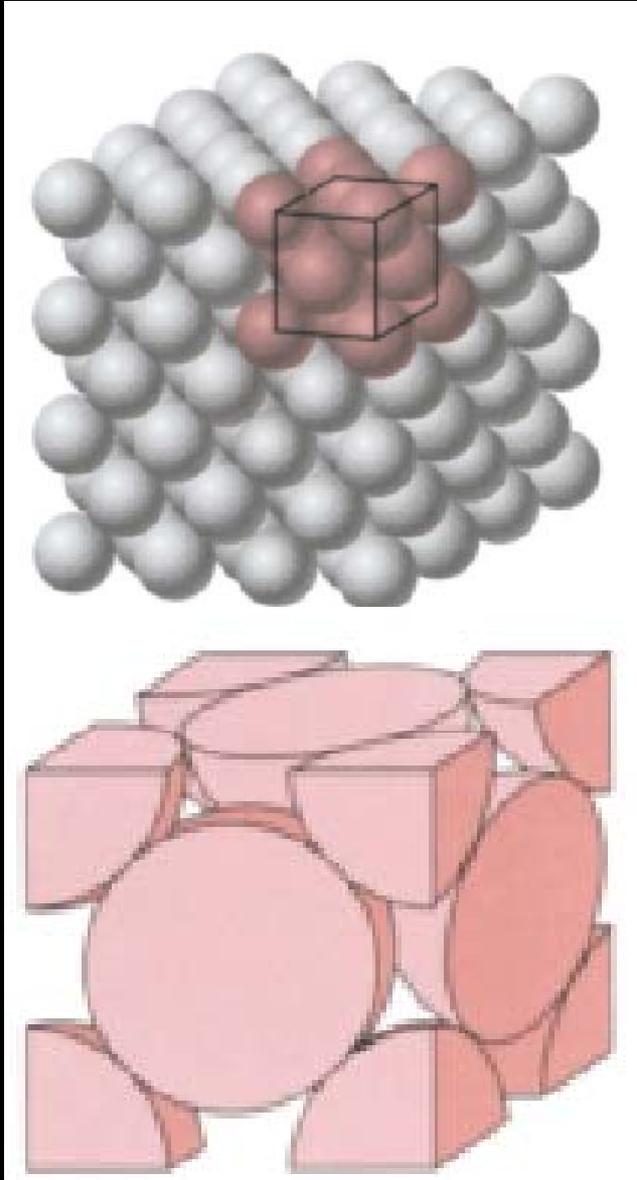
90%的金属具有下述
三种晶体结构之一

- 体心立方
- 面心立方
- 密排六方

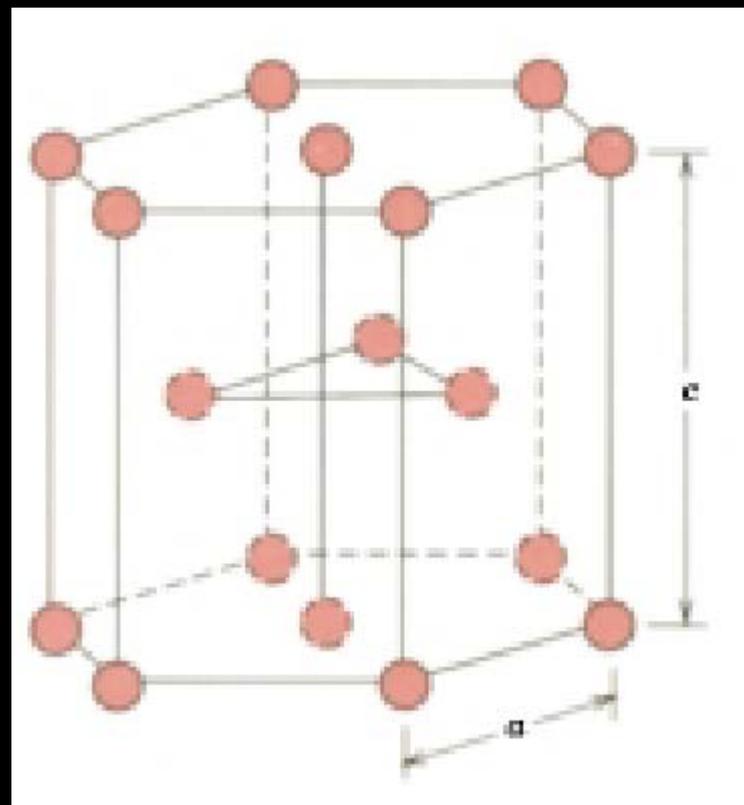
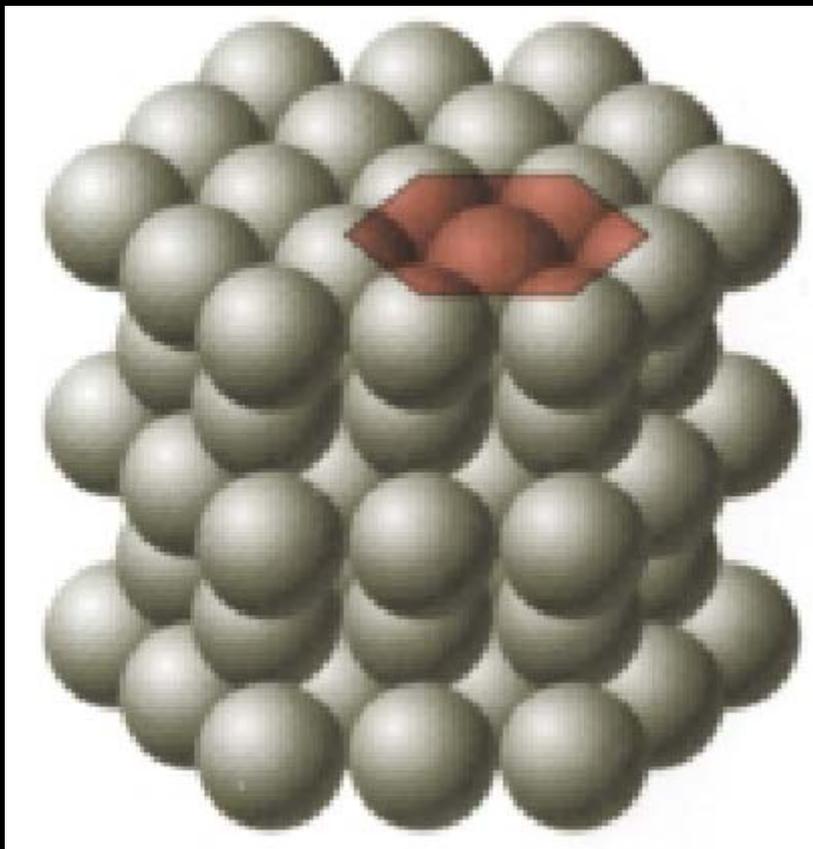
体心立方 **B**ody **C**entered **C**ubic



面心立方 Face Centered Cubic



密排六方 Hexagonal-close-packed



BCC

铁(α -Fe)、钨(W)、铬(Cr)、
钼(Mo)、钒(V)等

FCC

铝(Al)、铜(Cu)、银(Ag)、金(Au)、
镍(Ni)、铅(Pb)、铁(γ -Fe)等

HCP

钛(Ti)、锆(Zr)、镁(Mg)、锌(Zn)等

晶体结构与材料性能：（一般规律）面心立方的金属塑性最好，体心立方次之，密排六方的金属较差。

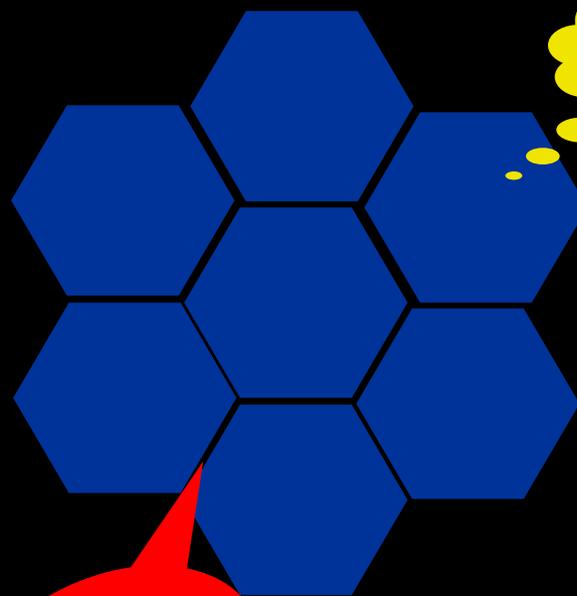
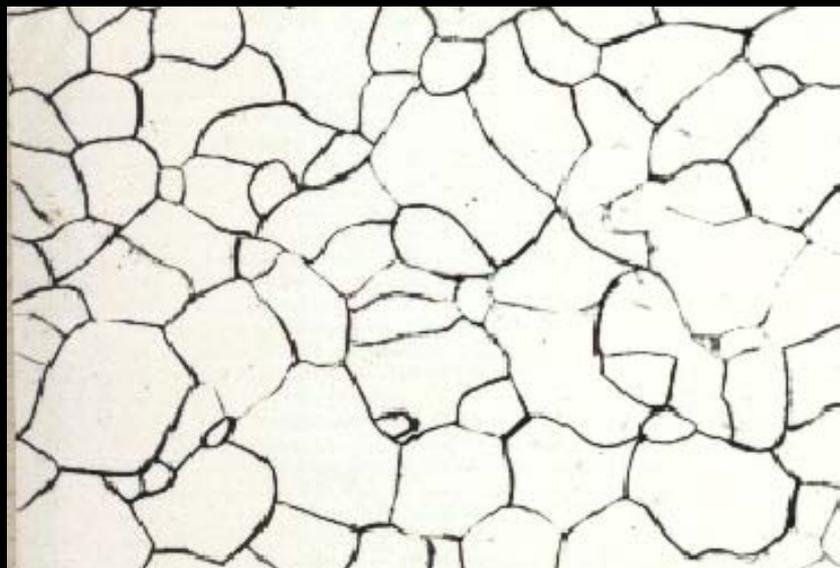
各向异性

- 晶体不同晶面及晶向上原子的排列情况不同，所以，不同方向上晶体的性能是不同的。

纯铁

$$E = \begin{cases} 290\text{GPa} & [111]\text{-体对角线方向} \\ 135\text{GPa} & [110]\text{-面对角线方向} \end{cases}$$

多晶体伪各向同性



晶粒

晶界

晶粒的位向彼此不同，其性能是各晶粒的统计平均值，故是大致相同的。

$$E_{\text{Fe}} = 210\text{GPa}$$

晶体缺陷

实际晶体中排列不规则的区域统称为晶体缺陷

按空间尺寸大小不同分为点、线、面三类缺陷。

点缺陷

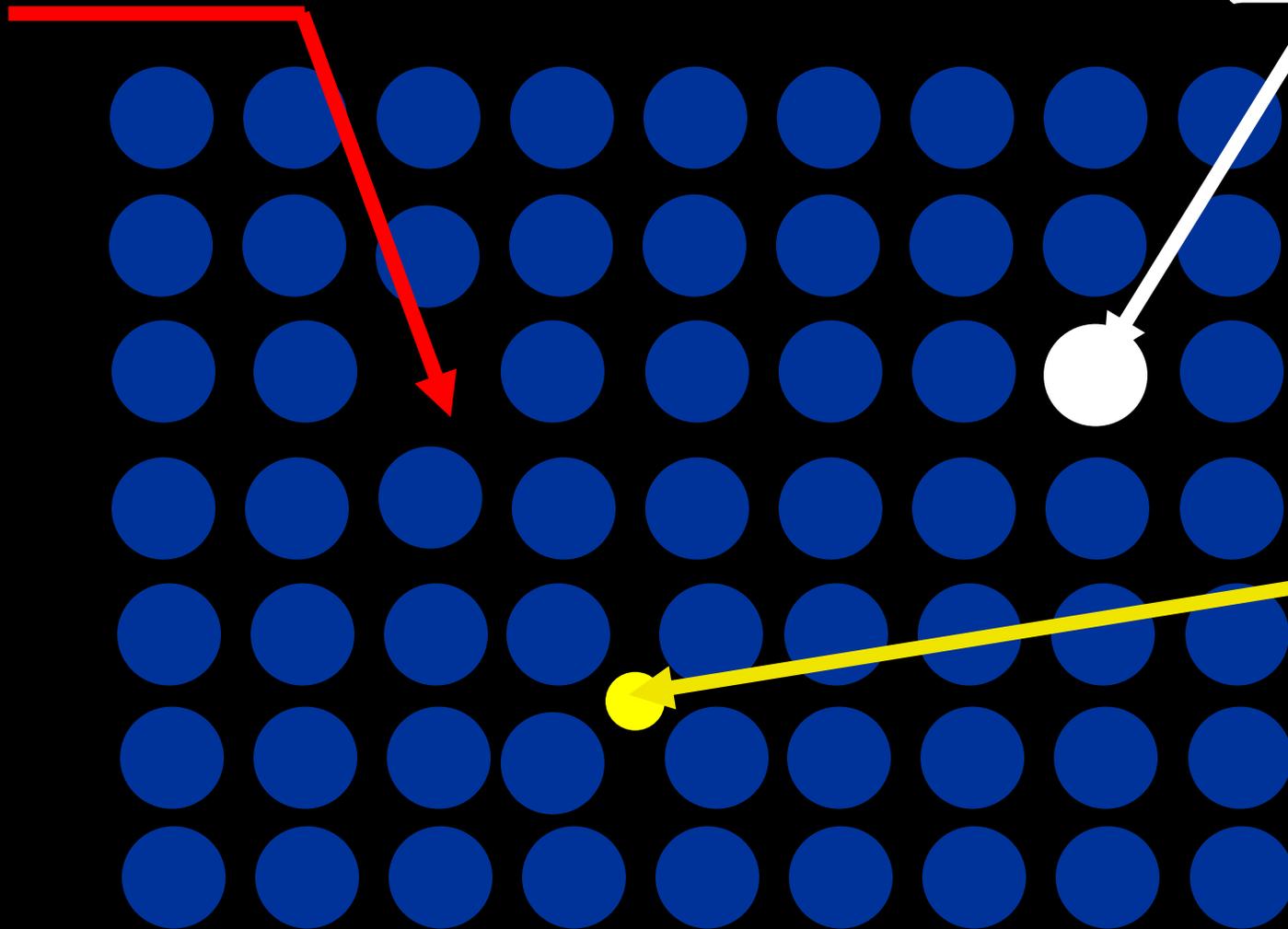
在三维空间上，其长、宽、高的尺寸均很小（不超过几个原子直径）的缺陷。

点缺陷示意图

空位

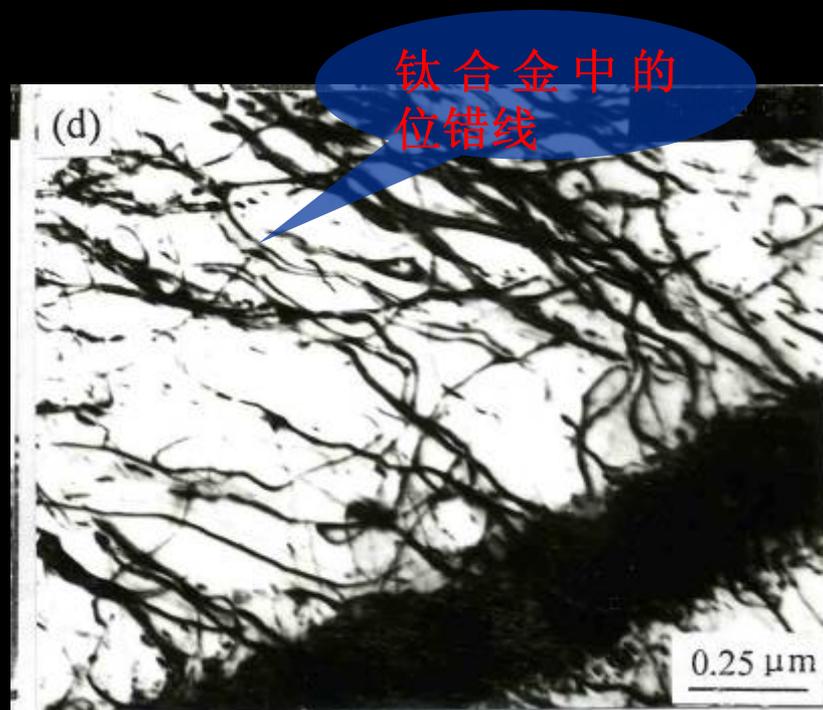
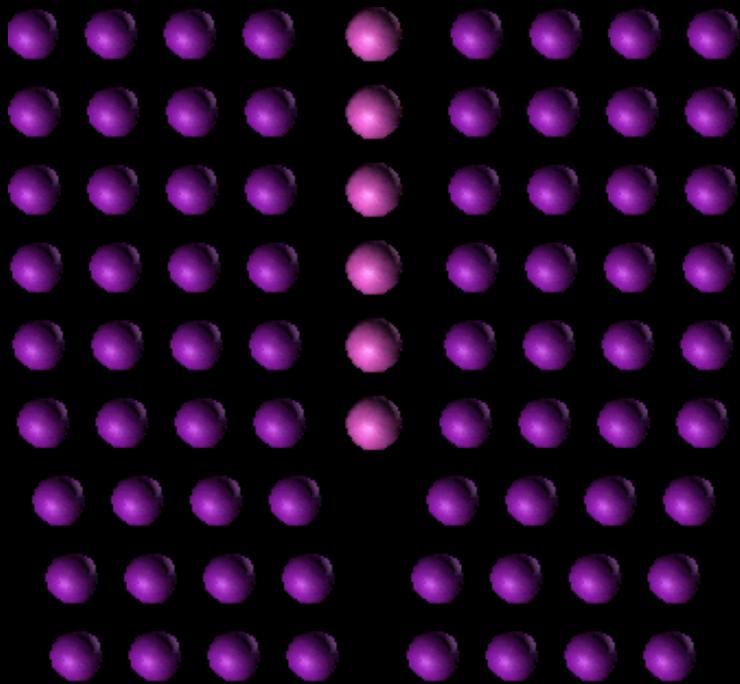
置换原子

间隙原子



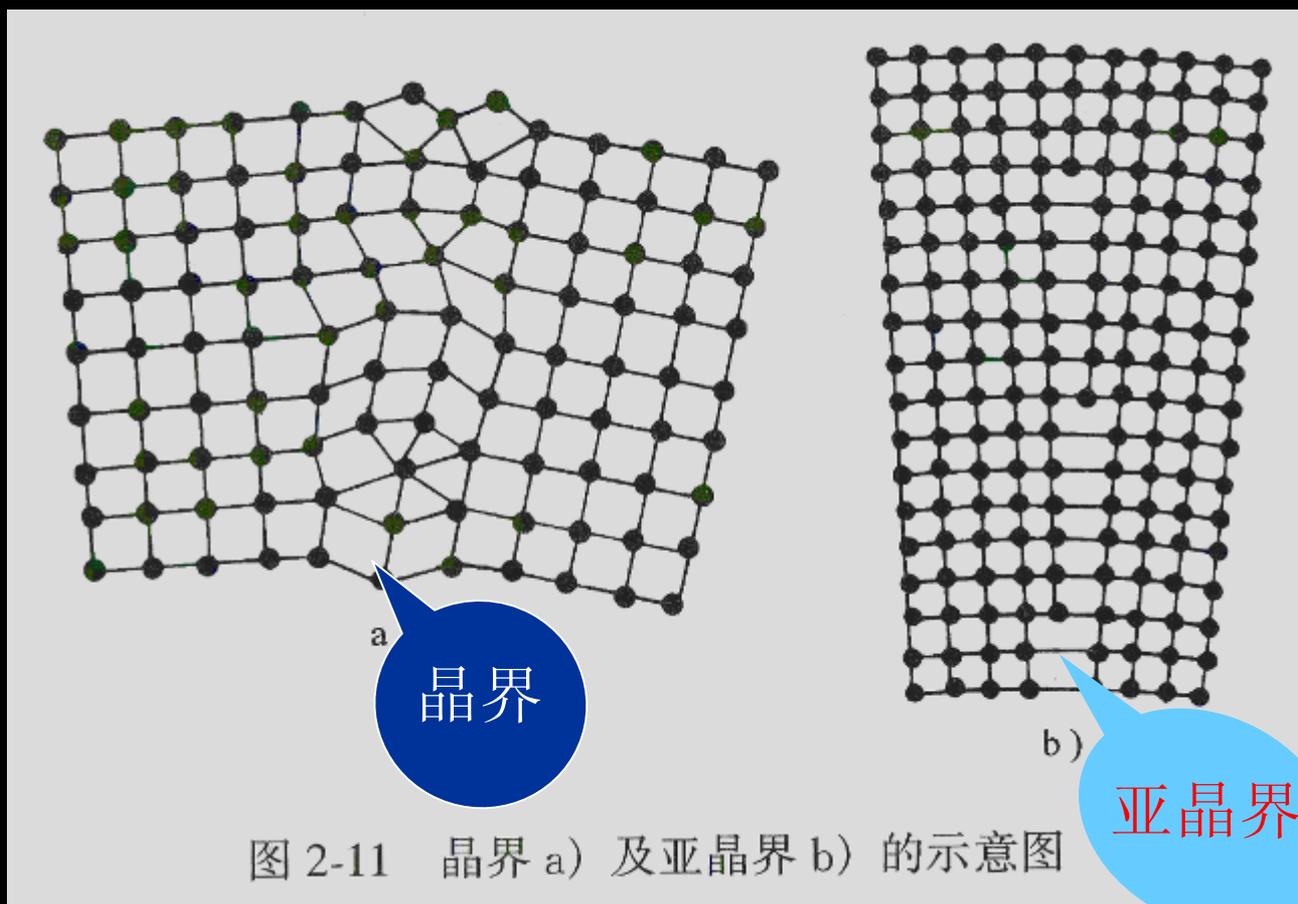
线缺陷

不规则区域在一个方向的尺寸很大，在另外两个方向的尺寸都很小。



面缺陷

不规则区域在两个方向的尺寸很大，在另外一个方向的尺寸很小，例如晶界、亚晶界。



晶体缺陷对晶体性能的影响

点缺陷

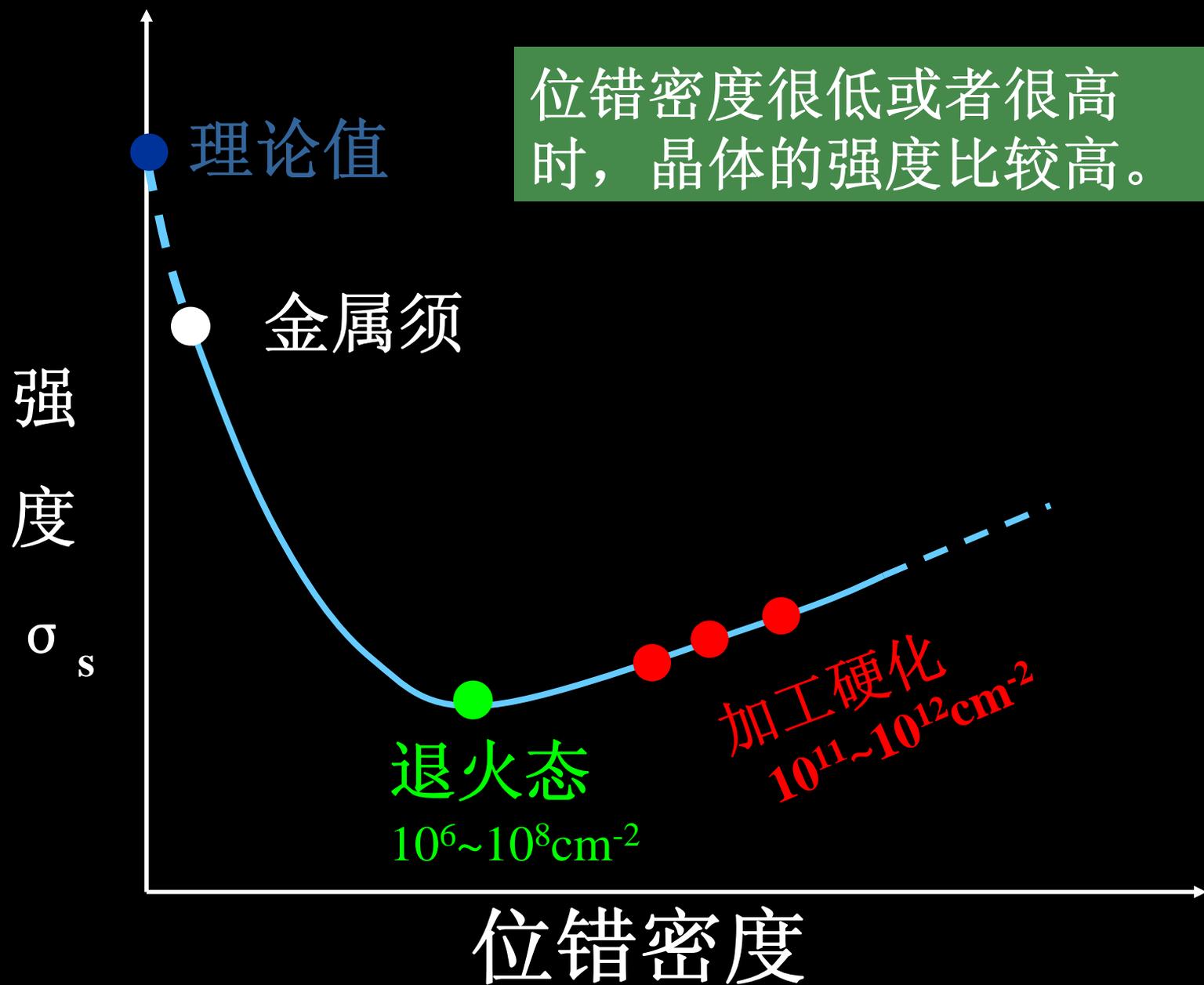


点缺陷周围晶格发生畸变，材料的屈服强度提高，塑性韧性下降，电阻增加。

线缺陷



附近的晶格畸变，对强度影响显著。强度的变化与位错密度有关。



位错密度很低或者很高时，晶体的强度比较高。

理论值

金属须

强度

σ_s

退火态

$10^6 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$

加工硬化

$10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$

位错密度

面缺陷

晶格发生畸变，晶界增多能显著提高材料的强度，也可提高材料的塑性和韧性，但是容易发生高温氧化，耐腐蚀性能降低。

细晶强化：通过细化晶粒而使材料强度提高的方法称为细晶强化。

强化材料的方法
之一

(三) 纯铁的同素异构转变

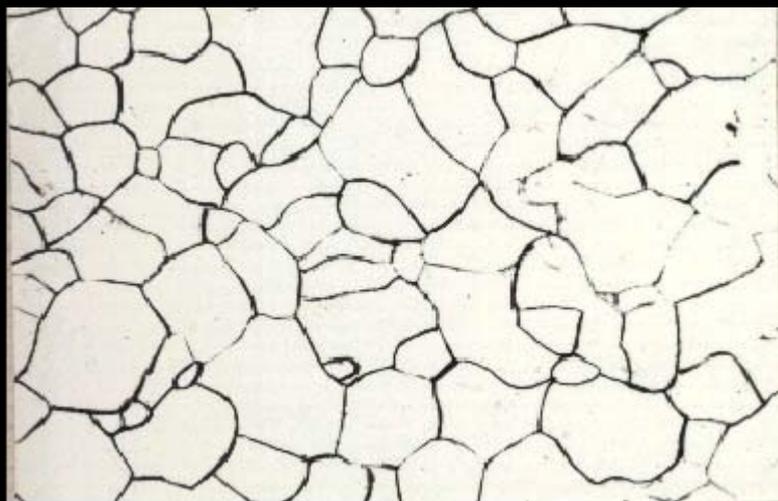
同素异构转变：同一种元素在固态下由于温度变化而发生的晶体结构的变化。

固态铁有三种同素异构体

温度范围(°C)	晶体结构	名称
1394~1538	BCC	δ -Fe
912~1394	FCC	γ -Fe
<912	BCC	α -Fe



三、纯铁的组织 and 性能



材料：工业纯铁
状态：退火
侵蚀：4%硝酸酒精
倍数：100X
组织：等轴状铁素体晶粒



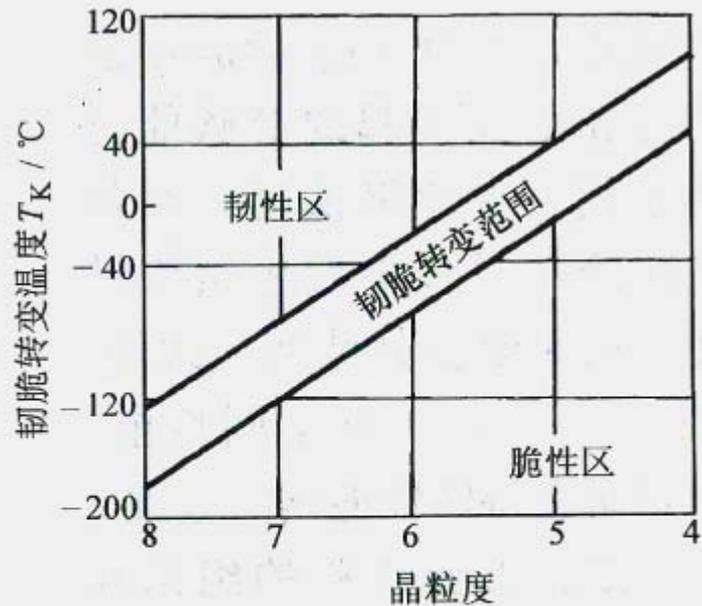
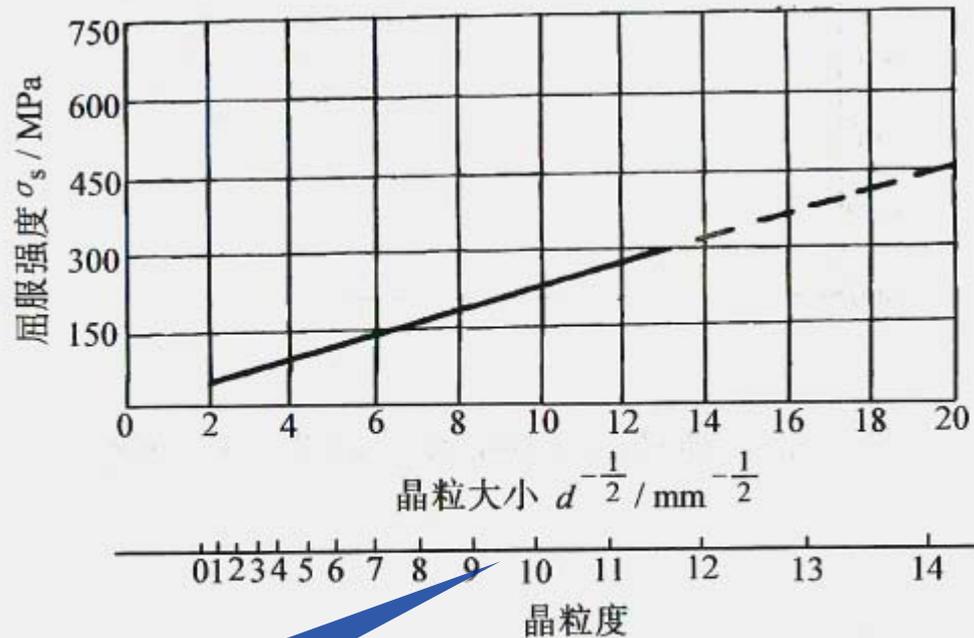
材料：工业纯铁
状态：退火
侵蚀：热染
倍数：200 X
组织：等轴状铁素体（不同的位向表现出不同的色彩）

性能

纯铁的力学性能因纯度及晶粒大小不同有较大差别。

σ_s (MPa)	100~170
σ_b (MPa)	180~230
δ (%)	30~50
Ψ (%)	70~80
a_k (J/cm ²)	160~200
HB	50~80

纯铁塑性、韧性好，但强度、硬度低。



晶粒度级别

图 2-14 纯铁的屈服强度 a) 和韧性 b) 与晶粒大小的关系

晶粒度级别越高，晶粒越细。我国将细晶粒度分为8级

$$\sigma_s = \sigma_o + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Hall-Petch equation

第二节 铁碳合金中的相和组织组成物

- 铁与碳的相互作用
 - 固溶体
 - 化合物
- 铁碳合金中的相和组织组成物
 - 相
 - 组织

(一) 固溶体—铁素体、奥氏体

固溶体

固体溶液，是溶质原子溶入溶剂中所形成的晶体，保持溶剂元素的晶体结构。

固溶体的分类 { 置换固溶体
 { 间隙固溶体

置换固溶体

溶质原子和溶剂原子尺寸相差较小，形成固溶体时溶质原子替换了溶剂晶格中的一部分原子，就形成了置换固溶体。

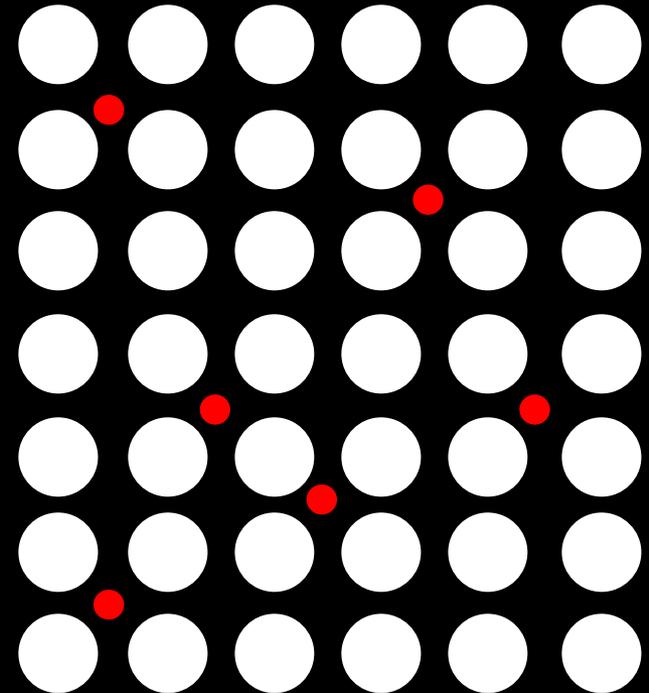
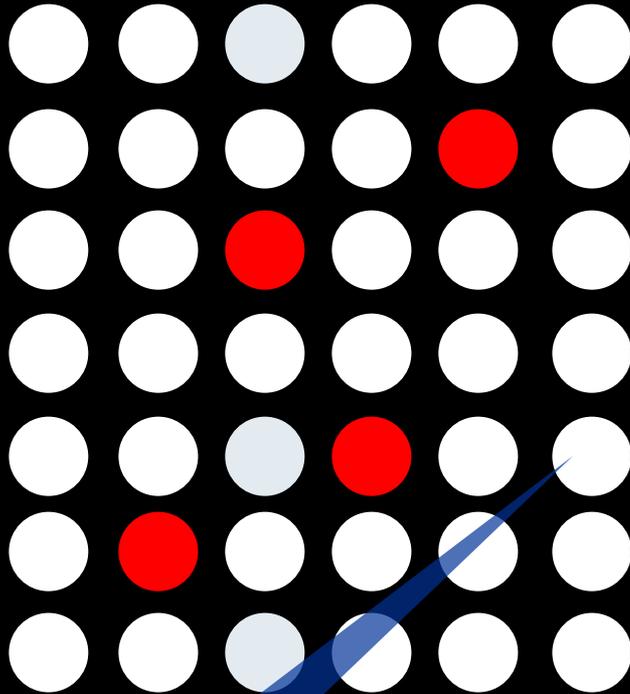
如：Fe与Mn、Si、Al、Cr、Ti、Nb等形成置换固溶体

间隙固溶体

溶质原子和溶剂原子直径相差较大，溶质原子处于溶剂晶体结构的间隙位置上，则形成间隙固溶体。

如：Fe 与 C , N , O , H 形成间隙固溶体

间隙固溶体



置换固溶体



溶剂原子



溶质原子

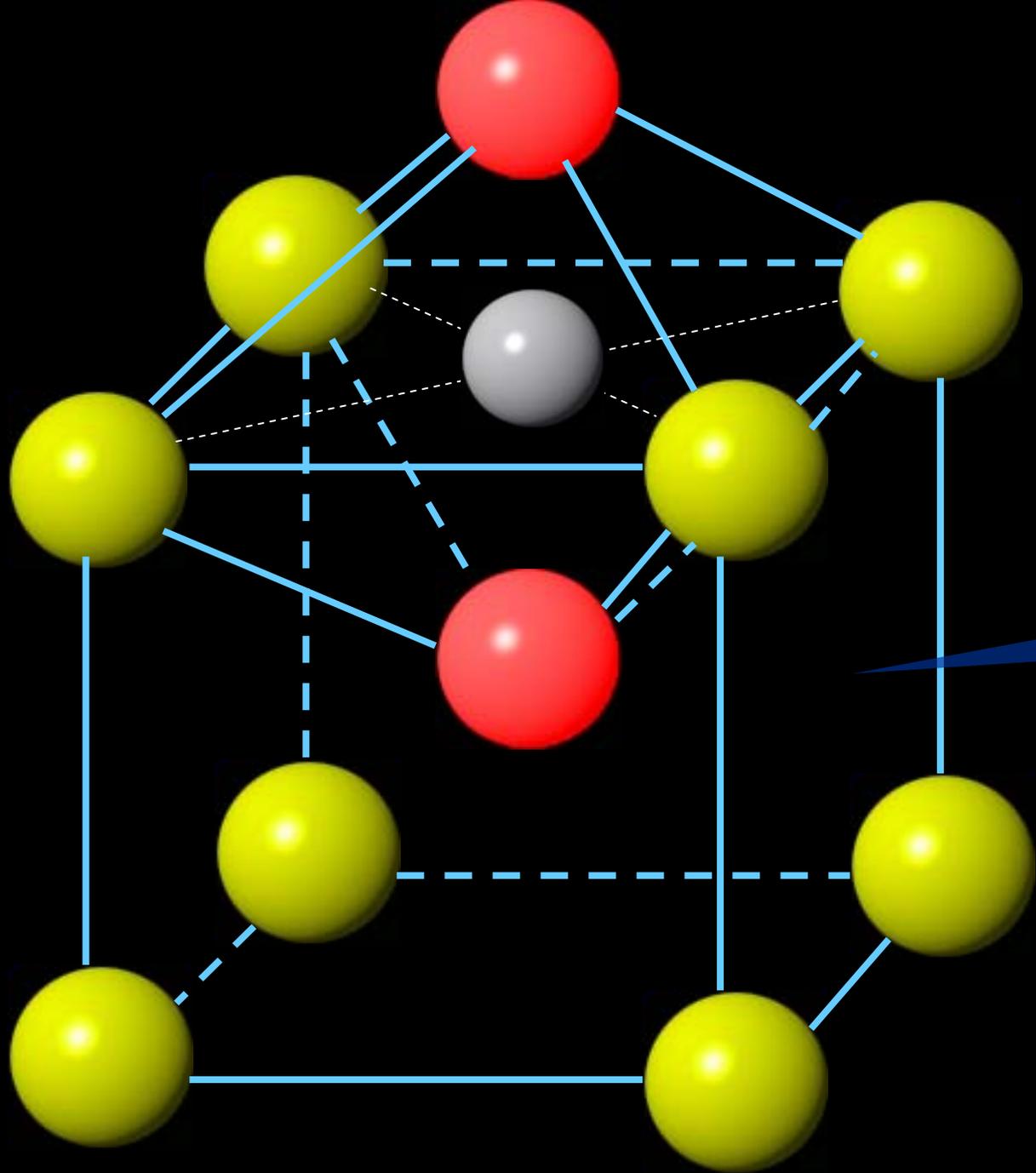
铁与碳形成的固溶体

铁素体

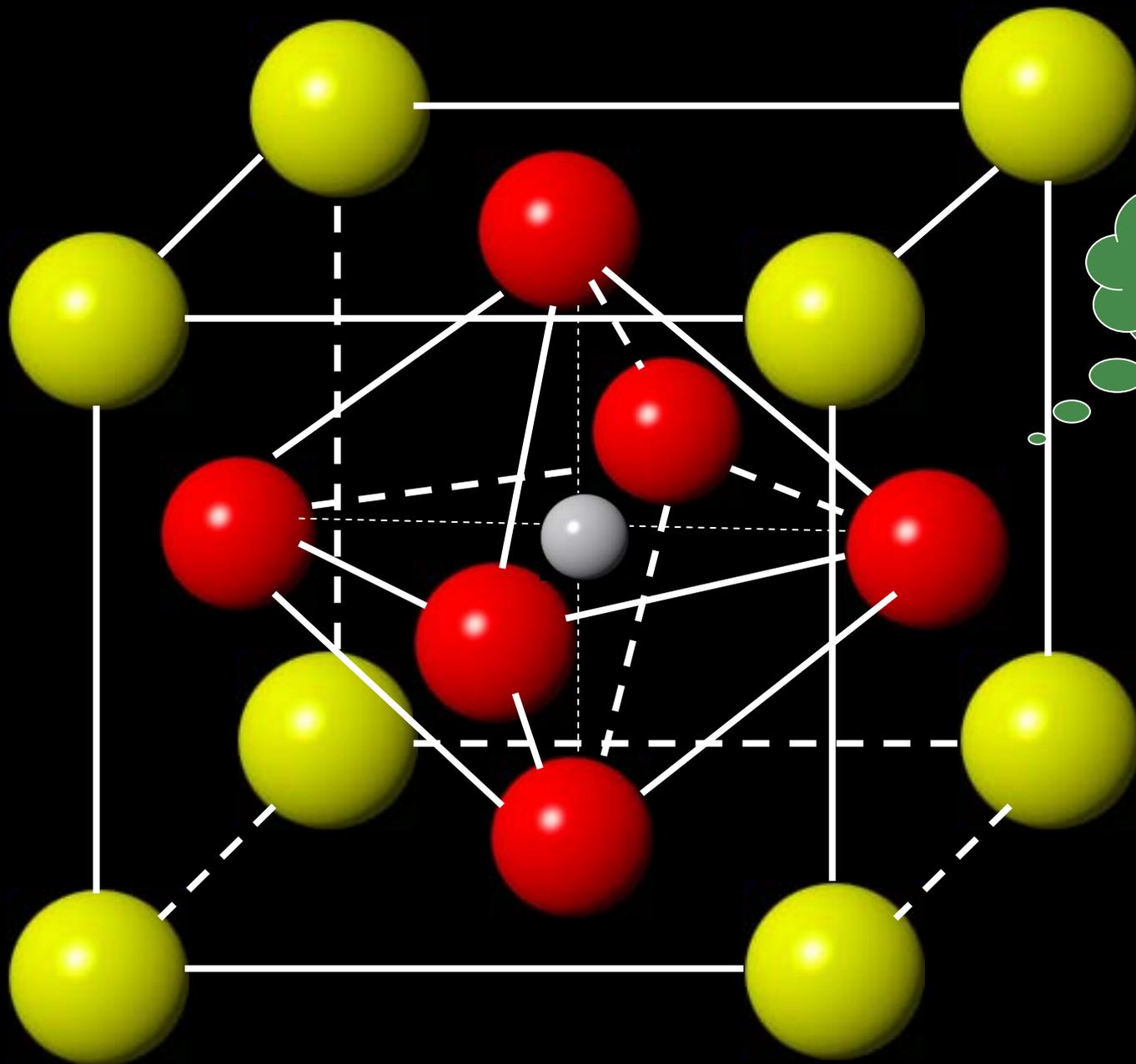
碳溶于 α -Fe 中形成的固溶体称为铁素体，用 α 或者 F 表示。BCC

奥氏体

碳溶于 γ -Fe 中形成的固溶体称为铁素体，用 γ 或者 A 表示。FCC



铁素体



奥氏体

由于FCC的间隙比BCC大，所以 γ 的溶碳能力比 α 大。

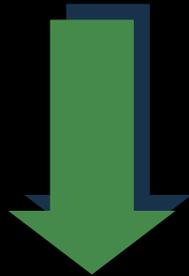
- 2.11%
- 0.0218%



热处理基础之一

固溶体的性能

固溶体的晶体结构与溶剂相同，但溶质原子的溶入会使溶剂的晶格产生畸变



- 强度硬度增加，塑性韧性降低；
- 电阻、矫顽力增加，导电性降低。

强化材料的方法之一

固溶强化

通过溶入某种合金元素形成固溶体而使材料强度增加的现象称为

如，钢中加入Mn, Si可置换F中的Fe形成合金铁素体，使其强度提高

(二) 化合物—渗碳体

当碳在铁中的含量超过了其溶解度极限时，便会形成化合物。 Fe_3C ，渗碳体。

化合物的性能特点

晶体结构和性能不同于其组成元素，晶体结构复杂，熔点高、硬而脆。

渗碳体

- 渗碳体具有一种复杂的正交晶体结构，熔点高 1227°C ， $w_c=6.69\%$ ；
- 渗碳体能提高合金的硬度、耐磨性，会降低合金的塑性和韧性。
- 渗碳体中的Fe可以被Mn, Cr, W, Mo等金属原子置换而形成合金渗碳体

渗碳体对铁碳合金性能的影响取决于其形态

以层片状或者球形均匀分布在组织中，能提高合金的强度；

以连续网状、粗大的片状或者作为基体出现时，急剧降低材料的强度、塑韧性。

二、铁碳合金中的相和组织组成物

相

系统中具有同一聚集状态、同一化学成分、同一结构并以界面相互隔开的均匀组成部分。

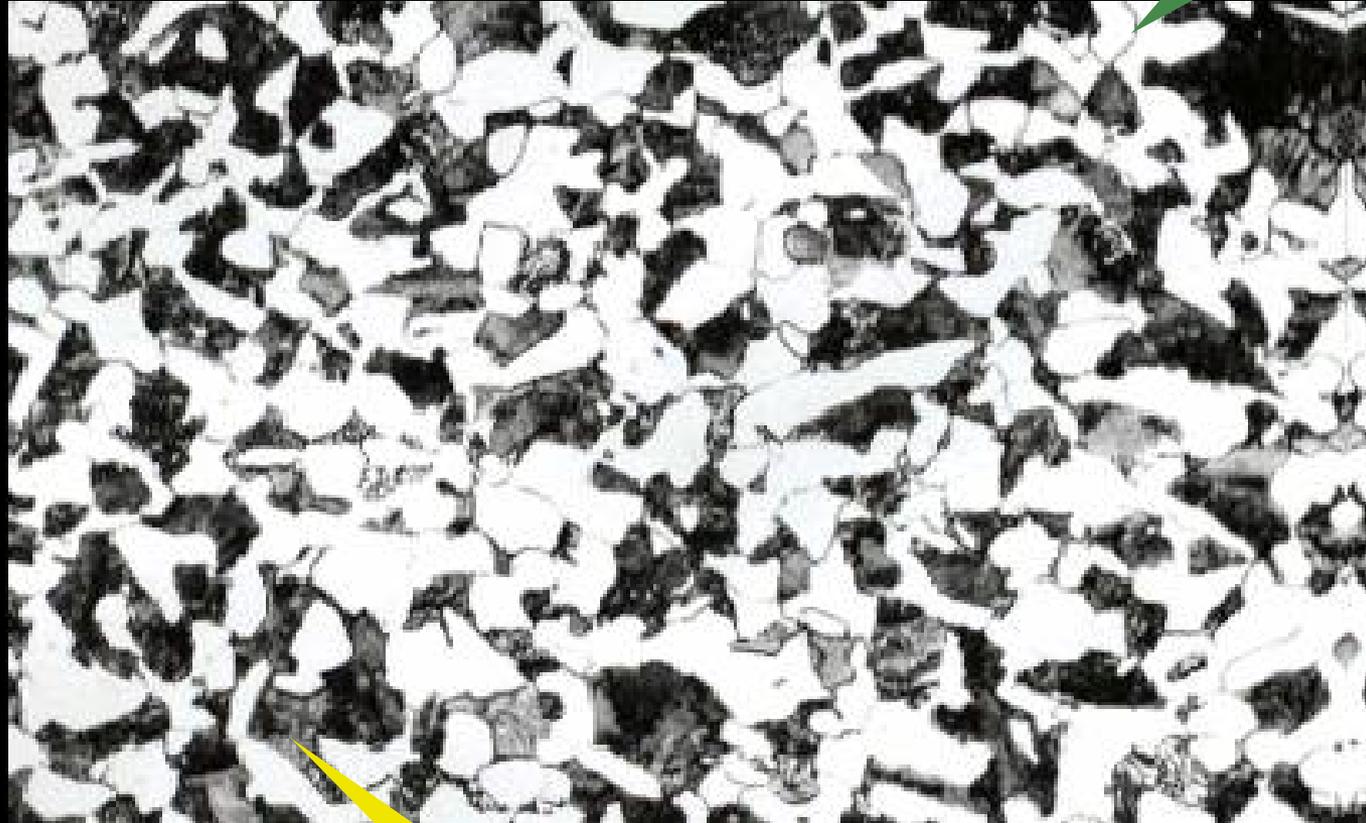
铁碳合金中：铁素体、奥氏体和渗碳体

组织组成物

是构成显微组织的独立部分，可以是单相，也可一是两相或者多相混合物。

铁碳合金中的组织组成物

- 铁素体
- 奥氏体
- 渗碳体
- 珠光体：F与 Fe_3C 片层相间的两相混合物
- 莱氏体：A与 Fe_3C 两相混合物



F

P

第三节 Fe-Fe₃C相图

本节要点

- Fe-Fe₃C相图中重要的点、线和相区
- Fe-Fe₃C相图中的重要转变及产物
- 应用Fe-Fe₃C相图分析典型成分铁碳合金结晶过程
- 分析室温下得到的相和组织组成物
- 会用杠杆定律计算室温下相和组织组成物的质量分数
- 碳对铁碳合金平衡组织和性能的影响

一、相图的基本概念

表示合金在缓慢冷却的平衡状态下相或者组织与温度、成分间关系的图形，又称状态图或平衡图。

相图的分类（根据组元数量分）

二元相图（两个组元配成的合金体系）

三元相图（三个组元配成的合金体系）

组元

组成合金的最基本的独立的物质。

组元可以是纯元素，亦可以是化合物。

碳钢：Fe、C

黄铜：Cu、Zn

MgO-Al₂O₃-SiO₂系陶瓷：MgO、Al₂O₃、SiO₂

(一) 相图的建立

测定不同成分合金的转变温度，将所有的开始转变点连接起来，将所有的转变结束点连接起来。

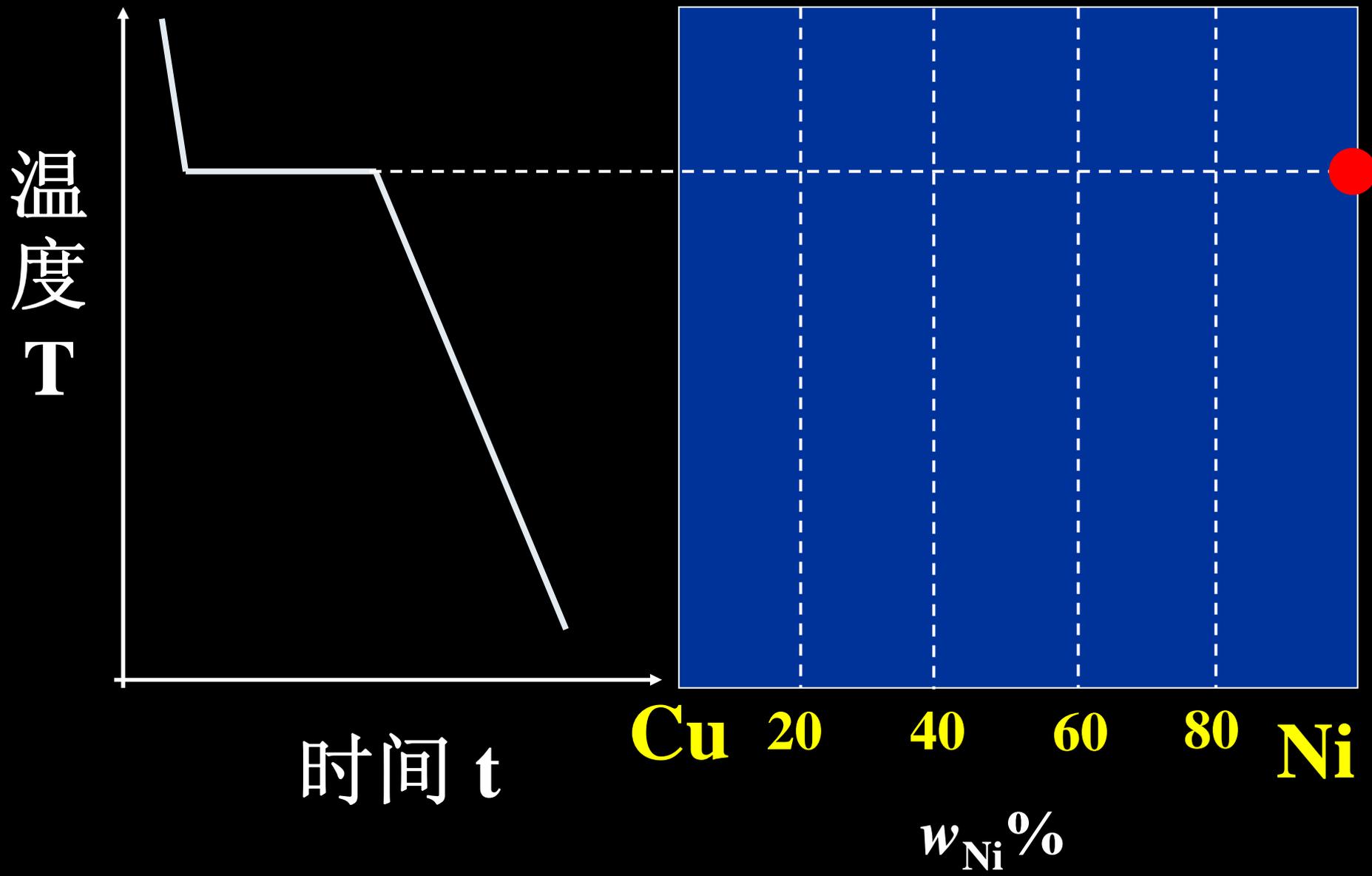
- 计算方法
- 实测方法
 - ✓ 热分析法
 - ✓ 金相分析法
 - ✓ 硬度测定法
 - ✓ X射线结构分析法
 - ✓ 膨胀法
 - ✓ 磁性法
 - ✓

相图建立步骤

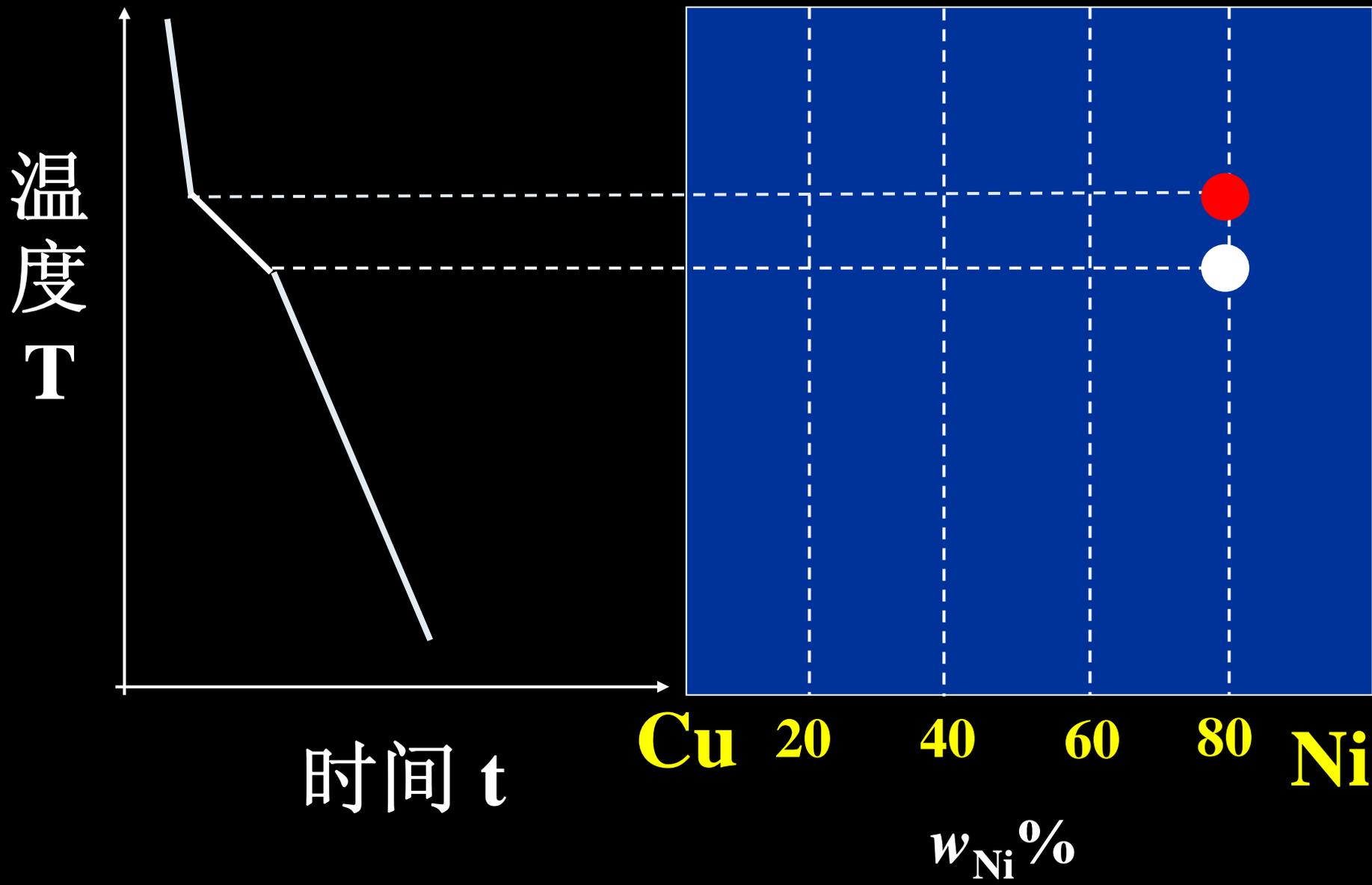
- 配制合金
- 熔化后冷却测冷却曲线
- 确定临界点并标在相图中
- 汇总

以热分析法为例介绍Cu-Ni合金相图的建立过程

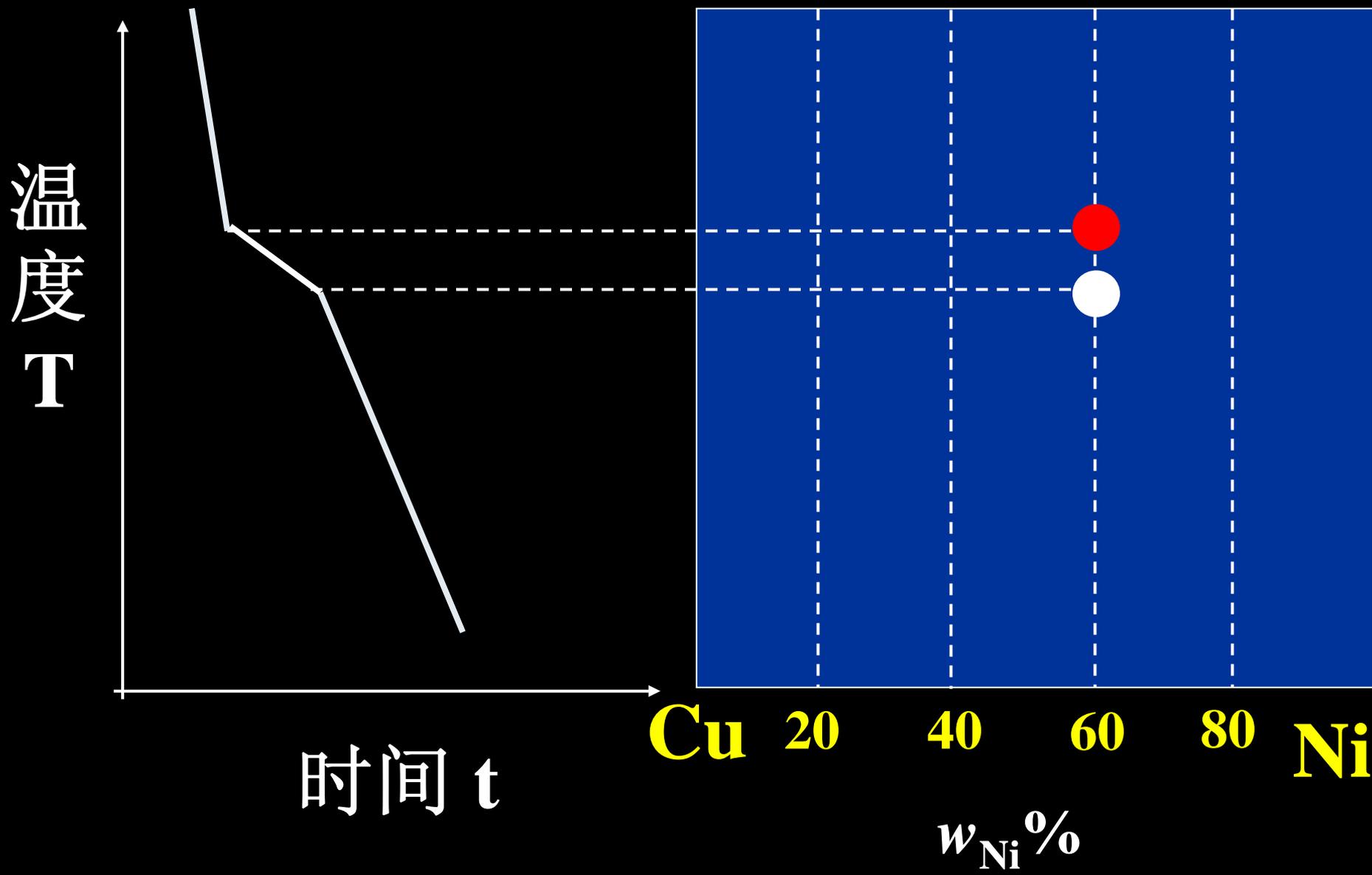
纯Ni的冷却曲线



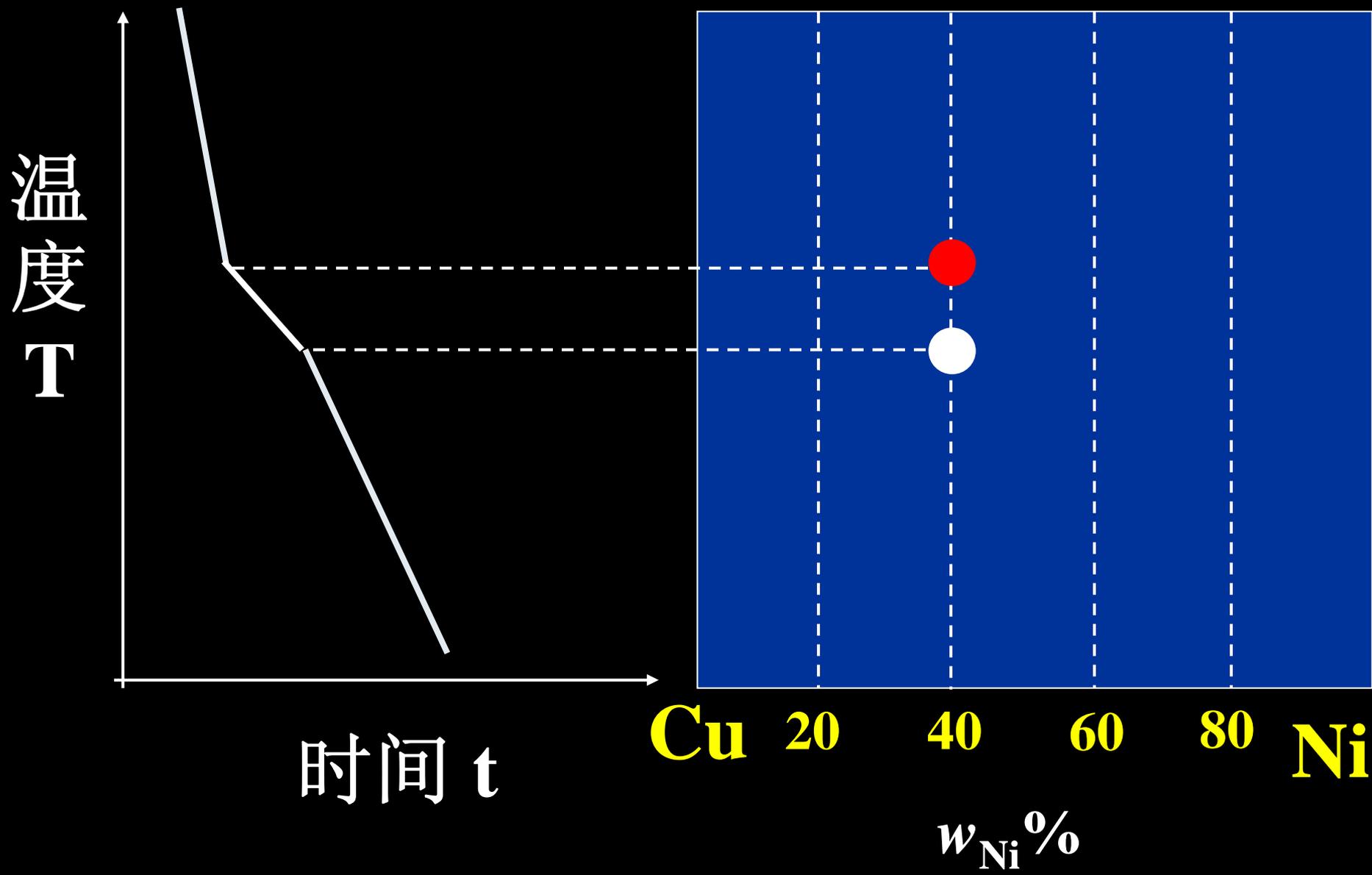
80%Ni的冷却曲线



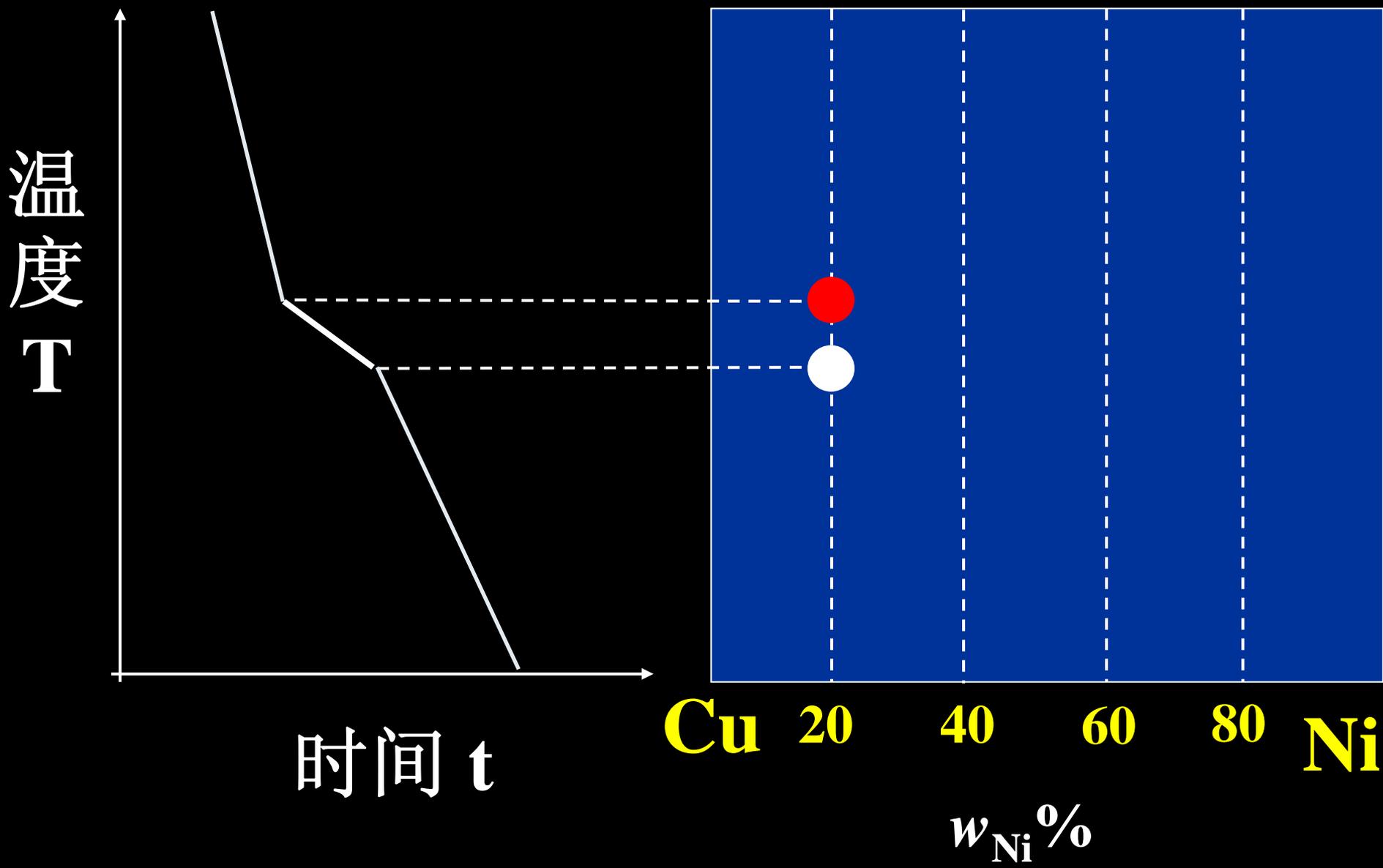
60%Ni的冷却曲线



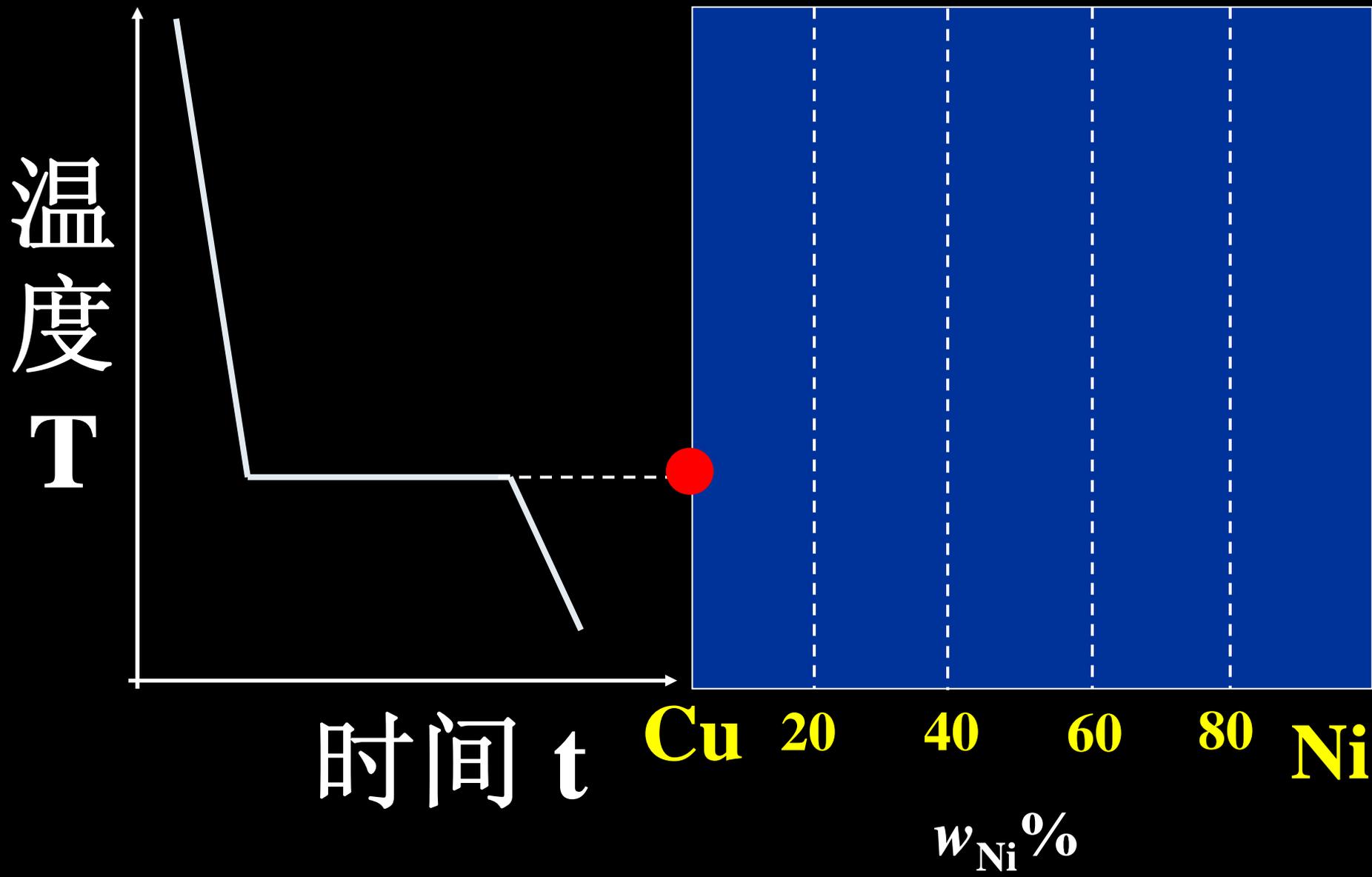
40%Ni的冷却曲线



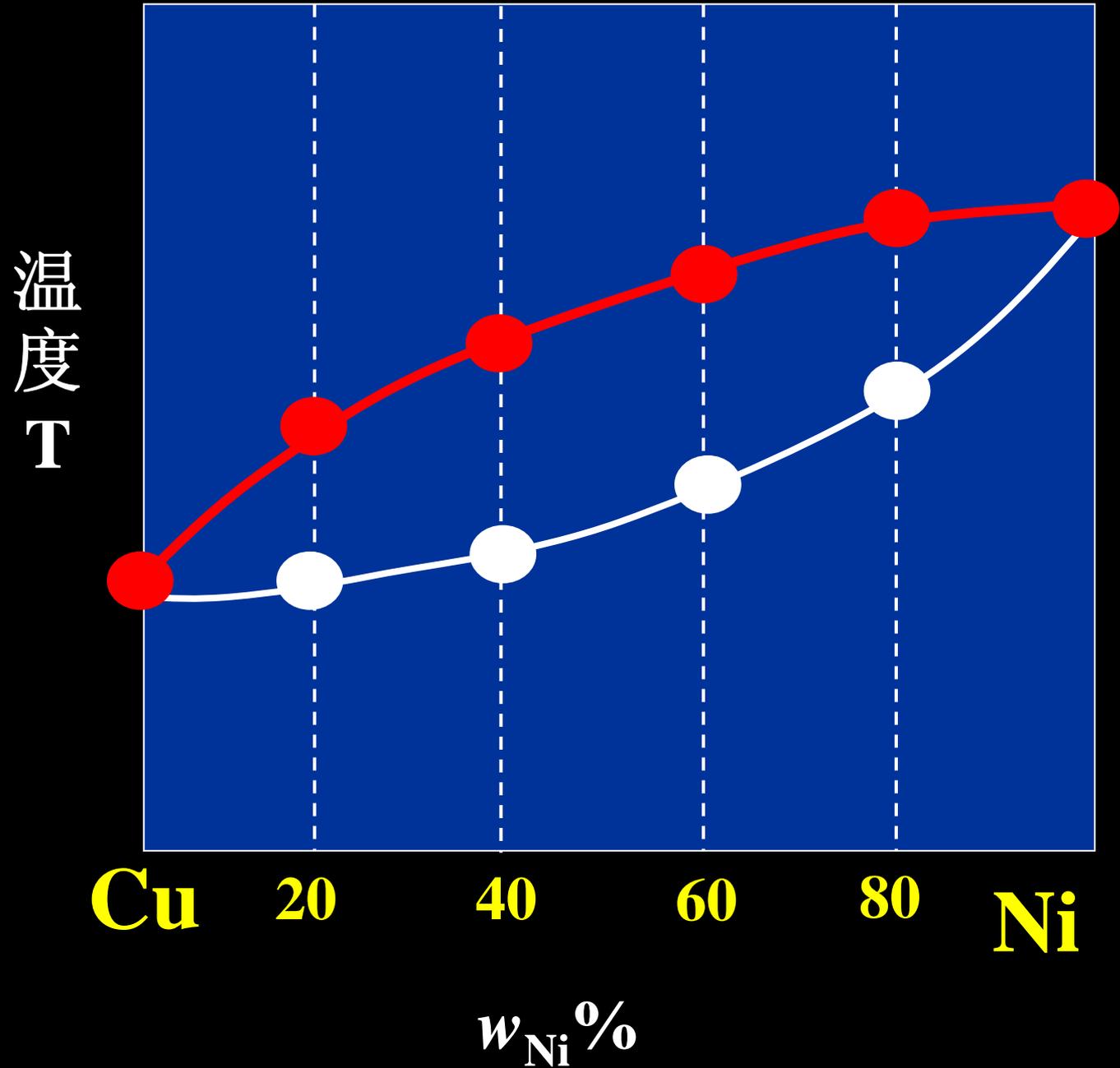
20%Ni的冷却曲线

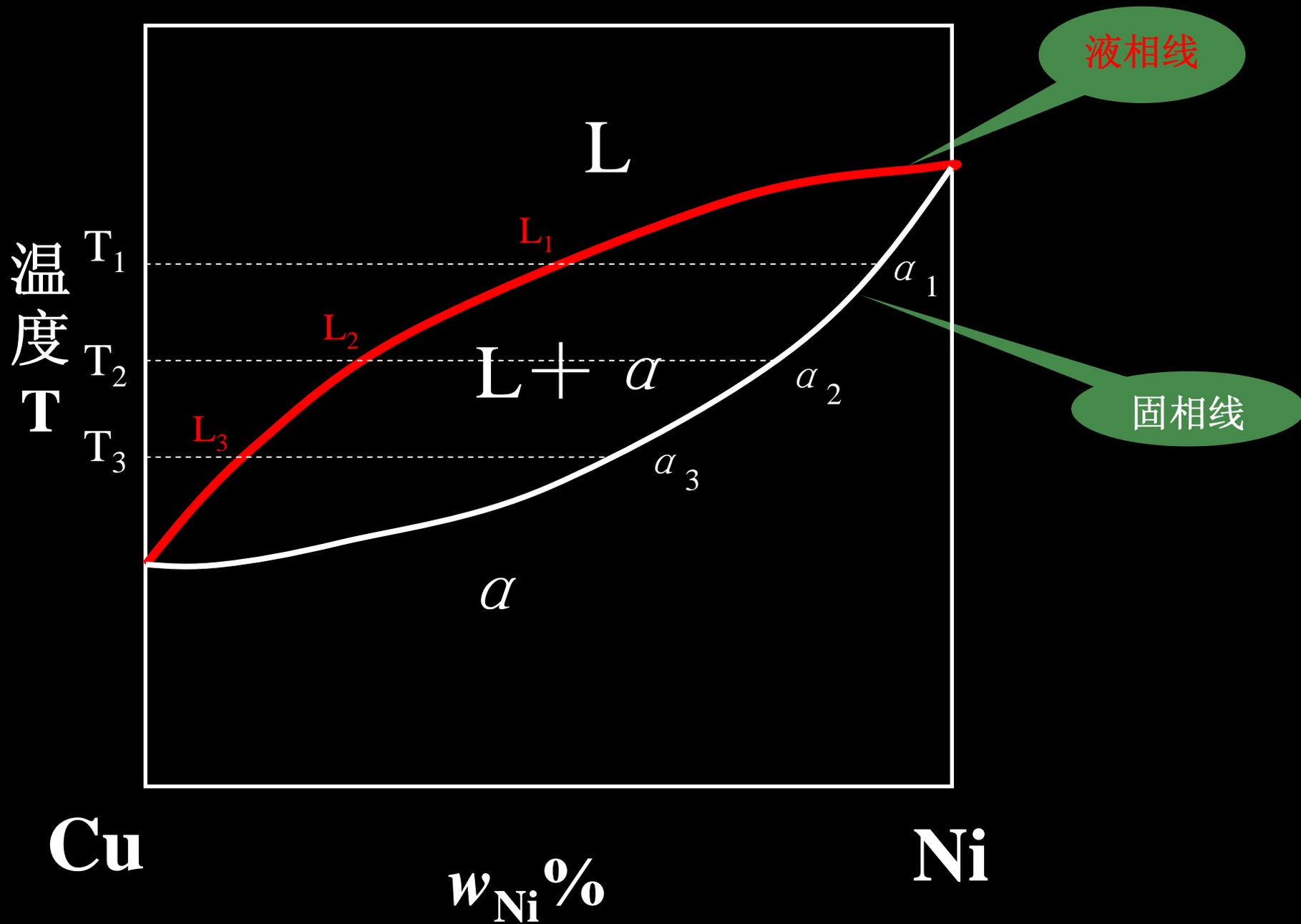


纯Cu的冷却曲线



汇总



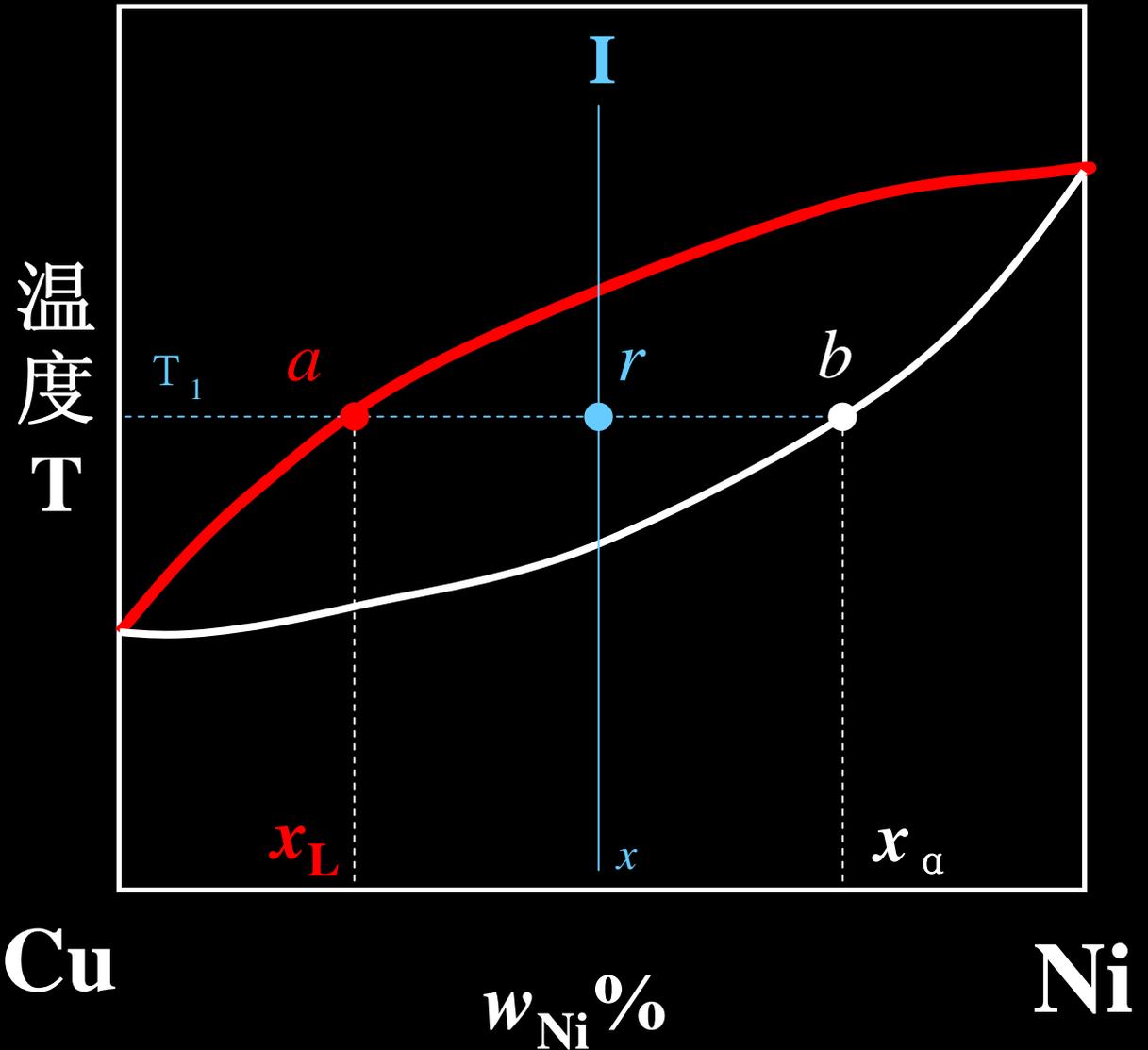


- 在缓慢冷却的条件下，液固两相是平衡的，即随着温度的变化，液相的成分沿液相线变化，固相成分沿固相线变化。
- 在冷却速度较快时，液相的成分可以均匀化，沿着液相线变化，而固相成分会偏离固相线，使先结晶和后结晶的固溶体的成分不同，这种成分不均匀现象称为显微偏析、晶内偏析或枝晶偏析。

(二) 杠杆定律

确定两相区中，两相的相对质量的方法

I合金在 T_1 温度为L+ α 两相，两相的相对质量各是多少？



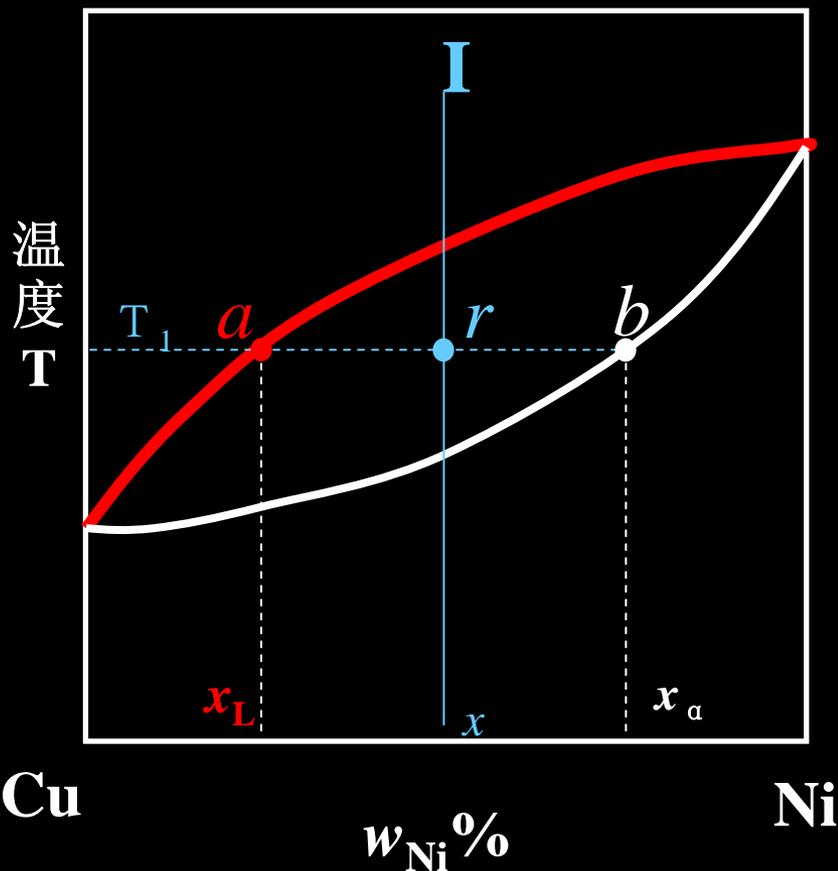
设 T_1 温度下I合金的总质量为 M ，液、固相质量分别为 M_L 和 M_α ，则有：

$$\begin{cases} M_L + M_\alpha = M \\ M_L \cdot x_L + M_\alpha \cdot x_\alpha = M \cdot x \end{cases}$$

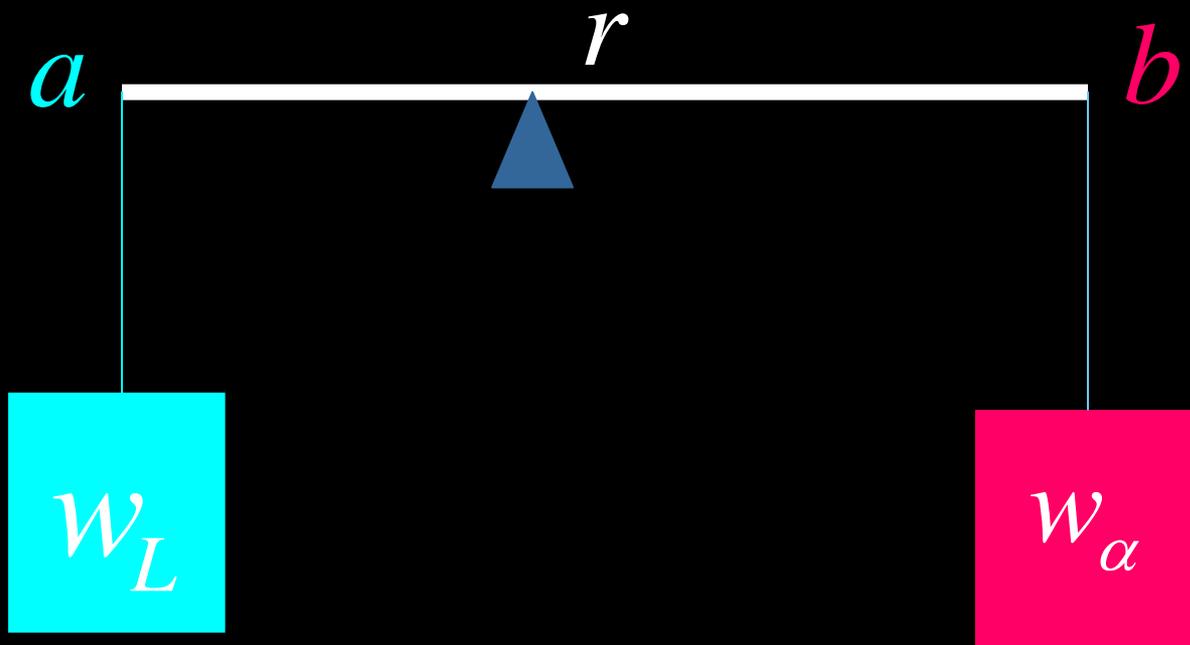
解得

$$w_L = \frac{M_L}{M} = \frac{x_\alpha - x}{x_\alpha - x_L} = \frac{rb}{ab}$$

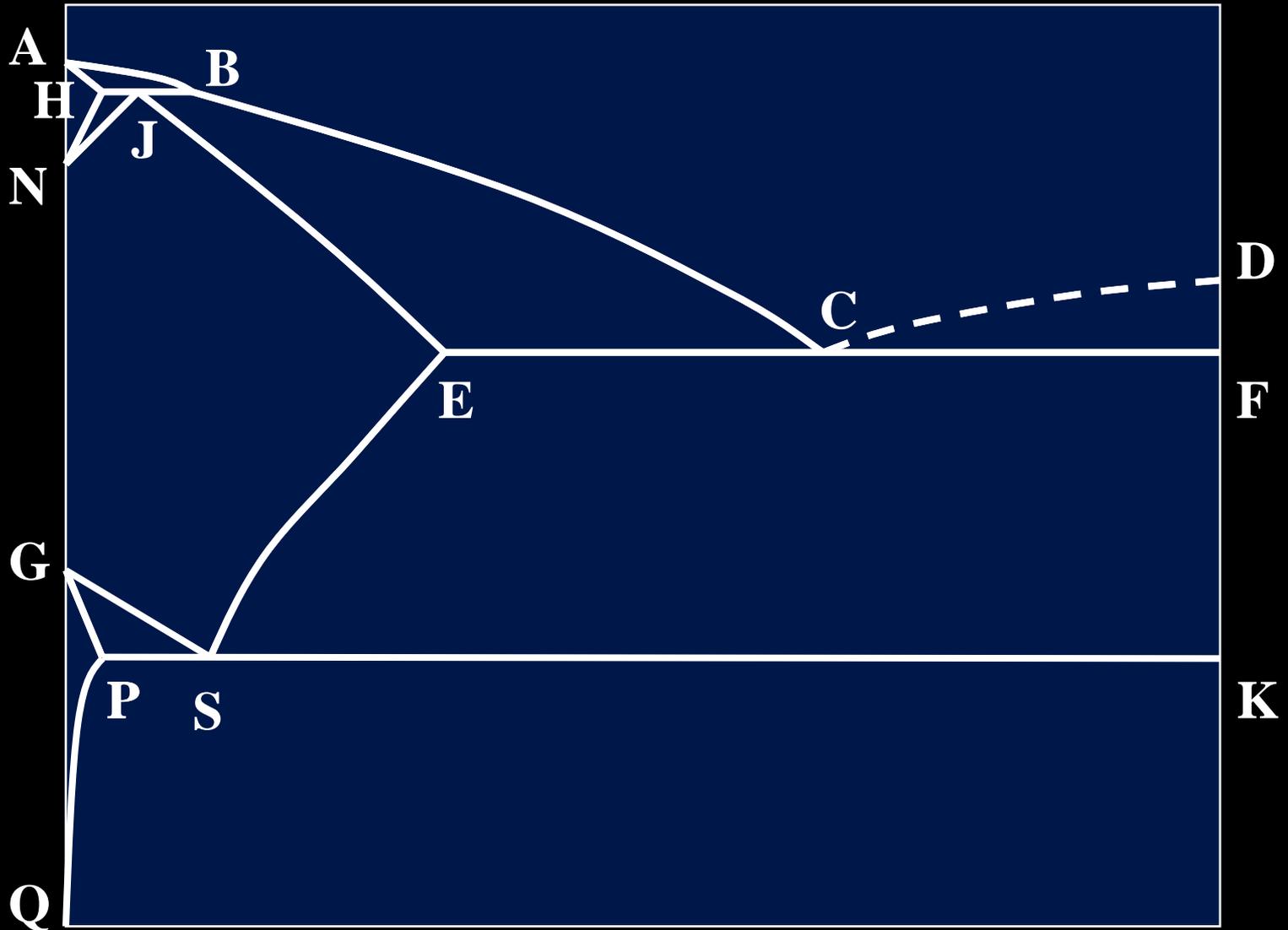
$$w_\alpha = \frac{M_\alpha}{M} = \frac{x - x_L}{x_\alpha - x_L} = \frac{ar}{ab}$$



$$\frac{w_L}{w_\alpha} = \frac{\overline{rb}}{\overline{ar}} \quad \text{即} \quad w_L \cdot \overline{ar} = w_\alpha \cdot \overline{rb}$$



二、Fe-Fe₂C相图分析



共有14个点

点	温度 $^{\circ}\text{C}$	w_{C} (%)	说明
A	1538	0	纯铁的熔点
B	1495	0.53	包晶反应时L的浓度
C	1148	4.3	共晶点
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	C在 γ -Fe中的极限溶解度
F	1148	6.69	渗碳体
G	912	0	同素异构转变点

点	温度 $^{\circ}\text{C}$	w_{C} (%)	说明
H	1495	0.09	C在 δ -Fe中的极限溶解度
J	1495	0.17	包晶点
K	727	6.69	渗碳体
N	1394	0	同素异构转变点
P	727	0.02	C在 α -Fe中的极限溶解度
Q	20	0.0008	室温C在 α -Fe中的溶解度
S	727	0.77	共析点

相区

- 相图中共有5个单相：

L、 δ 、 γ 、 α 、 Fe_3C

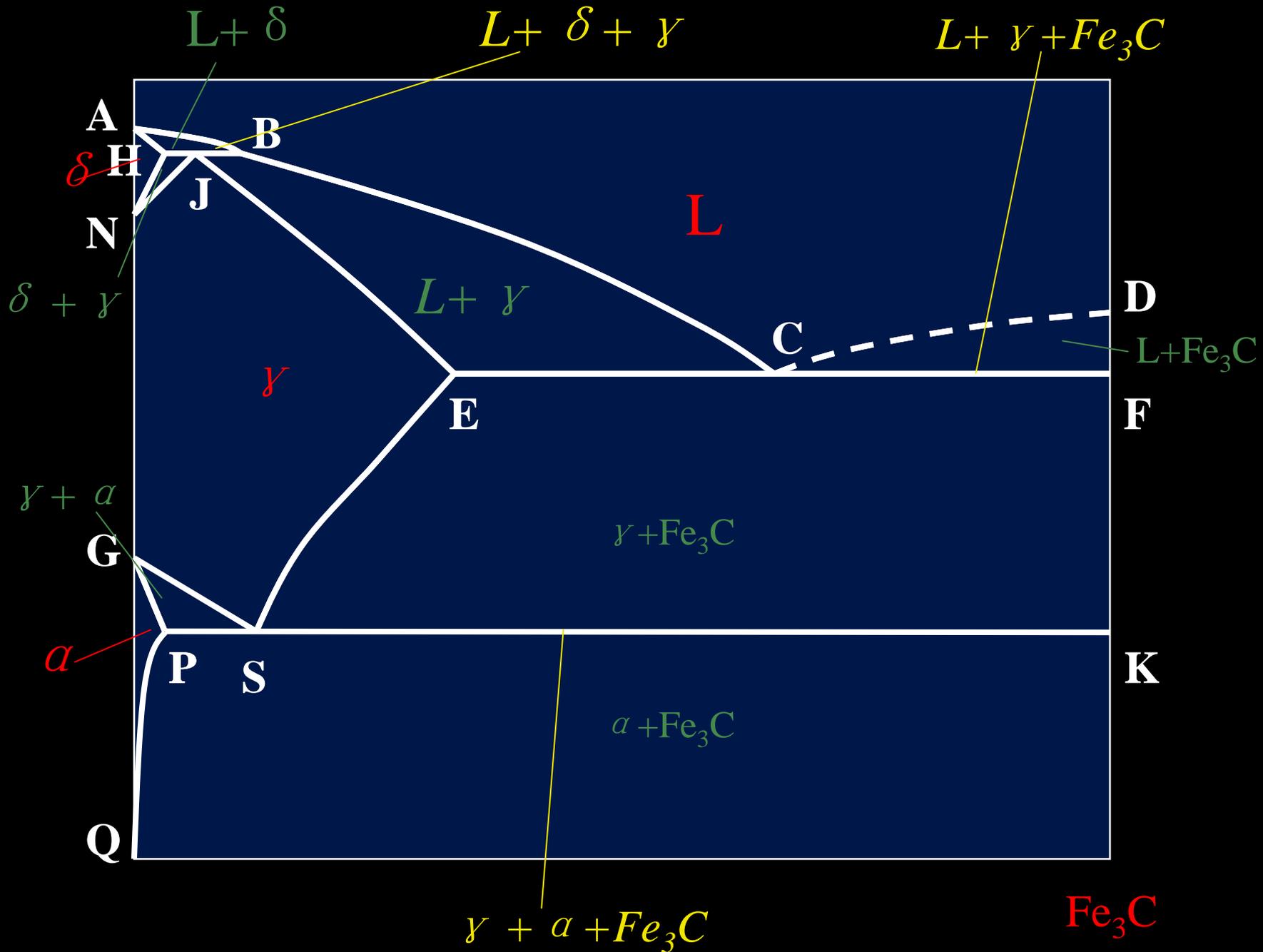
- 7个双相区：

L + δ 、L + γ 、L + Fe_3C 、 δ + γ 、 γ + α 、

α + Fe_3C 、 α + Fe_3C

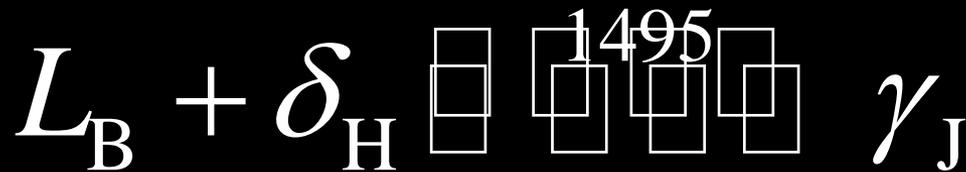
- 3条三相共存线：

HJB（包晶线）、ECF（共晶线）、PSK（ A_1 线）



(二) 恒温转变

包晶转变：HJB线

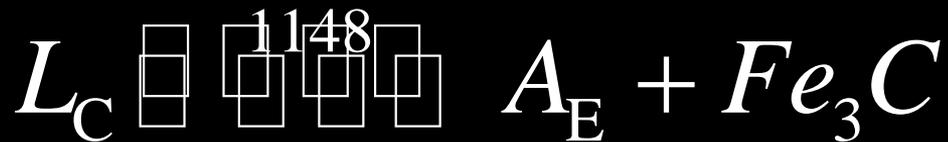


- 由一定成分的液相和一定成分的固相生成另一个一定成分新固相地反应称**包晶反应**。

$w_C \% \in (0.09, 0.53)$ 均会产生包晶反应。

- J点成分的铁-碳合金冷却至1495°C，体系中的液相和 δ 相在转变过程中恰好全部消耗完，得到单一的 γ_J 相。
- $0.09 < w_C \% < 0.17$ 的合金，液相消耗完后，还有剩余的 δ 相，包晶转变完成后的产物为：
 $\gamma + \delta$
- $0.17 < w_C \% < 0.53$ 的合金，液相有剩余，包晶转变完成后的产物为：
 $\gamma + L$

共晶转变： ECF线

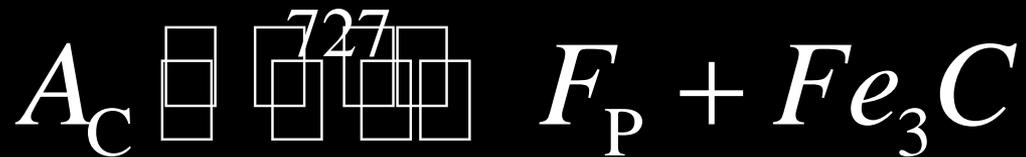


共晶产物为E点成份的A与渗碳体的机械混合物，称**莱氏体Ledeburite (Ld)**，冷却至室温的莱氏体称**变态莱氏体（或低温莱氏体）**，用**Ld'**表示。

$$\frac{w_A}{w_{Fe_3C}} = \frac{\overline{CF}}{\overline{EC}} \approx 1.1$$

$w_C > 2.11\%$ 的合金均会发生共晶反应。

共析转变：PSK线

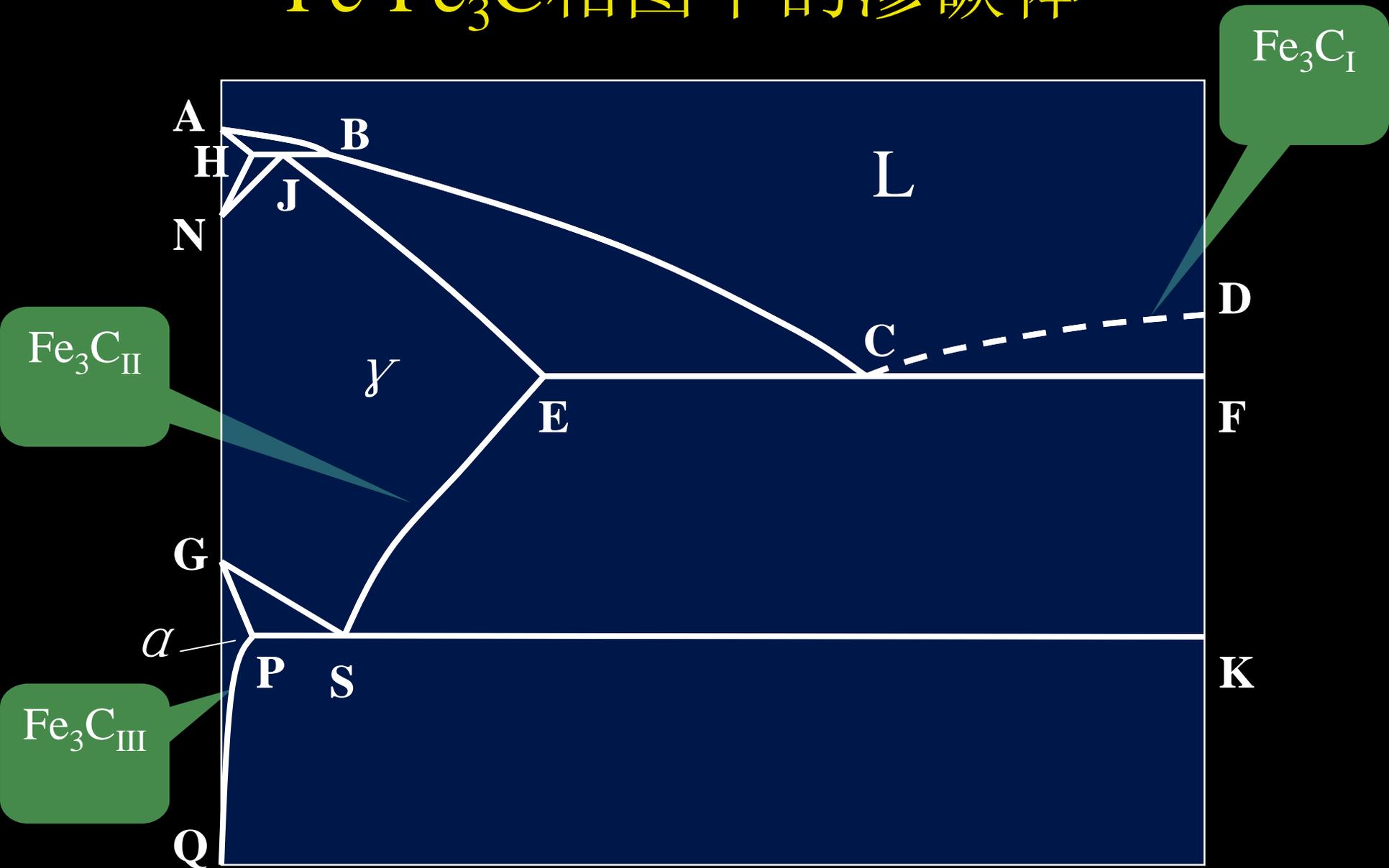


共析产物为铁素体与渗碳体的机械混合物，称珠光体Pearlite用P表示。该线亦称A₁线。

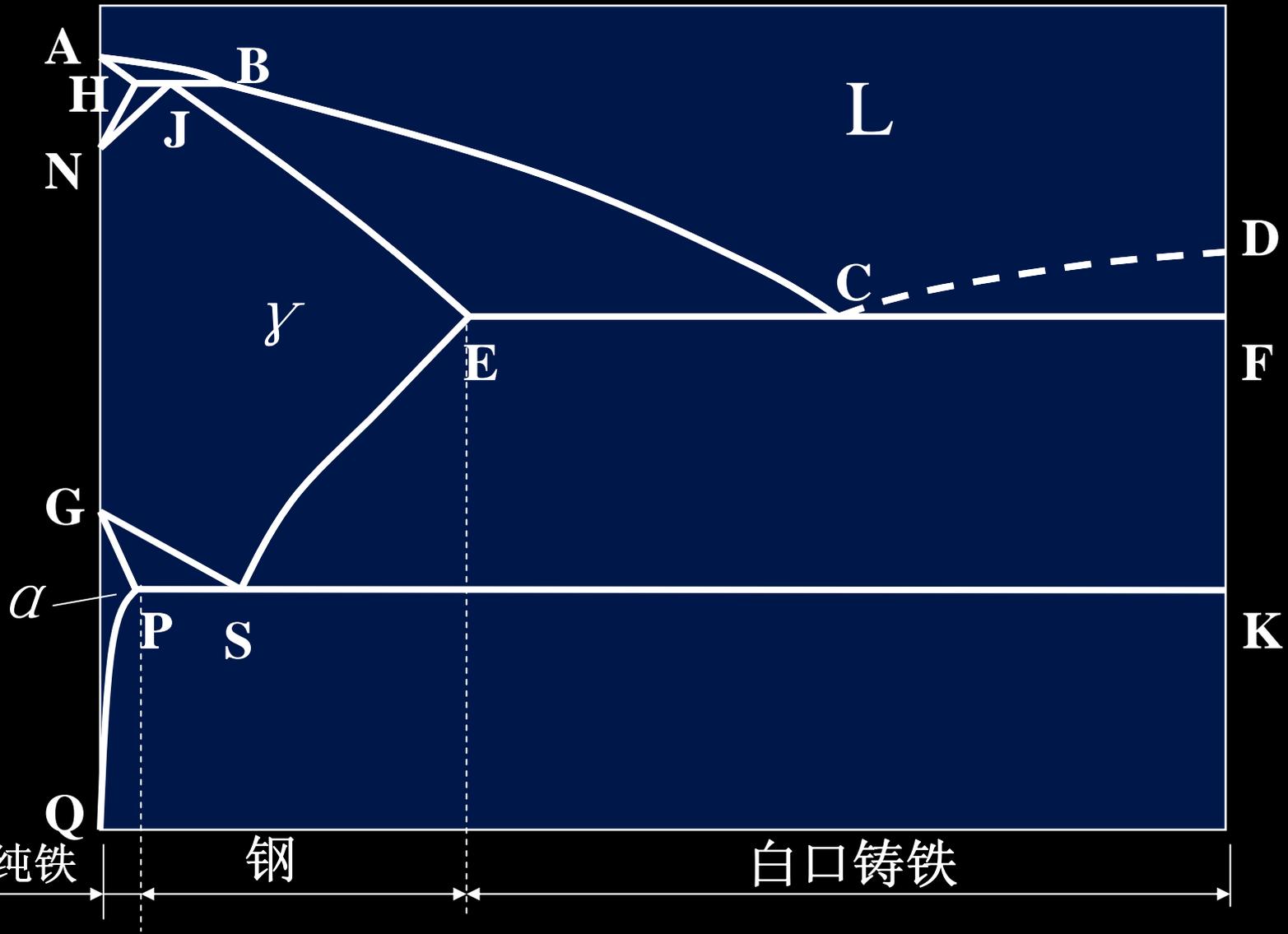
$$\frac{w_{Fe_3C}}{w_F} = \frac{\overline{PS}}{\overline{SK}} \approx \frac{1}{8}$$

含碳量大于0.2%的铁碳合金都会发生共析转变，即室温下有P组织。

Fe-Fe₃C相图中的渗碳体



三、典型铁碳合金结晶过程分析



工业纯铁

$$w_C < 0.0218\%$$

钢

亚共析钢 $w_C \%$ (0.02, 0.77)

共析钢 $w_C \% = 0.77$

过共析钢 $w_C \%$ (0.77, 2.11)

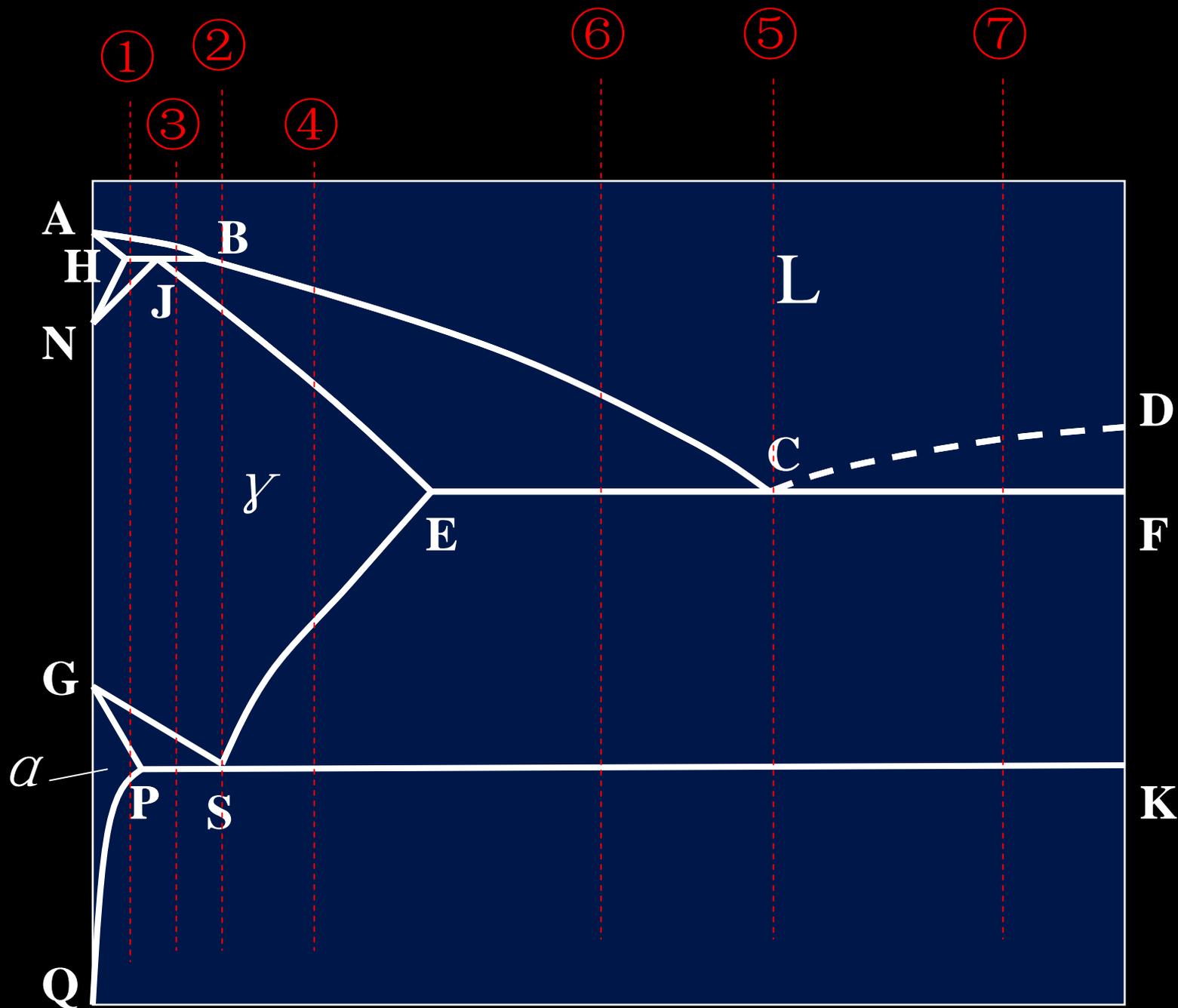
铸铁

亚共晶白口铁 $w_C \%$ (2.11, 4.3)

共晶白口铁 $w_C \% = 4.3$

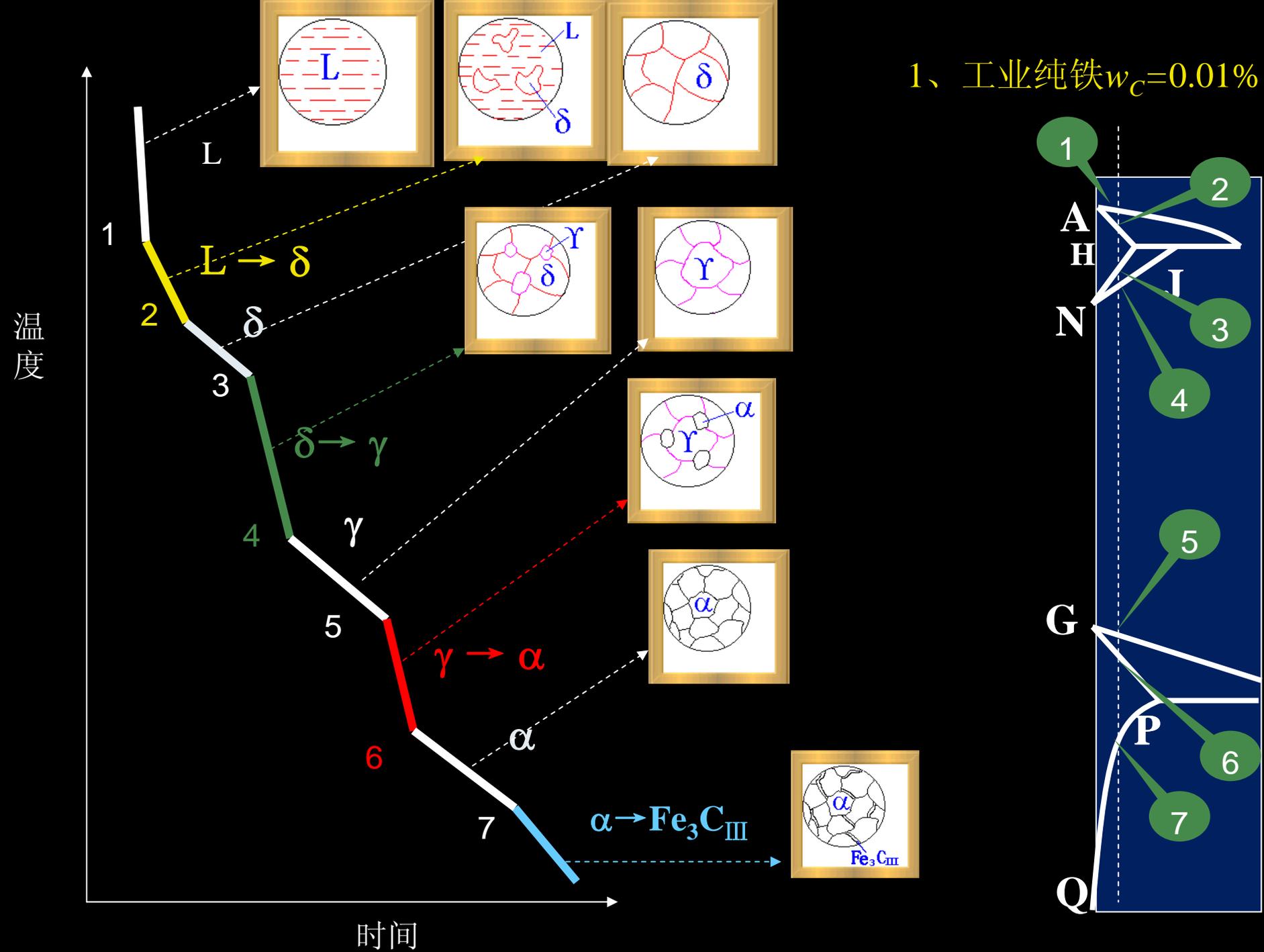
过共晶白口铁 $w_C \%$ (4.3, 6.69)

七种典型合金



工业纯铁 结晶过程 分析

1、工业纯铁 $w_C=0.01\%$

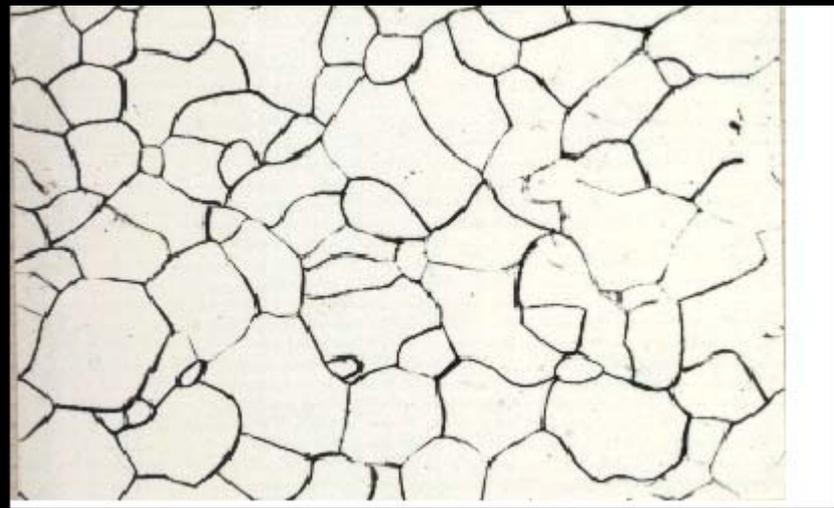


❖ 0.01%C的工业纯铁组织

- 室温组织是 F + Fe₃C_{III}
- 组织特点： 在缓慢冷却条件下，Fe₃C_{III}以断续沿 F 晶界析出。
- Fe₃C_{III}相对量为：

$$W_{Fe_3C_{III}} = \frac{0.01 - 0}{6.69 - 0} \times 100\% \cong 0.15\%$$

工业纯铁的室温组织

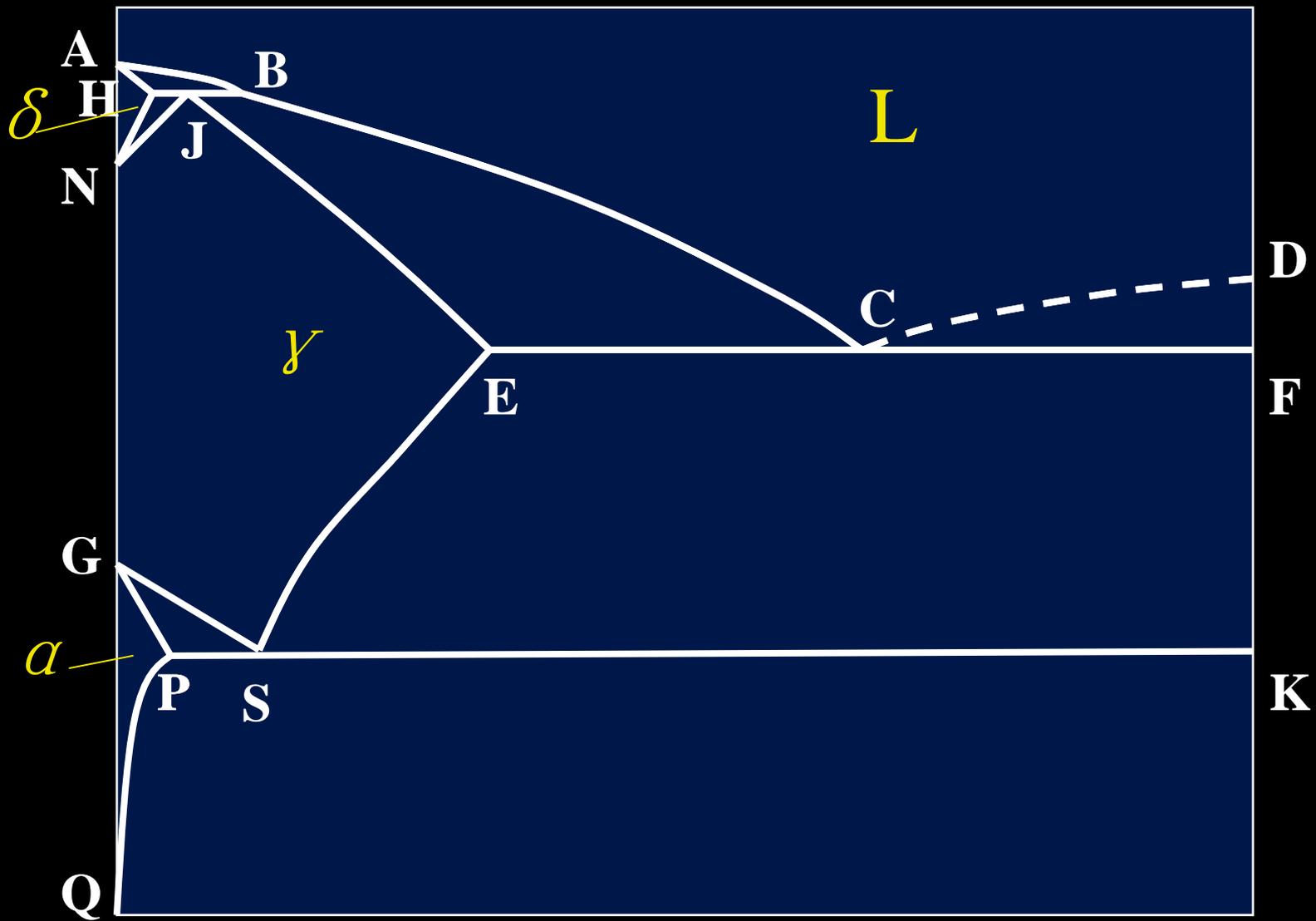


Fe_3C_{III} 含量随 w_C 增加而增加, 当 $w_C=0.0218\%$ 时, Fe_3C_{III} 含量达最大值

$$w_{Fe_3C_{III}} \Big|_{Max} = \frac{0.0218 - 0}{6.69 - 0} \cong 0.3\%$$

复习

- Fe-Fe₃C相图
 - 点
 - 线
 - 相区
- 工业纯铁的结晶过程分析
 - 相
 - 组织组成物

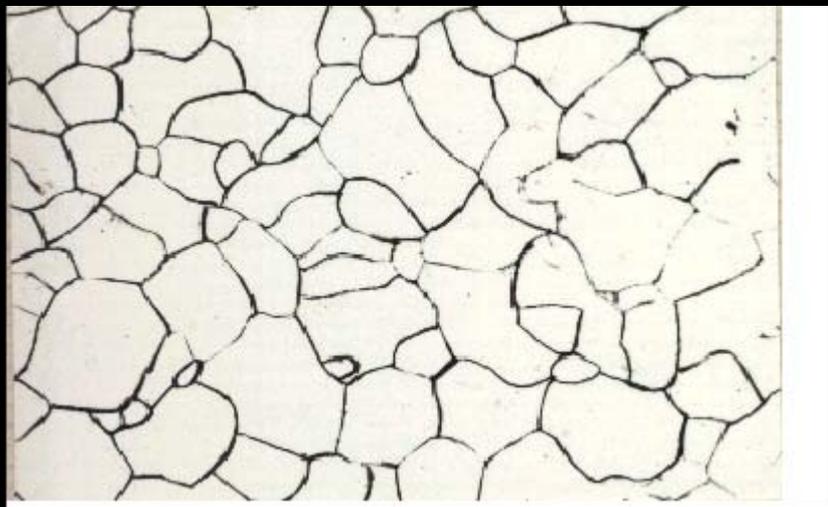


工业纯铁

室温相： $F + Fe_3C$

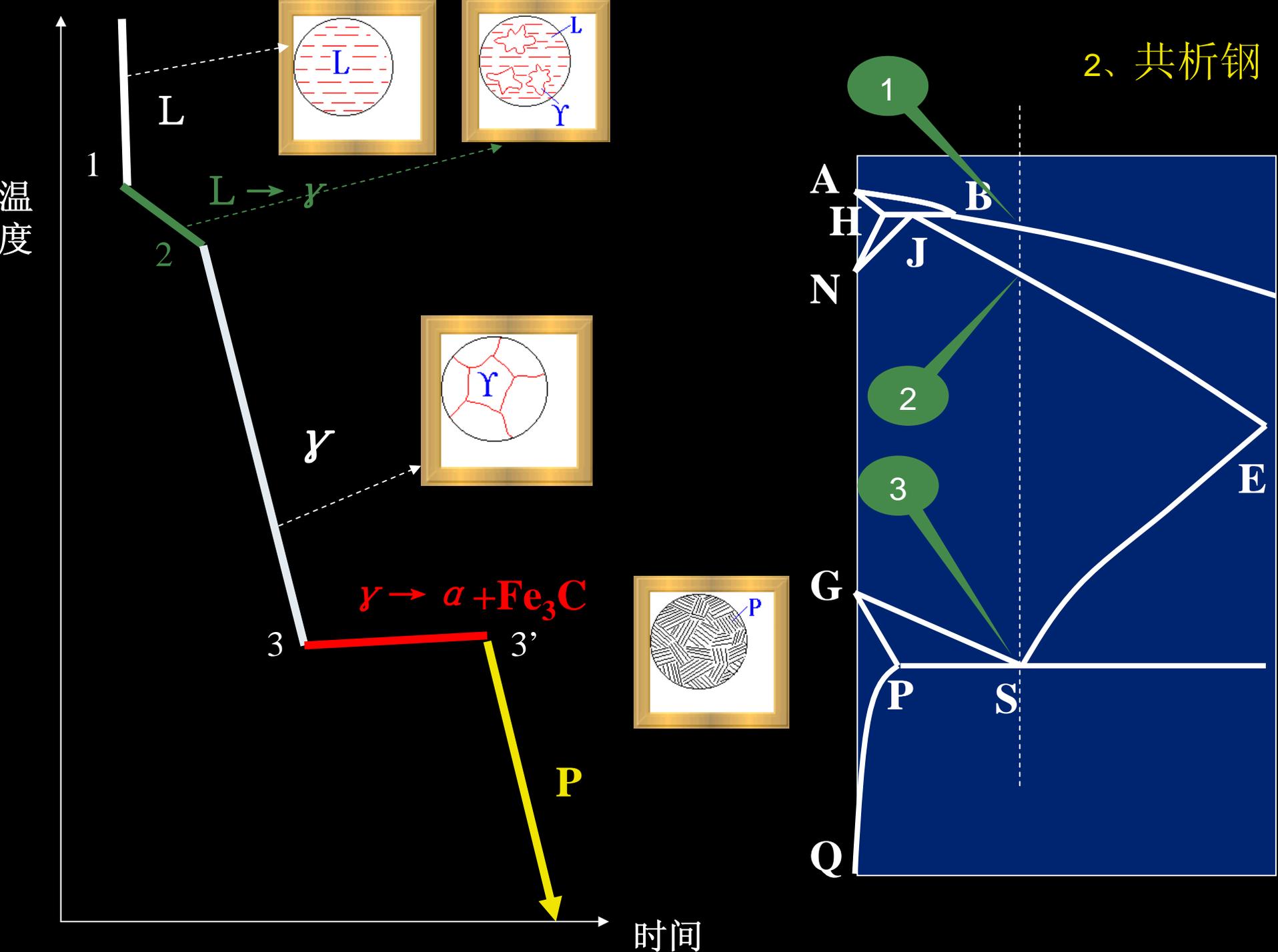
室温组织： $F + Fe_3C_{III}$

组织特点： 在缓慢冷却条件下， Fe_3C_{III} 以断续沿 F 晶界析出。

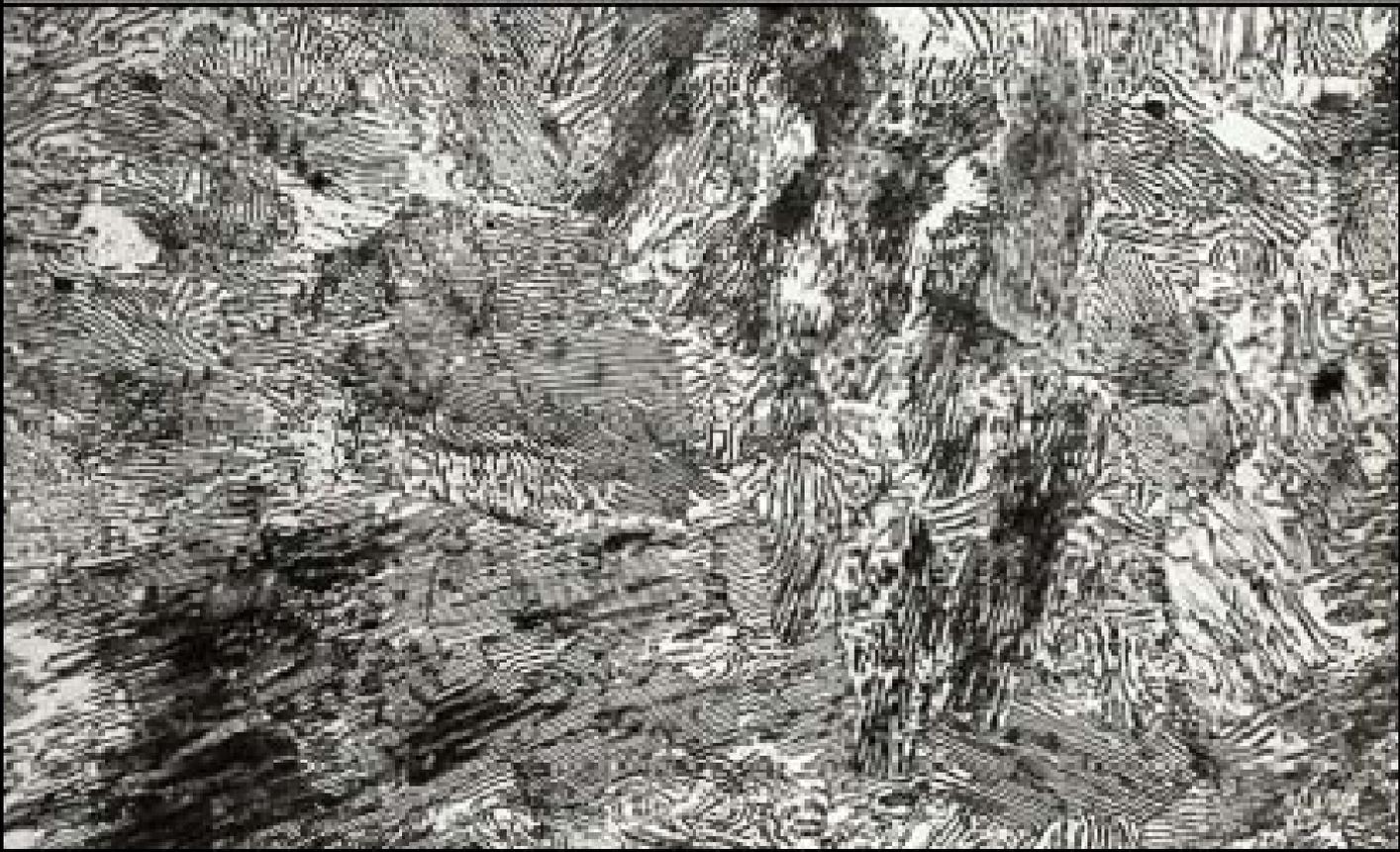


钢的结晶 过程分析

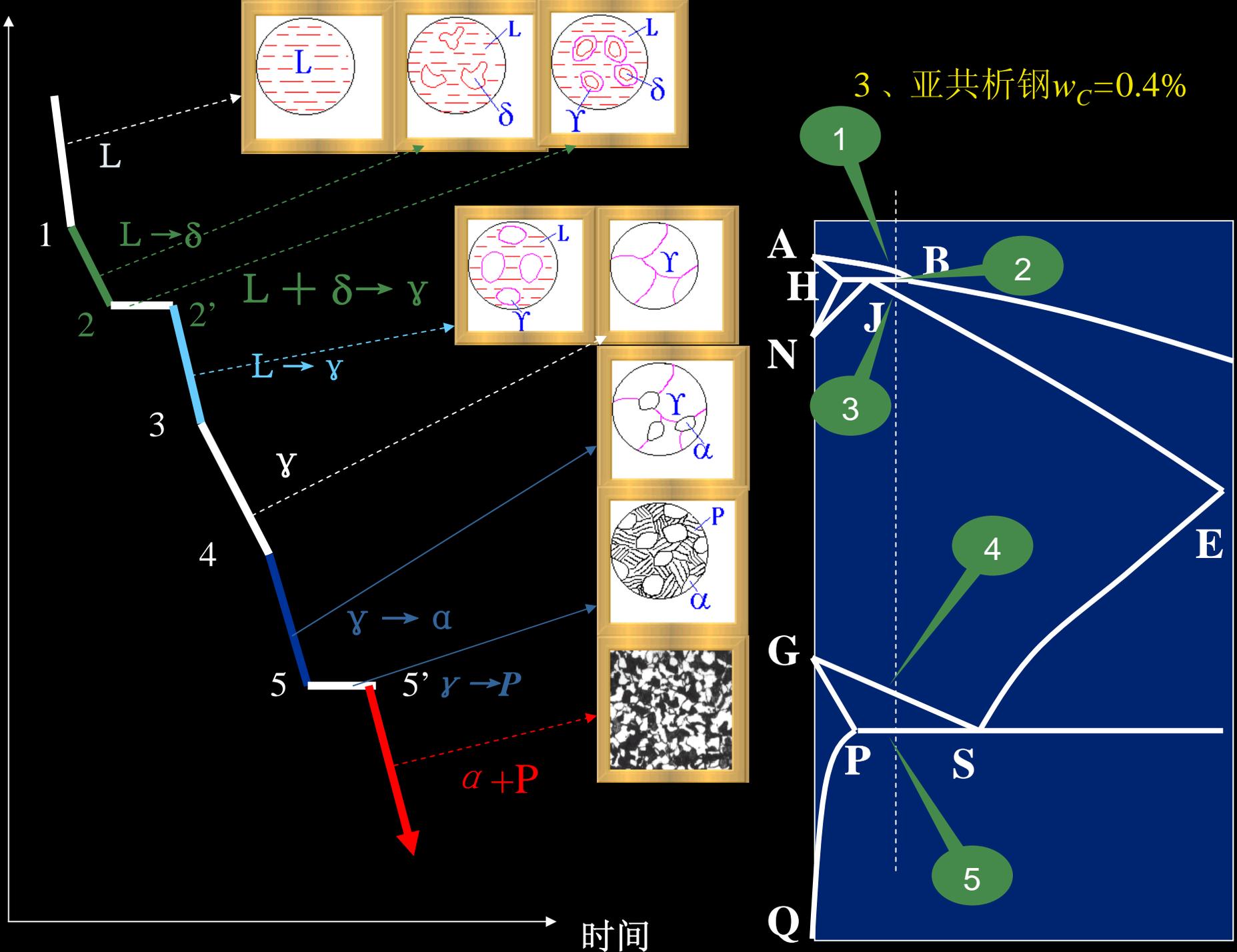
2、共析钢



共析钢的组织为 P，是 F 和 Fe_3C 的机械混合物。



温度



- 亚共析钢的室温组织



- 亚共析钢的室温相



α

P

相分数、组织分数

室温下有 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 两个相

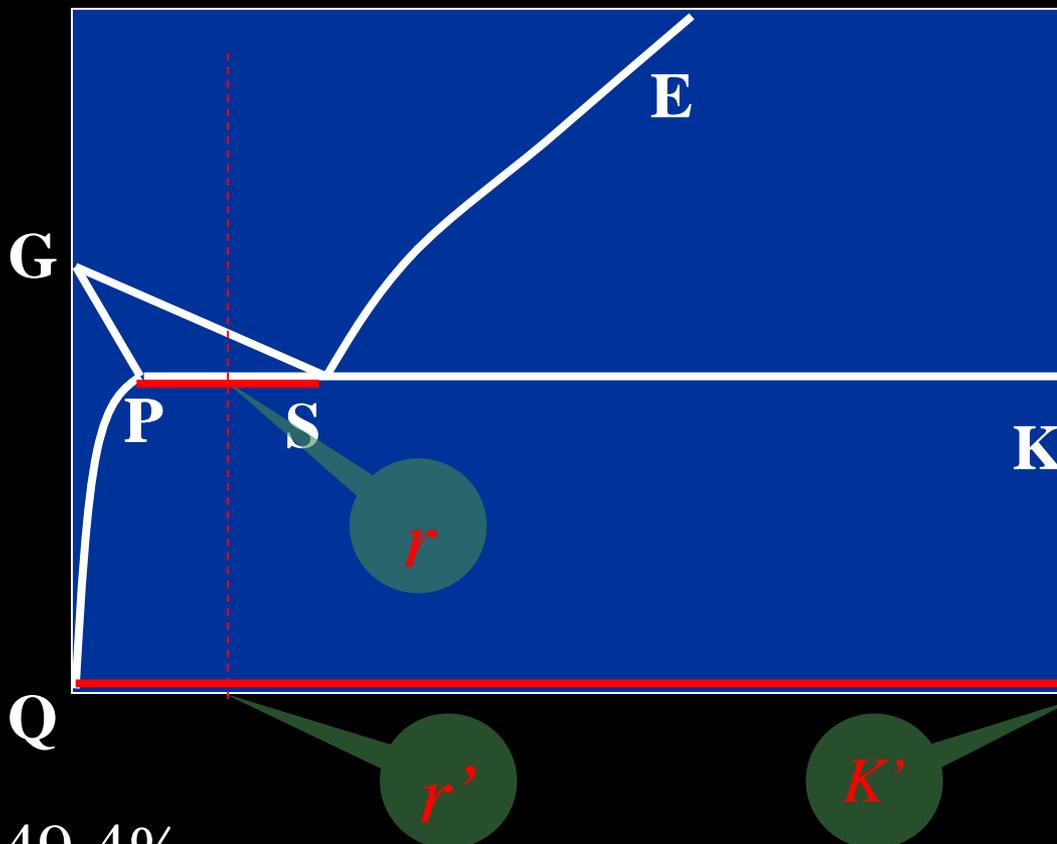
$$w_{\alpha} = \frac{\overline{r'K'}}{\overline{QK'}} = \frac{6.69 - 0.4}{6.69 - 0} \cong 94\%$$

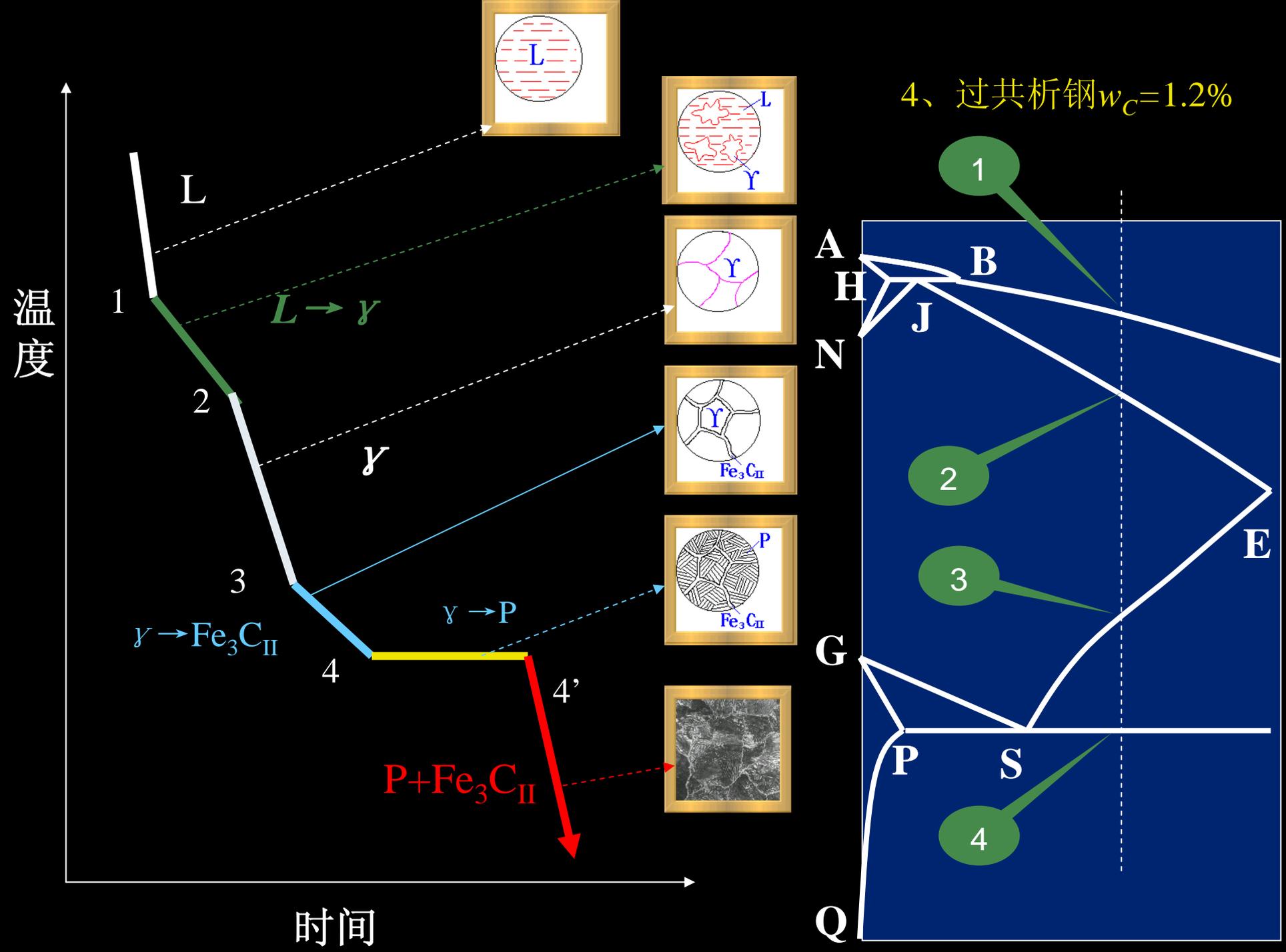
$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{\overline{Qr'}}{\overline{QK'}} = \frac{0.4 - 0}{6.69 - 0} \cong 6\%$$

室温下有 $\alpha + \text{P}$ 两种组织

$$w_{\alpha} = \frac{\overline{rS}}{\overline{PS}} = \frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.0218} \cong 49.4\%$$

$$w_{\text{P}} = \frac{\overline{\text{Pr}}}{\overline{PS}} = \frac{0.4 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \cong 50.6\%$$





- 过共析钢的室温组织



- 亚共析钢的室温相



P

$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

相分数、组织分数

室温下有 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 两个相

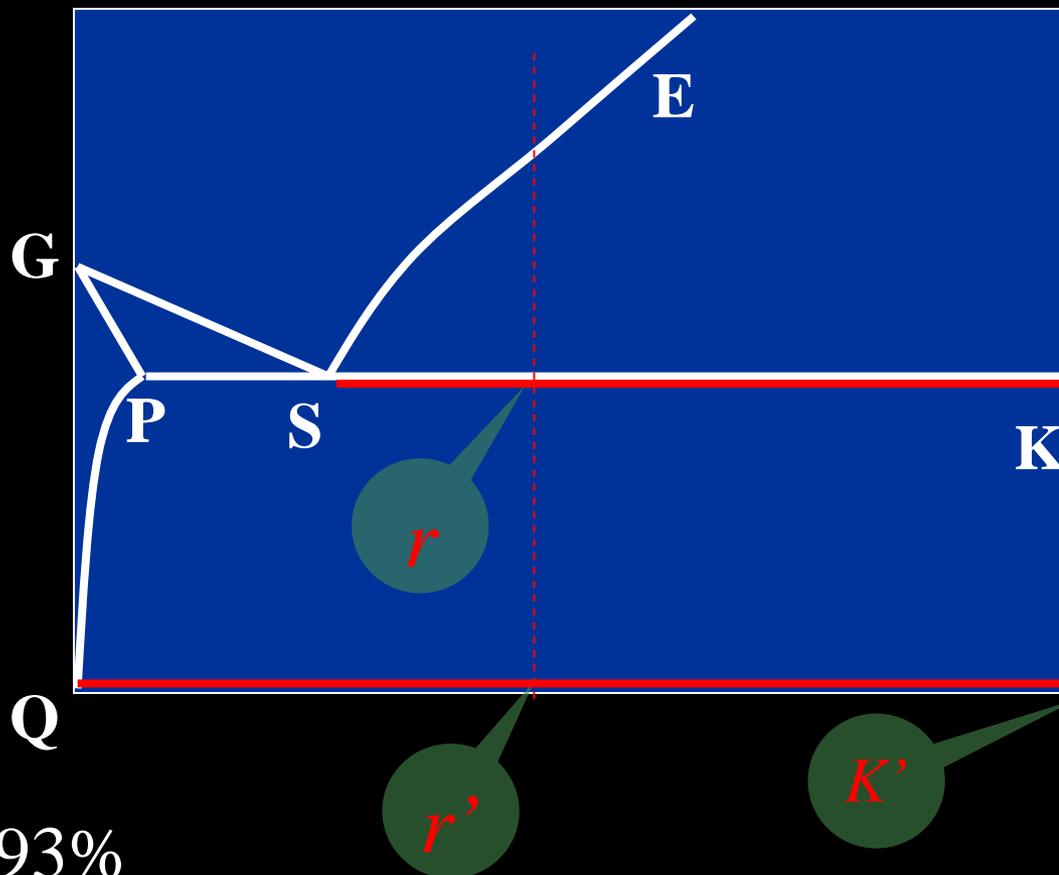
$$w_{\alpha} = \frac{\overline{r'K'}}{\overline{QK'}} = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0} \cong 82\%$$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{\overline{Qr'}}{\overline{QK'}} = \frac{1.2 - 0}{6.69 - 0} \cong 18\%$$

室温下有 $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 两种组织

$$w_{\text{P}} = \frac{\overline{rK}}{\overline{SK}} = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} \cong 93\%$$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = \frac{\overline{Sr}}{\overline{SK}} = \frac{1.2 - 0.77}{6.69 - 0.77} \cong 7\%$$



钢的金相组织

钢在室温下有两个相： $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

- 亚共析钢的金相组织

铁素体+珠光体($\alpha + \text{P}$)

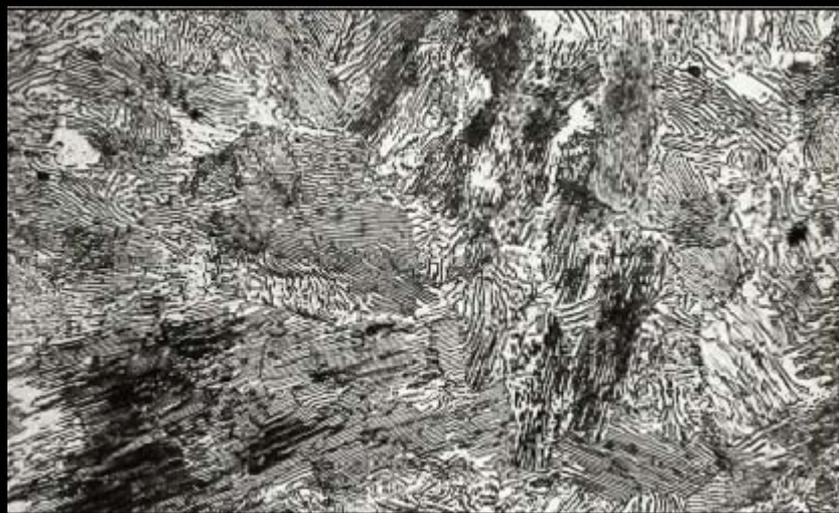
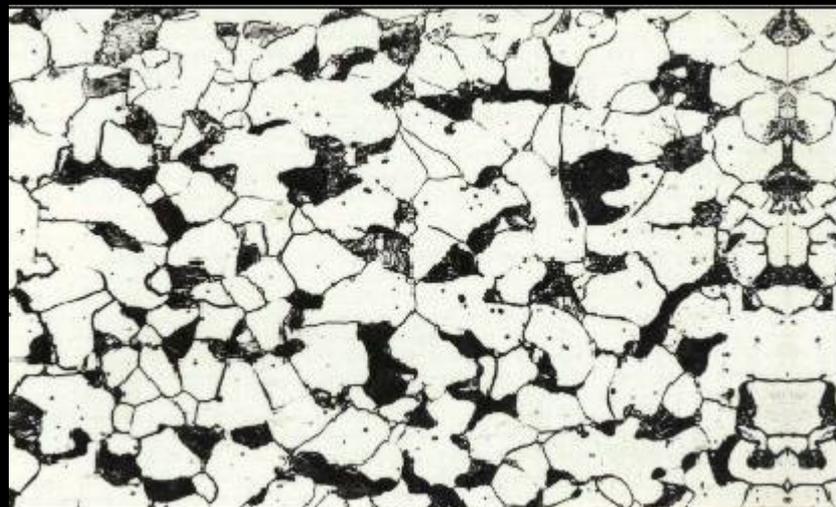
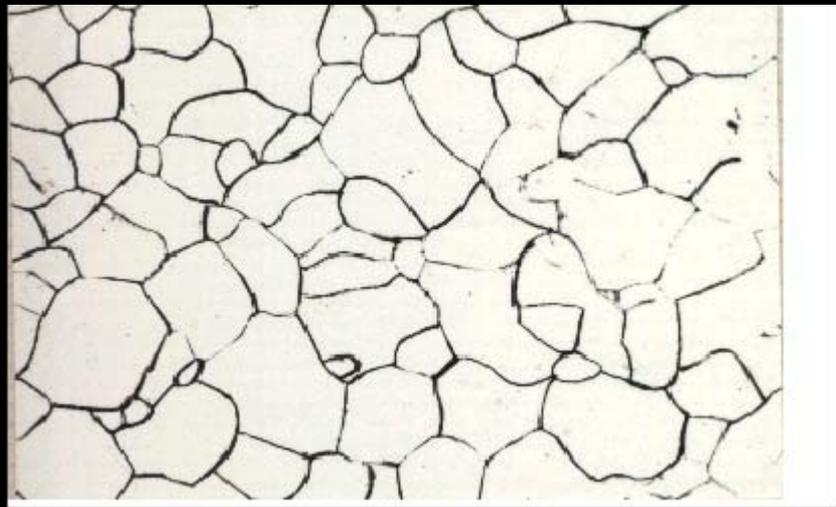
- 共析钢的金相组织

珠光体 (P)

- 过共析钢的金相组织

珠光体+渗碳体($\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$)

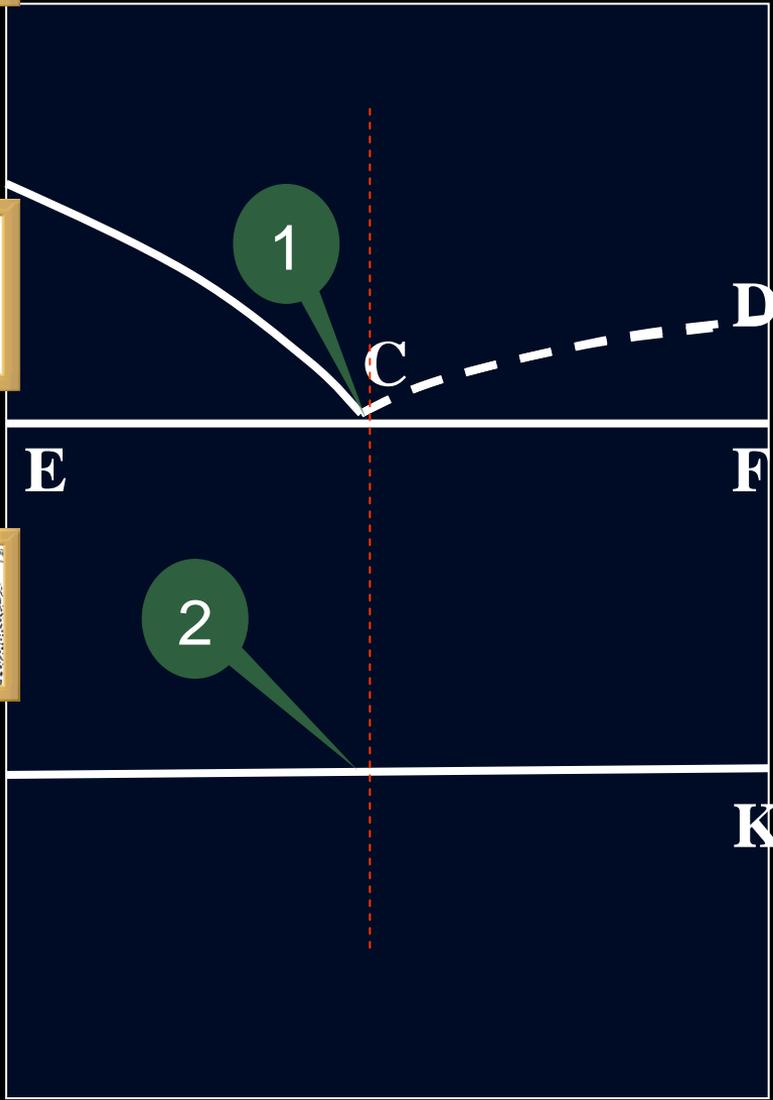
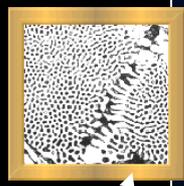
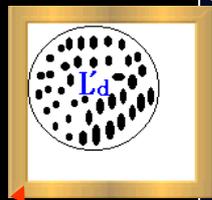
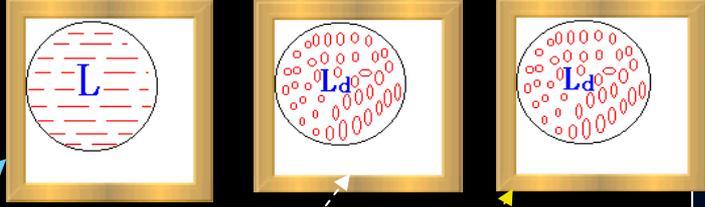
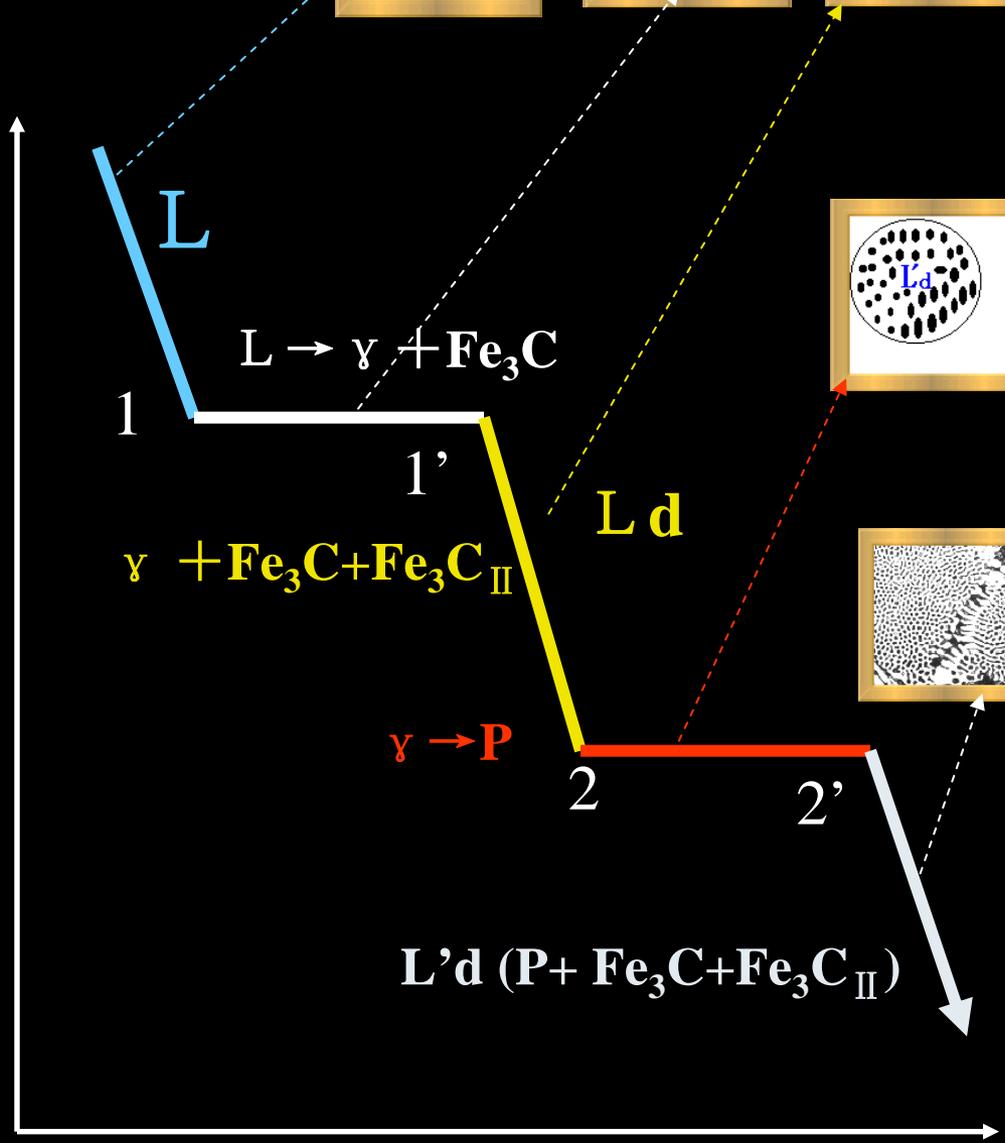
工业纯铁及钢的金相组织



白口铸铁的 结晶过程分析

5、共晶白口铸铁

温度

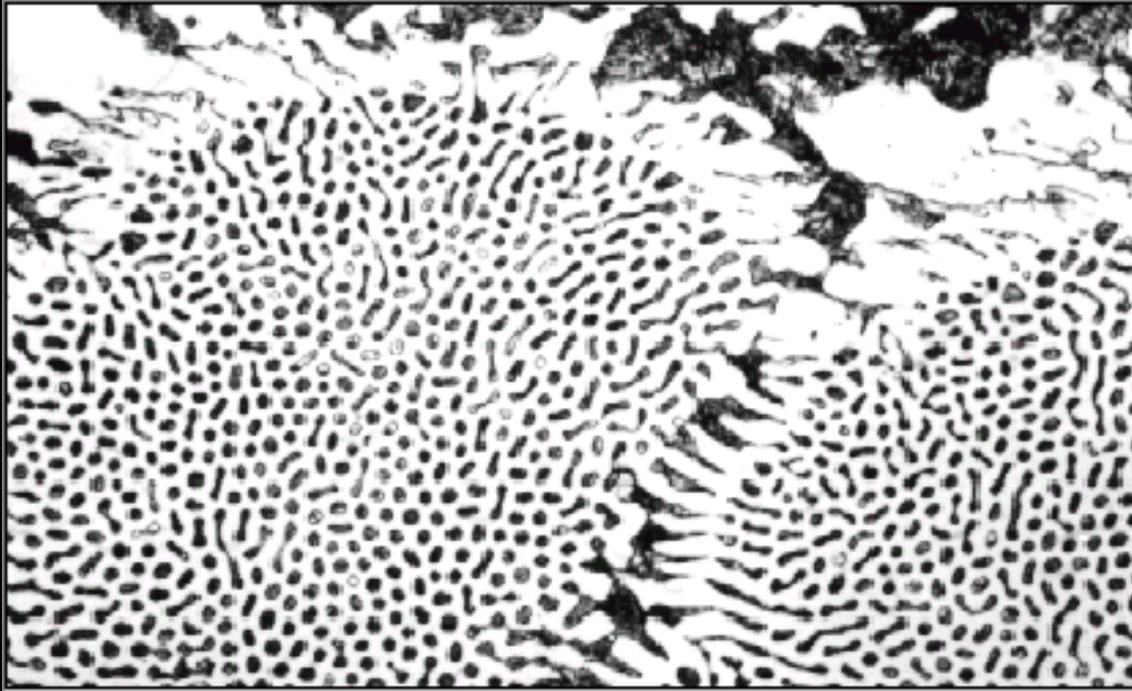


时间

共晶白口铁的高温组织为Ld



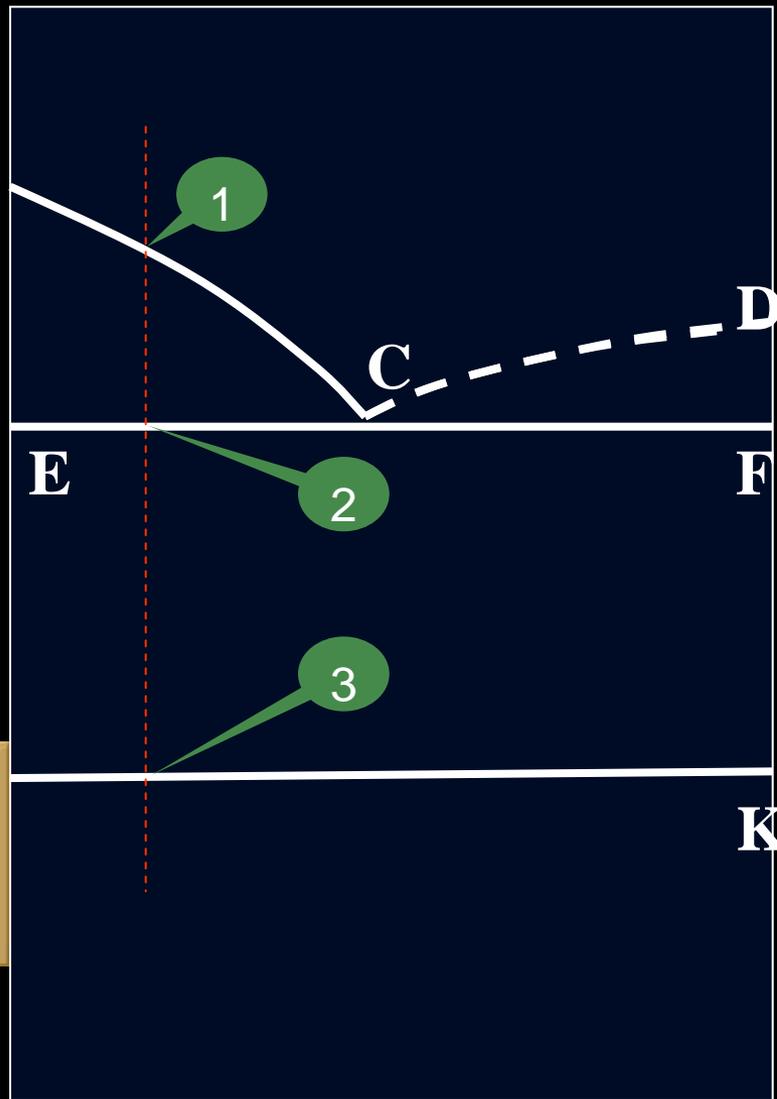
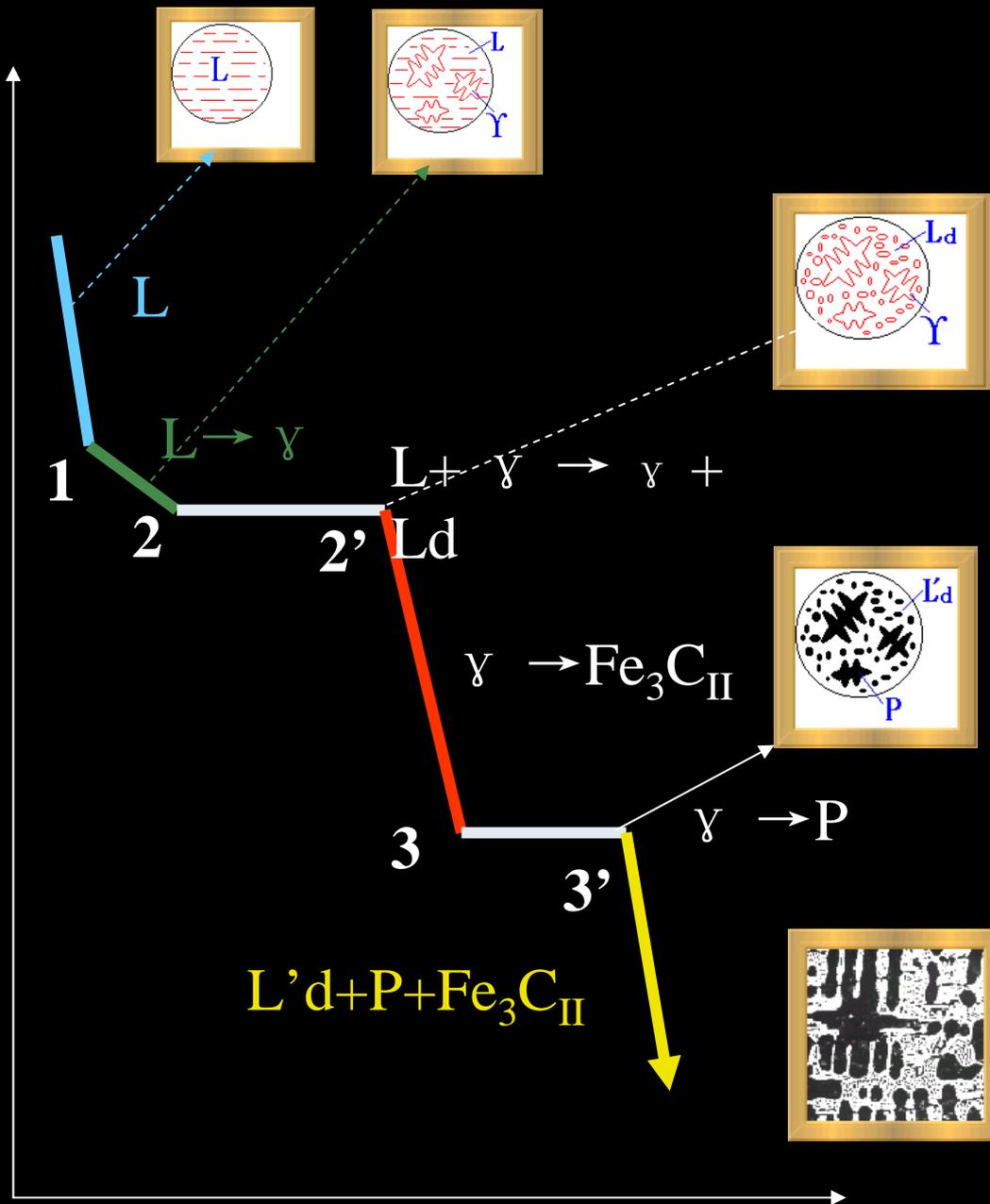
共晶白口铁的室温组织为L'd



6、亚共晶白口铸铁

$w_C=3.0\%$

温度



时间

- 亚共晶白口铁的高温组织



- 亚共晶白口铁的室温组织



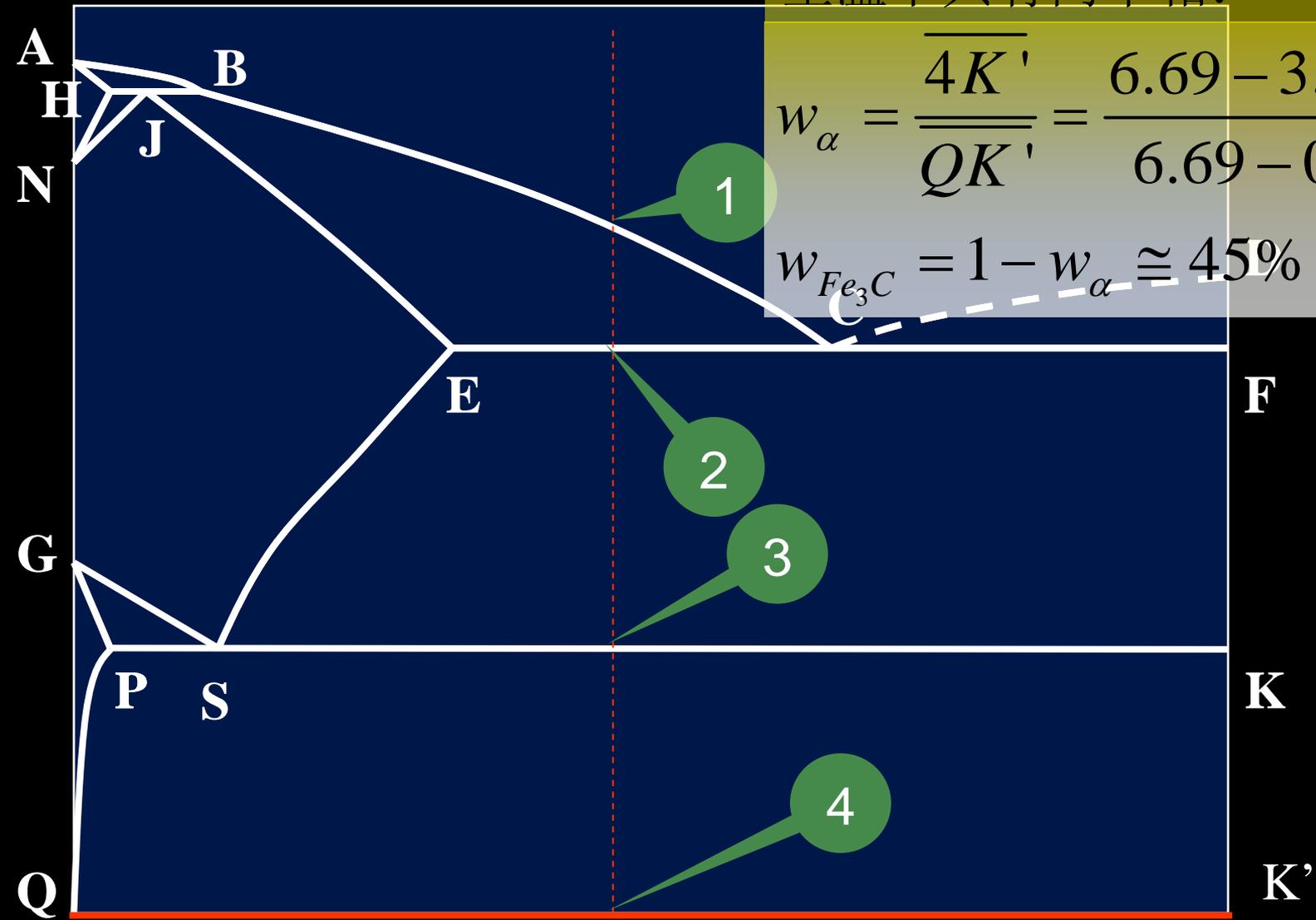
P

L'd

相及组织组成物质量分数

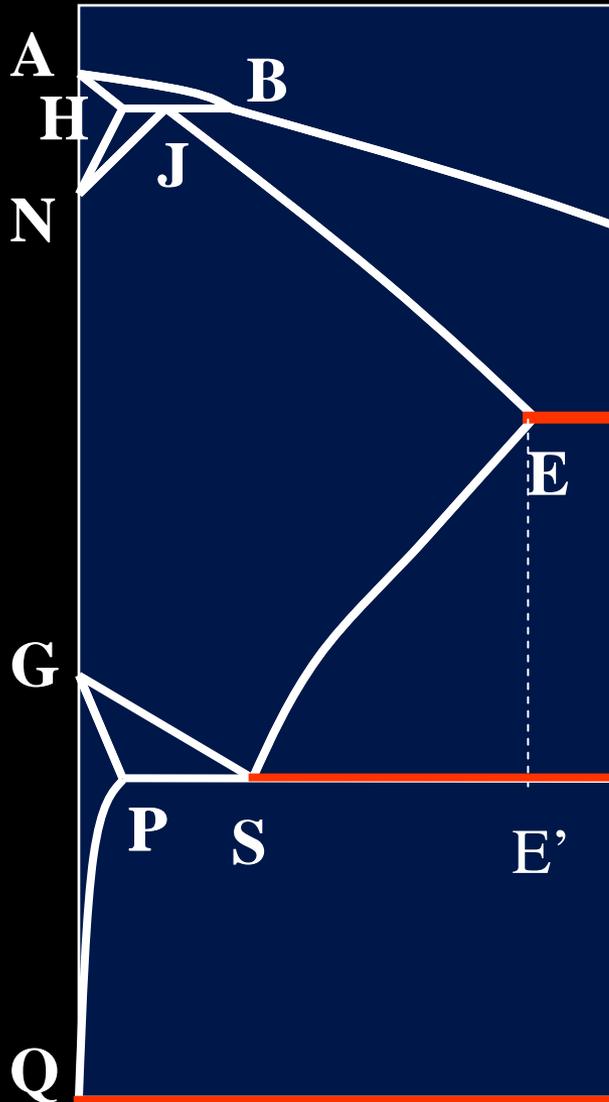
室温下共有两个相： $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{4K'}{\overline{QK'}} = \frac{6.69 - 3.0}{6.69 - 0} \cong 55\%$$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = 1 - w_{\alpha} \cong 45\%$$


室温下有三种组织L'd+P+Fe₃C_{II}

L'd来自Ld, P和Fe₃C_{II}来自 γ



$$w_{L'd} = w_{Ld} = \frac{\overline{E2}}{\overline{EC}} = \frac{3.0 - 2.11}{4.3 - 2.11} \cong 41\%$$

$$w_{\gamma} = 1 - w_{Ld} \cong 59\%$$

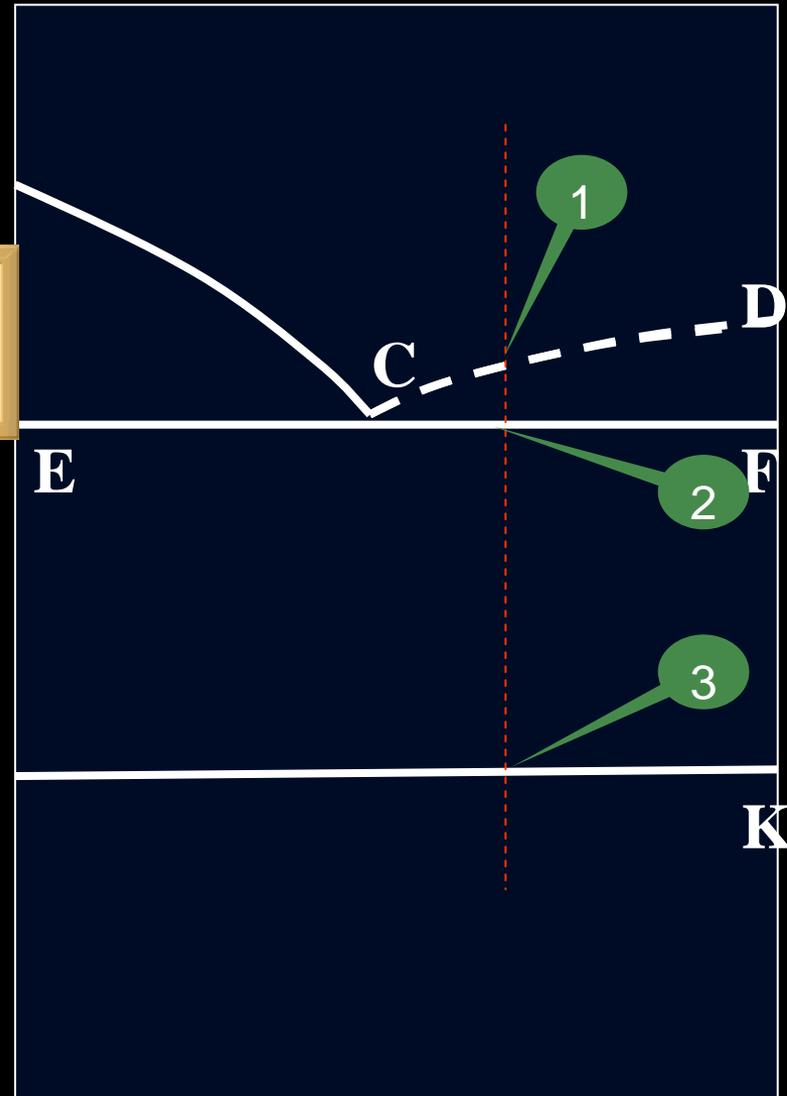
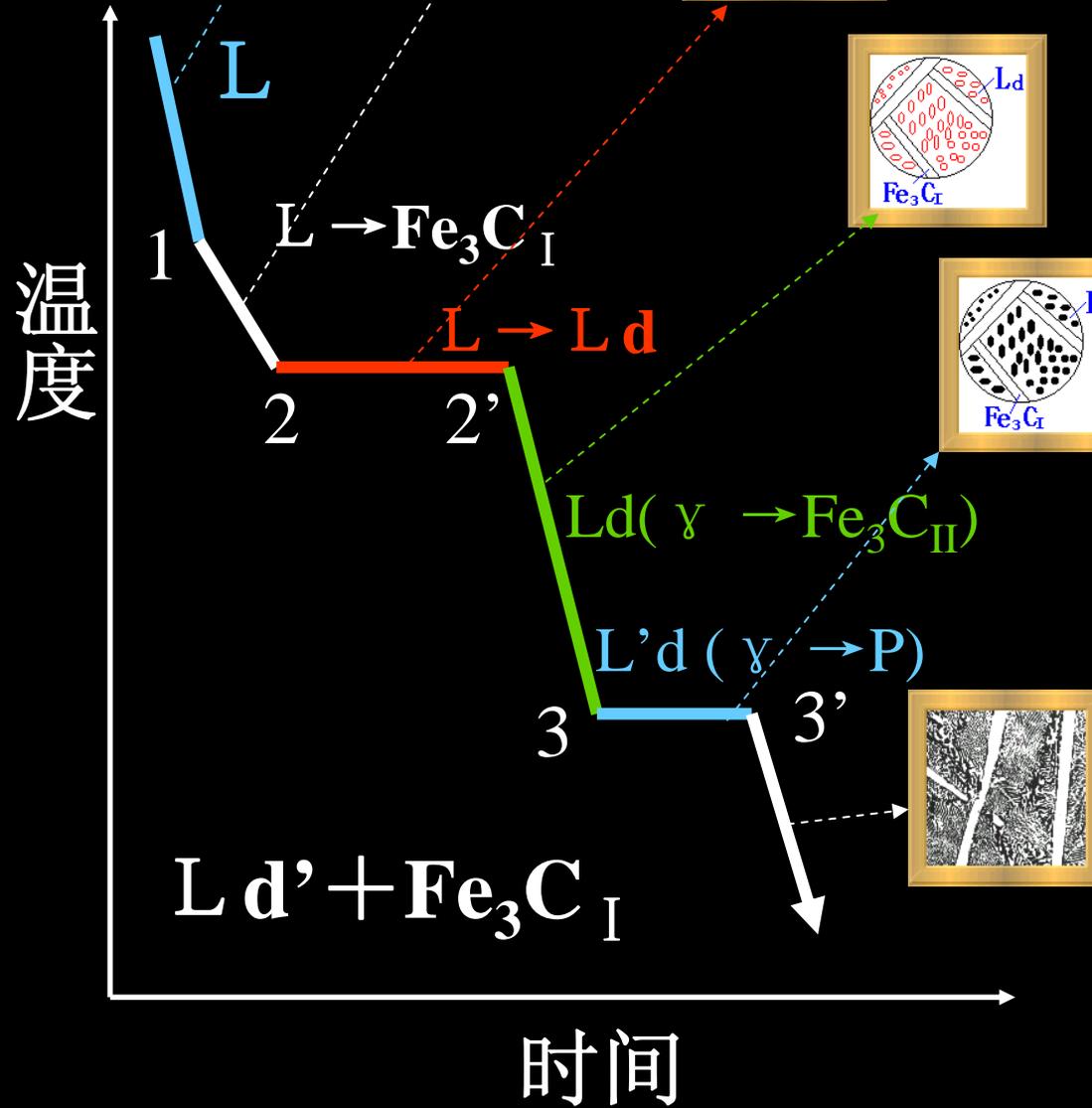
$$w_{Fe_3C_{II}} = w_{\gamma} \cdot \frac{\overline{SE'}}{\overline{SK}} = 0.59 \cdot \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \cong 13\%$$

$$w_P \cong 0.59 - 0.13 = 46\%$$

- 1
- 2
- 3
- 4

7、过共晶白口铸铁

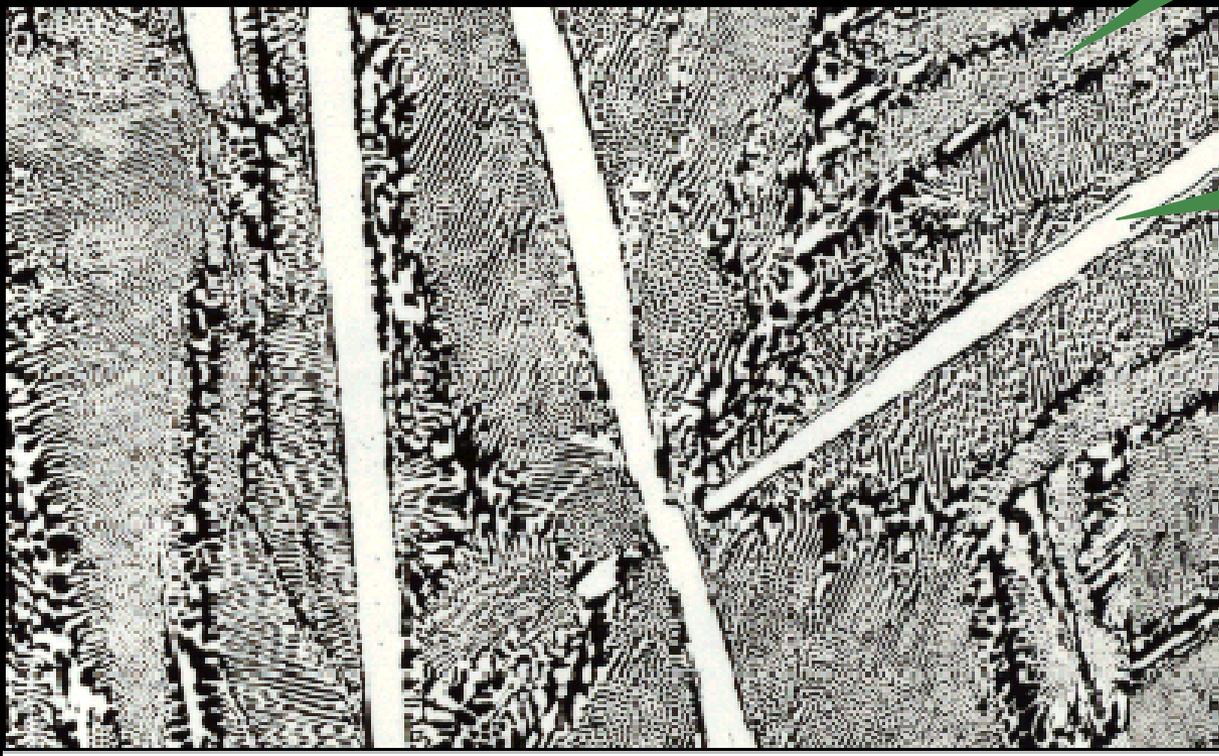
$w_C=5.0\%$



- 过共晶白口铁的高温组织



- 过共晶白口铁的室温组织



L'd

Fe₃C_I

相及组织物分数

室温下共有两个相: $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{4KH}{QK'} = \frac{6.69 - 5.0}{6.69 - 0} \cong 25\%$$

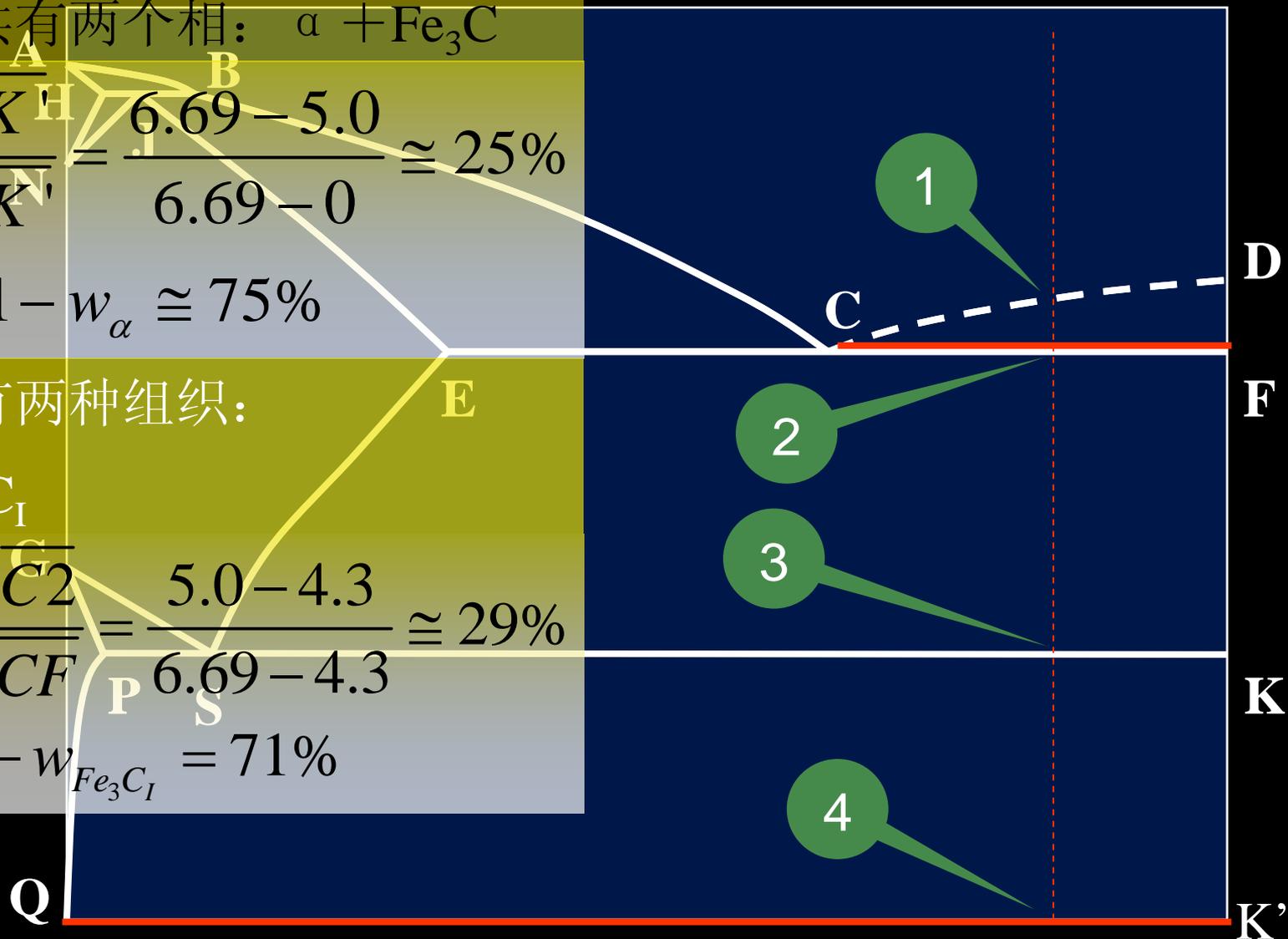
$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = 1 - w_{\alpha} \cong 75\%$$

室温下有两种组织:

$L'd + \text{Fe}_3\text{C}_I$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}_I} = \frac{C_2}{CF} = \frac{5.0 - 4.3}{6.69 - 4.3} \cong 29\%$$

$$w_{L'd} \cong 1 - w_{\text{Fe}_3\text{C}_I} = 71\%$$



白口铸铁的相及组织

- 白口铸铁的室温相为



- 亚共晶白口铁的金相组织



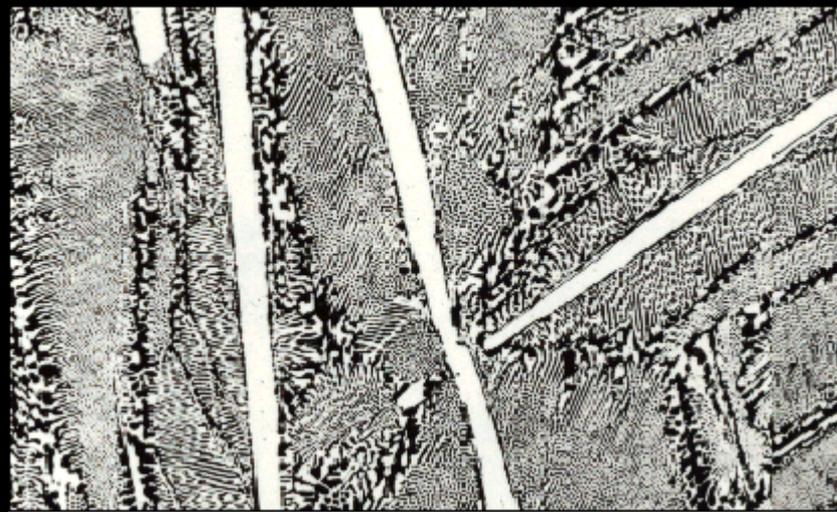
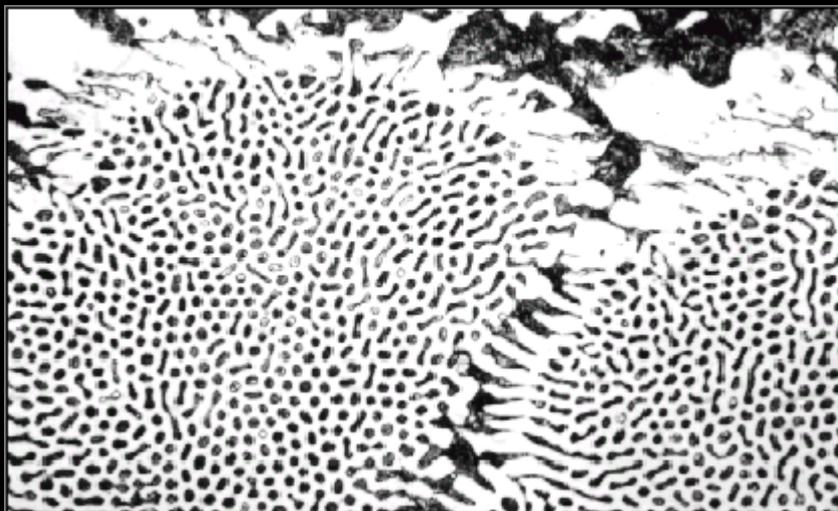
- 共晶白口铁的金相组织



- 过共晶白口铁的金相组织



白口铁的金相组织



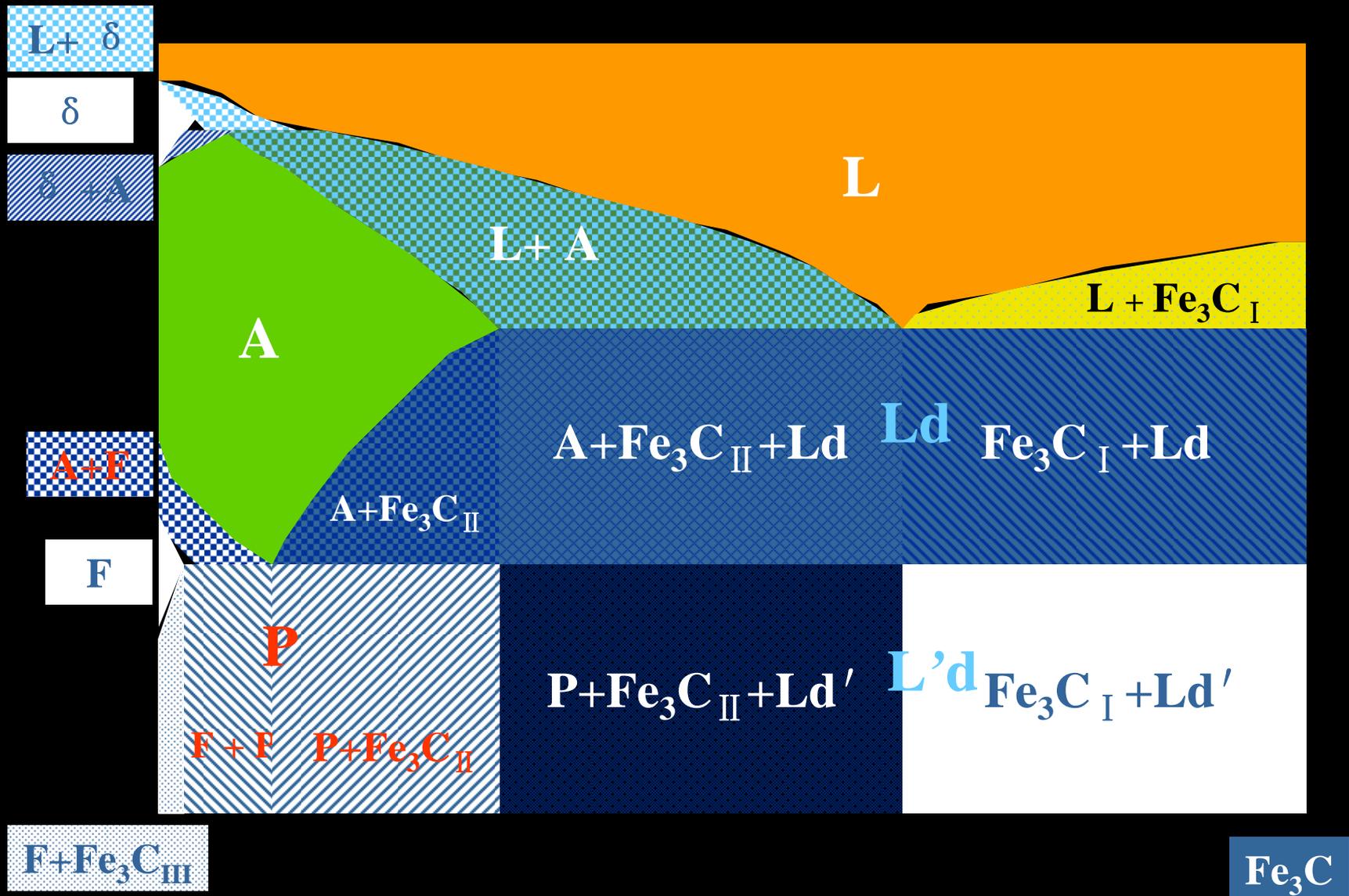
四、含碳量对组织及性能的影响

(一) 对平衡组织的影响

组织组成物相图：

将Fe-Fe₃C相图中的相区按组织组成物填写

组织组成物相图



• $w_C \uparrow$, 组织发生相应改变

工业纯铁



钢

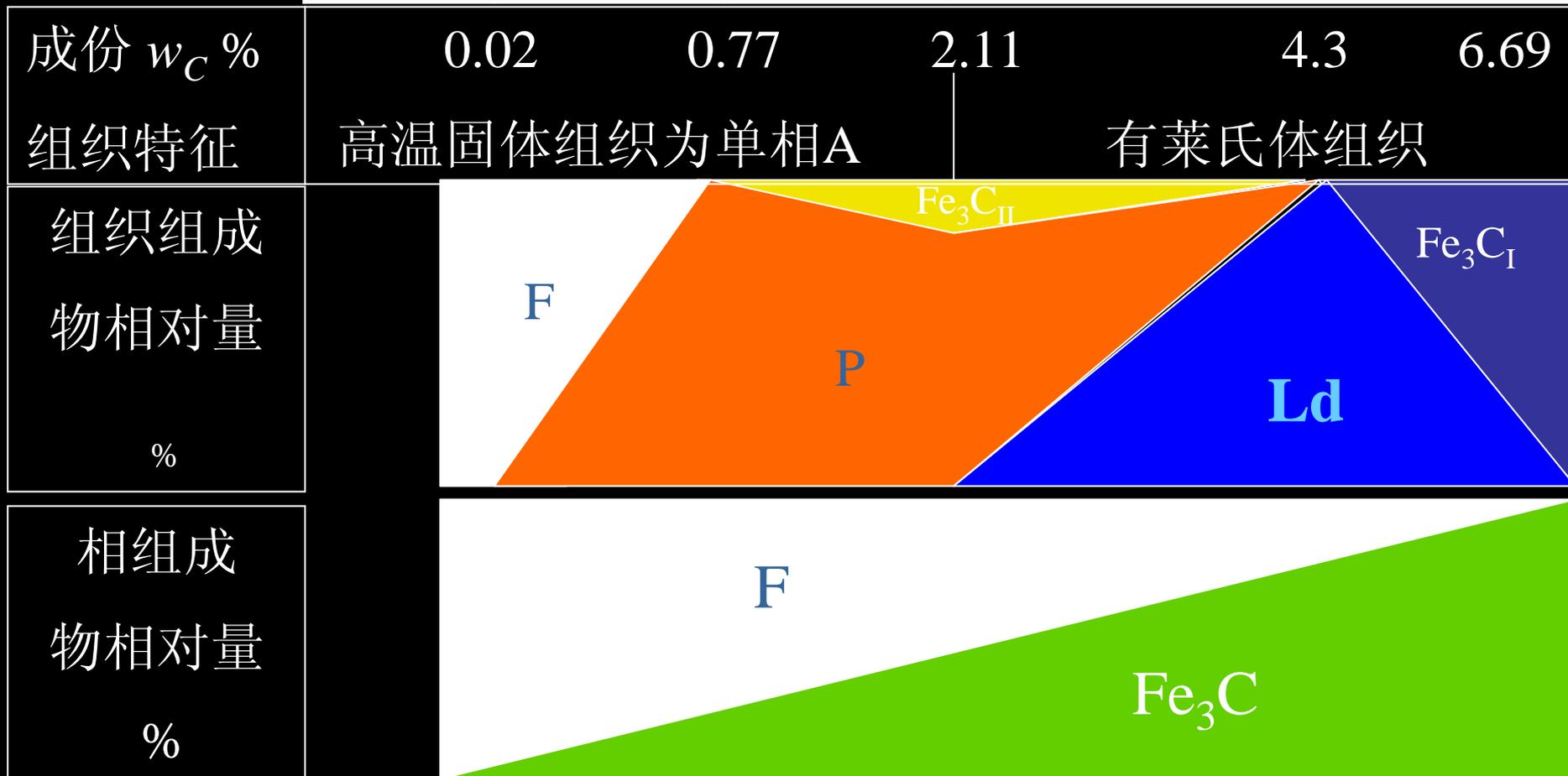


白口铸铁



• $w_C \uparrow$, Fe_3C 的数量 \uparrow

工业	钢		白口铸铁	
纯铁	亚共析	过共析	亚共晶	过共晶



- $w_C \uparrow$, Fe_3C 的形态会发生变化

$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ (薄片状) \rightarrow 共析 Fe_3C (层片状)

$\rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ (网状) \rightarrow 共晶 Fe_3C (连续基体)

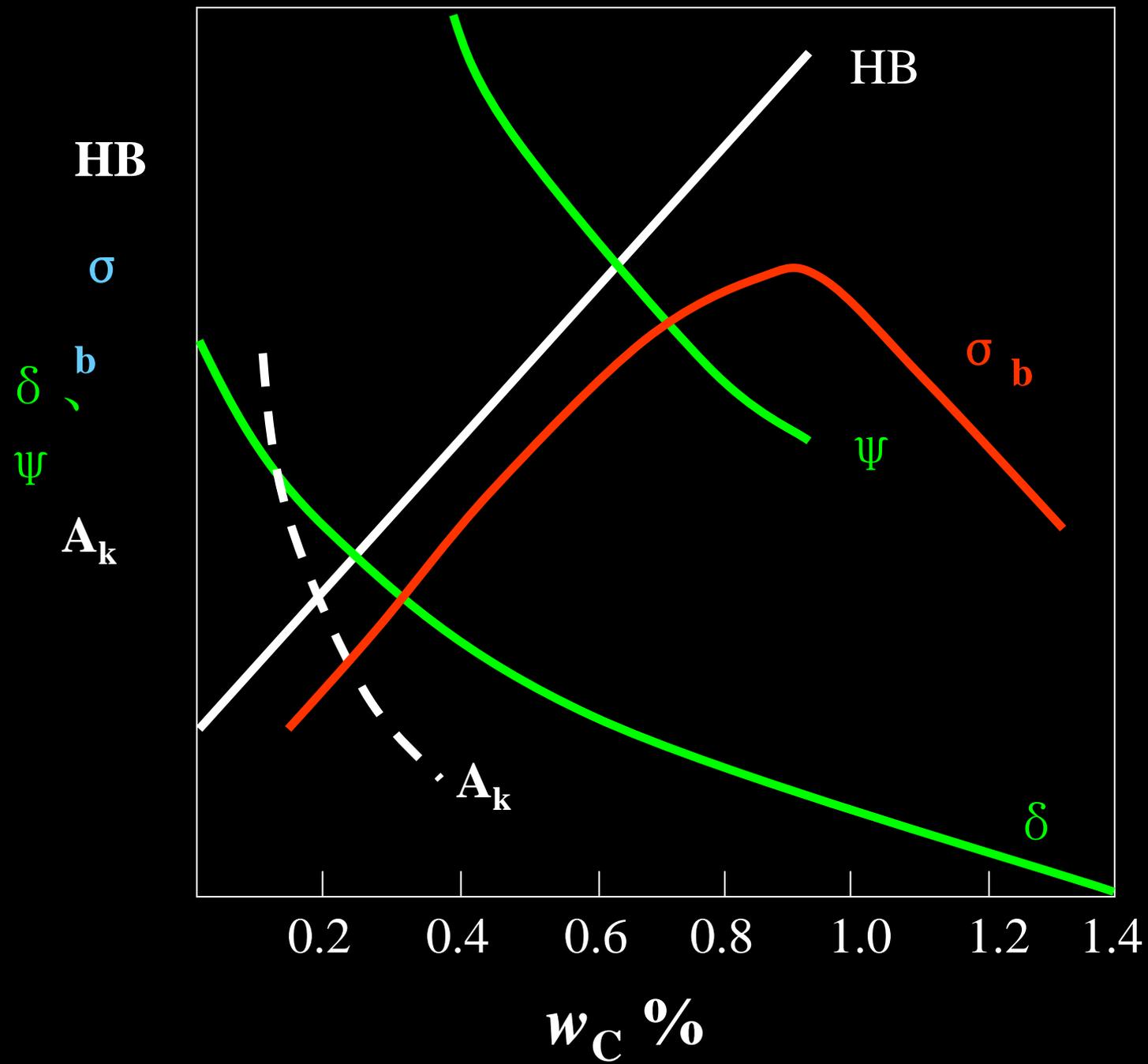
$\rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$ (粗大片状)

(二) 对性能的影响

- ❖ Fe_3C 是钢中的强化相，当渗碳体与F基体组成P时，随其含量↗
 - 强度和硬度↗
 - 塑性、韧性↘

❖ 当渗碳体以网状 ($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$)、特别是作为基体 (共晶 Fe_3C) 或以板条粗针状 ($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$) 分布于Ld上时

- 塑韧性下降
- 强度也会下降。



五、铁碳合金相图的应用

设计选材

铁碳合金的性能是随含碳量而变化的，根据零件的性能要求，可以确定铁碳合金的成分范围。

塑性、韧性



低碳钢 $w_C\%$ (0.10,0.25)

塑性、韧性、强度



中碳钢 $w_C\%$ (0.25,0.60)

硬度、耐磨性



高碳钢 $w_C\%$ (0.60,1.30)

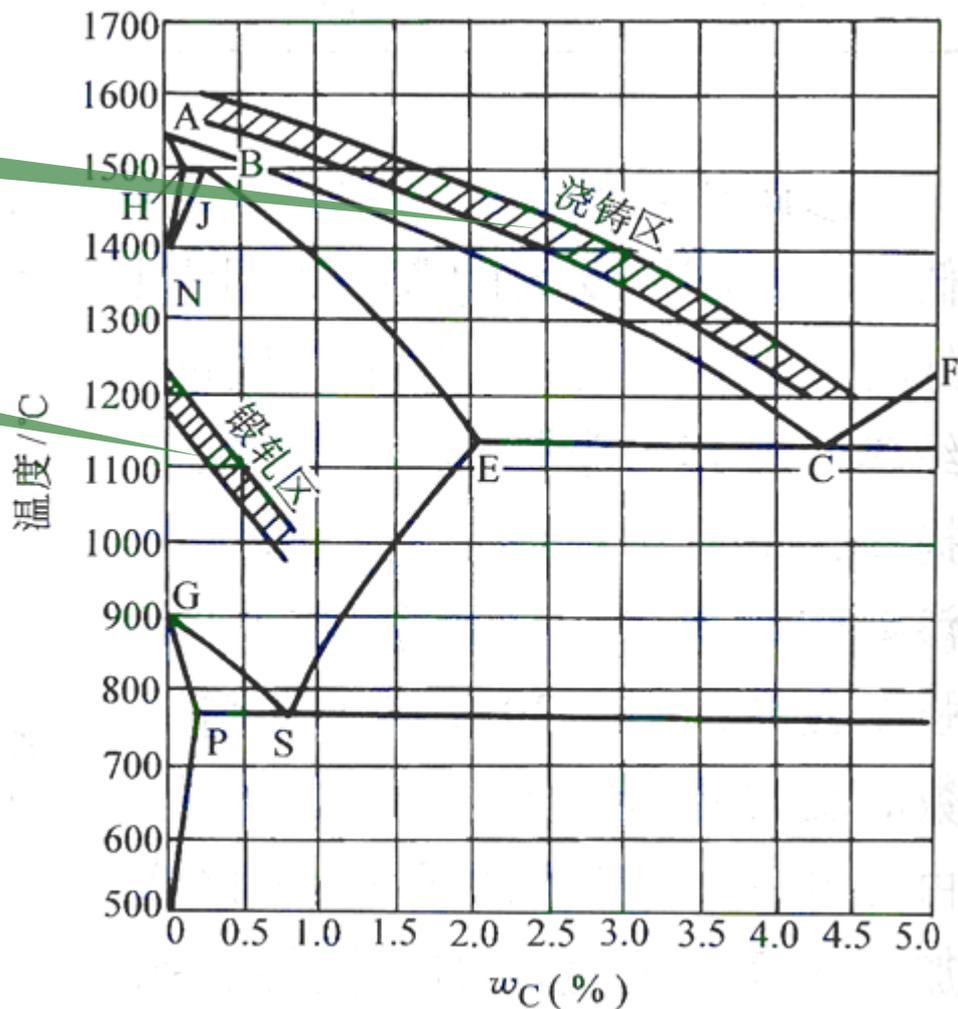
制定热加工工艺

铸造工艺：确定浇注温度

锻造工艺：确定锻造温度

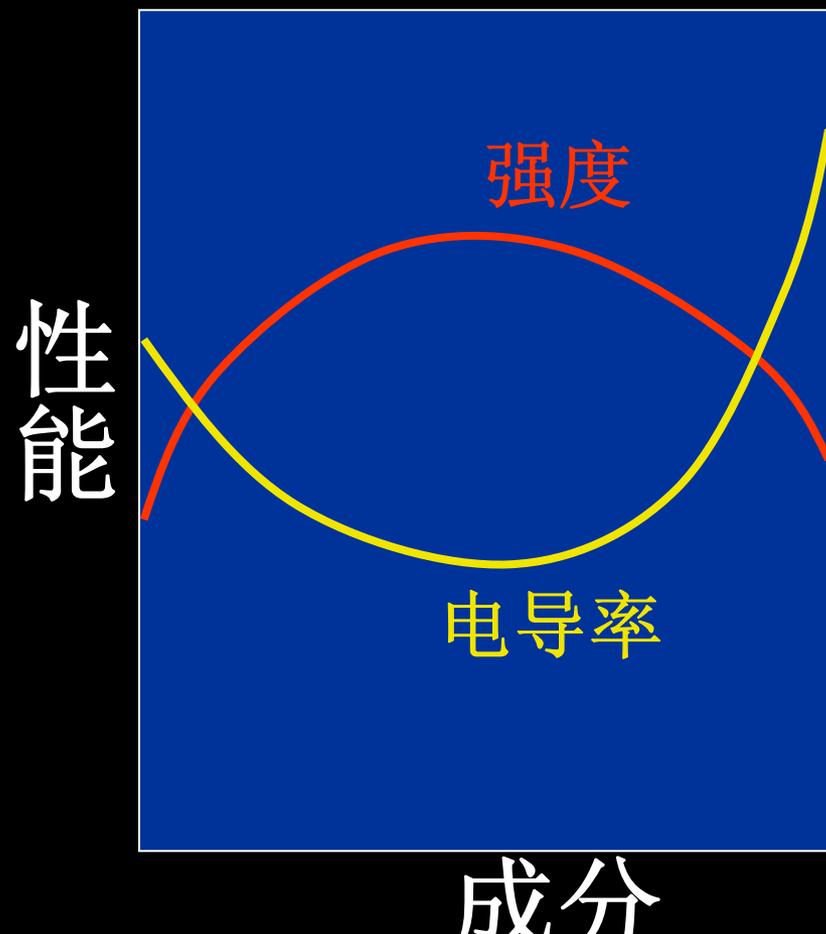
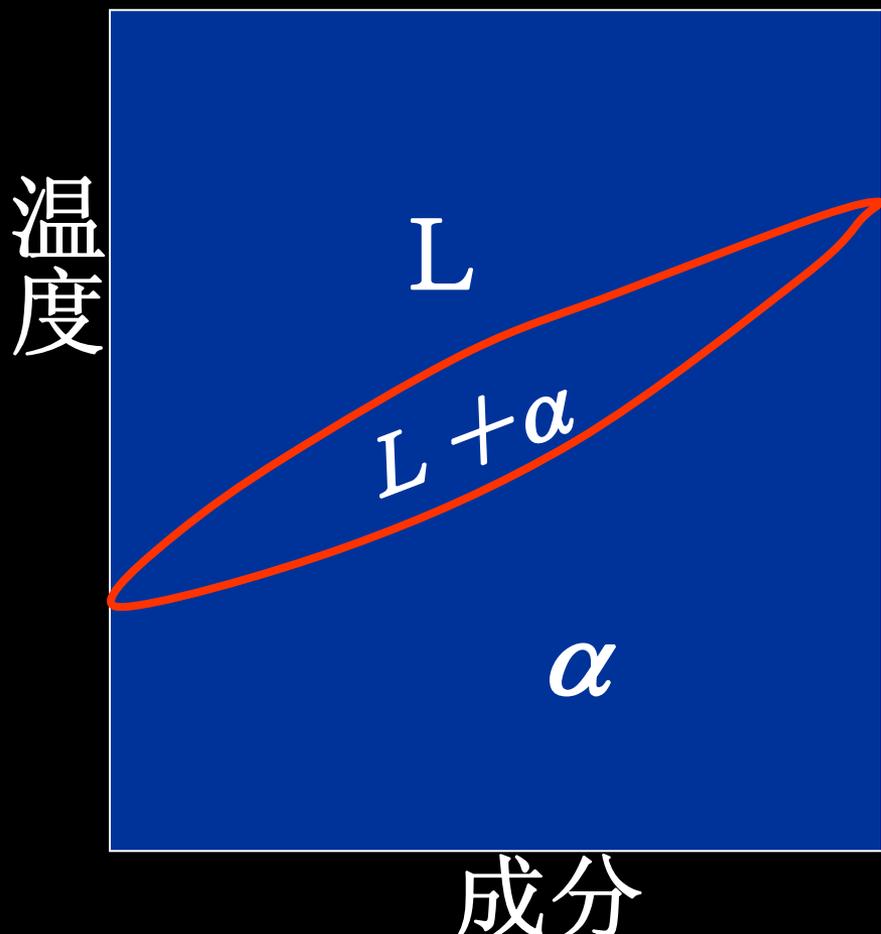
焊接工艺：分析HAZ的组织
和性能

热处理工艺：是制订热处理
工艺的基础。



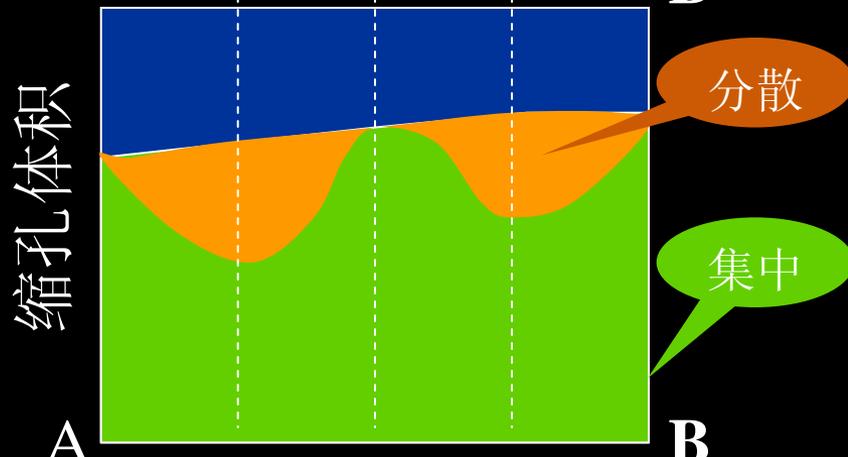
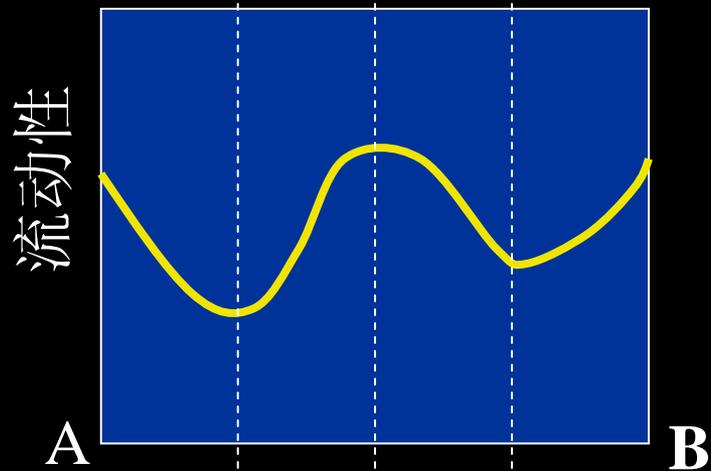
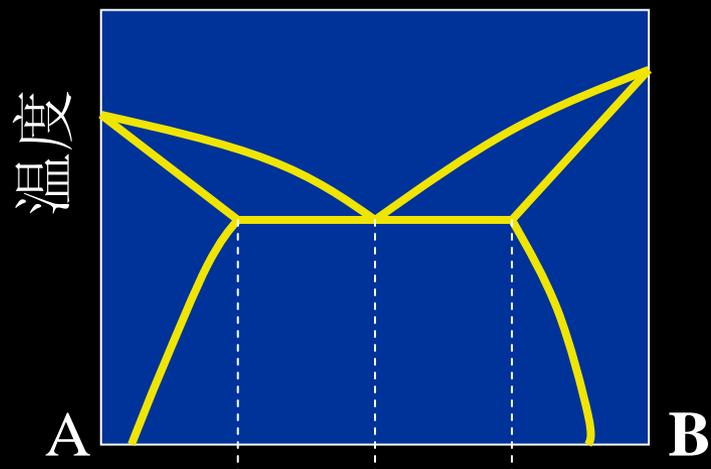
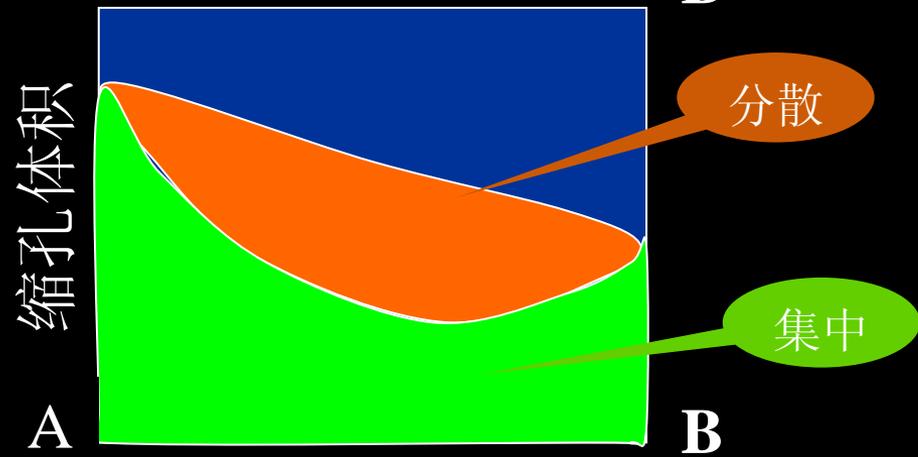
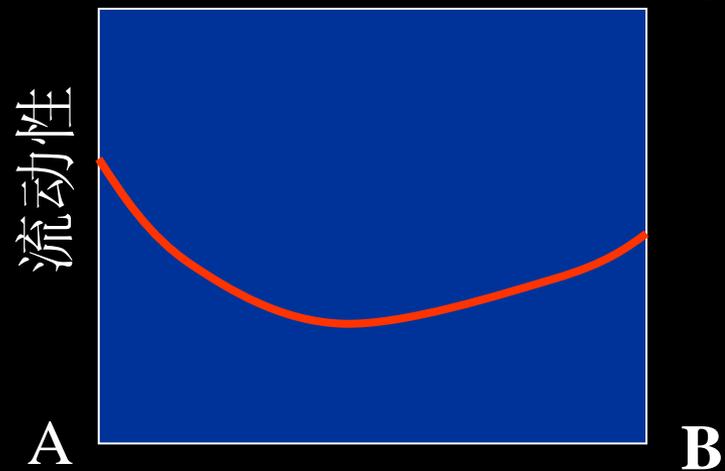
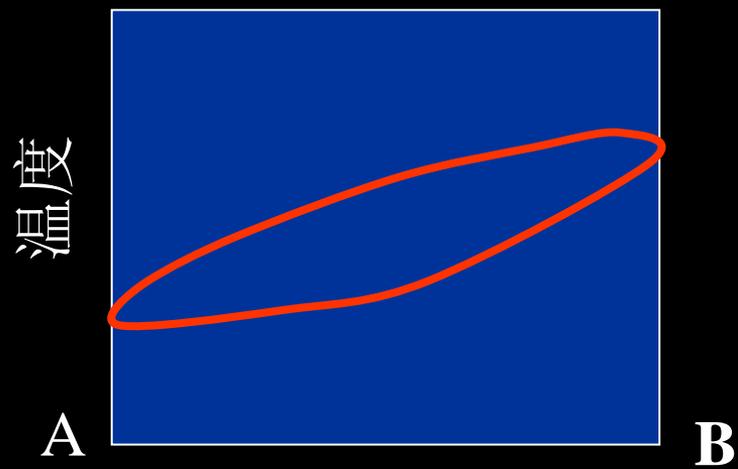
六、合金性能与相图的关系

1) 力学性能与物理性能



2) 工艺性能

- 铸造
- 压力加工
- 焊接性
- 切削加工性能
- 热处理



第四节 钢中杂质元素对钢性能的影响

- 硅、锰
- 硫、磷
- 氢、氮、氧

一、硅和锰的影响

硅和锰是钢中的脱氧剂

少量  有利 → 溶入铁素体中，产生固溶强化作用，提高钢的强、硬度

较多  有害 → 形成 SiO_2 及 MnS ，形成夹杂物，降低钢的性能

二、硫和磷的影响

是炼钢的原料中带来的，是钢中的有害元素

硫

S 不溶于 Fe，而形成 FeS 熔点 1190°C ，且 FeS 与 γ -Fe 会形成低熔点 (989°C) 共晶体，分布在奥氏体晶界上。热加工时，共晶体熔化，沿奥氏体晶界开裂—**热脆**

适当增加钢的含Mn量，可使S优先与Mn结合生成高熔点（ 1620°C ）的MnS，可避免热脆。但MnS会降低钢的塑韧性，常成为裂纹源。

磷

磷可固溶于铁素体中，提高钢的强度，但剧烈降低钢的塑韧性，特别是使钢低温下变脆—冷脆。且磷在钢中偏析严重。

硫、磷均会降低钢的焊接性。

钢中要严格控制硫、磷含量。

普通钢

$$w_S \leq 0.035 \sim 0.050\%$$

$$w_P \leq 0.035 \sim 0.045\%$$

优质钢

$$w_S \leq 0.030 \sim 0.035\%$$

$$w_P \leq 0.030 \sim 0.035\%$$

高级优质钢

$$w_S \leq 0.020\%$$

$$w_P \leq 0.030\%$$

- 适当增加硫、磷含量
($w_S=0.18\sim0.35\%$, $w_P=0.08\sim0.15\%$)
可提高钢的切削加工性能, 适于一些强度要求不高的标准件的批量生产;
- 磷可增加钢在大气中的耐腐蚀性能, 同时在钢中加入RE、Ti抑制冷脆
如国产Cu-P-RE, Cu-P-Ti钢

三、钢中气体的影响

氢

微量的氢（ $0.5 \sim 3\text{mL}/100\text{g}$ ）就可引起“氢脆”，使钢的塑韧性显著下降，甚至产生微裂纹。

氢是引起焊接接头延迟裂纹的重要因素。

氮

氮固溶于铁素体中产生“应变时效”，增加钢的脆性。

应变时效：冷塑性变形后在室温放置或加热一定时间后钢的强度增加，塑性韧性降低的现象。

钢中若含有Al、V、Ti、Nb等元素，可与N形成细小弥散的氮化物，可细化晶粒，提高强度。

第五节 钢锭的组织 and 缺陷

按浇注前钢液的脱氧程度钢锭分为：

镇静钢

钢液浇注前用锰铁、硅铁、铝进行充分脱氧，浇注时钢液不发生碳-氧反应，处于镇静状态。

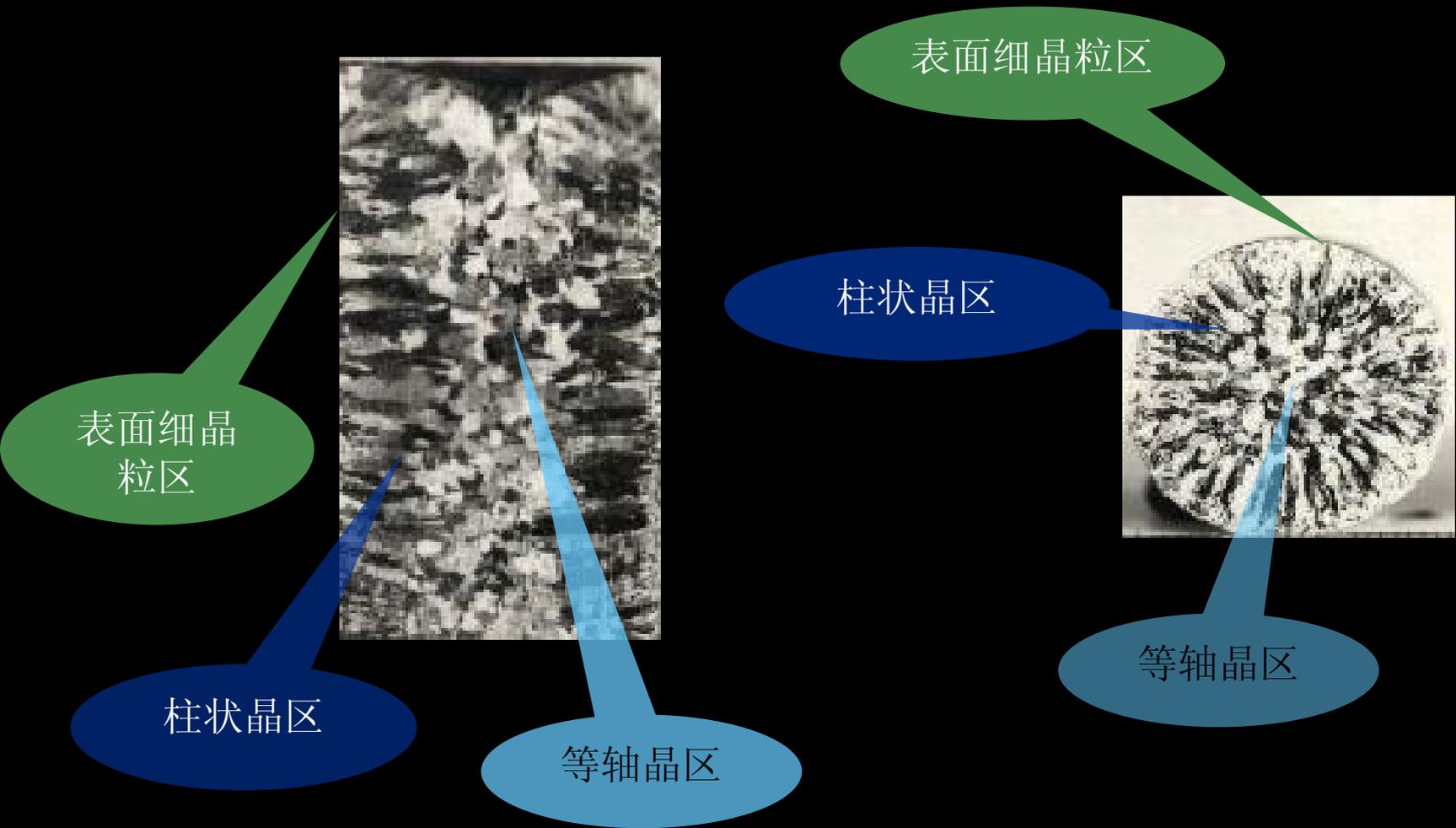
沸腾钢

冶炼过程中仅用少量锰铁轻度脱氧，钢液含氧量高，浇注时发生碳-氧反应，析出大量CO气体，引起钢液沸腾。

半镇静钢

介于镇静钢与沸腾钢之间。

一、镇静钢的组织



表面细晶粒区

钢液注入锭模时，因模壁的冷却作用，冷却速度快，过冷度大，形核率大，故晶粒细小。

柱状晶区

钢锭的表面结晶后，模壁的温度升高，钢液的冷却速度降低，形核率降低。在垂直于模壁方向散热条件最好，冷却速度最快，晶粒沿散热方向相反的方向优先长大，形成具有一定方向性的柱状晶粒。

中心等轴晶区

在锭模中心，温度高，过冷度小，各个方向的散热条件下当，故形成粗大的等轴晶粒区。

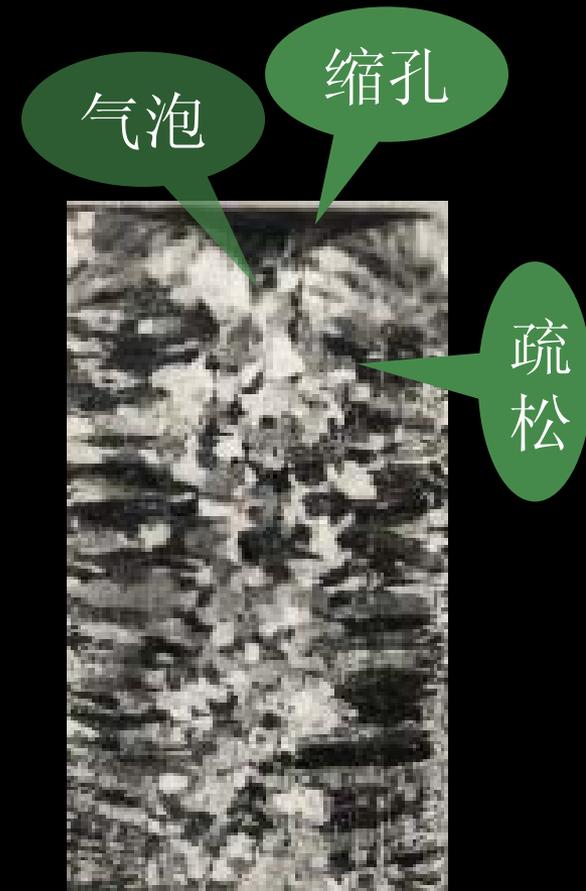
钢锭的组织不均匀，必然导致其性能不均匀。为改善这种不均匀性，可采取变质处理或采取振动、搅拌等措施，使整个铸锭全部由均匀细晶粒组成。

二、镇静钢锭的缺陷

缩孔和疏松、气泡、偏析

缩孔和疏松是钢锭结晶时体积收缩引起的，集中的体积收缩称缩孔，分散的体积收缩称疏松。

缩孔必须完全切除，疏松可在锻造或轧制过程中焊合，危害较缩孔小。



气泡

钢液凝固时产生的气体来不及从铸锭中逸出保留在钢内。

偏析

钢锭先后结晶的部位化学成分不同。

钢锭上部杂质元素如S、P等含量高；中部杂质少，成分均匀；下部高熔点氧化物可 SiO_2 、 $\text{SiO}_2 \cdot \text{FeO}$ 等。

第六节 压力加工对钢组织和性能的影响

压力加工

金属材料在外力作用下发生的一种塑性变形过程。
(工业生产上将钢锭锻造、挤压、轧制、拉拔成各种型钢、钢板、钢管或者钢丝等规定尺寸和形状的零件和产品的过程。)

目的

- (1) 获得规定形状和尺寸的零件和产品
- (2) 改变钢的组织 and 性能

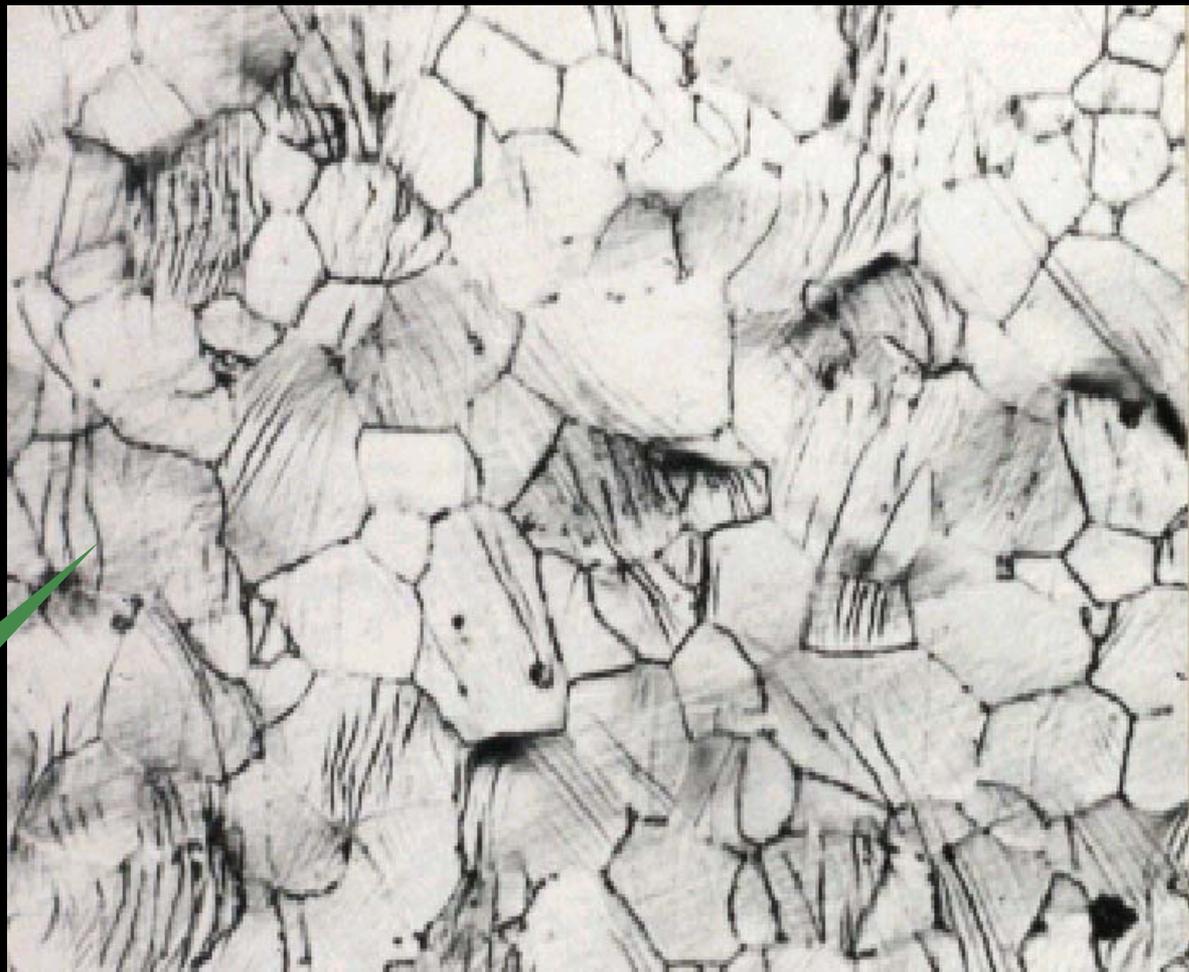
一、冷变形对钢组织和性能的影响

材料：工业纯铁

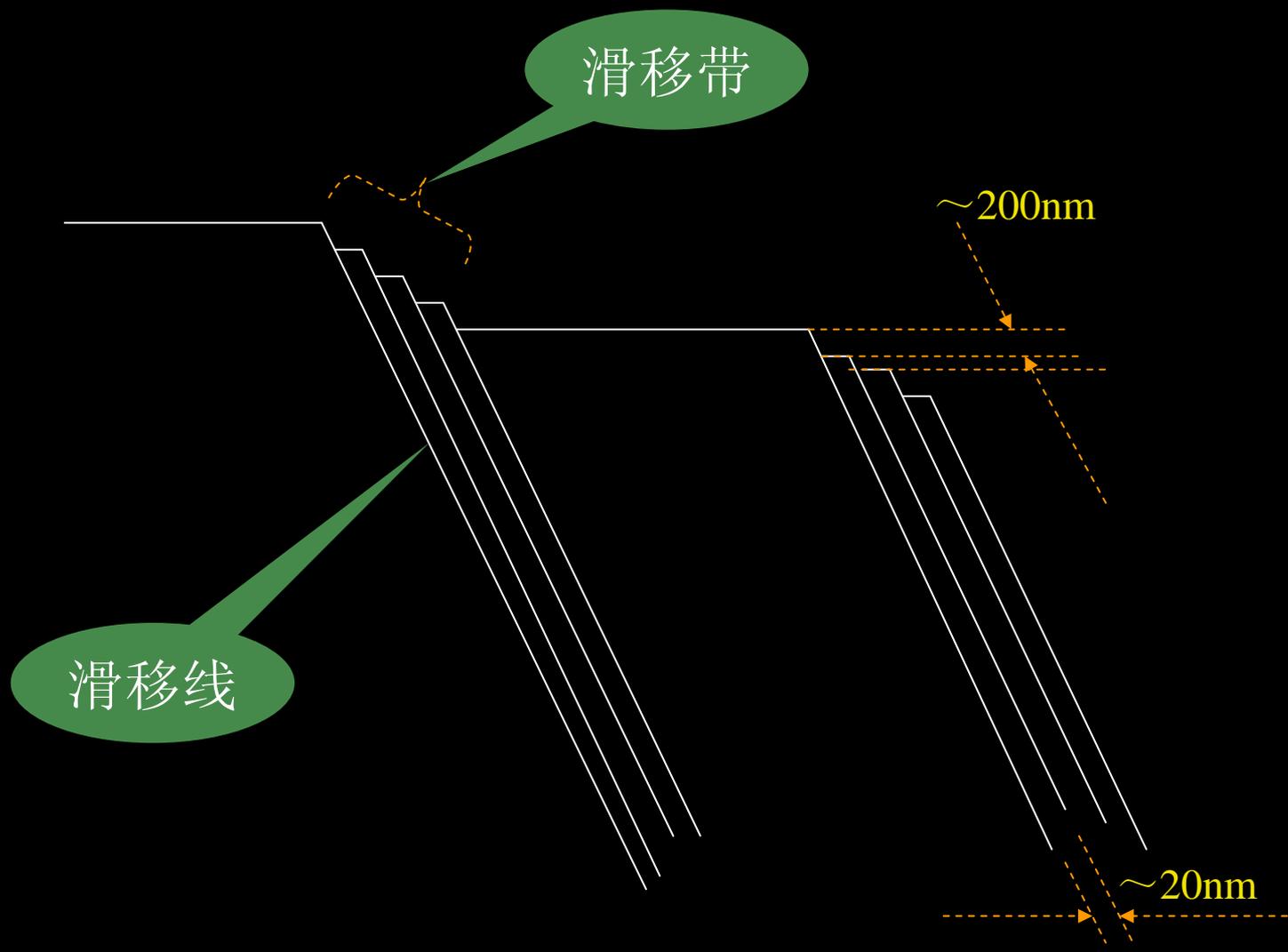
状态：压缩变形30%

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：250X



滑移带



滑移带

滑移线

~200nm

~20nm

滑移带：对于适量塑性变形的试样，在光学显微镜下观察到的相互平行的线条叫滑移带。

滑移线：滑移带是由许多密集的相互平行的更细的滑移线和台阶组成的。

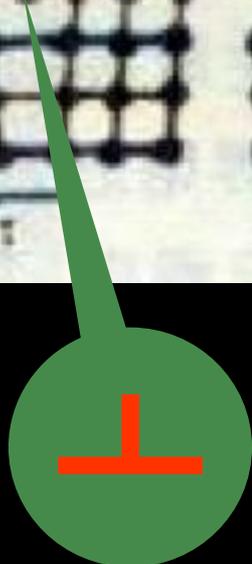
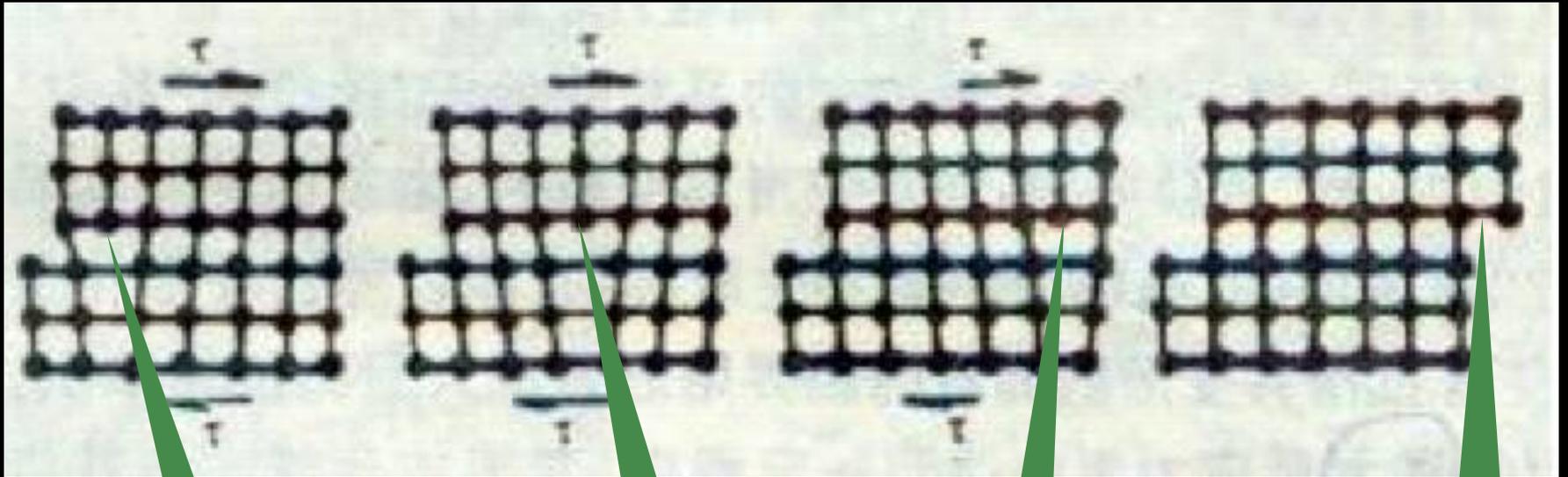
晶体塑性变形的的基本方式

滑移和孪生

滑移是金属最主要的一种塑性变形方式。

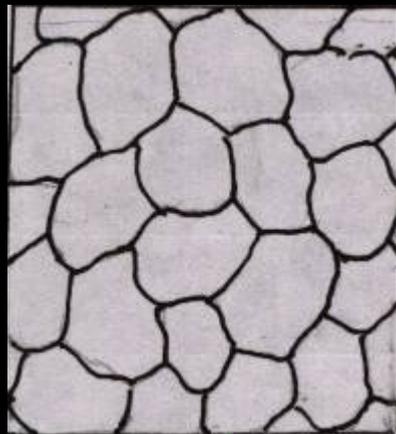
晶体滑移并不是，在切应力作用下，一部分相对于另一部分沿一定晶面和晶向发生相对的整体移动。

滑移的实质是位错运动



滑移
台阶

塑性变形中的组织变化



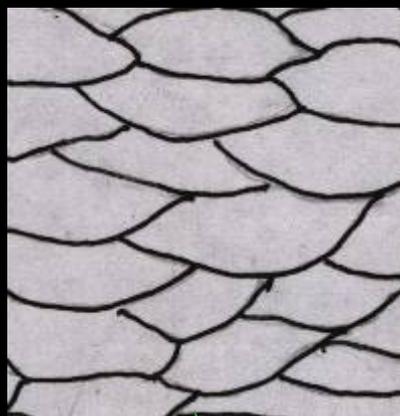
未变形

原始晶粒



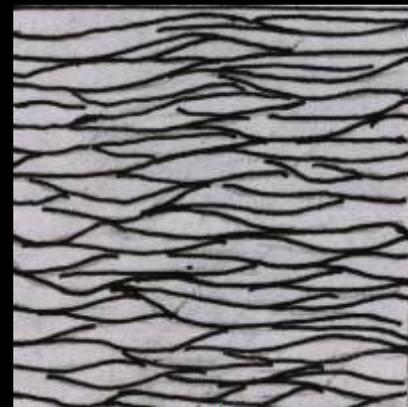
25%变形

滑移线



50%变形

拉长或压扁的晶粒



75%变形

细条状纤维组织

变形度增加



等轴
晶粒



晶粒被拉长
或者压扁



细条状
纤维组织

- (1) 随着应变量的增加，晶粒被拉长或者压扁，呈细条状或者纤维状；
- (2) 晶粒破碎，晶格扭曲，位错密度急剧增加。

塑性变形过程中的性能变化

塑性变形过程中材料内部的晶格畸变，晶粒破碎，晶体缺陷特别是位错密度增加，会使晶体的性能发生明显的变化。

物理性能

电阻增加

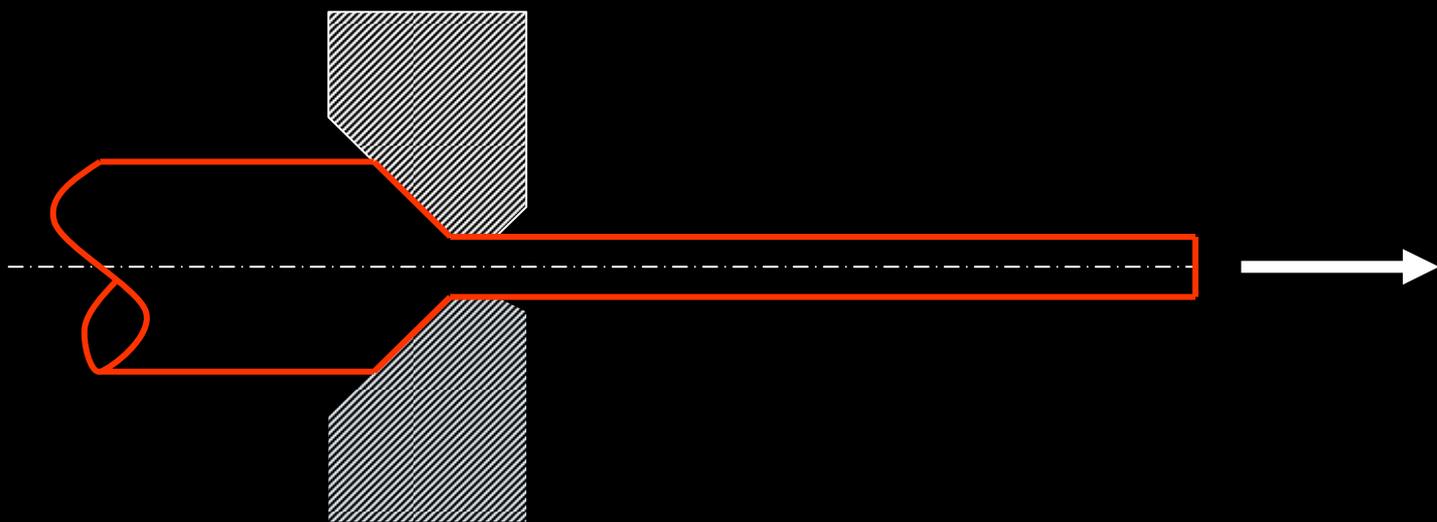
力学性能

- 强度、硬度增加
- 塑性、韧性降低

抗腐蚀性能降低

冷塑性变形导致金属材料的强度、硬度升高，塑性、韧性降低的现象称为**加工硬化**或**形变强化**。

- 70%冷轧变形后，纯铁及低碳钢的 σ_b 可提高400~500MPa；
- 80%冷变形后，细片状P的 w_C 1.0%高碳钢 σ_b 可提高1100~1200MPa；
- 90%冷拔变形后，细片状P的 w_C 1.0%高碳钢丝 σ_b 可达3000MPa。



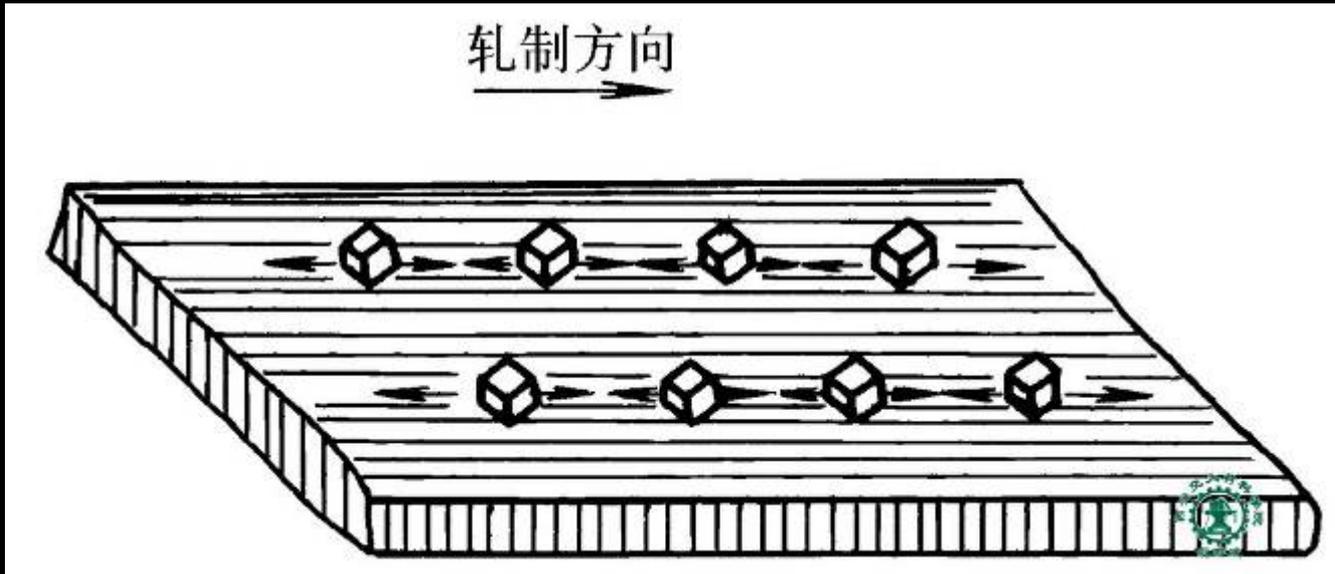
钢丝被拉拔的一端因塑性变形强度升高，不再继续变形；而未经变形的粗端强度低，可通过拔丝模继续变形，从而获得粗细均匀的钢丝。

加工硬化的工程意义

- “加工硬化”是强化金属材料的一种手段，尤其是对那些不能用热处理方法强化的金属。
- 加工硬化是各种冷变形成型得以进行的原因。
- 加工硬化使零件在偶然超载时，不会突然断裂。

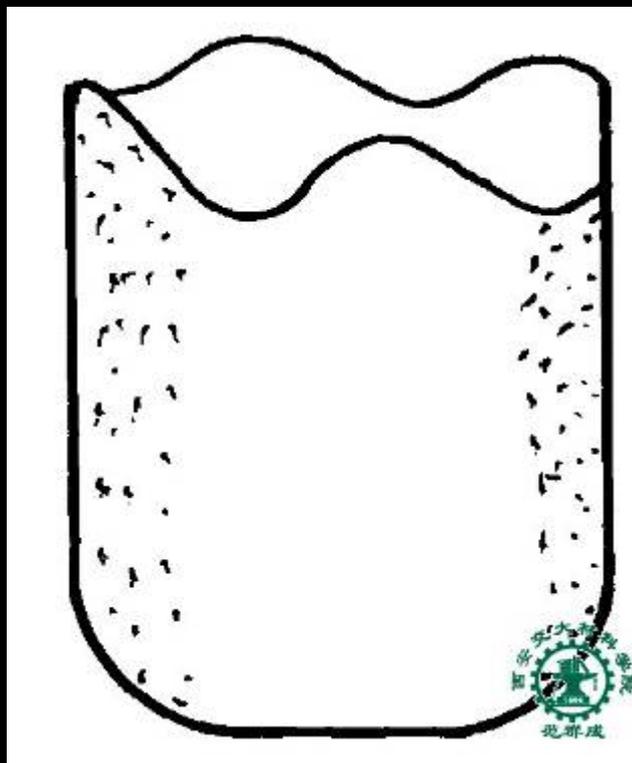
组织引起各向异性

- 当变形量很大时，原来位向不同的晶粒因滑移产生的转动，将取得接近一致的结构称变形组织，又称择优取向。



结构引起各向异性

- 变形结构的各相异性是明显的。其不均匀的塑性变形会使薄板冲压产生“制耳”现象。



- 在塑性变形的金属中，由于各部分变形的不均匀性，将造成变形内应力，又称残余应力。
- 宏观残余应力（体积范围内平衡）
- 显微残余应力（晶粒间平衡）
- 晶格畸变应力（在几百到几千个原子内平衡，占残余应力的90%，是金属变形强化的主要原因）

残余应力使零件尺寸不稳定，残余压应力可提高疲劳强度，残余拉应力降低腐蚀性能。

二、冷变形钢在加热过程中组织和性能的变化

- 冷变形导致晶格畸变、晶粒破碎被拉长或压扁、缺陷增多、内应力升高，处于一种不稳定的状态，有自发恢复到变形前的稳定状态的趋势；
- 低温下，原子的活动能力弱，这种趋势无法完成；
- 加热可提高原子活动能力，从而会发生

回复、再结晶、晶粒长大

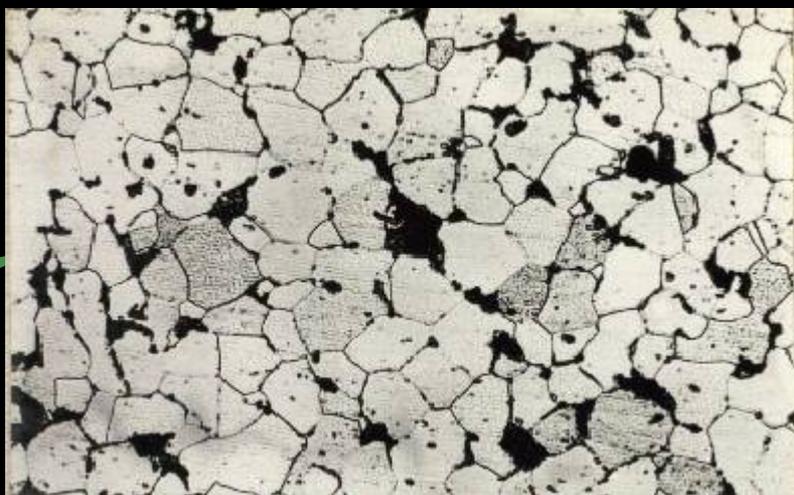
Q235经60%冷变形后加热30min时的组织变化



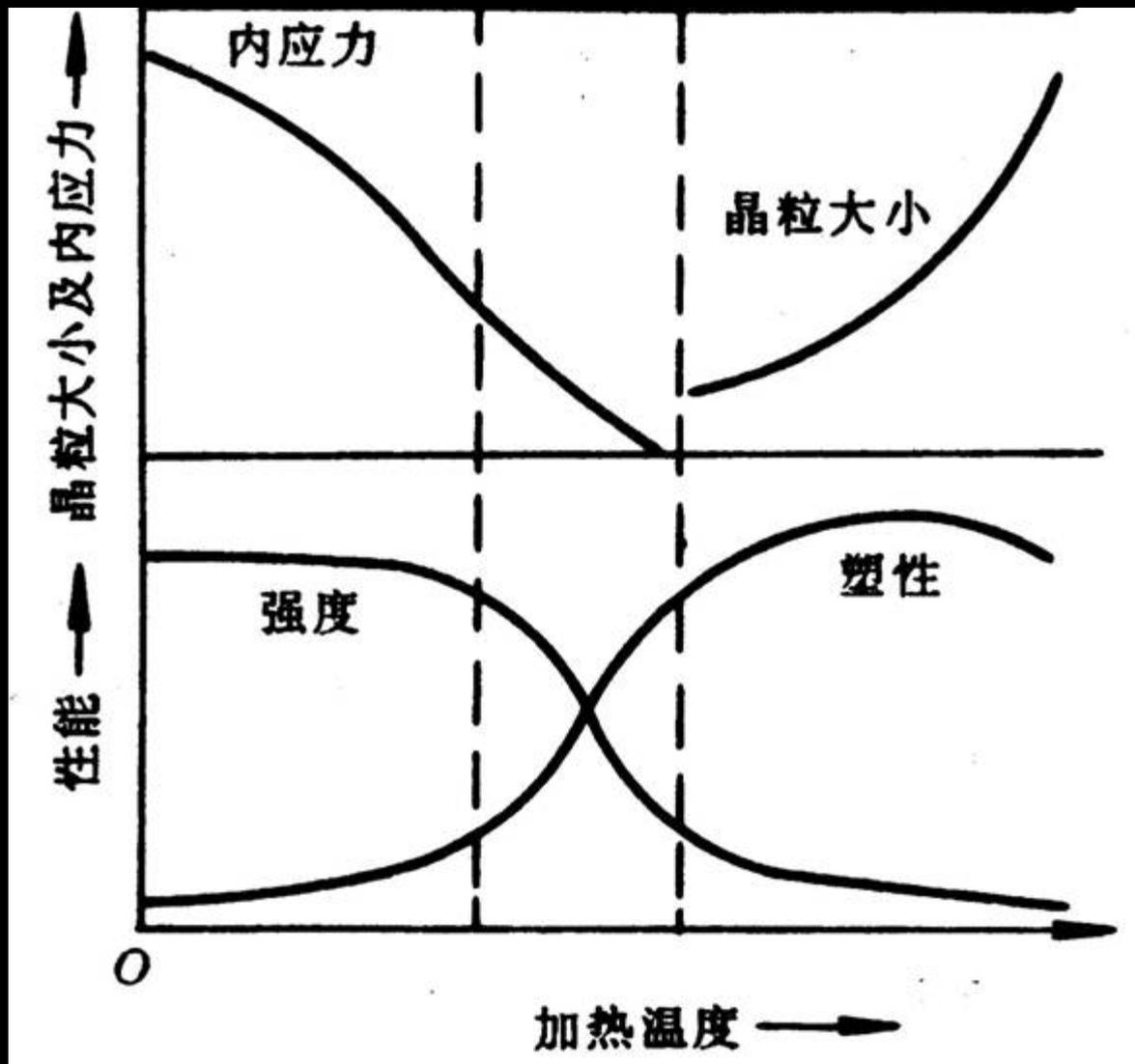
300°C



600°C



900°C



黄铜的冷变形回复再结晶长大



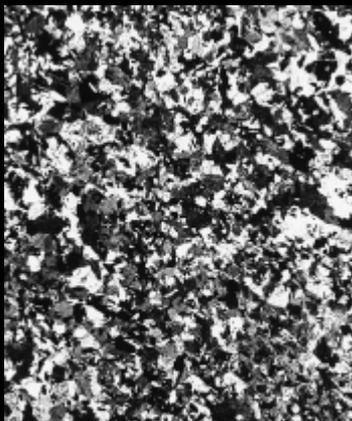
黄铜
冷变形33%



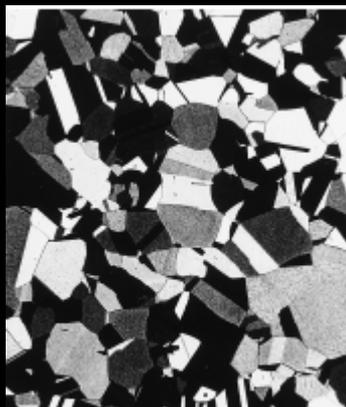
形核
3s 580°C



部分结晶
5s 580°C



完全结晶
8s 580°C



晶粒长大
15min 580°C



晶粒长大
10min 700°C

回复

- 加热温度不高，不引起显微组织的变化；
- 原子排列畸变程度减轻，空位剧烈减少，**电阻明显降低**；
- 强度硬度略有降低，内应力明显下降。

基本上保持加工硬化效果；

工程应用

- 降低内应力，稳定零件尺寸；
- 提高导电性；
- 防止SCC。
- 此阶段称为“去应力退火”

再结晶

- 加热温度较高；
- 组织恢复为细小的等轴晶粒；
- 内应力完全消失；
- 加工硬化效果消除，材料的塑性变形能力恢复；
- 性能：强度、硬度降低，塑性、韧性恢复。

此阶段又称再结晶退火

再结晶是一个再结晶形核和长大的过程。

再结晶的晶核实际上是“现成的”，它存在于畸变能较大的区域。

工程应用

再结晶退火主要用于金属冷加工工艺过程中，使冷压力加工得以进一步进行。

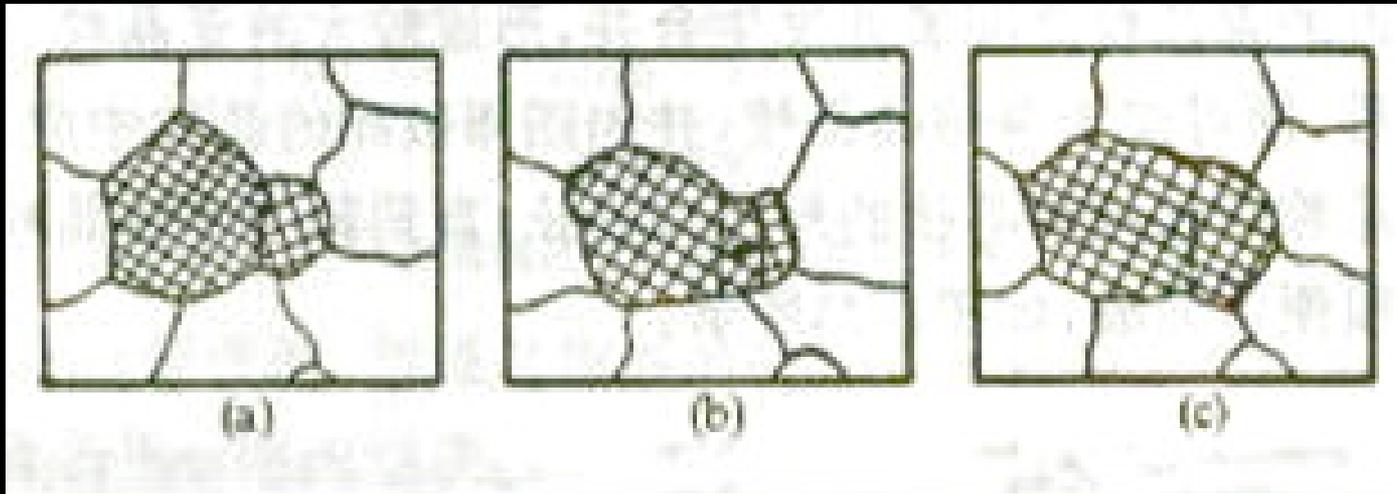
冷拔钢丝工艺

- 冷拔钢丝不是一次从圆钢冷拔而成的，要经过多次的拔丝过程，使钢丝直径逐渐减小至所要求的尺寸；
- 在冷拔变形过程中，材料的强度提高， σ_b 和 σ_s 都提高；
- σ_s / σ_b 提高，冷变形无法继续进行；
- 在冷拔过程中要进行中间再结晶退火处理。

如：汽车轮胎钢帘线的生产过程中要进行多次再结晶退火处理，把5mm的钢丝最终拉拔成0.1~0.2mm；再结晶退火是该工艺的关键技术。

晶粒长大

在结晶结束后，加热温度继续升高或者延长时间，晶粒会长大。带来的后果是强度、塑性韧性下降。



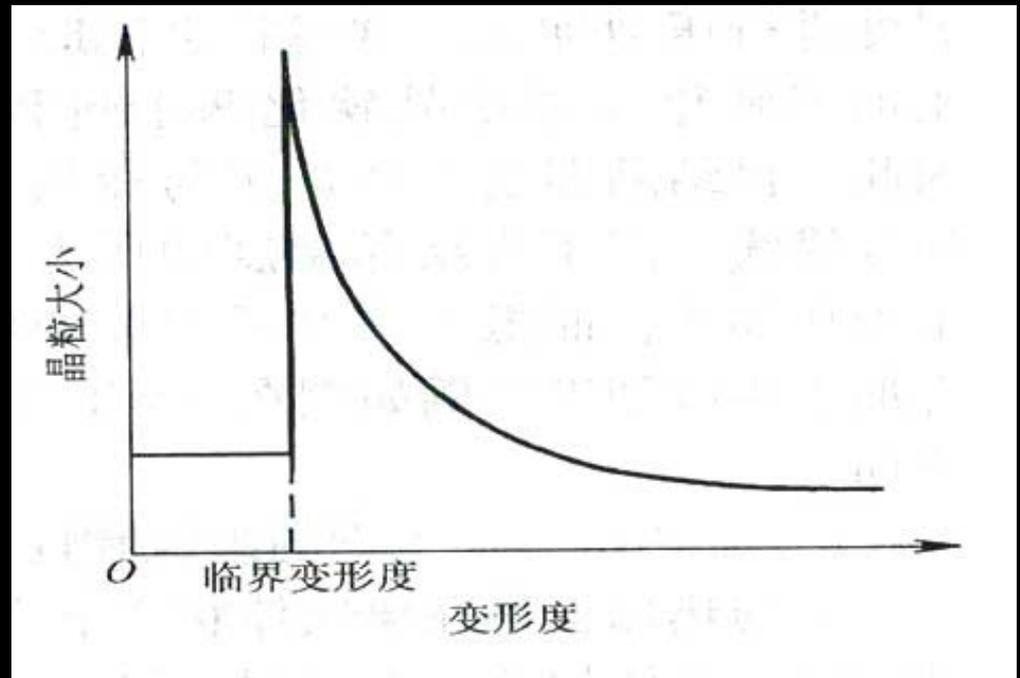
再结晶晶粒长大实质上是一个晶粒的边界向另一个晶粒中迁移，使这个晶粒的晶格位向逐步改变为与其相同的位向。即这个晶粒被逐步“吞并”，合成一个大晶粒。

影响再结晶晶粒大小的因素

变形度、加热温度、加热时间、成分、杂质、原始晶粒度等。

变形度

临界变形度 金属冷变形后再结晶时晶粒极易长得粗大，这时所对应的应变度，称为临界变形度。金属材料的临界变形度一般为（2%~10%）。



- 大于临界变形度，变形度越大，退火后晶粒尺寸越小；
- 冷加工都要避开临界变形度，避免组织粗大。强调！

退火温度

- 温度过低，不发生再结晶；
- 温度过高，再结晶晶粒会长大；
- 温度再适当

$$T_{\text{再}} = 0.4T_{\text{m}} \quad (\text{K})$$

$$T_{\text{退}} = T_{\text{再}} + 150 \sim 250^{\circ}\text{C}$$

三、热压力加工对钢组织和性能的影响

冷、热加工的定义

热加工？

冷加工？

- 钢在 500°C
- W在 1000°C
- Sn在室温

- 再结晶温度是冷热加工的分界线；

铁： $T_{\text{再}} = 600^{\circ}\text{C}$

W： $T_{\text{再}} = 1200^{\circ}\text{C}$

Sn： $T_{\text{再}} = -7^{\circ}\text{C}$

- 钢的热加工是在单相奥氏体区进行的，此时，材料的塑性好；
- 奥氏体经历加工硬化和再结晶软化两个过程；
- 热加工的变形度、变形温度和时间及冷却速度决定了加工后的奥氏体晶粒大小，称为热加工工艺参数；

- 钢中加入微量V、Nb等元素，可在奥氏体晶界上形成细小弥散的C、N化物，阻碍晶界的迁移和晶粒长大，从而获得细小的奥氏体晶粒；
- 热加工可消除钢锭中的一些缺陷，打碎粗大的柱状晶，从而提高钢的性能；
- 组织呈“流线”型分布，纵向性能高于横向。

第七节 碳钢的分类和牌号

一、碳钢的分类

1 按含碳量分类

}	低碳钢	$(w_c < 0.25\%)$
	中碳钢	$(0.30 < w_c < 0.60\%)$
	高碳钢	$(w_c > 0.60\%)$

2 按质量分类

普通碳素钢	$w_s < 0.035 \sim 0.05\%$
	$w_p < 0.035 \sim 0.045\%$
优质碳素钢	$w_s < 0.030 \sim 0.035\%$
	$w_p < 0.030 \sim 0.035\%$
高级优质碳素钢	$w_s < 0.02\%$
	$w_p < 0.03\%$

3 按照钢的用途分

碳素结构钢

主要用于制造各种工程结构和机器零件。

碳素工具钢

主要用于制造各种工具，如刃具、模具及量具等等。

二、碳钢的牌号和应用

1 普通碳素结构钢

特点： 保证力学性能，在牌号上直接体现，不保证成分。

Q+数字（-字母·字母）

“屈”的汉语拼音第一个字母

屈服强度
MPa

质量等级

冶炼方式

质量等级

普通碳素结构钢按质量分成4个等级，标注为：A, B, C, D。钢的含硫、磷量依次降低，质量提高。

冶炼方式

普通碳素结构钢的冶炼方式有3种：沸腾钢、镇定钢、半镇定钢。

F-沸腾钢，b- 表示半镇定钢，无标注-镇定钢

用途：用于桥梁、建筑、各种型钢、条钢和铆钉、螺钉、螺母等。

例：

Q235-A·F

屈服强度235MPa, A级沸腾钢

Q235-C

屈服强度235MPa, C级镇静钢

2 优质碳素结构钢

特点： 保证化学成分和力学性能，
可热处理获得需要的性能

牌号

$w_C \times 10,000$ 取2位整数

用途： 主要用于制造机器零件

常用牌号

08、08F、
10、10F

塑性韧性好，冷成型性和焊接性能好，可冷轧成薄板，用于仪器仪表外壳、汽车车身等

30、40、
45、50

综合性能好，用于轴类零件，如曲轴、连杆等

60、65

弹性极限高，主要用于弹簧类零件

3 碳素工具钢

特点： 保证化学成分和力学性能，需要热处理获得需要的性能

牌号

T 数字(A)

“碳”的汉语拼音第一个字母

$w_C \times 1000$
取整数

高级优质

常用牌号

T8 T10

T8A T10A T12A (高级优质钢)

成分、性能特点

- 高碳；
- 硬度高；
- 耐磨性好。

要点总结

- 1) 掌握纯铁的组织 and 性能、铁碳合金中的相及组织组成物；
- 2) 掌握Fe-Fe₃C相图及碳对组织和性能的影响；
- 3) 了解钢中杂质元素的影响；
- 4) 了解钢锭的组织特点与缺陷；
- 5) 掌握回复、再结晶和长大；
- 6) 知道冷加工和热加工常识。

作业（第二章）

1、3、4、6、9、10、11、15

第三章

钢的热处理

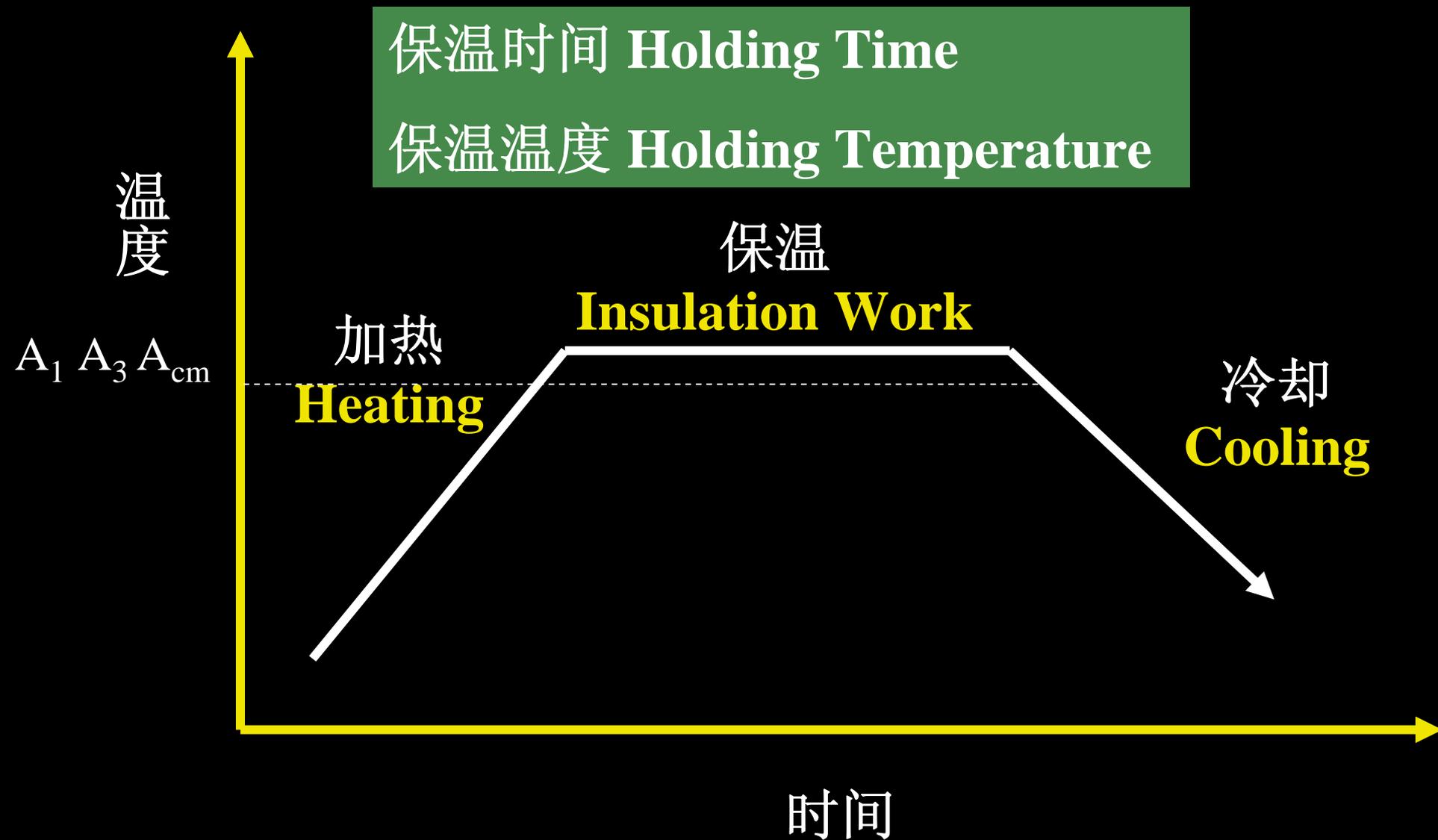
Heat Treatment of Steels

钢的热处理

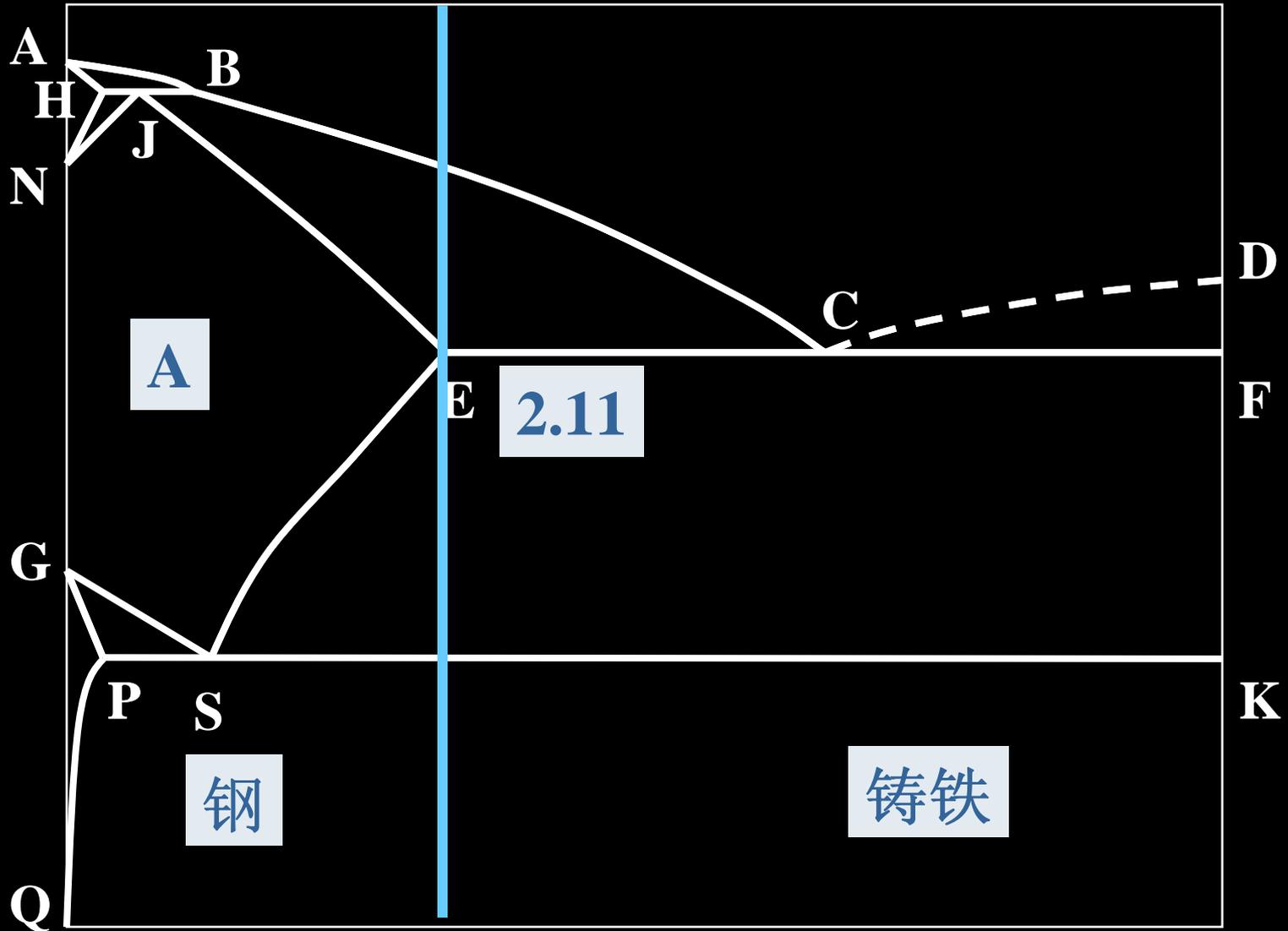
Heat Treatment of Steels

将钢件在一定的介质中加热到一定的温度并保温一定的时间，然后冷却，以期改变其整体或者表面组织，从而获得所需要的性能的一种热加工工艺。

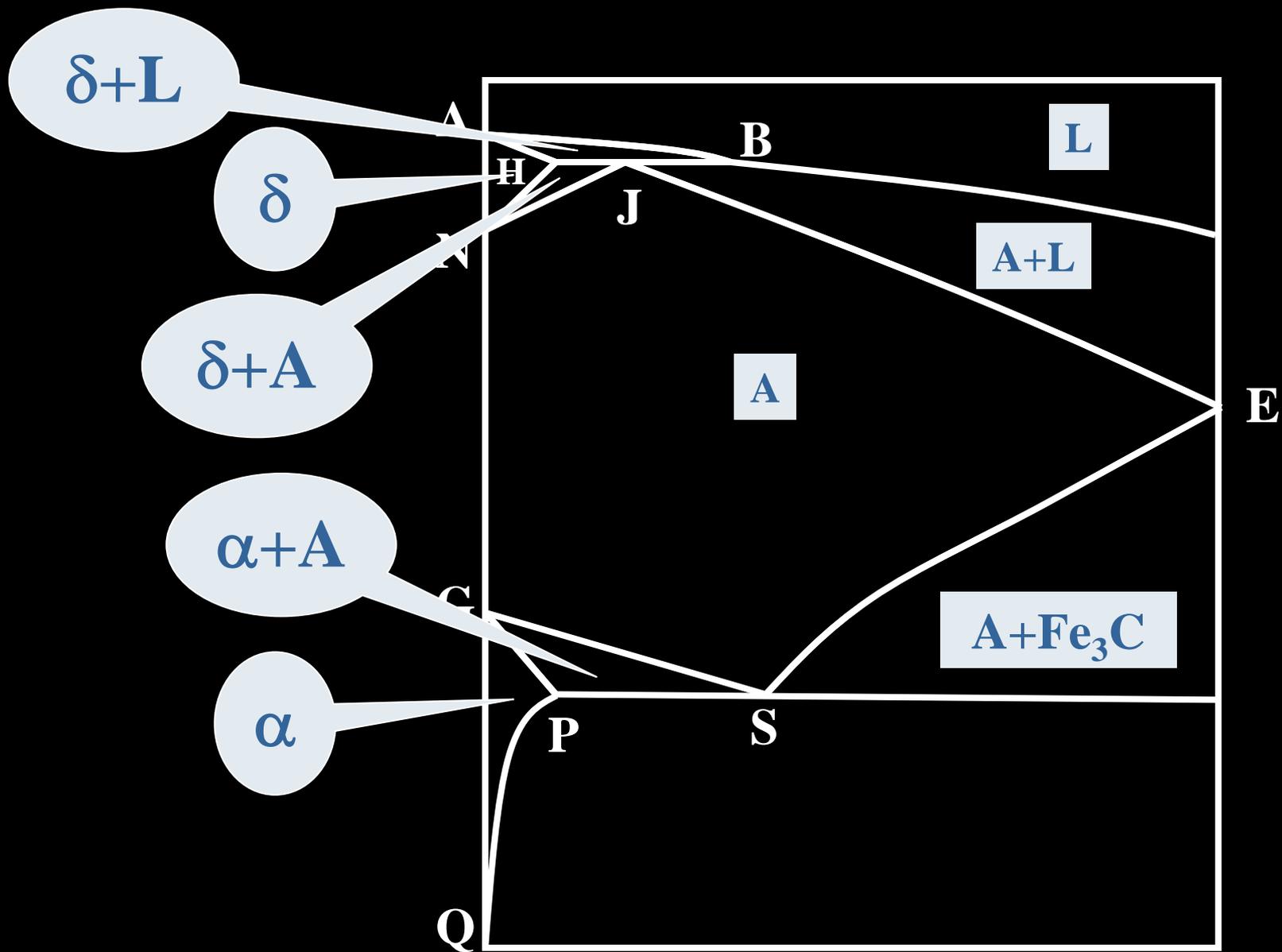
钢的热处理工艺示意图



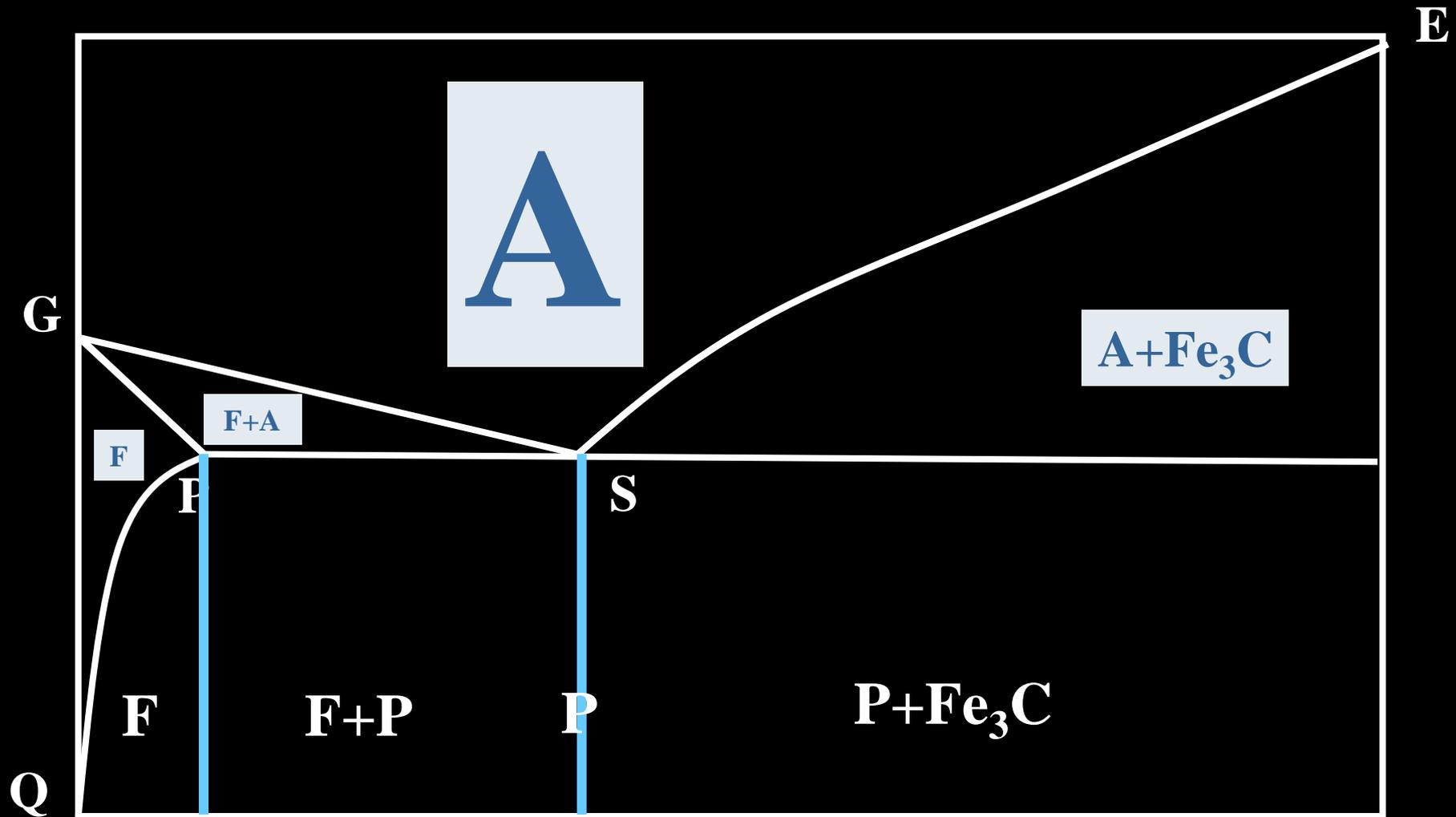
3.1 钢在加热时的转变



钢相图



钢热处理相图



钢的平衡组织

F 铁素体 **Ferrite**、

P 珠光体 **Pearlite**、

Fe₃C 渗碳体 **Cementite**

F+P

P+ Fe₃C

特征线

A_1 线(PSK线)

加热 Ac_1

冷却 Ar_1

A_3 线(GS线)

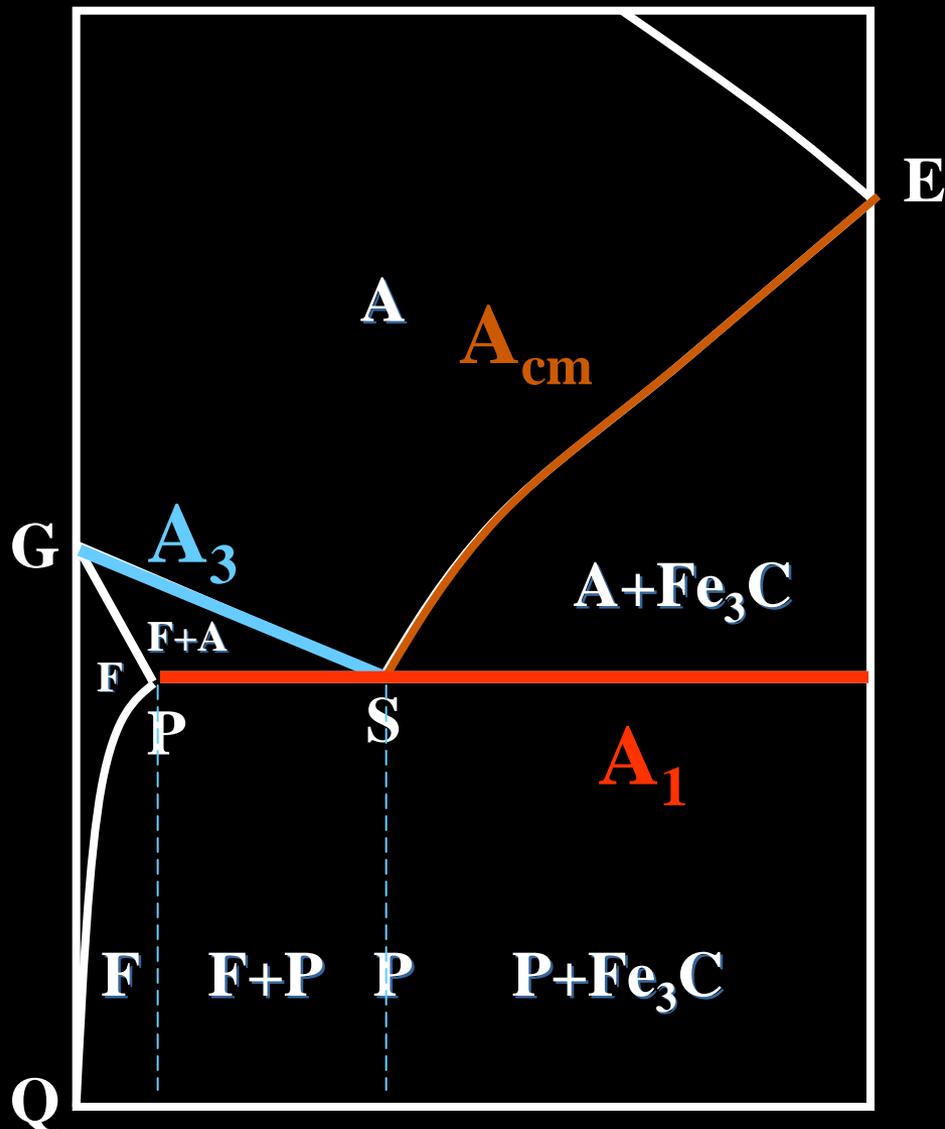
加热 Ac_3

冷却 Ar_3

A_{cm} 线(SE线)

加热 Ac_{cm}

冷却 Ar_{cm}



一、奥氏体的形成

(一) 共析钢的奥氏体的形成过程

① 形核

F和 Fe_3C 的界面最易于形核，通过同素异构转变 $\text{F} \rightarrow \text{A}$ 和 Fe_3C 的溶解来实现。

② 长大

一旦形核，A则向F和 Fe_3C 方向长大，此过程同样通过同素异构转变 $\text{F} \rightarrow \text{A}$ 和 Fe_3C 的溶解来实现。

③ 残余碳化物溶解

由于同素异构转变 $F \rightarrow A$ 的速度比和 Fe_3C 向奥氏体中溶解的速度快，所以，同素异构转变完成后，还有一部分碳化物（残余碳化物）尚未溶解，它会在随后的加热过程中继续向奥氏体中溶解。

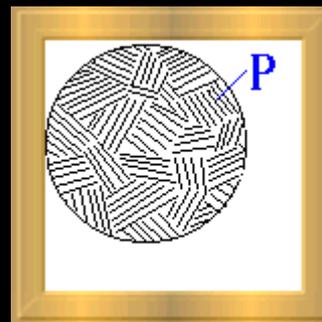
④ 奥氏体均匀化

残余碳化物溶解完毕后，奥氏体的成分是不均匀的，原来 F 处含碳量低，而原来 Fe_3C 处含碳量高。只有经足够长的保温时间，才能通过 C 的扩散形成均匀的 A 等轴晶。

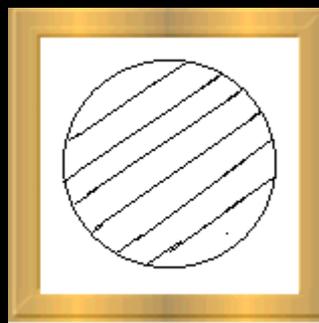
A形核长大示意图



P的实际组织

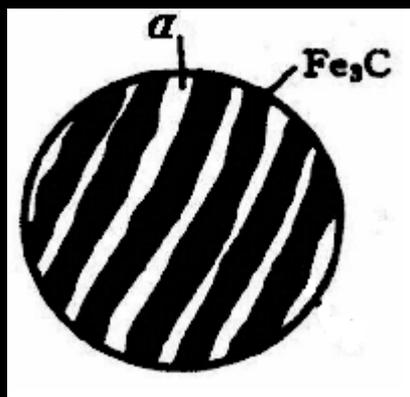


P组织示意图

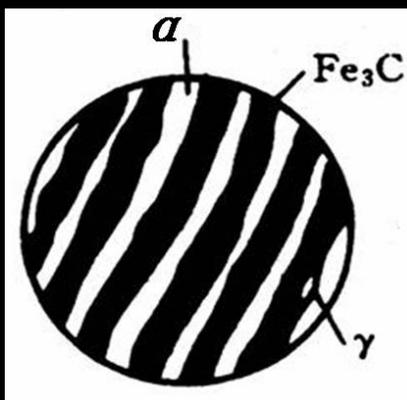


P组织示意图放大

A形核长大示意图



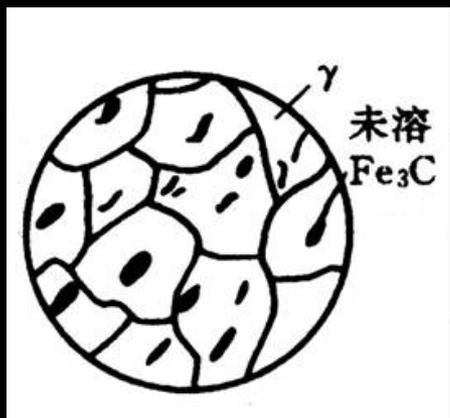
P组织



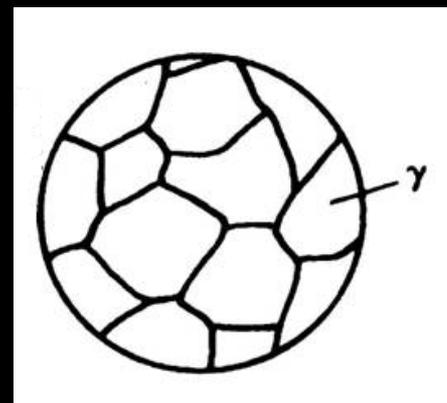
A形核



A长大

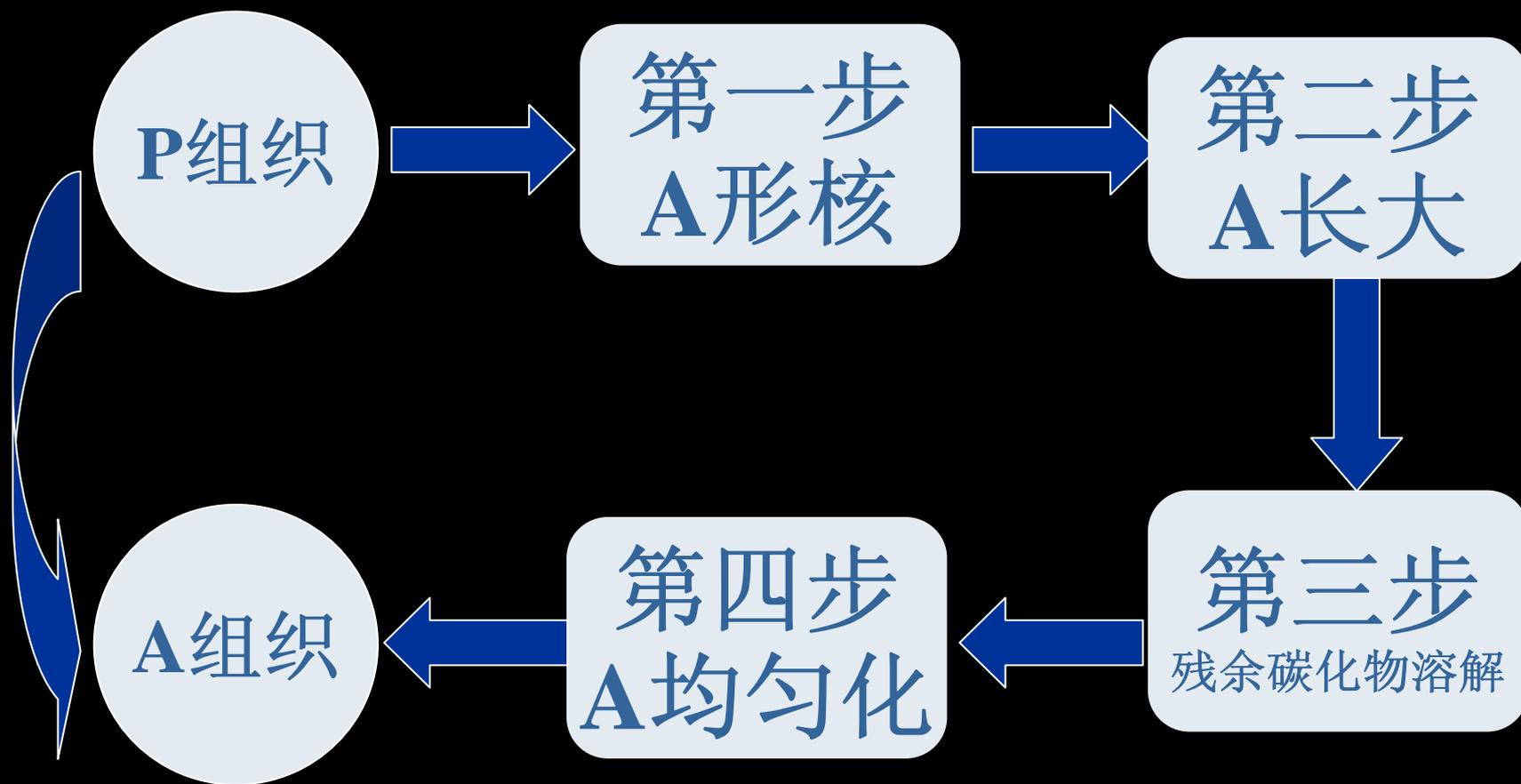


残余碳化物溶解



A均匀化

A转变四个阶段



(二) 影响A形成的因素

因素
Factors

A形成温度T

加热速度 W_H

钢中C的含量

原始组织

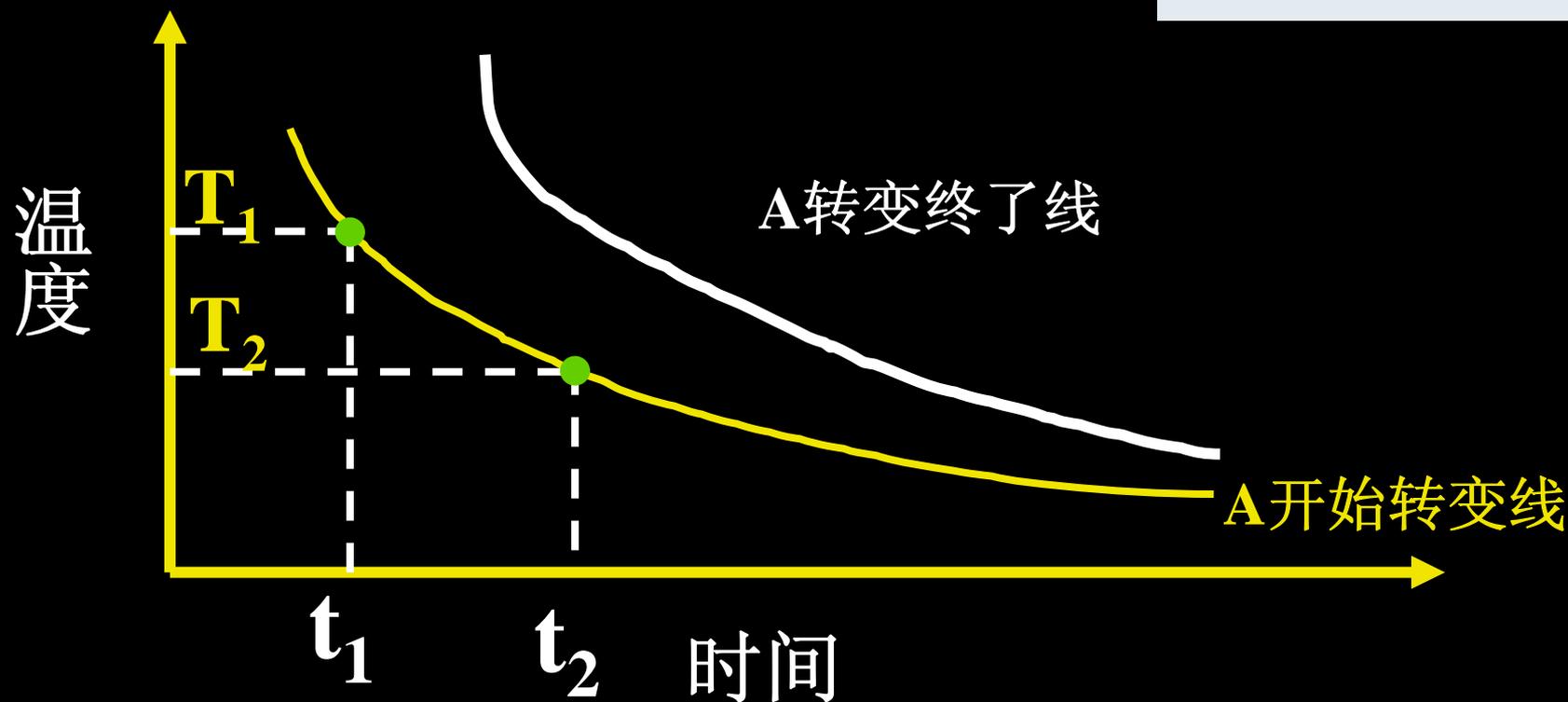
合金元素

(1) A的形成温度

A的形成温度 \uparrow ,
则A形成速度 \uparrow

$$T_1 > T_2$$

$$t_1 < t_2$$



(2) 加热速度 W_H

❖ $W_H \uparrow$

$Ac_1 \uparrow$ 、 $Ac_3 \uparrow$ 、 $Ac_{cm} \uparrow$

转变孕育期和转变所需要的时间

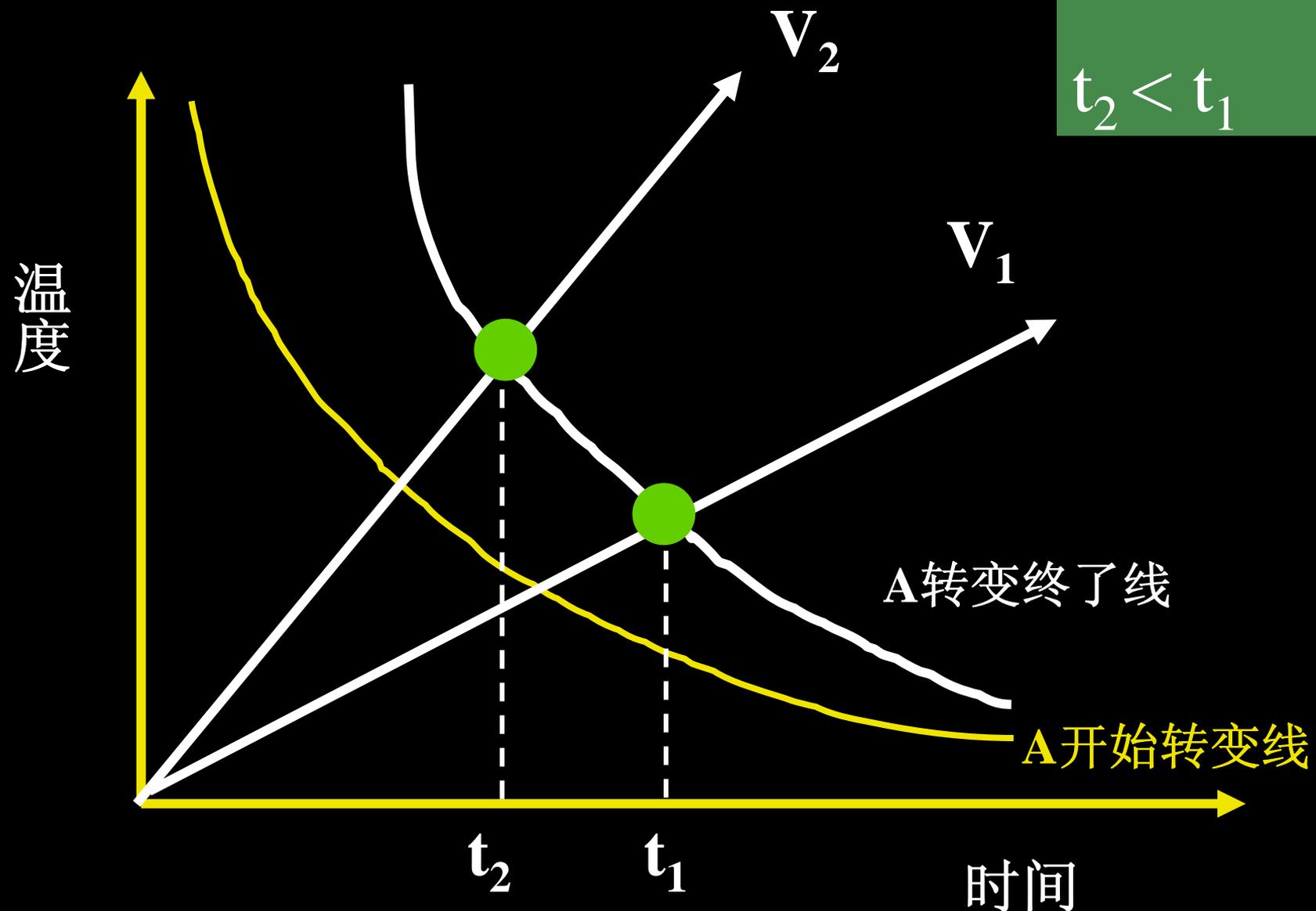
↓。

❖ $W_H \uparrow$

A的形成速度 \uparrow 。

加热速度影响示意图

$V_2 > V_1$
 $t_2 < t_1$



(3) C的含量

① 亚共析钢 Hypoeutectoid Steel

A_3 (GS线):

C% \uparrow A_3 \downarrow

P \uparrow

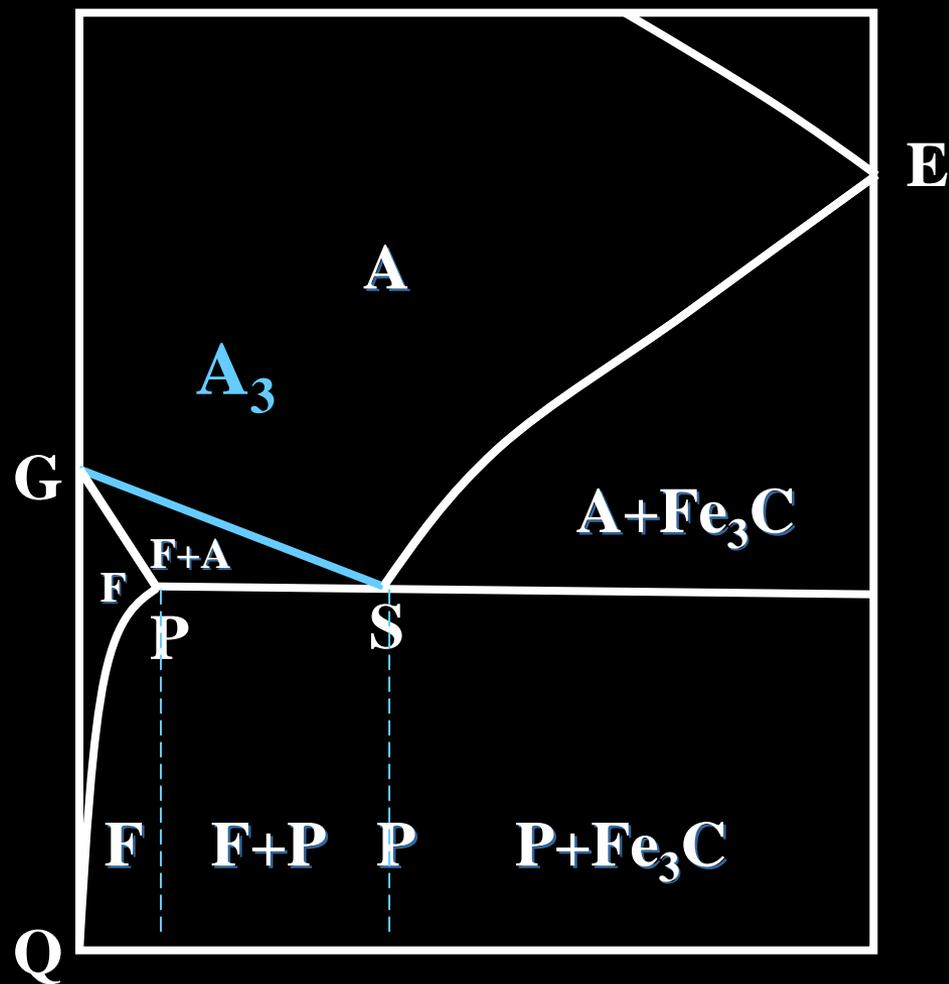
F \downarrow

F和 Fe_3C 的界面 \uparrow

A形核数目将 \uparrow

C的扩散距离 \downarrow

A形成速度 \uparrow

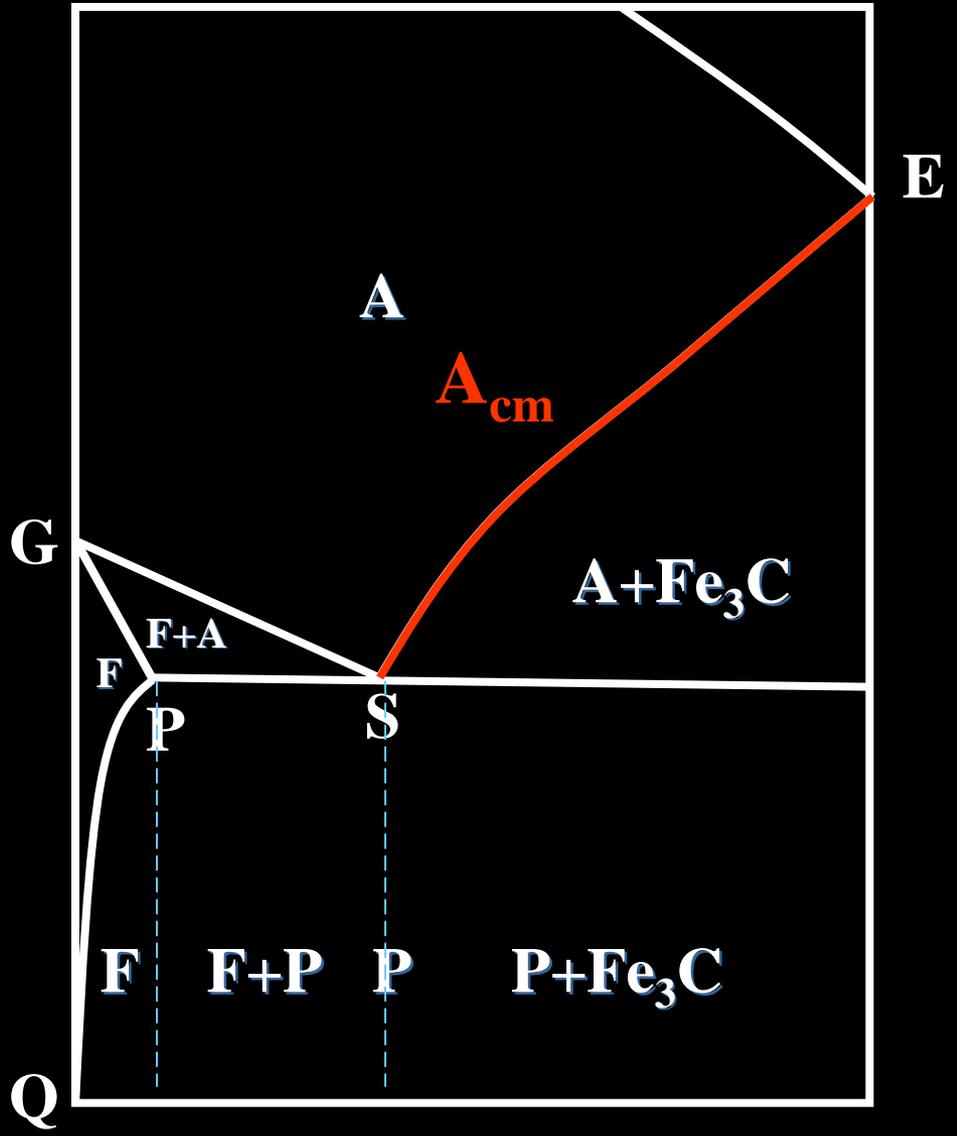


②过共析钢 Hypereutectoid Steel

A_{cm} (SE线):

C ↑ A_{cm} ↑
 Fe_3C ↑
 P ↓

F和 Fe_3C 的界面 ↓
 A形核数目将 ↓
 C的扩散距离 ↑
 A形成速度 ↓



结论

$w_C = 0.77\%$ 时，F和 Fe_3C 的界面最多，A化速度最快， $T > A_1$ 时，完全形成P。

共析钢A化速度最快

(4)原始组织

原始组织越细，相界面越多，A的形成速度↑

例：细片状P比粗片状P容易A化。

(5)合金元素 Alloying element

①碳化物、氮化物

难溶的碳化物：**Cr、W、Mo**

稳定性高，不易于聚集长大的碳化物、氮化物

Ti、Zr、Al、V、Nb、Ta

会阻碍 α 晶粒的长大
(可以形成本质细晶粒钢)

②Mn、P、Al

Mn、P 以及过量的Al在钢中熔入A
会削弱Fe原子的结合力，
加速Fe原子的自扩散
加速A的长大。

二、奥氏体晶粒大小

A的晶粒度基本概念

(1)定义

对钢的晶粒级别进行分级。

晶粒度对钢的性能的影响是直接的，所以在很多标准中规定晶粒度的等级。

(2) 晶粒度

Coarseness of Grain

A 晶粒大小用晶粒度 N 表示，
通常分 8 级

1~4 粗晶钢 **Scorched Steel**

5~8 细晶钢 **Fine-Grain Steel**

>8 超细晶钢 **Ultra-fine Grain Steel**

(3) 晶粒度的数学表示方式

假定：放大倍数 $100\times$
每平方英寸内晶粒数目为 n ，
则：

$$n = 2^{N-1}$$

(一) 奥氏体的实际晶粒度

(1) 定义

在具体加热条件下得到的奥氏体晶粒大小称为奥氏体实际晶粒大小或奥氏体实际晶粒度

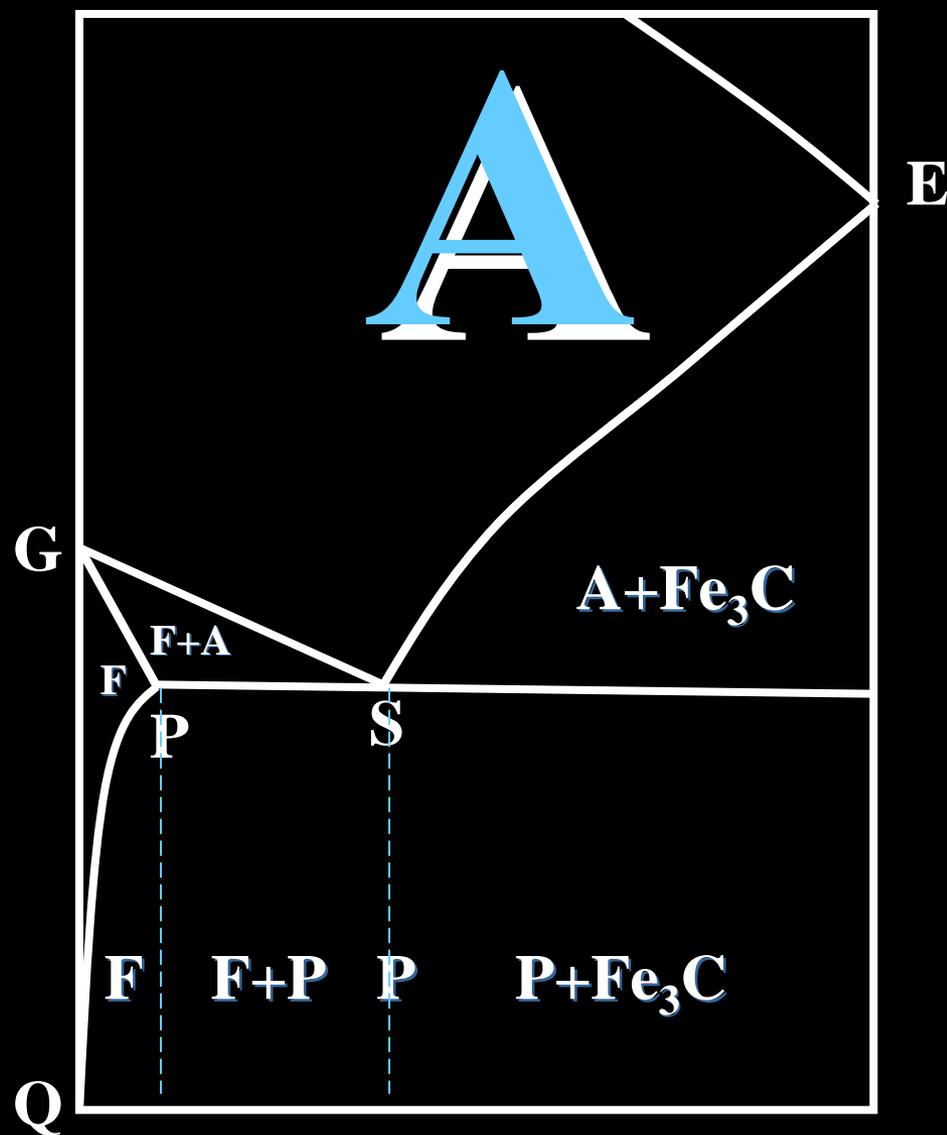
(2) 影响因素

- ① 加热温度越高
- ② 保温时间越长

奥氏体的
实际晶粒度越大

过热

Overheat



(二) 奥氏体的本质晶粒度

(1) 定义

本质晶粒度只表示钢在加热时奥氏体晶粒长大倾向的大小。并不表示奥氏体实际晶粒的大小。

钢在 $930^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 下保温8小时冷却后所测定的晶粒度为本质晶粒度。主要是检验钢本身A长大倾向。

(2) 本质细晶粒钢

本质细晶粒钢一般具有阻碍奥氏体晶粒长大的元素如：**Nb**、**Ti**、**V**等，

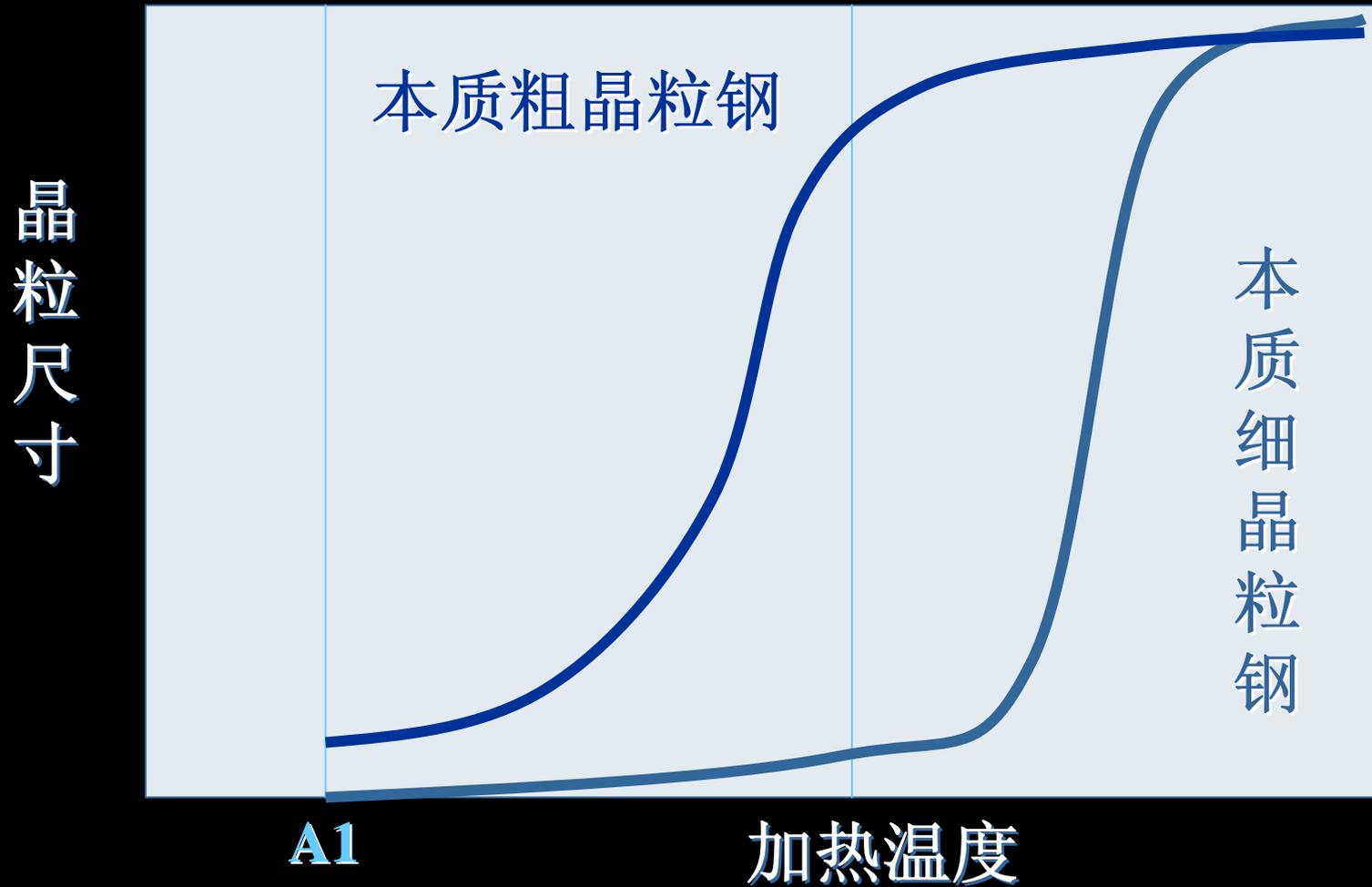
主要是这些元素易于形成**AlN**、**Al₂O₃**、**NbC**、**TiC**、**VC**等不易溶解的小粒子，阻碍奥氏体晶粒的长大。

(2) 本质粗晶粒钢

本质粗晶粒钢一般主要用**Si**、**Mn**脱氧，没有阻碍奥氏体晶粒长大的合金元素，奥氏体晶粒的长大的很快。热处理一定不能过热。

(3) 对比

Comparision



3.2 奥氏体转变图

热处理工艺中，有两种冷却方式：等温冷却、连续冷却

等温转变

Isothermal Transformation

连续转变

Continuous Transformation

1)等温转变

将已A化的钢迅速冷却到
 A_1 点以下某T,

恒温转变

2)连续转变

将已A化的钢连续冷却，使
其在 A_{r1} 以下
连续转变

一、过冷A的等温转变

过冷奥氏体

在临界温度以下尚未发生转变的不稳定奥氏体称过冷奥氏体。

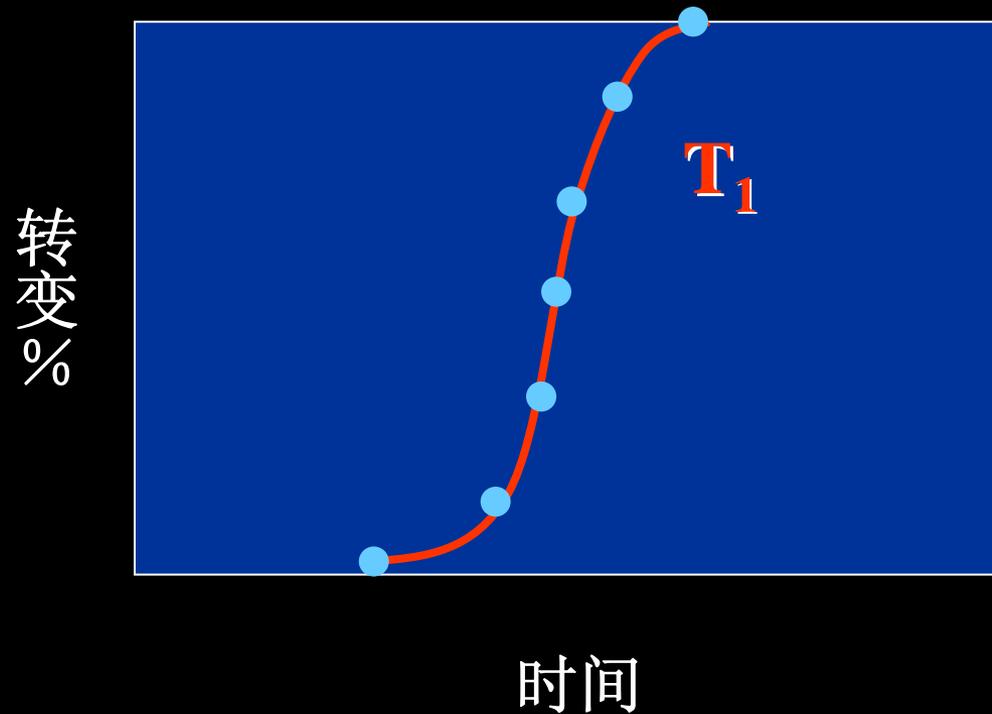
等温转变图

Temperature-
Time-
Transformation
Diagram

TTT 图

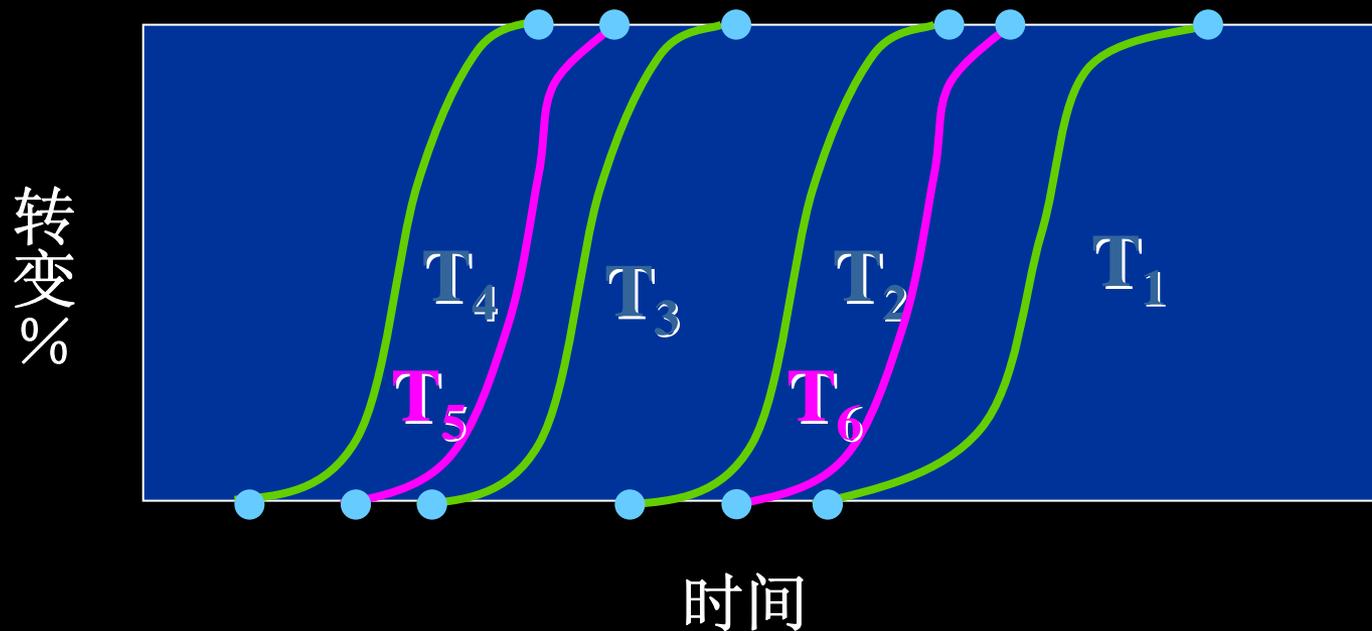
(一) TTT图的建立

- (1) 将奥氏体化的若干组（每组若干个）试样分别迅速放入不同温度的恒温盐（金属）浴中，每隔一段时间取出一个试样迅速淬入水中，然后观察其转变的相对量。

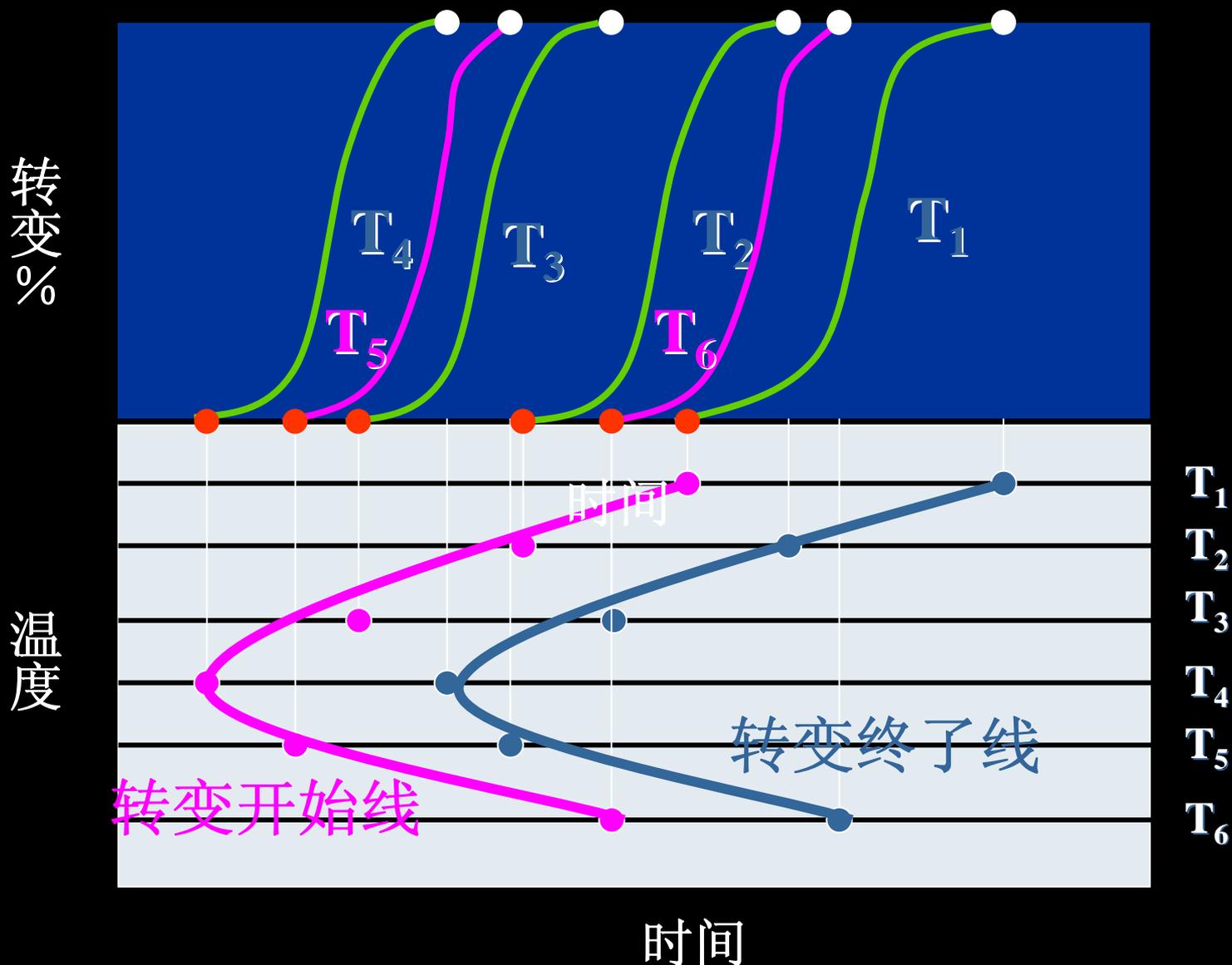


(2) 测量不同温度下过冷 Δ 的转变曲线

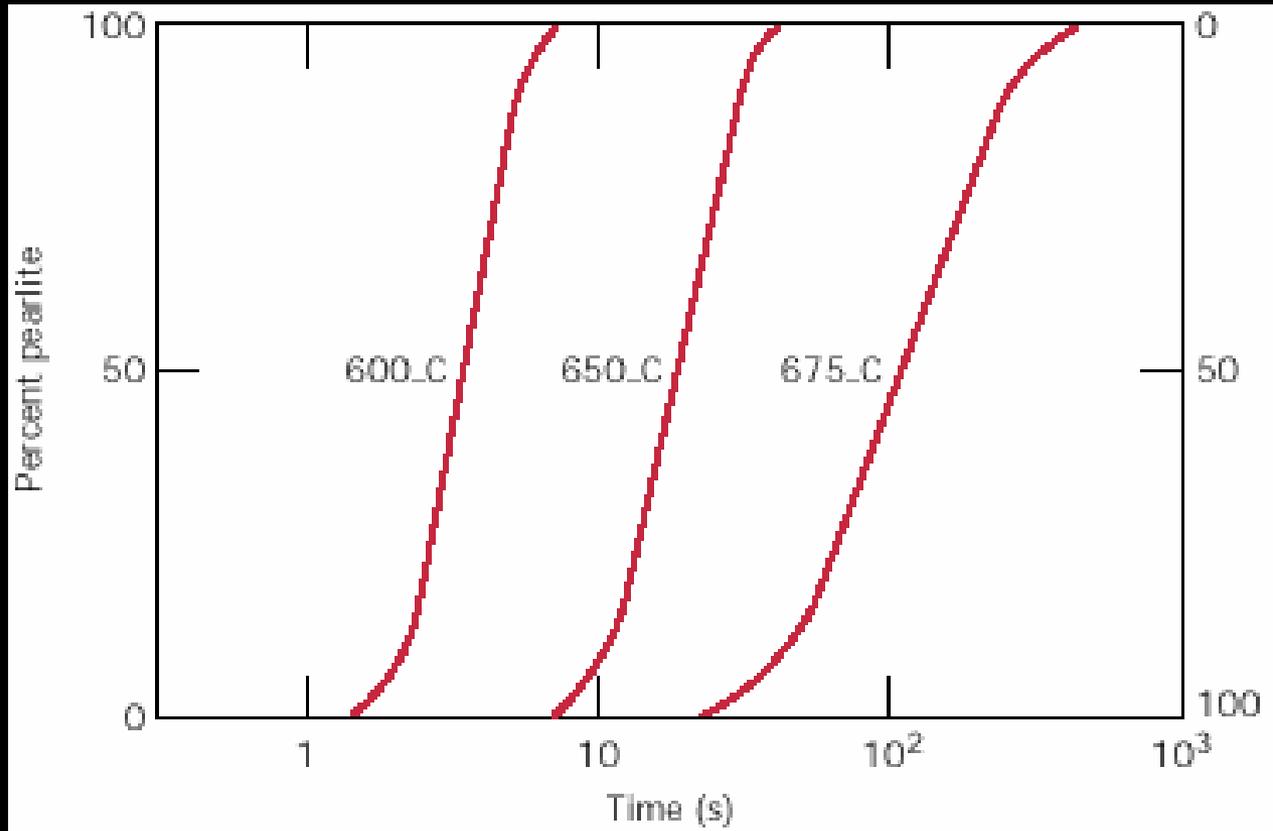
$$T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5 > T_6$$



(3) 汇总特征值

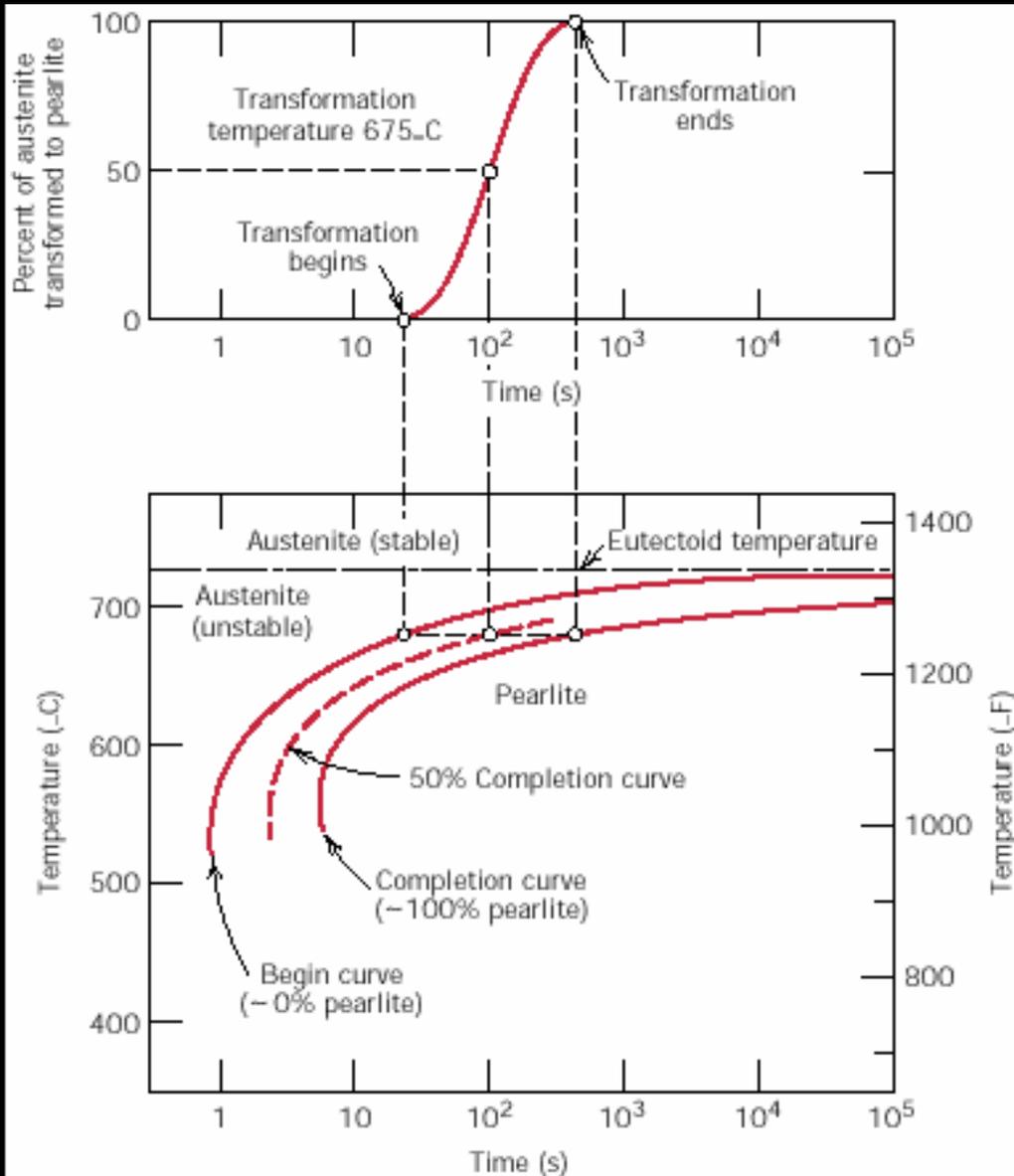


共析钢 Eutectoid Steel



For an iron-carbon alloy of eutectoid composition isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

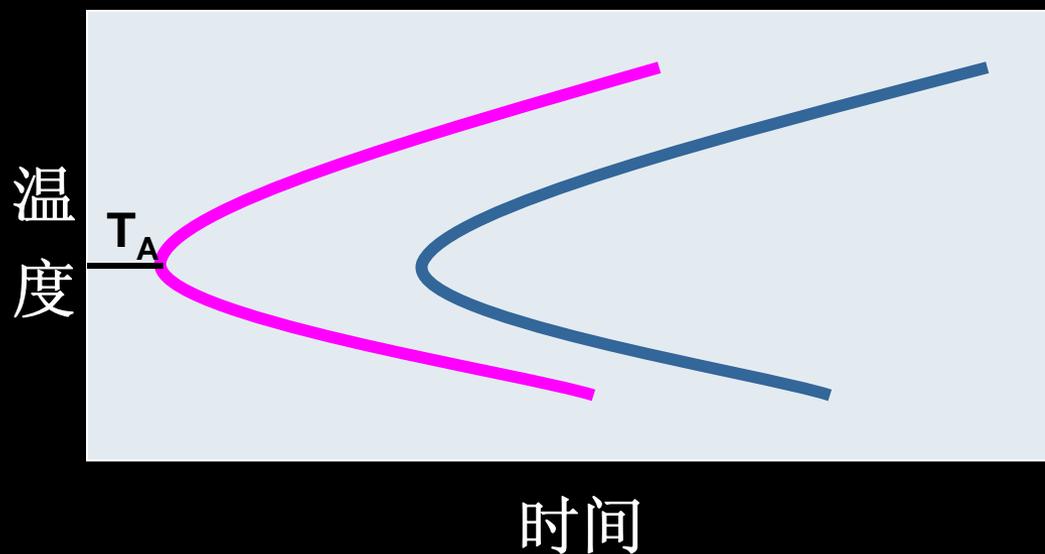
TTT Diagram of Eutectoid Steel



Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percent transformation-versus-logarithm of time measurements (top).

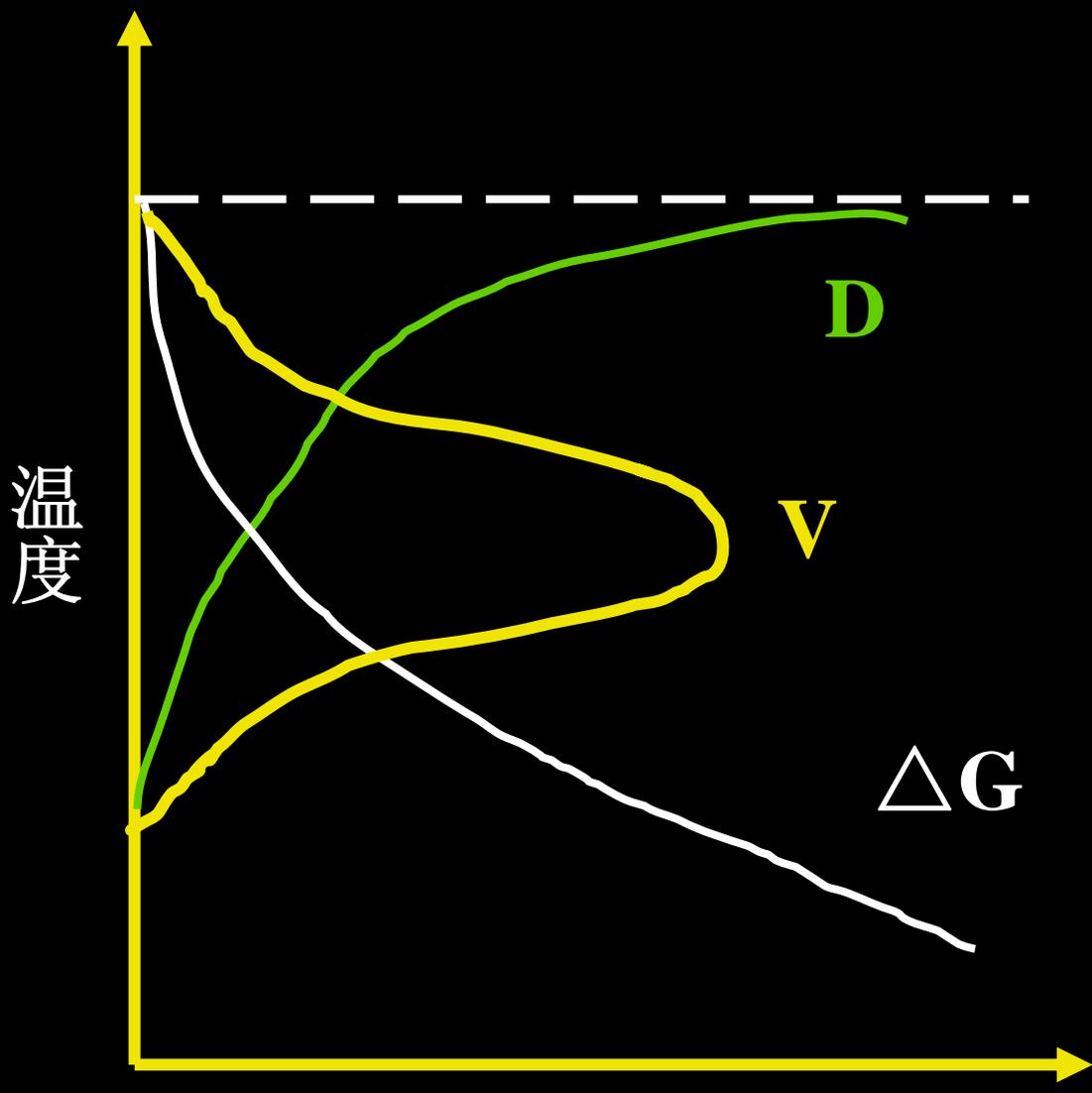
(二) 奥氏体TTT图分析

- 当 $T > T_A$ 时，
属于高温转变
随 $\Delta T \uparrow$ ，孕育期 \downarrow ，
转变 \uparrow
- 当 $T < T_A$ 时，
属于中温转变
随 $\Delta T \uparrow$ ，孕育期 \uparrow
转变 \downarrow
出现“鼻子”，
所以TTT图也叫C曲线



过冷度对过冷 Δ 转变的影响

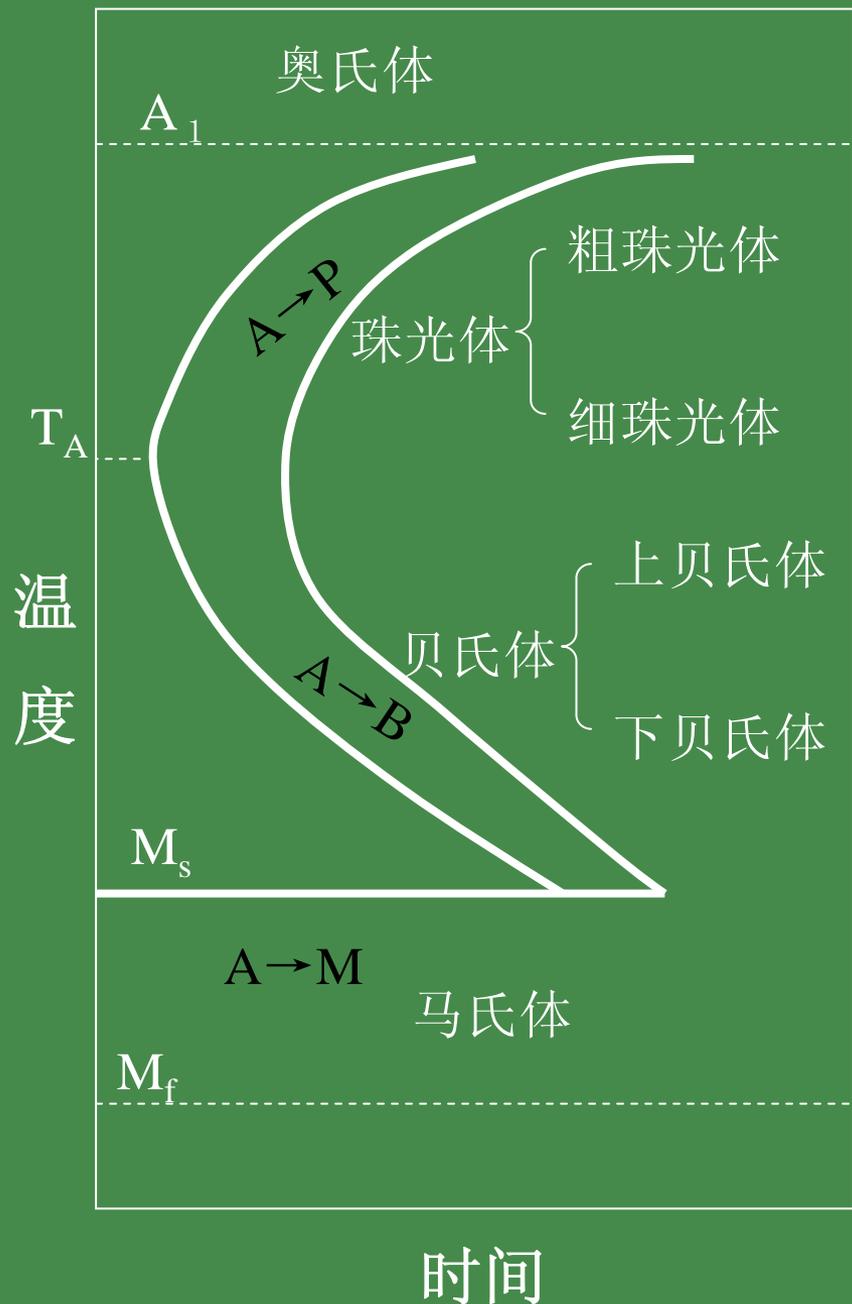
- $\Delta T \uparrow$ ，
自由能差 $\Delta G \uparrow$ ，
形核率 \uparrow ，
长大速度 \uparrow ，
相变速度 \uparrow
- $\Delta T \uparrow$ ，
原子扩散 $D \downarrow$ ，
(共析相变是扩散形相边)
相变速度 \downarrow



自由能、扩散速度、分解速度

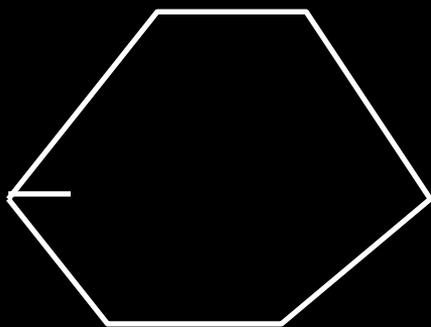
共析钢过冷A等温转变

- **P型转变**
高温转变($A_{r1} \sim 550^{\circ}\text{C}$)
- **B型转变**
中温转变($550^{\circ}\text{C} \sim M_s$)
- **M型转变**
低温转变($< M_s$)

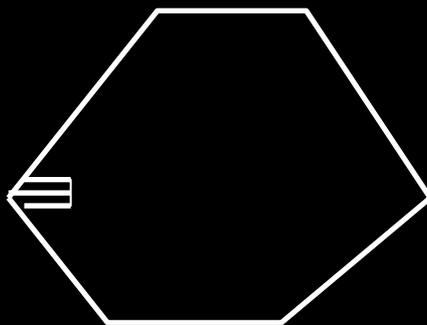


(三) 过冷 A 等温转变过程及产物

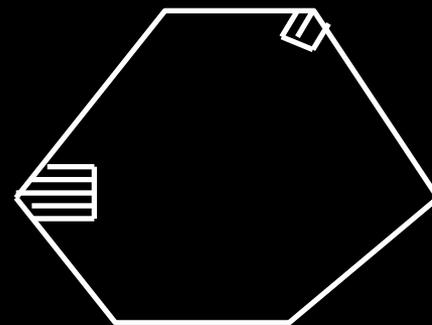
1. P型转变



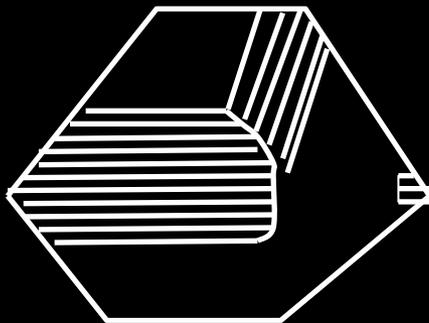
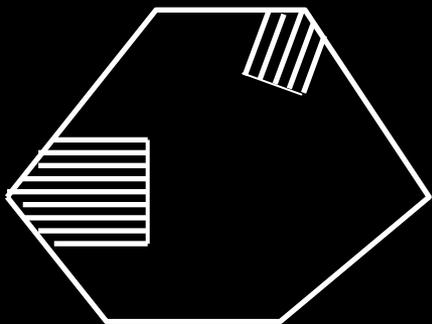
Fe_3C 在A晶界
形核



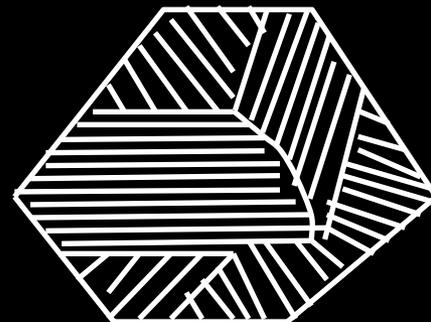
Fe_3C 周围贫
C, F形核,
形成P核



F长大, 排
C, Fe_3C 形核



P晶粒长大



在 $A_1 \sim 560^\circ\text{C}$ 恒温下，过冷 A 发生 P 转变，产物为层片状 P 组织。不同转变温度下层片大小及距离不同，据此可将 P 转变产物分为：

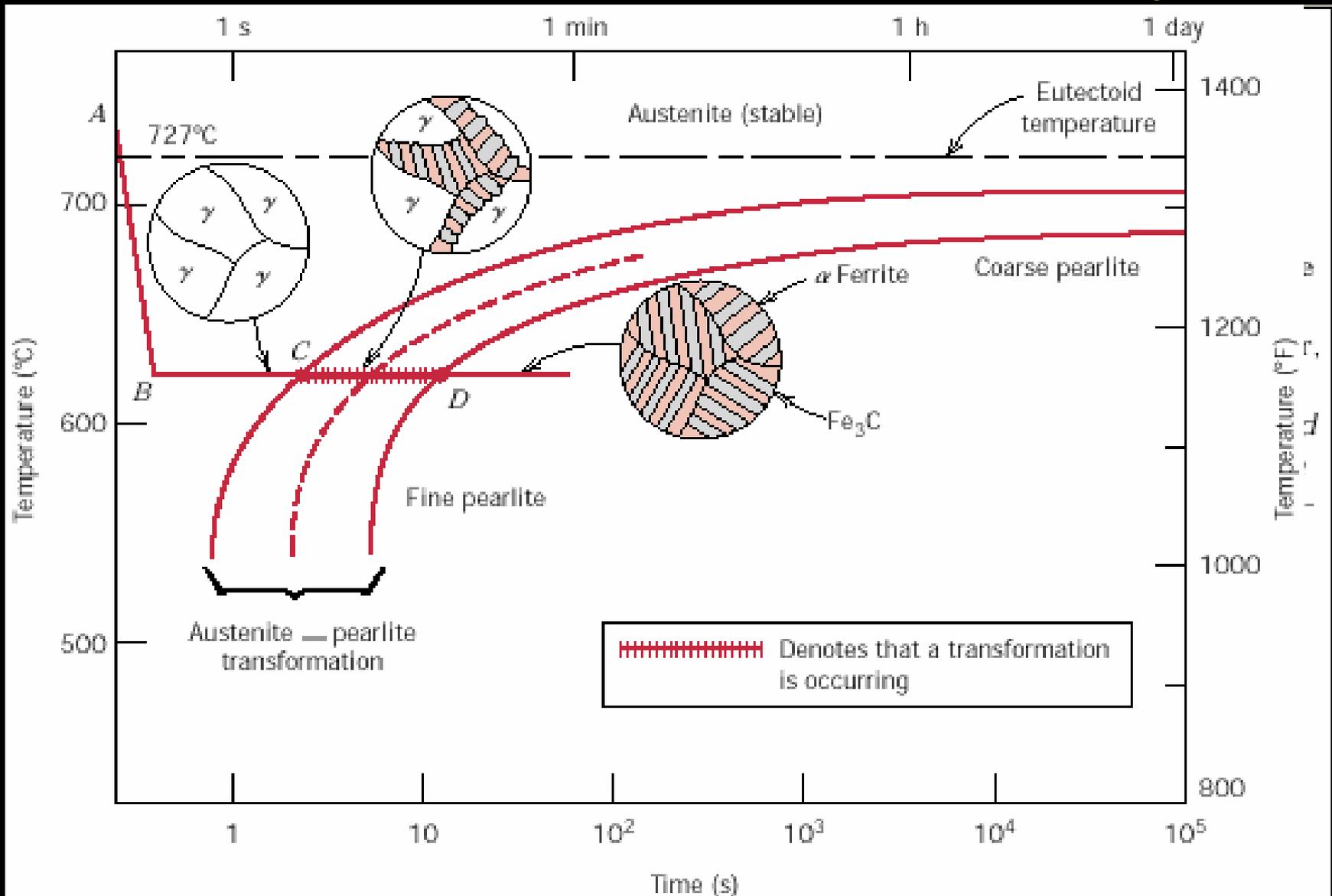
珠光体 P: $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$

索氏体 S: $650 \sim 600^\circ\text{C}$

托氏体 T: $600 \sim 560^\circ\text{C}$

P、S、T 无本质区别，只有形态上的粗细之分，P 较粗、S 较细、T 更细。P、S、T 通称 P 型组织，组织越细，强度、硬度越高，塑、韧性越好。

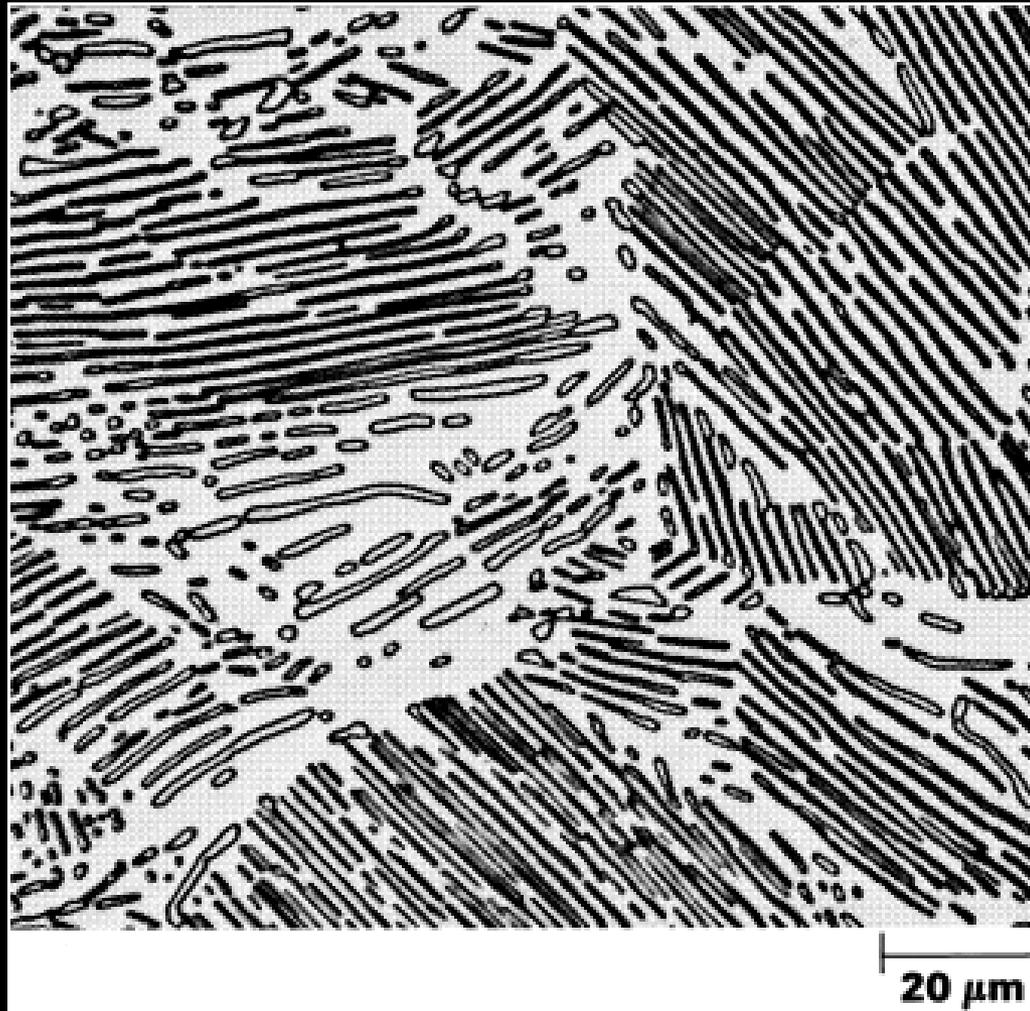
Isothermal Transformation diagram for a eutectoid iron-carbon alloy



Microstructures of Pearlite



Microstructures of Pearlite 2

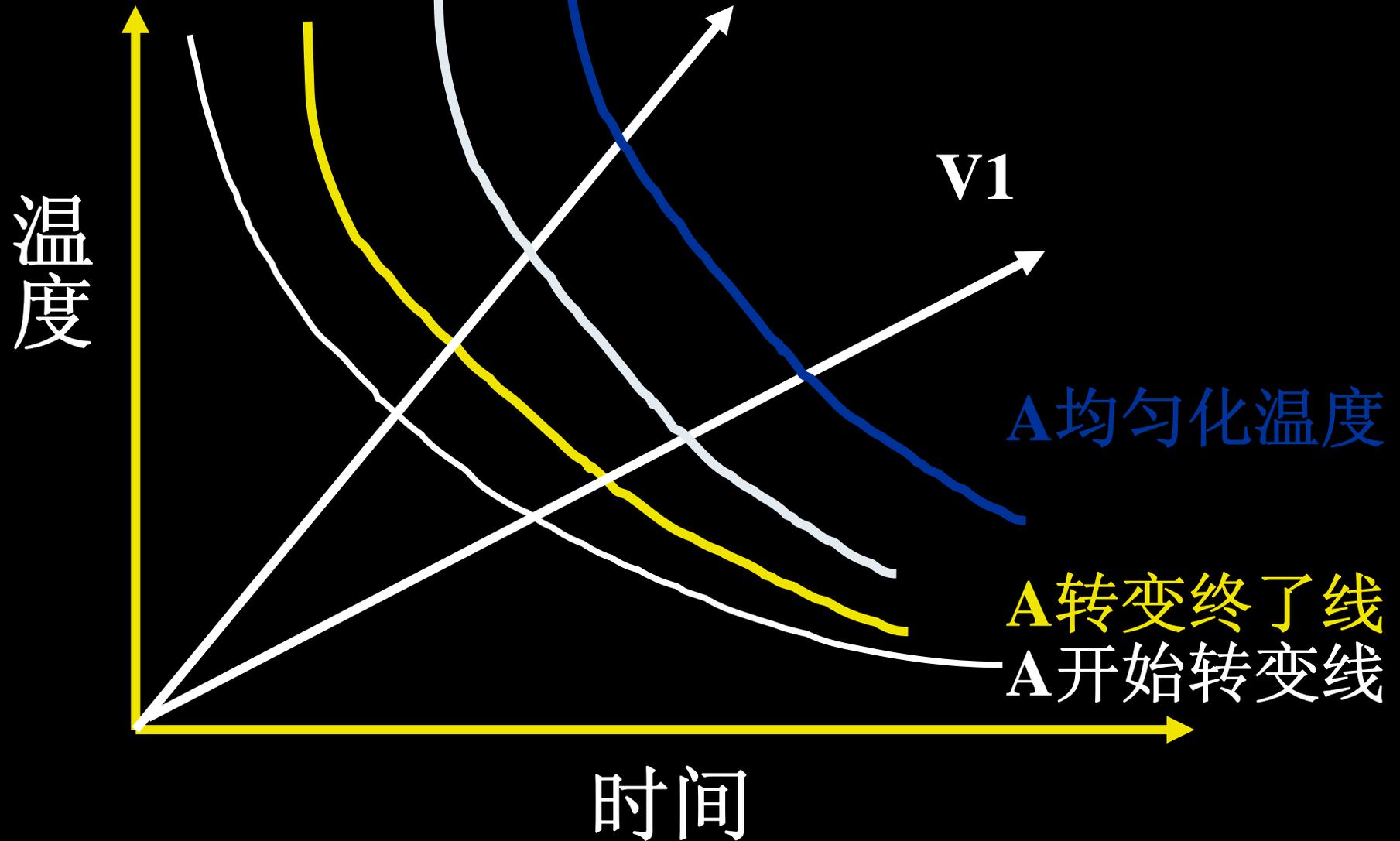


要点总结

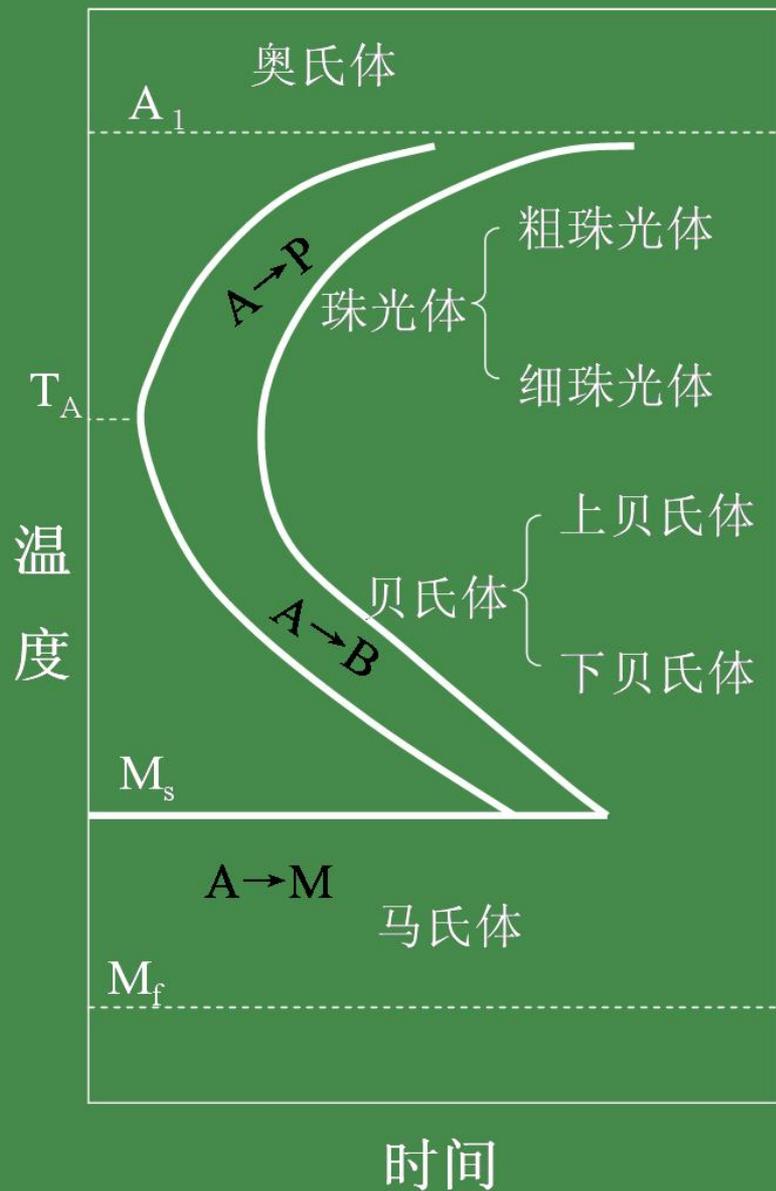
1. A的形成与长大
2. TTT图
3. P家族

A转变示意图

残余碳化物溶解温度



共析钢的TTT图



P家族

P珠光体($A1 \sim 650^{\circ}\text{C}$)

Pearlite

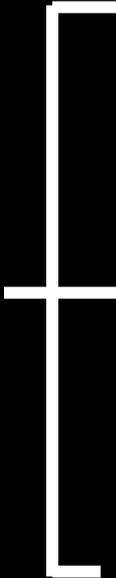
S索氏体($650^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$)

Sorbite

T屈氏体($600^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$)

Troostite

分类



作业

第三章

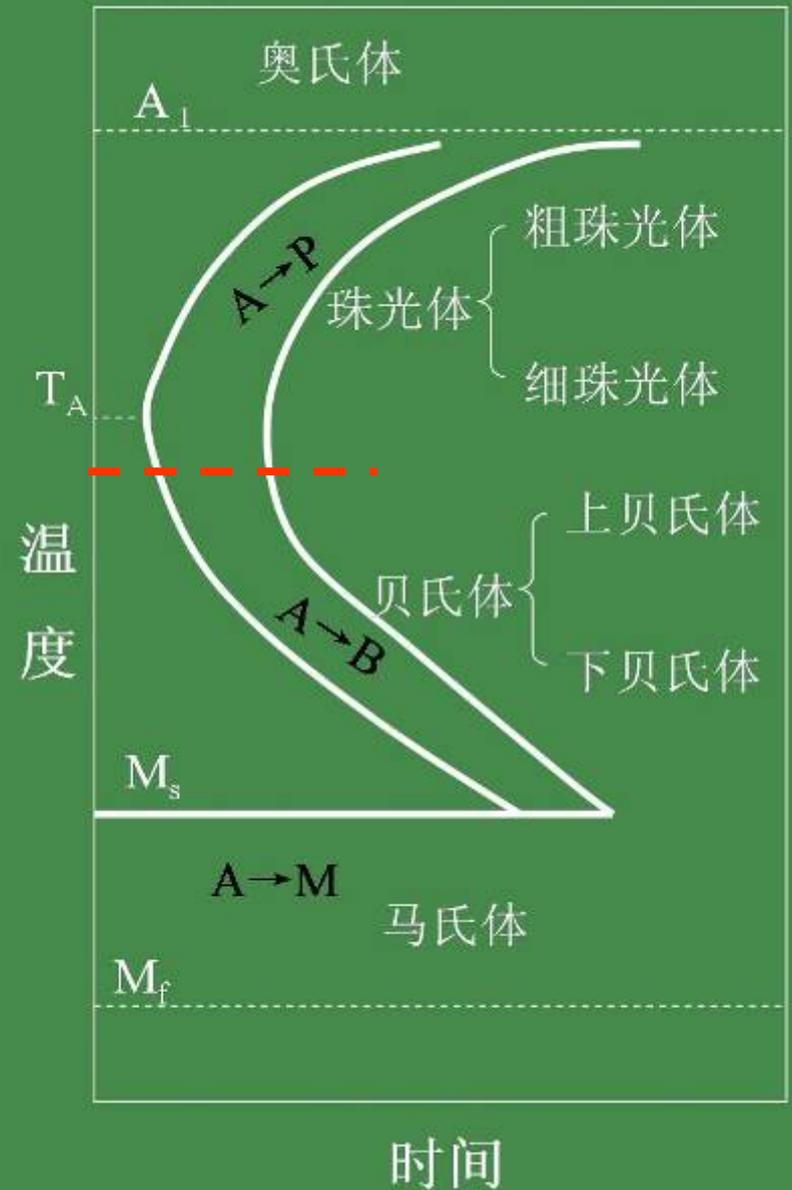
1、2

第三章

钢的热处理-2

2. 贝氏体型转变

贝氏体：**F**和**Fe₃C**的机械混合物，在**F**基体上分布着**Fe₃C**



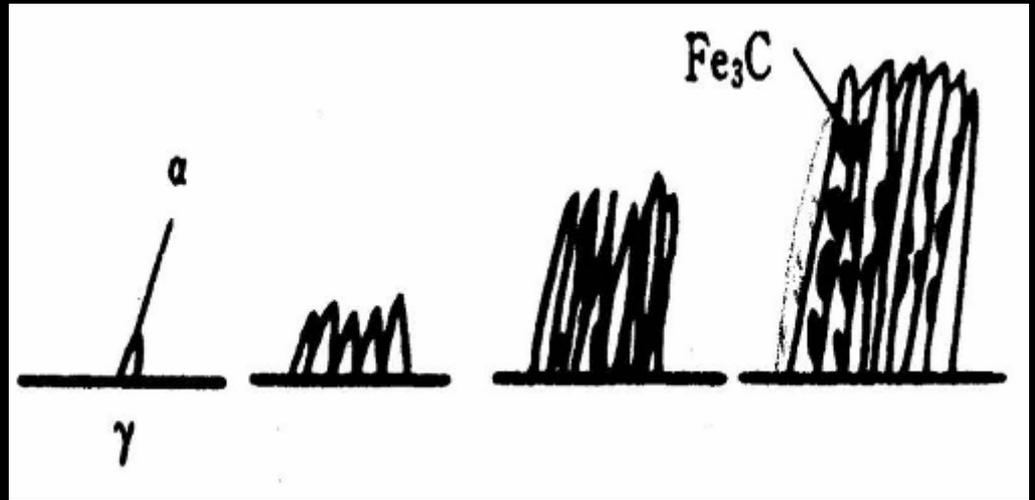
“鼻尖”（560 °C）~ M_s 点温度范围内的过冷A转变产物仍然为F与 Fe_3C 的混合物。但其形态不同于P，称Bainite, B, 贝氏体。

B转变也是B形核与长大的过程。首先沿A晶界形成C过饱和的F晶核并长大，随后在这种F中析出细小的渗碳体。不同温度下产生的B的形态不同。

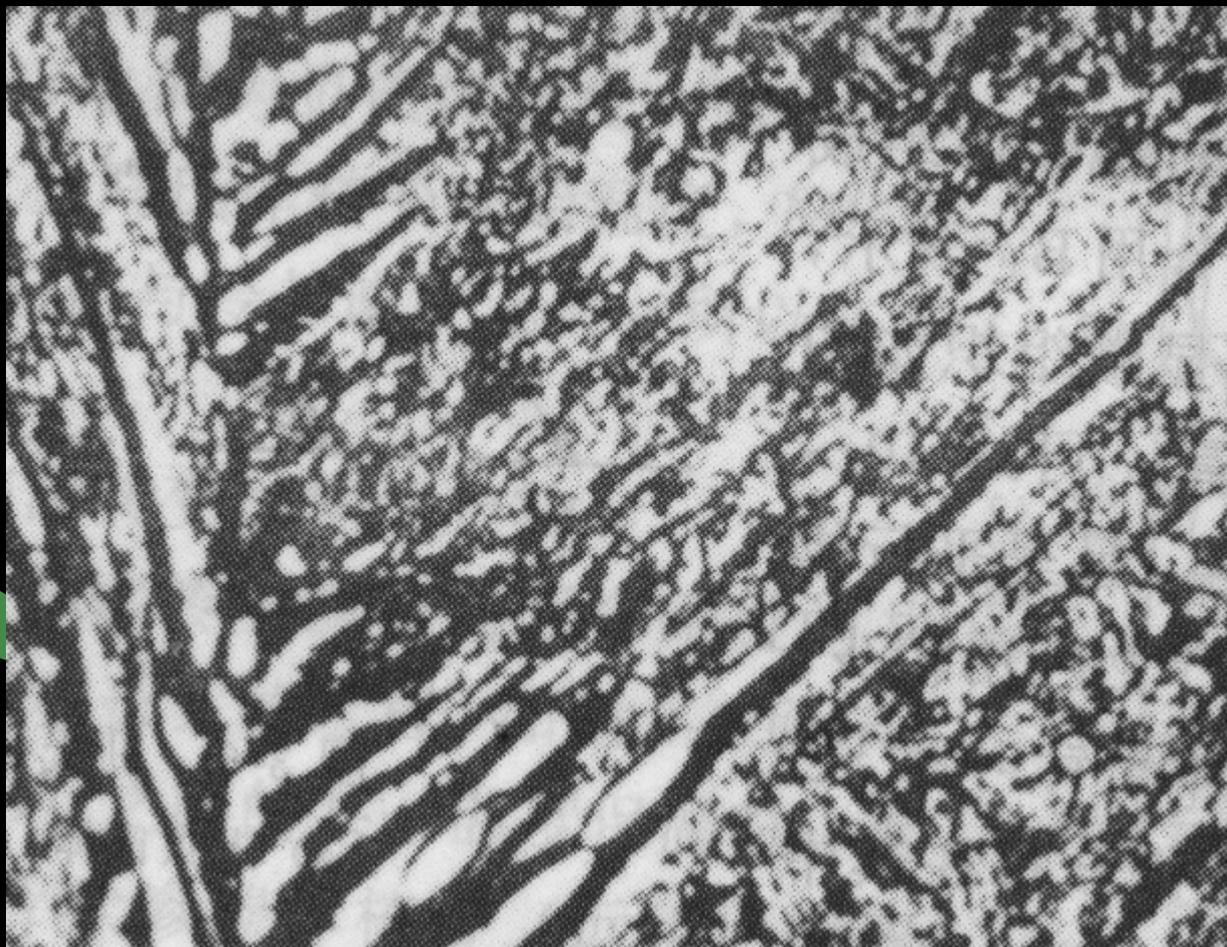
560 ~350 °C形成的B称为 $B_{上}$ ；

350~ M_s 形成的B称为 $B_{下}$ 。

上贝氏体



$B_{上}$ 呈羽毛状，由互相平行的过饱和F和分布在片间的断续细小的渗碳体组成。硬度高，可达40~45HRC，但因F片粗且平行分布，同时晶间有脆性的渗碳体，故塑、韧性差。



Fe_3C (白色), 细条或短杆状断续分布

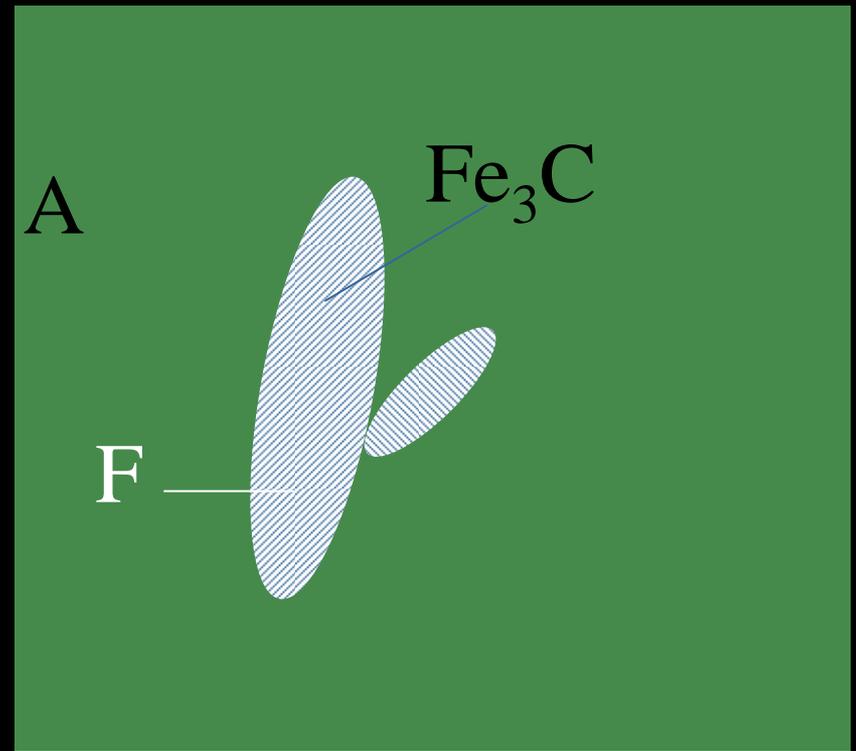
F (深色), 大体平行分布

$B_{\text{上}} \times 10000$

羽毛状

下贝氏体

$B_{\text{下}}$ 呈针叶状，由针叶状过饱和F和弥散分布在其中的极细小的渗碳体组成。硬度高50~60 HRC，强度高，耐磨性好，塑性、韧性高，具有良好的综合力学性能。



生产中“等温淬火”的目的就是为了得到 $B_{\text{下}}$ 组织



$B_{\text{下}} \times 500$



$B_{\text{下}} \times 10000$

针叶状

Fe_3C (白色) 弥散分布于F晶内

3、M型转变

转变温度： $M_s \sim M_f$ ，温度低，Fe、C不能扩散。

A \rightarrow F，C完全保留在 α -Fe中，引起过饱和。M又称碳过饱和铁素体。

晶格歪扭成体心正方，随 w_C \uparrow ，正方度 \uparrow 。

A \rightarrow M 伴随有体积膨胀

- 淬火应力
- 残余A M转变结束时，总有少量的A被保留下来，称为残余A。

M形态

片状马氏体：呈双凸透镜状，显微镜下呈针片状，高碳、孪晶M

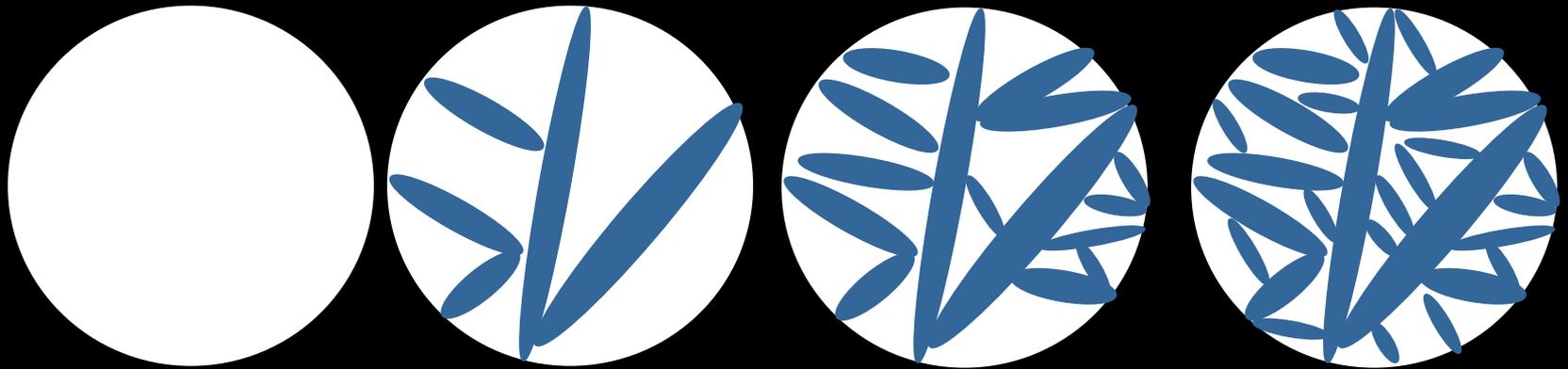
强度高，塑韧性低

板条马氏体：呈细长板条状，低碳

强度高，塑韧性好。

片状M

长大速度非常快，先形成的M片较大，后形成的M片不能穿越已形成的M，故较小。显微镜下为长短不一，互成一定角度的M片。





片状M ×500

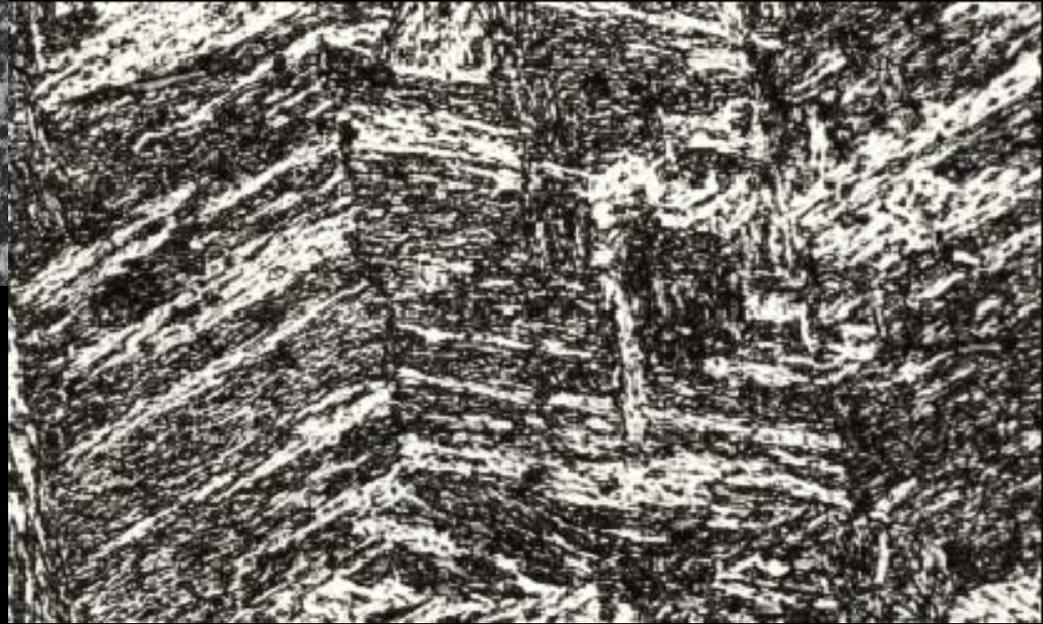
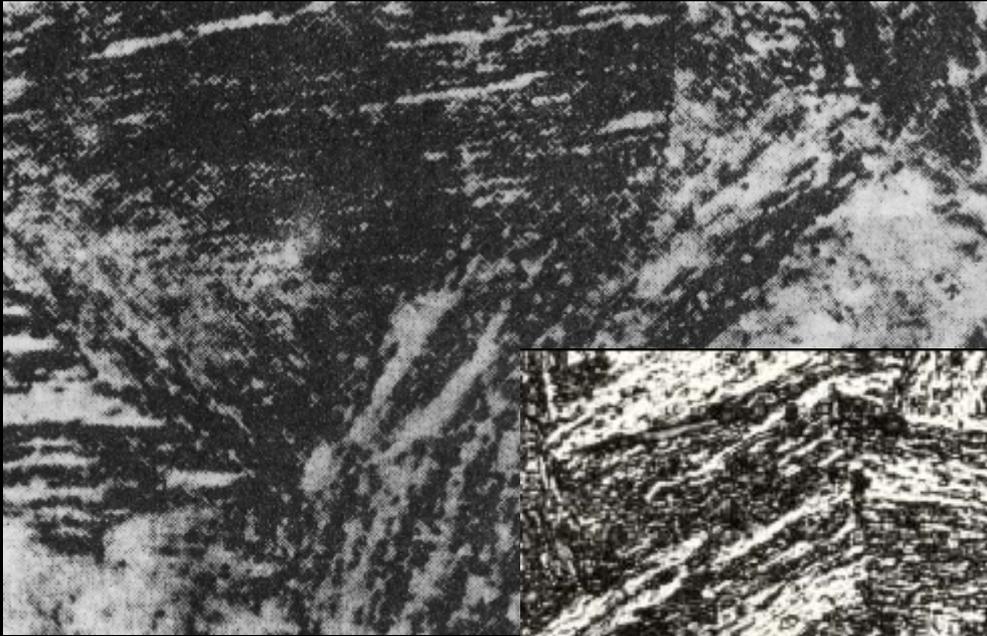


片状M的孪晶亚结构

×20000

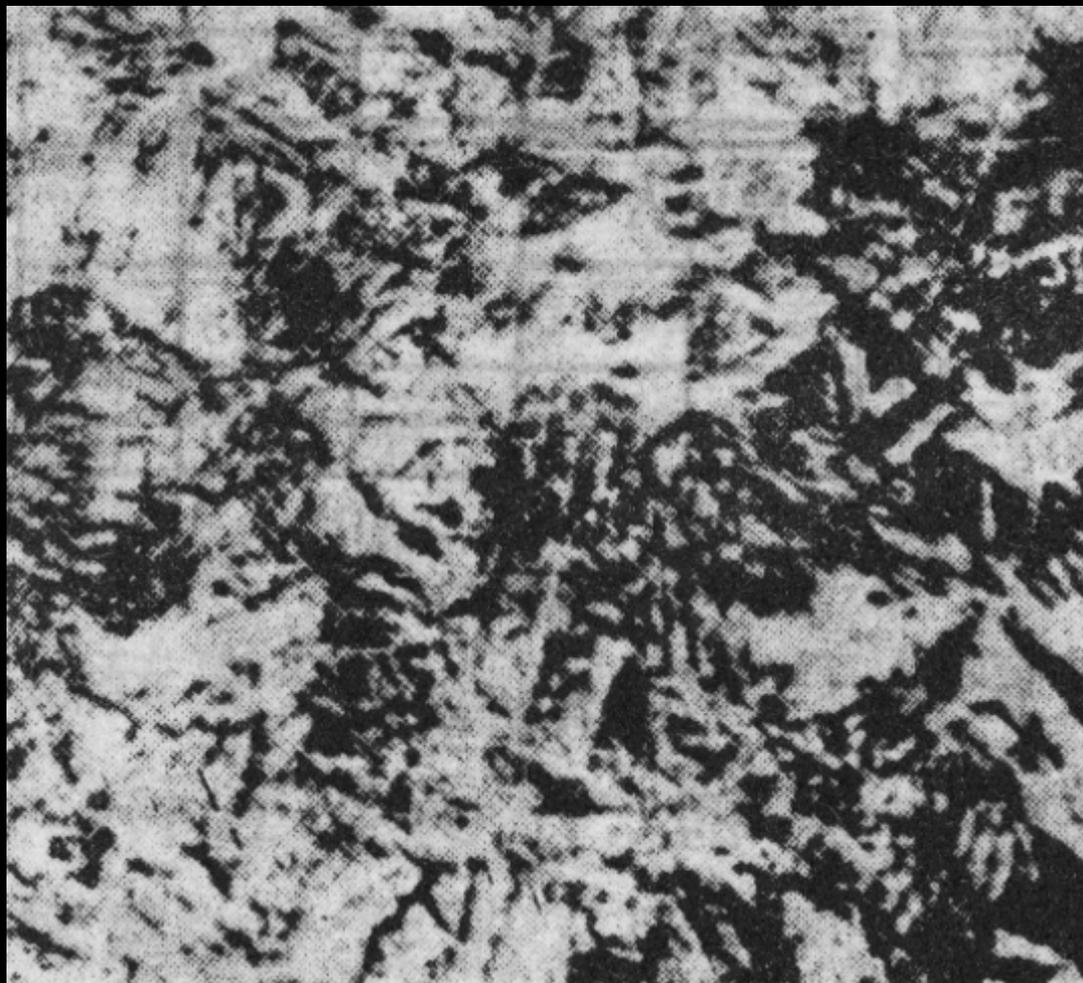
板条M

截面呈椭圆形的细长条状，许多尺寸大致相同的M定向相互平行排列，构成一个M群（束），显微组织为一束束细长板条状组织。

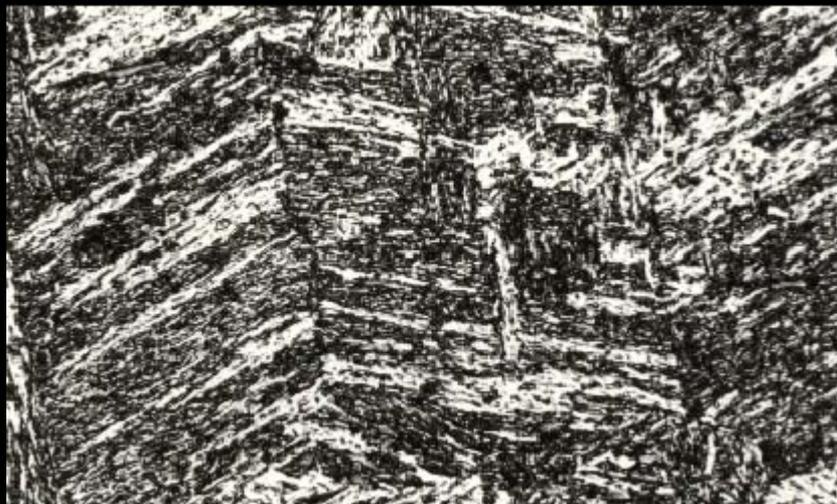


板条M ×500

- $w_C > 1.0\%$ 的钢淬火后, 几乎全部为片M;
- $w_C < 0.2\%$ 的钢淬火后, 基本上全部为板条M;
- $0.2\% < w_C < 1.0\%$ 的钢淬火后, 为两种M的混合物。



45钢淬火M形态 × 500



× 500



× 80000



× 500



× 500

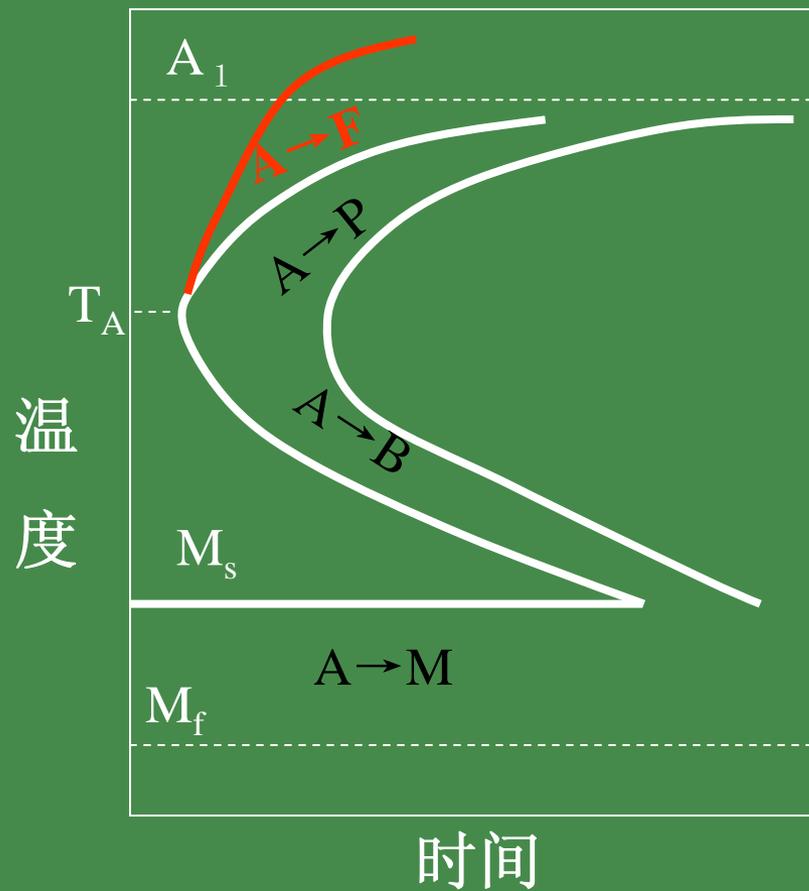
(四) 影响TTT曲线的主要因素

- 含C量
- 合金元素

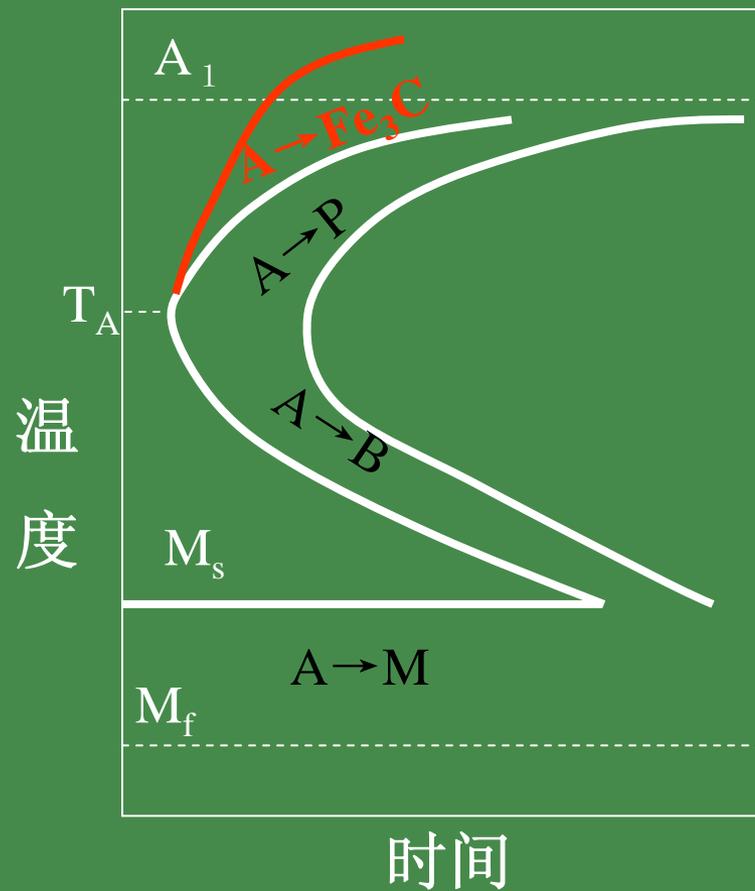
1. 含C量的影响

亚共析钢及过共析钢的过冷A的等温转变与共析钢一样，亦可分为高温P型转变、中温B型转变和低温M型转变。

但在P型转变之前，亚共析钢有F的析出，过共析钢有 Fe_3C 析出。

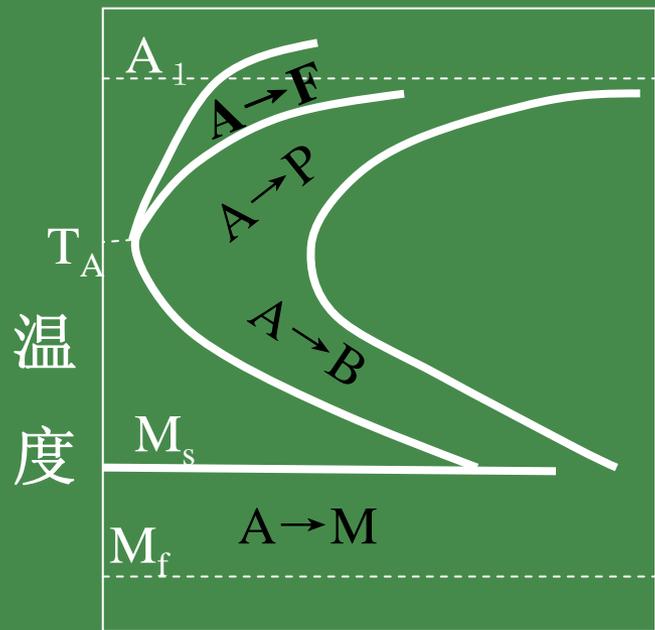


亚共析钢

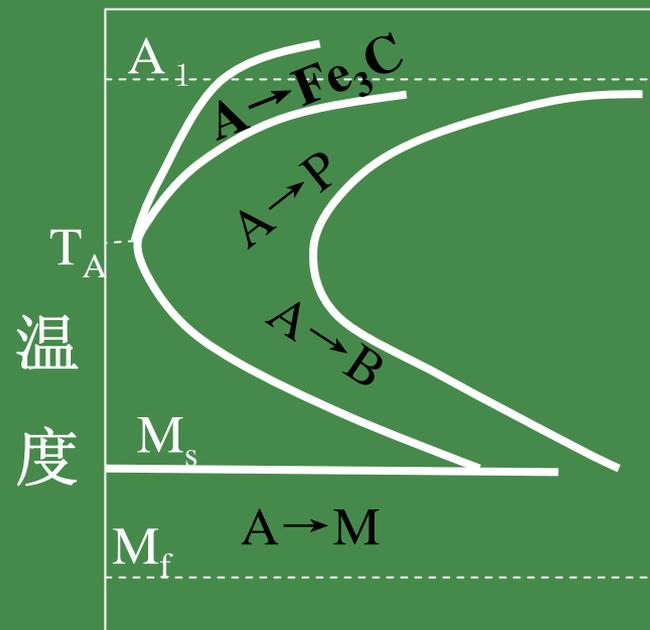


过共析钢

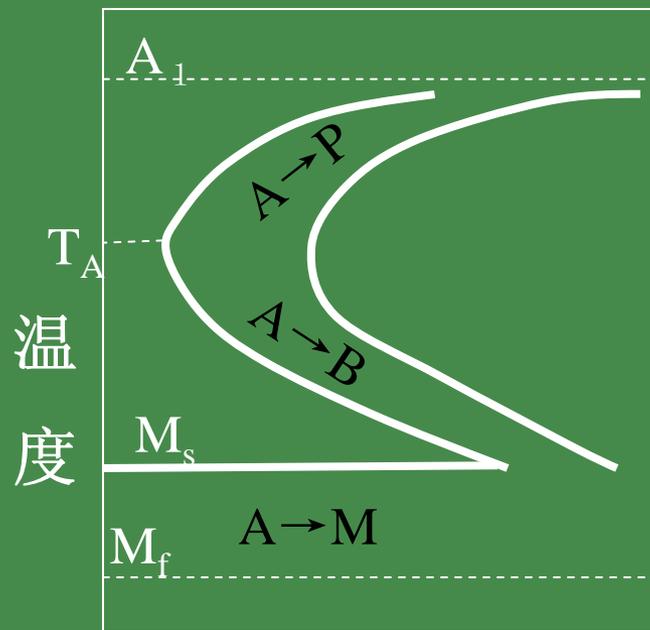
亚、过共析钢的TTT曲线



时间



时间



时间

- 共析钢过冷A最稳定（C曲线最靠右）
- $w_C < 0.77\%$: $w_C \uparrow$ ，C曲线右移
- $w_C > 0.77\%$: $w_C \uparrow$ ，C曲线左移

2. 合金元素的影响

合金元素对C曲线的影响是复杂的，几乎除Co外，所有溶入A中的合金元素均使曲线右移。

除Co、Al外，溶入A的合金元素都使C曲线上的 M_s 、 M_f 点降低。

残余奥氏体A'

在M相变时，由于体积膨胀，使尚未发生相变的过冷A受压，而停止相变，这部分A称为残余奥氏体A'，只有当温度进一步下降时，A'才会发生分解。当温度达到M_f点以下时，A'才会全部分解完毕。

共析钢M_f = -50°C，淬火至室温下仍有3~6%的A'；过共析钢M_f = -100°C时，淬火至室温下仍有8~15%A'。

A'会降低钢的硬度，并带来钢件尺寸的不稳定，“冷处理”

二、过冷A的连续冷却转变

过冷A的连续冷却转变曲线

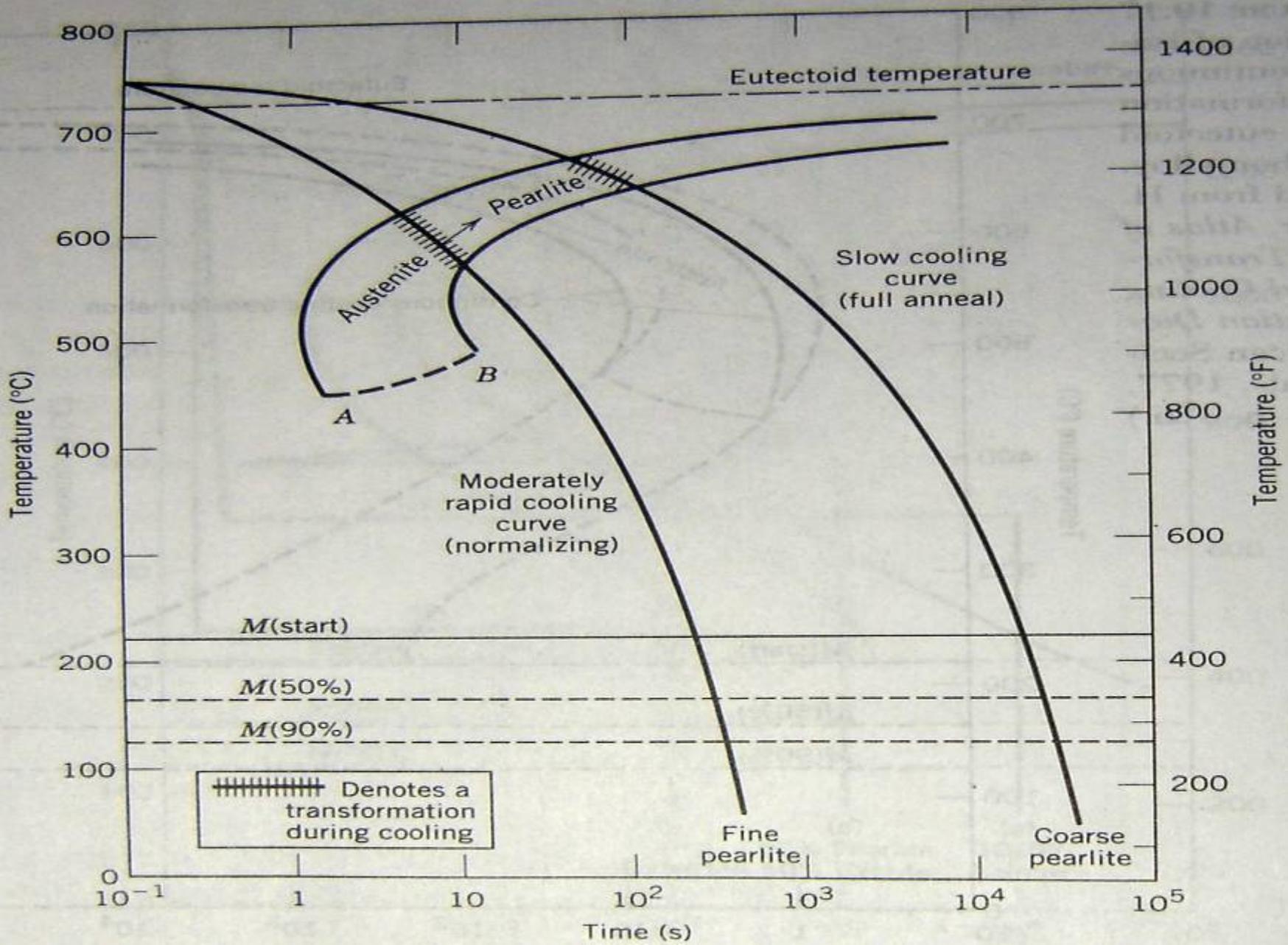
Continuous **C**ooling
Transformation **D**iagram

简称CCT图

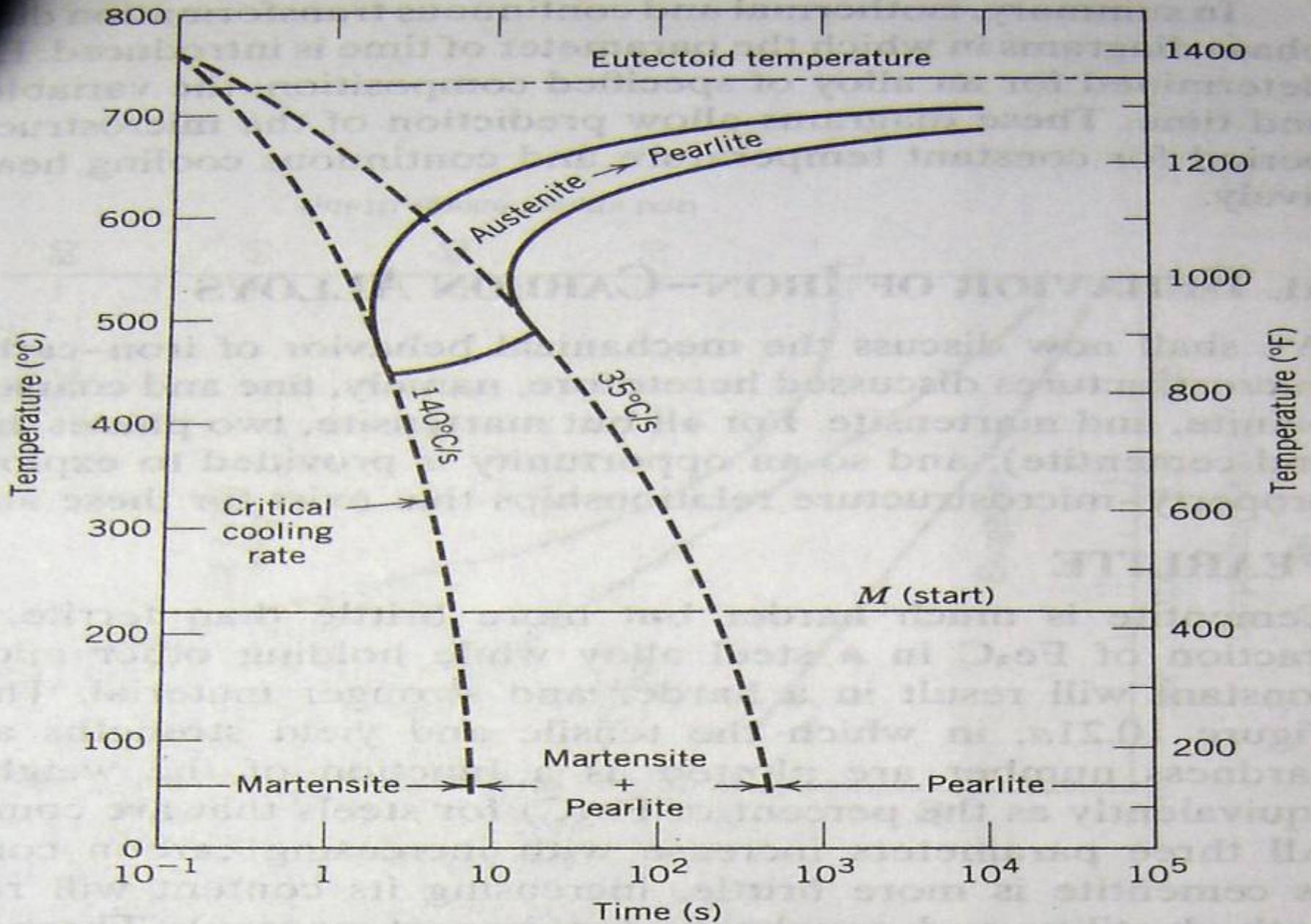
转变是一个连续过程，符合生产实际，所以**CCT**图比**C**曲线更切合实际，应用范围更大。

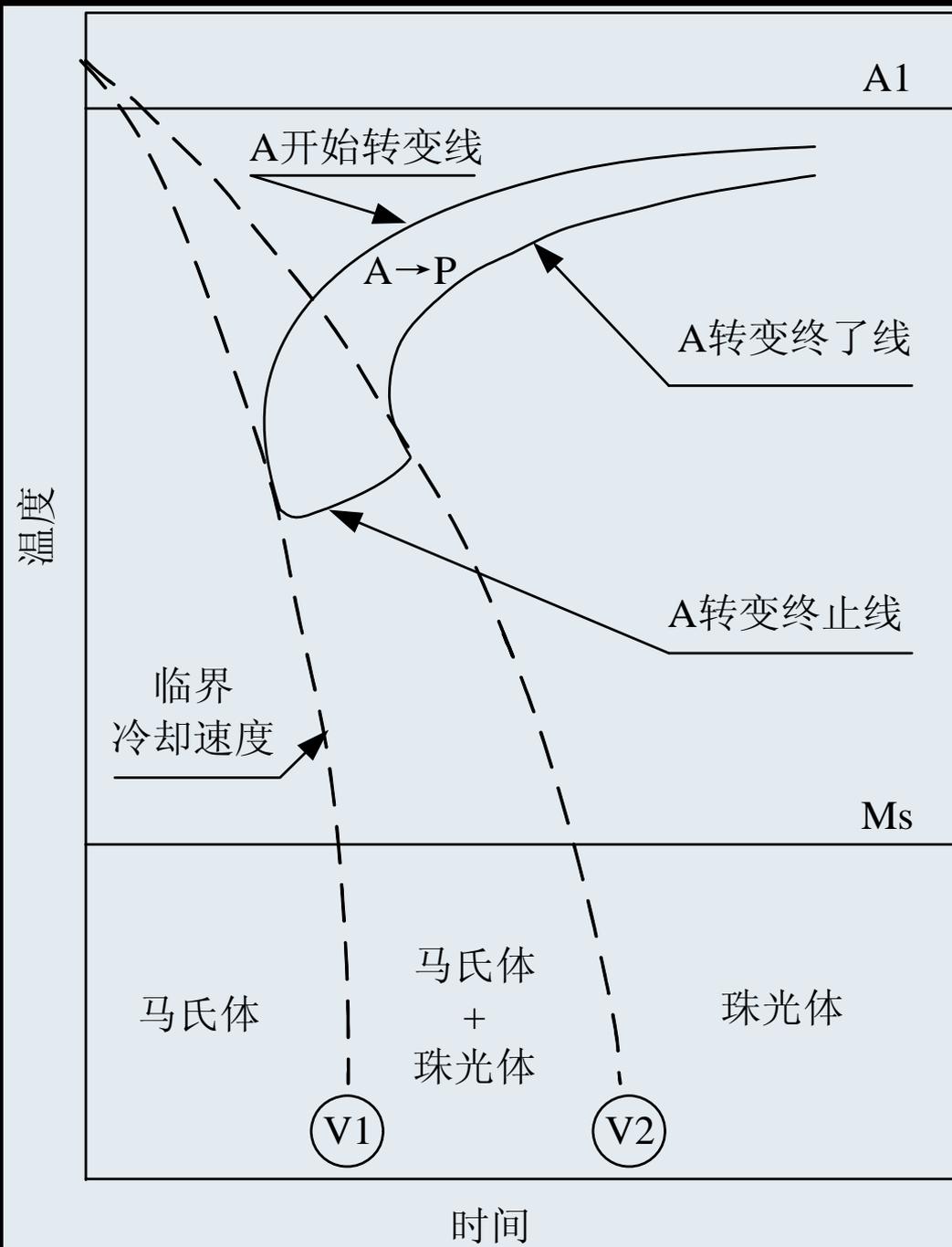
但**CCT**图的测试比**C**曲线困难，所以经常需要利用**C**曲线来分析过冷**A**的连续冷却转变过程。

CCT Diagram of Eutectoid Steel



CCT Diagram of Eutectoid Steel

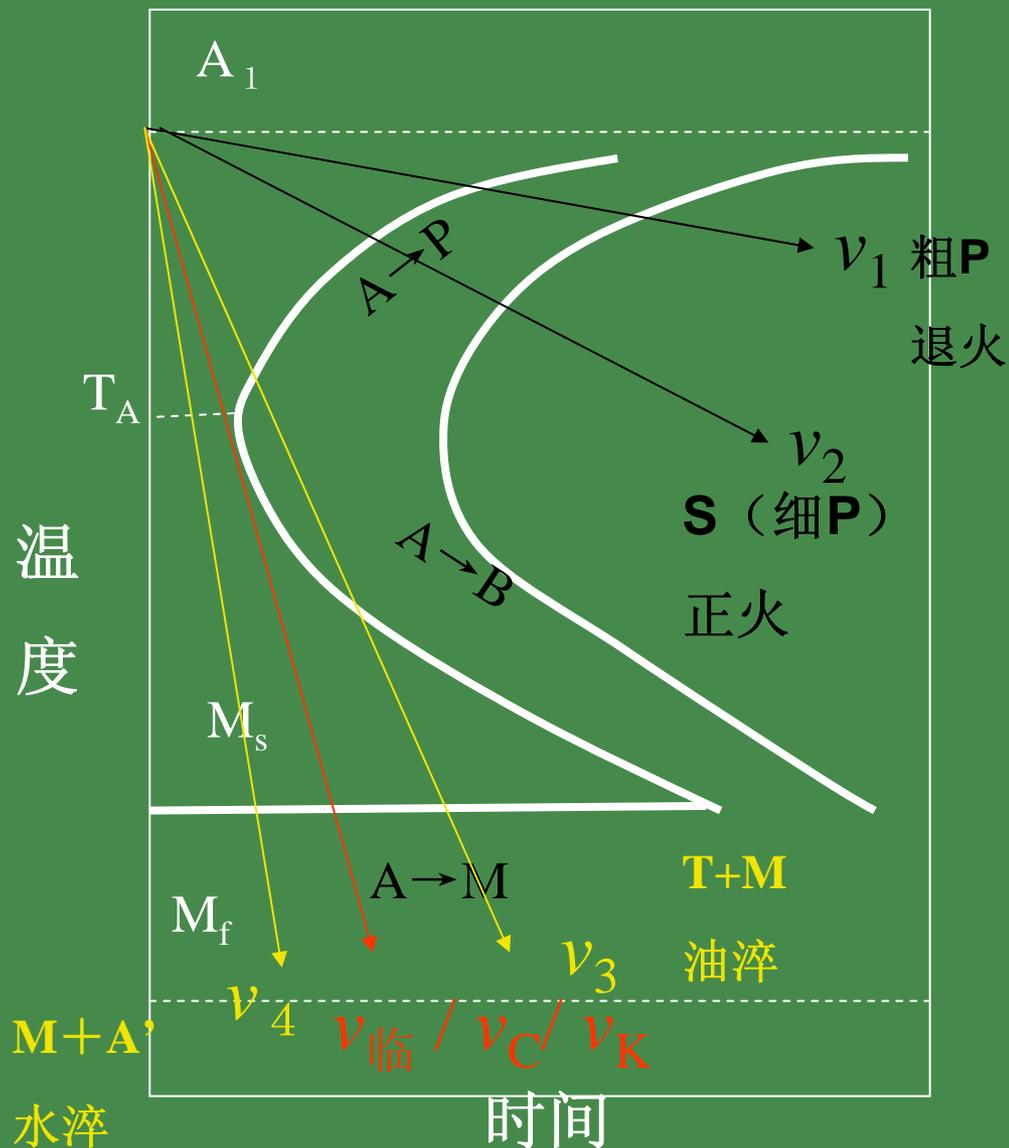




CCT曲线与C曲线的比较

- CCT曲线位于C曲线右下方，P转变温度更低，时间更长；
- 共析钢及过共析钢的CCT曲线中无B型转变，而多了一条P转变终止线；
- 亚共析钢在连续冷却时在一定温度范围内过冷A会部分转变为B。

由于 CCT 曲线测定比较困难，许多钢至今仍无，实际热处理中常参照 C 曲线来定性估计连续冷却转变过程。



3.3 钢的普通热处理



退火
Annealing



正火
Normalizing

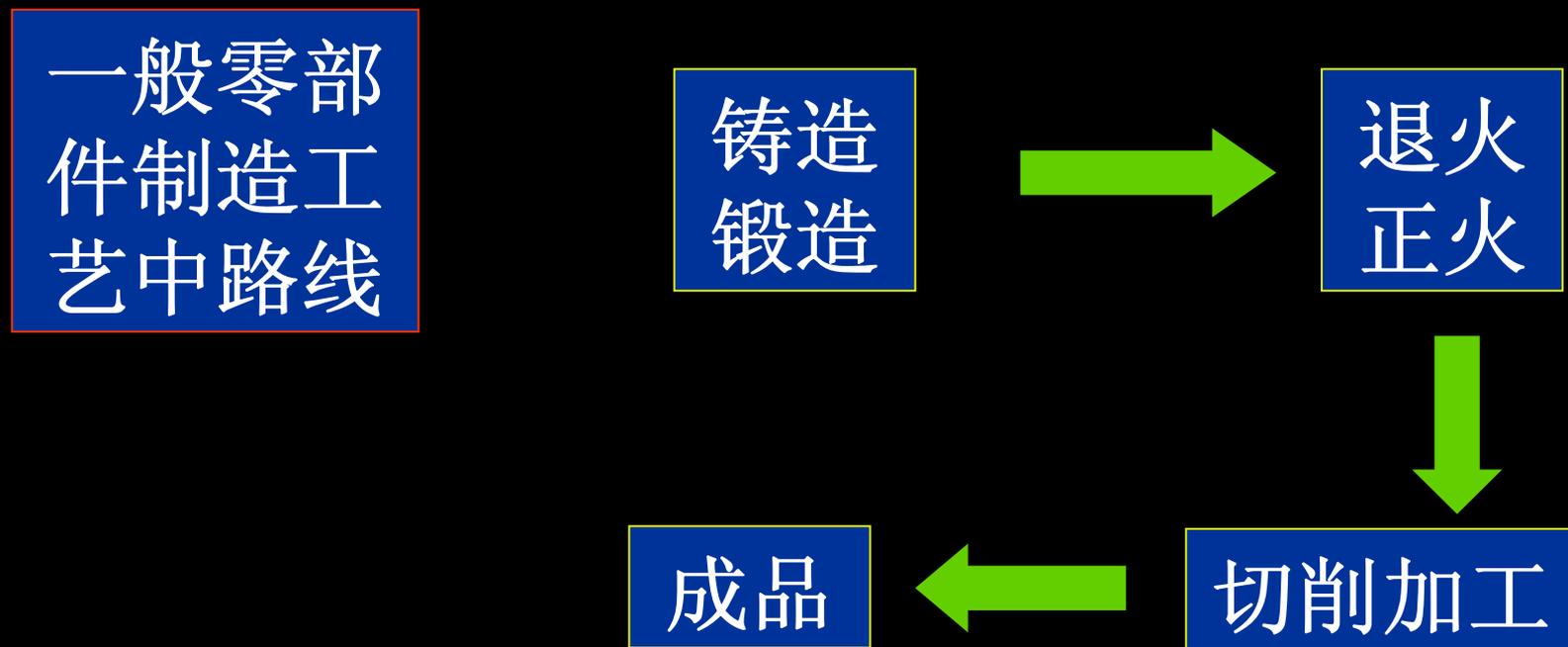


淬火
Quenching



回火
Tempering

普通热处理是零件制造过程中非常重要的不可缺少的工序。



重要零部件制造工艺中路线

铸造
锻造

退火
正火

粗加工

成品

精加工

回火

淬火

预先热处理

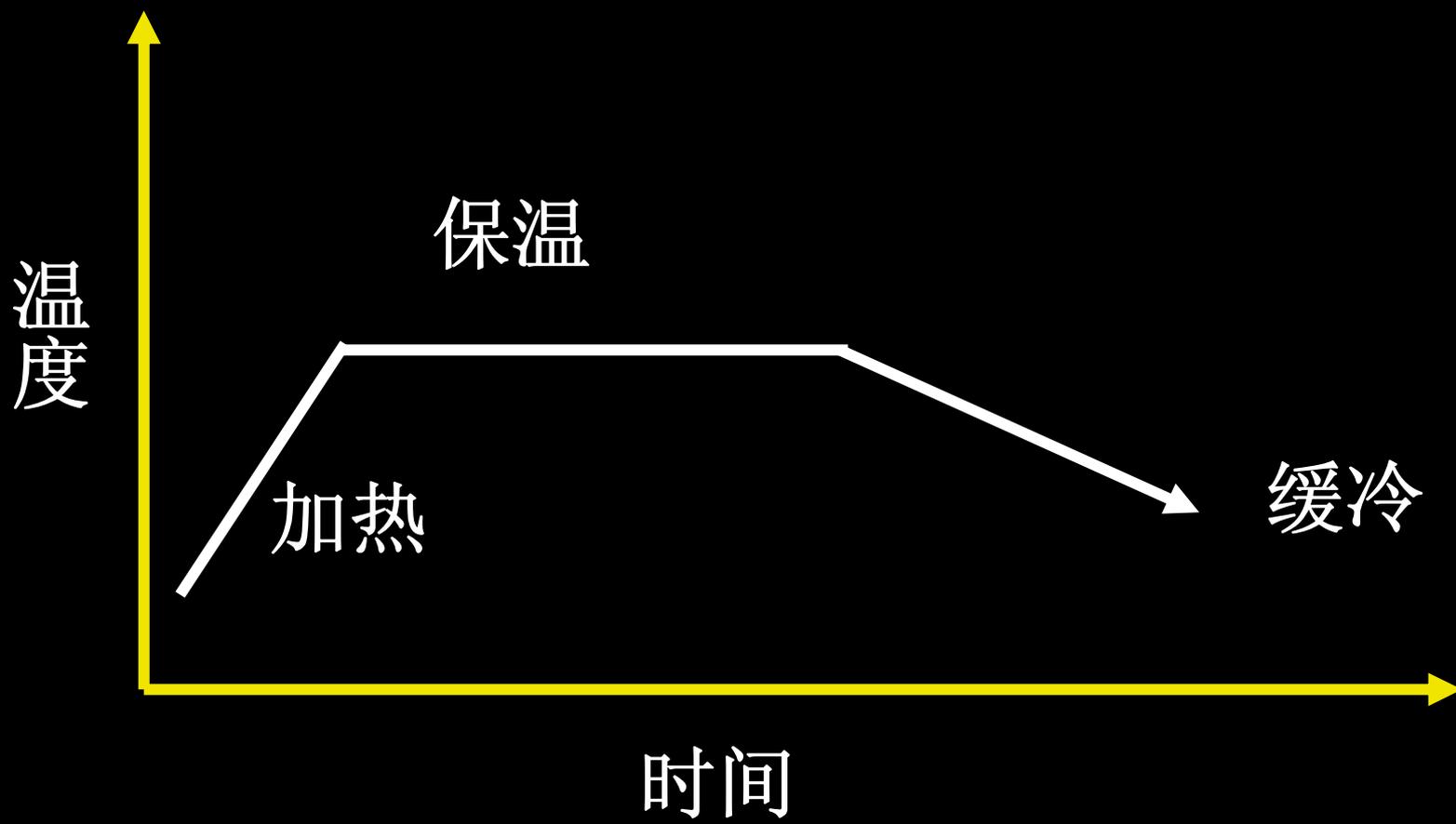
最终热处理

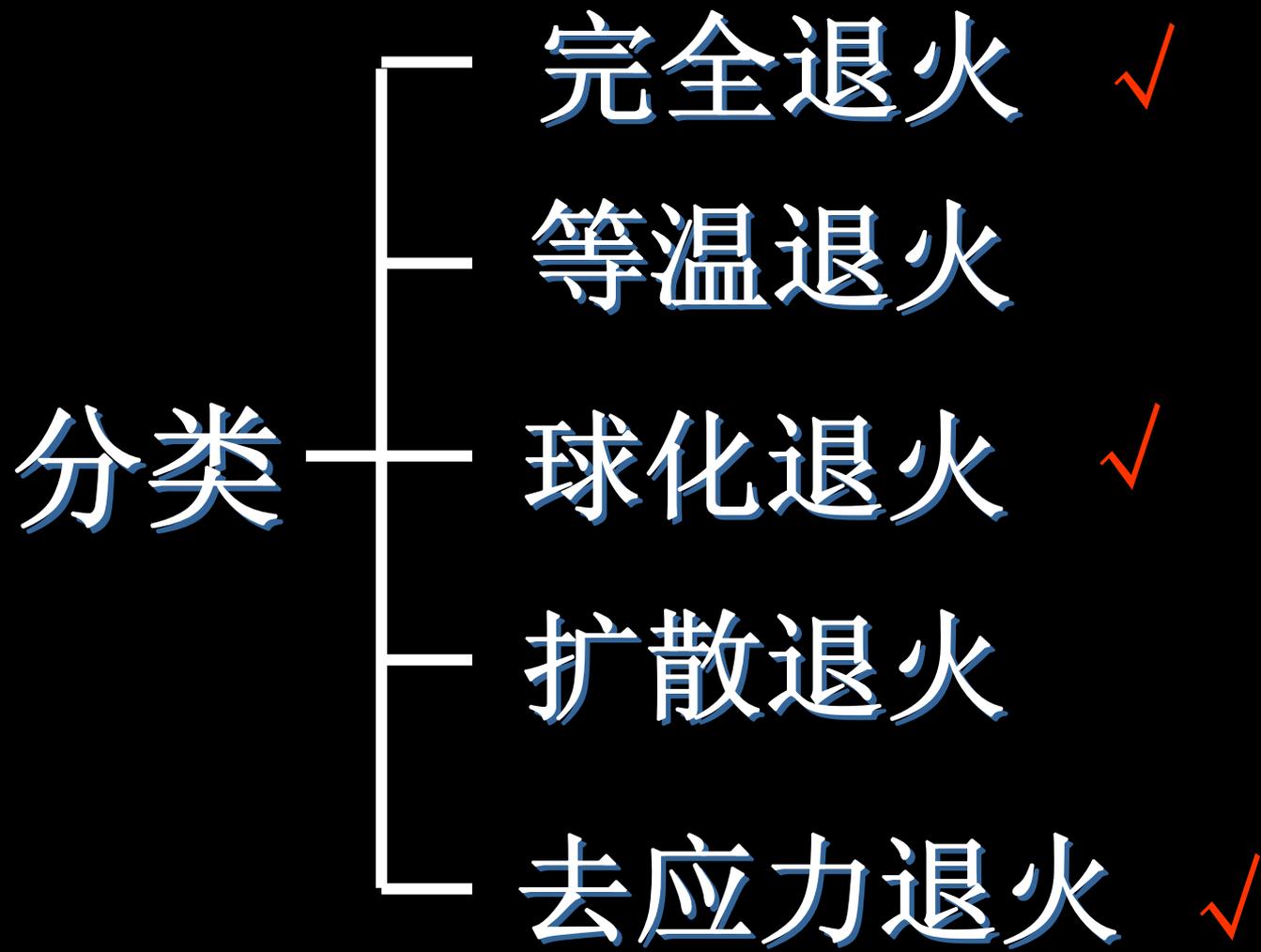


一、钢的退火

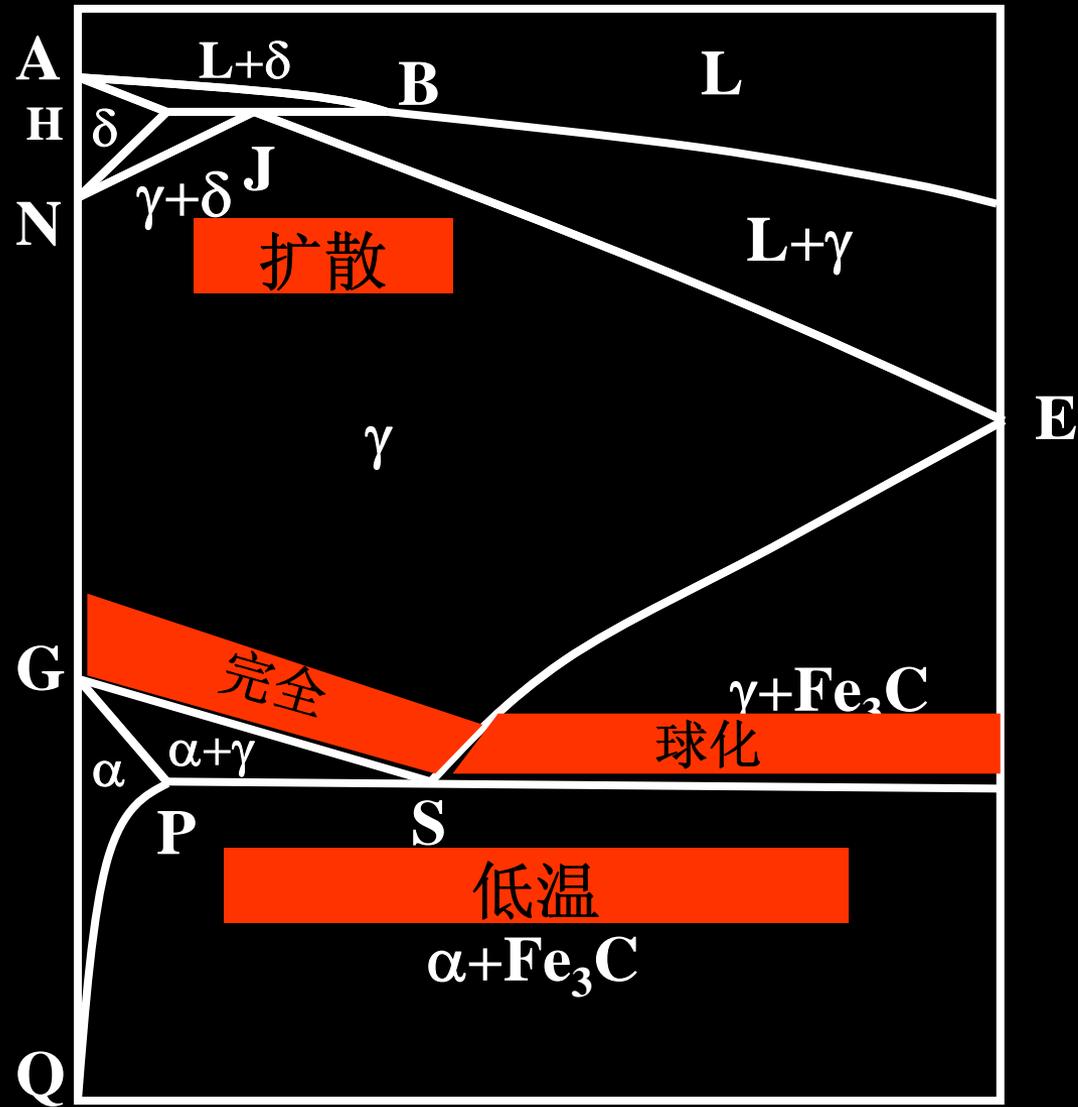
将钢件加热到临界温度（ A_1 、 A_3 、 A_{cm} ）以上（有时以下）保温一定时间，然后缓冷（炉冷、坑冷、灰冷）以得到平衡状态的组织的热处理工艺称退火。

退火工艺





退火温度



1、完全退火

主要用于亚共析钢和合金钢的铸、锻、及热轧型材。也可以用于焊件。

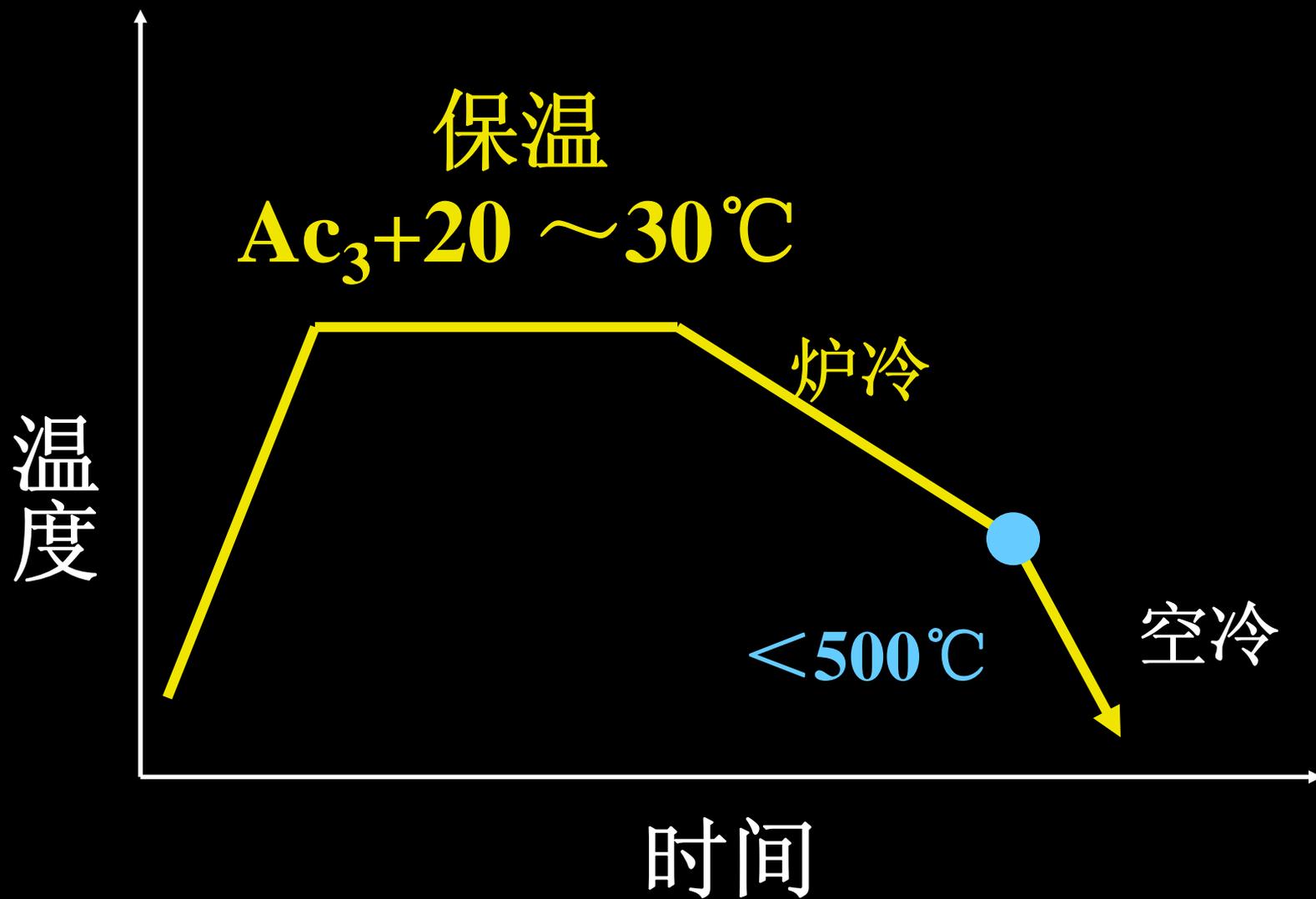
细化晶粒，消除应力和组织缺陷，↓硬度，↑塑性。

加热保温 $A_{c3}+20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$

冷却 缓慢冷却（随炉或者埋在砂中或石灰中冷却）到 500°C 以下，在空气中冷却。

目的 细化晶粒，消除应力和组织缺陷，降低硬度，提高塑性，为机械加工及后续热处理（淬火）作组织准备。

完全退火工艺



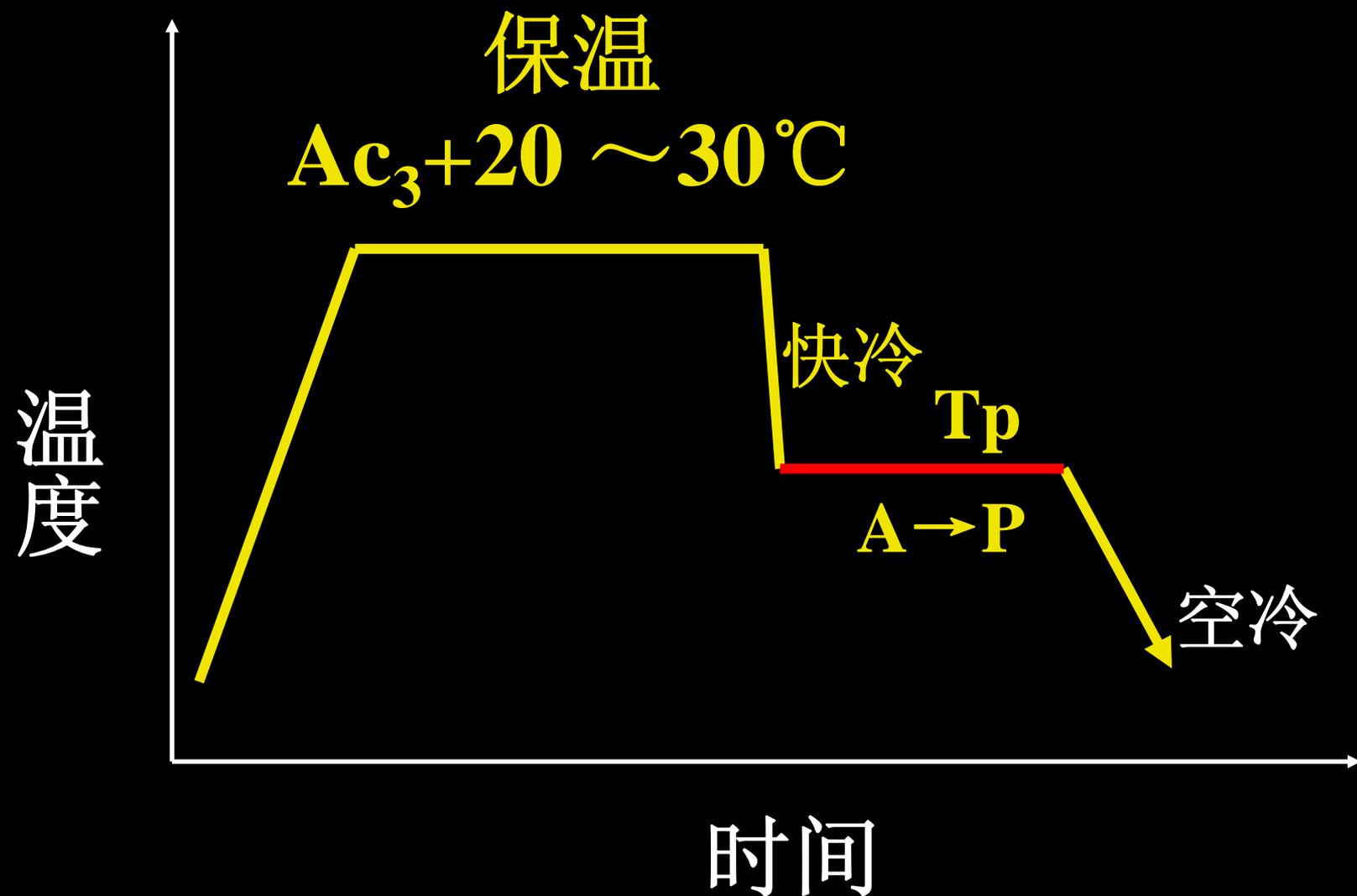
完全退火的局限性

需要时间很长，特别对于某些 A 比较稳定的合金钢，需要十几个小时甚至几天，为了 \uparrow 生产效率，产生了等温退火。

2、等温退火

与完全退火工艺相同，所不同的是钢件经过A化后，以较快的速度冷却到某一T，保温一定时间 **A→P**，然后以较快的速度冷却到室温。

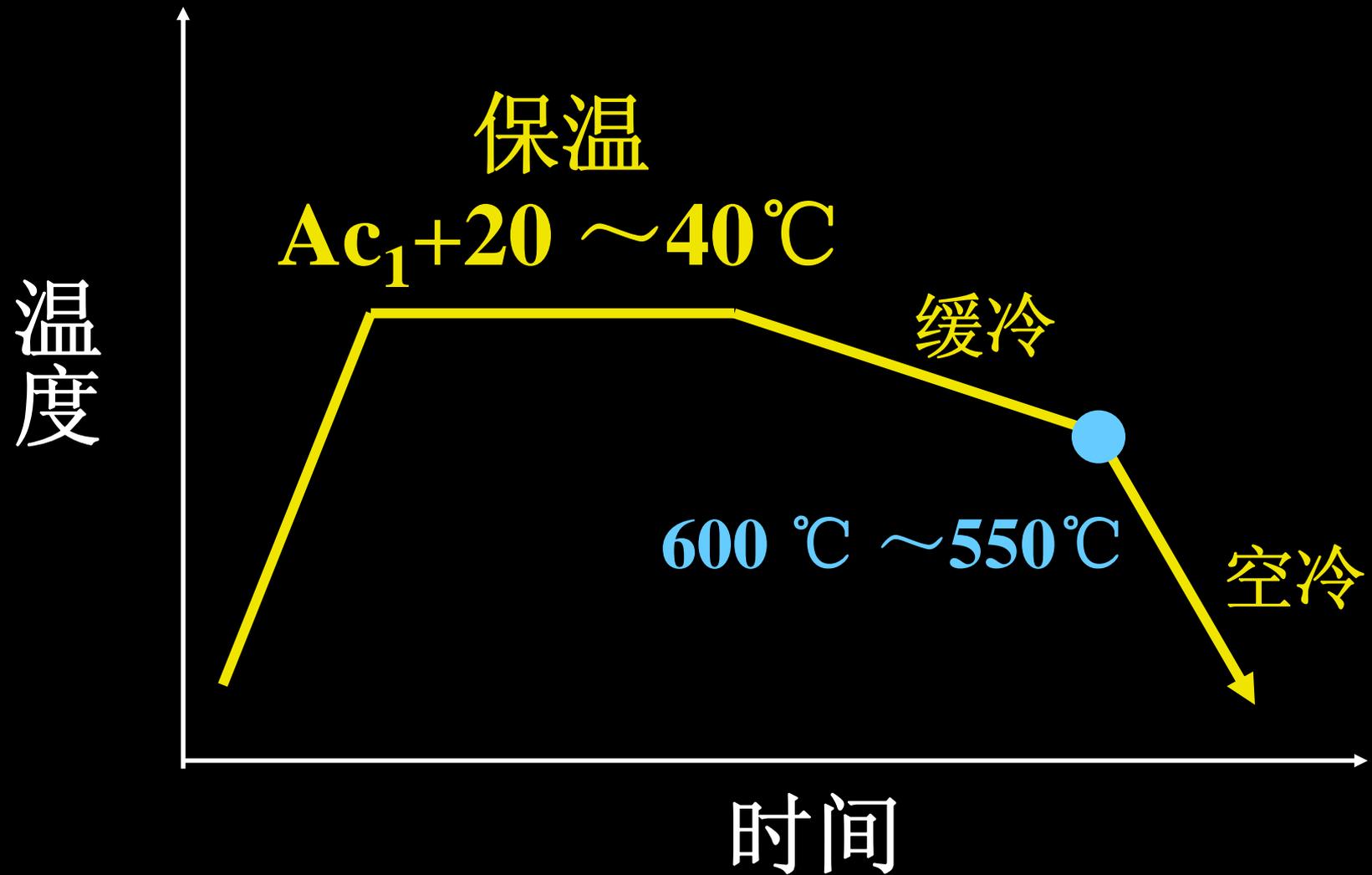
等温退火工艺



3、球化退火

$T = A_{c1} + 20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，进行较长时间的保温，使钢的 Fe_3C （碳化物）趋于球化，然后缓慢冷却到 $600 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 再出炉冷却。使 Fe_3C 网变成球，以降低硬度，改善切削加工性能，并为淬火作组织准备。

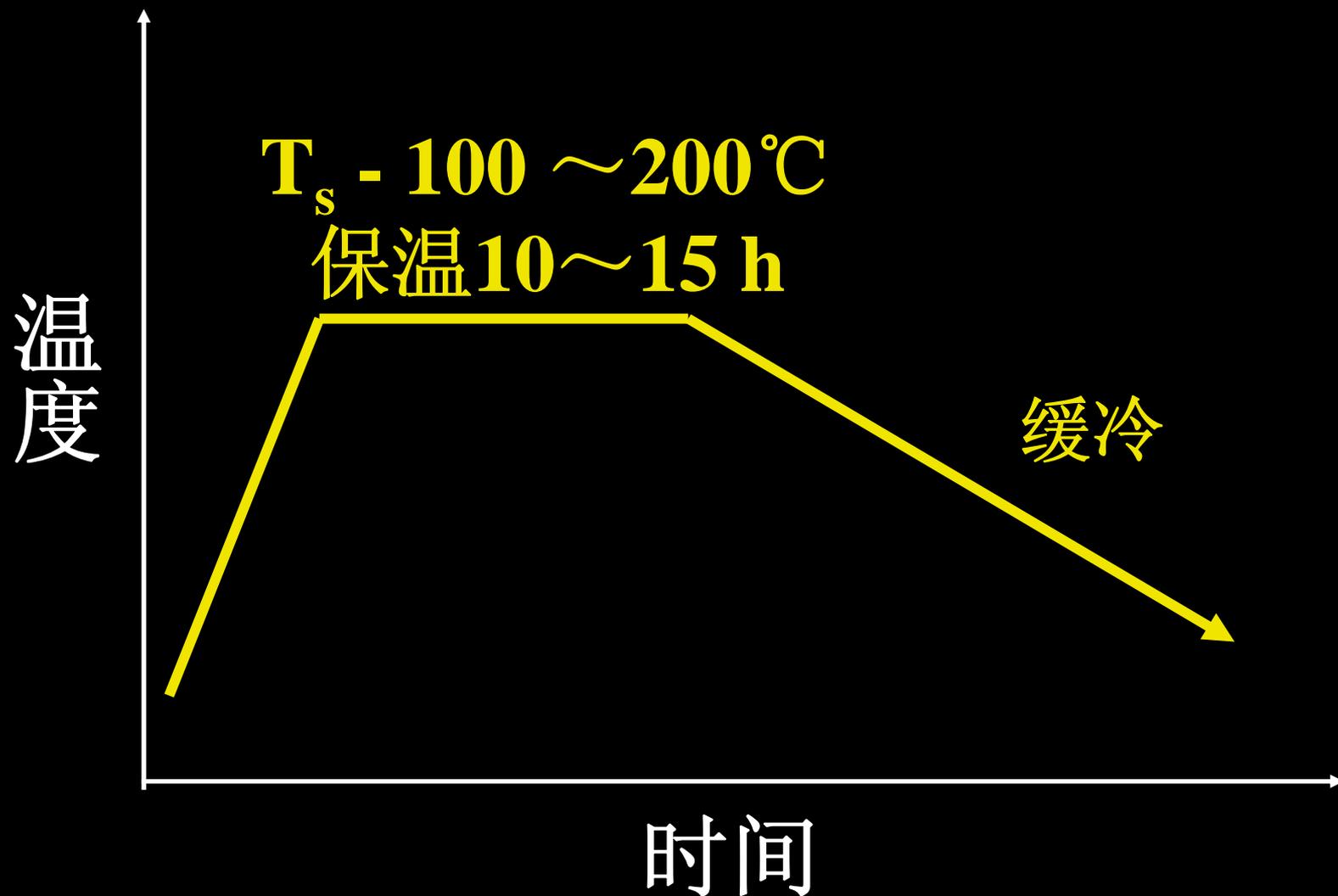
球化退火工艺



4、扩散退火

把钢加热到固相线以下 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，并保温缓冷。目的是消除钢中的枝晶偏析。所以也叫均匀化退火。

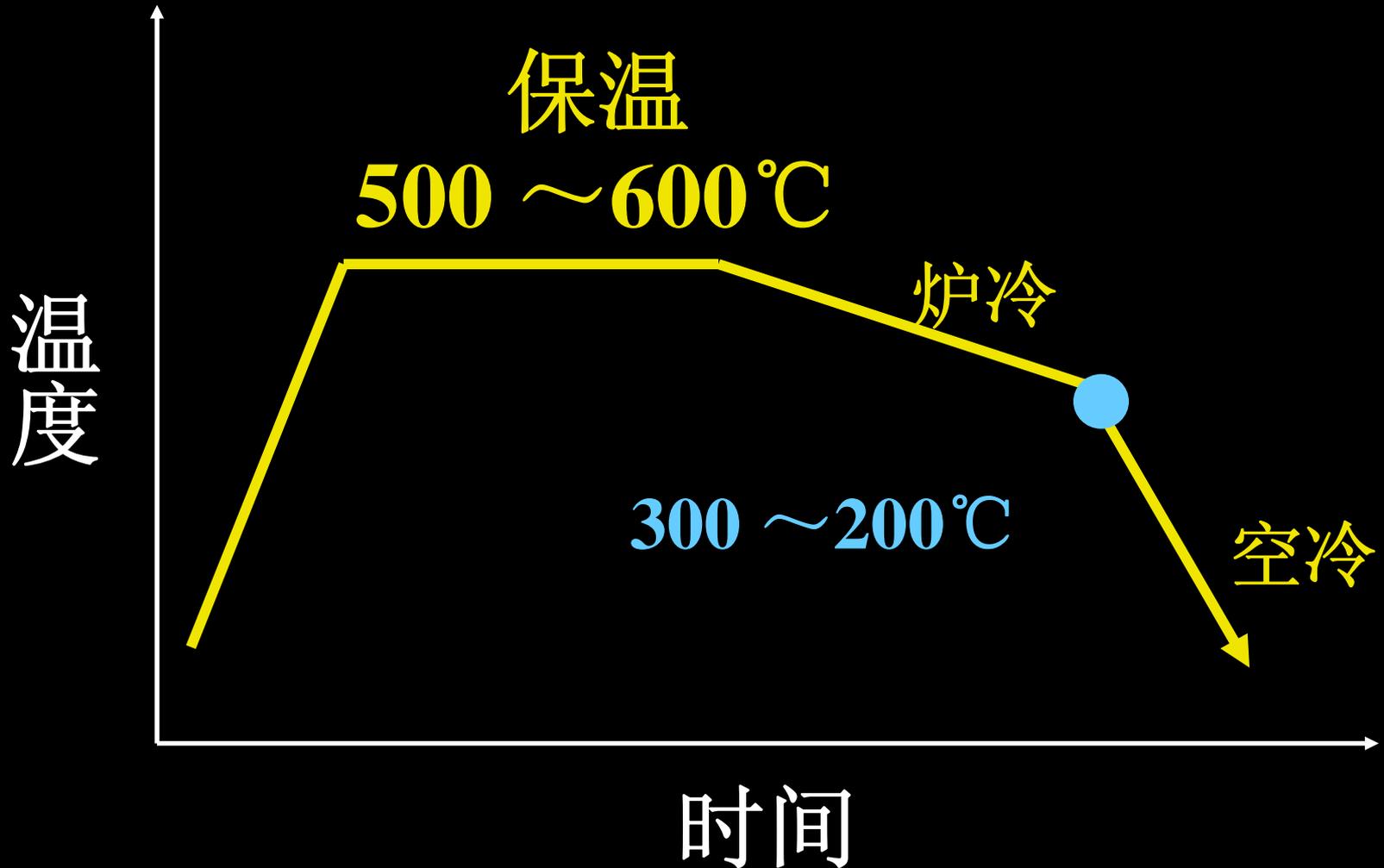
扩散退火工艺



5、去应力退火

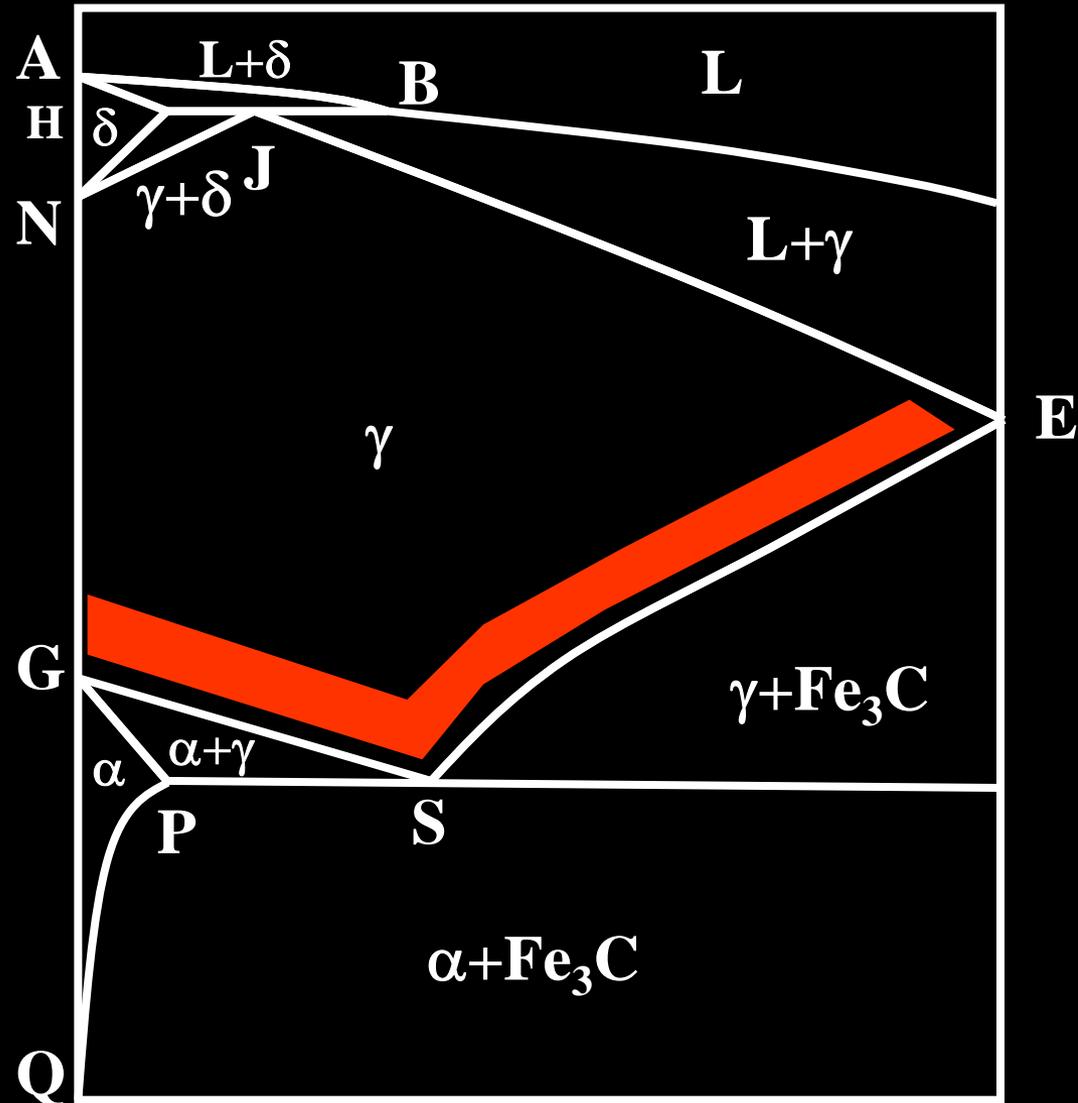
- ❖ 去应力退火又称**低温退火**或**高温回火**；
- ❖ 把钢件加热到 A_{c1} 以下，一般 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 随炉冷却至 $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 出炉；
- ❖ 目的：消除残余应力，防止零件变形或开裂，保证精度。

去应力退火工艺

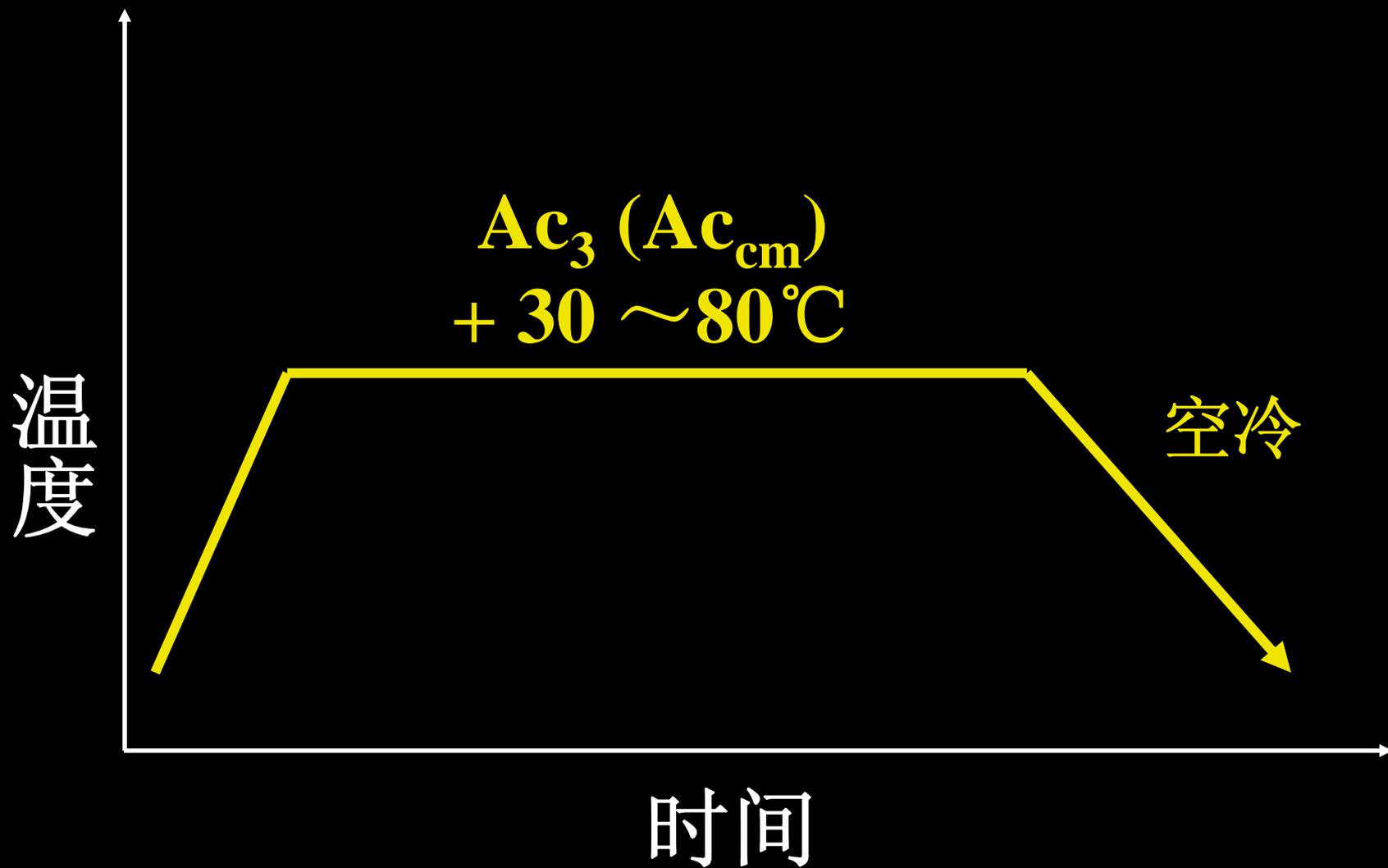


二、 钢的正火 Normalizing

Ac_3 、 $Ac_{cm} + 30 \sim 80^\circ C$ ，
保温后空冷。



正火工艺



应用范围

- 对普通结构件为最终热处理，以细化组织，提高其强度和韧性；
- 使中、低碳结构钢组织正常化，改善切削加工性能；
- 为淬火作组织准备；
- 抑制或消除过共析钢的网状渗碳体，为球化退火作组织准备。

退火与正火的选择

- 改善切削加工性能
低碳钢：硬度低，粘刀，正火；
高碳钢：硬度高，难切削，退火；
中碳钢：退火、正火。
- 经济性
正火周期短，耗能少，操作简便，
尽量以正火代替退火。

- 使用性能

普通结构件，以正火作为最终热处理，以细化晶粒，提高力学性能；

形状复杂的结构件，采用退火作为最终热处理，以消除应力防止裂纹。

三、 钢的淬火 Quenching

- ❖ 将钢加热到临界温度以上，保温后快速冷却获得M的热处理工艺。
- ❖ 淬火是钢强化的最重要手段之一。

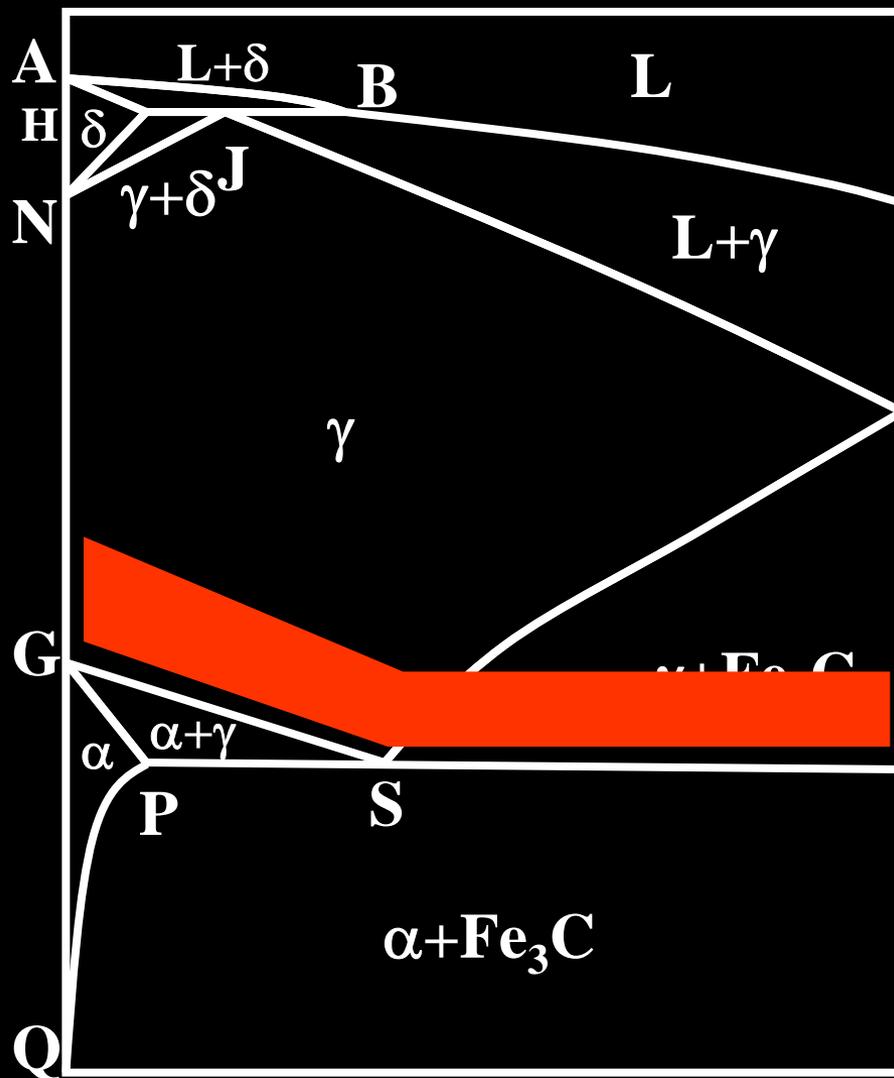
淬火温度

❖ 亚共析钢

$Ac_3 + 30 \sim 50^\circ C$

❖ 过共析钢

$Ac_1 + 30 \sim 50^\circ C$



冷却速度

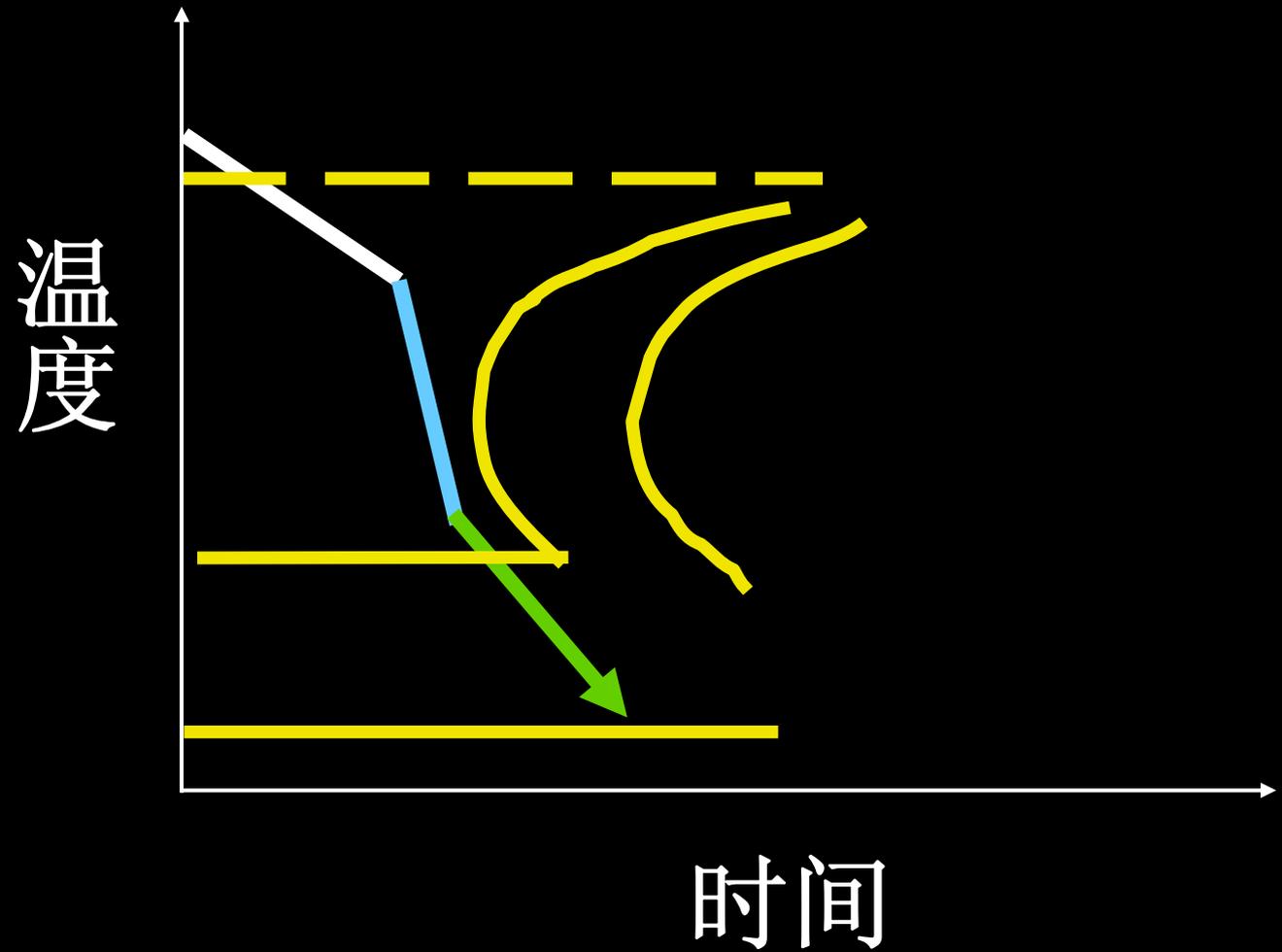
(1)理想冷却速度

高温 $T > 650^{\circ}\text{C}$, 慢冷, 可以减少热应力。

中温 $650^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$, 快冷, 避开C曲线的鼻尖, 保证全部获得M。

低温 400°C 以下, 特别是 $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 发生M转变时要求慢冷, \downarrow M转变时的组织应力

(2)理想冷却速度示意图



淬火介质

到目前为止，在实际生产中还没有找到符合这一理想曲线的冷却介质。现有淬火介质有：水、含盐水溶液、油、盐浴、碱浴、淬火液等等。

①水

是最普通的淬火介质。

在 $650\sim 500^{\circ}\text{C}$ 冷速大，但在 $320\sim 200^{\circ}\text{C}$ 冷速也大。

②含盐水溶液

是水的改进，和水性能类似。

但淬火后表面硬度高、性能均匀、表面光滑。

③油

是另一种特别通用的
淬火介质。

在 $650\sim 500^{\circ}\text{C}$ 冷速小，
但在 $320\sim 200^{\circ}\text{C}$ 冷速也小。

淬火方法

单液淬火

Single-stage Quenching

双液淬火

Double Quenching

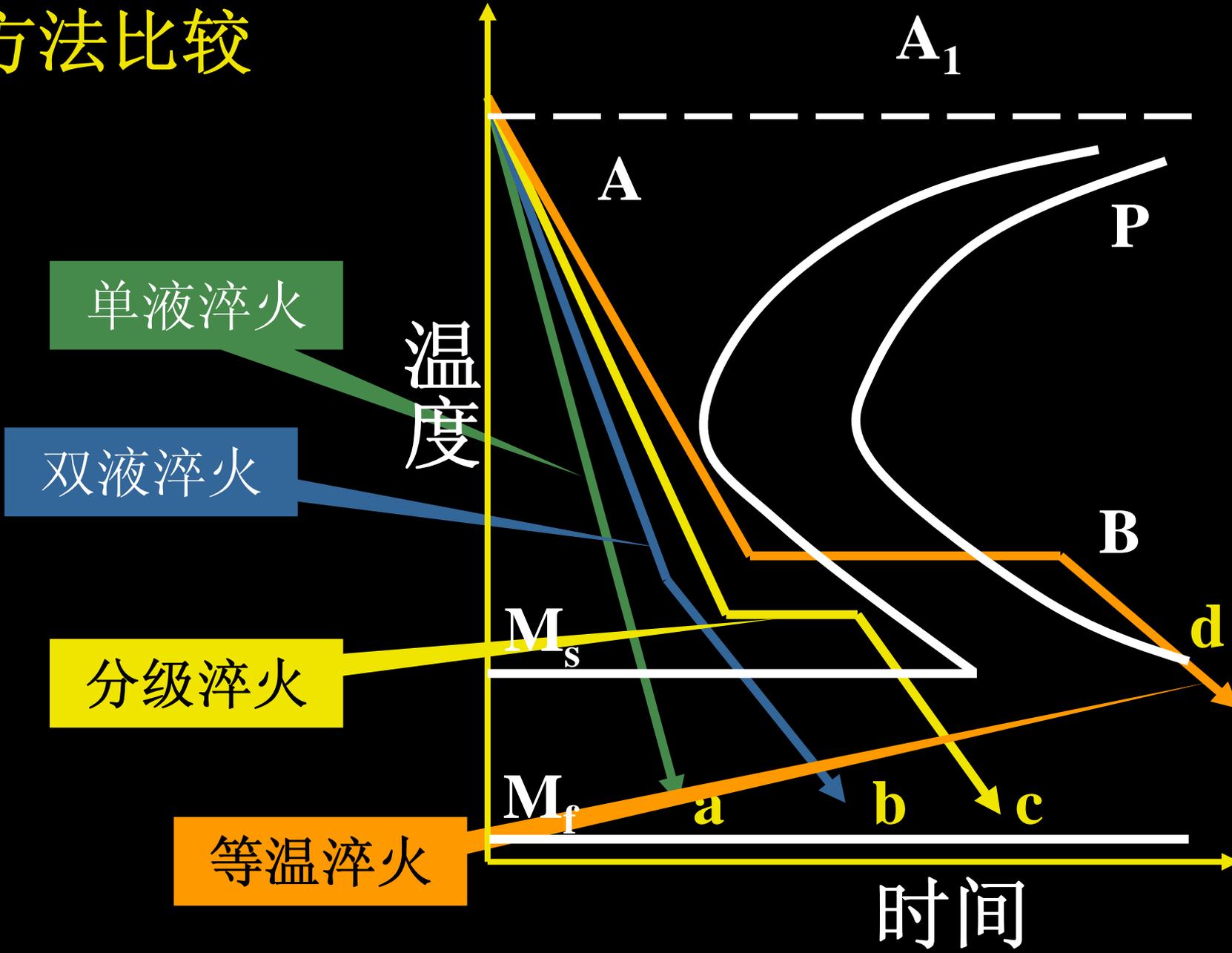
分级淬火

Broken Hardening

等温淬火

Isothermal Hardening

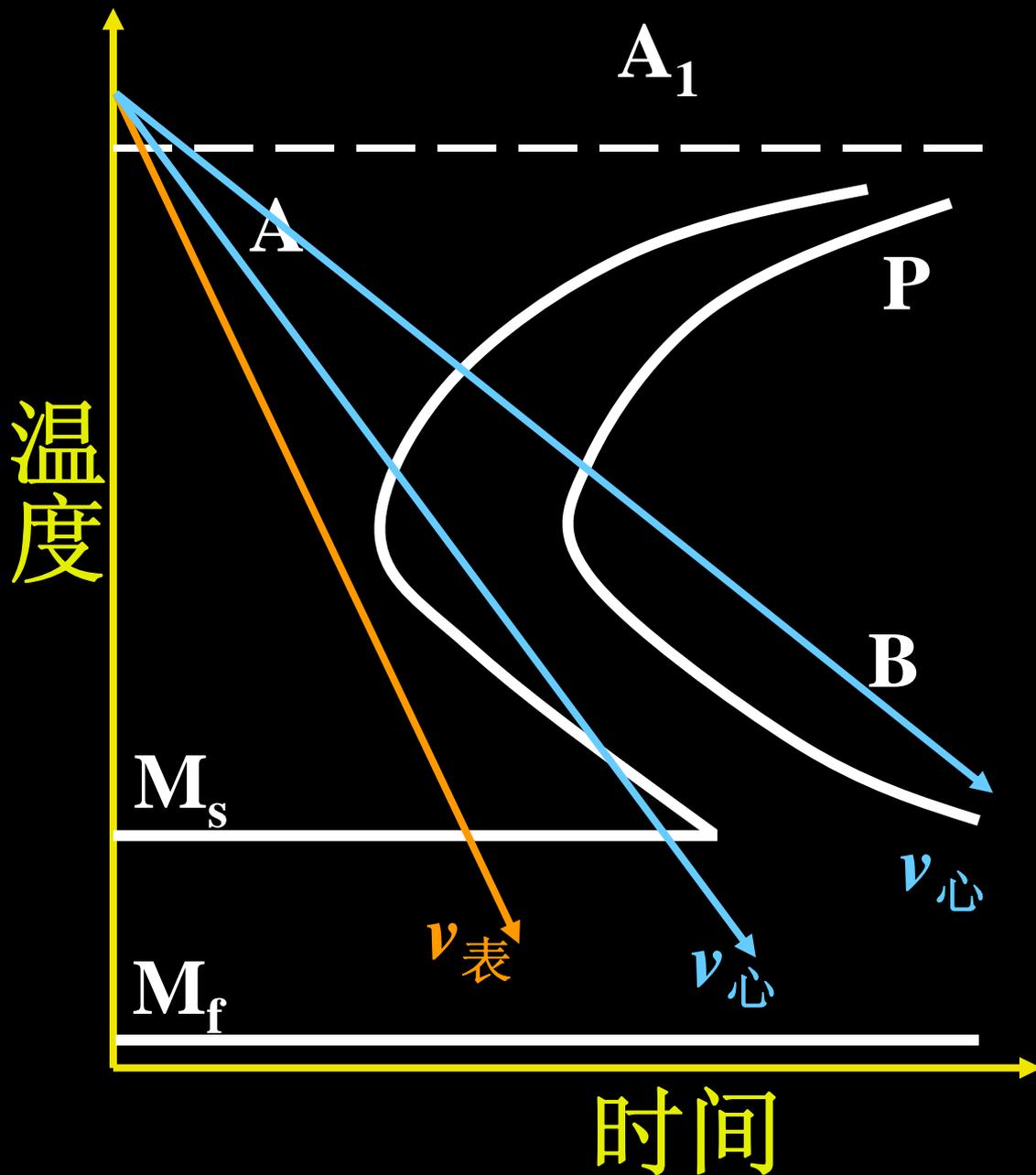
淬火方法比较



钢的淬透性

钢件淬火时，表层直接与淬火介质接触，冷却速度快；而心部则要通过表层来散热，冷却速度慢。

钢件表层得到M；而心部只能获得部分M，甚至完全得不到M。



(1) 淬透性定义

淬透性是表征钢件淬火时形成M的能力，或者说表征钢件淬火时所能得到的淬硬层的深度。(与钢中过冷A稳定性有关)

(2)工程定义

由钢件表面向里到半M组织（50%M）的区域称为淬硬层，其深度称淬硬层深度。

(3) 淬硬性

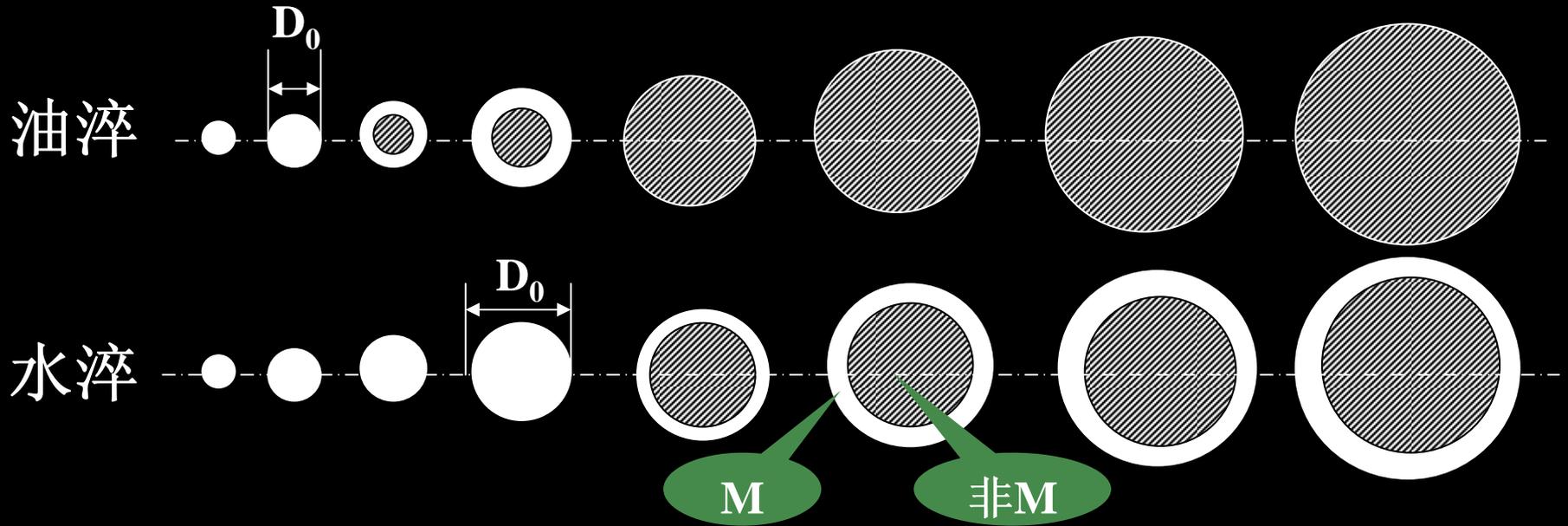
在正常淬火情况下，以超过临界冷却速度的冷速冷却，得到的M组织所能达到的最高硬度值（与M中含C量有关）。

(4)淬透性的测试方法

- 临界直径法
- 顶端淬火法

临界直径法

将同一种钢不同直径的圆棒试样加热至单相A区，然后在同一淬火介质中冷却，测出其能全部淬硬成M的最大直径 D_0 即为临界直径。

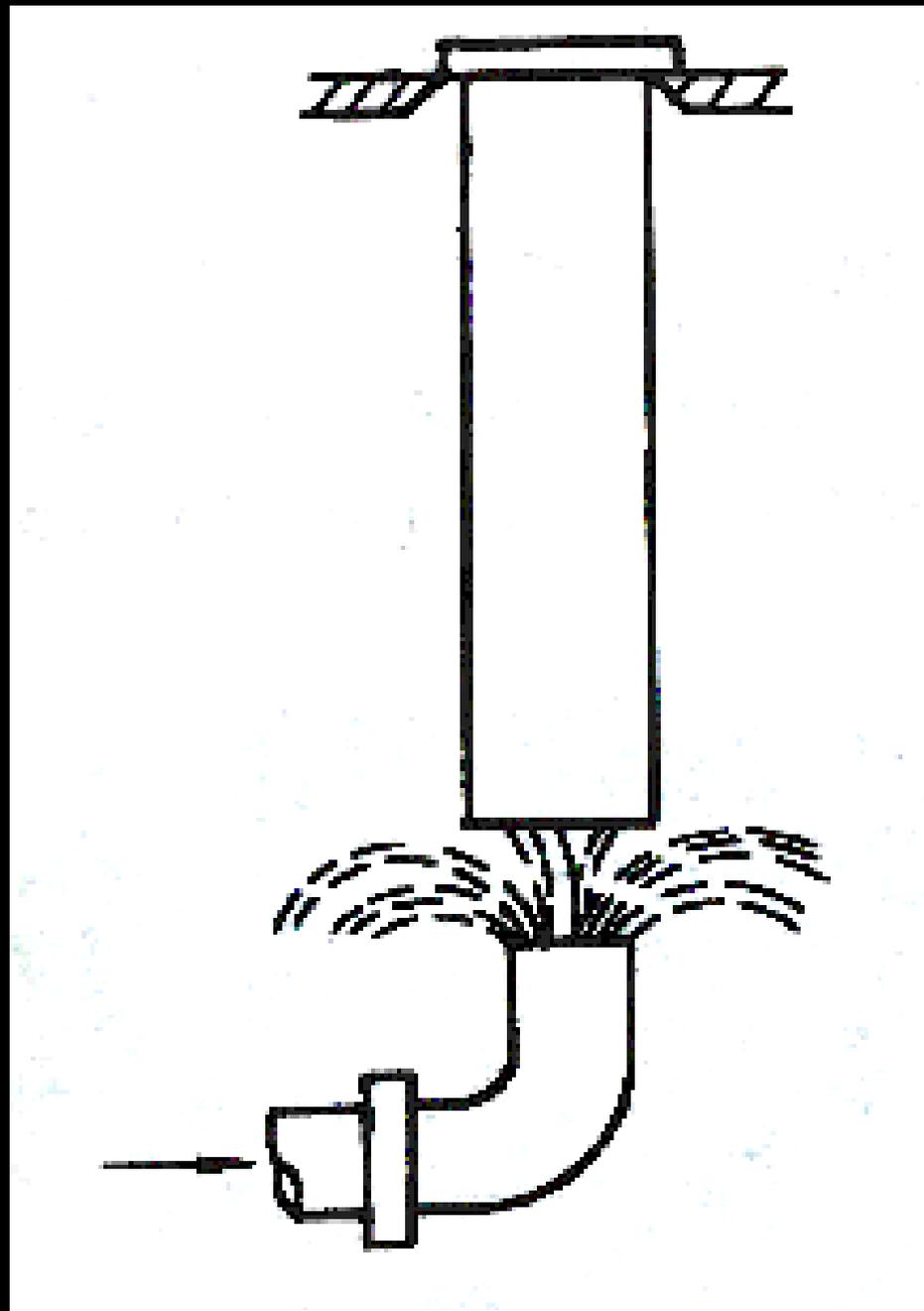


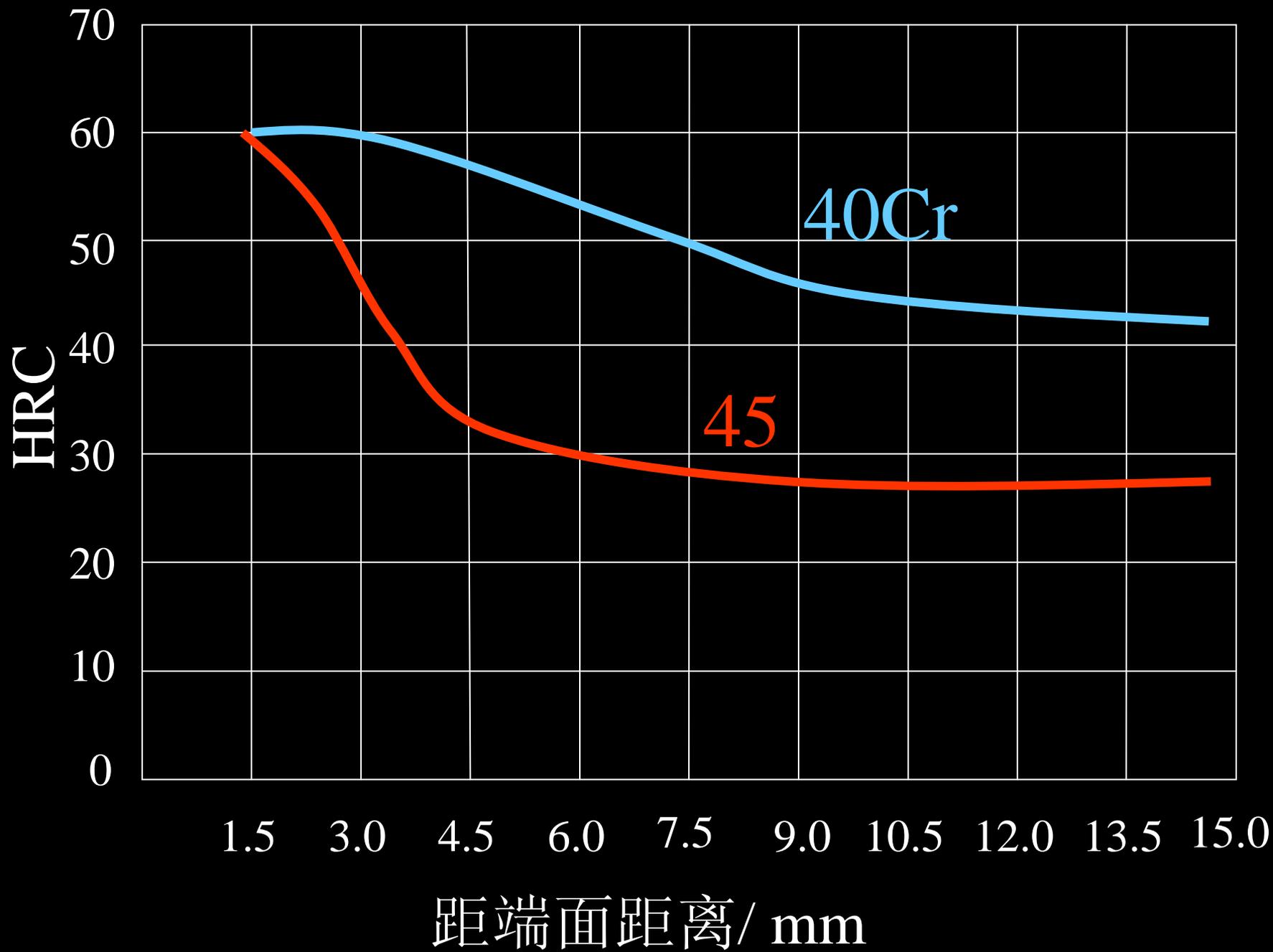
- D_0 越大，表示钢的淬透性越好；
- 临界直径法用不同钢在同一淬火介质中的临界直径来比较它们的淬透性大小。

顶端淬火法

- 国内普遍采用的淬透性试验方法；
- 将标准尺寸的棒状试样加热至单相A区后放在支架上，从它的一端喷水冷却，然后在试棒的表面从端面起依次测定硬度，得到硬度随距顶端距离的变化曲线—淬透性曲线；
- 根据淬透性曲线比较不同钢种的淬透性大小。

顶端淬火法





钢的淬透性的应用

钢的淬透性是机械设计中选材时应予考虑的重要因素之一。

- 大截面零件、承受动载的重要零件、承受拉力和压力的许多重要零件（螺栓、拉杆、锻模、锤杆等），要求表面和心部力学性能一致，故应选择淬透性高的材料；
- 心部力学性能对使用寿命无明显影响的零件（承受弯曲或扭转的轴类），可选用淬透性低的钢，获得 $1/2 \sim 1/4$ 淬硬层深度即可；
- 焊接件、承受强力冲击和复杂应力的冷镦凸模等，不能或不宜选择淬透性大的材料。

作业

第三章

3、4、5、6、9

第三章

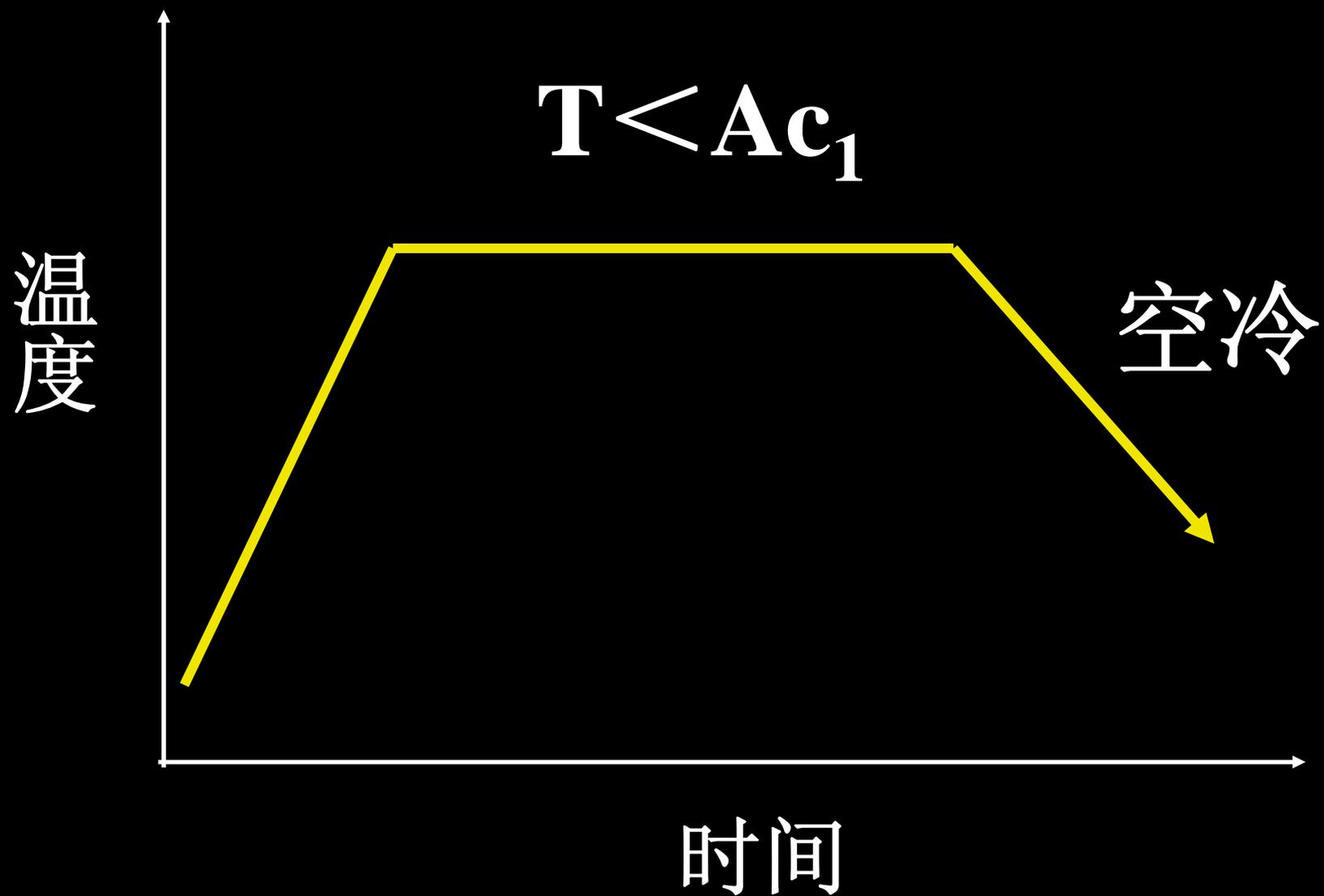
钢的热处理

-3

四、钢的回火 Tempering

将淬火后的钢重新加热到 A_{c1} 以下某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温。

回火工艺



回火的目的

- ❖ 消除淬火应力,降低钢的脆性。
- ❖ 稳定工件尺寸(淬火M和残余A是非稳定组织,如果发生转变,则零件的尺寸会发生变化)。
- ❖ 获得工件所要求的组织性能。
- ❖ 回火是热处理工序中最后一道工序。

(一) 淬火钢回火时的组织转变

回火意味着 $\uparrow T$ ，当 $T \uparrow$ 时，M 等非稳定组织会发生转变，根据回火温度不同，非稳定组织的转变可以分四个阶段。

淬火钢回火时的组织转变四阶段

四阶段

第一阶段 $T \leq 200^\circ\text{C}$

M分解

第二阶段 $T \in (200, 300^\circ\text{C})$

残余A转变

第三阶段 $T \in (300, 400^\circ\text{C})$

碳化物析出

第四阶段 $T > 400^\circ\text{C}$

Fe_3C 和碳化物聚集长大与
F的再结晶

第一阶段 $T \leq 200^{\circ}\text{C}$

M分解

C以 ϵ 碳化物形式析出，弥散分布、极细、粒状，与M保持共格关系的薄片，其晶体结构为正交晶格，分子式为 $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ ，此时组织为回火M。

第二阶段 $T \in (200 \sim 300 \text{ } ^\circ\text{C})$

残余 A 转变

M 分解使得体积 \downarrow ， \downarrow
残余 A 的压力， $A_{\text{残}} \rightarrow B_{\text{下}}$ 。 $B_{\text{下}}$
与回火 M 组织相似，固这一阶段主要还是回火 M。

第三阶段 $T \in (300 \sim 400 \text{ } ^\circ\text{C})$

碳化物析出

- ❖ C 从 $\alpha\text{-Fe}$ 中析出，
 $\varepsilon(\text{Fe}_{2.4}\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ 。
- ❖ 淬火时晶格畸变所造成的内应力大大消除。
- ❖ 组织为：F + 细颗粒状的 Fe_3C 的混合物。

第四阶段 $T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fe_3C 和碳化物聚集长大与F的再结晶

回火 T 越高, Fe_3C 的颗粒越大, 经第三阶段后, 钢组织 F 已经回复为平衡浓度的 F, 但 F 仍然保留着原 M 的板条状或片状形态, 并且晶粒内部的位错密度很高, 所以与冷变形金属相似。随 $T_{\text{回}} \uparrow$ (一般在 $500 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) F 逐渐发生再结晶, 形成位错密度较低的多边形等轴 F。且较粗大。

$T_{\text{回}} \uparrow$, Fe_3C 尺寸 \uparrow , 内应力 \downarrow , $A_{\text{残}} \downarrow$,
 $M \downarrow$

回火后的组织

- ✓ 回火M $T < 250^{\circ}\text{C}$
Tempered Martensite
- ✓ 回火T $T (350^{\circ}\text{C}, 500^{\circ}\text{C})$
Tempered Troostite
- ✓ 回火S $T (500^{\circ}\text{C}, 600^{\circ}\text{C})$
Tempered Sorbite
- ✓ 回火P $T (600^{\circ}\text{C}, A_1)$
Tempered Pearlite

①回火M

$$T < 250^{\circ}\text{C}$$

过饱和F + 共格弥散
分布的极细的 ϵ 碳化物

②回火T

$$T \in (350, 500^\circ\text{C})$$

尚未发生再结晶的**F**和呈弥散分布的细颗粒**Fe₃C**的混合组织。

③回火 S

$T \in (500, 600^\circ\text{C})$

再结晶后的 F (多边形)
+ 粗粒状 Fe_3C 。

④回火 P

$$T \in (600^{\circ}\text{C}, A_1)$$

多边形 F + 较粗大颗粒的 Fe_3C 。

光学显微组织与球化退火处理后的组织相似。



图 3-17 淬火马氏体和回火马氏体的显微组织

a) 淬火马氏体 $\times 5000$ b) 回火马氏体 $\times 1500$



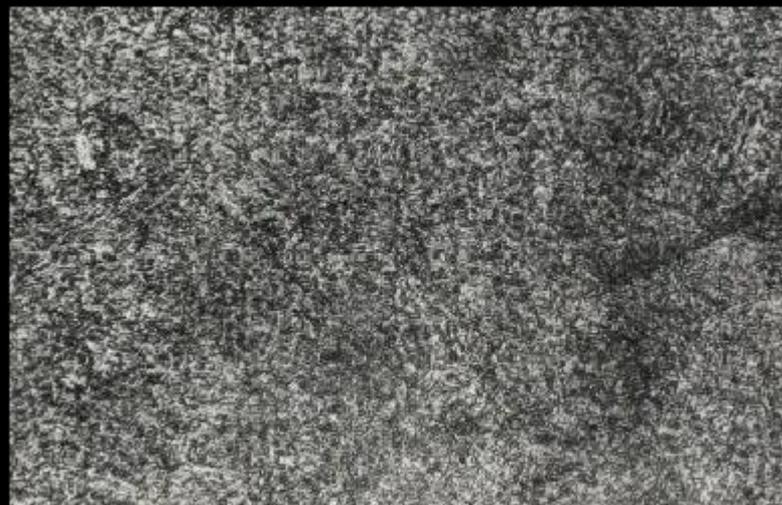
材料：T12钢

状态：780℃加热 水冷 200℃回火

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：回火马氏体 + 未溶碳化物（白色颗粒状）



材料：45钢

状态：860℃加热 水冷 600℃回火

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：回火索氏体

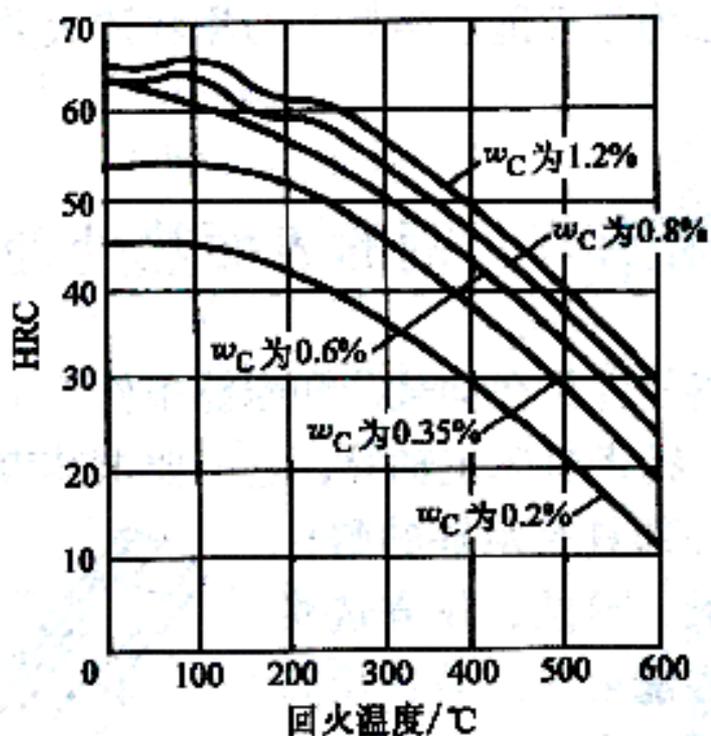
(二) 淬火钢的回火后力学性能

随 $T_{\text{回}} \uparrow$

硬度、强度 \downarrow

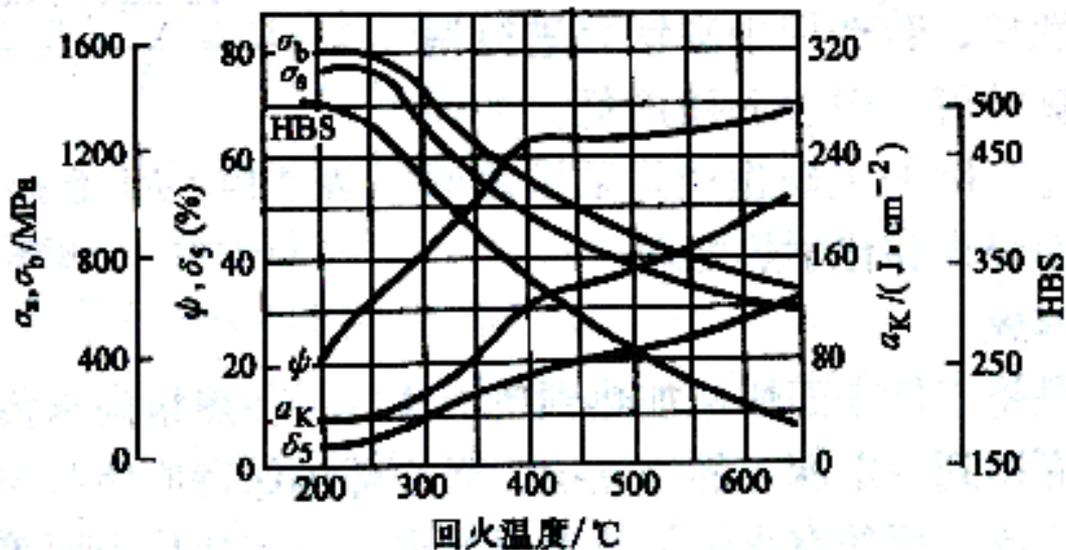
塑性、韧性 \uparrow

不同含碳量钢的
硬度随回火温度
升高而降低



a)

35钢力学性能与
回火温度的关系



b)

(三) 回火种类及应用

①低温回火($150\sim 250^{\circ}\text{C}$)

回火M，工具钢。

②中温回火($350\sim 500^{\circ}\text{C}$)

回火T，主要弹簧部件。

③高温回火($500\sim 650^{\circ}\text{C}$)

回火S，

广泛应用于各种机械零件。

调质

Modified Treatment

淬火+高温回火=调质

Hardening and
tempering

=

Modified Treatment

3.4 钢的表面热处理

对在动载和摩擦条件下工作的机械零件，要求

- 表面硬度高，耐磨性好，以保证其精度；
- 而心部要具有足够的塑性和韧性，以防止断裂。

通过选材和普通热处理无法满足上述要求。

- 高碳钢：淬火+低温回火，硬度高，耐磨性好，但心部韧性差；
- 中碳钢调质处理，心部韧性好，但表面硬度不够，耐磨性差。

一、表面淬火

将工件表面快速加热到A区，在热量尚未传到材料心部时立即迅速冷却，使其表面得到一定深度的淬硬层，而心部仍保持原始组织的一种局部淬火方法。

工业中常用的表面淬火方法有：感应加热表面淬火、激光加热表面淬火和火焰加热表面淬火。

(一) 火焰加热表面淬火

- 利用气体燃烧产生的火焰加热工件，使其表面迅速加热到A区后，立即喷水冷却，使材料表面淬硬；
- 淬硬层深度一般为2~6mm；
- 这种方法所使用的设备简单，成本低，但生产效率低，且质量不易控制。

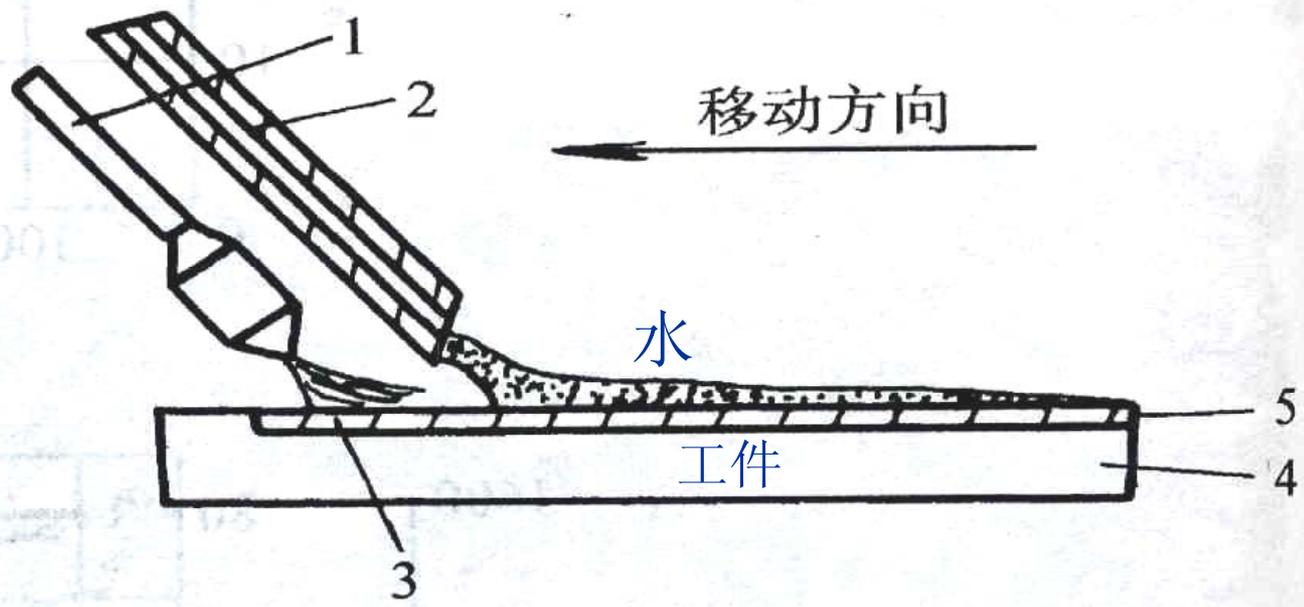


图 3-19 火焰加热表面淬火示意图

- 1—烧嘴 2—喷水管 3—加热层
- 4—工件 5—淬硬层

(二) 感应加热表面淬火

利用通入交流电的加热感应器在工件中产生的感应电流来加热工件。

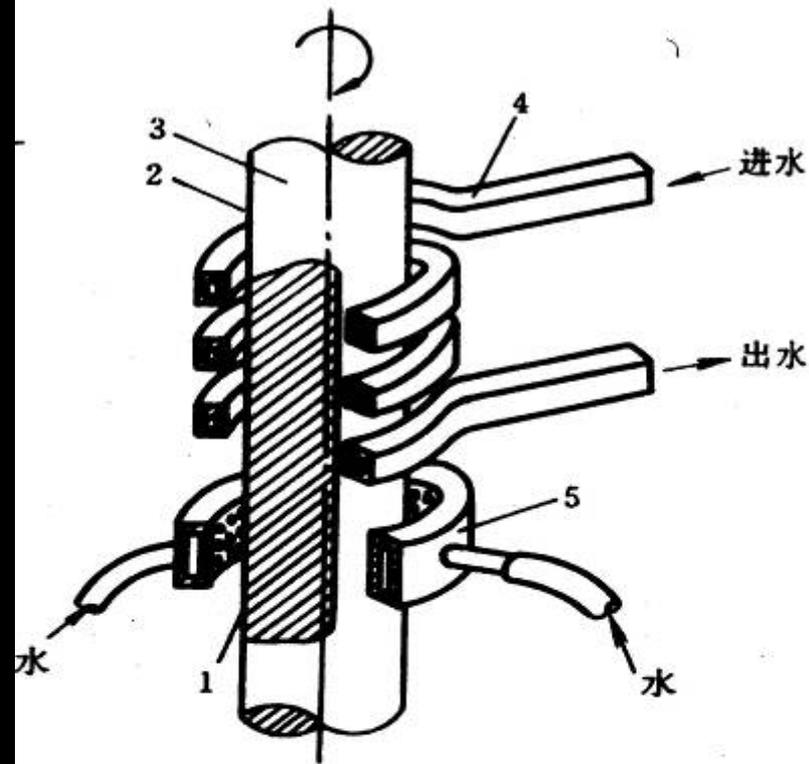


图 3-20 感应加热表面淬火示意图

1—加热淬火层 2—间隙 3—工件

4—加热感应圈 5—淬火喷水套

- 因感应电流的集肤效应，感应电流主要集中在工件的表面层，心部几乎没有电流；
- 使工件表面层被快速加热到A区后，喷水冷却；
- 工件表面层获得一定深度的淬硬层，而心部组织不变。

感应加热表面淬火的特点

- 加热速度快；
- 时间短；
- 因表面层M相变产生压应力，可提高工件的疲劳强度；
- 工件表面质量高，变形小；
- 这种表面淬火的方法易于实现自动化。

(三) 激光加热表面淬火

用高功率密度的激光束照射到工件表面，使其表面层快速加热到A区或 T_m ，靠工件自身的热传导迅速自冷而获得一定深度的淬硬层或冷凝层。

激光束斑点直径仅 $20\sim 50\text{mm}^2$ ，故工件与激光束要作相对运动，使光束能照射到整个工件表面。

特点

- 质量高；
- 表层组织超细化；
- 硬度高（比常规淬火高HRC6~10）；
- 脆性极小；
- 工件变形小；
- 自冷淬火，生产率高，易于实现自动化；
- 设备昂贵，成本高。

二、钢的化学热处理

将工件置于一定的化学介质中，通过加热、保温和冷却，使介质中的某些元素渗入到工件表层，以改变表层的化学成份和组织，从而使工件表面具有与心部不同的性能的一种热处理工艺。

与表面淬火热处理相比，化学热处理不仅使工件表面与心部的组织不同，且成份亦不同。

作用

渗入不同的元素，则赋予工件表面不同的性能。

- 渗碳、渗氮、碳氮共渗可提高钢表面的硬度、耐磨性及疲劳强度；
- 渗B、渗Cr可提高表面耐磨性和耐蚀性；
- 渗Al、渗Si可提高耐热抗氧化性；
- 渗S可提高减摩性。

（一）渗碳处理

渗碳是向低碳钢或低碳合金钢工件表层渗入碳原子的过程。

- 根据渗碳介质的不同，渗碳可分为固体渗碳、液体渗碳和气体渗碳。
- 渗碳后工件中的含碳量从表面向心部逐渐降低，表面可达0.8~1.0%，而心部仍保持原始成份。

- 加热温度 $900 \sim 950^{\circ}\text{C}$
- 气体渗碳剂
裂化混合气体（天然气或煤气 + $\text{CH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$ ）；
有机液体高温下分解产生的混合气体（ CO 、 CH_4 、 C_2H_4 ）

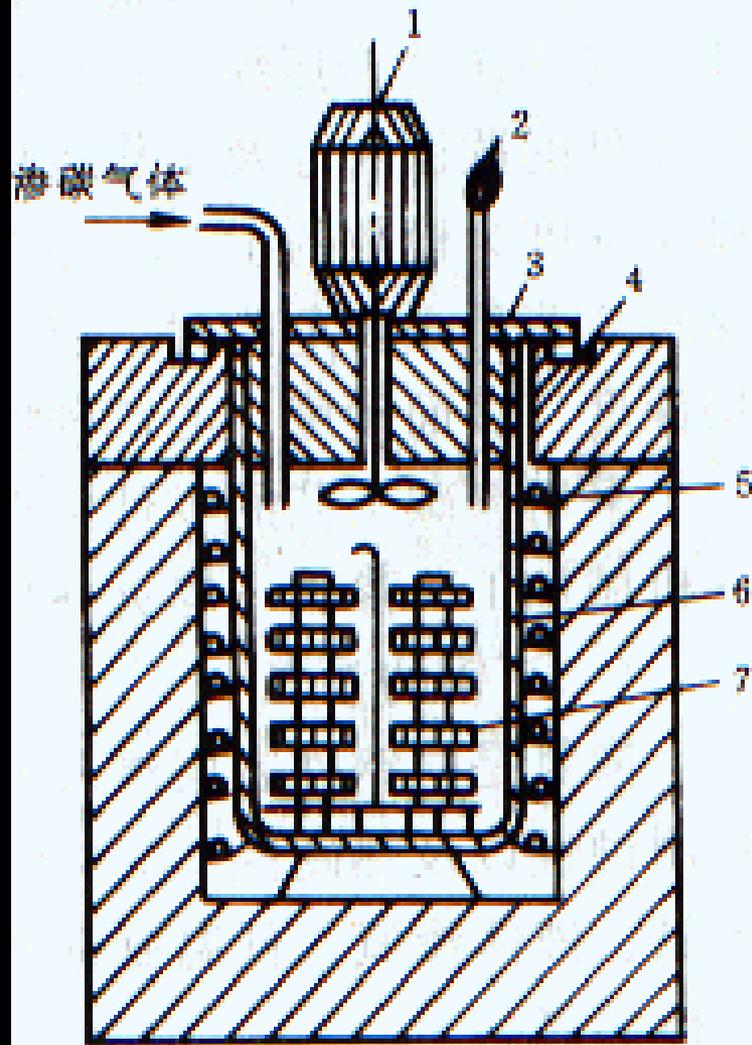


图 3-21 气体渗碳法示意图

1—风扇电动机 2—排出废气火焰

3—炉盖 4—砂封 5—电炉丝

6—加热圈 7—工件

组织

- 渗碳缓冷后的成分
表面：过共析
心部：亚共析



- 工件渗碳后，通常还要进行淬火+低温回火处理，组织为

表面：

高碳回火M+粒状渗碳体或碳化物+少量A'

心部：随材料而异

普通低碳钢为：F+P

低碳合金钢为：回火低碳M+F

渗碳层深度及工艺路线

- 渗碳层深度：0.3~3mm
- 采用渗碳工艺的零件的加工工艺路线：
锻造→正火→机械加工→渗碳→淬火→低温回火→精加工→成品

（二）渗氮

渗氮是向钢件表层渗入氮原子的过程。

渗氮用钢通常是含有铝、铬、钼、钒、钛等合金元素的钢。这些合金元素极易与氮形成颗粒细小、分布均匀、硬度很高且非常稳定的各种氮化物，从而提高工件表面硬度、耐磨性、疲劳强度和耐蚀性及热硬性（600~650℃）。

渗氮处理的特点

- 渗氮工艺温度比渗碳低（600~650, 900 ~ 950°C），工件变形小；
- 渗层薄（0.15~0.75mm）；
- 生产周期长（30~50h）；
- 渗氮层脆性大；
- 要使用专用合金钢。

（三）碳氮共渗

同时向钢的表层渗入碳和氮原子的过程。

将工件放入充有渗碳介质和氨气的炉中，加热到840~860 °C后保温，共渗介质分解出C、N原子被工件表面奥氏体吸收并向内部扩散，形成一定深度的CN共渗层。

3.5 钢的特种热处理

Special Heat Treatment of Steels

一、真空热处理

可以防止钢件表面氧化，脱碳，保护工件热处理后表面的质量和性能。

二、可控气氛热处理

工件在可控气氛中进行的各种热处理叫可控气氛热处理

1 具有氧化和脱碳作用的气体

2 具有还原性的气体

3 具有强烈渗碳作用的气体

4 中性气体

三、形变热处理

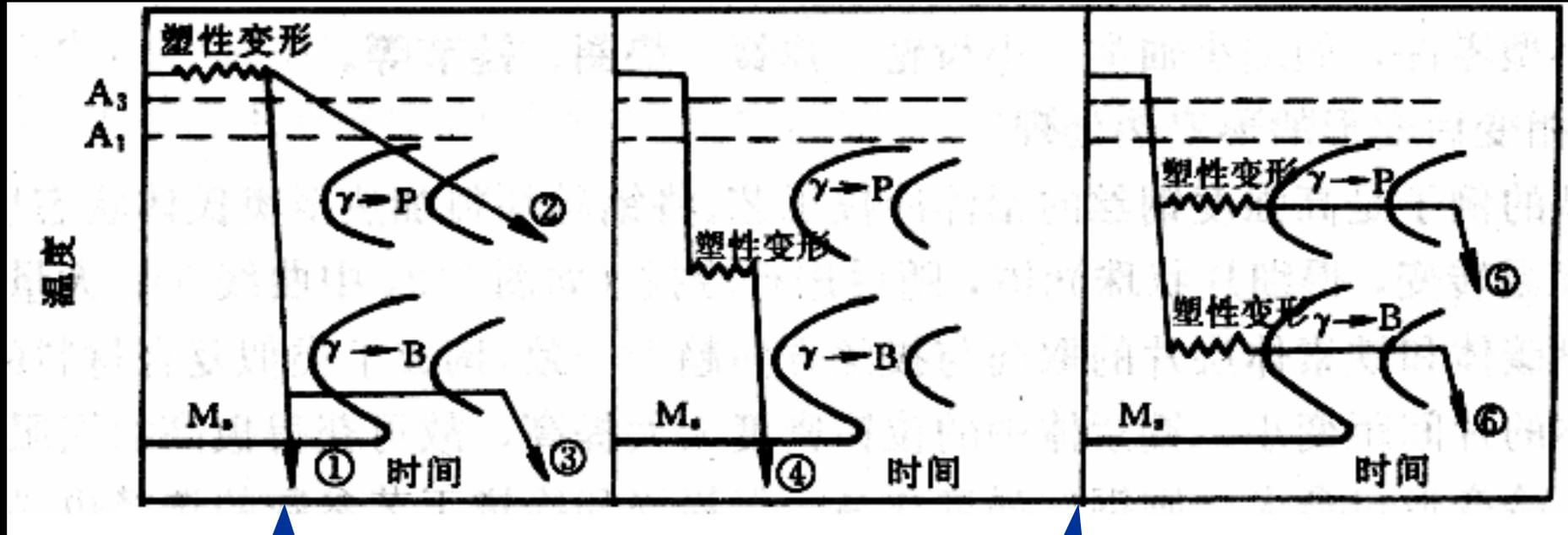
形变热处理就是将塑性变形与热处理操作相结合，使金属材料同时受到形变强化和相变强化的一种综合工艺。

1 相变前变形的
形变热处理

2 相变中变形的
形变热处理

3 相变后变形的
形变热处理

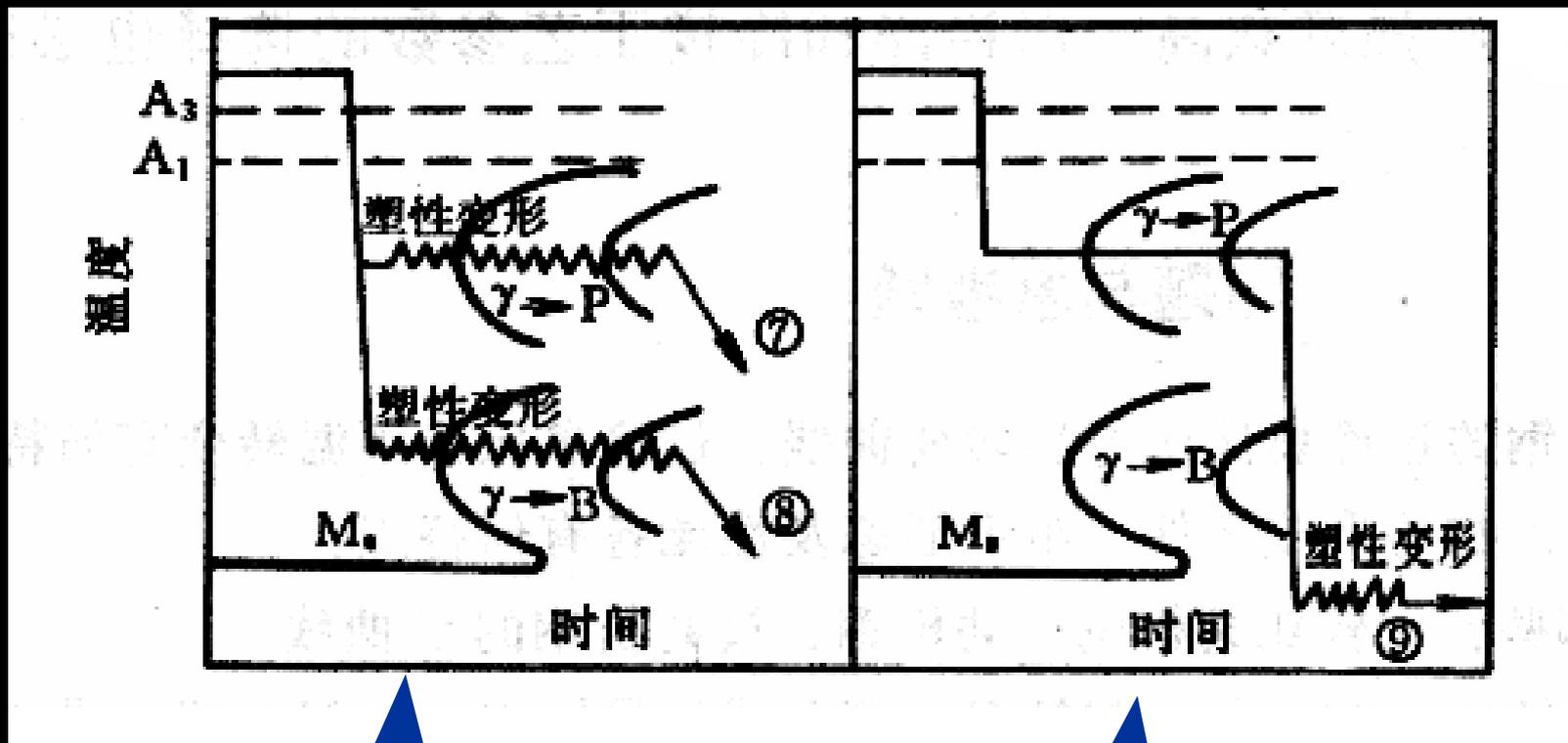
相变前变形的形变热处理



A化温度下变形

过冷A变形

组织: ①④M; ②⑤P; ⑥③B



A相变中变形

A相变后变形

组织: ⑦⑨P; ⑧B

要点总结 Focus in

熟悉 四种热处理

掌握 三个转变、两种转变图

通晓 典型组织

了解 表面热处理和特殊热处理

四种热处理

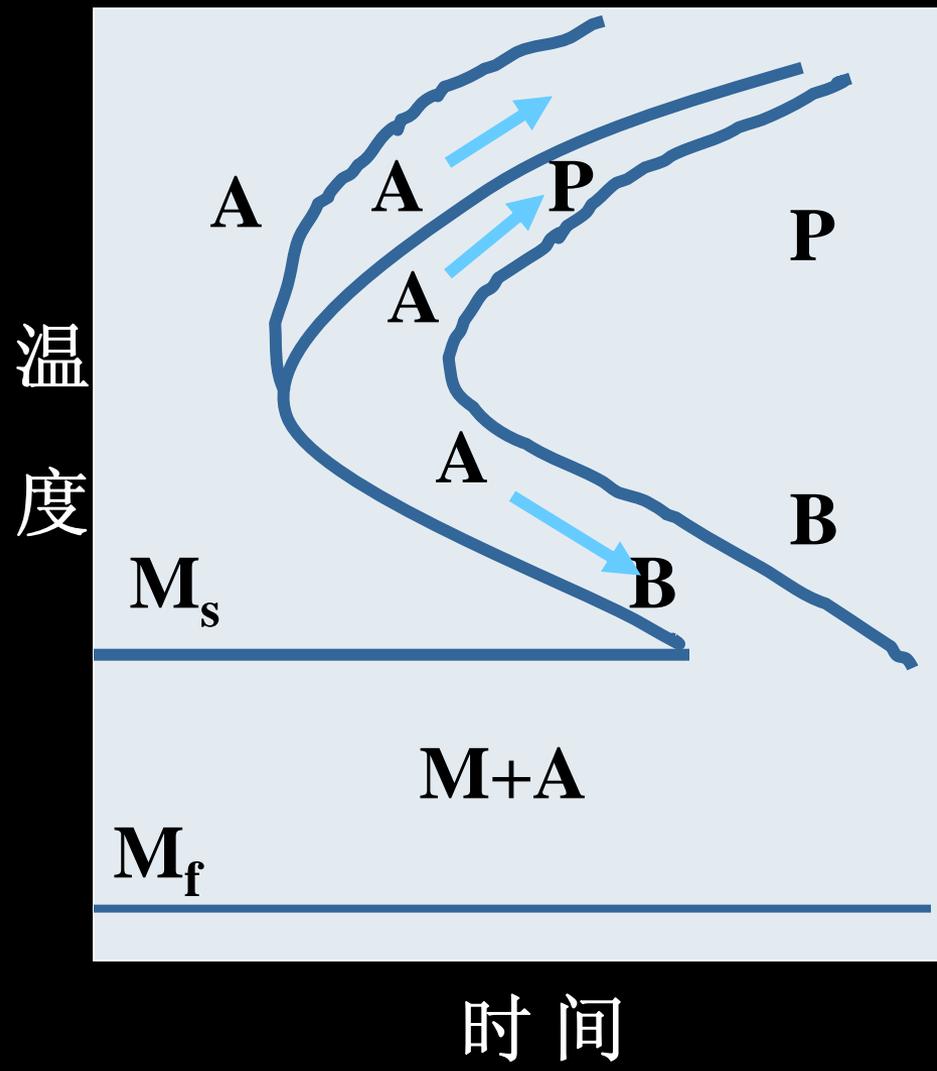
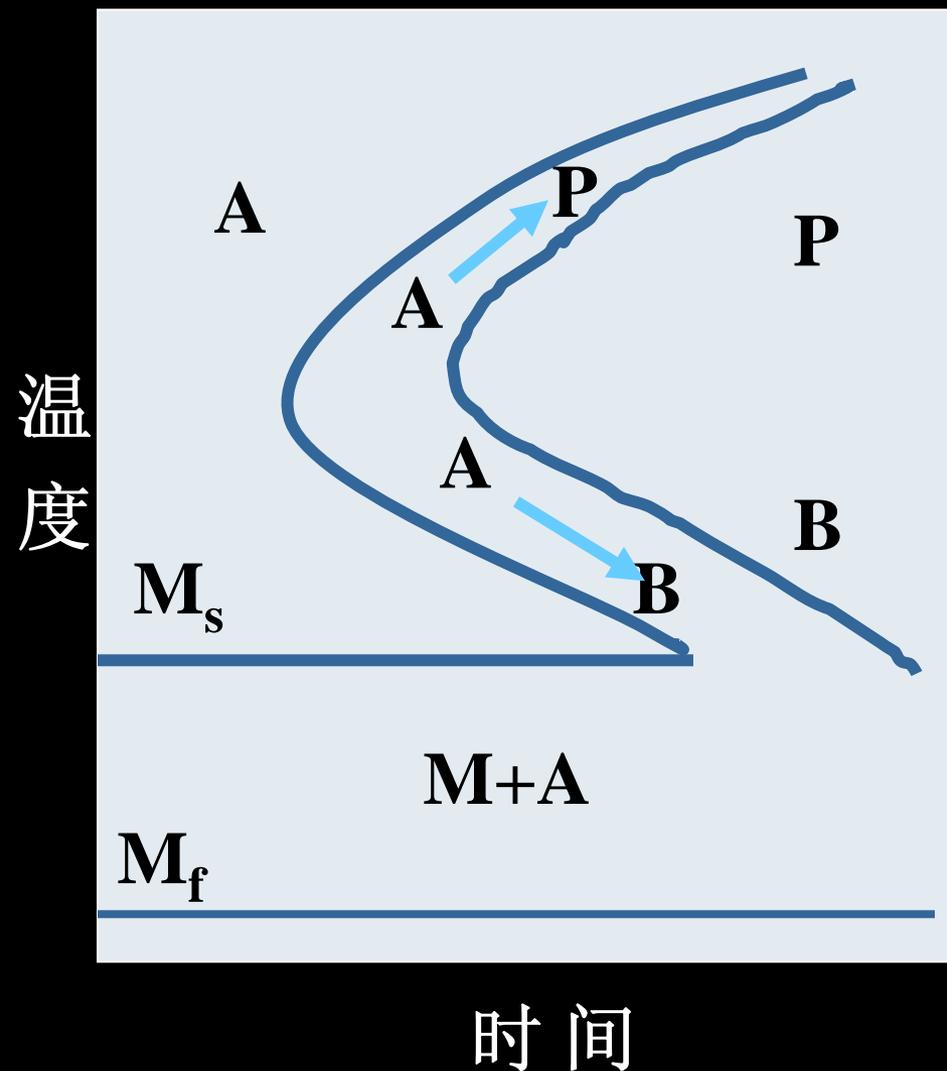
- 退火 **Annealing**
- 正火 **Normalization**
- 淬火 **Quenching**
- 回火 **Tempering**

钢TTT曲线比较

亚共析钢A→F

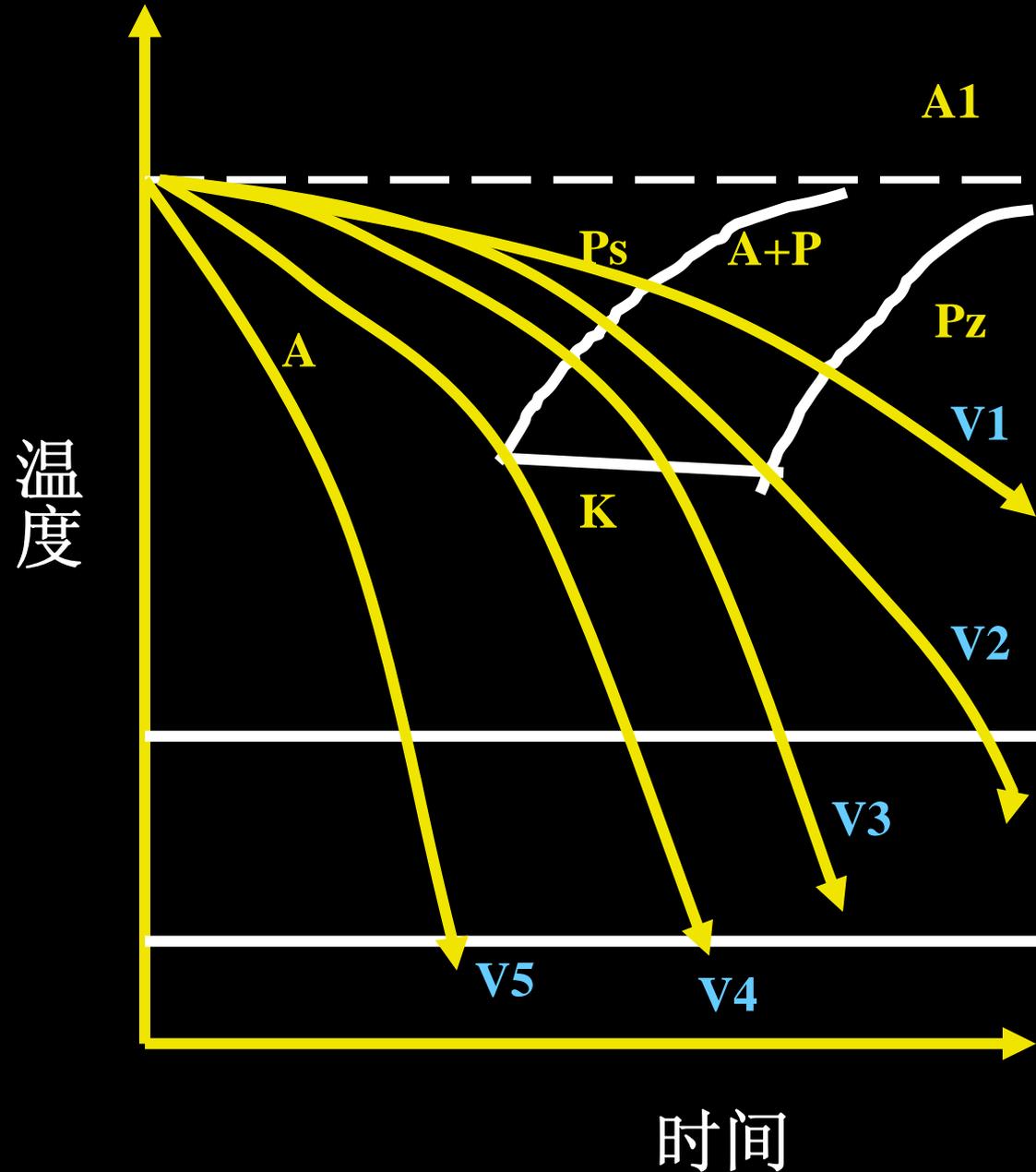
过共析钢A→Fe₃C

共析钢



共析钢的连续冷却转变曲线

- V1 P
- $V < V2$ P
- $V2 < V < V4$
P+M+A'
- $V > V4$ M+A'
- V5 M+A'



热处理过程中的三种转变

- 钢加热时的A转变（A化）；
4个阶段
- 过冷A的冷却转变；
高、中、低温转变
P、B、M型转变
- 淬火钢的回火转变。
4个阶段

钢中的基本组织

- ❖ 铁素体F
- ❖ 渗碳体 Fe_3C
- ❖ 珠光体P
- ❖ 奥氏体A
- ❖ 马氏体M
- ❖ 贝氏体B

马氏体 **M**(Martensite)

C在 α —**Fe** 中的**过饱和**固溶体。

铁素体F: **C**在 α —**Fe** 中的固溶体

奥氏体A

C在 γ —Fe 中的固溶体
最大溶解度

E 2.11% 1148°C

S 0.77% 727 °C

贝氏体B

F和Fe₃C的机械混合物
(是在F基体上分布着Fe₃C, Fe₃C不再连续)

珠光体P

F和Fe₃C的机械混合物
(F和Fe₃C成层片状分布)

作业

第三章

10、11、12、

14 (1/2/4)

第四章

合金钢

4.1 概述

碳钢的强度、硬度总的说来还是比较低的，虽然可以通过调节碳含量及热处理的方法来提高其力学性能，但其**淬透性**及**回火稳定性**差，限制了其应用。

淬透性：表征钢件淬火时形成M的能力。（用淬硬层深度来表示）

淬硬性：以大于上临界冷速的冷却速度冷却时得到的M的硬度。

回火稳定性：在高温下保持硬度和强度的能力。

为提高碳钢的力学性能、淬透性及回火稳定性，在钢中添加一定量的合金元素——合金钢。

常用的合金元素有：Cr、Mn、Ni、Co、Cu、Si、Al、B、W、Mo、V、Ti、Nb、Zr、Re等。

微合金化钢是近二、三十年来钢铁生产中的最重要成就。在普通碳钢中只要加入极少量的 ($\leq 0.1\%$) 的强碳化物形成元素如**Ni**、**Ti**、**V**或加少量的**Al**形成**AlN**再配合以控轧工艺，就可以制成屈服强度达**350-550MPa**，并具有良好韧性的低碳钢。

合金元素的影响是永远的热点。

一、合金元素的作用

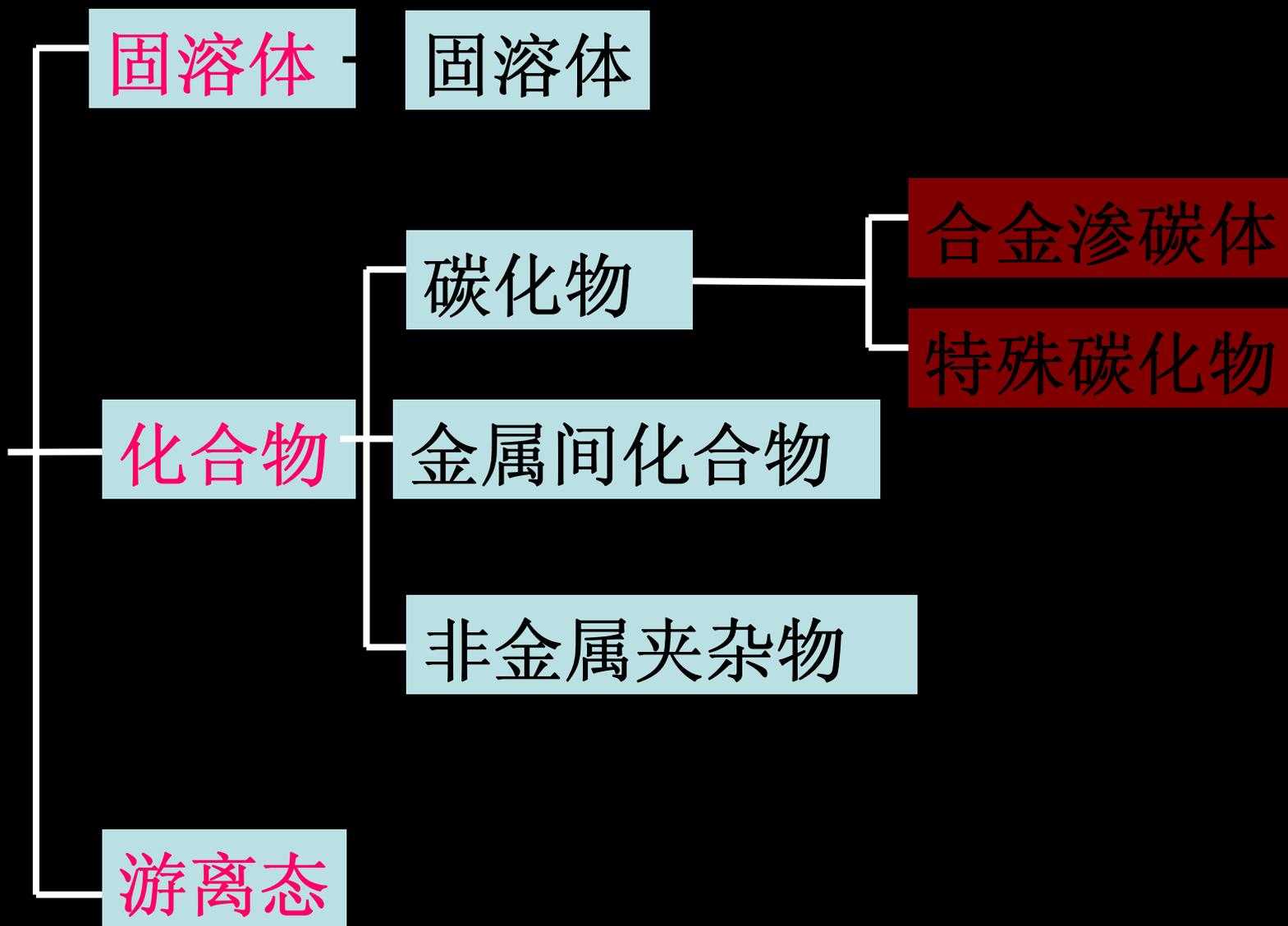
合金元素在钢中的存在形式多样，还会改变相图，影响相变。

所以要理解合金钢，必须了解合金元素及其作用，虽然很难，但我们无法回避。

成分—组织—性能

是材料科学的主旋律。成分的复杂性对研究工作带来困难，但同时也蕴藏着更多的发展潜力。

合金元素在钢中的存在形式



固溶体

固溶于F、A、M中

Ni、Si、Co、Mn、Cr、Mo、W

例：形成合金F

合金元素溶入F后，由于原子半径和晶格类形的差异，必然引起F晶格畸变，产生固溶强化，使F的强度、硬度 \uparrow ，而塑、韧性略有下降。

P、Si、Mn、Ni是显著的强化F元素。

合金渗碳体

如 $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe},\text{Mo})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe},\text{W})_3\text{C}$ 、等

它是合金元素溶入渗碳体中并置换部分铁原子而形成的碳化物。



Me代表Mn、Cr等合金元素。

合金渗碳体比一般渗碳体稳定，硬度高，所以可以提高耐磨性。

特殊碳化物

VC、TiC、NbC、ZrC、WC、MoCW₂C、
Mo₂C、Cr₂₃C₆、Cr₃C₇、Fe₃Mo₃C、Fe₃W₃C、

由中强或强碳化物形成元素形成的碳化物。其共同特点是：熔点高、硬度高、稳定性高、很难溶入A中。

金属间化合物

FeS、FeCr、Ni₃Al、Ni₃Ti、Fe₂W

非金属夹杂物

Al₂O₃、AlN、SiO₂、TiO₂、MnS

游离态

如Pb、Cu等

（一）合金元素改善钢的热处理工艺性能

1. 细化奥氏体晶粒

除Mn外，所有合金元素都阻碍钢在加热时A晶粒的长大，尤其是Ti、V、Nb、Zr、Al等，可形成C、N化物，阻碍晶界迁移，细化晶粒。

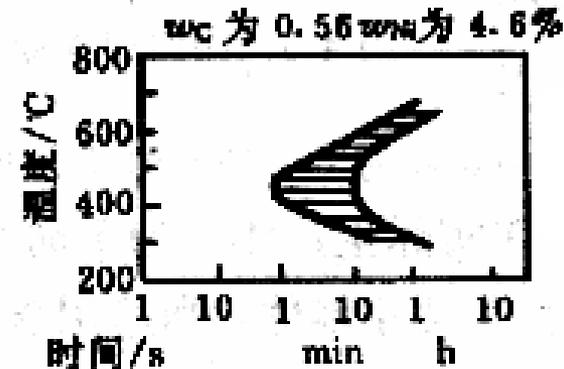
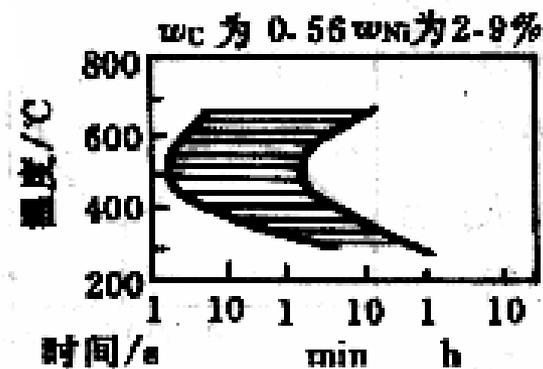
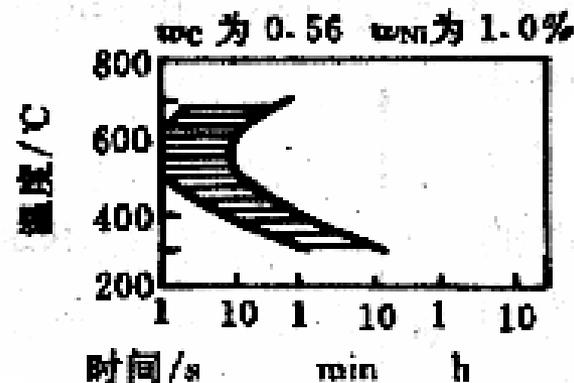
2. 提高淬透性

除Co外，固溶于A中的合金元素总是不同程度的增加A稳定性，延缓A的转变，使C曲线右移，淬透性提高。

合金钢可选择油淬，高合金钢甚至空冷即可获得M组织。

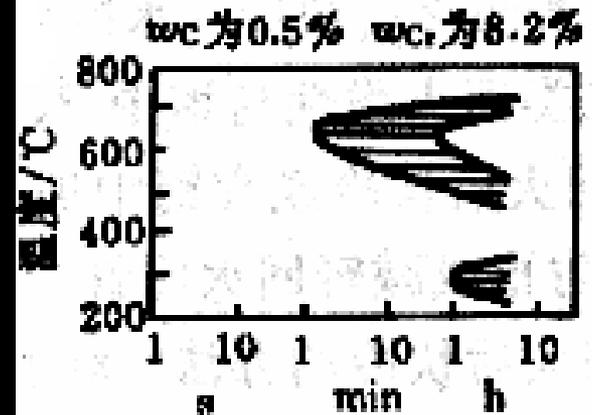
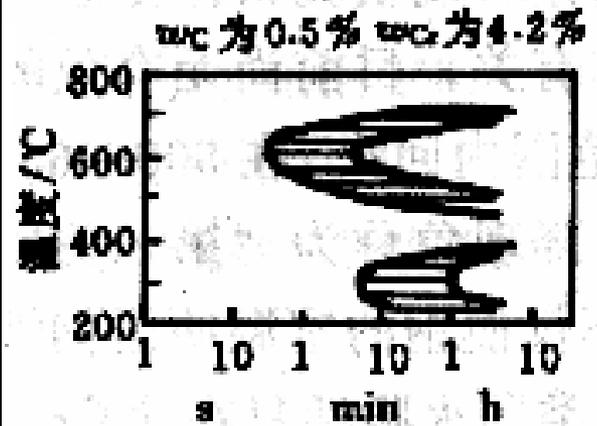
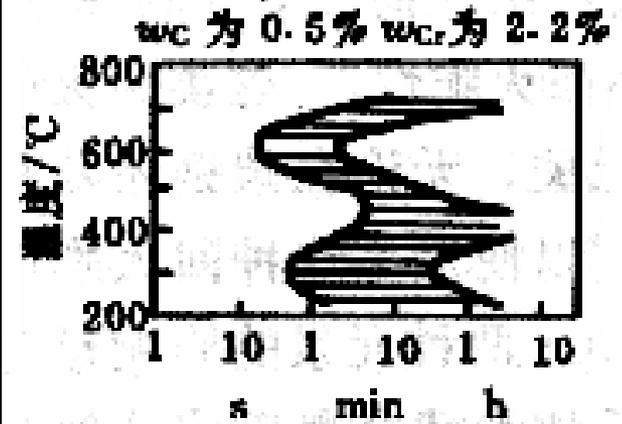
非碳化物形成
元素及Mn，使C曲
线右移。

Mn, Ni, Cu...



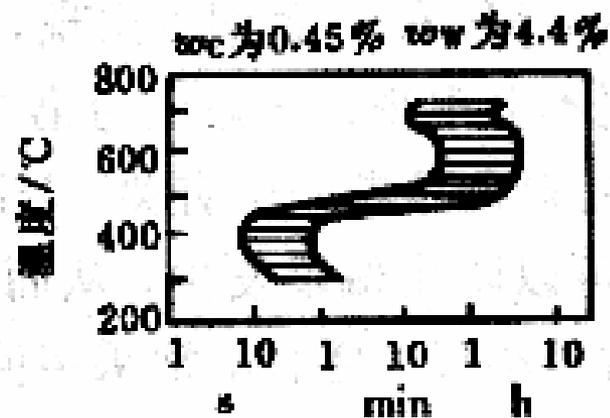
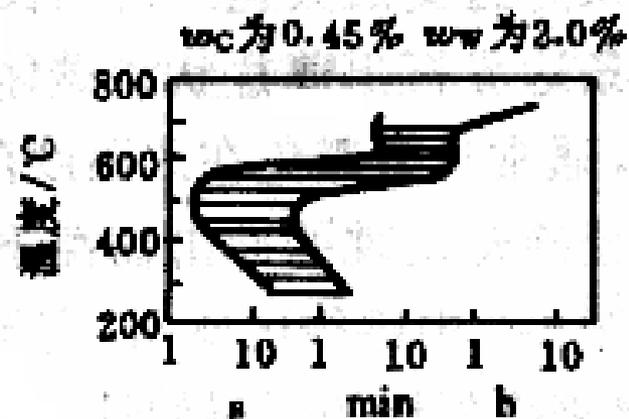
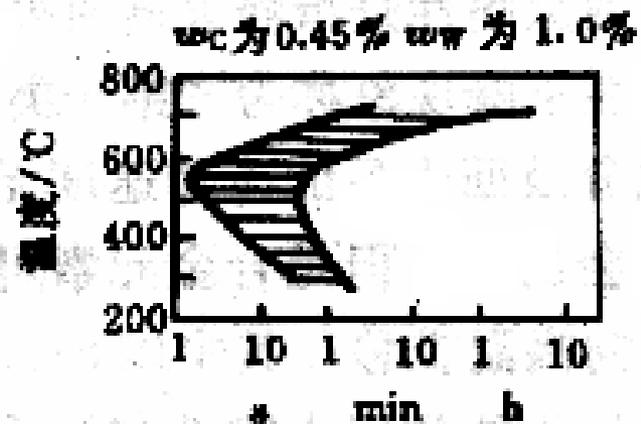
碳化物形成元素使C曲线右移，还改变C曲线形状。使P转变和B转变明显分开成两个转变图。

Cr使B转变图右移的作用大于使P转变右移的作用。



碳化物形成元素Mo、W等使P转变图右移的作用大于使B转变右移的作用。

空冷可获得B组织。



3. 提高回火抗力，产生二次硬化，防止第二类回火脆性

回火抗力是指淬火钢在回火过程中抵抗硬度下降的能力，又称回火稳定性。

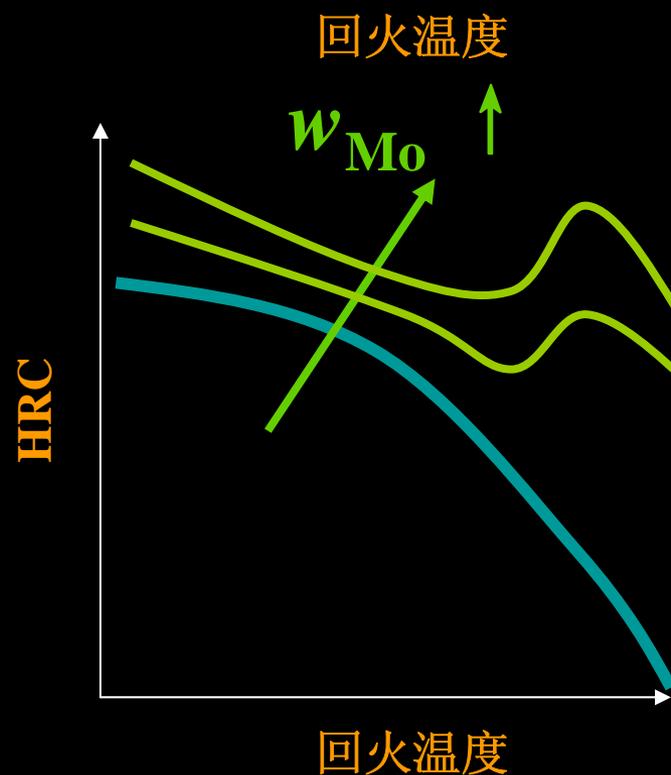
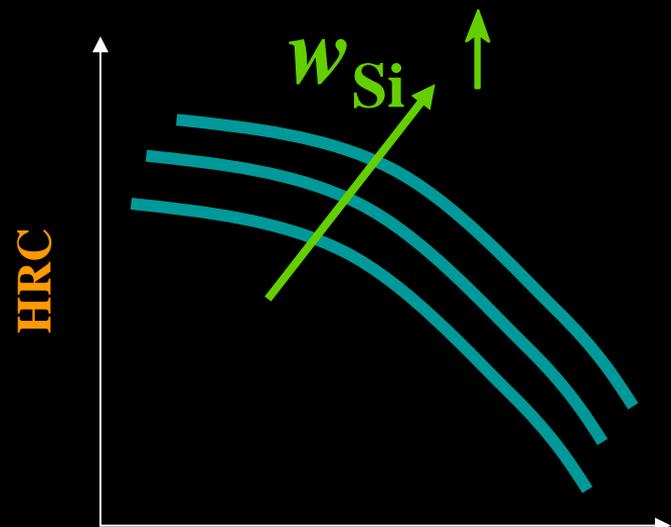
合金元素固溶于淬火M中可减慢碳的扩散，阻碍碳化物从过饱和固溶体中析出，推迟M的分解，延缓硬度下降，因此，合金钢具有较高的回火抗力。

在相同回火温度下，含碳量相同的合金钢的硬度较碳钢高。

在要求相同硬度条件下，合金钢的回火温度高，塑韧性好。

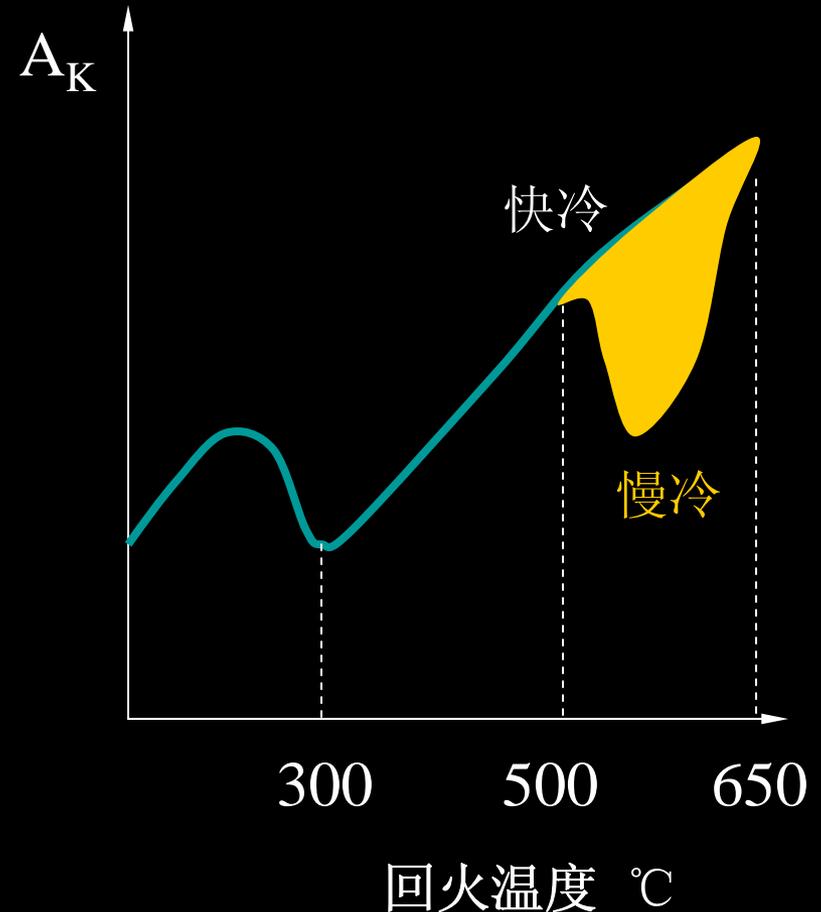
一些含Cr、W、Mo、V等合金元素较多的合金钢，在500~600℃范围内回火时，由于沉淀析出这些合金元素的碳化物并呈弥散状分布，因而对材料起到沉淀强化的作用。

淬火钢在较高温度回火时，硬度不降低反而升高的现象称为二次硬化。



淬火钢回火后的韧性下降现象称为回火脆性。

在250~400℃出现韧性下降，称**第一类回火脆性**；在500~600℃回火后缓慢冷却时韧性亦会下降，称**第二类回火脆性**。



产生回火脆性的原因

第一类回火脆性与M及残余A分解时沿M针条边界析出薄片状 Fe_3C 有关。目前尚无有效方法消除，只能尽量避开在此温度范围内回火。

第二类回火脆性，是因钢中的杂质S、P、Mn、Si在晶界上偏聚引起的。

防止第二类回火脆性的措施

- 对小型零件可采用回火后快冷的方法；
- 而对于大型零件则可在材料中加入Mo、W等，这些元素可阻止或延缓有害元素在晶界上的析出。

（二）合金元素提高钢的使用性能

1. 提高钢的强度

- 固溶强化
- 第二相强化
- 细晶强化

(1) 固溶强化

Ni、Si、Al、Co、Cu、Mn、Cr、Mo、W等合金元素固溶于F、A、M中引起晶格畸变，增加位错运动的阻力，产生强化。

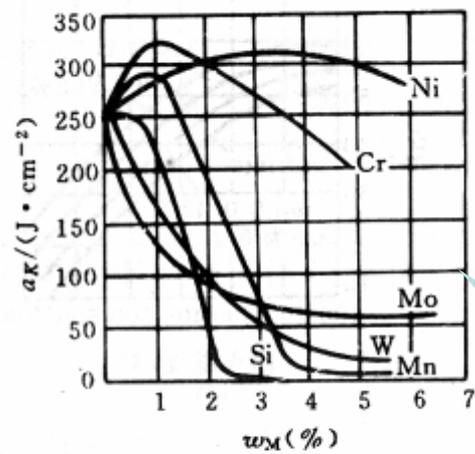
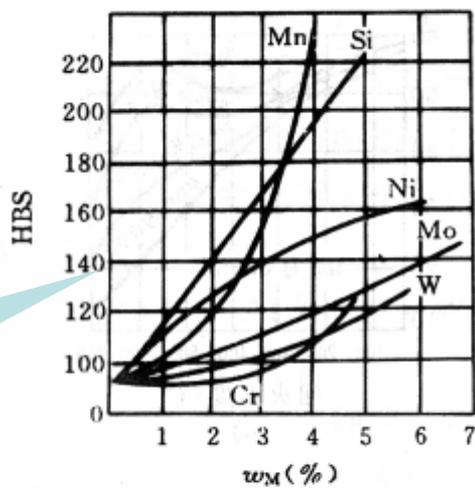


图 4-4 合金元素对铁素体硬度 a) 和冲击韧性 b) 的影响

硬度
提高

韧性
降低

(2) 第二相强化

Mn、Cr、Mo、W、V、Ti、Nb、Zr等合金元素在钢中能够形成各种碳化物—合金碳化物。

根据元素与碳亲和力的强弱，合金元素分为

强碳化物形成元素：V、Ti、Nb、Zr

弱碳化物形成元素：Mn

中强碳化物形成元素：Cr、Mo、W

合金碳化物

合金渗碳体

特殊碳化物

• 合金渗碳体

它是合金元素溶入渗碳体中并置换部分铁原子而形成的碳化物。



Me代表弱及中强碳化物形成元素Mn、Cr、Mo、W等合金元素。

合金渗碳体比一般渗碳体稳定，加热时难溶入A中，也不易聚集长大，可阻碍位错运动，从而提高钢的强、硬度，提高耐磨性。

一般低合金结构钢中主要的合金元素为：Mn、Cr、Mo等，故在此类钢中主要形成的是合金渗碳体。

- **特殊碳化物**

由中强或强碳化物形成元素形成的碳化物。

其共同特点是：熔点高、硬度高、稳定性高、很难溶入A中。

特殊碳化物的晶体结构与渗碳体不同，可分为

➤ 具有简单晶体结构的间隙化合物

WC、Mo₂C、VC、TiC

➤ 具有复杂晶体结构的碳化物

Cr₂₃C₆、Cr₇C₃、Fe₅W₃C

(3) 细晶强化

V、Ti、Nb、Zr、Al等合金元素可是显著细化A、F晶粒及M，提高钢的强度、硬度，并能提高钢塑性和韧性。

钢的其它强化手段，提高强度、硬度是以降低塑、韧性为代价的。

只有细晶强化既可以提高钢的强度和硬度，又能提高钢的塑性和韧性。

2. 使钢获得特殊性能

合金元素加入钢中后会改变相图，使钢在室温下得到单相组织，并可形成致密的氧化膜和金属间化合物，使钢获得耐蚀性及耐热性。

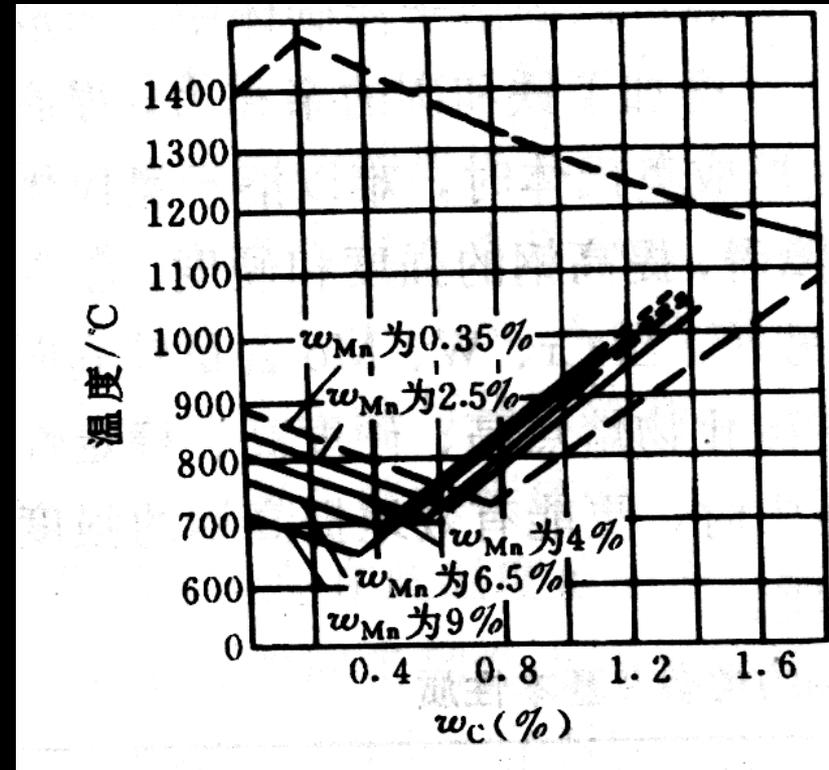
(1) 形成单相组织

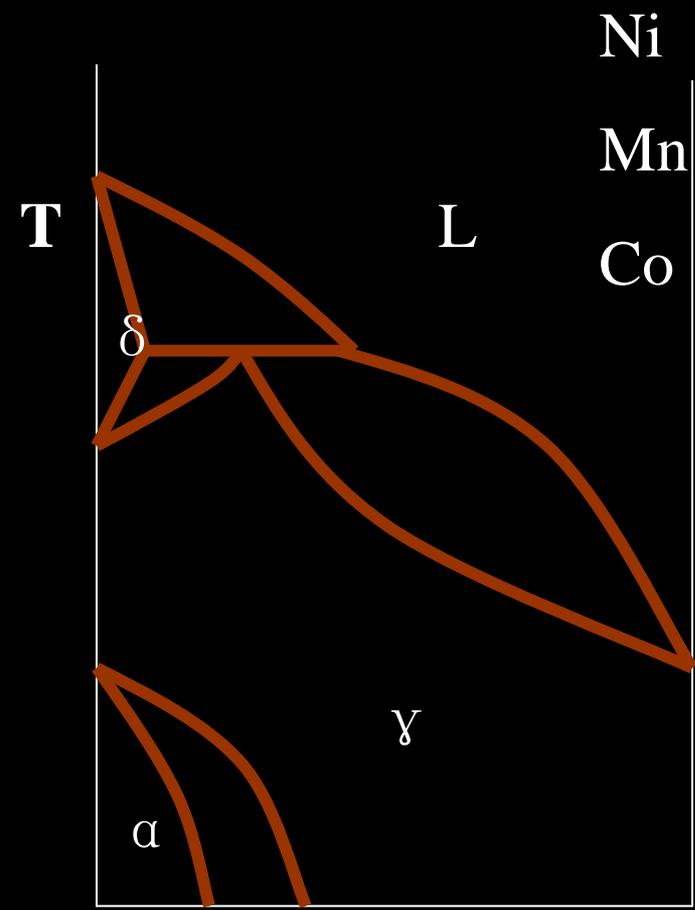
合金元素固溶于铁素体及奥氏体中，会改变

- 同素异构转变温度 A_4 、 A_3
- 共析温度 A_1
- 共析成分S
- 奥氏体中碳的最大溶解度点E

①扩大 γ 相区合金元素（A 稳定元素）

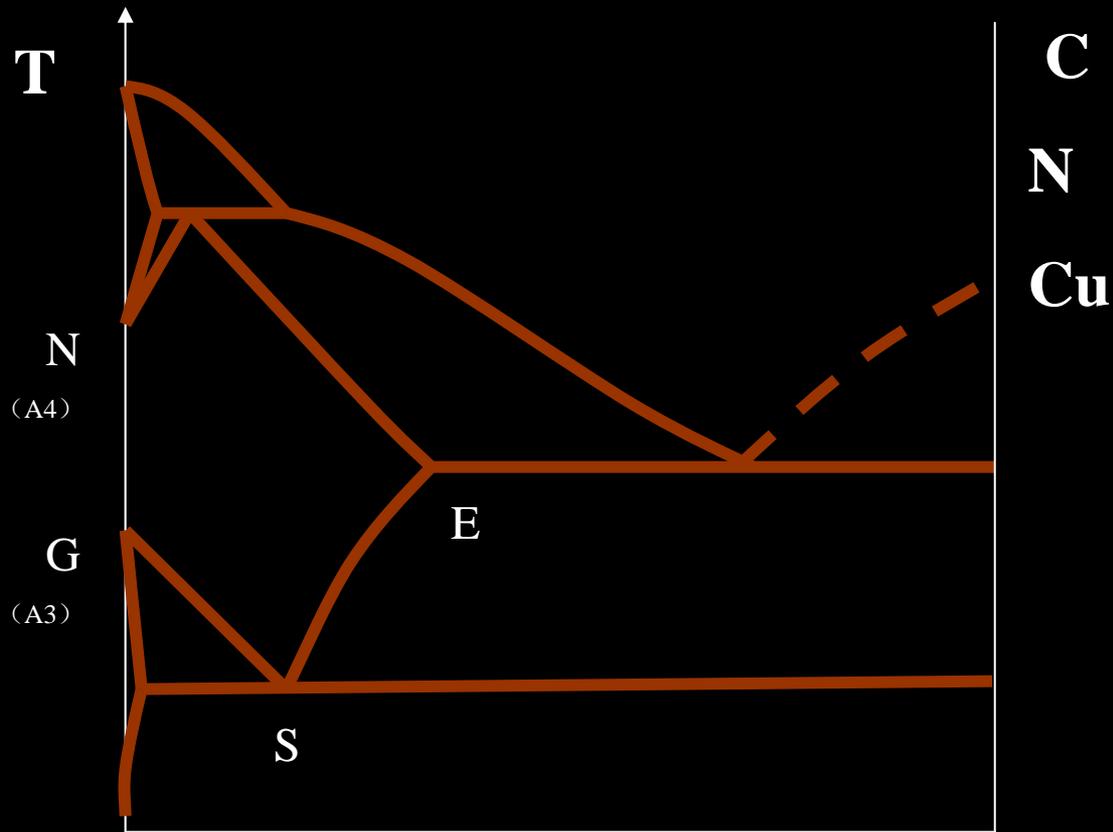
- ◆ 特点： $A_4 \uparrow$ 、 $A_3 \downarrow$ ， γ 相区扩大
- ◆ 扩大 γ 相区并与 γ -Fe形成无限固溶体的元素 Ni、Mn 等
- ◆ 部分扩大 γ 相区与 γ -Fe形成有限固溶体的元素 C、N、Cu 等。





$w_{Me} \%$

扩大 γ 相区并与 γ -Fe
形成无限固溶体

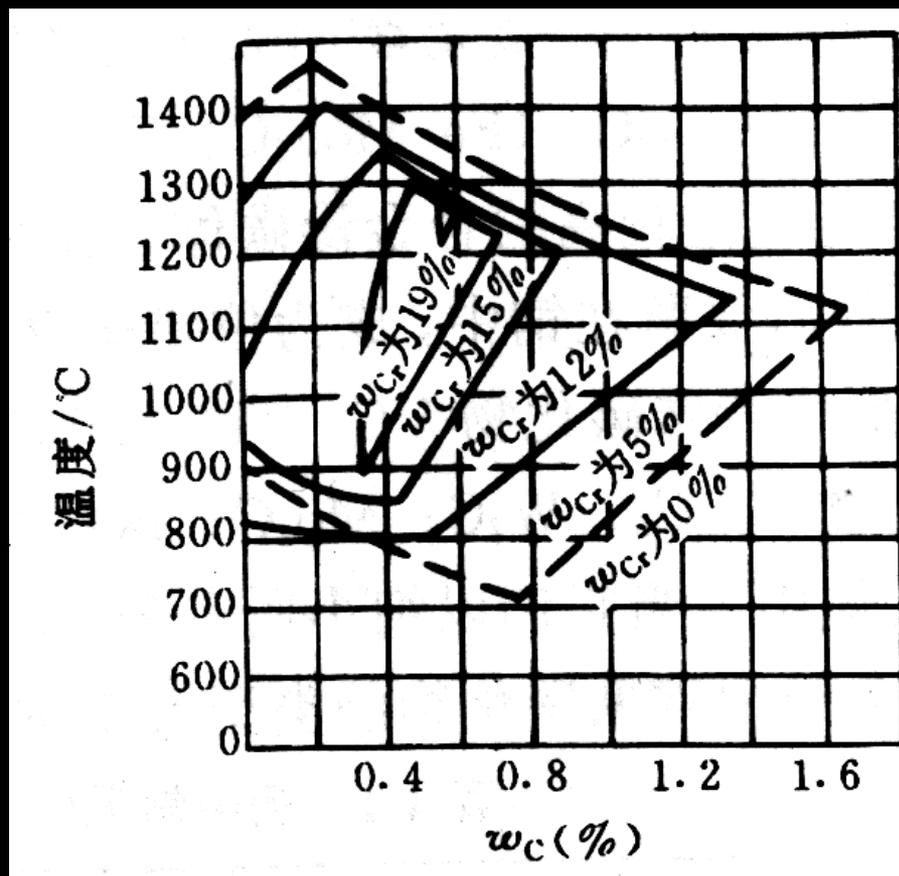


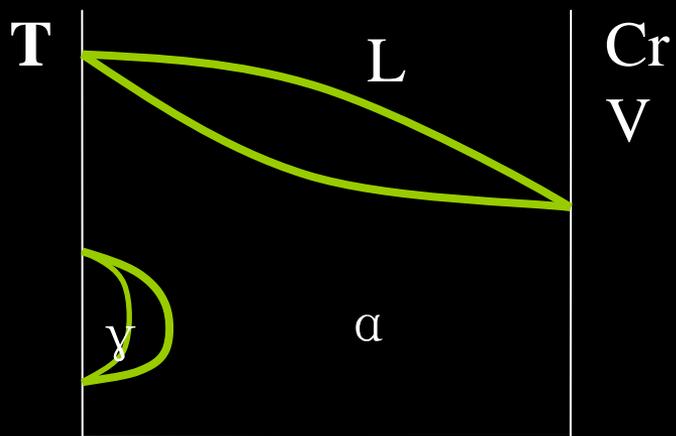
$w_{Me} \%$

部分扩大 γ 相区并与 γ -Fe
形成有限固溶体

② 缩小 γ 相区的元素（F 稳定元素）

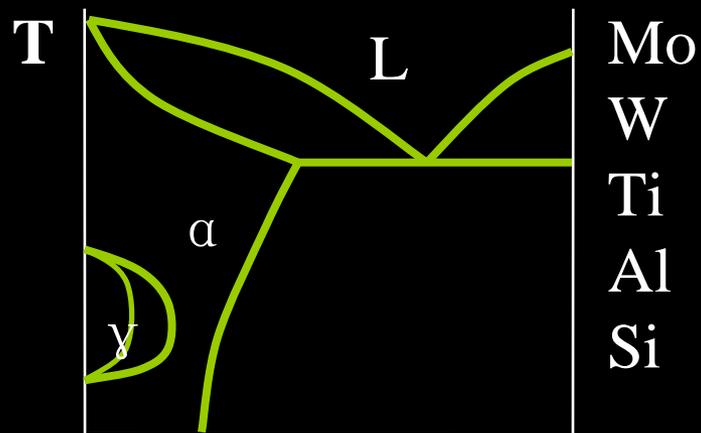
- ◆ 特点： $A_3 \uparrow$ 、 $A_4 \downarrow$ ， γ 相区缩小
- ◆ 缩小并完全封闭 γ 相区的元素 **Cr、V、Mo、W、Ti、Al、Si**等
- ◆ 仅使 γ 相区部分缩小而不闭的元素 **B、Nb、Ta、Zr**等。





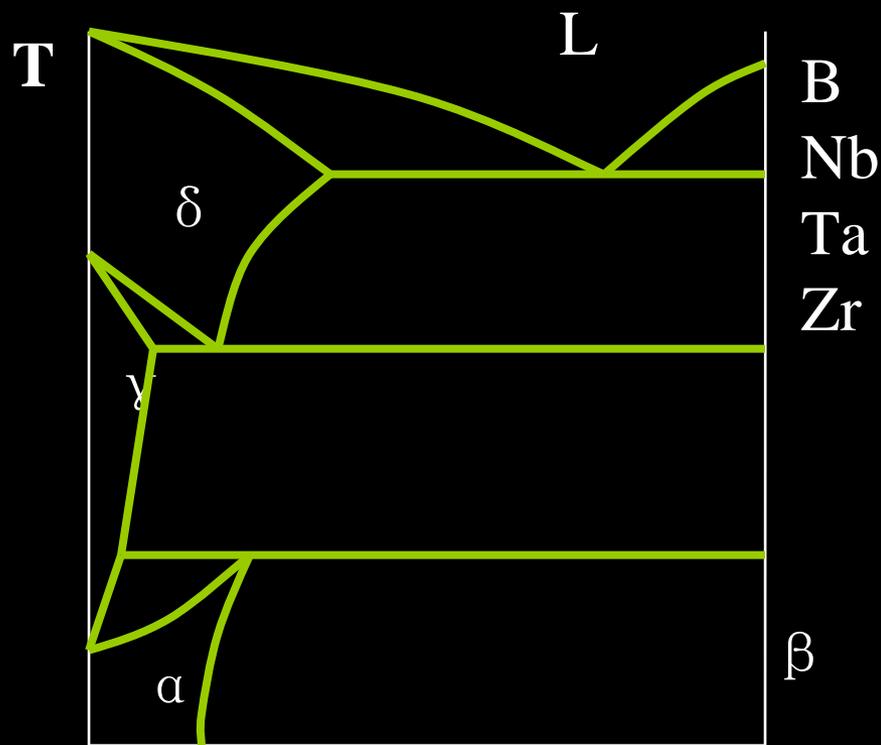
Fe $\xrightarrow{\text{Me}}$ Me

缩小并完全封闭 γ 区并与 α 形成无限固溶体



Fe $\xrightarrow{\text{Me}}$ Me

缩小并完全封闭 γ 区并与 α 形成有限固溶体



Fe $\xrightarrow{\text{Me}}$ Me

部分缩小 γ 区而不封闭

当钢中 $w_{\text{Ni}}=9\%$ ， $w_{\text{Mn}}=13\%$ 时，可使 A_3 降低至室温，此时钢在室温下为单相奥氏体组织，称为奥氏体钢。此类钢具有耐蚀、耐高温、抗磨损等特殊性能。

当钢中 $w_{\text{Cr}}=17\sim 28\%$ 时，可使奥氏体区消失，此时钢在室温下为单相铁素体组织，称为铁素体钢。此类钢也具有耐蚀、耐高温等特殊性能。

(2) 形成致密氧化膜或金属间化合物

合金元素Si、Cr、Al、Ni、W、Mo、Ti等加入钢中后，会形成

- ◆ 致密氧化膜 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 等
- ◆ 金属间化合物 FeSi 、 FeCr 、 Ni_3Al 、 Ni_3Ti 、 Fe_2W 、 Fe_2Mo 等

- 致密的氧化膜覆盖在钢的表面上，可提高钢的耐蚀性和高温抗氧化性；
- 金属间化合物可阻碍位错在高温下的运动，提高钢的蠕变抗力，及高温强度。

合金元素在钢中作用

细化 Δ 晶粒

Ti、V、Nb、Zr、Al

提高淬透性

除Co以外，如Mn、Cr、W、Mo

提高回火抗力

Cr、W、Mo、V

固溶强化

Ni、Si、Al、Co、Cu、Mn、Cr、Mo、W

第二相强化

Mn、Cr、Mo、W

扩大 Δ 相

Ni、Mn、Cu、N

扩大F相

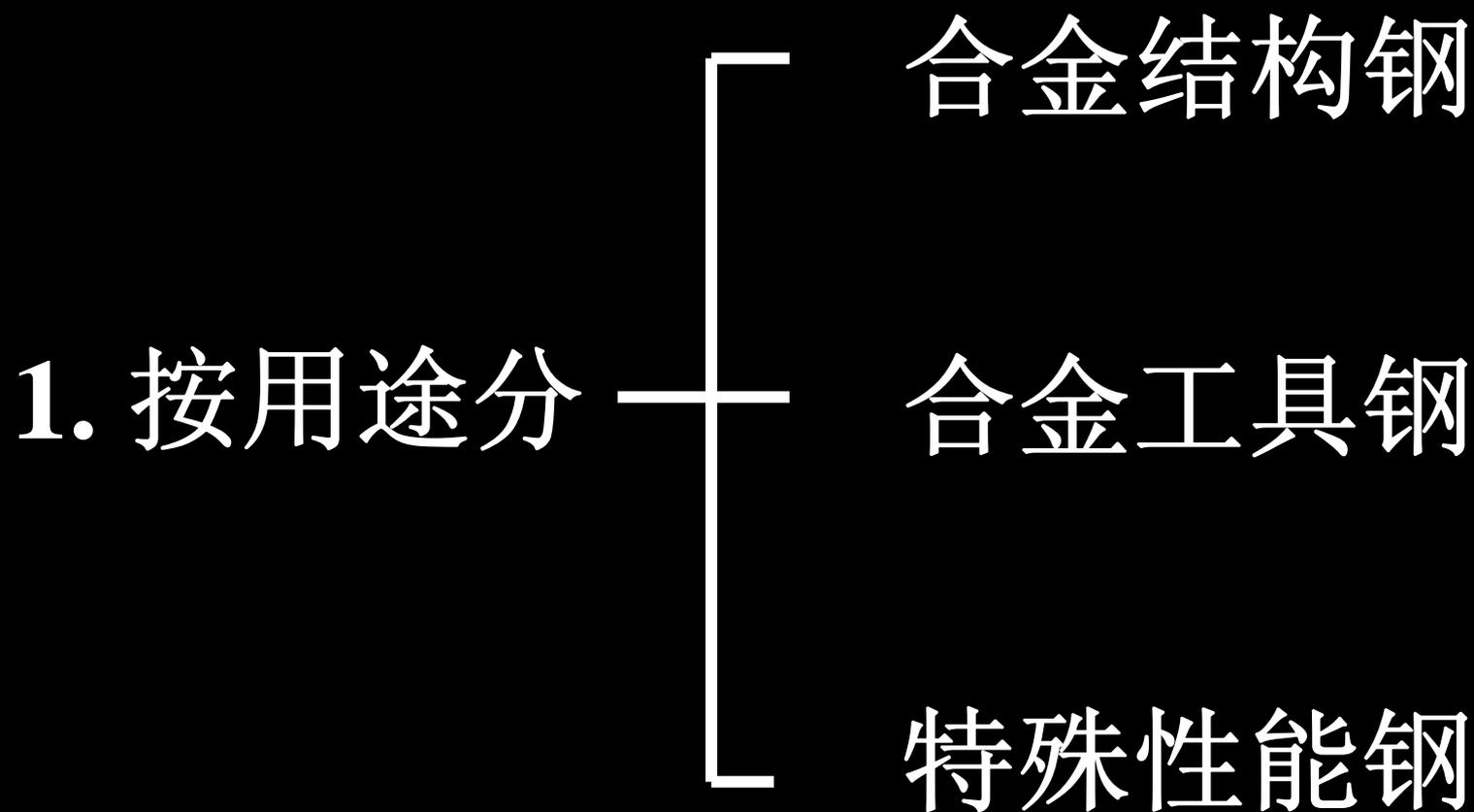
Si、Cr、W、Mo、V、Ti、Al

形成致密氧化膜

Si、Al、Ni、Cr、W、Mo、Ti

二、合金钢的分类及牌号

(一) 分类



2. 按化学成分分类

1) 按合金元素种类分为

铬钢、锰钢、硅锰钢、铬锰硅钢、铬镍钢、
铬镍钼钢等；

2) 按合金元素含量分为：

低合金钢 $\Sigma Me \leq 5\%$

中合金钢 $5\% < \Sigma Me \leq 10\%$

高合金钢 $\Sigma Me > 10\%$

3) 按质量分

普通钢 $w_S \leq 0.050\%$, $w_P \leq 0.055\%$

优质钢 $w_S \leq 0.040\%$, $w_P \leq 0.040\%$

高级优质钢 $w_S \leq 0.030\%$, $w_P \leq 0.035\%$

4) 按金相组织分

珠光体钢 (包括S、T钢)

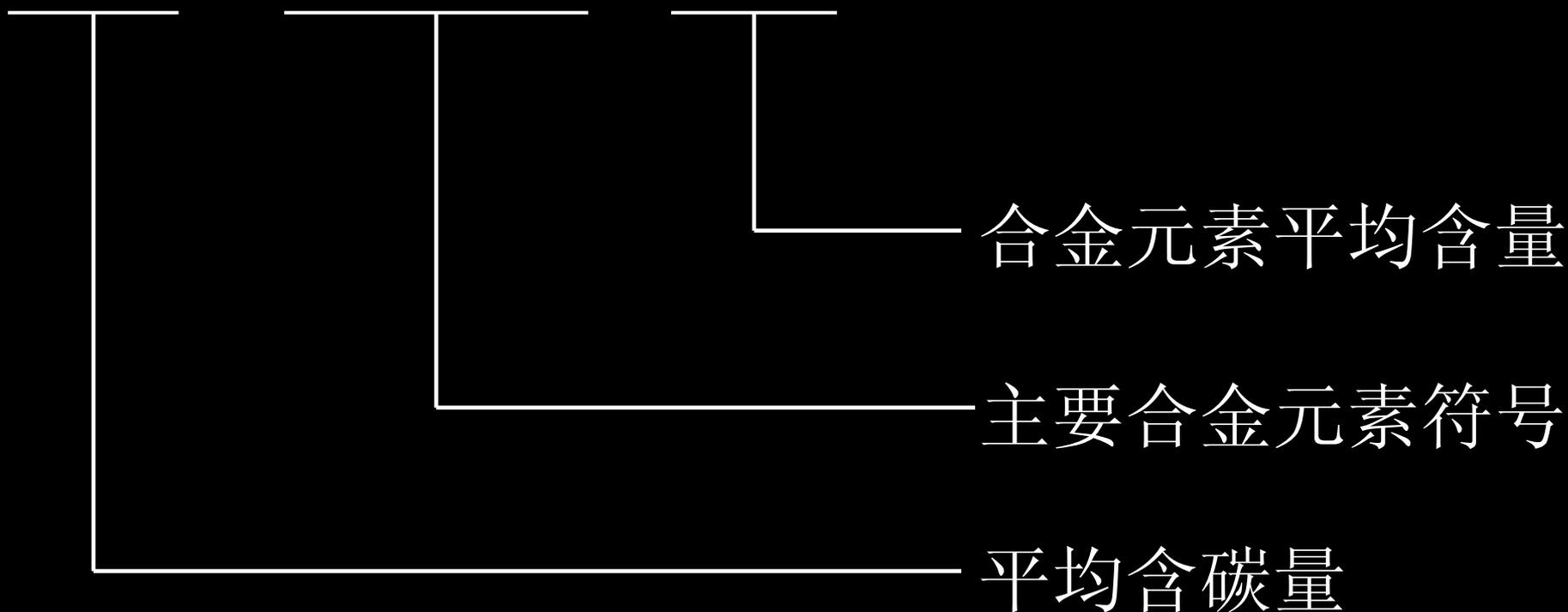
贝氏体钢

马氏体钢

奥氏体钢

(二) 编号

数字 + 化学元素 + 数字



1、含碳量的标记

结构钢： $w_C \times 10,000$

工具钢： $w_C \times 1,000$ ，为了避免与结构钢混淆，又规定 $w_C \geq 1.0\%$ 时不予以标注，高速钢例外，其 $w_C < 1.0\%$ 也不标注。

特殊性能钢： $w_C \times 1,000$

$w_C = 0.08 \sim 0.1\%$ ，标 1

$w_C = 0.03 \sim 0.08\%$ ，标 0

$w_C < 0.03\%$ ，标 00

2、合金元素含量的标记

$w_{Me} \%$	<1.5	≥ 1.5	≥ 2.5	≥ 3.5	≥ 4.5
标记	-	2	3	4	5

注：滚动轴承钢铬的标记除外($w_{Cr} \times 1,000$)

3、附加标记

高级优质钢：编号后+“A”（高）

特殊用途钢：编号前+“特殊用途符号”

G—滚动轴承钢； C—磁钢；

Y—易切削钢

40CrNiMo w_C 0.4%的CrNiMo合金结构钢

30CrMnSiNi2 w_C 0.3%, w_{Ni} 2%的合金结构钢

30CrMnSiA w_C 0.3%的高级优质合金结构钢

GCr15 w_{Cr} 1.5%的滚动轴承钢

0Cr13 w_C 0.03%, w_{Cr} 13%的M不锈钢

1Cr17 w_C 0.08%, w_{Cr} 17%的F不锈钢

0Cr18Ni9 w_C 0.03%, w_{Cr} 18%, w_{Ni} 9%的A不锈钢

W18Cr4V w_W 18%, w_{Cr} 4%的高速钢

要点总结

熟悉 合金元素在钢中存在的形式和作用

掌握 第一第二类回火脆性

了解 合金结构钢的牌号及特点

合金元素在钢中的存在形式

固熔体

固溶于F、A、M中

Ni、Si、Co、Mn、Cr、Mo、W

化合物

碳化物

合金渗碳体

特殊碳化物

金属间化合物

非金属夹杂物

游离态

如Pb、Cu等

合金元素在钢中作用

细化 α 晶粒

Ti、V、Nb、Zr、Al

提高淬透性

除Co以外，如Mn、Cr、W、Mo

提高回火抗力

Cr、W、Mo、V

固溶强化

Ni、Si、Al、Co、Cu、Mn、Cr、Mo、W

第二相强化

Mn、Cr、Mo、W

扩大 α 相

Ni、Mn、Cu、N

扩大F相

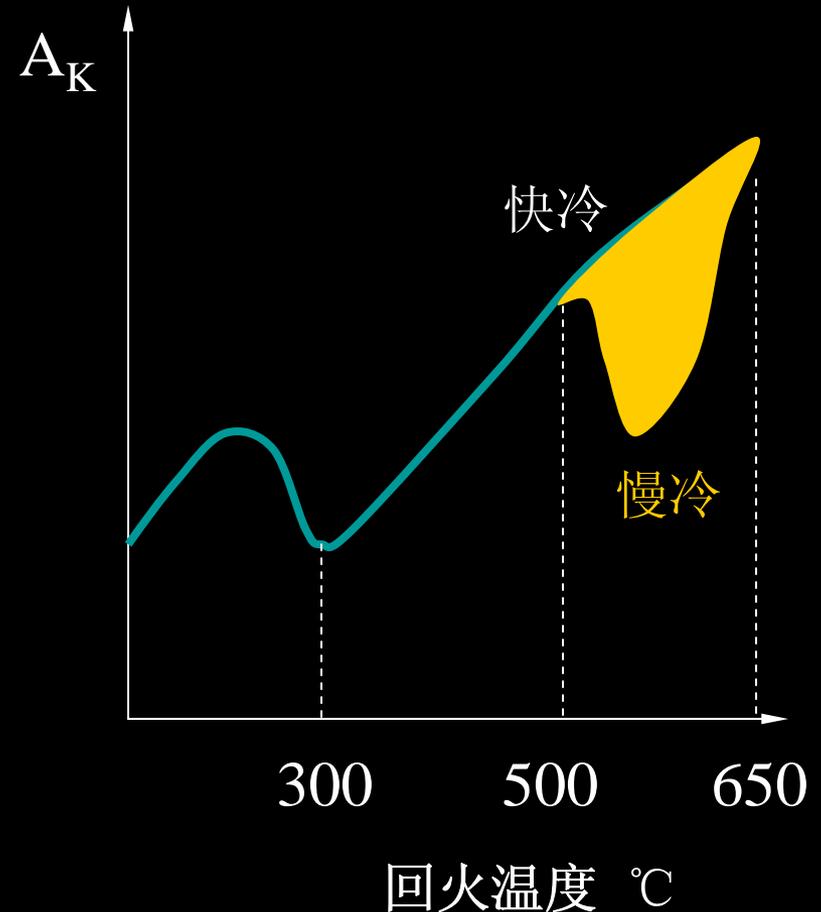
Si、Cr、W、Mo、V、Ti、Al

形成致密氧化膜

Si、Al、Ni、Cr、W、Mo、Ti

淬火钢回火后的韧性下降现象称为回火脆性。

在250~400℃出现韧性下降，称**第一类回火脆性**；在500~600℃回火后缓慢冷却时韧性亦会下降，称**第二类回火脆性**。



第一类回火脆性的防止

一般认为，低温回火脆性是由于M分解时沿M板条或片的界面析出断续的薄壳状碳化物，降低了晶界的断裂强度，使之成为裂纹扩展的途径，因而导致脆性断裂。

避免在**250°C ~ 400°C**回火

第二类回火脆性

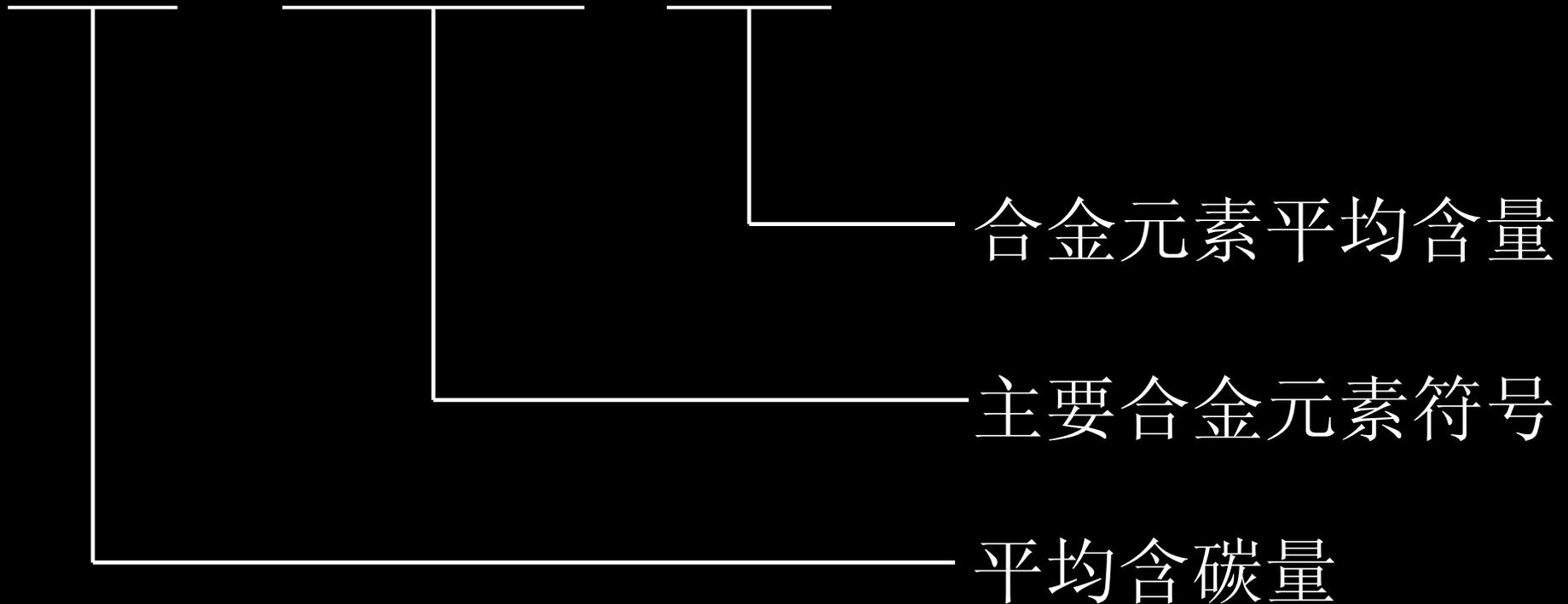
➤ 第二类回火脆性，在回火过程中**Sb**、**P**、**Sn**在A晶界偏聚而引起的脆化现象。

①加入**W**、**Mo**等能强烈阻止或延缓杂质元素在A晶界的偏聚。

② **450°C ~ 650°C**回火快冷

(二) 编号

数字 + 化学元素 + 数字



1、含碳量的标记

结构钢： $w_C \times 10,000$

工具钢： $w_C \times 1,000$ ，为了避免与结构钢混淆，又规定 $w_C \geq 1.0\%$ 时不予以标注，高速钢例外，其 $w_C < 1.0\%$ 也不标注。

特殊性能钢： $w_C \times 1,000$

$w_C = 0.08 \sim 0.1\%$ ，标 1

$w_C = 0.03 \sim 0.08\%$ ，标 0

$w_C < 0.03\%$ ，标 00

2、合金元素含量的标记

$w_{Me} \%$	<1.5	≥ 1.5	≥ 2.5	≥ 3.5	≥ 4.5
标记	-	2	3	4	5

注：滚动轴承钢铬的标记除外($w_{Cr} \times 1,000$)

3、附加标记

高级优质钢：编号后+“A”（高）

特殊用途钢：编号前+“特殊用途符号”

G—滚动轴承钢； C—磁钢；

Y—易切削钢

40CrNiMo w_C 0.4%的CrNiMo合金结构钢

30CrMnSiNi2 w_C 0.3%, w_{Ni} 2%的合金结构钢

30CrMnSiA w_C 0.3%的高级优质合金结构钢

GCr15 w_{Cr} 1.5%的滚动轴承钢

0Cr13 w_C 0.03%, w_{Cr} 13%的M不锈钢

1Cr17 w_C 0.08%, w_{Cr} 17%的F不锈钢

0Cr18Ni9 w_C 0.03%, w_{Cr} 18%, w_{Ni} 9%的A不锈钢

W18Cr4V w_W 18%, w_{Cr} 4%的高速钢

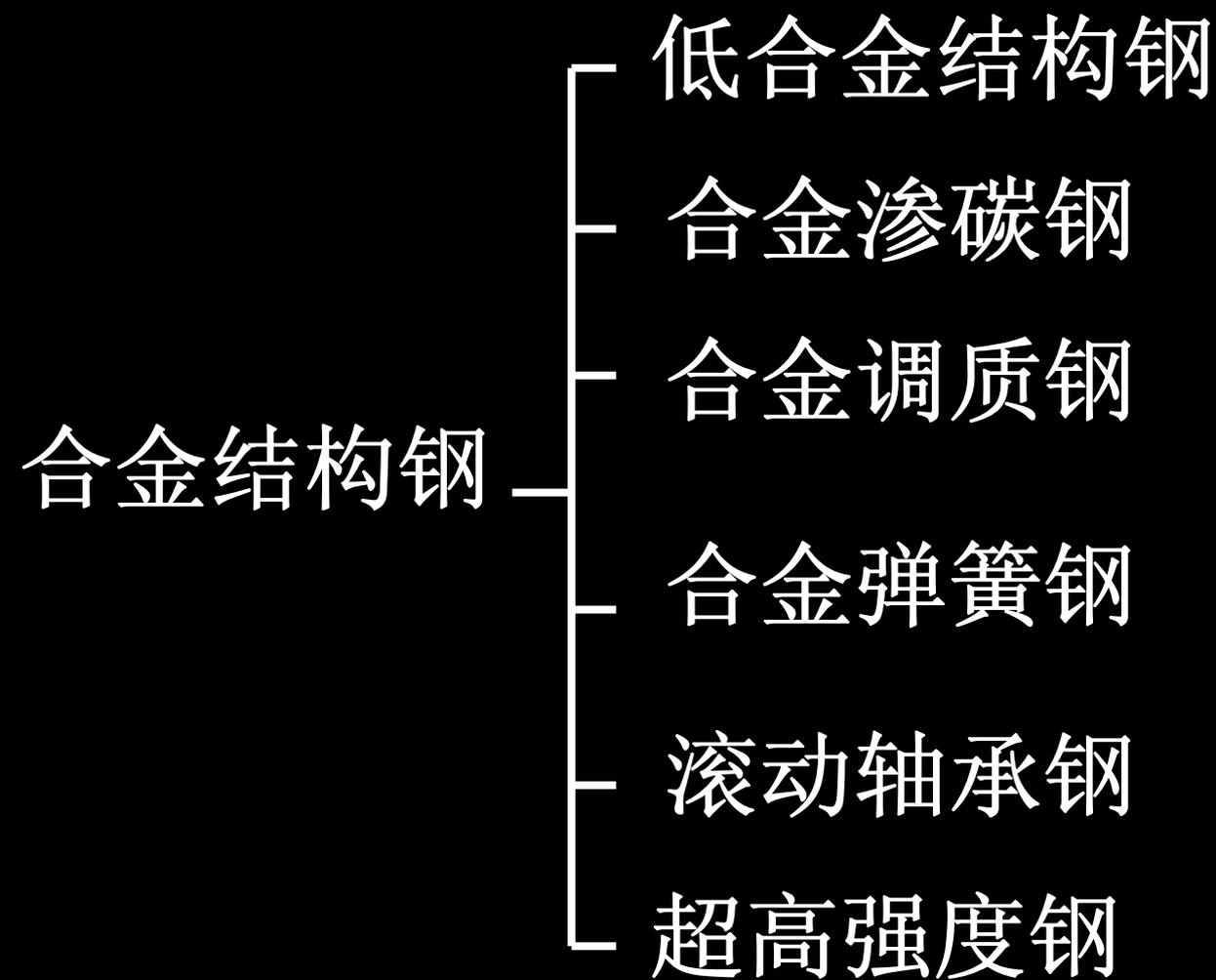
合金钢

合金结构钢

合金工具钢

特殊性能钢

4.2 合金结构钢



一、低合金高强度结构钢

简称低合金高强钢 (**high strength low alloy steel, HSLA steel**), 广泛用于制造在大气和海洋工作的大型焊接结构件, 如建筑结构、桥梁、车辆、船舶、输油气管、压力容器等。

(一) 成分及性能特点

- 成分： $w_C \leq 0.2\%$, $w_{Me} \leq 3\%$
- 常加的合金元素： Mn、Ti、V、Nb、RE
- 作用： 强化F， 细化晶粒， 提高钢的强度。
- 性能： 塑韧性好， 有良好的焊接性及冷加工成形性能。

(二) 典型牌号

Q295: 09MnV、09MnNb、
09Mn2、12Mn

Q345: 12MnV、14MnNb、
16Mn、16MnRE、18Nb

Q390: 15MnV、15MnTi、
16MnNb

通常在热轧后空冷，
或在正火状态下供货。

组织：F+P

16Mn是我国开发最早
使用最多的一种低合金高强
钢。 σ_s 可达350MPa。

二、合金渗碳钢

经过渗碳热处理后使用的低碳合金钢。

工作环境：主要用于制造在摩擦力、交变接触应力和冲击条件下工作的零件，如齿轮。

性能要求：表面要求高的硬度和耐磨性及高的接触疲劳强度，心部则要求良好的韧性。

(一) 成分及性能特点

低碳 $w_c=0.10\sim 0.25\%$ ，保证零件心部足够的韧性。

加Cr、Ni、Mn、B，↑钢的淬透性，并改善心部的组织及性能。

加微量V、Ti、W、Mo，形成特殊碳化物，阻止A↑。

(二) 典型牌号

低淬透性合金渗碳钢

20Mn2、20MnV;

中淬透性合金渗碳钢

20CrMn、20CrMnTi;

高淬透性合金渗碳钢

18Cr2Ni4WA

热处理特点:

渗C+淬火+低温回火

组织:

表层 合金渗C体+回火M(高C)+少量A'

心部 { 低碳回火M
T(或低碳回火M)+少量F

三、合金调质钢

经过**调质**处理（淬火+高温回火）后使用的中碳合金结构钢。

主要用于制造受力复杂、要求综合力学性能的重要零件如精密机床的主轴、发动机的曲轴等等。

(一) 成分及性能特点

- 中碳 $w_C=0.25\sim 0.5\%$
- 中合金 Mn, Cr, Si, Ni, B $w_{Me}=3\sim 7\%$
- 有时加微量V, 以细化晶粒
- 高级优质 $w_{S,P}\leq 0.025\%$
- 回火脆性小 W、Mo
- $\sigma_s > 800\text{MPa}$, $\sigma_b > 980\text{MPa}$, $\delta > 10\%$,
 $\Psi > 45\%$, $a_k > 50\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$

(二) 典型牌号

低淬透性合金调质钢

40Cr、40MnB

中淬透性合金调质钢

35CrMo、38CrSi

高淬透性合金调质钢

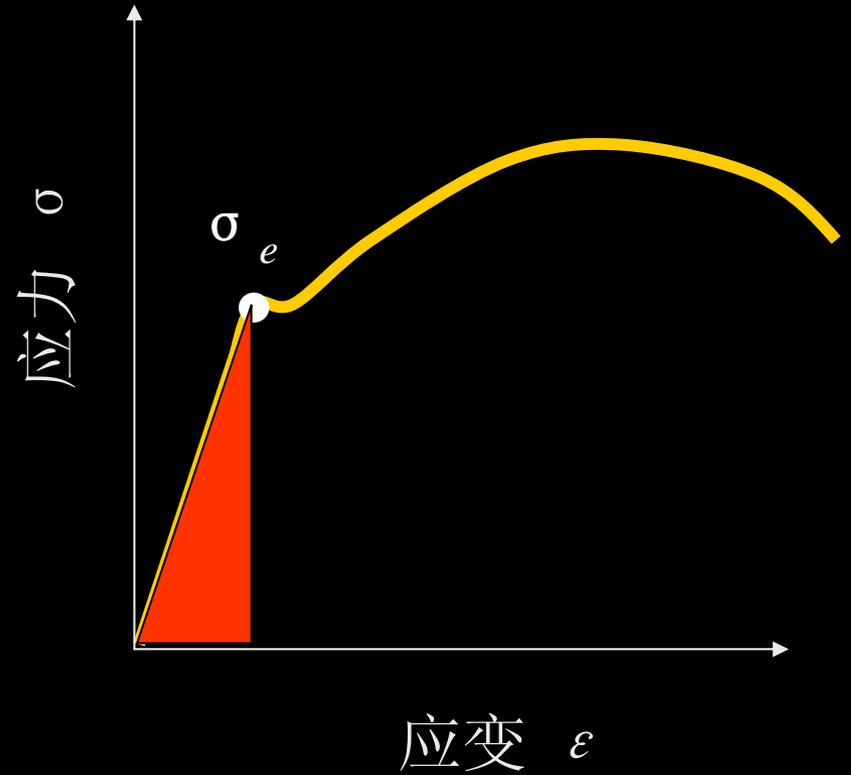
38CrMoAl、40CrNiMoA

四、合金弹簧钢

是用来制造弹簧和其它弹性零件的钢种。如拖拉机和火车上的板弹簧和螺旋弹簧。

弹性比功是关键。

$$\text{弹性比功} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E}$$



(一) 成分及性能特点

- 中高碳 $w_c=0.45\sim 0.70\%$ ，含C量比合金调质钢高，保证高强度和高弹性极限。
- 加Si、Mn、Cr、V、Nb、Mo、W，以提高钢的淬透性和回火抗力，强化铁素体
- 加Mo、W、V、Nb，以降低因Si的加入造成的脱C敏感性

(二) 典型牌号

- **60Si2Mn**

含Si、Mn元素的合金弹簧钢，用于制造截面尺寸 $\leq 25\text{mm}$ 的弹簧，如汽车脱拉机的板弹簧

- **50CrVA**

含Cr、V元素的合金弹簧钢，用于截面 $\leq 30\text{mm}$ 并在 $350\sim 400^\circ\text{C}$ 工作的重载弹簧，如阀门弹簧

热处理： 淬火+中温回火

组织： 回火T

五、滚动轴承钢

用于制造滚动轴承的滚珠、滚柱和套圈等钢种。也可以用于制作精密量具、冷冲模、机床丝杠及柴油机油泵的精密件如阀体、柱塞、柱塞套。

要求具有高的接触疲劳强度，高而均匀的耐磨性及一定的韧性和耐腐蚀性能。

(一) 成分及性能特点

高碳 $w_C=0.95\sim 1.1\%$

传统轴承钢是高C低Cr钢，可以保证钢有高的硬度和强度。 $w_{Cr}=0.35\% \sim 1.95\%$ ，提高钢的淬透性，并形成合金渗碳体，使钢具有高的接触疲劳强度和耐磨性。

对于大型轴承用钢加Si、Mn、Mo可进一步提高淬透性、强度和弹性极限。

轴承钢要求纯度高， $w_S<0.020\%$ ， $w_P<0.027\%$

(二) 典型牌号

- 含Cr轴承钢

GCr9、GCr15、GCr9SiMn、
GCr15SiMn

- 无Cr轴承钢，性能和GCr 15相当
GMnMoVRe、GSiMoMnV

热处理： 淬火+低温回火

组织： 回火M



材料：GCr15钢

状态：850加热淬油，200回火

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：回火马氏体+碳化物+残余奥氏体



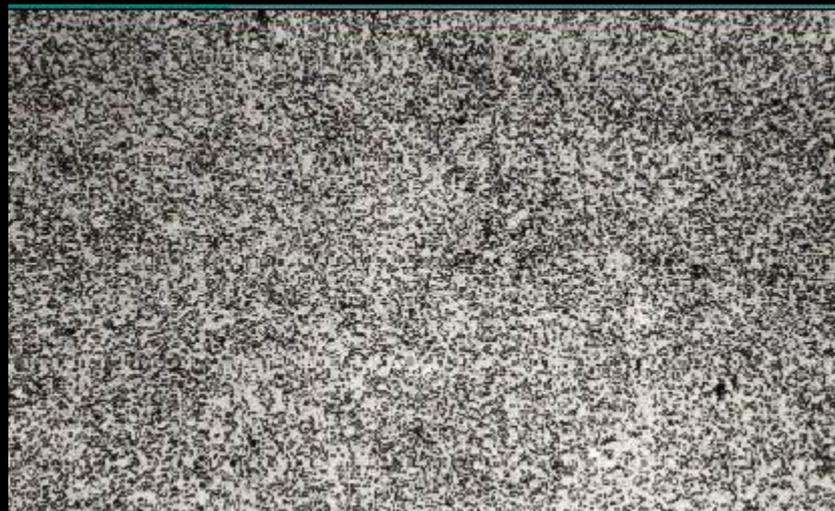
材料：GCr15钢

状态：960加热淬油

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：冷却不足组织，马氏体+粒状碳化物+残余奥氏体+淬火屈氏体（沿晶界析出的黑色团状物）



材料：GCr15钢

状态：球化退火温度偏低

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：细片珠光体与少量球状珠光体



材料：GCr15钢

状态：球化退火温度偏高

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500 X

组织：粗片珠光体与少量球状珠光体



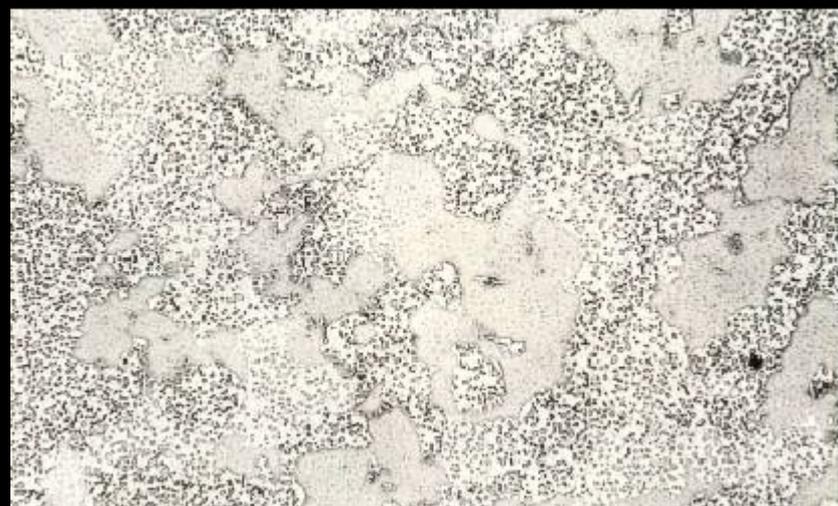
材料: GCr15钢

状态: 950加热淬油

侵蚀: 4%硝酸酒精

倍数: 500 X

组织: 过热组织, 粗大片状马氏体+大量残余奥氏体+少量碳化物



材料: GCr15钢

状态: 760加热淬火

侵蚀: 4%硝酸酒精

倍数: 500 X

组织: 奥氏体化不完全, 原始球状珠光体区上存在尚(亮区), 马氏体+残余奥氏体+碳化物+原始球状珠光

六、超高强度钢

工程上把抗拉强度 $> 1500\text{MPa}$ 以上的钢称为超高强度钢。主要用于制造飞机起落架、机翼大梁，火箭发动机壳体、液体燃料氧化剂储藏箱、炮筒、枪筒、防弹板等等。

(一) 成分及性能特点

- $w_C=0.03\% \sim 0.45\%$ ，含C范围宽。
- 按少量多元的原则加入合金元素：
Cr、Mn、Ni、Si、Mo、V、Nb、Ti、Al

Cr、Mn、Ni、Si ↑ 钢的淬透性；
Mo、V、Nb、Ti、Al 形成特殊碳化物使钢产生二次硬化，
V、Nb、Ti 有细化晶粒的作用

分类

低合金超高强度钢

$$w_{\text{Me}} \leq 5\%$$

中合金超高强度钢

$$5 < w_{\text{Me}} < 10\%$$

高合金超高强度钢

$$w_{\text{Me}} \geq 10\%$$

4.3 合金工具钢

工具钢是用于制造

刀具、模具、量具

的钢种。

一、工具的服役条件

(一) 刀具

刀具是用来进行切削加工的工具，其服役条件是：

- 摩擦导致严重磨损，伴随高温
- 大的切削力导致刃部崩缺
- 振动，冲击使刀具发生断裂

(二) 模具

- 冷作模具
室温金属变形的模具
- 热作 模具
热态金属变形的模具
- 可能的失效
磨损，刃口钝化，塌陷，沟槽，热疲劳，断裂。

(三) 量具

- 磨损
- 碰撞
- 变形

对工具钢的要求

- (1) 高的硬度
- (2) 耐磨损
- (3) 足够的韧性
- (4) 抗热脆性
- (5) 耐热疲劳性

二、常用合金工具钢及其热处理

合金工具钢

高碳低合金
工具钢

高碳高合金
工具钢

中碳合金
工具钢

(一) 高碳低合金工具钢

1. 成分及性能特点

$w_c=0.85\% \sim 1.1\%$, $w_{Me} \leq 5\%$

加Si、Mn、Cr、W、V等，Si、Mn、Cr是提高钢的淬透性和回火抗力、固溶强化M，从而提高强度。W、V是形成特殊化合物，细晶提高韧性。

2. 典型牌号

**9Mn2V、
9SiCr、
Cr2、
CrWMn等**

主要用于制造低速和中速切削刀具，中等负荷的冷变形模具及量具



材料: 9SiCr

状态: 850°C加热淬油, 200°C回火

侵蚀: 4%硝酸酒精

倍数: 500 X

组织: 回火马氏体+碳化物



材料: 9SiCr

状态: 完全退火

侵蚀: 4%硝酸酒精

倍数: 250 X

组织: 片状珠光体+二次碳化物(断续网状)

3. 热处理工艺

预先热处理
球化退火

获得颗粒状碳化物
改善切削加工性能

最终热处理
淬火+低温回火
冷处理和时效处理

回火后的组织：
细针状回火M+
细颗粒状碳化物+
少量残余A

(二) 高碳高合金工具钢

虽然低碳低合金工具钢的淬透性、回火抗力及耐磨性比碳素工具钢好，但是回火温度高于**300℃**时，其硬度变急剧下降不能适合高温的要求。

1. 成分及性能特点

$w_c = 0.70\% \sim 2.3\%$,

$w_{Me} > 10\%$

具有优良的淬硬性、回火
抗力、红硬性和耐磨性

2. 典型分类

高速钢 用于制造高速切削刀具的钢种有钨系、钼系、钒系等。

高铬钢 用于制造承受重载荷、形状复杂，要求变形小、耐磨性高、红硬性好的模具材料。典型有Cr12和Cr12MoV

① 高速钢

a) 成分

高碳和大量的碳化物形成元素

$$w_{\text{C}} = 0.70 \sim 1.5\% \quad w_{\text{Cr}} = 3.8 \sim 4.0\%$$

$$w_{\text{W}} = 6.0 \sim 19.0\% \quad w_{\text{Mo}} = 0 \sim 6.0\%$$

$$w_{\text{V}} = 1.0 \sim 5.0\%$$

b) 性能

Cr_{23}C_6 、 W_2C 、 Mo_2C 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 、
 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ 、 VC

保证钢的高硬度，高耐磨性，红硬性。

Cr提高钢的淬透性，回火抗力，抗氧化，抗脱碳，抗腐蚀能力。

W和**Mo**提高钢的淬透性，回火抗力，热硬性， W_2C 、 Mo_2C 可以在 $500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 产生二次硬化。

c) 锻造工艺

在制造工具前必须进行锻造使粗大的碳化物成小颗粒均匀分布以提高钢的强度，塑性和韧性。

d) 热处理工艺

预先热处理
球化退火

进一步细化碳化物
降低硬度
改善切削加工性能
组织为：
S+细粒状碳化物

最终热处理
淬火+高温回火
冷处理和时效处理

回火后的组织：
细针状回火M+
细颗粒状碳化物+
少量残余A

e) 常用高速钢

W18Cr4V

W6Mo5Cr4V2

② 高铬钢

a) 成分

高碳 高铬

Cr12 :

$$w_{\text{C}} = 2.00 \sim 2.30\% \quad w_{\text{Cr}} = 11.50 \sim 13.00\%$$

Cr12MoV:

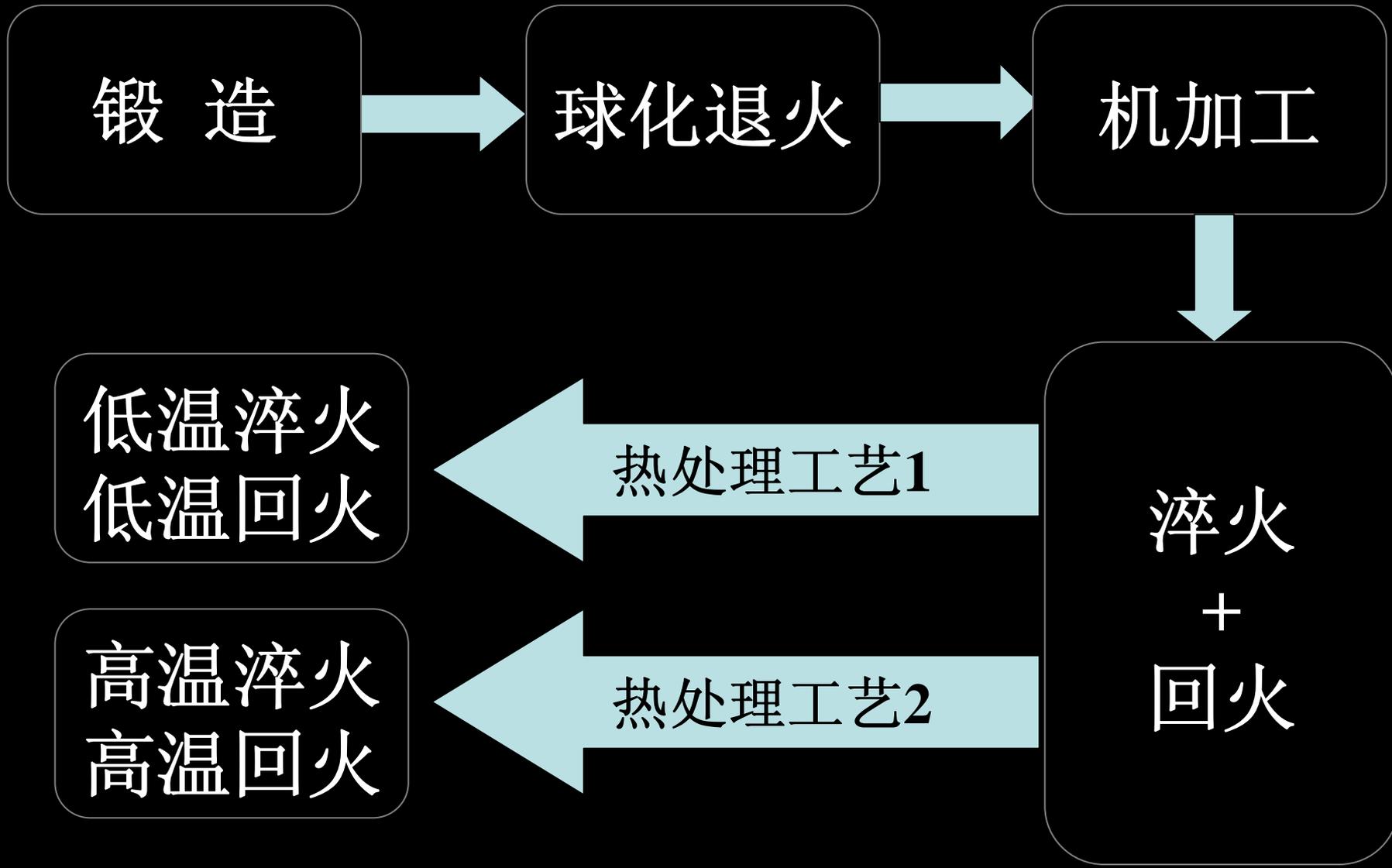
$$w_{\text{C}} = 1.45 \sim 1.70\% \quad w_{\text{Cr}} = 11.00 \sim 12.50\%$$

b) 性能

可以承受重载荷
形状复杂
要求变形小
耐磨性高
红硬性好

Cr提高钢的淬透性，回火抗力，抗氧化，抗脱碳，抗腐蚀能力。

c) 制造工艺





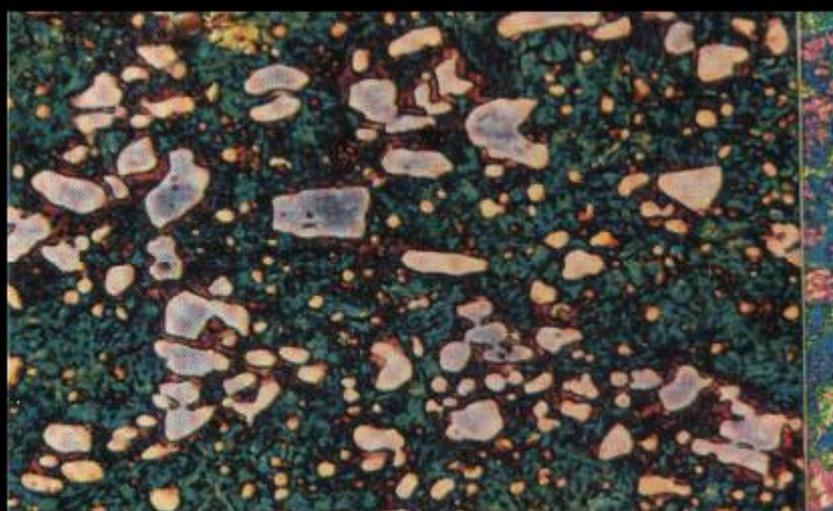
材料: Cr12MoV模具钢

状态: 1040淬火 480回火

侵蚀: 4%硝酸酒精

倍数: 500 X

组织: 回火马氏体+一次碳化物(大白块)+二次碳化物(小白点)



材料: Cr12MoV模具钢

状态: 淬火+回火

侵蚀: 化染

倍数: 210 X

组织: 大块的碳化物+回火马氏体

（三）中碳合金工具钢

这类钢主要用来制造热作模具，如热锻模、热挤压模、压铸模。

(1) 成分及性能特点

$$w_c=0.35\sim 0.60\%$$

加Mn、Ni、Si、Cr、W、Mo、V等以提高钢的淬透性和回火稳定性及强化F。W、Mo可抑制高温回火脆性。

Cr、W、Mo、Si还能提高钢的耐热疲劳性能。

(2) 典型牌号

**5CrNiMo、
5CrMnMo、
3Cr2W8V等**

三、新型合金工具钢

新型
合金工具钢

基体钢

冷模具钢

热模具钢

4.4 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊物理、化学、力学性能的钢种。

- 不锈钢
- 耐热钢
- 低温钢
- 耐磨钢

一、不锈钢及镍基耐蚀合金

在自然环境或一定工业介质中具有耐腐蚀性能的钢称不锈钢。广泛应用于石油、化工等领域。

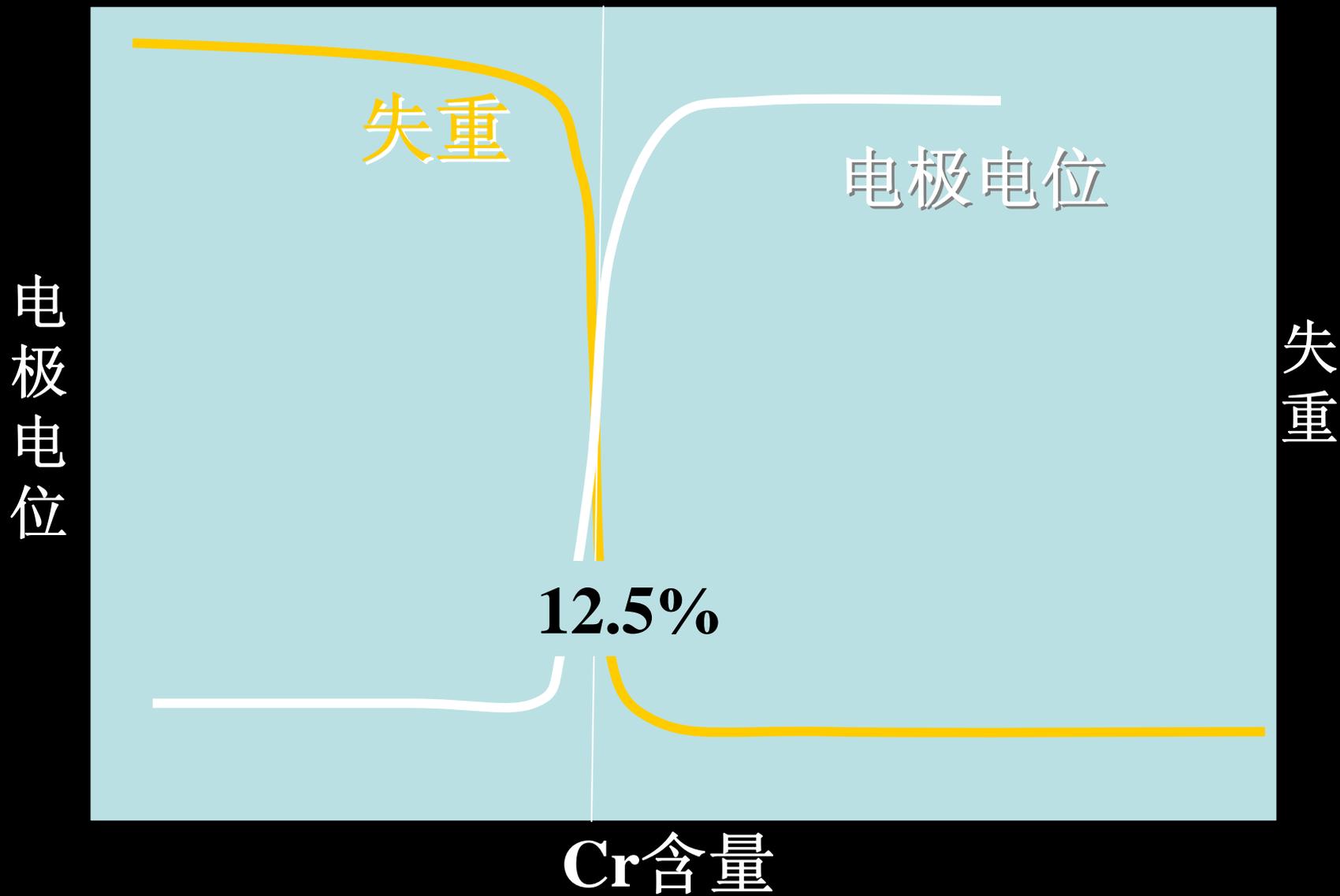
(一) 成分及性能特点

- $w_C=0.03\sim0.95\%$,
从耐蚀角度C越低越好, 可以防止 $Cr_{23}C_6$ 。
- $w_{Me}=12\sim38\%$
- 常加入: Cr、Ni、Si、Al、Mo、Ti、Nb

主要作用

- 1) 提高电极电位,
- 2) 室温获得单相组织,
- 3) 在钢表面形成致密氧化膜,
- 4) 形成稳定碳化物和金属间化合物。

Cr的影响



(二) 常用不锈钢及其热处理

- ① M型不锈钢
- ② F型不锈钢
- ③ A型不锈钢
- ④ A—F型不锈钢
- ⑤ 沉淀硬化型不锈钢

1. M型不锈钢

- 淬透性好，空冷时可形成M；
- 合金元素单一，在氧化性介质中（如大气、水蒸气、氧化性酸）有较好的耐蚀性。且耐蚀性还随着含碳量的增加而降低。

1) 成分及性能特点

$$w_{\text{C}} = 0.1 \sim 1.0\%$$

$$w_{\text{Cr}} = 12 \sim 18\%$$

2) 典型牌号

**1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、
9Cr18**

因为Cr加入，使共析点转移到0.3%附近，3Cr13、4Cr13分别属于共析钢和过共析钢，

工业上一般把1Cr13、2Cr13作为结构钢用，3Cr13、4Cr13、9Cr18作为工具钢用。



材料：1Cr13（马氏体+铁素体）型不锈钢

状态：1100加热淬火

侵蚀：三氯化铁盐酸水溶液

倍数：1000 X

组织：马氏体+ δ 铁素体（白色多角状），淬火温度过高使 δ 铁素体增多

3) 热处理

材 料: 1Cr13
2Cr13

热处理: 调质

组 织: $S_{\text{回}}$

用 途: 汽轮机叶片
蒸气管附件

材 料: 3Cr13
4Cr13
9Cr13

热处理: 淬火+
低温回火

组 织: $M_{\text{回}}$
用 途: 医疗器械
刃具

2. F型不锈钢

和M型不锈钢相比，由于含碳的降低，含铬量增加，致使钢从室温加热到 1000°C 均为单相F，不发生 $\text{F}\rightarrow\text{A}$ 。

F不锈钢的耐蚀性、塑性、焊接性均优于M不锈钢。但其强度较低，主要用于对力学性能要求不高，但对耐蚀性要求很高的机器零件和结构。

1) 成分及性能特点

$$w_{\text{C}} < 0.15\%,$$

$$w_{\text{Cr}} = 12 \sim 30\%,$$

2) 典型牌号

0Cr13

1Cr17

1Cr28

3) 热处理

材 料: 0Cr13 , 1Cr17 , 1Cr28

热处理: 退火, 或者正火

组 织: F

用 途: 对耐蚀性能要求很高的机器零件

硝酸吸收塔

热交换器

磷酸槽

3. A型不锈钢

不仅仅有高的耐腐蚀性，还有高的塑性，低温韧性，加工硬化能力与良好的焊接性。广泛应用于制造硝酸、有机酸、盐、碱等工业中的机械零件及构件。

1) 成分及性能特点

$$w_{\text{C}} < 0.12\%,$$

$$w_{\text{Cr}} = 17 \sim 25\%,$$

$$w_{\text{Ni}} = 8 \sim 29\%$$

Ni 扩大 A，Cr 提高电极电位，A 不锈钢的耐蚀性比 M 不锈钢有进一步的提高

2) 典型牌号

0Cr18Ni9

1Cr18Ni9

1Cr18Ni9Ti

.....



材料：1Cr18Ni9Ti

状态：固溶处理，1060加热淬火

侵蚀：混合酸甘油电解抛光侵蚀

倍数：250 X

组织：多边形奥氏体晶粒及孪晶

3) 热处理

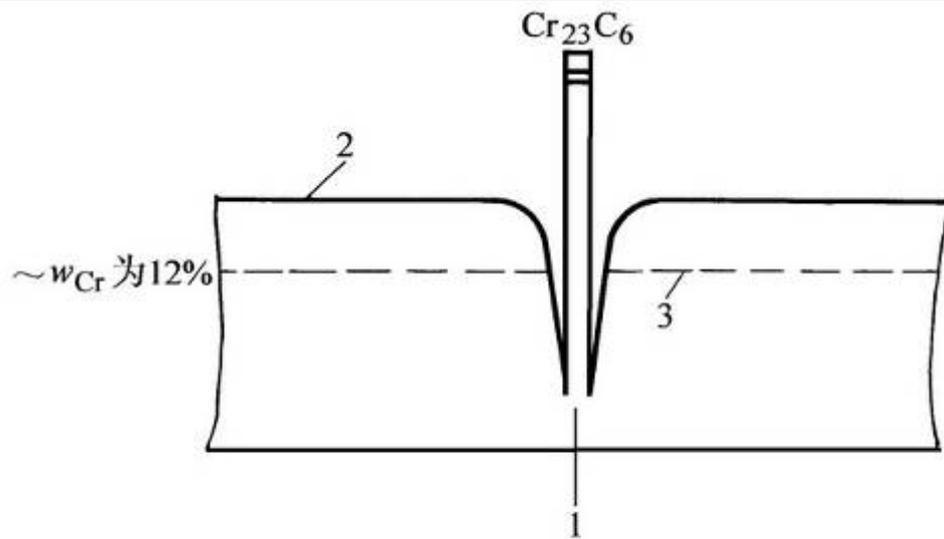
材 料: **0Cr18Ni9 , 1Cr18Ni9 , 1Cr18Ni9Ti**

热处理: 固溶处理

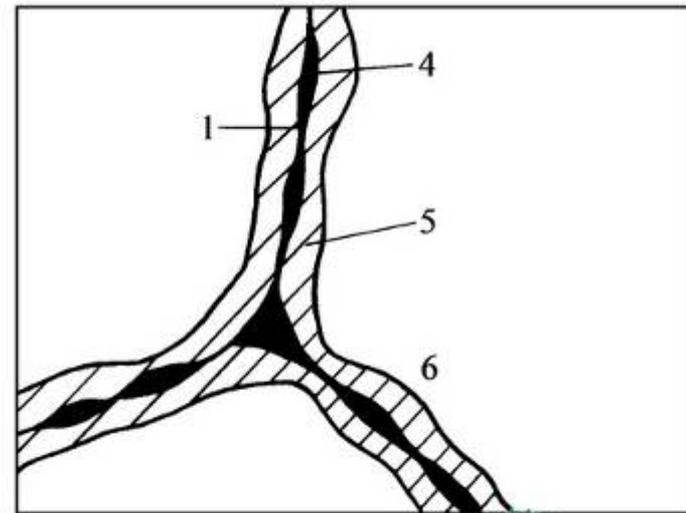
组 织: **A**

用 途: 广泛应用于硝酸, 有机酸, 盐, 碱等
工业中的机械零件及构件

4) 晶间腐蚀



a)



b)



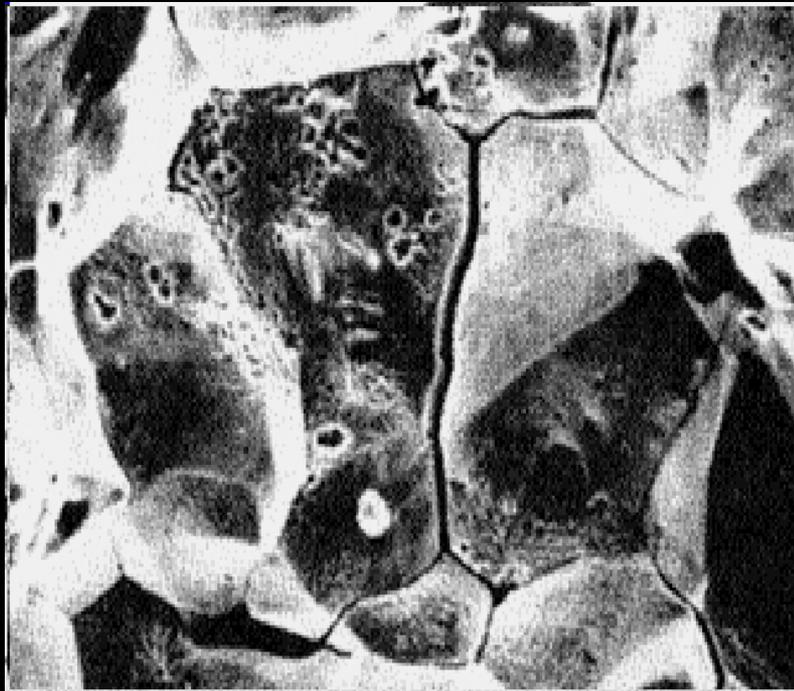
晶间腐蚀主要原因

贫铬理论—晶界析出 Cr_{23}C_6

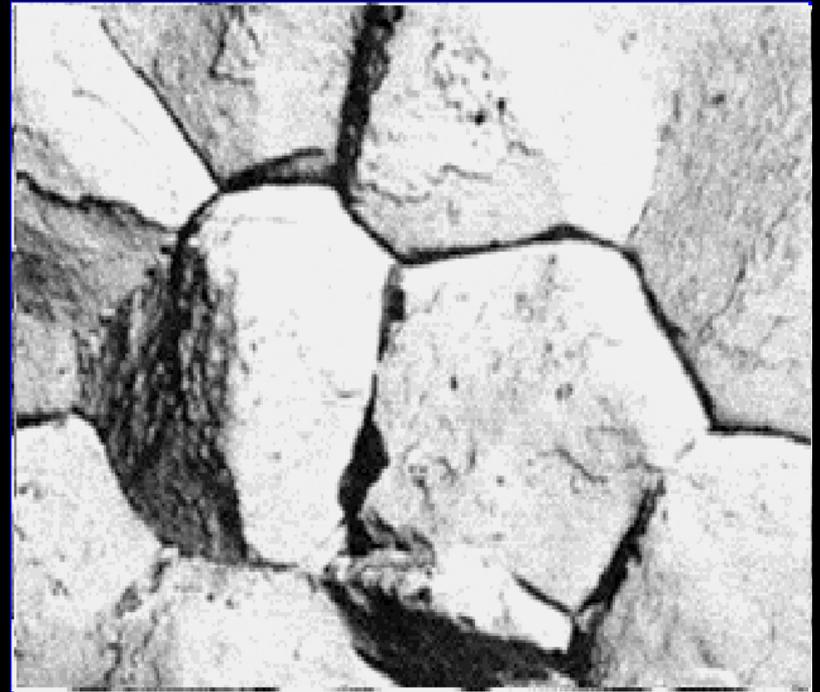
对策

1. 降碳
2. 添加强碳化物形成元素 **Ti, Nb**
3. 固溶处理或者退火处理

沿晶断口



材料：18-8钢



材料：2Cr17

4. A-F型不锈钢

这是双相不锈钢，兼有A不锈钢和F不锈钢的特性。不仅仅有良好的耐蚀性，还有较高的抗SCC能力，抗晶间腐蚀能力及良好的焊接性。适合于制作硝酸工业与尿素、尼龙生产的零件和设备。

1) 成分及性能特点

在18-8的基础上调整Cr、Ni的含量，并加入适量的Mn、Mo、W、Cu、N等而形成的双相不锈钢。

2) 典型牌号

1Cr21Ni5Ti

1Cr17Mn9Ni3Mo3Cu2N

1Cr18Mn10Ni5Mo3N

.....

3) 热处理

材 料: **1Cr21Ni5Ti ,**
1Cr17Mn9Ni3Mo3CuN
1Cr18Mn10Ni5Mo3N

热处理: **1000 ~ 1100°C 淬火**

组 织: **A + F**

用 途: **硝酸工业与尿素**
尼龙生产设备及零件

5. 沉淀硬化型不锈钢

对于复杂的零件，形变强化很难应用，所以在18-8基础上降低Ni加入适量的Al, Cu, Mo, Nb等以便在热处理中析出金属间化合物，实现沉淀强化——沉淀强化不锈钢。

1) 成分及性能特点

在18-8的基础上降低Ni的含量，并加入适量的Al、Cu、Mo、Nb等而形成的沉淀强化不锈钢。

2) 典型牌号

0Cr17Ni7Al

0Cr15Ni7Mo2Al

.....

3) 热处理

材 料: **0Cr17Ni7Al**

0Cr15Ni7Mo2Al

热处理: 固溶处理(**1060 °C** 空冷)获得**A**

750 ~ 760 °C空冷 获得 **A+M**

560 ~ 570 °C 时效

析出金属间化合物 如: **Ni₃Al**

组 织: **A + M + 金属间化合物**

用 途: 高强度, 高硬度, 耐腐蚀的
化工机械设备

(三) 镍基耐蚀合金

在自然环境或一定工业介质中具有耐腐蚀性能的合金称耐蚀合金。广泛应用于石油、化工等领域。

1) 成分及性能特点

- 低碳高合金

$$w_{\text{C}}=0.03\sim 0.2\%,$$

- $w_{\text{Me}}=30\sim 48\%$

Me: Cu、Cr、Fe、Mn、Mo、Nb、Ti

Cu、Fe、Mn溶于**Ni**中，形成单相固溶体组织，减轻电化学腐蚀；**Cr**提高电极电位，形成 **Cr_2O_3** 保护层；**Mo、Nb、Ti**形成稳定碳化物 **NbC** 、 **TiC** ，和金属间化合物 **Ni_3Mo** 、 **Ni_3Ti** 、 **Ni_3Nb** 。

2) 典型分类

- ① 锻造镍
- ② 镍-铜合金
蒙乃尔(Monel)合金
- ③ 镍-铬-铁合金
因科镍(Inconel) 合金

3) 锻造镍

A. 特点

耐蚀性特强，强度较高，耐高温和低温

B. 用途

制作与强酸、强碱接触的泵壳，容器，火箭，导弹耐蚀零件。

B. 常用牌号

200 和 201

4) 镍-铜合金

A. 特点

别称蒙乃尔(Monel)合金,耐蚀性特强,在氢氟酸中的耐蚀性居所有金属材料之首。

B. 用途

制作与氢氟酸接触的零构件。

C. 常用牌号

Ni-29.5Cu, (Monel K-500)

Ni-31Cu-1.5Mn-1.4Fe, (Ni66Cu31Fe)

Ni-28Cu-1.5Mn-2.5Fe, (Ni68Cu28Fe)

5) 镍-铬-铁合金

A. 特点

别称因科镍(Inconel)合金, 优良的耐蚀性, 高温强度高, 辐照稳定性好。

B. 用途

制作高温下要求耐腐蚀的零构件。

C. 常用牌号

Inconel 600 (Ni-15.5Cr-10Fe)

Inconel 706 (Ni-16Cr-27.6Fe-2.9Nb-1.8Ti)

Inconel 718 (Ni-19Cr-18.5Fe-5.1Nb-3Mo-0.9Ti)

二、耐热钢和高温合金

耐热钢和高温合金是指在高温下具有高热稳定性和热强性的特殊钢和合金。

主要用于制造工业加热炉、高压锅炉、汽轮机、内燃机、航空发动机、热交换器等在高温下工作的构件和零件。

(一) 耐热钢

1) 成分及性能特点

- 性能要求:

高的热稳定性，即具有高温抗氧化能力。

高的热强性，即具有高的抗蠕变抗力和持久强度。

2) 典型分类

常用耐热钢分类：

P耐热钢

M耐热钢

F耐热钢

A耐热钢

(1) P型耐热钢

这类钢在正火状态下的显微组织是**P+F**。由于合金元素含量少，因而热膨胀系数小，导热性好，并有良好的冷、热加工性能。广泛用于制造工作温度 $<600^{\circ}\text{C}$ 的锅炉及管道、压力容器、汽轮机转子等。

①成分及性能特点

$$w_{\text{C}}=0.1\sim 0.4\%$$

加入Cr、Mo、W、V等主要是强化F，防止高温下片状 Fe_3C 的球化和石墨化，提高钢的高温强度。

② 典型牌号

12CrMo、

15CrMoV、

25Cr2MoVA

(2) M型耐热钢

这类钢淬透性好，
空冷就能得到M。

①成分及性能特点

低C高Cr钢： 在C r13的基础上加入Mo、W、V、Ti、Nb等以便强化F，形成稳定的碳化物，提高钢的强度。

中C铬硅钢： 其抗氧化性能好、蠕变抗力高、还有较高的硬度和耐磨性。

② 典型牌号

- **1Cr11MoV、1Cr12WMoV**

低碳高铬钢，在500℃以下具有良好的蠕变抗力和优良的消震性，最宜于制造汽轮机叶片，故又称叶片钢

- **4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo**

主要用于制造使用温度低于750℃的发动机排气阀，故称气阀钢

(3) F型耐热钢

这类钢抗氧化强，但高温强度低，焊接性差，脆性大，多用于受力不大的加热炉部件。

①成分及性能特点

是在F不锈钢的基础上加入Si、Al等合金元素，提高其抗氧化性能。

② 典型牌号

1Cr13Si3、
1Cr13SiAl、
1Cr18Si2等

(4) A型耐热钢

这类钢有高的热强性和抗氧化性，高的塑性和冲击韧性，良好的焊接性和冷成形性。主要用于制造工作温度在 $600^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ 间的高压锅炉过热器、汽轮机叶片、叶轮、发动机气阀等。

①成分及性能特点

是在A不锈钢的基础上加入W、Mo、V、Ti、Nb、Al等元素，以强化A，形成稳定碳化化合物和金属间化合物，提高钢的高温强度。

② 典型牌号

1Cr18Ni12Ti、

1Cr15Ni36W3Ti、

4Cr14Ni14W2Mo等

(4) 沉淀硬化型耐热钢

这类钢和沉淀硬化不
锈钢基本相同

典型牌号：

0Cr17Ni4Cu4Nb

0Cr17Ni7Al

(二) 高温合金

对于航空、航天飞机的零构件，如喷气发动机的压气机燃烧室、涡轮、尾喷管等等，在 800°C 以上温度长期服役，耐热钢已经不能满足抗氧化和高温强度的要求，这时候就应该选用高温合金。

分类：

铁基、镍基、钴基、铌基、钼基

1) 铁基高温合金

单相A组织，抗氧化性好，冷加工成形和焊接性好，用于制造形状复杂、需经冷压和焊接成形、但受力不大，主要要求在 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 下抗氧化能力强的零件。如喷气发动机的燃烧室、火焰筒等等。

(1) 成分及性能特点

是在A耐热钢的基础上增加Cr、Ni、W、Mo、V、Ti、Nb、Al等，以形成单相A组织提高抗氧化性，并提高再结晶温度，以及形成弥散分布的稳定碳化化合物和金属间化合物，提高合金的高温强度。

(2) 典型牌号

**GH1035、
GH2036、
GH1130、
GH2132等
(高合GH)**

2) 镍基高温合金

单相 A 组织，抗氧化性好，高温强度高，用于制造在 $800^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 以下受力的零件。如涡轮机叶片等。

(1) 成分及性能特点

这类合金是以Ni 为基。加入Cr、W、Mo、Co、V、Ti、Nb、Al等，以形成Ni为基的固溶体。产生固溶强化并提高再结晶温度，以及形成弥散分布的稳定碳化化合物和金属间化合物，提高合金的高温强度。

(2) 典型牌号

GH3030、

GH4033、

GH4037、

GH3039、

GH3044等

三、低温钢

低温钢是指工作温度在
0°C以下的零件和结构件钢
种。

1)用途

广泛用于低温下工作的设备，如冷冻设备、制氧设备、石油液化设备、航天工业用的高能推进剂液氢、液氮等液体燃料的制造、贮运装置、寒冷地区（如北极、南极）开发所用的机械设施等等。

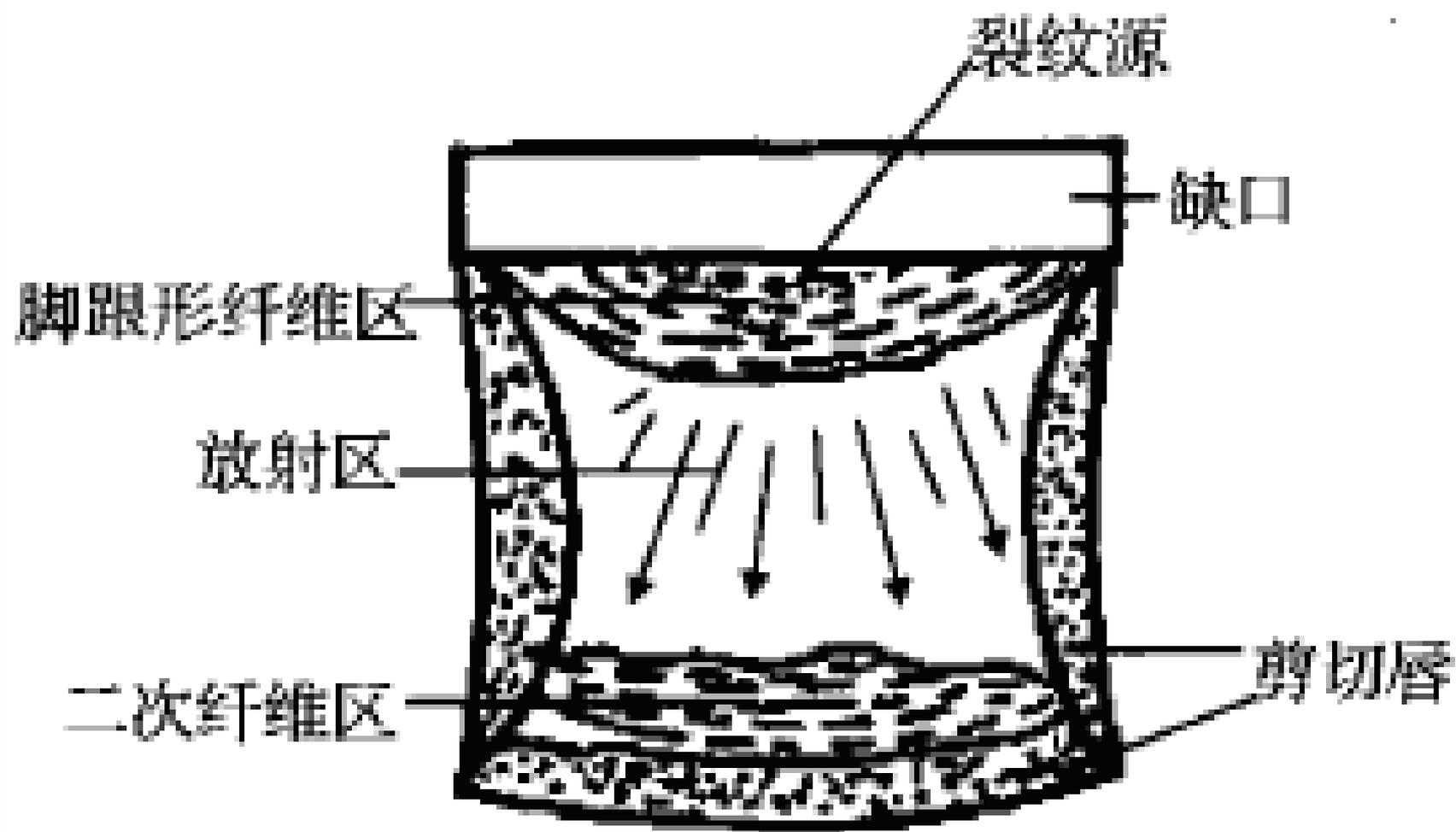
2) FATT

性能要求：冲击韧性

FATT

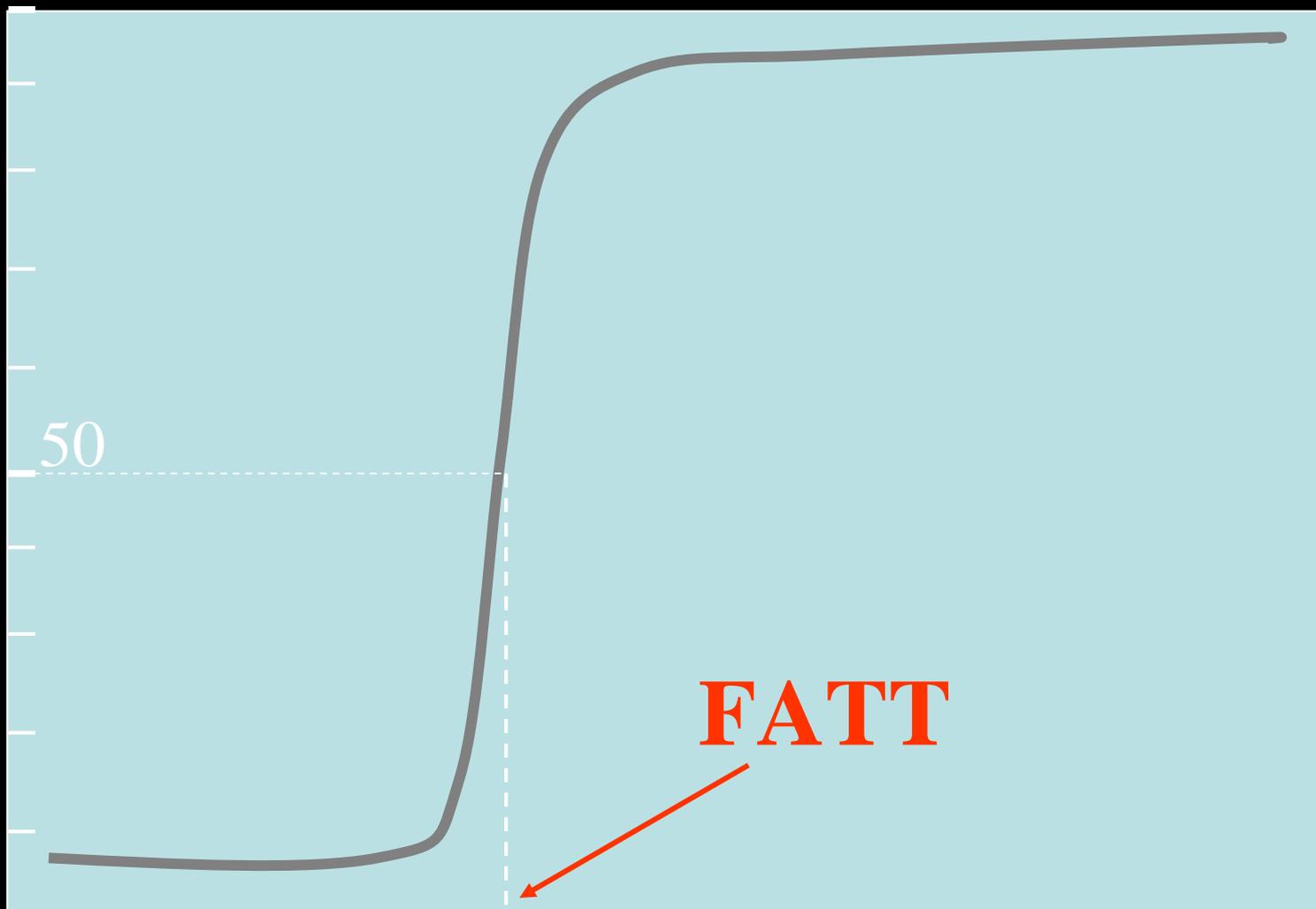
Fracture Appearance
Transition Temperature.

断口形貌转化温度。



FATT

剪切面积比例 %



FATT

试验温度

3)成分及性能特点

C、S、P会 \uparrow FATT,

Mn、Ni会 \downarrow FATT,

BCC随T \downarrow 韧性显著降低,

FCC随T \downarrow 影响不大。

4) 典型低温钢

常用低温钢

低碳锰钢

镍钢

▲ 不锈钢

四、耐磨钢

广义地讲，耐磨钢是指用于制造高耐磨零件及构件的一些钢种。有高碳铸钢、硅锰结构钢、高碳工具钢以及滚动轴承钢等，但通常指高锰钢。

高锰钢的成分

高的C	0.9~1.5%
适量Si	0.3~0.8%
低S	<0.05%
低P	<0.10%

高锰钢的性能

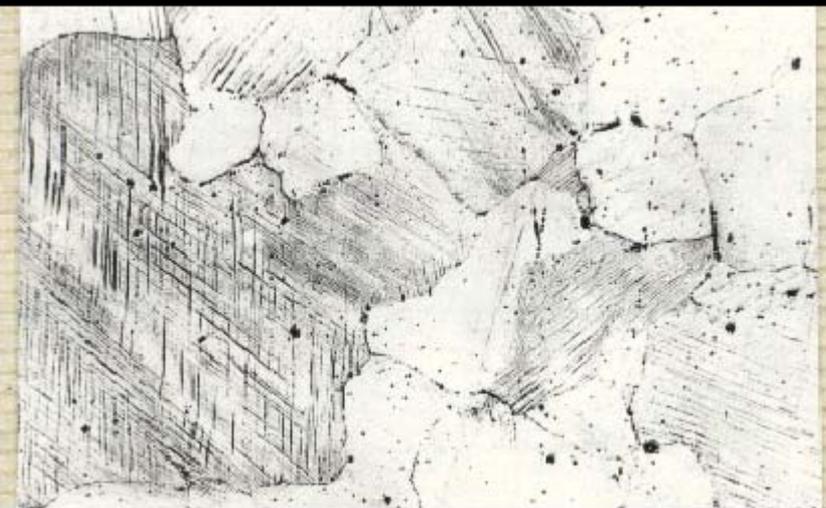
高锰钢经热处理后能得到单一的A，韧性好，但硬度低，200HBS，但当其受到剧烈冲击及高压作用时，其表层的A将迅速产生**加工硬化**，同时伴有 $A \rightarrow M$ ，导致表层的硬度提高到450~500HBS，从而形成硬而耐磨的表面，但其内部仍然保持原有的低硬度状态。

当表面一层磨损以后，新的表面将继续产生**加工硬化**并获得高的硬度。

典型牌号

由于高锰钢具有很高的加工硬化能力，切削加工十分困难，所以基本上是铸造成型的，故其钢号用**ZG**铸钢表示如：

ZGMn13



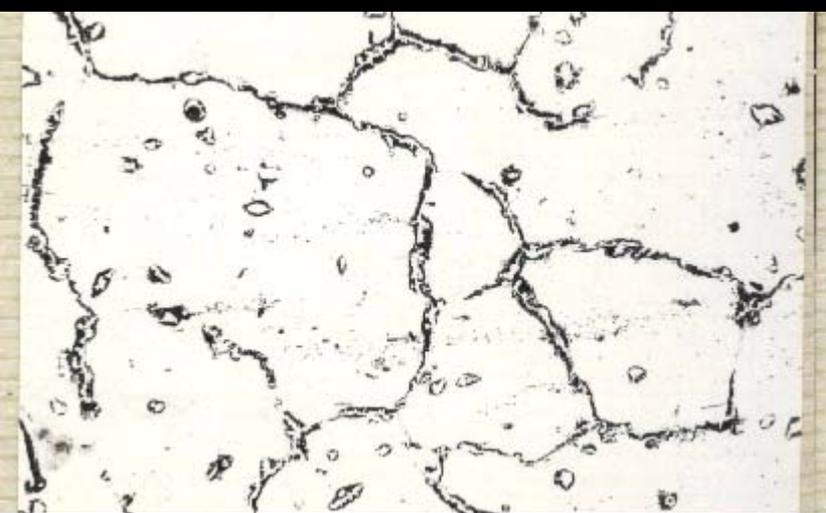
材料：ZGMn13钢

状态：水韧处理，压缩变形

侵蚀：盐酸+氢氟酸+磷酸+硝酸

倍数：100 X

组织：奥氏体晶粒及变形孪晶



材料：ZGMn13钢

状态：铸态

侵蚀：盐酸+氢氟酸+磷酸+硝酸

倍数：100 X

组织：奥氏体+碳化物

要点总结

熟悉 合金元素在钢中存在的形式和作用

掌握 第一第二类回火脆性

了解 典型钢号的特点

合金元素在钢中的存在形式

固熔体

固溶于F、A、M中

Ni、Si、Co、Mn、Cr、Mo、W

碳化物

合金渗碳体

特殊碳化物

化合物

金属间化合物

非金属夹杂物

游离态

如Pb、Cu等

2)合金元素在钢中作用

细化A晶粒

Ti、V、Nb、Zr、Al

提高淬透性

除Co以外，如Mn、Cr、W、Mo

提高回火抗力

Cr、W、Mo、V

固溶强化

Ni、Si、Al、Co、Cu、Mn、Cr、Mo、V

第二相强化

Mn、Cr、Mo、W

扩大A相

Ni、Mn、Cu、N

扩大F相

Si、Cr、W、Mo、V、Ti、Al

形成致密氧化膜

Si、Al、Ni、Cr、W、Mo、Ti

第一类回火脆性

第二类回火脆性。

第一类回火脆性的防止

一般认为，低温回火脆性是由于M分解时沿M板条或片的界面析出断续的薄壳状碳化物，降低了晶界的断裂强度，使之成为裂纹扩展的途径，因而导致脆性断裂。

避免在**250°C ~ 400°C**回火

第二类回火脆性

➤ 第二类回火脆性，在回火过程中**Sb**、**P**、**Sn**在A晶界偏聚而引起的脆化现象。

①加入**W**、**Mo**等能强烈阻止或延缓杂质元素在A晶界的偏聚。

② **450°C ~ 650°C**回火快冷

作业

本章全部习题

第五章

铸铁

Cast Iron

- $w_C > 2.11\%$ ，并含Si、Mn、S、P

铸铁特点

- 生产设备、冶炼工艺简单
- 价格低廉
- 良好的铸造性能
- 减摩
- 切削加工好
- 低的缺口敏感性
- 消震性能好

5.1 铸铁的石墨化

碳在铁碳合金中的存在形式:

- ◆ 固溶于F、A中
- ◆ 形成 Fe_3C
- ◆ 游离态的石墨Graphite (G)

一. 石墨化过程

二. 影响石墨化的因素

一、石墨化过程

(一) 石墨的特性

成分

Fe₃C **$w_C = 6.69\%$**

G **$w_C = 100\%$**

结构

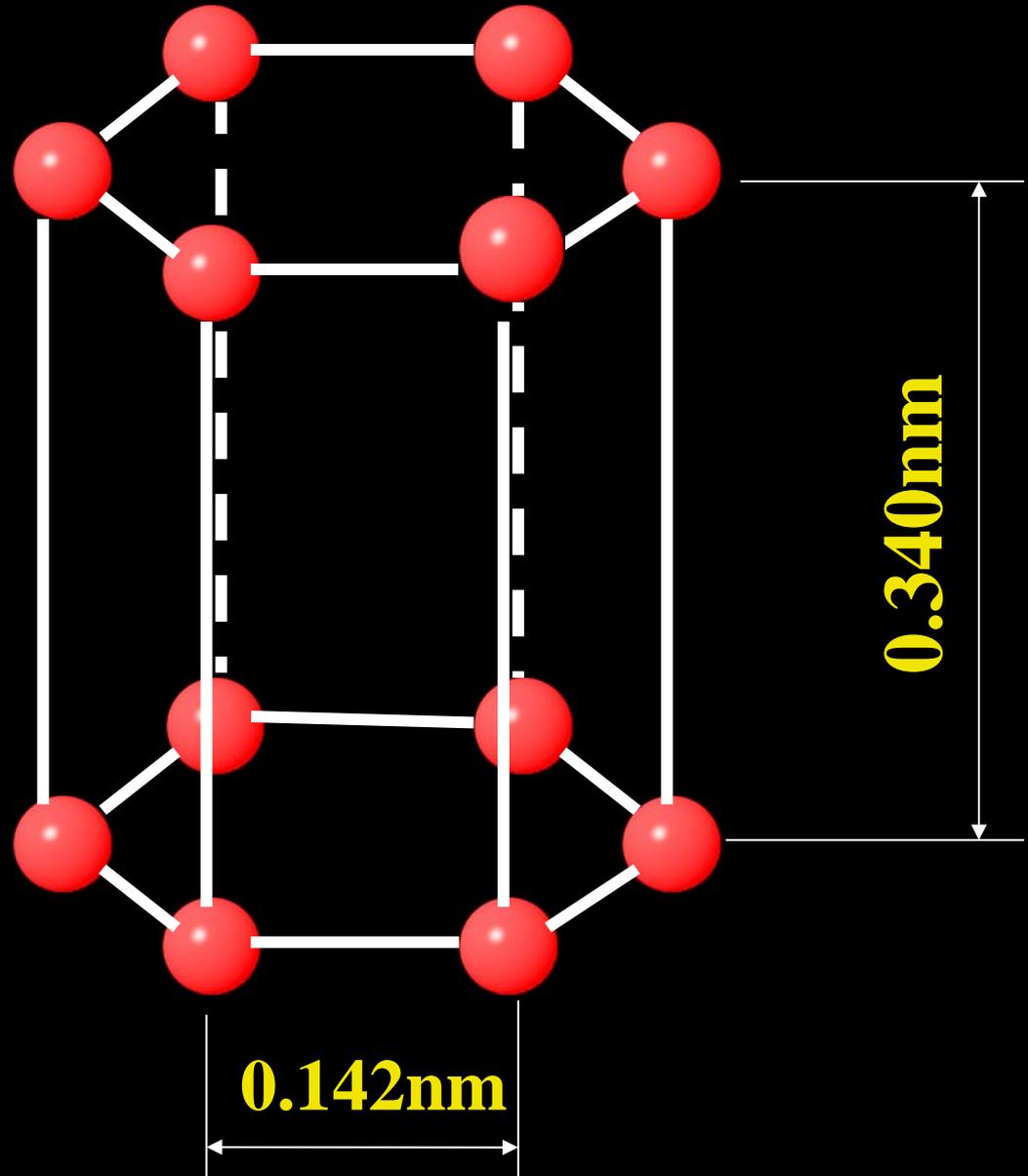
Fe₃C 正交晶体结构

G 简单六方晶体结构

在成分和结构上石墨与铁液相差很大，但渗碳体和液相差别较小，因此，从铸铁中液相或A中析出渗碳体比石墨较为容易。

石墨的晶体结构

简单六方

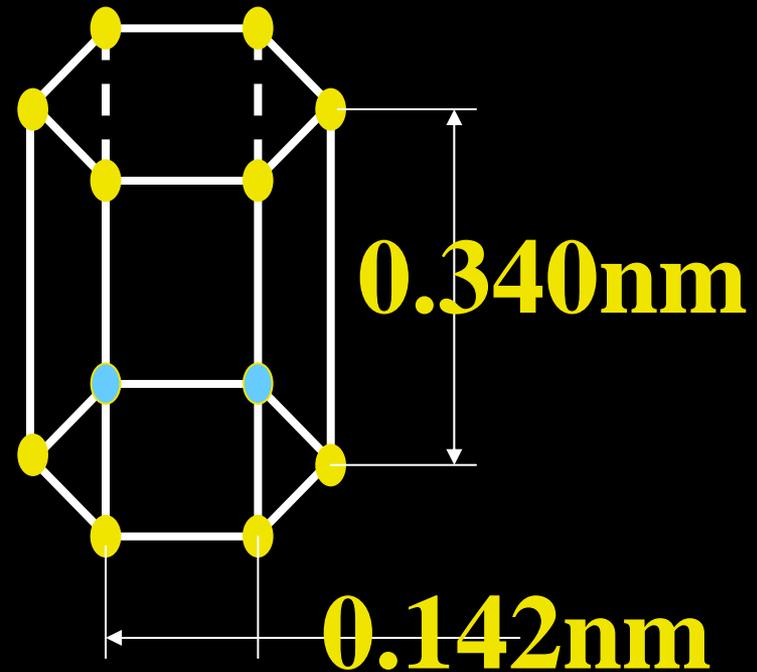


石墨的结晶特点

在简单六方晶体中，
碳原子是分层排列

同一层上的原子间
距小(0.142nm),结合力强

层间原子间距大
(0.340nm)结合力弱



结晶时原子层方向的生长速度大于层间

容易形成片状石墨

熔点

Fe₃C 熔点1227°C

G 熔点高于1227°C

力学性能

Fe₃C 硬而脆, 硬度800Hv, 能轻易划破玻璃, 塑性几乎为零。

G 强度、塑性和韧性几乎为零, 硬度仅为3Hv。

铸铁组织

铸铁（非白口铸铁）中的C主要以游离态的石墨（G）存在；基体组织几乎和钢没有什么区别，随工艺条件及热处理条件的不同，可以获得**F**、**P**、**S**、**T**、**M**、**A**等组织。

铸铁可以简单看作由钢的基体上分布着不同形态的石墨

在铁碳合金中，C既可以G形式也可以渗碳体的形式存在。

- ◆ 从热力学上，G比 Fe_3C 要稳定；
- ◆ 从动力学上，渗碳体的成分与铁液更接近，Fe的排列与A也有相似之处。

因而，A中析出渗碳体较易形核，而G的晶体结构与A相差较大，不易从A中形核和长大。

铁碳合金中，C以何种形式存在取决于化学成分和冷却速度。

铸铁性能

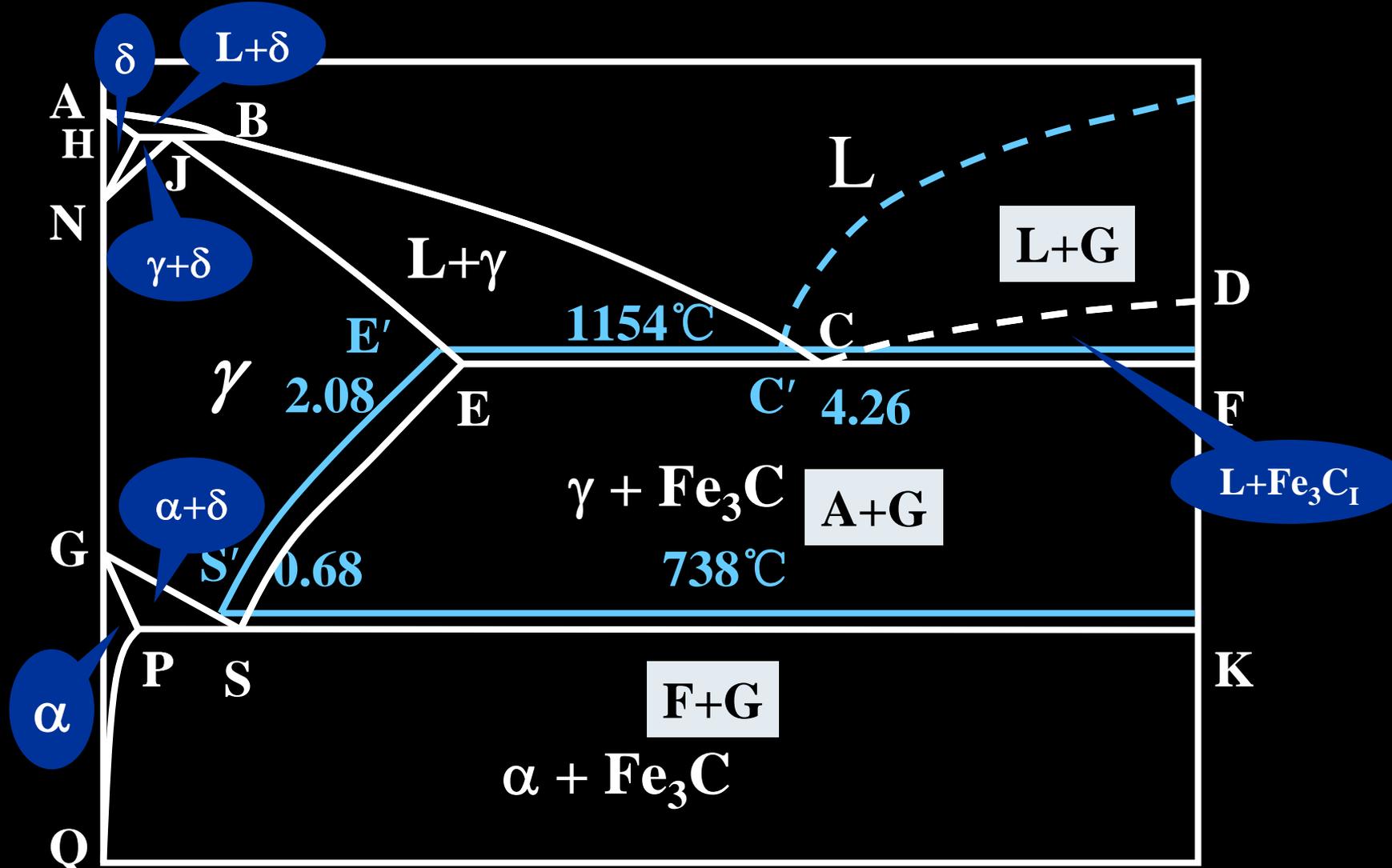
石墨的晶体结构是简单的六方晶格，它的强度、塑性和韧性均很低，（和钢相比几乎为零），因此我们可以把铸铁看作是布满裂纹的空洞的钢。

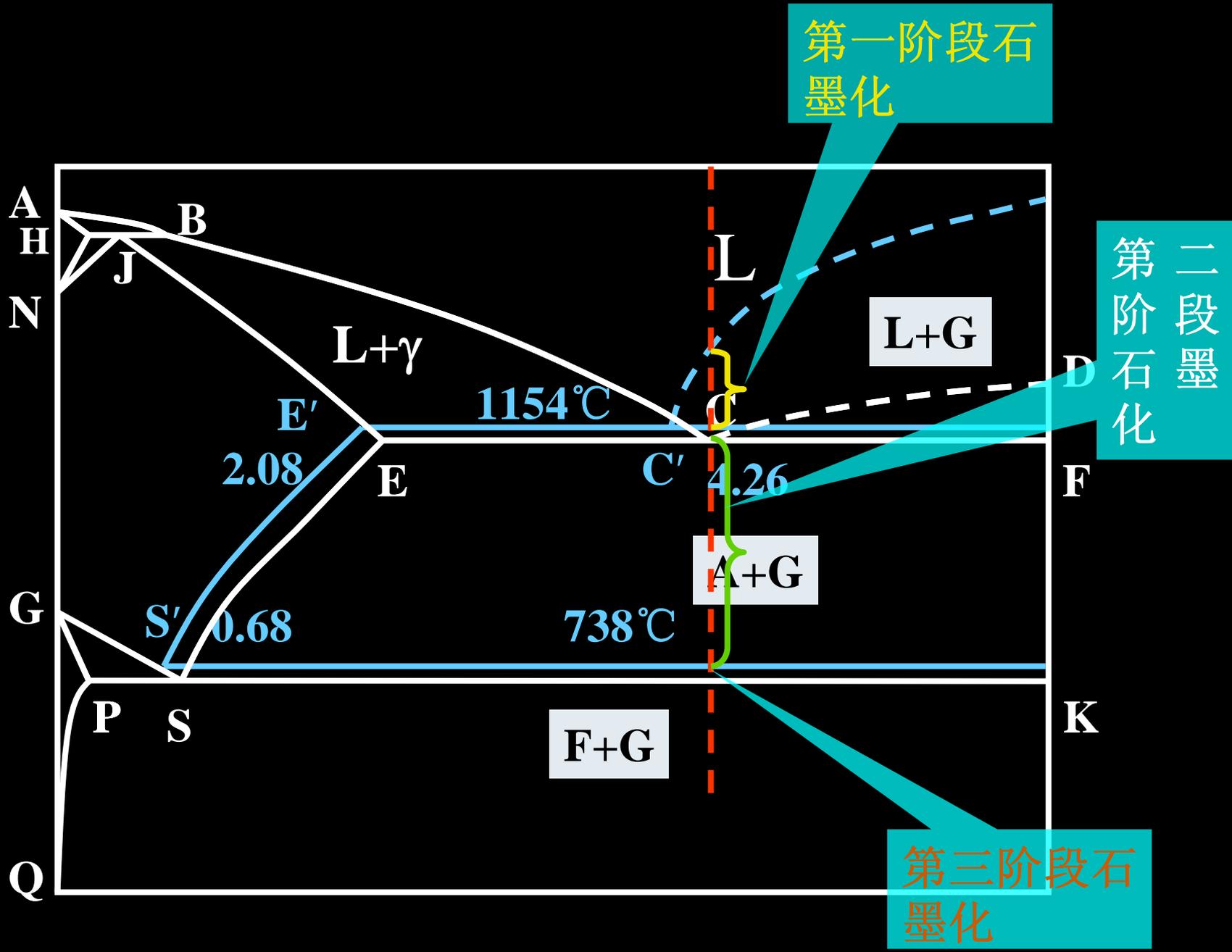
（二）石墨化的三个阶段

- ❖ 铸铁组织中析出碳原子形成石墨的过程称石墨化过程。
- ❖ 石墨化过程的三个阶段

铁-碳双重相图

为了便于比较，习惯上把两个相图画在一起。此种合二为一的相图称铁-碳双重相图





➤ 第一阶段(液态阶段)

从铸铁液相中直接析出 G_I 及共晶反应析出共晶石墨 $G_{晶}$

➤ 第二阶段(共晶—共析阶段)

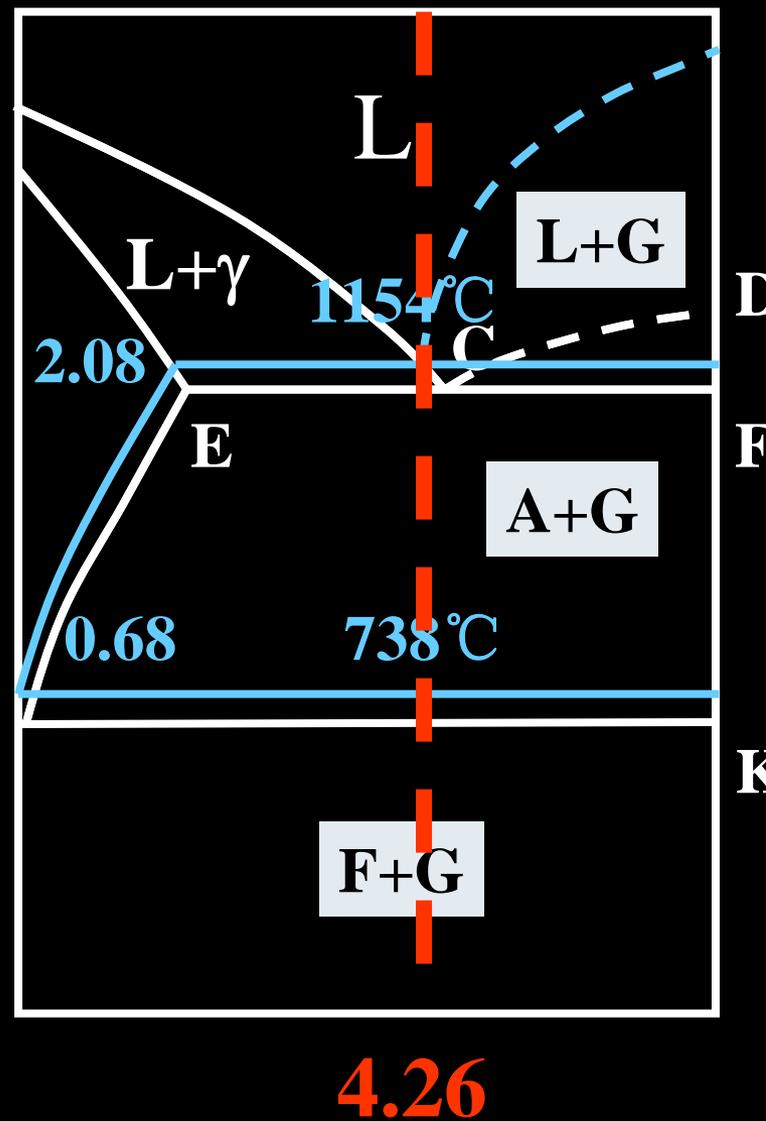
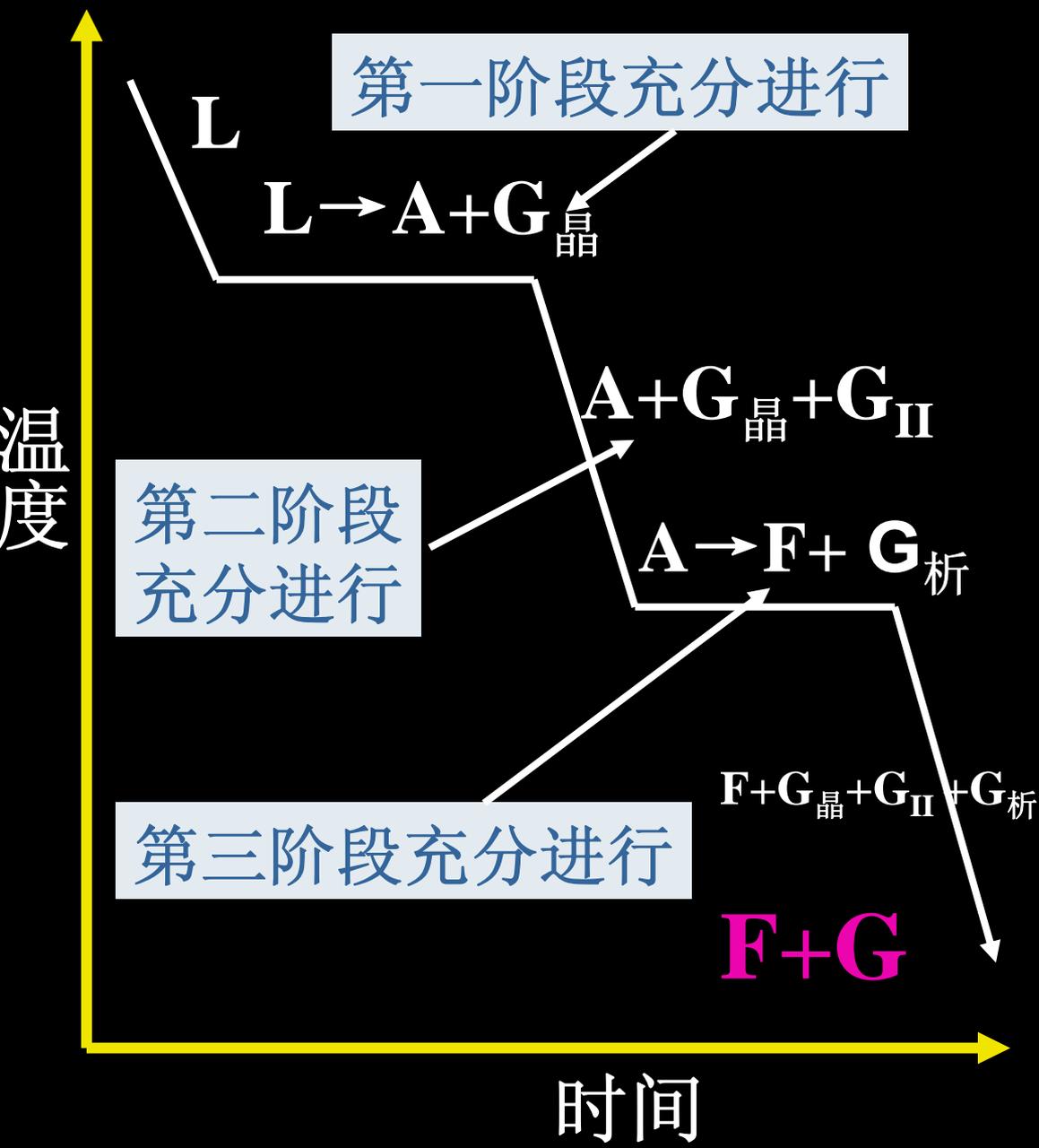
自A中沿 $E' S'$ 线析出二次石墨 G_{II}

➤ 第三阶段(共析阶段)

发生共析反应析出 $G_{析}$

共晶合金的石墨化过程1

石墨化
三个阶段
都充分进行



共晶合金的石墨化过程2

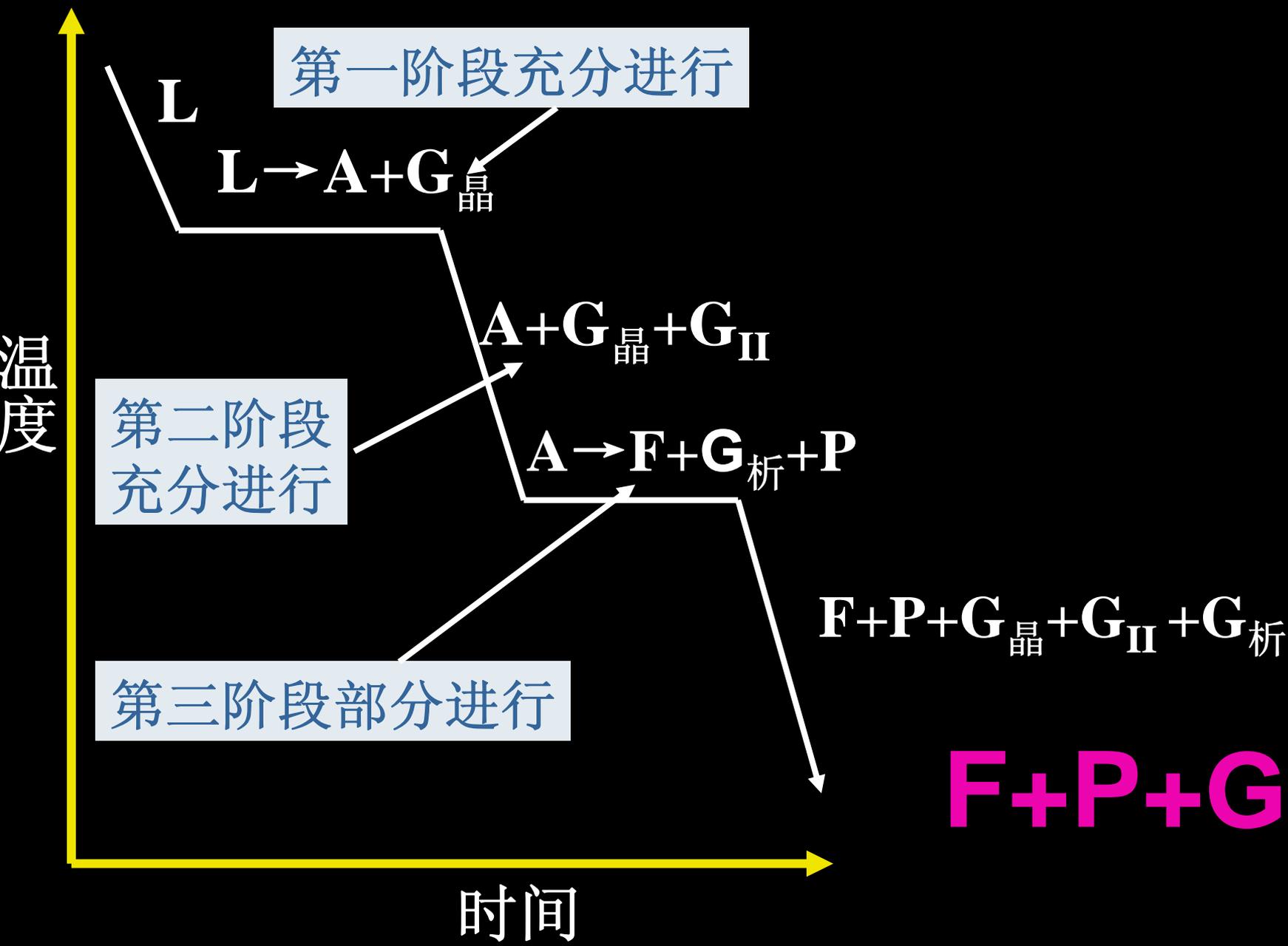
石墨化

第一第二个阶段

充分进行

第三阶段

部分进行



共晶合金的石墨化过程3

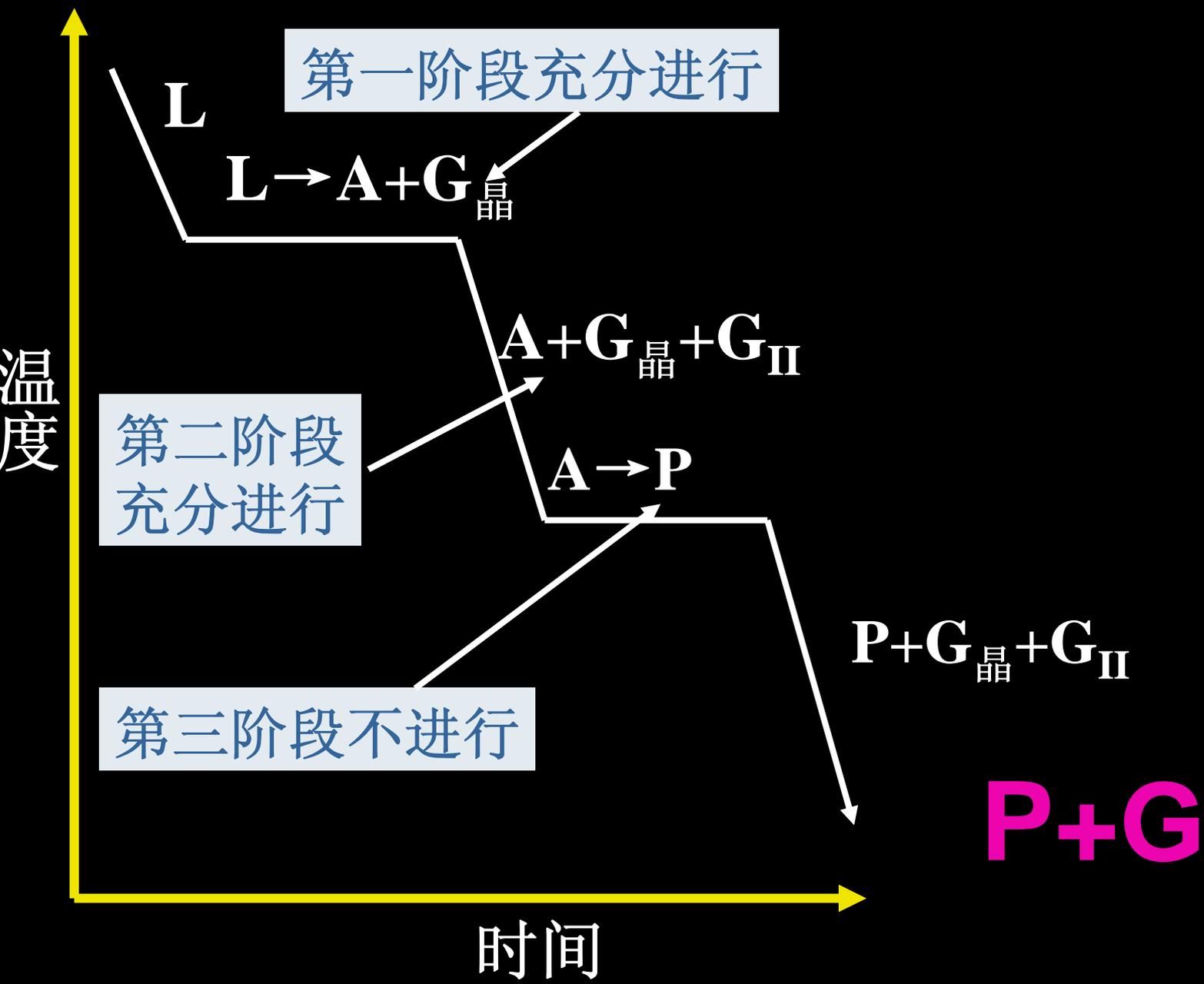
石墨化

第一第二个阶段

充分进行

第三阶段

不进行



石墨化后得到的组织

石墨化程度			显微组织
第一阶段	第二阶段	第三阶段	
充分进行	充分进行	充分进行	F+G
充分进行	充分进行	部分进行	F+P+G
充分进行	充分进行	不进行	P+G

灰口铸铁

共晶合金的石墨化过程4

石墨化程度			显微组织
第一阶段	第二阶段	第三阶段	
不进行	不进行	不进行	$L'd+P+Fe_3C$ $L'd$ $L'd+Fe_3C$

白口铸铁

共晶合金的石墨化过程5

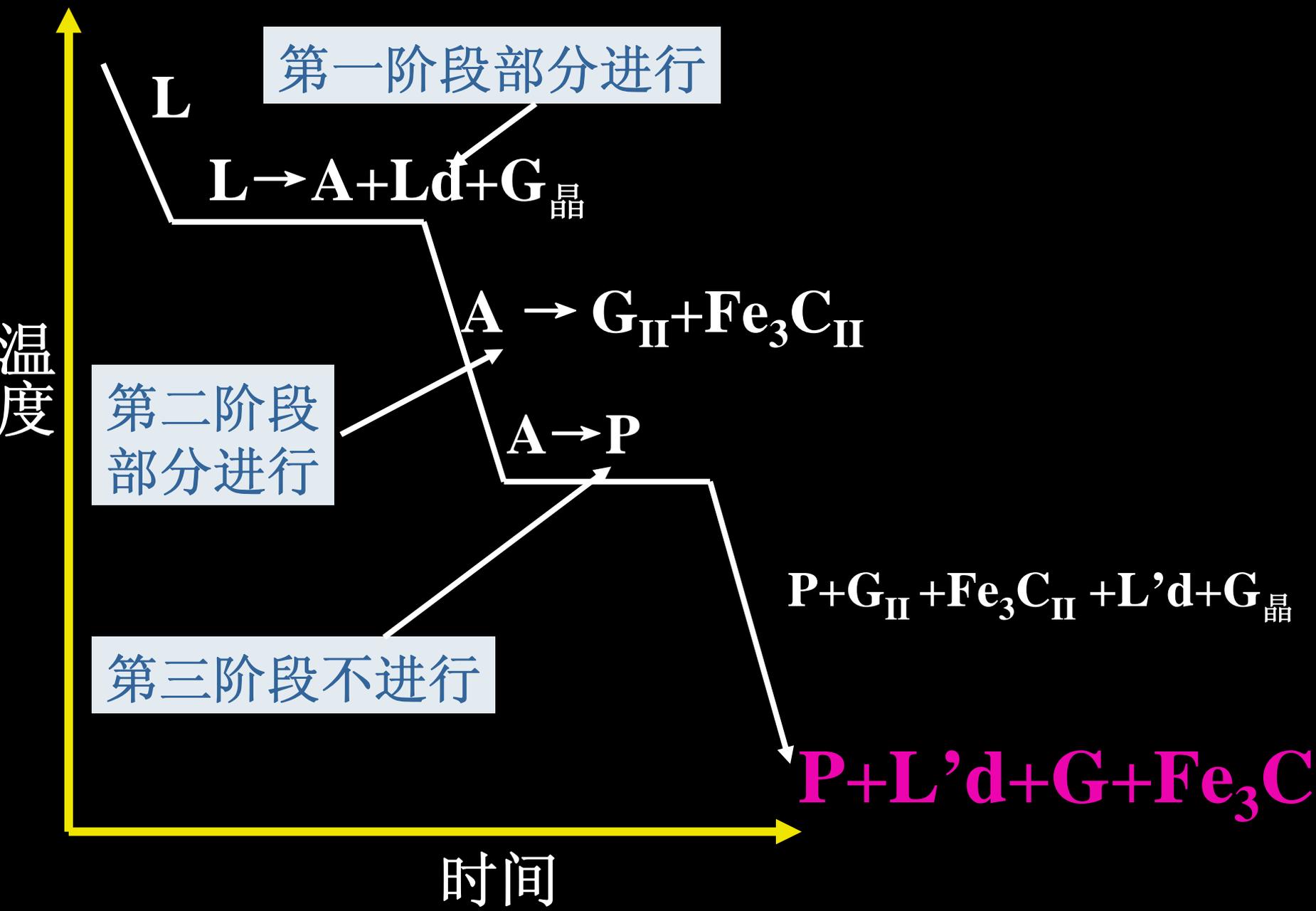
石墨化

第一第二个阶段

部分进行

第三阶段

不进行



石墨化程度			显微组织
第一阶段	第二阶段	第三阶段	
部分进行	部分进行	不进行	P+L'd+G+Fe₃C

麻口铸铁

各类铸铁经不同程度石墨化后得到的组织

铸铁类型	石墨化程度			显微组织
	第一阶段	第二阶段	第三阶段	
灰口铸铁	充分进行	充分进行	充分进行	F+G
	充分进行	充分进行	部分进行	F+P+G
	充分进行	充分进行	不进行	P+G
麻口铸铁	部分进行	部分进行	不进行	L'd+P+G+Fe₃C
亚共晶白口	不进行	不进行	不进行	L'd+P+Fe₃C
共晶白口				L'd
过共晶白口				L'd+Fe₃C

二、影响石墨化的因素

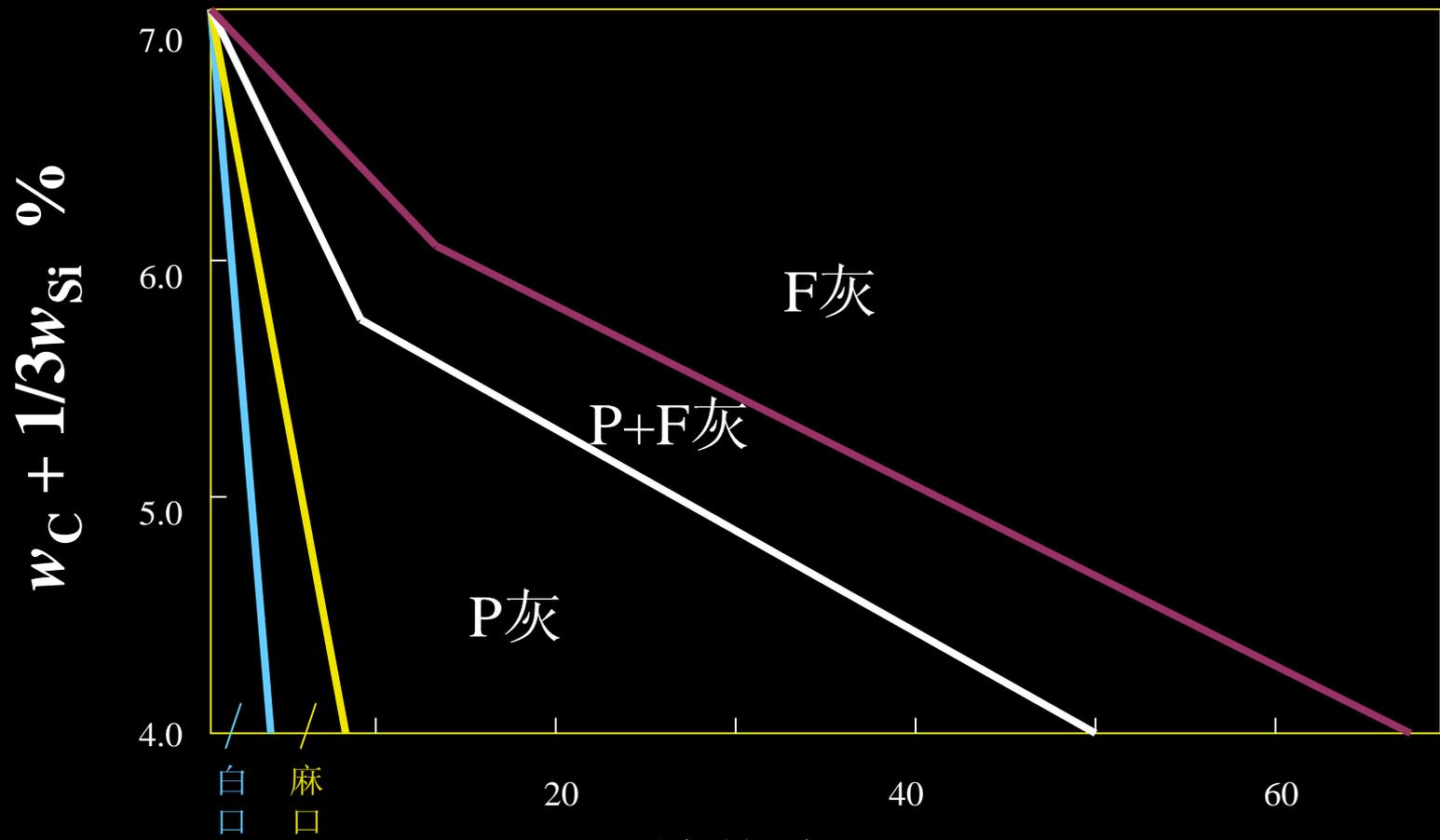
(一) 化学成分

- $w_C \uparrow$ 有利于石墨形核；
- Si可削弱铁原子间的结合力，并使共晶温度提高、共晶点左移，故有利于石墨形核；
- 生产中，通过调整 $(w_C + 1/3w_{Si})$ 来控制铸铁的组织；

- ◆ 除C、Si外，P、Al、Cu、Ni、Co也为石墨化元素；
- ◆ S、Mn、Cr、W、Mo、V等元素为白口化元素。

（二）冷却速度

渗碳体的成分（碳含量）更接近于液态铸铁，与G相比，结构亦更近于A，在快冷时易得到渗碳体；而G是一种更稳定的相，在缓冷时易得到G。



冷却速度



5.2 各类铸铁的特点及应用

一、铸铁的分类

铸铁通常按石墨化程度或石墨形态两种方法进行分类。

按石墨化程度分

灰口铸铁

第一阶段石墨化充分进行，C主要以G形式存在，断口呈灰暗色，应用广。

白口铸铁

石墨化过程完全被抑制，C主要以渗碳体存在，断口呈银白色，性能脆硬，主要做炼钢原料。

按石墨形态分

灰铸铁

石墨呈片状，生产工艺简单，价格低，应用最广。

可锻铸铁

石墨呈团絮状，生产周期长，成本高。

球墨铸铁

石墨呈球状，生产工艺比可锻铸铁简单，力学性能好，应用较广。

蠕墨铸铁

石墨呈蠕虫状，是一种新型铸铁，有大的应用前景。

二、不同石墨形态铸铁的特性及用途

(一) 灰铸铁

成分

$$w_{\text{C}} = 2.5 \sim 4.0\%$$

$$w_{\text{Si}} = 1.0 \sim 2.5\%$$

$$w_{\text{Mn}} = 0.5 \sim 1.4\%$$

$$w_{\text{S}} \leq 0.10 \sim 0.15\%$$

$$w_{\text{P}} \leq 0.12 \sim 0.25\%$$

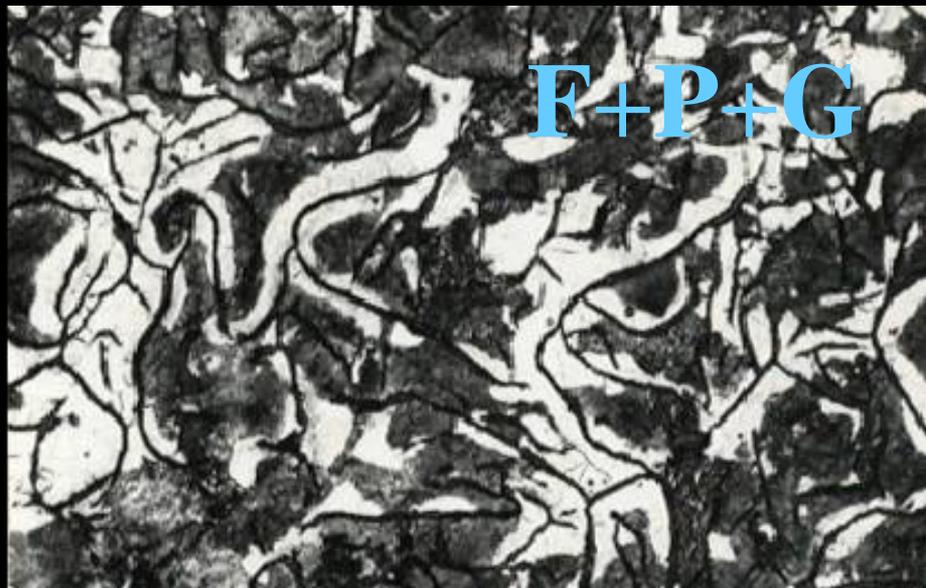
组织

因C、Si含量高，第一阶段和第二阶段石墨化过程都能充分进行，显微组织特征是片状石墨分布在钢的基体组织上。

根据第三阶段石墨化的程度不同，有三种组织：

F+G、F+P+G、P+G

灰铸铁的显微组织对比



牌号

- ❖ 工业上最常用的是P+F灰口铁，因其综合力学性能好。
- ❖ 按照GB/T9439-1988规定，灰铸铁的牌号用 HT

HT × × ×



如：

HT150

灰铁

最低抗拉强度为**150MPa**

用途

使用范围：汽车、拖拉机气缸、气缸套，机床床身等受压力及振动的零件。

注意事项：HT的强度随厚度增加而降低，选材时应注意

表5-1 灰铸铁的牌号、性能及应用 (GB/T9493—1988)

牌号	铸件壁厚/mm		最小抗拉 强度 σ_b	硬度HBS	显微组织		应用举例
	大千	至	R_{m}		基体	石墨	
HT100	2.5	10	130	最大不超过 170	F+P(少)	粗片	
	10	20	100				
	20	30	90				
	30	50	80				
HT150	2.5	10	175	150~200	F+P	较粗片	端盖, 汽轮泵体, 轴承座, 阀壳, 管子及管端附件, 手轮, 一般机床 底座, 床身及其他复杂零件, 滑 座, 工作台等
	10	20	145				
	20	30	130				
	30	50	120				
HT200	2.5	10	220	170~220	P	中等片状	汽缸, 齿轮, 底座, 机件, 飞轮, 活塞, 衬筒; 一般机床床身及中等 压力(8MPa以下)液压缸, 液压泵 和阀的壳体等
	10	20	195				
	20	30	170				
	30	50	160				
HT250	4.0	10	270	190~240	细珠光体	较细片状	阀壳, 油缸, 气缸, 联轴器, 机 件, 齿轮, 齿轮箱外壳, 飞轮, 衬 筒, 凸轮, 轴承座等
	10	20	240				
	20	30	220				
	30	50	200				
HT300	10	20	290	210~260			
	20	30	250				
	30	50	230				
HT350	10	20	340	230~280	索氏 体 或 托氏 体	细小片状	齿轮, 凸轮, 车床卡盘, 剪床, 压 力机的机身, 导板, 蜗塔, 自动车 床及其他重负荷机床的床身, 高压 液压缸, 液压泵和滑阀的壳体等
	20	30	290				
	30	50	260				

表5-1 灰铸铁的牌号、性能及应用 (GB/T9493—1988)

牌号	铸件壁厚/mm		最小抗拉 强度 σ_b	硬度HBS	显微组织		应用举例
	大千	至	MPa		基体	石墨	
HT100	2.5	10	150	最大不超过 170	F+P(少)	粗片	
	10	20	100				
	20	30	90				
	30	50	80				
HT150	2.5	10	175	150~200	F+P	较粗片	端盖, 汽缸零件, 轴承座, 阀壳, 管子及管路附件, 手轮, 一般机床底座, 床身及其他复杂零件, 销座, 工作台等
	10	20	145				
	20	30	150				
	30	50	120				
HT200	2.5	10	220	170~220	P	中等片状	汽缸, 齿轮, 底座, 机件, 飞轮, 油泵, 衬筒; 一般机床床身及中等压力(8MPa以下) 液压筒, 液压泵和阀的壳体等
	10	20	195				
	20	30	170				
	30	50	160				
HT250	4.0	10	270	190~240	细珠光体	较细片状	阀壳, 油缸, 气缸, 联轴器, 机件, 齿轮, 齿轮箱外壳, 飞轮, 衬筒, 凸轮, 轴承座等
	10	20	240				
	20	30	220				
	30	50	200				
HT300	10	20	290	210~260			
	20	30	250				
	30	50	230				
HT350	10	20	340	230~280	珠光体 或托氏体	细小片状	齿轮, 凸轮, 车床卡盘, 喇叭, 压力机的机身, 导板, 塔塔, 自动车床及其他重负荷机床的床身, 高压液压筒, 液压泵和滑阀的壳体等
	20	30	290				
	30	50	260				

普通灰口铸铁的主要缺点不仅仅是石墨片粗大，力学性能低，更重要的是铸件组织对冷却速度很敏感。

同一铸件薄截面上可能出现白口或麻口组织，而厚截面上则可能出现大量的石墨片或过量的F，结果力学性能不均匀。

为了解决麻口问题，生
产上采用孕育处理
或称变质处理

孕育处理就是在尚未浇铸的过热（ 1400°C 以上）铁水中加入少量的孕育剂，搅拌后进行浇铸，而得到

孕育铸铁
（变质铸铁）

孕育剂

Si-Fe或

Si-Ca合金

孕育铸铁的组织

孕育铸铁的组织为细P基体上加细小均匀分布的片状石墨。并使铸件各部位得到均匀一致的组织。

(二) 球墨铸铁

措施：球化剂+孕育剂

在尚未浇铸的一定成分的铁水中加入一定量的球化剂（如**Mg**、**Ce**、**RE**等）进行球化处理，并加入少量的孕育剂（**Si-Fe**、**Si-Ca**合金）以促进石墨化，在浇铸后得到具有球状石墨的铸铁。

成分

与灰铁相比，球铁的成分更严格 **C**、**Si** ↑, **S**、**P** ↓

$$w_{\text{C}} = 3.8 \sim 4.0\%, \quad w_{\text{Si}} = 2.0 \sim 2.8\%$$

$$w_{\text{Mn}} = 0.6 \sim 0.8\%$$

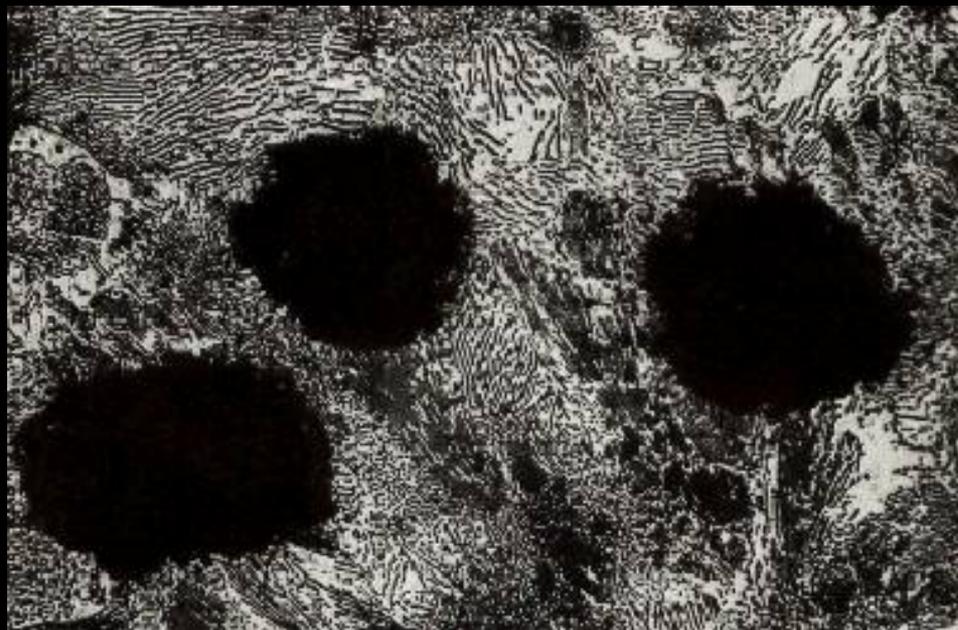
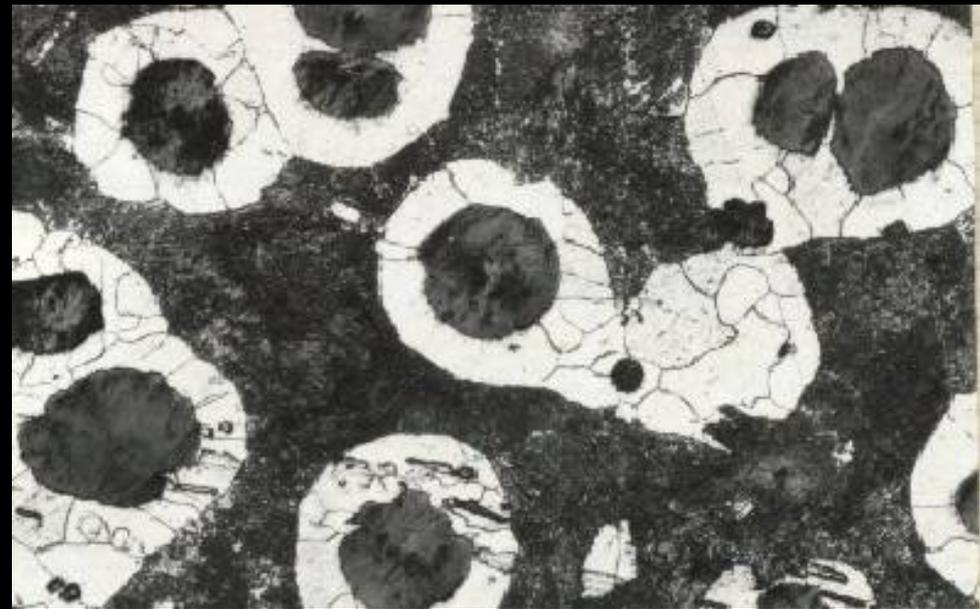
$$w_{\text{S}} \leq 0.04\%, \quad w_{\text{P}} \leq 0.10\%$$

$$w_{\text{RE}} < 0.03 \sim 0.05\%$$

组织

根据基体的不同球墨铸铁为：

- F+球状石墨
- F+P+球状石墨
- P+球状石墨

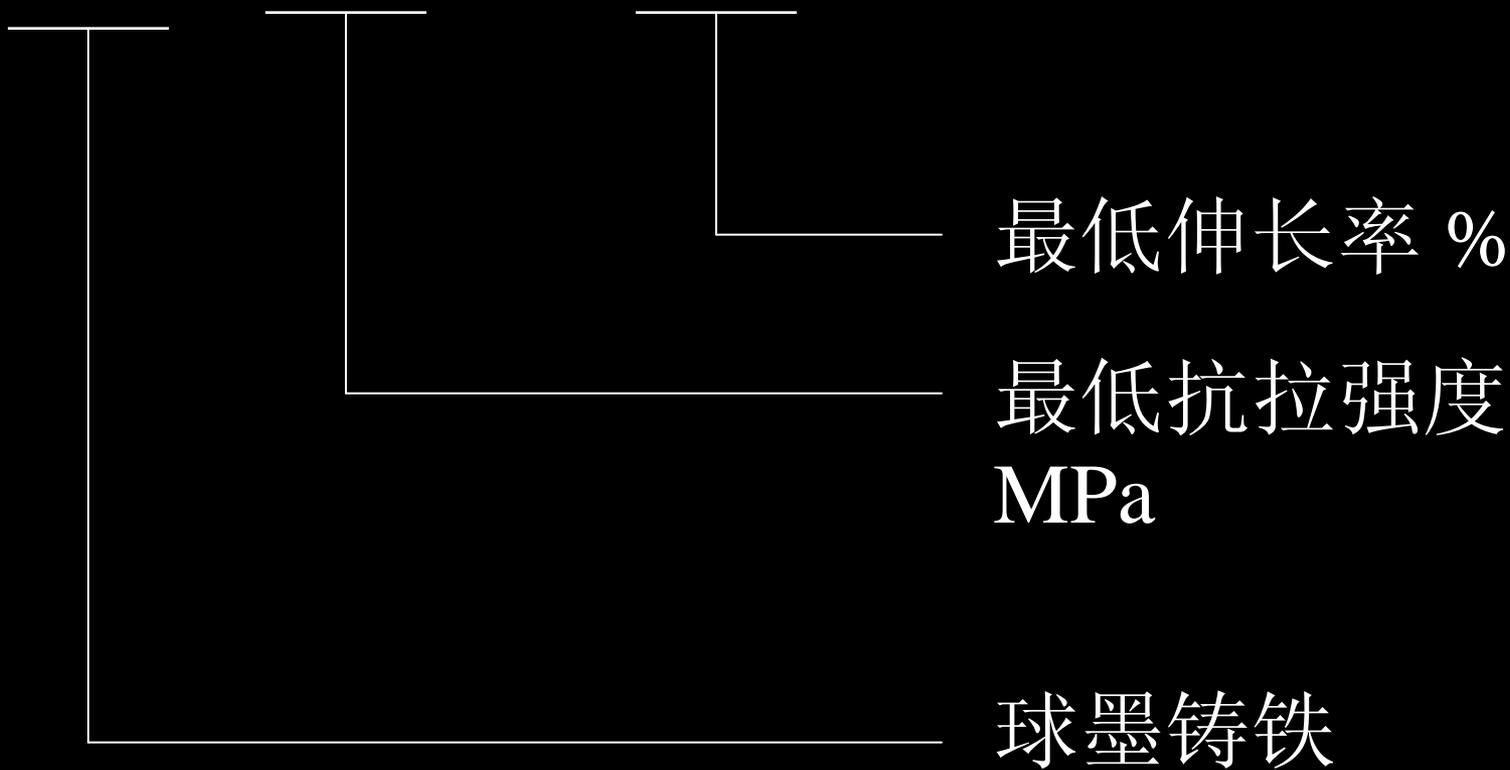


由于石墨呈球状，对基体的割裂作用小，应力集中小，所以，球墨铸铁既具有灰铸铁良好铸造性、耐磨性、可切削加工性及低的缺口敏感性等；又具有与中碳钢媲美的抗拉强度、弯曲疲劳强度及良好的塑韧性；并可通过合金化及热处理来改善和提高性能。

生产中应用最为广泛的是F和P球墨铸铁，在制造发动机曲轴、连杆、凸轮轴和机床主轴中已可用球墨铸铁代替中碳钢及中碳合金钢（45、42CrMo等）。

编号 GB/T 1348-1988

QT400-18



(三) 可锻铸铁 Ductile Cast Iron

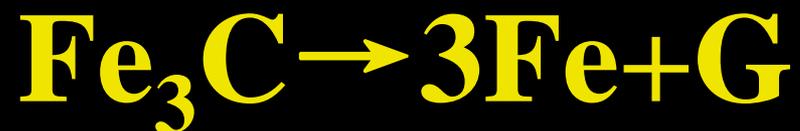
Ductile

adj. 易延展的, 易教导的, 柔软的
的 (简明英汉字典)

Adj. 可展性 (科技大字典)

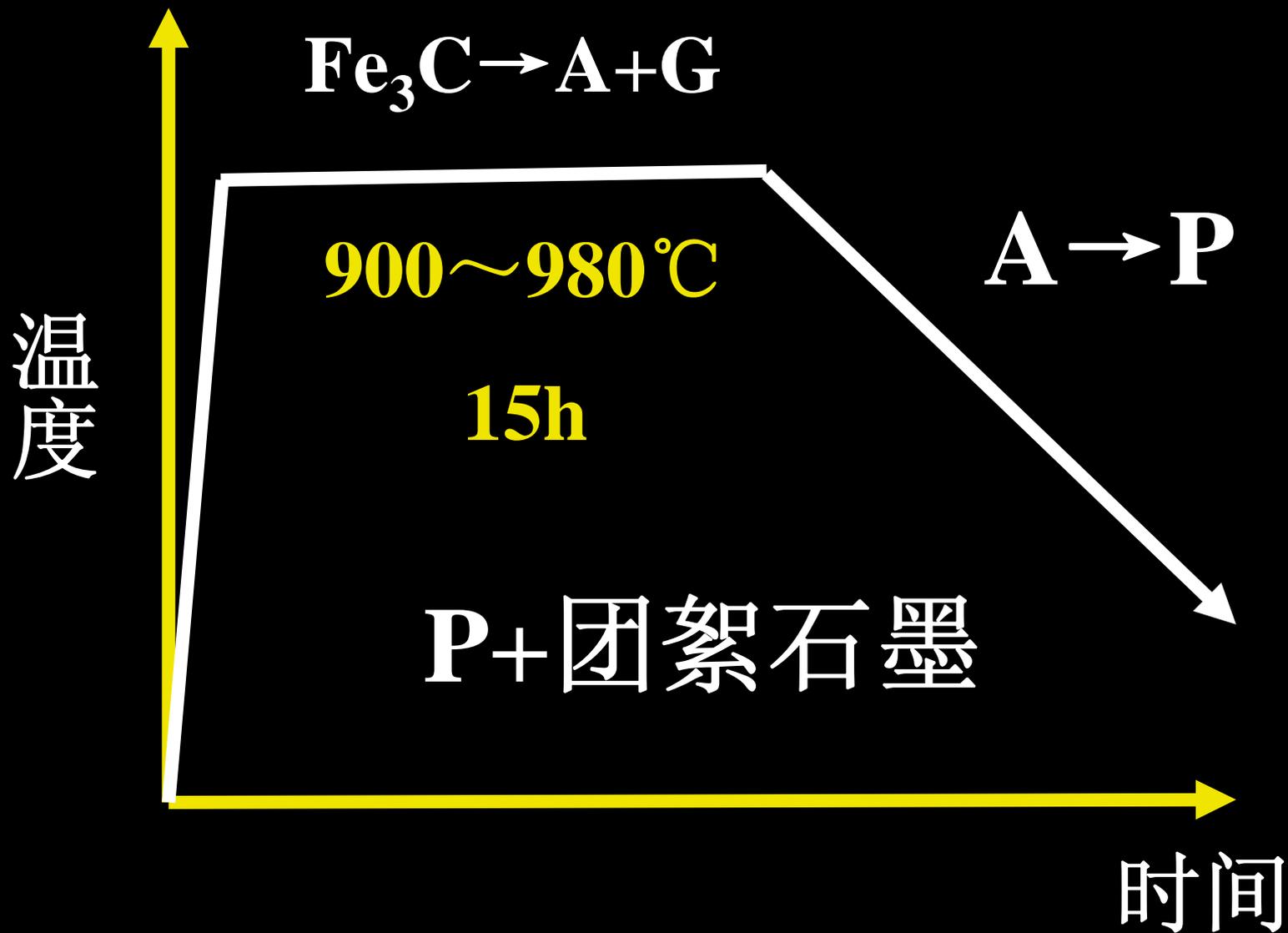
可锻铸铁不可锻

可锻铸铁是由白口铸铁在固态下，经长时间的石墨化退火，使其中的

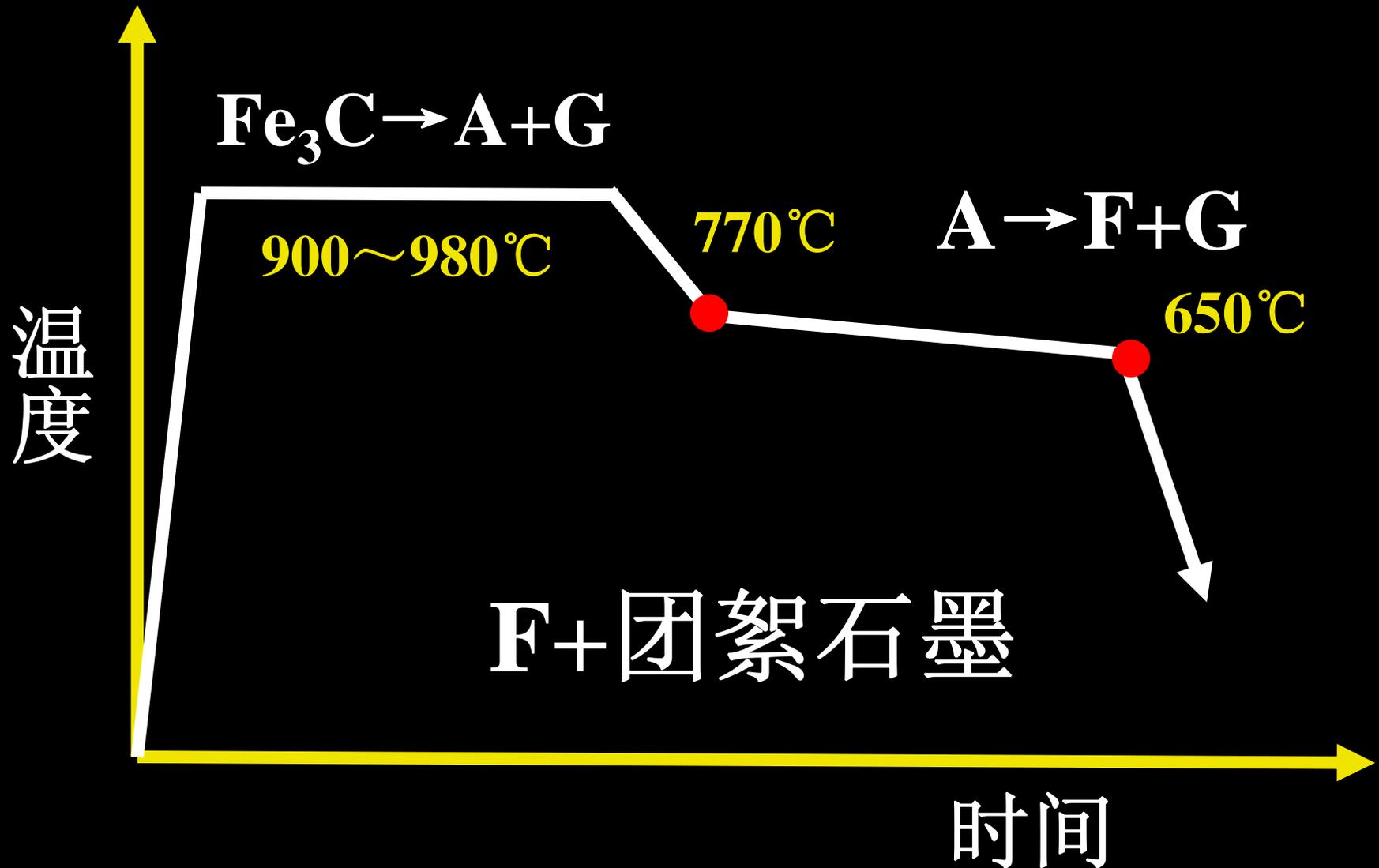


而得到团絮状石墨的一种铸铁。

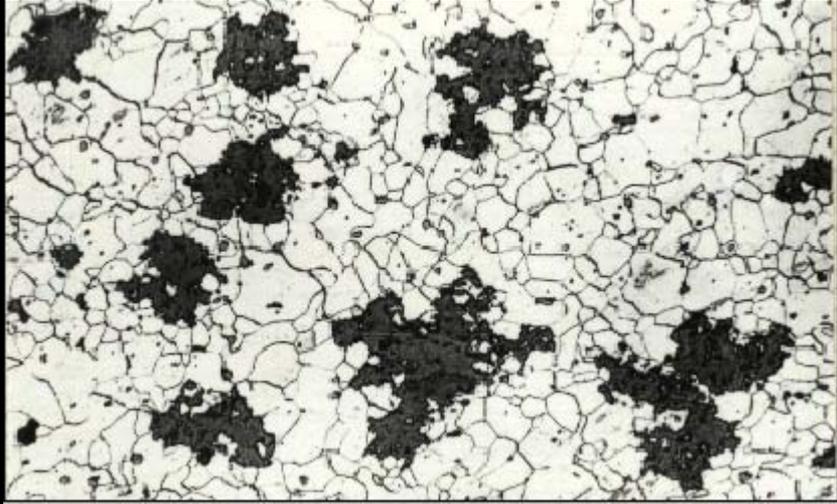
P可锻铸铁石墨化退火工艺



F可锻铸铁石墨化退火工艺



典型可锻铸铁的显微组织



材料：可锻铸铁
状态：铸造后950退火
侵蚀：4%硝酸酒精
倍数：100X
组织：铁素体+团絮状石墨



材料：可锻铸铁
状态：铸态
侵蚀：4%硝酸酒精
倍数：100X
组织：珠光体+铁素体+团絮状石墨

黑心可锻铸铁

白心可锻铸铁

性能

因石墨呈团絮状，对基体的切割作用小，故可锻铸铁具有高的强度、塑性和抗冲击能力。

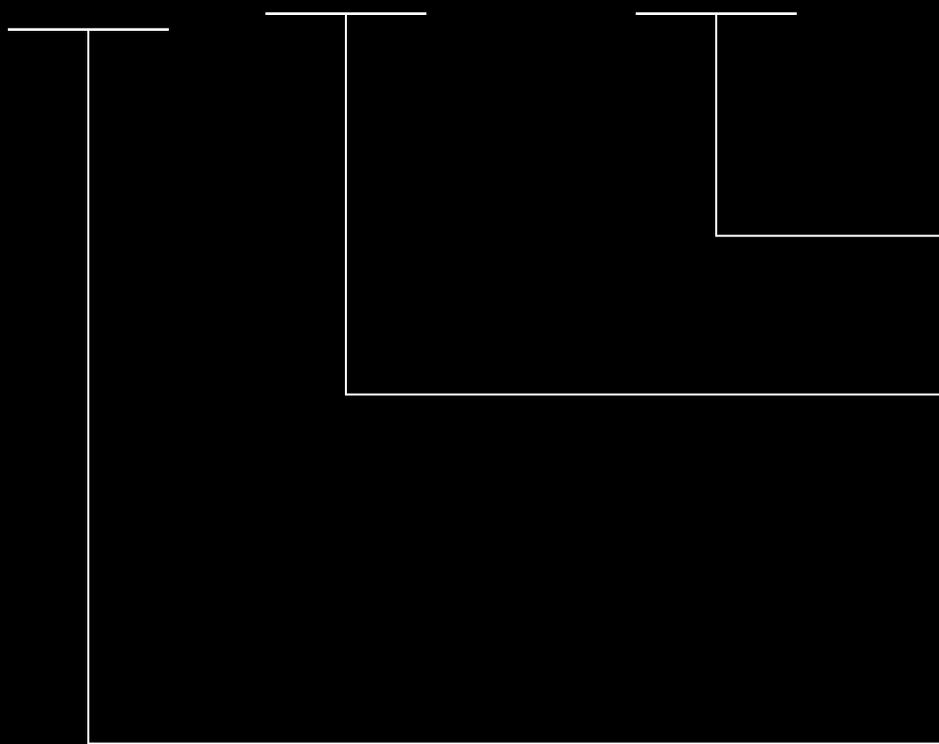
白心可锻铸铁生产工艺复杂，退火周期长，性能与黑心可锻铸铁相近，故应用少。

可锻铸铁的生产周期长，工艺复杂，成本高，已逐渐被球墨铸铁代替。

编号

GB/T9440-1988

KTH 350 — 10

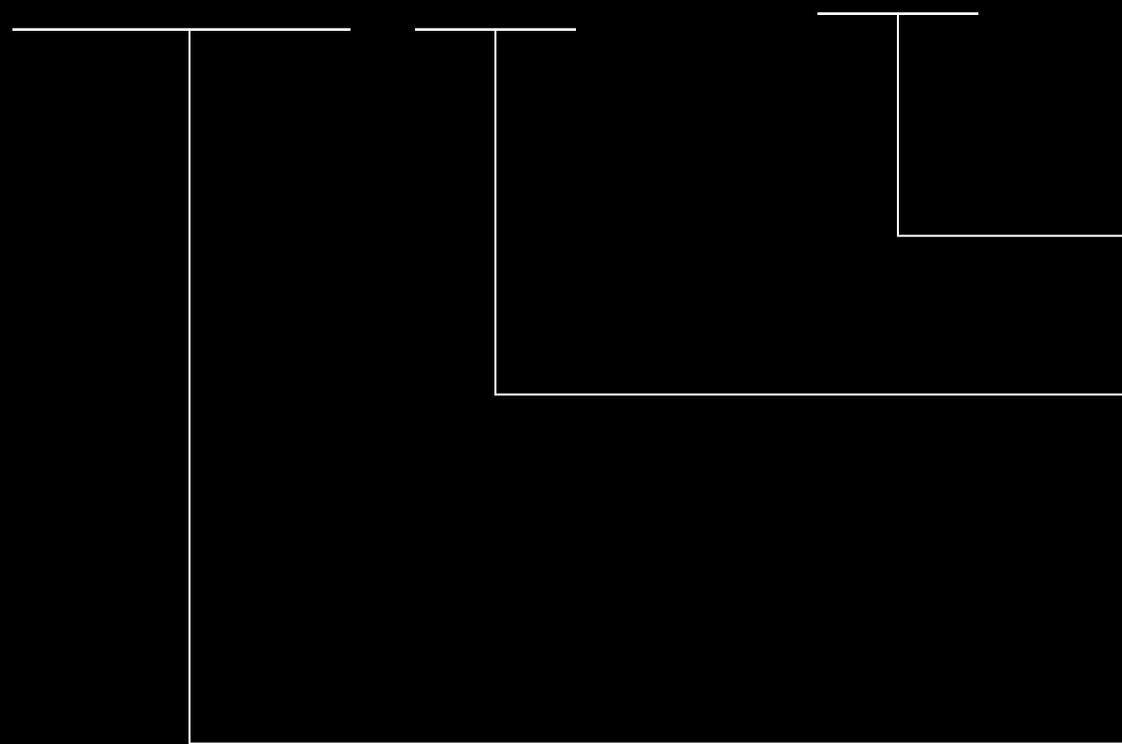


最低伸长率 %

最低抗拉强度,
MPa

黑心可锻铸铁

KTZ 550 - 04



最低伸长率 %

最低抗拉强度,
MPa

P可锻铸铁

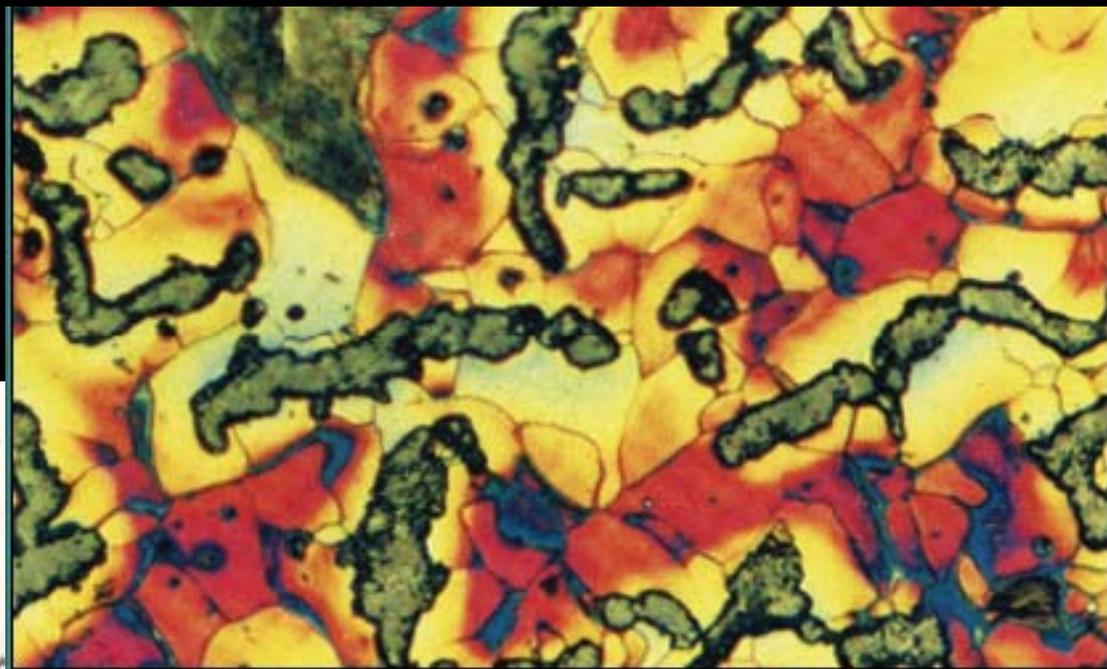
（四）蠕墨铸铁

介于片状石墨和球状石墨之间。

特点：保持了球墨铸铁塑、韧性好的特点。又具有灰铸铁良好的铸造性能及耐热性。

新型铸铁。

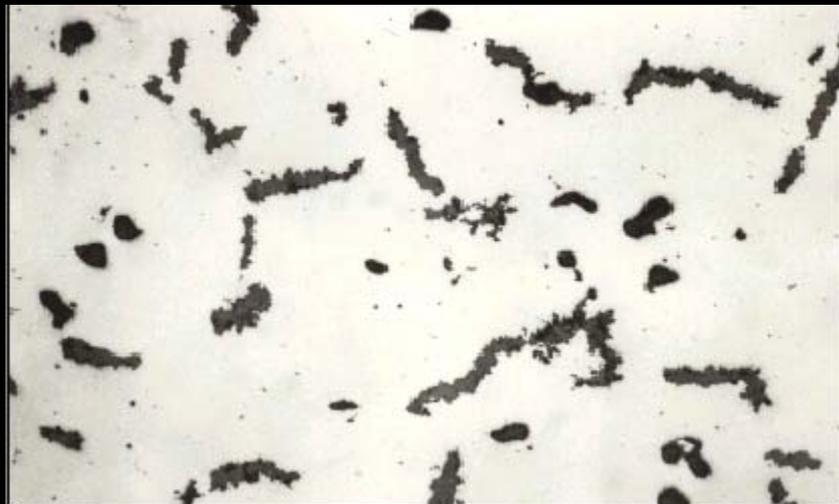
典型铸铁的显微组织



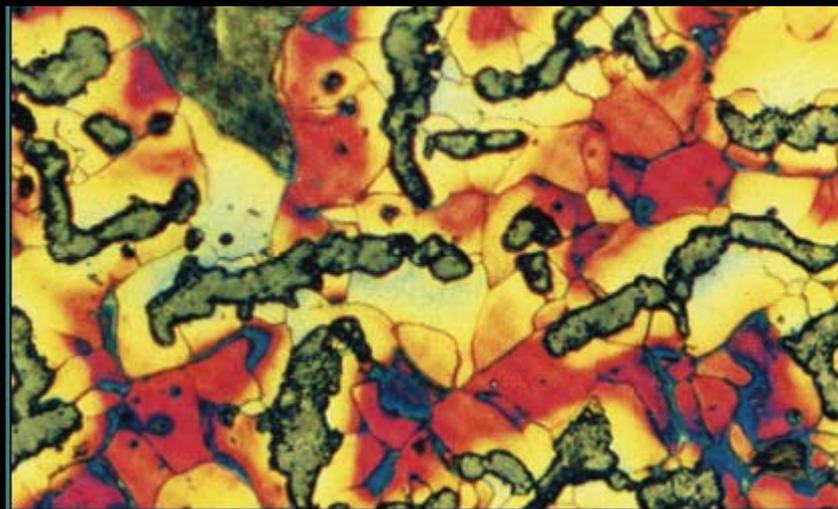
典型铸铁的显微组织1



典型铸铁的显微组织2



材料：灰铸铁
状态：铸态
侵蚀：抛光态
倍数：100X
组织：蠕虫状石墨



材料：蠕墨铸铁
状态：铸态
侵蚀：化染
倍数：150X
组织：珠光体+铁素体+片状石墨

典型铸铁的显微组织3



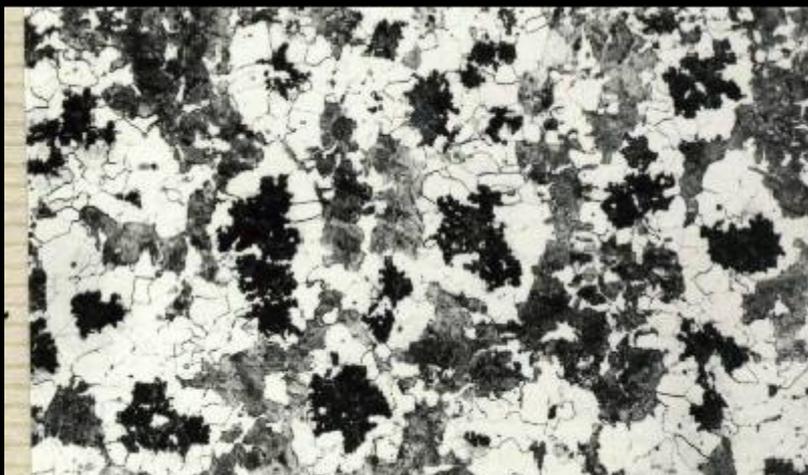
材料：可锻铸铁

状态：铸造后950退火

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：100X

组织：铁素体+团聚状石墨



材料：可锻铸铁

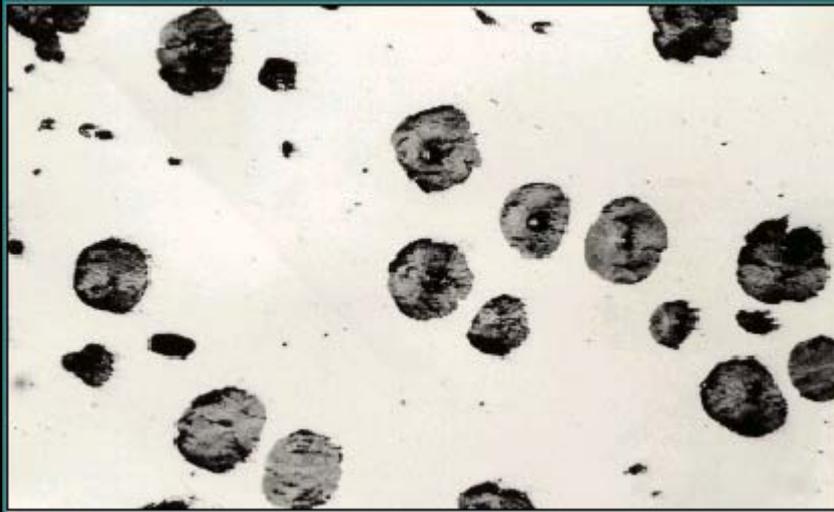
状态：铸态

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：100X

组织：珠光体+铁素体+团聚状石墨

典型铸铁的显微组织4



材料：球墨铸铁
状态：铸态
侵蚀：抛光态
倍数：100X
组织：球状石墨



材料：球墨铸铁
状态：铸造后退火
侵蚀：4%硝酸酒精
倍数：100X
组织：铁素体+球状石墨

典型铸铁的显微组织5



材料：QT60-2稀土镁球墨铸铁

状态：铸态

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：200X

组织：铁素体（白圈）与珠光体+球状石墨，亦称牛眼状石墨



材料：球墨铸铁

状态：铸态

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：500X

组织：珠光体+球状石墨

典型铸铁的显微组织6



材料：麻口铸铁

状态：铸态

侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：750X

组织：珠光体基体+片状石墨+莱氏体（上边白色块为离异渗碳体）



材料：麻口铸铁

状态：铸态

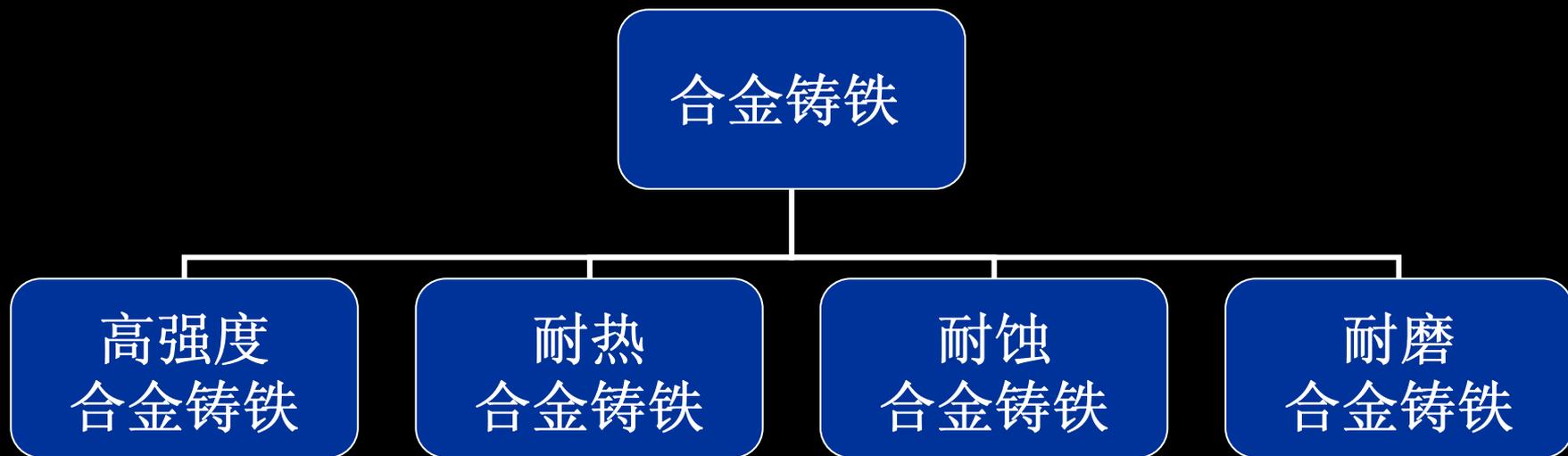
侵蚀：4%硝酸酒精

倍数：750X

组织：珠光体基体+片状石墨+莱氏体

三、合金铸铁

为了满足特种性能，在铸铁中加入合金元素，就形成合金铸铁。



(一) 高强度合金铸铁

加入少量的Cr、Ni、Cu、Mo等



基体中的P数量增加并细化P



提高铸铁的强度

常用铸铁

稀土镁钼系合金铸铁

稀土铜钼系合金铸铁

(二) 耐热合金铸铁

加入Al、Cr、Si等

- 1) 在铸铁表面形成致密的氧化膜，防止内氧化。
- 2) 得到单相F，防止 Fe_3C 分解。

常用铸铁

中硅球墨铸铁、高硅球墨铸铁、高铬耐热铸铁。

(三) 耐蚀合金铸铁

加入**Si**、**Al**、**Cr**、**Mo**、**Cu**、**Ni**等

- 1) 提高基体电极电位
- 2) 形成单相基体上分布着彼此孤立的石墨
- 3) 在铸件表面形成致密的氧化物。

常用铸铁

稀土高硅球墨铸铁、中铝耐蚀铸铁、高铬耐蚀铸铁。

(四) 耐磨合金铸铁

加入合金元素

1) 表面造成白口组织

2) 球化和孕育处理得到

$M + A_{\text{残}} + \text{碳化物} + \text{球状石墨}$

3) 加Cr、Mo 使得 $Fe_3C \rightarrow Cr_7C_3$ 、 $(Cr-Fe)_7C_3$

常用铸铁

高磷铸铁、磷铜钛铸铁、
铬钼铜铸铁。

要点总结

石墨化

孕育剂

球墨剂

铸铁

石墨化

高C

高Si

孕育剂

Si-Fe或

Si-Ca合金

球墨剂

Mg、Ca、
RE 等

五种常用铸铁

普通灰铸铁

孕育铸铁

球墨铸铁

蠕墨铸铁

可锻铸铁

组织: (F、P、F+P) + G

第八章

陶瓷材料

Ceramics

陶瓷材料指所有无机非金属材料。是用天然或人工合成的粉状化合物，经成型和高温烧结而制成的多晶固体材料。

第一节 概述

一、陶瓷材料的分类与生产

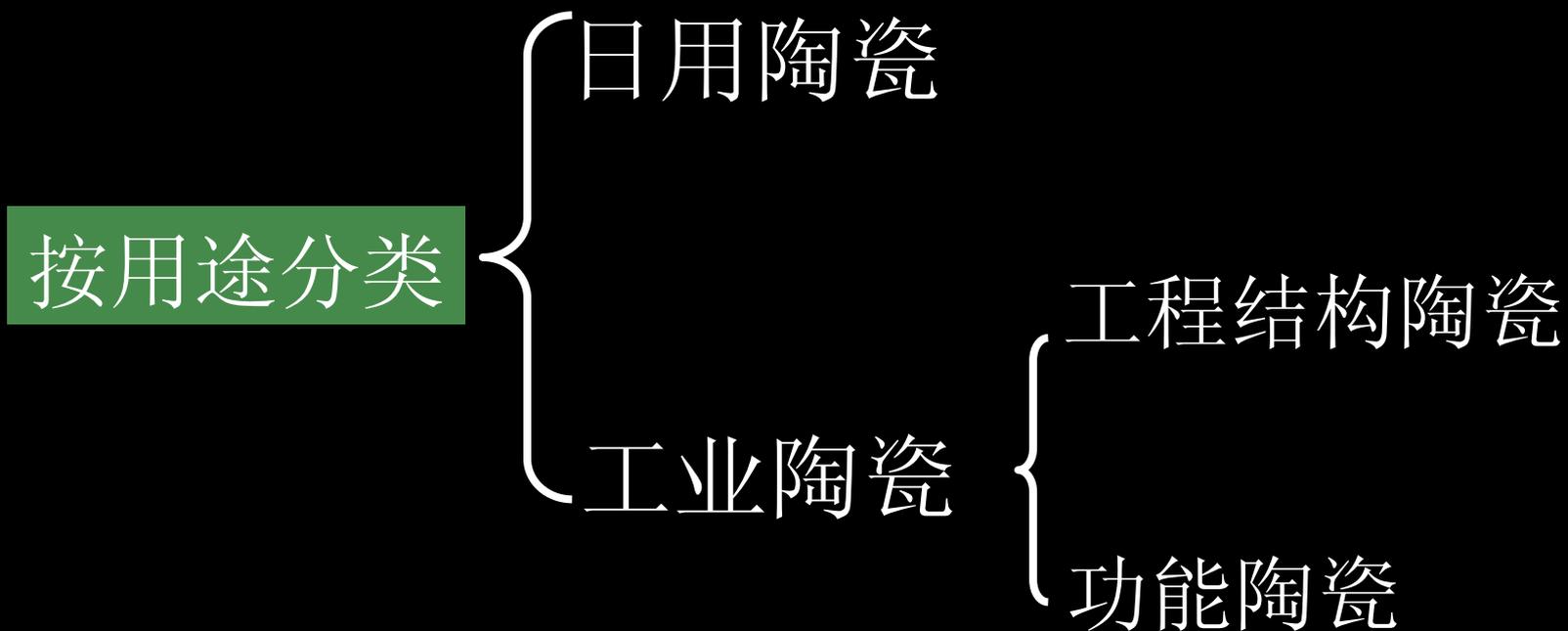
(一) 分类

按原料来源分：普通陶瓷、特种陶瓷

普通陶瓷又称传统陶瓷。以天然硅酸盐矿物为主要原料，如粘土、石英、长石等。主要制品有：日用陶瓷、建筑陶瓷、电器绝缘陶瓷、化工陶瓷、多孔陶瓷。

特种陶瓷是以纯度较高的人工合成化合物为主要原料的人工合成化合物。

如 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiC 、 Si_3N_4 、 BN 等。



按性能可将陶瓷分

- ✓ 高强度陶瓷
- ✓ 高温陶瓷
- ✓ 压电陶瓷
- ✓ 磁性陶瓷
- ✓ 半导体陶瓷
- ✓ 生物陶瓷

- 特种陶瓷可按化学组成为
 - ✓ 氧化物陶瓷
 - ✓ 氮化物陶瓷
 - ✓ 碳化物陶瓷
 - ✓ 金属陶瓷（硬质合金）

（二）陶瓷制品的生产

陶瓷制品的生产都要经过三个阶段：坯料制备、成型、烧结

- 坯料制备

通过机械或物理或化学方法制备粉料，在制备坯料时，要控制坯料粉的粒度、形状、纯度及脱水脱气，以及配料比例和混料均匀等质量要求。按不同的成型工艺要求，坯料可以是粉料、浆料或可塑泥团。

- 成型

将坯料用一定工具或模具制成一定形状、尺寸、密度和强度的制品坯型（亦称生坯）。

- 烧结

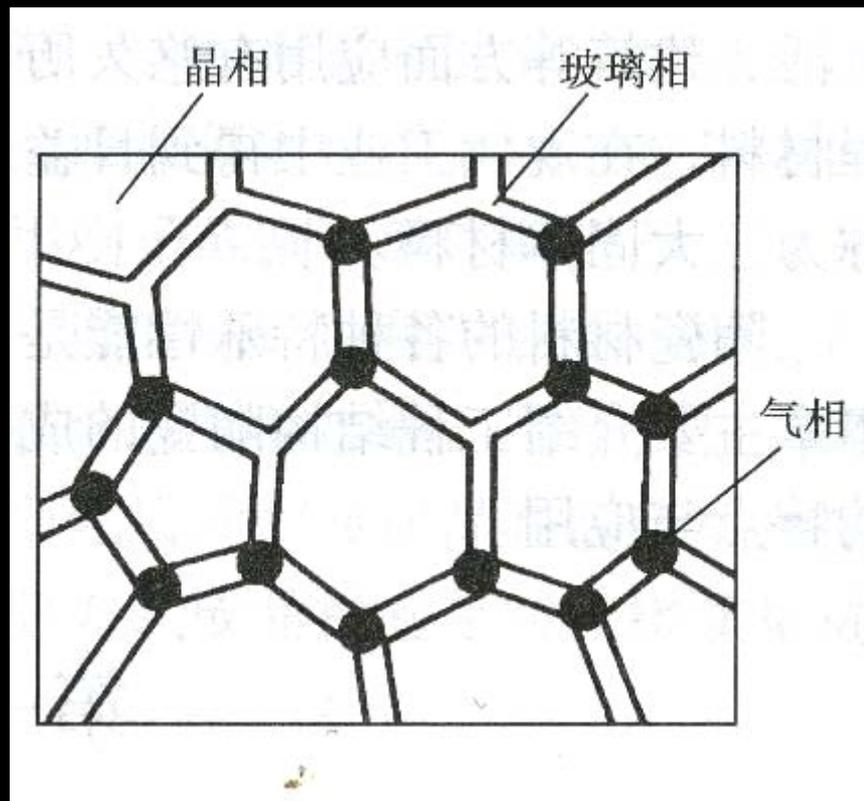
生坯经初步干燥后，进行涂釉烧结或直接烧结。高温烧结时，陶瓷内部会发生一系列物理化学变化及相变，如体积减小，密度增加，强度、硬度提高，晶粒发生相变等，使陶瓷制品达到所要求的物理性能和力学性能。

二、陶瓷材料的结构与性能特点

陶瓷材料是多相多晶材料，陶瓷结构中同时存在

- 晶体相
- 玻璃相
- 气相

各组成相的结构、数量、形态、大小及分布决定了陶瓷的性能。



(一) 陶瓷材料的结构

1. 晶相

晶相是陶瓷材料的主要组成相，对陶瓷的性能起决定性作用。

陶瓷中的晶相的结合键为

- 离子键
- 共价键
- 混合键

氧化物结构的结合键以离子键为主，又称离子晶体。

Si_3N_4 、 SiC 、 BN 等以共价键为主，称共价晶体。

氧化物结构的主要特点是氧离子紧密排列构成晶格骨架，组成六方或面心立方点阵，而正离子位于骨架的适当间隙之中。

如： CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 ZrO_2

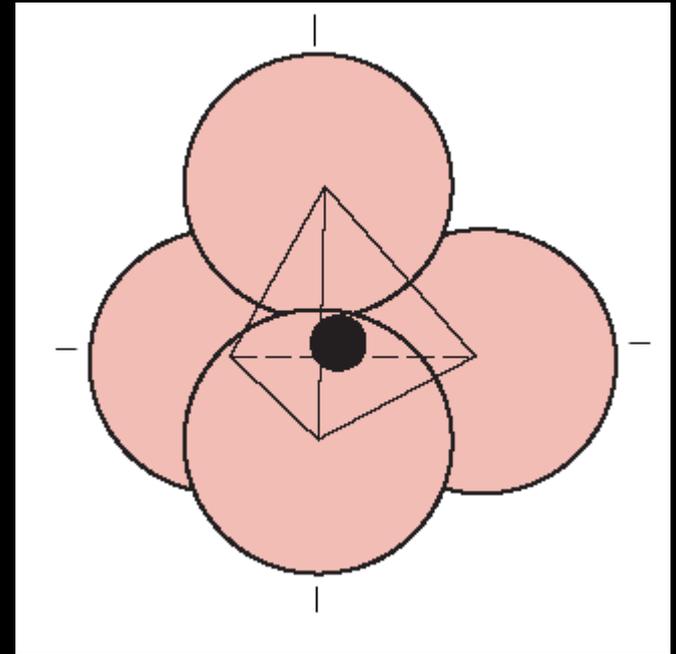
硅酸盐结构

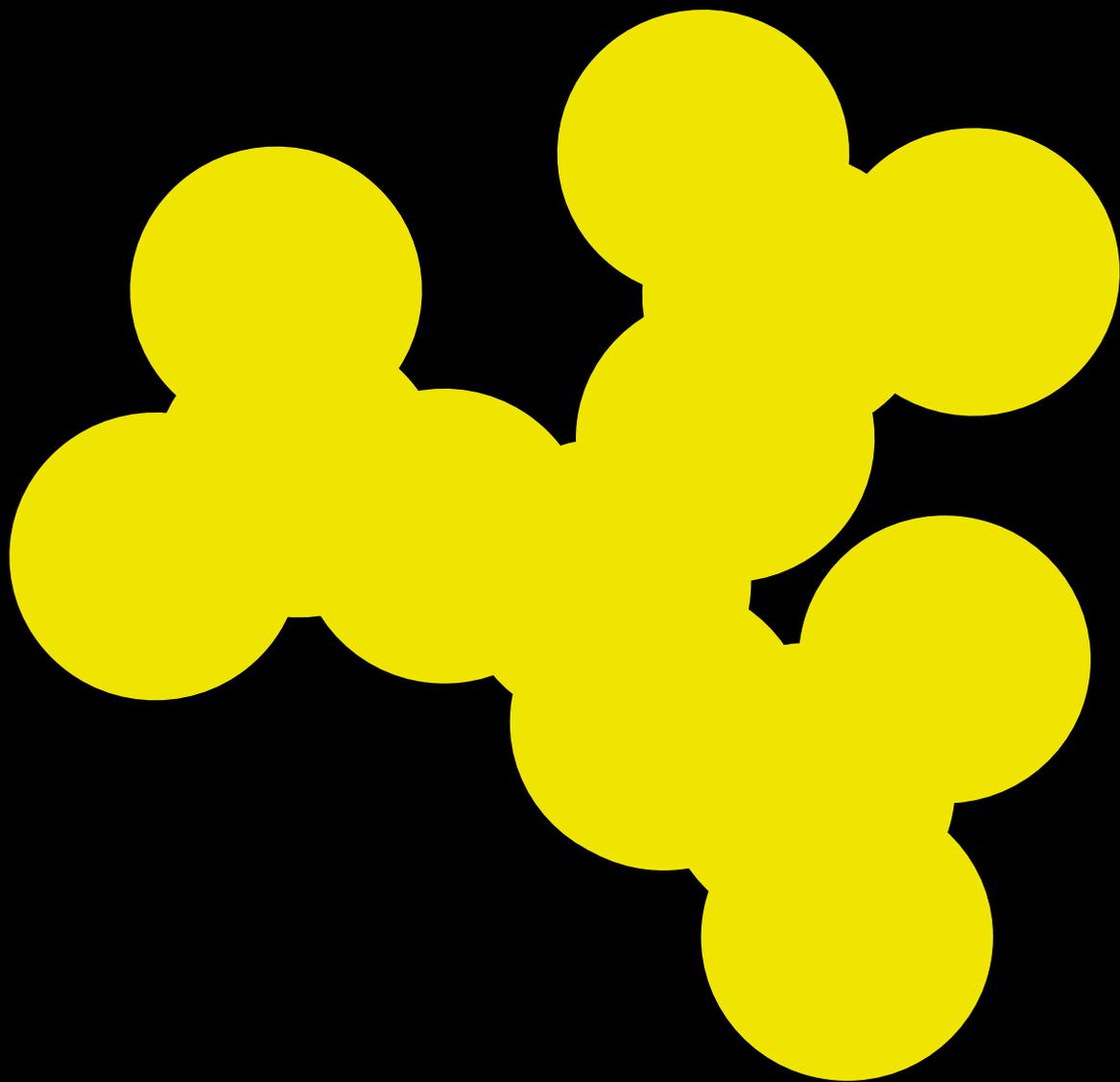
结构很复杂，但基本结构单元为 $[\text{SiO}_4]$ 硅氧四面体，结合键为离子键、共价键的混合键；

每个氧原子最多只有被两个 $[\text{SiO}_4]$ 所共有；

Si-O-Si的键角为 145° ；

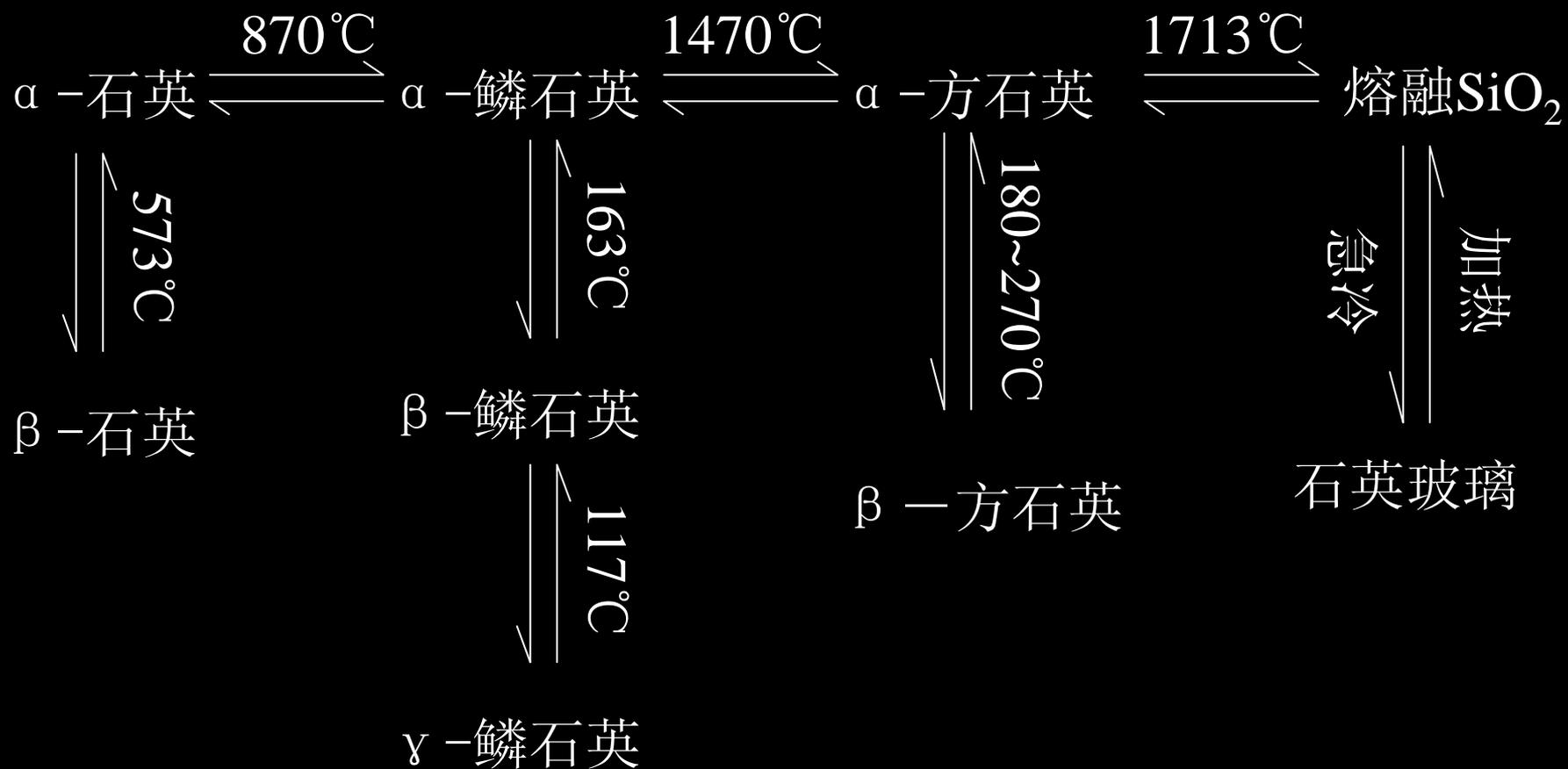
$[\text{SiO}_4]$ 既可孤立存在，亦可通过共用顶点连接成链状、平面或三维网状结构，故硅酸盐材料有无机高聚物之称。





- 有些陶瓷中的晶相也存在同素异构转变。

SiO₂的同素异构转变



- 实际陶瓷晶体与金属晶体一样也存在晶体缺陷，这些缺陷可加速陶瓷的烧结扩散过程，还影响陶瓷性能。
- 晶粒愈细，陶瓷的强度愈高。如刚玉（ Al_2O_3 ）晶粒平均尺寸为 $200\ \mu\text{m}$ 时，抗弯强度为 74MPa ， $1.8\ \mu\text{m}$ 时抗弯强度可高达 570MPa 。
- 陶瓷材料中往往同时存在多种晶相，对陶瓷性能起决定作用的晶相称主晶相，其余为次晶相。

2. 玻璃相

玻璃相是一种非晶态固体，是陶瓷烧结时，各组成相与杂质产生一系列物理化学反应形成的液相在冷却凝固时形成的。

玻璃相的作用

玻璃相是陶瓷材料中不可缺少的组成相。

- 将分散的晶相粘结在一起；
- 降低烧结温度；
- 抑制晶相的晶粒长大
- 填充气孔。

玻璃相熔点低、热稳定性差，在较低温度下开始软化，导致陶瓷在高温下发生蠕变，且其中常有一些金属离子而降低陶瓷的绝缘性。

故工业陶瓷中玻璃相的数量要予以控制，一般 $<20\sim 40\%$ 。

3. 气相

气相指陶瓷孔隙中的气体即气孔。是生产过程中不可避免的，陶瓷中的孔隙率常为5~10%，要力求使其呈球状，均匀分布。

气孔对陶瓷的性能有显著影响，使陶瓷强度降低、介电损耗增大，电击穿强度下降，绝缘性降低。

- 气相可使陶瓷的密度减小，并能吸收振动；
- 用作保温的陶瓷和化工用的过滤多孔陶瓷等需要增加气孔率，有时气孔率可高达60%。

(二) 陶瓷的性能

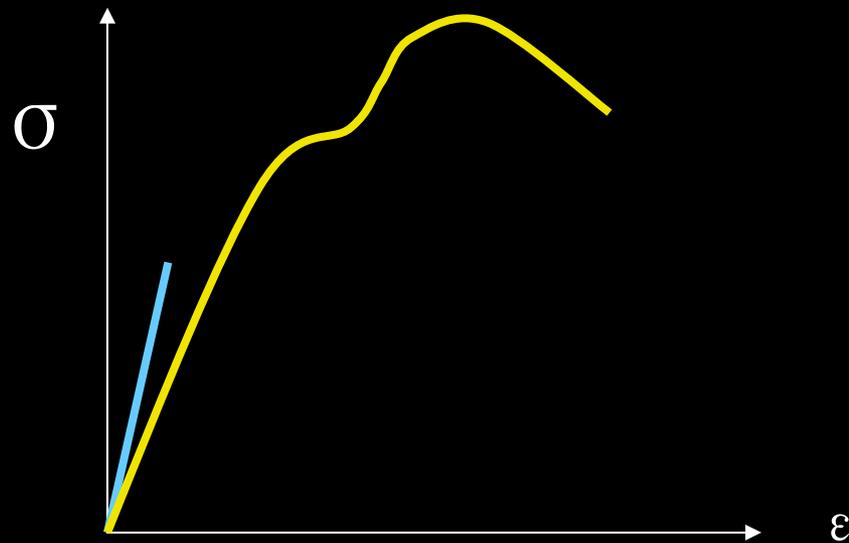
1. 力学性能

- 硬度高、耐磨性好；
>1500Hv （淬火钢 500~800Hv，高聚物 <20Hv）
- 抗拉强度低，抗压强度较高；
因表面及内部的气孔、微裂纹等缺陷，实际强度仅为理论强度的1/100~1/200。但抗压强度高，为抗拉强度的10~40倍。

- 高弹性模量，高脆性。

$E=100\sim 400\text{GPa}$ （金属210）

在拉伸时几乎没有塑性，在拉力作用下产生一定的弹性变形后直接断裂。



- 冲击韧性、断裂韧性低
 K_{IC} 约为金属的1/60~1/100

几种材料的断裂韧性

材料	K_{IC} /MPa.m ^{1/2}
45钢	90
球墨铸铁	20~40
氮化硅陶瓷	3.5~5

2. 物理与化学性能

- 熔点高

一般在 2000°C 以上，故陶瓷高温强度和高温蠕变抗力优于金属。

- 热胀系数小、热导率低

随气孔率增加，陶瓷的热胀系数、热导率降低，故多孔或泡沫陶瓷可作绝热材料。

热振性差。

- 有些陶瓷具有特殊的光学性能

红宝石（ α - Al_2O_3 掺铬离子）、钇铝石榴石、含钕玻璃等可作固体激光材料；玻璃纤维可作光导纤维材料，此外还有用于光电计数、跟踪等自控元件的光敏电阻材料。

- 磁性

磁性陶瓷又名铁氧体或铁淦氧，主要是 Fe_2O_3 和Mn、Zn等的氧化物组成的陶瓷材料，为磁性陶瓷材料，可用作磁芯、磁带、磁头等。

- 结构稳定

化学稳定性高，抗氧化性优良，在 1000°C 高温下不会氧化，并对酸、碱、盐有良好的抗蚀性。故在化工工业中广泛应用。

8.2 工程结构陶瓷材料

一、普通陶瓷

又称传统陶瓷、粘土陶瓷。这种陶瓷以天然硅酸盐矿物，如粘土、长石、石英等为主要原料配制、烧结而成的。

主晶相为莫来石晶体（ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ），占25~30%，次晶相为 SiO_2 ；

玻璃相约为35~60%；

气相为1~3%。

性能特点

- 硬度高，不会氧化生锈，不导电，耐1200℃高温，加工成型性好，成本低廉。
- 玻璃相较多，强度较低，在较高温度下易软化，故耐高温及绝缘性不及其它陶瓷。

应用

- 日用陶瓷
- 工业上主要用作绝缘的电瓷绝缘子和耐酸、碱的容器、反应塔管道等，还可用于受力不大，工作温度在 200°C 以下的结构零件。

二、特种陶瓷

（一）氧化铝陶瓷

- 以 Al_2O_3 为主要成分，含少量 SiO_2 的陶瓷。
- 根据 Al_2O_3 含量不同，分为
75瓷（ $w_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 75\%$ ）又称刚玉-莫来石瓷；
95瓷、99瓷，又称刚玉瓷。
- Al_2O_3 含量愈高，玻璃相愈少，气孔愈少，陶瓷的性能愈好，但工艺愈复杂，成本愈高。

- 氧化铝陶瓷的强度高，是普通陶瓷的2~6倍，抗拉强度可达250MPa；
- 耐磨性好，硬度次于金刚石、碳化硼、立方氮化硼和碳化硅，居第5；
- 耐高温性能好，刚玉陶瓷可在1600℃下长期工作，在空气中的最高使用温度达1980℃；
- 耐蚀性和绝缘性好；
- 脆性大，抗热振性差，不能承受环境温度的突然变化。

- 主要用于制作内燃机火花塞，火箭、导弹的导流罩，石油化工泵的密封环，耐磨零件，如轴承、纺织机上的导纱器，合成纤维用的喷嘴等，作冶炼金属用的坩埚等。

（二）氮化硅陶瓷

- 以 Si_3N_4 为主要成分；按生产工艺不同，分为热压烧结氮化硅陶瓷和反应烧结氮化硅陶瓷；
- 热压烧结氮化硅陶瓷

以 Si_3N_4 粉为原料，加入少量添加剂，装入石墨模具中，在 $1600\sim 1700^\circ\text{C}$ 高温和 $20\sim 30\text{MPa}$ 的高压下烧结成型，得到组织致密，气孔率接近0的氮化硅陶瓷。因受石墨模具所限制，只能加工形状简单的制品。

- 反应烧结氮化硅陶瓷

以硅粉或硅粉与 Si_3N_4 粉的混合料，压制成型后，放入渗氮炉中进行渗氮处理，直到所有的硅都形成氮化硅，得到尺寸相当精密的氮化硅制品。但此制品中有20~30%的气孔，故强度不及热压烧结制品，与95瓷相近。

性能优异，易于加工。

性能特点

- 硬度高，摩擦系数小（0.1~0.2），有自润滑性，是极优的耐磨材料；
- 蠕变抗力高，热胀系数小，抗热振性能在陶瓷中是最好的；
- 化学稳定性好，除氢氟酸外，能耐各种酸、王水和碱液的腐蚀，也能抗熔融金属的侵蚀；
- 因氮化硅是共价键晶体，既无自由电子也无离子，具有优异的电绝缘性能。

应用

- 反应烧结氮化硅陶瓷主要用于耐磨、耐高温，耐腐蚀，形状复杂且尺寸精度高的制品。如石油化工泵的密封环、高温轴承、热电偶套管、燃气轮机转子叶片等；
- 热压烧结氮化硅陶瓷用于制造形状简单的耐磨、耐高温零件和工具。如切削刀具、转子发动机刮片、高温轴承等。

(三) 碳化硅陶瓷

- 主晶相SiC，有反应烧结和热压烧结两种碳化硅陶瓷；
- 高温强度高，工作温度可达1600~1700℃
1400℃时，抗弯强度为500~600MPa；
- 有很好的导热性、热稳定性、抗蠕变能力、耐磨性、耐蚀性，且耐辐射；
- 是良好的高温结构材料，主要用于制作火箭喷管的喷嘴，浇注金属的浇道口、热电偶套管、炉管，燃气轮叶片，高温轴承，热交换器及核燃料包封材料等。

（四）氮化硼陶瓷

- 主晶相BN，共价晶体，晶体结构为六方结构，有白石墨之称；
- 良好的耐热性和导热性，热导率与不锈钢相当，热胀系数比金属和其它陶瓷低得多，故抗热振性和热稳定性好；
- 高温绝缘性好，2000℃仍是绝缘体，是理想的高温绝缘材料和散热材料；
- 化学稳定性高，能抗Fe、Al、Ni等熔融金属的侵蚀；
- 硬度较其它陶瓷低，可切削加工；
- 有自润滑性，耐磨性好。

- 氮化硼陶瓷常用于制作热电偶套管，熔炼半导体、金属的坩埚和冶金用高温容器和管道，高温轴承，下班制品成型模，高温绝缘材料；
- 因BN中含 $w_B=43\%$ ，有很大的吸收中子的截面，可作核反应堆中吸收热中子的控制棒。

氧化镁陶瓷

氧化锆陶瓷

氧化铍陶瓷

不同种类的特种陶瓷，各具不同的优异性能，但作为主体结构材料，其共同的弱点是：**塑性、韧性差，强度低**

8.3 金属陶瓷

以金属氧化物或碳化物为主要成分，加入适量的金属粉末，通过粉末冶金的方法制成的，具有某些金属性质的陶瓷。

金属陶瓷是金属切削刀具、模具和耐磨零件的重要材料。

一、粉末冶金方法及其应用

- 金属材料的制备：熔炼、铸造
- 高熔点的金属及金属化合物难以通过熔炼或铸造的方法制备

粉末冶金：陶瓷生产工艺在冶金中的应用

粉末冶金

粉末制备



压制成型



烧结成零件或毛坯

（一）粉末冶金法的基本工艺过程

1. 粉末制备

包括粉末制取、配料、粉料混合等步骤。

粉末的纯度、粒度、混合的均匀程度等对粉末冶金制品的质量有重要影响。

粉末愈细、愈均匀、纯度愈高，陶瓷的性能愈好。

2. 压制成型

多采用冷压法，即将粉料装入模具型腔内，在压力机下压制成致密的具有一定强度的坯体。

为了改善粉末的可塑性和成型性，通常在粉料中会加入一定比例的增塑剂，如汽油橡胶溶液、石蜡等。

3. 烧结

将压制成型的坯体放入通过保护气氛的高温炉或真空炉中进行烧结，在保持至少一种组元仍处于固态的烧结温度下，长时间保温，通过扩散、再结晶、化学反应等过程，获得与一般合金相似的组织，并存在一些微小的孔隙的粉末冶金制品。

根据烧结过程中有无液相产生，烧结分为：固相烧结和液相烧结。

- 固相烧结：在烧结时不形成液相。

无偏析高速钢、烧结铝（Al-Al₂O₃）、烧结钨、青铜—石墨、铁—石墨等

- 液相烧结：在烧结时形成部分液相的液-固共存状态。

金属陶瓷硬质合金（WC-Co、WC-TiC-Co等）、高速钢—WC、铬钼钢—WC等

4. 后处理加工

为改善或得到某些性能，有些粉末冶金制品在烧结后还要进行后处理加工。

如齿轮、球面轴承等在烧结后再进行冷挤压，以提高其密度、尺寸精度等；铁基粉末冶金零件进行淬火处理，以提高硬度等等。

（二）粉末冶金的应用

- 减摩材料 含油轴承

利用粉末冶金材料的多孔性，将材料浸在润滑油中，在毛细力作用下，可吸附大量润滑油（一般含油率达12~30%），从而减摩。常用含油轴承材料有铁基（Fe+石墨、Fe+S+石墨）和铜基（Cu+Sb+Pb+Zn+石墨）

- 结构材料

用碳钢或合金钢的粉末为原料，采用粉末冶金方法制造结构零件。这种零件的精度较高、表面光洁，不须或少须切削加工即为成品零件。

- 高熔点金属材料

W、Mo、WC、TiC等金属及金属化合物熔点高 ($>2000^{\circ}\text{C}$)，用熔炼和铸造方法生产较难，且不易保证其纯度和冶金质量。

这些材料可以通过粉末冶金生产，如各种金属陶瓷、钨丝及Mo、Ta、Nb等难熔金属和高温合金。

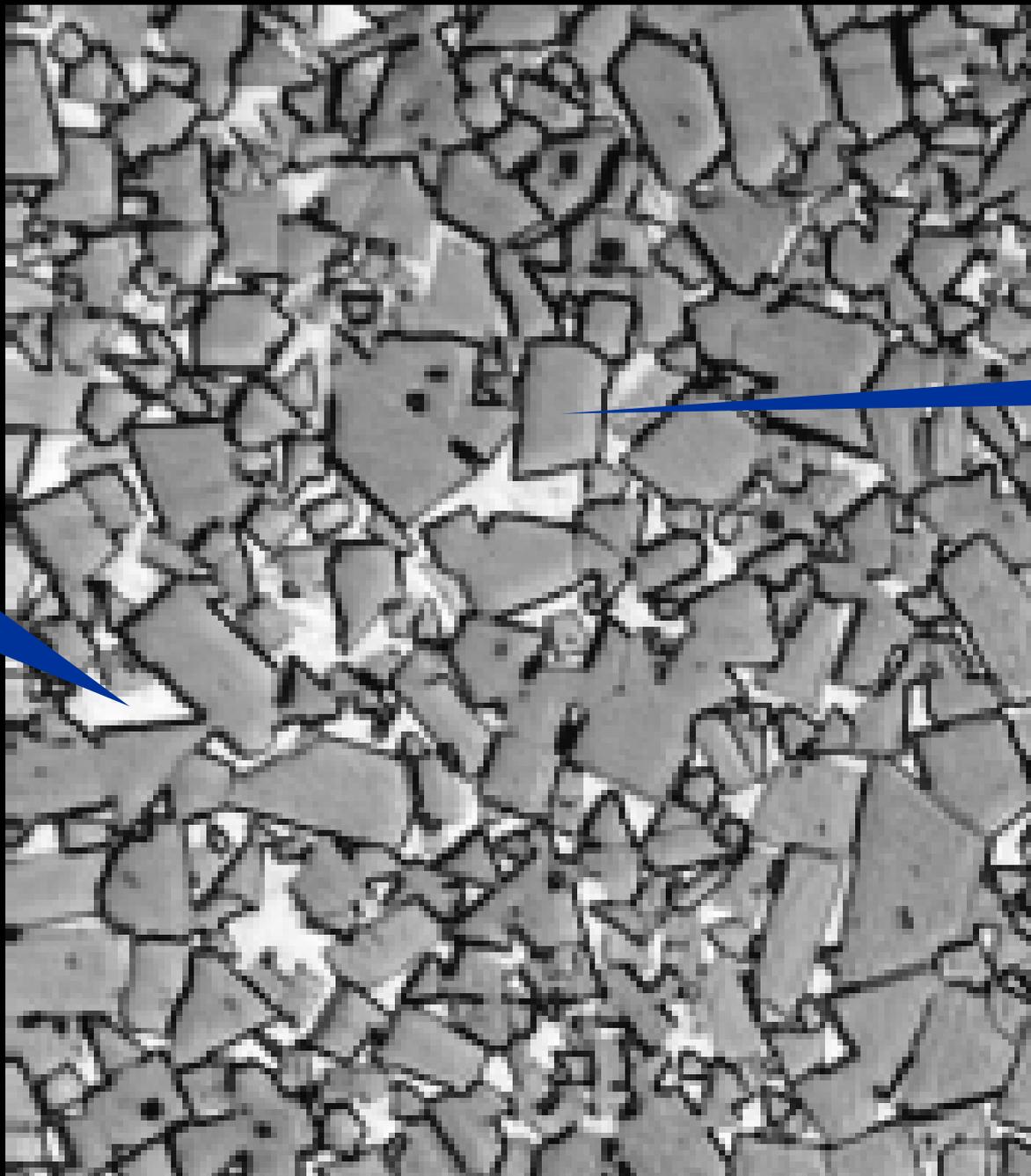
- 特殊电磁性能材料

如硬磁材料、软磁材料，多孔过滤材料，假合金材料

二、金属陶瓷硬质合金

硬质合金是金属陶瓷的一种，它是以金属碳化物（WC、TiC、TaC等）为基体，再加入适量的金属粉末（如Co、Ni、Mo等）作为粘结剂制成的，具有金属性质的粉末冶金材料。

Co
基体



WC

（一）硬质合金的性能特点

① 高硬度、高热硬性、耐磨性好（主要特点）

因以碳化物为骨架，常温下硬度69~81 HRC，热硬性达900~1000℃，作为切削刀具，其耐磨性、寿命和切削速度比高速钢显著提高。

② 力学性能

抗压强度高（6000MPa），抗弯强度低（只有钢的1/3~1/2），弹性模量高（是高速钢的2~3倍），韧性差（约为淬火钢的30~50%）

③ 耐蚀性、抗氧化性好，热胀系数比钢低

- 因抗弯强度低、脆性大、导热性差，故在加工、作用过程中要避免冲击和温度急剧变化；
- 硬度高，无法进行切削加工，可采用电加工（电火花、线切割）和专门砂轮磨削加工。

(二) 硬质合金的分类、编号和应用

1. 分类与编号

常用硬质合金按成分和性能特点分为三类

- 钨钴类硬质合金
- 钨钴钛类硬质合金
- 通用硬质合金

① 钨钴类硬质合金

由WC和Co组成

代号：YG×

YG—“硬”、“钴”，×—钴的含量。

如：YG6表示 $w_{Co}=6\%$ ，余量为WC的钨钴类硬质合金

② 钨钴钛类硬质合金

由WC、TiC和Co组成

代号：YT×

YT—“硬”、“钛”，×—TiC含量

如：YT15表示 $w_{TiC}=15\%$ ，余量为WC和Co的钨钴钛类硬质合金

- 在硬质合金中，WC越多，Co越少，则硬度、热硬性及耐磨性越高，但强度及韧性越低。
- 当Co含量相同时，含TiC的硬质合金硬度、耐磨性高，且因合金表面有一层TiO薄膜，切削时不易粘刀，热硬性高；但强度和韧性比钨钴类硬质合金低。

③ 通用硬质合金

添加TaC或NbC取代部分TiC

代号：YW×

YW—“硬”、“万”；×—顺号

热硬性高（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ），其它性能介于上两类之间。既可加工钢材，又能加工铸铁和有色金属，故称通用或万能硬质合金。

2. 应用

主要用于制造切削刀具、冷作模具、量具和耐磨零件。

- 钨钴类硬质合金刀具主要用来切削加工脆性材料，如铸铁、有色金属、胶木及其它非金属材料；
- 钨钴钛类硬质合金主要用来切削加工韧性材料，如各种钢。
- 含Co量多的硬质合金韧性好，适宜粗加工，含Co量少的适于精加工。
- 通用硬质合金既可切削脆性材料，亦可加工韧性材料

(三) 钢结硬质合金

以一种或几种碳化物（WC、TiC）为硬化相，以合金钢（高速钢、铬钼钢）粉末为粘结剂，经配料、压型、烧结而成的一种新型硬质合金。

与普通硬质合金相比，钢结硬质合金可锻造、焊接、热处理，并可切削加工。

在锻造退火后，其硬度约40~45HRC，可用一般方法切削加工，加工成型后，经淬火+低温回火，硬度达69~73HRC。

- 使用寿命与钨钴类硬质合金相当；
- 可用于制造形状复杂的刀具，如麻花钻、铣刀。
- 可用于制造在较高温度下工作的模具和耐磨零件。

第九章

复合材料

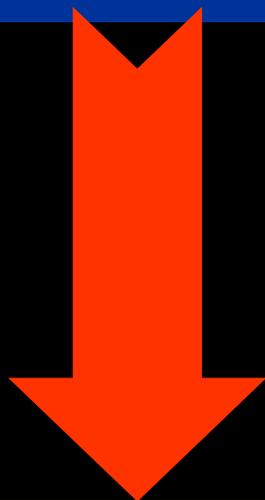
Composite

在现代工程中对材料的要求越来越苛刻，特别是在航天、航海及交通运输领域。

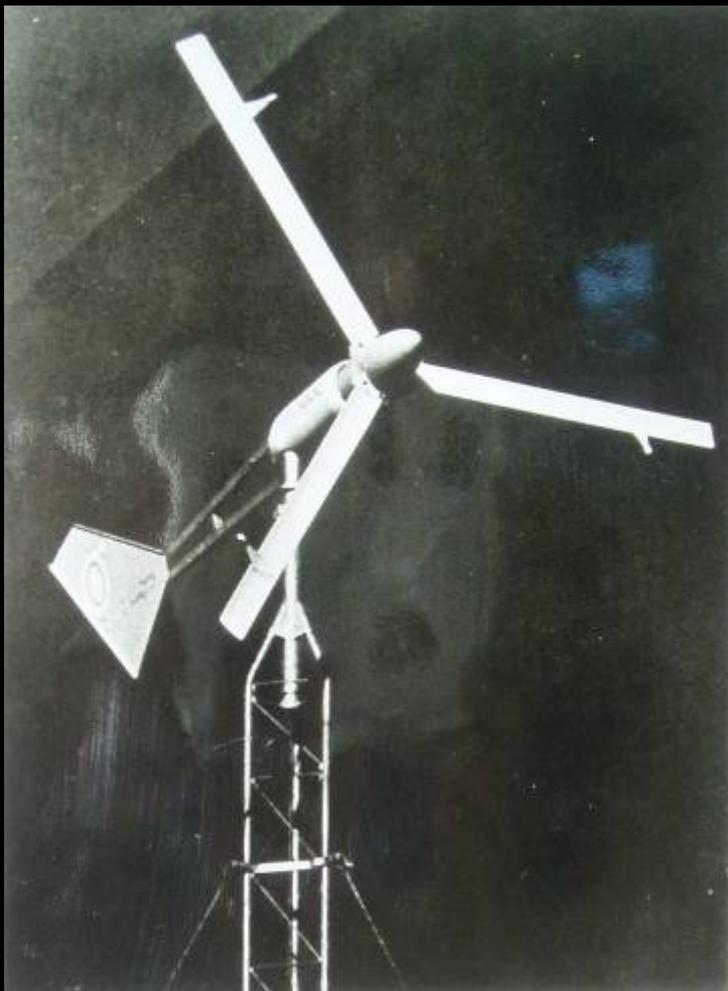
例如，要求飞机结构材料既有低的密度，又具有高的强度、刚度、韧性、耐磨及耐蚀性。

通常高强度材料的密度也高，增大强度或刚度则会降低材料的韧性。

这种材料优异性能的组合
是单一材料无法满足的。



复合材料



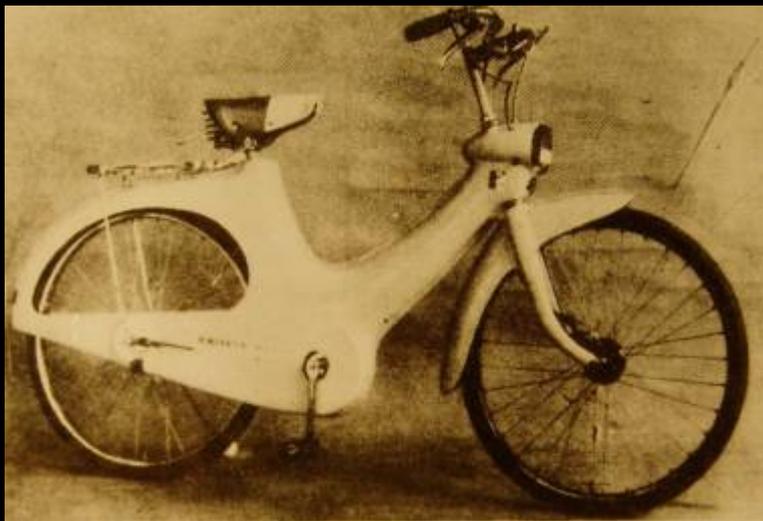
玻璃纤维增强风机叶片



玻璃纤维增强尼龙车轮

Tuff Wheel Made of Glass





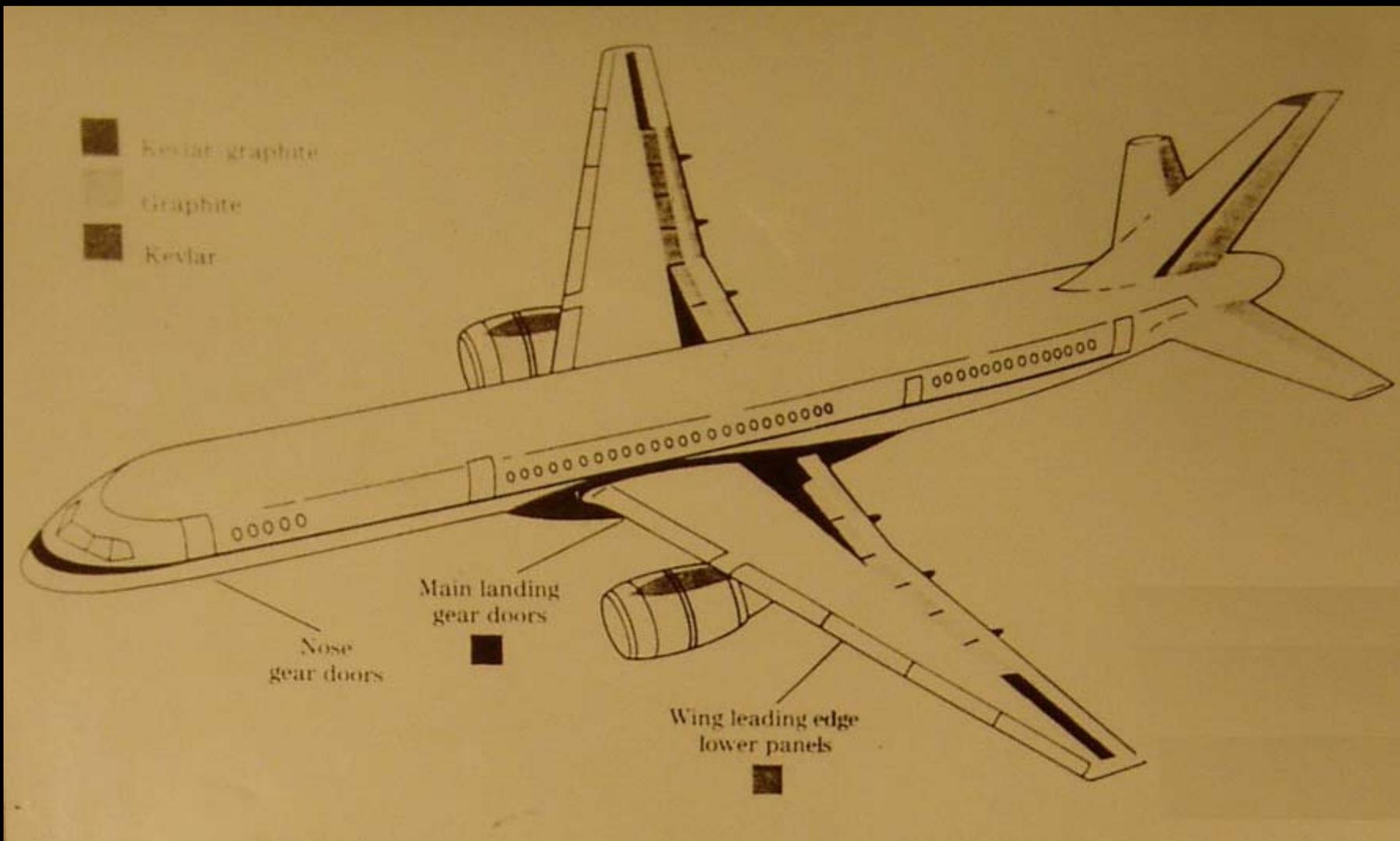
玻璃纤维增强塑料制自行车



复合材料制小船



复合材料制防弹衣



复合材料在波音飞机上的应用

本章内容

第一节 概述

- 分类
- 性能特点

第二节 增强材料及其增强机制

- 增强材料
- 增强机制

第三节 常用复合材料

复合材料应用实例（2）

第一节 概述

复合材料 两种或者两种以上的不同性质的材料，通过不同的工艺方法人工合成的多相材料。

特点

复合材料既保持组成材料各自的最佳特性，又具有组合后的新特性。

例1:

热固性玻璃钢 = 热固性树脂 + 玻璃纤维

材料	断裂能/ J
玻璃纤维	7.5×10^{-4}
常用树脂	2.26×10^{-2}
热固性玻璃钢	17.6

热固性玻璃钢： 强度高于热固性树脂
脆性低于玻璃纤维

例2：建筑材料（复合材料的应用）

- 泥土 + 稻草
- 水泥 + 钢筋

一、复合材料的分类

复合材料种类繁多，目前尚无统一的分类方法。

按基体相的性质分

金属基复合材料

铝基复合材料
钛基复合材料
铜基复合材料

非金属基复合材料

塑料基复合材料
橡胶基复合材料
陶瓷基复合材料

按增强相的形态分

纤维增强复合材料

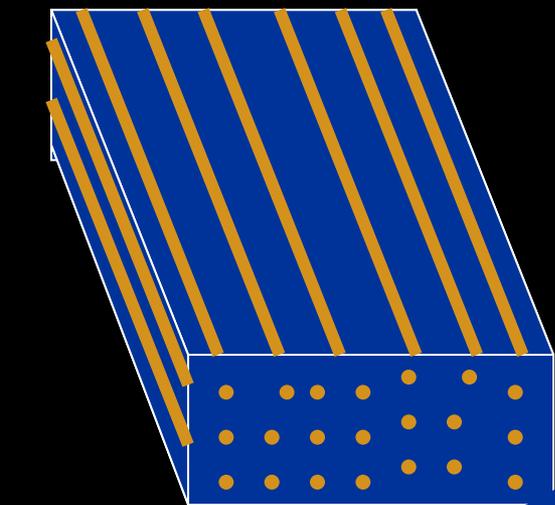
纤维增强塑料（玻璃钢）
纤维增强橡胶（轮胎）
纤维增强陶瓷
纤维增强金属

颗粒增强复合材料

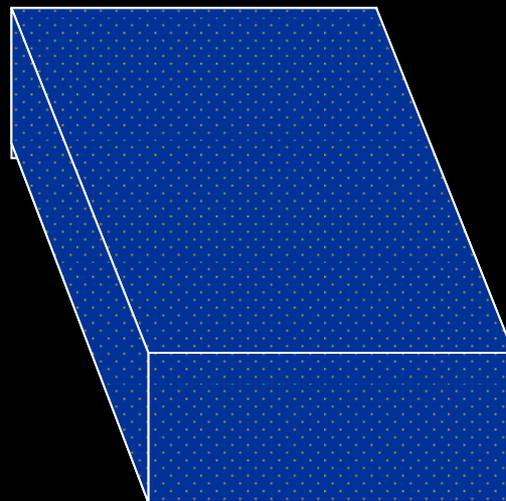
金属陶瓷
弥散强化金属

叠层复合材料

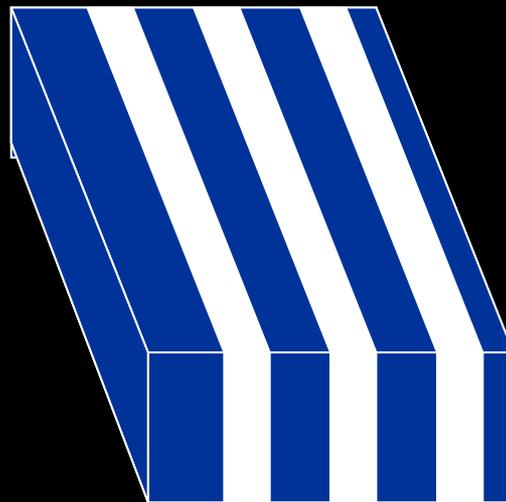
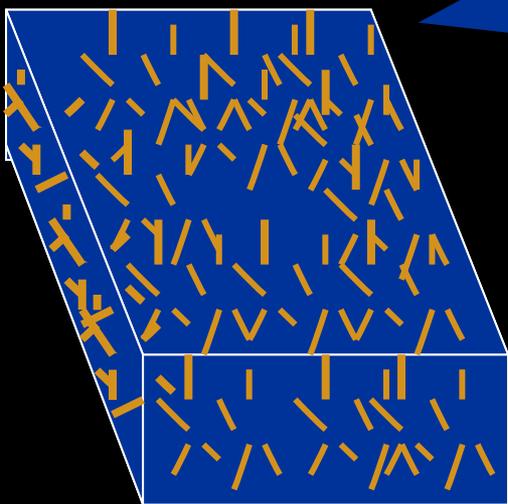
双层金属复合材料
三层复合材料



纤维增强复合材料



颗粒增强复合材料



叠层
复合材料

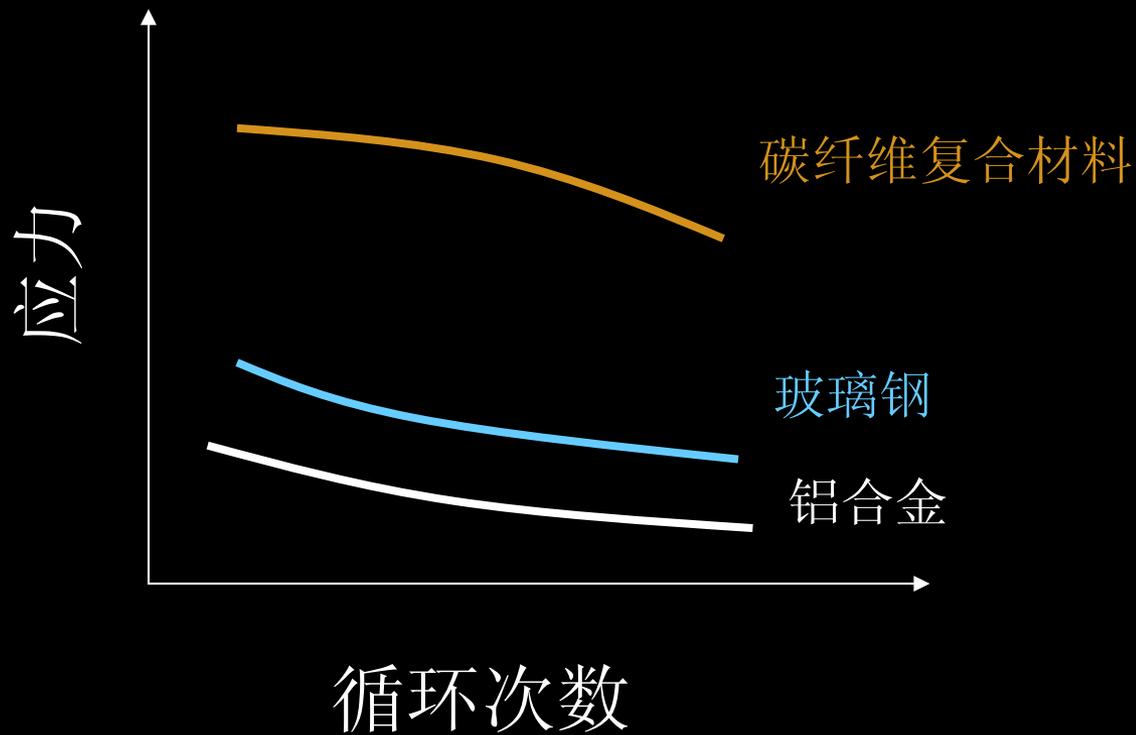
二、复合材料的性能特点

1. 比强度和比模量高

纤维增加材料的比强度及比模量远高于金属材料，特别是碳纤维—环氧树脂复合材料比强度是钢的8倍，比模量是钢的4倍。

2. 抗疲劳和破断安全性好

纤维增强复合材料对缺口及应力集中的敏感性小，纤维与基体界面能阻止疲劳裂纹的扩展，改变裂纹扩展的方向。



复合材料具有较高的疲劳强度。实验表明： $\sigma_r = 70 \sim 80\% \sigma_b$ ，而钢的疲劳强度只有抗拉强度的40~50%。

纤维复合材料平均几千到几万根纤维/cm²，即使有少数纤维断裂亦不会影响到其承载能力，故破断安全性好。

3. 高温性能优良

大多数增强纤维在高温下仍保持高的强度，如铝合金在400℃时弹性模量已降至近于0，而碳纤维增强后，在此温度下强度和弹性模量基本未变。

4. 减振性能好

复合材料的比模量大，故自振频率也高，可避免构件在工作状态下产生共振。

纤维与基体界面有吸收振动能量的作用，所以纤维增强复合材料具有很好的减振性能。

第二节 增强材料及其增强机制

复合材料是一种由基体matrix 和增强相reinforced phase 组成的多相材料，通常基体为连续相，而增强相为分散相。

复
合
材
料

基体

金属材料、高分子材料、
陶瓷材料

增强相

颗粒增强材料、纤维增强材料、
片状增强材料

一、增强材料

（一）纤维增强材料

增强效果最明显、应用最广。
主要有玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、硼纤维、碳化硅纤维和氧化铝纤维等

常用增强纤维与金属丝性能对比

	密度 g/cm ³	抗拉强度 GPa	拉伸模量 100GPa	比强度 10 ⁶ N.m/kg	比模量 10 ⁶ N.m/kg
无碱玻璃纤维	2.55	3.40	0.71	1.33	28
高强度碳纤维 (II)	1.74	2.42	2.16	1.39	124
高模量碳纤维 (I)	2.00	2.23	3.75	1.12	188
Kevlar49	1.44	2.80	1.26	1.94	88
硼纤维	2.36	2.75	3.82	1.17	162
SiC纤维 (钨芯)	2.69	3.43	4.80	1.28	178
钢丝	7.74	4.20	2.00	0.54	26
钨丝	19.40	4.10	4.10	0.21	21
钼丝	10.20	2.20	3.60	0.22	35

1. 玻璃纤维

- ◆ 由熔融玻璃经拉丝制成纤维；
- ◆ 密度 $2.4\sim 2.7$ ，与铝相近，弹性模量低于金属，但比强度和比模量高；
- ◆ 耐热性好，软化温度 $550\sim 580^{\circ}\text{C}$ ；
- ◆ 耐蚀性好，除氢氟酸、浓碱、浓磷酸外，对其它溶剂有良好的化学稳定性；
- ◆ 不吸水、不燃烧、尺寸稳定、隔热、吸声、绝缘、透过电磁波等；
- ◆ 制取方便，价格便宜，是应用最广的增强纤维。

2. 碳纤维

- ◆ 将有机纤维（如粘胶纤维、聚丙烯腈纤维、沥青纤维等）在惰性气氛中经高温碳化而制成 $w_c > 90\%$ 以上的纤维；
- ◆ 密度低、强度和模量高；
- ◆ 高、低温性能好（ 1500°C ， -180°C ）；
- ◆ 化学稳定性高，能耐浓盐酸、硫酸、磷酸、苯、丙酮等；热胀系数小，热导率高，导电性、自润滑性好；
- ◆ 缺点：脆性大，易氧化，与基体结合力差。

3. 硼纤维

- ◆ 将元素B用蒸汽沉积的方法沉积到耐热金属丝—纤芯（钨丝）上制得的一种复合纤维；
- ◆ 熔点高（ 2300°C ）；
- ◆ 强度、弹性模量高；
- ◆ 良好的耐蚀性；
- ◆ 缺点：密度较大，直径较粗，生产工艺复杂，成本高；
- ◆ 不及玻璃纤维和碳纤维应用广泛。

4. 芳纶纤维

- ◆ 亦称Kevlar纤维，是一种将聚合物溶解在溶剂中，再经纺丝制成的芳香族聚酰胺类纤维；
- ◆ 密度小，比强度、比弹性模量高；
- ◆ 抗拉强度比玻璃纤维高45%，韧性好；
- ◆ 耐热性好，能在290℃下长期作用；
- ◆ 优良的抗疲劳性、耐蚀性、绝缘性和加工性，且价格便宜。

5. 碳化硅纤维

- ◆ 是以钨丝或碳纤维作纤芯，通过气相沉积法而制得；或用聚碳硅烷纺纱，经烧结而得；
- ◆ 是一种高熔点、高强度、高模量的陶瓷纤维，主要用于增强金属和陶瓷；
- ◆ 优良的高温强度，在 1100°C 时强度仍高达 2100MPa 。

（二）颗粒增强材料

- 主要增强颗粒为陶瓷颗粒，如 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 、 WC 、 TiC 、 B_4C 及石墨等；
- 陶瓷颗粒性能好、成本低，易于批量生产；
- 在聚合物中添加不同的填料，构成以填料为分散相、聚合物为连续相的复合材料，可改善制品的力学性能、耐磨性能、耐热性能、导电性能、导磁性能、耐老化性能等。

碳黑和白碳黑（ Si_2C 无定形微粉，呈白色，具有类似碳黑的增强作用，故称之）可明显提高橡胶的强度、硬度和弹性模量；

石墨、银粉、铜粉等可改善塑料的导电性；

Fe_2O_3 磁粉可改善塑料的导磁性；

MoS_2 可提高塑料的自润滑性；

空心玻璃微珠可减小塑料的密度并提高其耐热性。

二、增强机制

(一) 纤维增强

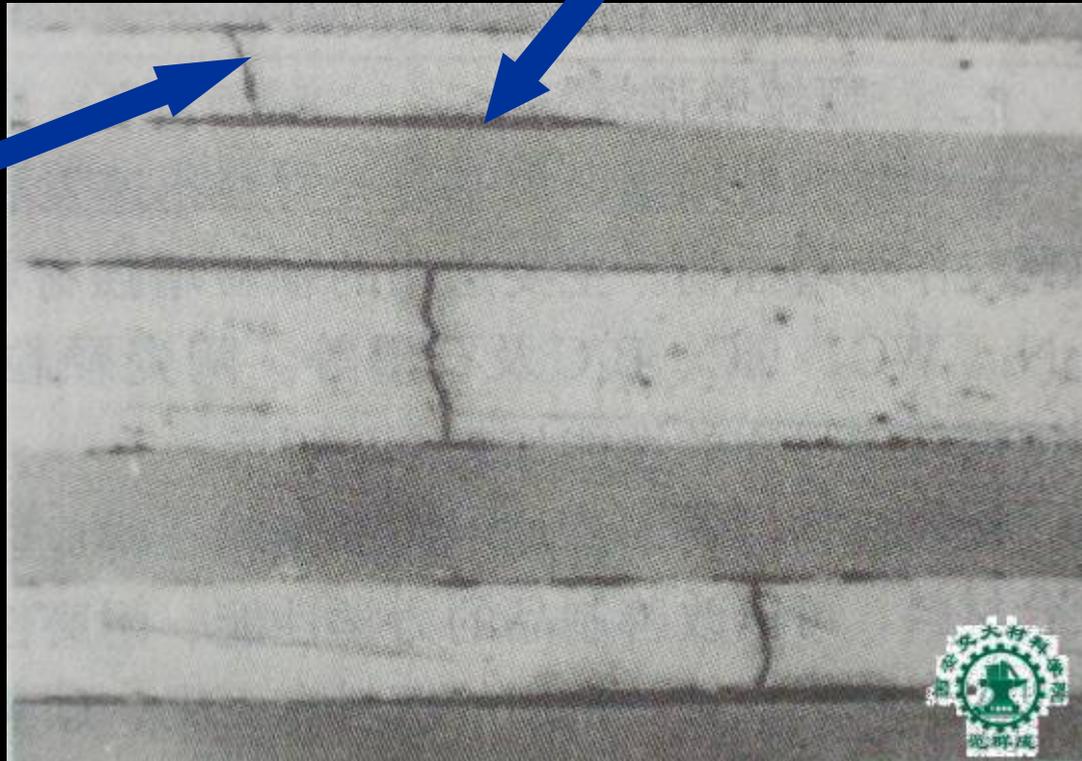
■ 增强机制

- ① 纤维是具有强结合键的物质或硬质材料；
- ② 纤维处于基体中，表面受到基体的保护不易损伤，也不易在受载过程中产生裂纹，承载能力增大；

③ 当材料受到较大应力时，一些有裂纹的纤维可能断裂，但基体能阻碍裂纹扩展并改变裂纹扩展方向。

裂纹扩展方向

纤维断裂



- ④ 当纤维与基体有适当的界面结合强度时，纤维受力断裂后被从基体中拔出，需克服基体对纤维的粘接力，使材料的断裂强度提高。



■ 纤维增强复合条件

- ① 纤维的强度和弹性模量应远高于基体；
- ② 纤维与基体间应有一定的界面结合强度，以保证基体所承受的载荷能通过界面传递给纤维，并防止脆性断裂；
- ③ 纤维的排列方向要与构件的受力方向一致；
- ④ 纤维与基体的热胀系数应匹配；
- ⑤ 纤维与基体不能发生使结合强度降低的化学反应；
- ⑥ 纤维所占体积分数、纤维长度和直径及长径比等必须满足一定要求。

(二) 颗粒增强

- ◆ 颗粒增强复合是将增强颗粒高度弥散地分布在基体中，基体承受载荷，而增强颗粒阻碍导致基体塑性变形的位错运动（金属基体）或分子链运动（高聚物基体）。
- ◆ 增强颗粒大小会直接影响增强效果：
 - d 过大 ($>0.1 \mu\text{m}$) 易引起应力集中而降低强度；
 - d 过小 ($<0.01 \mu\text{m}$) 则接近于固溶体结构，不起颗粒增强作用。
 - 一般颗粒直径为 $d=0.01\sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

第三节 常用复合材料

- 塑料基复合材料
- 金属基复合材料
- 橡胶基复合材料
- 陶瓷基复合材料

一、塑料基复合材料

- ❖ 作为机械工程材料，塑料的最大优点是密度小、耐腐蚀、可塑性好、易于加工成型。
- ❖ 缺点：强度低、弹性模量低、耐热性差。
- ❖ 改善的方法：复合材料，主要是增强。

使用最广泛的是纤维增强塑料。按纤维的性质可以把塑料基复合材料分为：

- ◆ 玻璃纤维增强塑料
- ◆ 碳纤维增强塑料
- ◆ 硼纤维增强塑料
- ◆ 碳化硅纤维增强塑料
- ◆ **Kevlar** 纤维增强塑料

基体材料：热固性塑料、热塑性塑料

(一) 玻璃纤维增强塑料

俗称玻璃钢。按照塑料的性质可以分为：

热塑性玻璃钢

热固性玻璃钢

1、热塑性玻璃钢

由体积分数为20~40%的玻璃纤维与60~80%的热塑性树脂组成。

具有高强度和高冲击韧性，良好的低温性能及低的热胀系数。

2、热固性玻璃钢

由体积分数为60~70%的玻璃纤维与30~40%的热固性树脂组成。

主要特点：密度小、强度高、比强度超过一般的高强钢，耐腐蚀、绝缘、绝热等。但弹性模量低，在300℃以下使用。

主要用于制造自重轻的受力构件和要求无磁性、绝缘、耐腐蚀的零件。

(二) 碳纤维增强塑料

■ 组成

由碳纤维与聚脂、酚醛、环氧、聚四氟乙烯等树脂组成的复合材料。

■ 特点

- ❖ 低密度、高强度、高弹性模量、高比强度和比模量。
- ❖ 优良的抗疲劳性能、耐冲击性能、自润滑性、减摩耐磨性、耐腐蚀和耐热性。

■ 缺点

碳纤维和基体结合强度低，各向异性严重。

■ 应用

性能优于玻璃钢，主要用于航天和航空工业中制作飞机机身，螺旋桨，发电机的护环材料等。

(三) 硼纤维增强塑料

■ 组成

由硼纤维与环氧、聚酰亚胺等树脂组成的复合材料。

■ 特点

- ❖ 高比强度和比模量；
- ❖ 良好的耐热性；
- ❖ 缺点是各向异性严重。

■ 应用

主要用于航天和航空工业中要求高刚度的构件，如飞机机身，机翼等。

（四）碳化硅纤维增强塑料

■ 组成

由碳化硅纤维与环氧树脂组成的复合材料。

■ 特点

- ❖ 高比强度和比模量；
- ❖ 抗拉强度接近碳纤维—环氧树脂复合材料，但抗压强度是其两倍；
- ❖ 碳化硅—环氧树脂复合材料是一种很具有发展前途的新型材料。

■ 应用

主要用于宇航器上的结构，比金属轻30%。还可以制作飞机的门、降落传动装置、机翼等等。

(五) Kevlar纤维增强塑料

■ 组成

由Kevlar纤维与环氧、聚乙烯、聚碳酸酯、聚脂等树脂组成的复合材料。

■ 特点

- ❖ 最常用的是Kevlar纤维—环氧树脂复合材料；
- ❖ 抗拉强度高于玻璃钢，与碳纤维—环氧树脂复合材料相近；
- ❖ 延性好，与金属相似；
- ❖ 具有优良的疲劳抗力和减振性。

■ 应用

主要用于制作飞机机身、雷达天线罩、火箭发动机外壳、快艇等。

二、金属基复合材料

- ❖ 目前是机械工程中用量最大的一类材料。
- ❖ 塑性，韧性，硬度，弹性模量比较高。但仍不能满足要求，一直在改进。

主要应用的金属基复合材料:

纤维增强金属基复合材料

颗粒增强金属基复合材料

塑料—金属多层复合材料

三、橡胶基复合材料

- ❖ 橡胶具有弹性高，减振性好，热导率低，绝缘等优点，但强度和弹性模量低，耐磨性差。
- ❖ 为了改善橡胶制品的性能，可以用增强纤维或粒子与其复合。制备纤维增强橡胶和粒子增强橡胶制品。

❖ 纤维增强橡胶——主要用于轮胎，皮带，橡胶管，橡胶布等。

❖ 粒子增强橡胶——利用补强剂提高橡胶的抗拉强度，撕裂强度，耐磨性等。

四、陶瓷基复合材料

- ❖ 陶瓷具有耐高温，抗氧化，耐腐蚀，弹性模量高，抗压强度大等优点。
- ❖ 但陶瓷脆性大，不能承受剧烈的机械冲击和热冲击。

用纤维或粒子与陶瓷制成复合材料，其韧性明显提高，是目前研究的热点。主要有：

- ❖ 纤维增强陶瓷复合材料
- ❖ 粒子增强陶瓷复合材料

复合材料应用实例

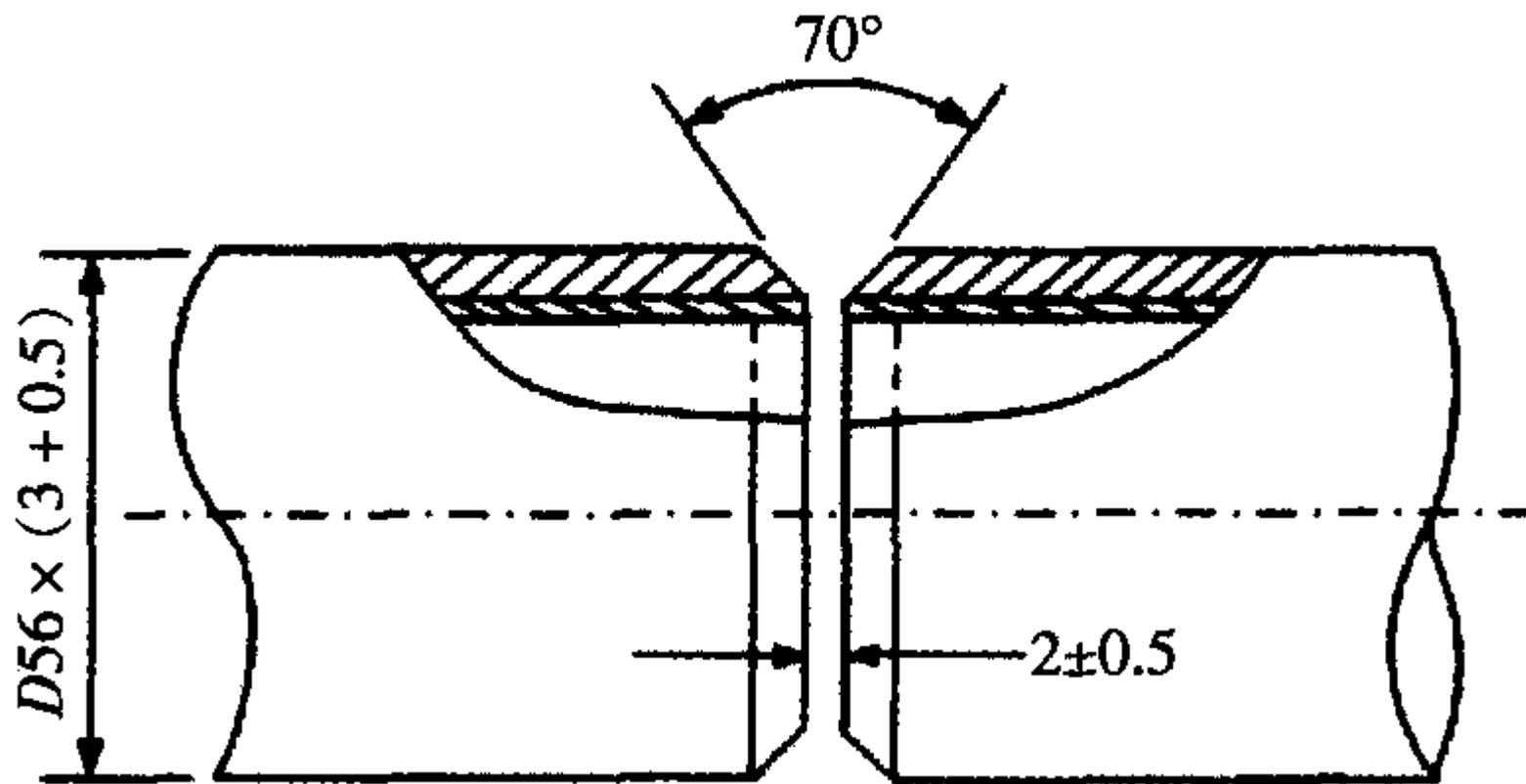
- ◆ 双金属复合钢管
- ◆ 陶瓷内衬复合管

基管20钢

内衬316L钢



20钢/316L钢复合管



20钢/316L复合管



铝热剂: $\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3$



Al_2O_3



Fe

本章要求

1. 掌握：复合材料的结构及性能特点。
2. 了解：增强材料及其增强机制；常用复合材料。

作业

习题与思考题

1 ~ 8

第10章 功能材料

Functional Materials



第一节 概述

定义：

以特殊的电、磁、声、光、热、力、化学及生物学等性能作为主要性能指标的一类材料。是用于非结构目的高技术材料。

1965年由美国贝尔实验室的J.A. Morton博士首先提出功能材料概念。

功能材料在电力技术、电子信息技术、微电子技术、激光技术、空间技术、海洋技术等领域得到广泛应用。

例：计算机的发展历史—CPU

1. 电子管
2. 晶体管
3. 集成电路
4. 大规模集成电路

现代微型计算机的功能与第一台大型电子管计算机相当，但运算速度快几十倍、体积仅 $1/300,000$ 、重量仅 $1/60,000$ 。IBM研制的超级计算机的运算能力可达 $39,000$ 次/s。（发热）

材料：锗Ge半导体材料

硅Si半导体材料

硬化镓GaAs半导体材料

功能材料的分类

功能材料种类繁多，涉及面广，有多种分类方法。目前主要是根据材料的化学组成、应用领域、使用性能进行分类。

按化学组成

金属功能材料

陶瓷功能材料

高分子功能材料

复合功能材料

按应用领域

电工材料

能源材料

信息材料

光学材料

仪器仪表材料

航空航天材料

生物医学材料

传感器用敏感材料

按使用性能

电功能材料

磁功能材料

光功能材料

热功能材料

化学功能材料

生物功能材料

声功能材料

隐形功能材料

功能材料的现状

近几年来，功能材料迅速发展，已有几十大类，10万多品种，且每年都有大量新品种问世。现已开发的以物理功能材料最多，主要有：

- 1) **单功能材料**，如：导电材料、介电材料、铁电材料、磁性材料、磁信息材料、发热材料、热控材料、光学材料、激光材料、红外材料等。
- 2) **功能转换材料**，如：压电材料、光电材料、热电材料、磁光材料、声光材料、电流变材料、磁敏材料、磁致伸缩材料、电色材料等。

- 3) **多功能材料**：如防振降噪材料、三防材料（防热、防激光和防核）、电磁材料等。
- 4) **复合和综合功能材料**，如：形状记忆材料、隐身材料、传感材料、智能材料、显示材料、分离功能材料、环境材料、电磁屏蔽材料等。
- 5) **新形态和新概念功能材料**，如：液晶材料、梯度材料、纳米材料、非平衡材料等。

目前，化学和生物功能材料的种类虽较少，但其发展速度很快，其功能也更加多样化。

功能材料的展望

展望21世纪，功能材料的发展趋势为：

- 1) 开发高技术所需的新型功能材料，特别是尖端领域（航空航天、分子电子学、新能源、海洋技术和生命科学等）所需和在极端条件下（超高温、超高压、超低温、强腐蚀、高真空、强辐射等）工作的高性能功能材料；
- 2) 功能材料的功能从单功能向多功能和复合或综合功能发展，从低级功能向高级功能发展；

- 3) 功能材料和器件的一体化、高集成化、超微型化、高密积化和超分子化;
- 4) 功能材料和结构材料兼容, 即功能材料结构化, 结构材料功能化;
- 5) 进一步研究和发展功能材料的新概念、新设计和新工艺;
- 6) 完善和发展功能材料检测和评价的方法;
- 7) 加强功能材料的应用研究, 扩展功能材料的应用领域, 加强推广成熟的研究成果, 以形成生产力。

主要内容

- ◆ 电功能材料
- ◆ 磁功能材料
- ◆ 热功能材料
- ◆ 光功能材料
- ◆ 其它功能材料简介

第二节 电功能材料



以特殊的电学性能或各种电效应作为主要性能指标的一类材料。

半导体
材料

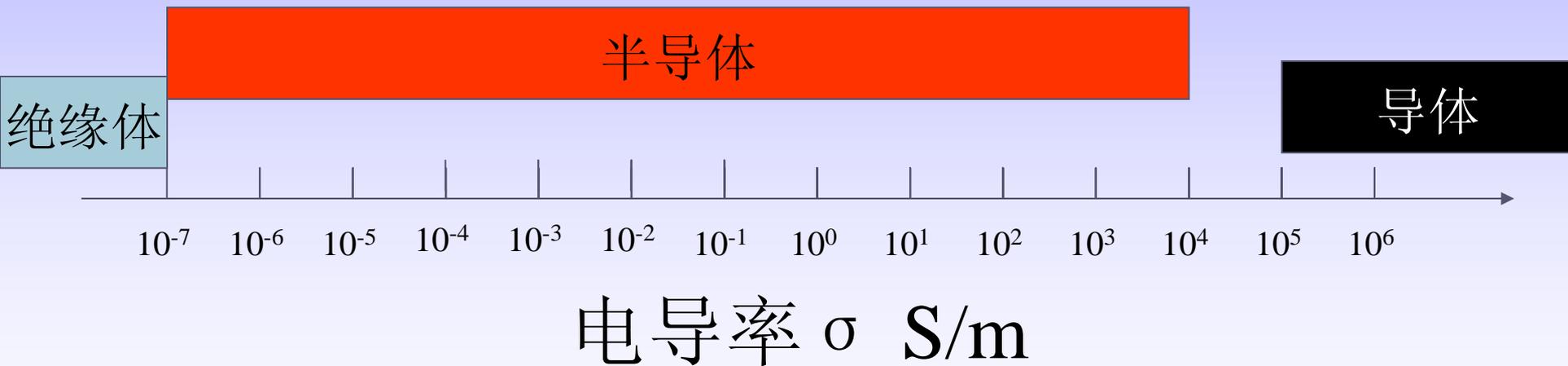
超导
材料

电接点
(触头)
材料

导电材料的分类

按导电机理可分为：电子导电材料和离子导电材料两大类。

电子导电材料包括导体、超导体和半导体：



超导体： $\sigma \rightarrow \infty$

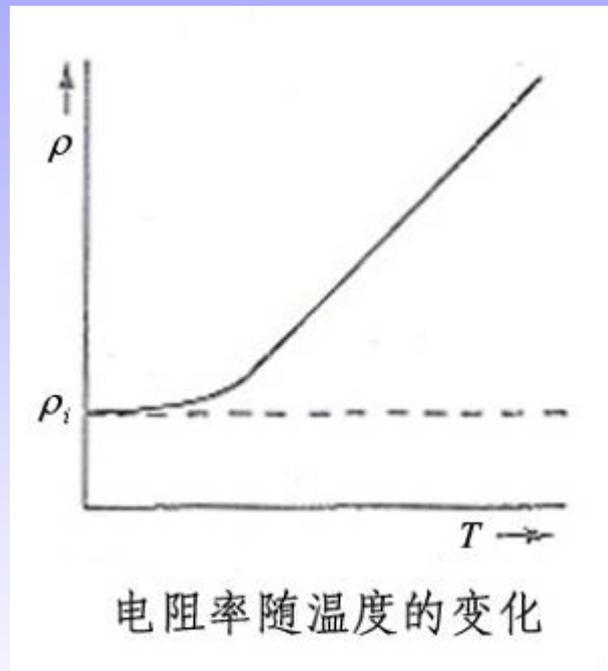
离子导电材料的导电机理源于离子的运动，由于离子的运动速度远小于电子的运动速度，因此其电导率较小，目前最高不超过 10^2 S/m ，一般在 10^0 S/m 以下。

导体电阻率公式

电阻率公式:

$$\rho = \rho_i + \rho_T$$

ρ_i 取决于晶格缺陷的多少，缺陷越多， ρ_i 越大，一般与温度无关； ρ_T 取决于晶格的热振动。



电阻率随着温度升高而升高，这是导体的一个特征。

导体材料的种类

导体材料按照化学成分主要有以下三种：

- (1) 金属材料。电导率在 $10^7 \sim 10^8 \text{ S/m}$ 之间；
银 ($6.63 \times 10^7 \text{ S/m}$)、铜 ($5.85 \times 10^7 \text{ S/m}$) 和
铝 ($3.45 \times 10^7 \text{ S/m}$)
- (2) 合金材料。电导率在 $10^5 \sim 10^7 \text{ S/m}$ 之间；
黄铜 ($1.60 \times 10^7 \text{ S/m}$)，
镍铬合金 ($9.30 \times 10^5 \text{ S/m}$)
- (3) 无机非金属材料。电导率在 $10^5 \sim 10^8 \text{ S/m}$ 之间。
石墨在基晶方向为 $2.5 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。

导体材料的应用

金属导体材料主要用作：电缆材料、电机材料、导电引线材料、导体布线材料、辐射屏蔽材料、电池材料、开关材料、传感器材料、信息传输材料、释放静电材料和接点材料等，还可以作成各种金属填充材料和金属复合材料。

合金导体材料主要用作电阻材料和热电偶材料，如铂铑-铂热电偶等。

非金属导体材料主要用作耐腐蚀导体和导电填料。

一、半导体材料



- ◆ 导电性能介于金属和绝缘体之间；（ $\sigma = 10^{-7} \sim 10^4$ ）
- ◆ 具有负的温度系数。（导体具有正的温度系数）

（一）半导体的能带结构

基本概念

（1）能带 Energy Band

当大量原子结合成晶体时（如， 10^{19} 个原子大约可形成 1mm^3 的晶体）

由于相邻原子电子云相互交叠，对应于孤立原子中的每一能级都将分裂成有一定能量宽度的能带。

(2) 带隙 Band Gap

能带之间的区域

(3) 禁带 Forbidden Band

带隙不存在电子的能级

(4) 价带 Valence Band

对应价电子能级的能带

(5) 空带 Empty Gap

价带上面的能带

(6) 导带 Conduction Band

最靠近价带的空带

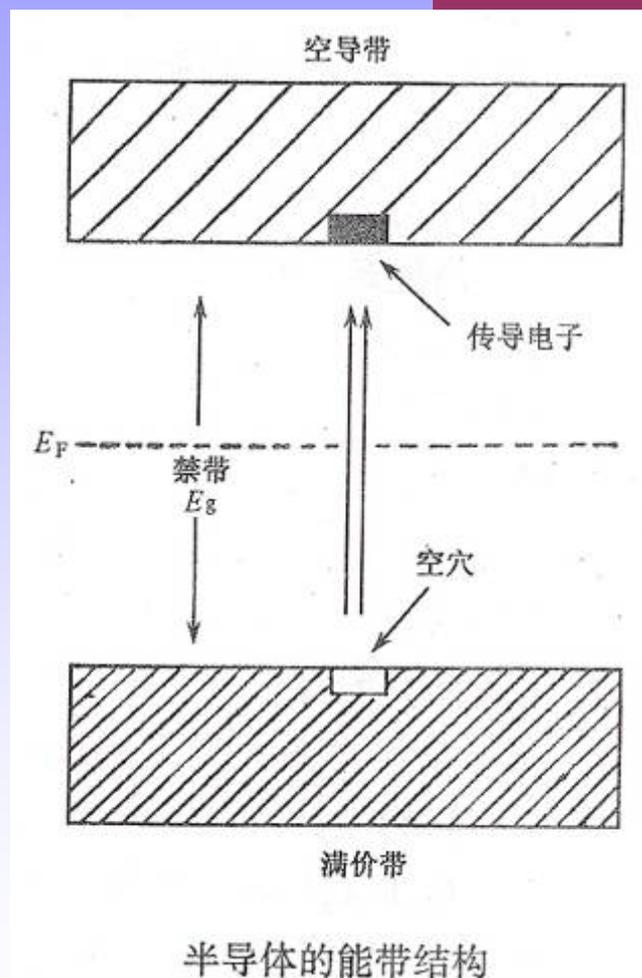
(7) 满带 Filled Band

价带被电子填满

- ◆ 导体的能带中都有未被填满的价带，在外电场的作用下，电子可由价带跃迁到导带，从而形成电流。
- ◆ 绝缘体的能带结构是满带与导带之间被一个较宽的禁带所隔开，在常温下几乎很少有电子可以被激发越过禁带，因此其电导率很低。

半导体能带结构下面是价带，其价带是充满了电子，因此是一个满价带。上面是导带，而导带是空的。

满价带和空导带之间是禁带，其禁带宽度比较窄，一般在1eV左右。价带中的电子受能量激发后，如果激发能大于 E_g ，电子可以从价带跃迁到导带上，同时在价带中留下一个空的能级位置--空穴。



半导体的导电机理

半导体价带中的电子受激发后从满价带跃到空导带中，跃迁电子可在导带中自由运动，传导电子的负电荷。同时，在满价带中留下空穴，空穴带正电荷，在价带中空穴可按电子运动相反的方向运动而传导正电荷。因此，**半导体的导电来源于电子和空穴的运动**，电子和空穴都是半导体中导电的载流子。

(二) 典型半导体材料及其应用

按组成分类

元素半导体

化合物半导体

固溶体半导体

1. 元素半导体

元素半导体

本征半导体

高纯度、无缺陷的元素半导体。杂质浓度小于 10^{-9}

杂质半导体

在本征半导体中有意加入少量的杂质元素，以控制电导率，形成杂质半导体。

本征半导体广泛研究的元素是Si、Ge和金刚石。金刚石可看作是碳元素半导体，它的性质是1952年由Guster发现的。除了硅、锗、金刚石外，其余的半导体元素一般不单独使用。

因为本征半导体单位体积内载流子数目比较少，需要在高温下工作电导率才大，故应用不多。

杂质半导体

利用将杂质元素掺入纯元素中，把电子从杂质能级（带）激发到导带上或者把电子从价带激发到杂质能级上，从而在价带中产生空穴的激发叫非本征激发或杂质激发。这种半导体叫杂质半导体。

杂质半导体本身也存在本征激发，一般杂质半导体中掺杂杂质的浓度很低，如十亿分之一就可达到目的。

杂质半导体

n型半导体

掺杂原子的价电子多于纯元素的价电子，又称施主型半导体

p型半导体

掺杂原子的价电子少于纯元素的价电子，又称受主型半导体

杂质半导体

◆ n型半导体（电子型，施主型）

IVA族元素（C、Si、Ge、Sn）中掺入以VA族元素（P、As、Sb、Bi）后，造成掺杂元素的价电子多于纯元素的价电子，其导电机理是电子导电占主导，这类半导体是n型半导体。

◆ p型半导体（空穴型，受主型）

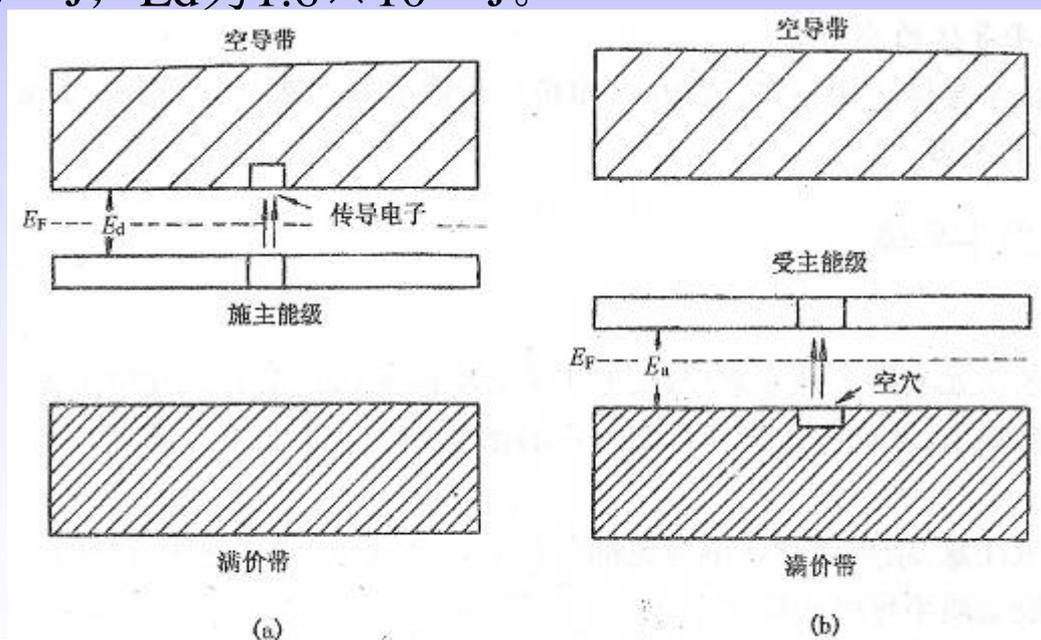
IVA族元素（C、Si、Ge、Sn）中掺入以IIIA族元素（如B）时，掺杂元素的价电子少于纯元素的价电子，它们的原子间生成共价键以后，还缺一个电子，而在价带其中产生空穴。以空穴导电为主，掺杂元素是电子受主，这类半导体是p型半导体。

杂质半导体的能带结构

N型半导体逾量电子处于施主能级，施主能级与导带底能级之差 E_d 远小于禁带宽度 E_g （相差近三个数量级）。因此，杂质电子比本征激发更容易激发到导带。

例如Si掺杂十亿分之一As时，其 E_g 为 1.6×10^{-19} J， E_d 为 6.4×10^{-21} J。Ge掺杂十亿分之一Sb时，其 E_g 为 1.15×10^{-19} J， E_d 为 1.6×10^{-21} J。

P型半导体逾量空穴处于受主能级。由于受主能级与价带顶端的能隙 E_a 远小于禁带宽度 E_g ，价带上的电子很容易激发到受主能级上，在价带形成空穴导电。



杂质半导体的能带结构

2. 化合物半导体

二元化合物

GaAs（砷化镓）、**CdS**镉、**SiC**、**GeS**锗、**AsSe₃**硒等。

三元化合物

AgGeTe₂、**AgAsSe₂**、**CuCdSnTe₄**等（碲）

GaAs

制备

发光二极管

隧道二极管

3. 固溶体半导体

由两种或多种元素或化合物互溶而成的。

二元系固溶体半导体

Bi-Sb

三元系固溶体半导体

(碲镉汞) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

(镓砷磷) $\text{GeAs}_{1-x}\text{P}_x$

最重要的
红外探测
器材料

用于高速响
应器件、
光通信等

半导体材料的应用

- 1、半导体材料在集成电路上的应用：最早用锗单晶制造二极管和三极管；现在发展硅器件，以硅单晶为基材的集成电路在电子器件中占主导地位。化合物半导体砷化镓做微波、超高频晶体管等；
- 2、半导体在光电子器件、微波器件和电声耦合器上的应用：发光管、激光器、光电池、光集成等；
- 3、半导体材料在传感器上的应用：半导体传感器

二、超导材料



超导材料的定义

1911年Onnes H K在研究极低温度下金属导电性时发现，当温度降到4.2K时，汞的电阻率突然降低到接近于零。这种现象称为汞的超导现象。

从此，超导材料的研究引起了广泛的关注，现已发现了上千种超导材料。

定义：

超导电现象：材料的电阻随温度降低而减小并最终出现零电阻的现象。

超导体：低于某一温度出现超导电性的物质。

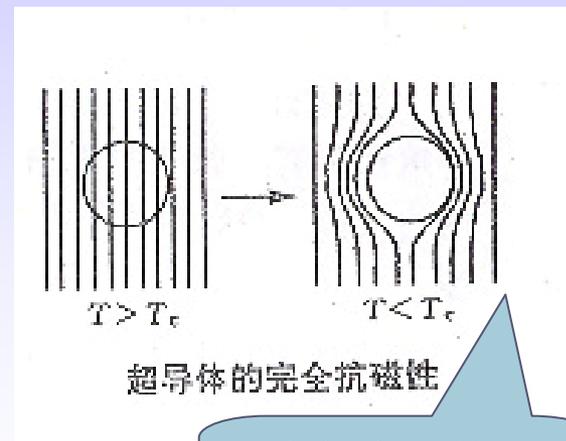
(一) 超导体的基本特性

特性一：完全导电性（零电阻）

File和Mills利用精确核磁共振方法测量超导电流产生的磁场，来研究螺线管内超导电流的衰变，得出的结论是超导电流的衰变时间不短于10万年。

特性二：完全抗磁性

处于超导状态的金属，不管其经历如何，磁感应强度 B 始终为零。这一现象为迈斯纳（Meissner）1933年发现，称为迈斯纳效应。

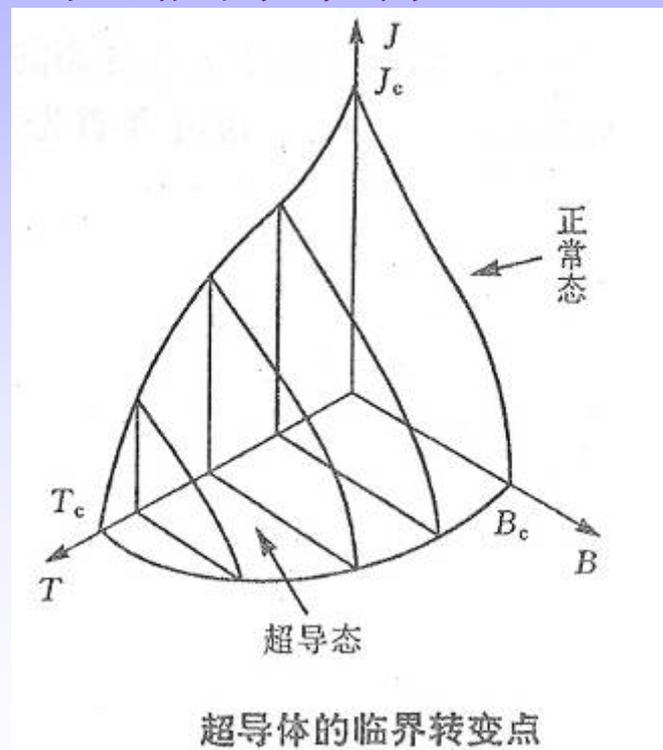


磁力线不能进入超导体内部

超导体的基本特性

特性三：临界温度 (T_c)、临界磁场 (H_c)、临界电流 J_c 是约束超导现象的三大临界条件。

当温度超过临界温度时，超导态就消失；同时，当超过临界电流或者临界磁场时，超导态也会消失，三者具有明显的相关性。只有当上述三个条件均满足超导材料本身的临界值时，才能发生超导现象（由 T_c 、 H_c 、 J_c 形成的闭合曲面内为超导态）。



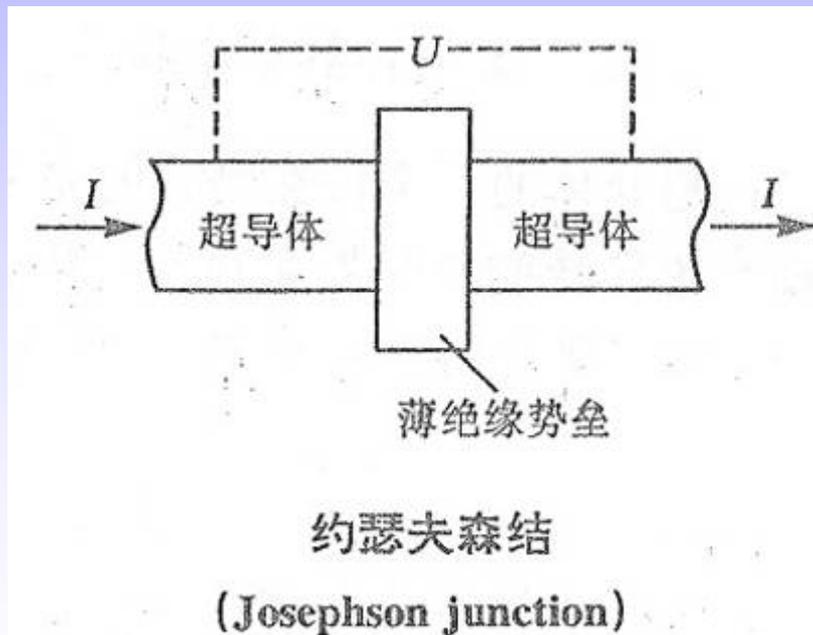
超导体的基本特性

特性四：约瑟夫森（B D Josephson）效应

（承担超导的超导电子还可以穿越极薄绝缘体势垒）

经典力学中，若两个区域被一个势垒隔开，则只有粒子具有足够的能量时，其才会从一个区域进入另一个区域。

量子力学中，粒子具有足够的能量不再是一个必要条件，一个能量不太高的粒子也可能以一定的概率“穿过”势垒，即所谓的“隧道效应”。（约瑟夫森预言并被后人证实）



超导体的种类 (按迈斯纳效应分)

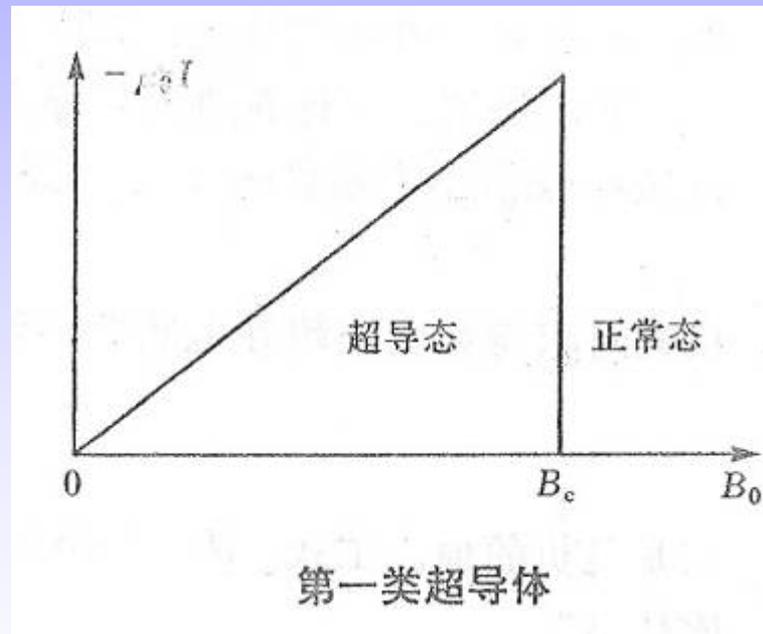
按照迈斯纳 (Meissner) 效应分类: 第一类超导体和第二类超导体

◆ 第一类超导体 (软超导体)

当 $H < H_C$ 时, $B = 0$ (B 为磁感应强度)

当 $H > H_C$ 时, $B = \mu H$

第一类超导体只有一个临界磁场, 即 H_C 只有一个特征值。除钒、铌、钨外, 元素超导体都是第一类超导体



超导体的种类 (按迈斯纳效应分)

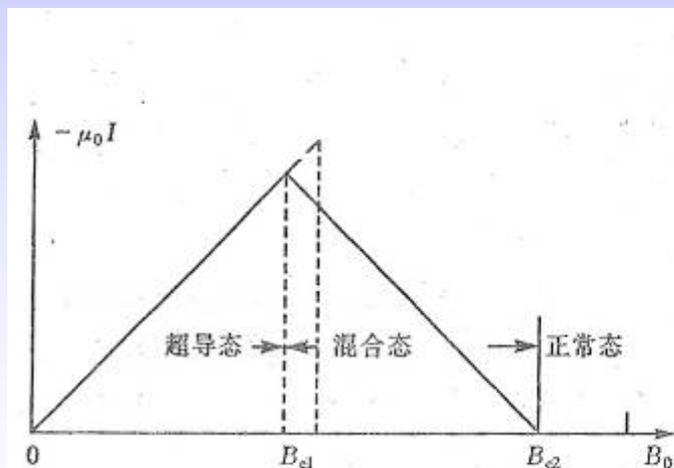
◆ 第二类超导体 (硬超导体)

当 $H < H_{C1}$ 时, $B = 0$, 处于迈斯纳状态, 完全抗磁

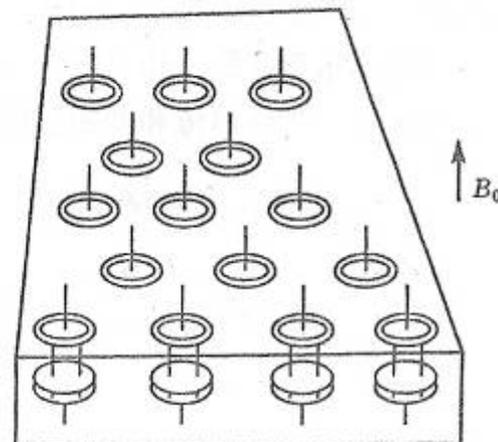
当 $H_{C1} < H < H_{C2}$ 时, 处于混合状态, 但电阻仍为零, 这时体内有磁感应线穿过, 形成许多半径很小的圆柱形正常区, 正常区周围是连通的超导区。

当 $H > H_{C2}$ 时, $B = \mu H$

钒、铌
以及大
多数合
金或化
合物超
导体均
属于第
二类



第二类超导体



第二类超导体的混合态

(二) 超导材料

- ◆ 元素超导体
- ◆ 合金超导体
- ◆ 金属间化合物超导体
- ◆ 陶瓷超导体
- ◆ 高分子超导体

1. 元素超导体

在低温常压下，具有超导特性的化学元素共有26种，由于临界温度太低，无太大实用价值

Nb的T_c最高，仅为9.26K

超导元素

元素	T _c /K	H _c (0)/(A·m ⁻¹)	晶体结构
Rh	0.000 2(外推值)		面心立方
W	0.012 0		体心立方
Be	0.026 0		六角密堆
Ir	0.140 0	1 512	面心立方
α-Hf	0.165 0		六角密堆
α-Ti	0.490 0	4 456	六角密堆
Ru	0.490 0	5 252	六角密堆
Cd	0.515 0	2 387	六角密堆
Os	0.690 0	5 172	六角密堆
α-U	0.680 0		正交晶系
α-Zr	0.730 0	3 740	六角密堆
Zn	0.844 0	4 138	六角密堆
Mo	0.920 0	7 799	体心立方
Ga	1.100 0	4 695	正交晶系
Al	1.174 0	7 878	面心立方
α-Th	1.370 0	12 892	面心立方
Pa	1.400 0		四角晶系
Re	1.700 0	15 359	六角密堆
Tl	2.390 0	13 608	面心立方
In	3.416 0	23 316	四角晶系
β-Sn	3.720 0	24 590	四角晶系
α-Hg	4.150 0	32 786	菱方晶系
Ta	4.480 0	66 050	体心立方
V	5.300 0	81 170	体心立方
β-La	5.980 0	127 325	面心立方
Pb	7.201 0	63 901	面心立方
Tc	8.220 0	112 205	六角密堆
Nb	9.260 0	155 177	体心立方

2. 合金超导体

- 合金超导体是机械强度最高、应力应变较小、磁场强度低、临界电流密度高的超导体，在早期得到实际应用。超导合金主要有Ti-V、Nb-Zr、Mo-Zr、Nb-Ti等合金系，其中Ge-Nb₃的临界温度最高（23.2K）。

3. 金属间化合物超导体

- 金属间化合物超导体的临界温度与临界磁场一般比合金超导体的高，但此类超导体的脆性大，不易直接加工成带材或线材。

一些超导合金和化合物的 T_c 和 H_c

材 料	T_c/K	$H_c/(kA \cdot m^{-1})$	材 料	T_c/K	$H_c/(kA \cdot m^{-1})$
Mo - 33Re	10.8	2 228	Pb - 50Bi	8.4	2 387
Mo - 50Re	12.6	2 149	NbN	17.0	11 141
Nb - 25Ti	9.8	5 809	V ₃ Si	17.0	
Nb - 60Ti	9.3	9 152	V ₃ Ca	16.8	19 099
Nb - 60Ti - 4Ta	9.9	9 868	Nb ₃ Al	18.8	23 873
Nb - 70Ti - 5Ta	9.8	10 186	Nb ₃ Sn	18.1	1 950
Nb - 25Zr	11.0	7 242	Nb ₃ Al _{0.75} Ge _{0.25}	21.0	33 422
Nb - 75Zr	10.8	62 628	Nb ₃ Ge	23.2	
Pb - 35Bi	8.7	2 069			

4. 陶瓷金超导体

1986年发现了陶瓷超导体，使超导材料获得了更高的临界温度，如YBaCuO ($T_c=90\text{K}$)、TiBaCaCuO ($T_c=120\text{K}$) 等。最大缺点为脆性大，加工困难。

高温超导材料： $T_c > 77\text{K}$ （液N温度）

高 T_c 氧化物超导系列

母 相	高 T_c 相	导电类型	最高的 T_c/K
La_2CuO_4	$\text{La}_{2-x}\text{A}_x\text{CuO}_4$ (A: Sr, Ba, Ca)	p	≈ 36
R_2CuO_4 *	$\text{R}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_{4-y}$ (M: Th, Ce)	n	≈ 25
BaBiO_3	$\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$	p	≈ 30
$\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.4}$ **	$\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$	p	≈ 95
	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	p	≈ 80
BiR_2SrCuO R: 稀土	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca}_x\text{R}_{1-x})_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+6}$	p	≈ 112
TiR_2BaCuO R: 稀土	$\text{Th}_2\text{Ba}_2(\text{Ca}_x\text{R}_{1-x})_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+6}$ $\text{TlBa}_2(\text{Ca}_x\text{R}_{1-x})_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+5}$	p p	≈ 125
$\text{Pb}_2\text{SrRCu}_3\text{O}_8$	$\text{Pb}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{Cu}_3\text{O}_{8.5}$	p	≈ 70

* R: Pr, Nd, Sm, Eu 等; ** R: Y, La, Nb, Sn, Eu, Gd, Ho, Er 等。



中国制造 Made in China

2002年1月

长116m，宽3.6mm，厚0.28 mm 铋系
高温超导带材试制成功。

2002年4月

340m 长的铋系高温超导导线试制成功。

已达到了国际先进水平

5. 高分子超导体

高分子材料通常为绝缘体，但在数亿帕气压作用下也可以转变成为超导体。

如：四硫富瓦稀四腈代对苯醌二甲烷

目前高分子超导体的最高临界温度仅仅达到**10K**

（三）超导材料的应用

超导的应用，基本上可以分为强电强磁和弱电弱磁两大类。

（1）超导强电强磁应用

主要基于超导体的零电阻特性和完全抗磁性以及非理想第二类超导体所特有的高临界电流密度和高临界磁场。

主要应用在电力方面如超导电缆、超导磁体（如超导磁悬浮列车）、巨大环形超导磁体、超导磁分离等。

(2) 超导弱电弱磁的应用

基于Josephson效应为基础，建立极灵敏的电子测量装置为目标的超导电子学，发展了低温电子学。如超导量子干涉器件是一种高灵敏度的测量装置，主要功能是测量磁场。它可以在电工仪表、医学、生物、资源开发、环境保护、固体材料、地球物理等领域应用。

超导材料的应用实例

1. 电力输送与储存

目前有大约**30%**的电能损耗在输电线路路上，采用超导体输电，可大大减少损耗，且省去了变压器和变电所。

使用巨大的超导线圈，经供电励磁产生磁场而储存能量。超导磁储能系统所存能量几乎可以无损耗的储存下去，其转换率可高达**95%**。

2. 磁流体发电

火力发电

化学能

热能

机械能

电能

磁流体发电

热能

电能

3. 磁悬浮列车

时速 400 ~ 500km.

4. 超导计算机

速度是计算机永远追求的主题

三、电接点（触头）材料



电接点是建立和解除电接触的导电构件，广泛应用于电力系统、电器装置，仪器仪表、电信和电子设备。

按电负荷的大小，电接点分为：强电、中电和弱电。

(一) 强电接点材料

电负荷大，要求电接点材料：接触电阻低、耐电蚀、耐磨损、高的耐电压强度、良好的来电弧能力，一定的机械强度。

一般采用合金材料。

◆ 空气开关接点材料

银系合金：**Ag-CdO、Ag-Fe、Ag-W、Ag-石墨**等。

铜系合金 如：**Cu-W、Cu-石墨**

◆ 真空开关接点材料

Cu-Bi-Ce、Cu-Fe-Ni-Co-Bi、W-Cu-Bi-Zr合金等

（二）弱电接点材料

弱电接点电负荷及机械负荷都很小，要求接点材料有极好的导电性、极高的化学稳定性、良好的抗电火花烧损性和耐磨性。

大多用贵金属合金材料。

常用的弱电接点材料有：

Au系（金）

Ag系（银）

Pt系（铂）

Pd系（钯）

(三) 复合接点材料

通过合理工艺将贵金属接点材料与非贵金属基体材料结合在一起，

国外90%以上的弱电接点采用复合接点材料。

第三节 磁功能材料



简介

- 磁性是物质的基本属性之一。磁性现象是与各种形式的电荷运动相关联的，由于物质内部的电子运动和自旋会产生一定大小的磁场，因而产生磁性。一切物质都具有磁性。但磁性材料通常是指那些在实际工程意义上具有较强磁性的材料。
- 磁性材料是电子工业的重要基础功能材料，广泛应用于计算机、电子器件、通讯、汽车和航空航天等工业领域，随着世界经济和科学技术的迅猛发展，磁性材料的需求将空前广阔。当前我国磁性材料的发展居世界之首，已经成为世界上永磁材料生产量最大的国家。

基本概念

“磁”来源于电。一个环形电流在其运动中心产生的磁矩为 $\mathbf{P}=\mathbf{is}$ ， i 为电流强度， s 为环形回路所包围的面积。

原子内的电子做循轨运动和自旋运动，这必然产生磁矩，产生的磁矩分别称为轨道磁矩 \mathbf{P}_1 和自旋磁矩 \mathbf{P}_s 。

原子核虽然也产生磁矩，但它的值比电子磁矩小三个数量级，一般情况下可忽略不计。因此，原子磁矩的产生是电子的循轨运动、电子自旋这二者组合的结果。

基本概念

磁场强度 (H)：指空间某处磁场的大小，单位：安/米；

磁化强度 (M)：物质的磁性来源于内部的磁矩，只有当内部磁矩同向有序排列时才对外显示强磁性。单位体积内磁矩矢量和称为M，单位：安/米；

磁感应强度 (B)：物质在外磁场作用下，其内部原子磁矩的有序排列还将产生一个附加磁场。在磁性材料内部外加磁场与附加磁场的和，称为磁感应强度。 $B = \mu_0(H + M)$ ， μ_0 是一个系数，叫做真空磁导率。磁感应强度又称为磁通密度，单位是特斯拉 (T)；

磁导率 (μ)： $\mu = B/H$ ，是磁化曲线上任意一点上B和H的比值。导磁率实际上代表了磁性材料被磁化的容易程度，或者说是材料对外部磁场的灵敏程度；

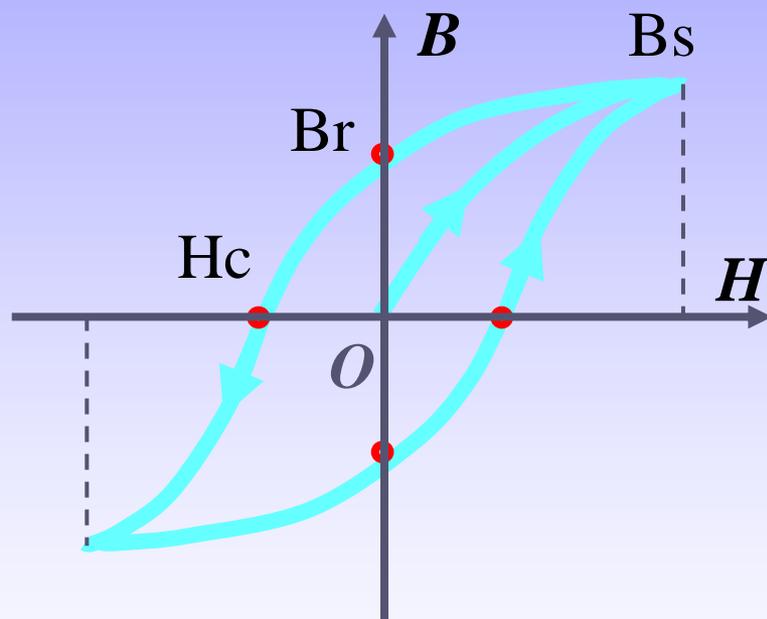
磁化率 (χ)：磁化强度与磁场强度的比值， $\chi = M/H$ 。

磁滞回线

在外加磁场的作用下磁体会被磁化，磁体内部的磁感应强度 B 随外磁场 H 的变化是非线性的，当 H 减少为零时， B 并未回到零值，出现剩磁 B_r 。磁感应强度滞后于磁场强度变化的性质称为磁滞性。图为磁性物质的磁滞曲线；

要使剩磁消失，通常需进行反向磁化。将 $B=0$ 时的 H 值称为矫顽磁力 H_c ；

B_r 称为剩余磁感应强度， B_s 称为最大磁感应强度（饱和磁感应强度）。

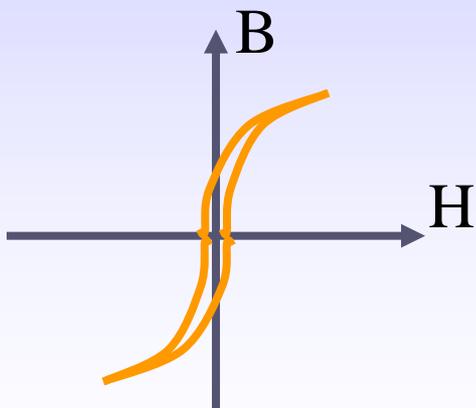


磁性材料的分类

根据滞回曲线和磁化曲线的不同，分成三类：

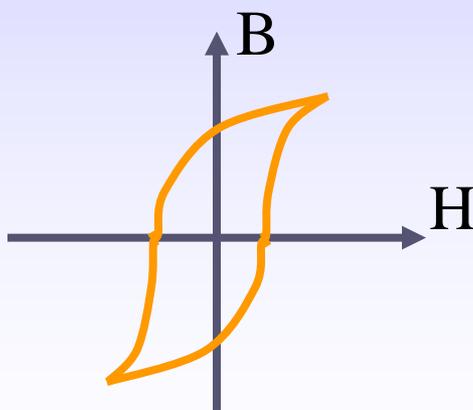
(1) 软磁材料

其矫顽磁力较小，磁滞回线较窄。(铁心)



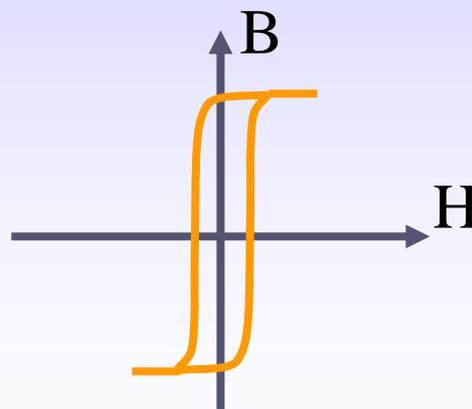
(2) 硬磁材料

其矫顽磁力较大，磁滞回线较宽。(磁铁)



(3) 矩磁材料

其剩磁大而矫顽磁力小，磁滞回线为矩形。(记忆元件)



一、软磁材料

- 定义：指在外磁场作用下，很容易磁化，去掉外磁场时又很容易去磁的磁性材料。
- 软磁材料的特性
- 高的磁导率和磁感应强度；
- 矫顽力和磁滞损耗低；（矫顽力一般小于 1kA/m ）
- 电阻率较高，反复磁化和退磁时产生的涡流损耗小。

典型软磁材料及其应用

常用的软磁材料有：电工纯铁、硅钢片、铁铝合金、镍铁合金、铁氧体软磁材料等。

某些普通软磁材料及其某些性能

材 料	初始磁化率 (χ_i)	每周期的磁滞损耗 $/(J \cdot m^{-3})$	磁饱和强度 $/T$
电工用纯铁	250	500	2.16
Fe-4%Si, 无规的	500	50~150	1.95
Fe-3%Si, 取向的	15 000	35~140	2.00
45坡莫合金(45%Ni-55%Fe)	2 700	120	1.60
Mu 金属(75%Ni-5%Cu-2%Cr-18%Fe)	30 000	20	0.80
超坡莫合金(79%Ni-15%Fe-5%Mo-0.5%Mn)	100 000	2	0.79
Ferrocube A* (Mn, Zn) Fe ₂ O ₄	1 200	≈40	0.36
Ferrocube B* (Ni, Zn) Fe ₂ O ₄	650	≈35	0.29

* 铁氧体



电工用纯铁

- ❏ 电工用纯铁是一种含碳量低， $w_{\text{Fe}} > 99.95\%$ 的软钢。它在平炉中进行冶炼时，用氧化渣除去碳、硅、锰等元素，再用还原渣除去磷和硫，出钢时在钢包中加入脱氧剂而得。
- ❏ 工业纯铁在退火状态，起始磁导率为 $300-500 \mu_0$ ，最大磁导率为 $600-1200 \mu_0$ ，矫顽力为 $39.8-95.5 \text{A/m}$ 。
- ❏ 电工用纯铁具有高的饱和磁感应强度、高的磁导率、较小的矫顽力、良好的冷加工性能，且成本低廉。缺点是电阻小，铁损大，只适用于直流情况。
- ❏ 主要用于制造电磁铁的铁心和磁极，继电器的磁路和各种零件，电话中的振动膜等。

硅钢片（硅铁合金）

- 在电工用纯铁中加入0.5~4.5%的硅，使之形成固溶体，可以提高材料电阻率，减少涡流损耗，这种材料称为硅铁合金，或者称电工用硅钢片。
- 纯铁中加入硅后，材料的物理性能发生如下变化：
 - 1) 热导率的变化。
 - 铁的热导率在加入硅后剧烈的降低。

硅铁合金

2) 电阻率的变化

随着硅含量的增加到5%，硅铁合金的电阻率急剧上升。

当 $w_{\text{Si}}=0.25\sim 5\%$ ，电阻率与含硅量的关系如下：

$$\rho = 13.25 + 11.30 \times w_{\text{Si}}$$

3) 相对密度d的变化

随着含硅量的增加，比重几乎是直线的降低。

$$d = 7.8740 - 0.062 \times w_{\text{Si}}$$

硅铁合金属于高饱和材料，主要用于各种形式的发电机、电动机和变压器中。 $w_{\text{Si}}=3\%$ 的Si-Fe合金片由于其饱和磁通密度高，是电力变压器和配电变压器中大量采用的材料。

电工硅钢片的应用和磁性能

ASTM 的电工硅钢片的应用和磁性能

钢 的 牌 号	应 用 范 围	片 厚 /mm	$P_{10/50}$ /(W· kg ⁻¹).	不同磁场强度中的磁感应强度/(10 ⁻⁴ T)						
				$B_{0.1}$	B_1	B_{10}	$B_{2.5}$	B_{50}	B_{100}	B_{300}
无硅的磁极钢	大型直流电机的磁极	1.5;3	-	-	6 000	15 400	16 200	17 200	18 200	20 600
磁极钢 0.25% Si		-	-	性 能 无 规 定						
电枢钢 0.5% Si $H_c = 51$	小型电动机、电枢、 磁极等	0.35 0.50	2.35 3.00	-	7 000	11 000	15 400	16 400	17 900	21 800
电工钢 ~1% Si $H_c = 48$	中等功率的电动机 和发电机	0.35	2.13	-	7 500	14 000	15 500	16 500	17 800	20 000
电动机钢 ~2.5% Si $H_c = 44$	中等功率以上的电动机 和发电机,小型变压器, 电抗器等	0.35 0.50	1.85 2.00	-	7 000	14 000	15 200	16 200	17 300	19 600
电机钢 ~3.25% Si $H_c = 41$	大型电动机和发电机, 小型和中型的变压器	0.35 0.50	1.45 1.75	-	6 000	13 500	14 800	15 800	17 100	19 400
变压器钢 ~3% Si $H_c = 33$	变压器,各种类型 的电动机,通信电器	0.35 0.50	1.35 1.45	170						
3.5Si $H_c = 25$	高效率的电机	0.35	1.27	250	7 500	13 500	14 700	15 700	16 900	19 200
~4.0% Si $H_c = 19$	变压器,优质电动机	0.35	1.12	280	8 000	13 600	14 800	15 600	17 000	19 200
>4.5% Si $H_c = 16$	质量极高的变压器和电 动机,无线电电器等	0.35	1.01	350	7 500	13 600	14 700	15 600	17 000	19100

注:表中 H_c 的数据单位是 $A \cdot m^{-1}$ 。



镍铁合金

镍铁合金主要是含镍量为34-80%的Fe-Ni合金，通常称坡莫合金。

镍铁合金有很高的起始磁导率和最大磁导率。镍铁合金广泛应用于电讯工业、仪表、电子计算机、控制系统等领域中。

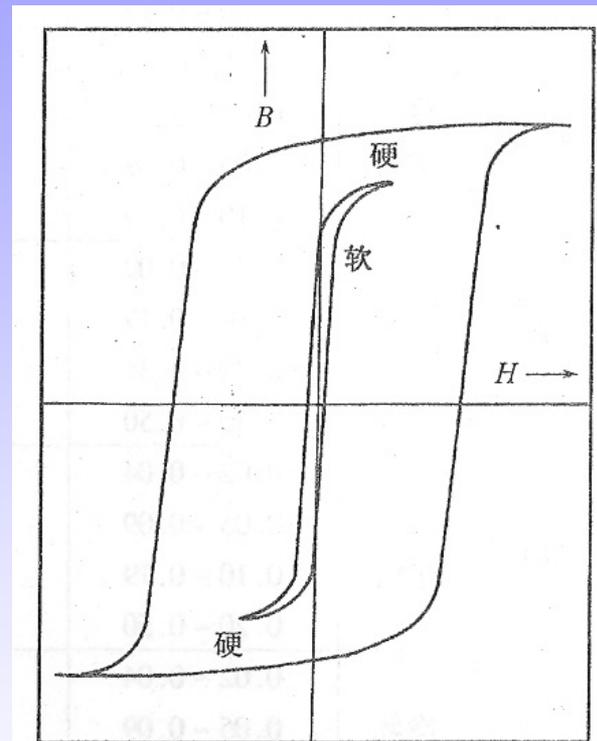
合金 牌号	成品 形状	厚度 /mm	磁 性 能				
			μ_i/μ_0 不小于	μ_m/μ_0 不小于	H_c /($A \cdot m^{-1}$) 不大于	B_s /($10^{-4} T$) 不小于	B_r/B_m ($H=80A \cdot m^{-1}$) 不小于
1J46	冷轧 带材	0.02~0.04	2 000	18 000	31.8	15 000	
		0.05~0.09	2 300	22 000	23.9	15 000	
		0.10~0.19	2 800	25 000	19.9	15 000	
		0.20~0.34	3 200	30 000	15.9	15 000	
		0.35~2.50	3 600	36 000	11.9	15 000	
1J50	冷轧 带材	0.02~0.04	2 200	2 000	23.9	15 000	
		0.05~0.09	2 800	28 000	19.9	15 000	
		0.10~0.19	3 200	32 000	14.3	15 000	
		0.20~0.34	3 600	40 000	11.1	15 000	
		0.35~1.00	4 500	50 000	9.5	15 000	
1J51	冷轧 带材	0.005~0.01		25 000	23.9	15 000	0.90
		0.02~0.04		35 000	19.9	15 000	0.90
		0.05~0.09		50 000	15.9	15 000	0.90
		0.10		60 000	14.3	15 000	0.90
1J65	冷轧 带材	0.005~0.01		80 000	8.0	13 000	0.90
		0.02~0.04		100 000	6.4	13 000	0.90
		0.05~0.09		150 000	4.8	13 000	0.90
		0.10~		220 000	3.2	13 000	0.90
1J34	冷轧 带材	0.005~0.01		50 000	19.9	15 000	0.90
		0.02~0.04		60 000	15.9	15 000	0.90
		0.05~0.09		90 000	9.5	15 000	0.90
		0.10~0.20		110 000	8.0	15 000	0.87
1J54	冷轧 带材	0.02~0.04	1 600	16 000	19.9	10 000	
		0.05~0.09	2 000	20 000	15.9	10 000	
		0.10~0.19	2 500	25 000	11.9	10 000	
		0.20~0.34	3 000	30 000	9.5	10 000	
		0.35~1.00	3 200	32 000	8.0	10 000	

软磁铁氧体

- 铁氧体是氧离子和金属离子组成的尖晶石结构的氧化物，是以 Fe_2O_3 为主要成分的复相氧化物。
- 根据磁滞回线特征，可分为软磁、硬磁和矩磁铁氧体。
- 软磁铁氧体是铁氧体材料中的一种，是一种容易磁化和退磁的铁氧体。其特点是起始的磁导率高，矫顽力小，损耗小，使用频率可达高频、超高频范围。
- 常用的软磁铁氧体有镍锌铁氧体和锰锌铁氧体
- 软磁铁氧体广泛应用于录音、录像记录磁头，变压器磁心等。利用软磁铁氧体的磁导率或饱和磁感应强度在居里温度附近的激烈变化，还可以制成热敏器件等。

二、硬磁材料

- 硬磁材料是具有很強的抗退磁能力和高的剩餘磁感應強度的強磁性材料，又稱永磁材料。
- 硬磁材料一旦經外加磁場飽和強化後，如果撤去外加磁場，在磁鐵兩個磁極之間的空隙便可產生恒定磁場，對外界提供有用的磁能。
- 硬磁材料的磁滯回線又寬又高，有較大的矯頑力，典型只為 $10^4 \sim 10^6 \text{A/m}$ 。
- 硬磁材料抗干擾性好，對溫度、振動、時間、輻射及其它因素的干擾不敏感。
- 典型的硬磁材料主要包括鋁鎳鈷系永磁、鐵氧體永磁和稀土系永磁。



硬磁材料和軟磁材料的磁滯回線形狀

铝镍钴系永磁

铝镍钴系永磁主要有Fe及Al、Ni、Co组成，有良好的磁特性和热稳定性，剩余磁感应强度高，磁能积大，矫顽力适中，但硬而脆，难以加工，主要用铸造和粉末烧结两种方法成形。

铸造铝镍钴系列磁钢的磁性能

序号	名称	$B_r/10^{-4} \text{ T}$	H_c $/(79.578 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1})$	$(BH)_{\max}$ $/(7.9578 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	附注
1	等轴晶 Alnico 5	12 500	630	5.0	
2	半柱状晶 Alnico 5	13 000	680	6.0	
3	柱状晶 Alnico 5	13 000 ~ 14 000	700 ~ 800	7.0 ~ 8.0	
4	等轴晶 Alnico 8	8 500	1 400	4.5	
5	柱状晶 Alnico 8	10 500 ~ 11 000	1 500 ~ 1 600	9.0 ~ 10.0	
6	柱状晶 Alnico 8	11 000 ~ 11 100	1 450 ~ 1 620	11.5 ~ 12.0	加 Si, 3.5% Cu
7	柱状晶 Alnico 8	11 500	1525	13.4	用种晶控制冷却
8	含碳柱状晶 Alnico 8	11 400	1 450	11.4	3.5% Cu 加 0.1% C
9	高钛高钴 Alnico(等轴晶)	7 500 ~ 8 000	1 800 ~ 2 000	5.0 ~ 6.0	
10	高钛高钴 Alnico(柱状晶)	8 920 ~ 10 000	1 780 ~ 2 200	11.0 ~ 11.7	加 Nb
11	高钛高钴 Alnico(柱状晶)	10 300	1 705	12.2	用“Magnicoi”方法

硬磁铁氧体

- 硬磁铁氧体包括钡铁氧体 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ，锶铁氧体 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 。它具有剩余磁通量小，矫顽力大，电阻率大，密度小，重量轻、温度系数大，制造工艺简单等优点，是硬磁材料中价格最低、用量最大的一类磁铁。

TDK 生产的永磁铁氧体材料的磁性能

牌号	类别	B_r /(10^{-4} T)		$B H_c$ /($79.578 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$)		$M H_c$ /($79.578 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$)		$(BH)_{\max}$ /($7.9578 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	
		小	大	小	大	小	中	小	大
FB ₁	钡铁氧体	2 000	2 350	1 800	2 000	3 000	3 500	0.9	1.20
FB ₂ A	钡铁氧体	3 700	4 000	1 700	2 000	1 700	1 850	3.0	3.60
FB ₂ B	锶铁氧体	3 700	4 000	1 700	2 000	1 700	1 850	3.0	3.60
FB ₃ A	钡铁氧体	3 400	3 700	2 200	2 600	2 300	2 500	2.9	3.10
FB ₃ B	锶铁氧体	3 200	3 600	2 800	3 200	3 000	3 400	2.6	2.90
FB ₄ A	钡铁氧体	4 000	4 350	1 700	2 000	1 700	1 850	3.8	4.10
FB ₄ B	锶铁氧体	3 600	4 000	3 000	3 400	3 200	3 500	3.2	3.60
FB ₄ C	锶铁氧体	3 950	4 150	1 800	2 200	1 800	2 000	3.9	4.10
FB ₄ H	锶铁氧体		3 700		3 450		4 200		3.25
FB ₄ N	锶铁氧体		4 300		2 300		2 320		4.40

稀土硬磁材料

- ❏ 稀土硬磁合金包括稀土钴和稀土铁系金属间化合物，为硬磁材料中性能最高的一类。
- ❏ 其中最著名的是钕铁硼永磁合金，号称磁王，具有其它永磁材料所不及的高矫顽力和最大磁能积，而且体积小、重量轻、效率高、成本较低等特点。
- ❏ 不含战略物质Co和Ni，它能吸起相当于自重640倍的重物，而铁氧体只能吸起自重的120倍。
- ❏ 如一台核磁共振成像仪需用铁氧体永磁材料100t，而改用钕铁硼永磁后，仅需10t。

三、磁致伸缩材料

磁致伸缩效应:

- 磁性材料在外磁场作用下，产生伸长或缩短的现象—为磁致伸缩效应。

Fe 随磁场强度的增大而伸长

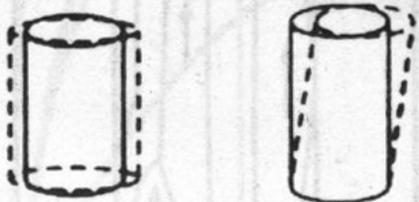
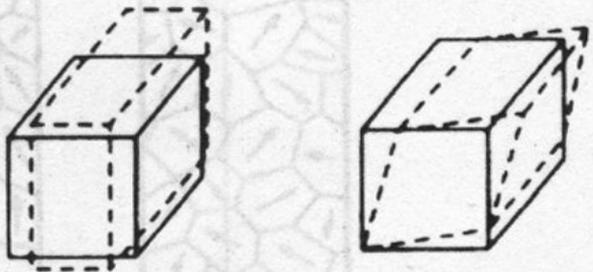
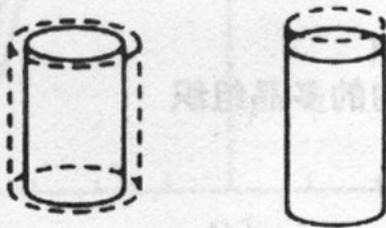
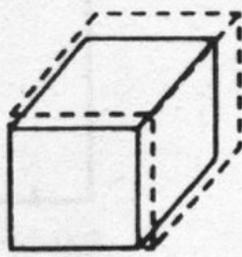
Ni 随磁场强度的增大而缩短

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}$$

λ 为磁致伸缩系数

常用磁致伸缩材料室温下的饱和磁致伸缩系数为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$

磁致收缩的各种变形模式

	六方晶系	立方晶系
体积不发生变化 (仅发生形状变化)		
体积发生变化		



常用磁致伸缩材料

常用磁致伸缩材料

镍

铁镍

铁铝

铁钴钒

铁氧体

磁致伸缩材料的应用

在磁（电）-声换能器中的应用

声纳、超声换能器、扬声器等。

在磁(电)-机械致动器中的应用

精密流体控制、超精密加工、超精密定位、机器人、精密阀门、微马达以及振动控制等工程领域。

传感器敏感元件

超磁致伸缩材料除用于驱动之外，利用其磁致伸缩效应或逆效应还可以制作检测磁场、电流、应变、位移、扭矩、压力和加速度等的传感器敏感元件。

磁致伸缩液位传感器，可实现对液位的高精度计量，其测量分辨率高于0.11 mm。

要点总结

半导体材料
超导材料
磁功能材料

第四节 热功能材料



内容

随着温度的变化，有些材料的某些物理性能会发生显著变化，如热胀冷缩、出现形状记忆效应或热电效应等，这类材料称为热功能材料。

本章主要内容：

- ◆ 膨胀材料
- ◆ 形状记忆材料
- ◆ 测温材料

膨胀材料

热膨胀是指材料的长度或体积在不加外力时随温度的升高而变大的现象。

材料热膨胀的本质是原子间的平均距离随温度的升高而增大，即是由原子的非简谐振动引起的。

材料热膨胀系数的大小与其原子间的接合键强弱有关，结合键越强，则给定温度下的热膨胀系数越小，材料中陶瓷的结合键（离子键和共价键）最强，金属的（金属键）次之，高聚物的（范德华力）最弱，因此热膨胀系数依次增大。

常用的膨胀材料包括低膨胀材料、定膨胀材料和热双金属材料

1、低膨胀材料

- 低膨胀材料是热膨胀系数较小的材料，也叫因瓦（Invar）合金。
- 主要应用于精密仪器、标准量具等以保证仪器精度的稳定及设备的可靠性。

低膨胀合金（因瓦 Invar 合金）

名称	成分	晶系	磁性	$\alpha/(1/^\circ\text{C})$	T_c 或 $T_N/^\circ\text{C}$
Fe-Ni 因瓦	35Ni-65Fe	立方	铁磁	1.2×10^{-6}	232
超因瓦	32Ni-64Fe-4Co	立方	铁磁	0.0	230
不锈因瓦	37Fe-52Co-11Cr	立方	铁磁	0.0	127
Fe-Pt 因瓦	75Fe-25Pt	立方	铁磁	-30×10^{-6}	80
Fe-Pd 因瓦	69Fe-31Pd	立方	铁磁	0.0	340
Cr 基因瓦	94Cr-5.5Fe-0.5Mn	立方	反铁磁性	$\sim 1 \times 10^{-6}$	~ 45
Mn 基因瓦	α -Mn	立方	反铁磁性	$< 10^{-6}$ (4.2K)	-178
Gd-Co 因瓦	67Co-33Gd	立方	亚铁磁	$\sim 3 \times 10^{-6}$	-160
Y2Fe17 因瓦	10.5Y-89.5Fe	六角	铁磁	—	-29
非晶态 Fe-B 因瓦	83Fe-17B	非晶态	铁磁	$(1\sim 2) \times 10^{-6}$	~ 320

注：1. 除指明温度外， α 都是室温值。

2. T_c 为铁磁物质的居里点， T_N (奈耳点) 是反铁磁物质的居里点。



2、定膨胀材料

- 定膨胀材料是指在某一温度范围内具有一定膨胀系数的材料，也称可伐（Kovar）合金；
- 主要用于与玻璃、陶瓷等材料相封接，要求与被封接材料的膨胀系数相匹配。

定膨胀合金（可伐 Kovar 合金）

名称	成分 %				线膨胀系数 $\alpha / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$				用途
	Ni	Fe	Co	Cr	0~300℃	0~400℃	0~500℃	0~600℃	
4J42	41.5~42.5	余			4.4~5.6	5.4~6.6			与软玻璃、陶瓷封接
4J43	42.5~43.5	余			5.6~6.2	5.6~6.8			杜美丝芯材
4J45	44.5~45.5	余			6.5~7.7	6.5~7.7			与软玻璃、陶瓷封接
4J54	53.5~54.5	余			10.2~11.4	10.2~11.4			与云母封接
4J58	57.5~58.5	余			11.73	11.92	12.07	12.28	精密机床基尺
4J6	41.5~42.5	余		5.5/6.3	7.5~8.5	9.5~10.5			与软玻璃封接
4J28		余		27~29			10.4~11.6		与软玻璃封接
4J29	28.5~29.5	余	16.8~17.5		4.7~5.5	4.6~5.2	5.9~6.4		与硬玻璃封接
4J34	28.5~29.5	余	19.5~20.5		6.2~7.5	6.2~7.6	6.5~7.6	7.8~8.4	与 95% Al ₂ O ₃ 封接



3、热双金属材料

- 由膨胀系数不同的两种金属片沿层间焊接在一起的叠层复合材料；
- 较高膨胀系数金属层为主动层，较低的为被动层。如5J11热双金属是由Mn75Ni15Cu10（主动层）与Ni36（被动层）组成。受热时，双金属片向被动层弯曲，将热能转化成机械能。
- 可用作各种测量和控制仪表的传感元件。

未受热

高 主动层 Mn75Ni15Cu10

低 被动层 Ni36

受热后

可作为各种测量和控制仪表的传感元件

二、形状记忆材料

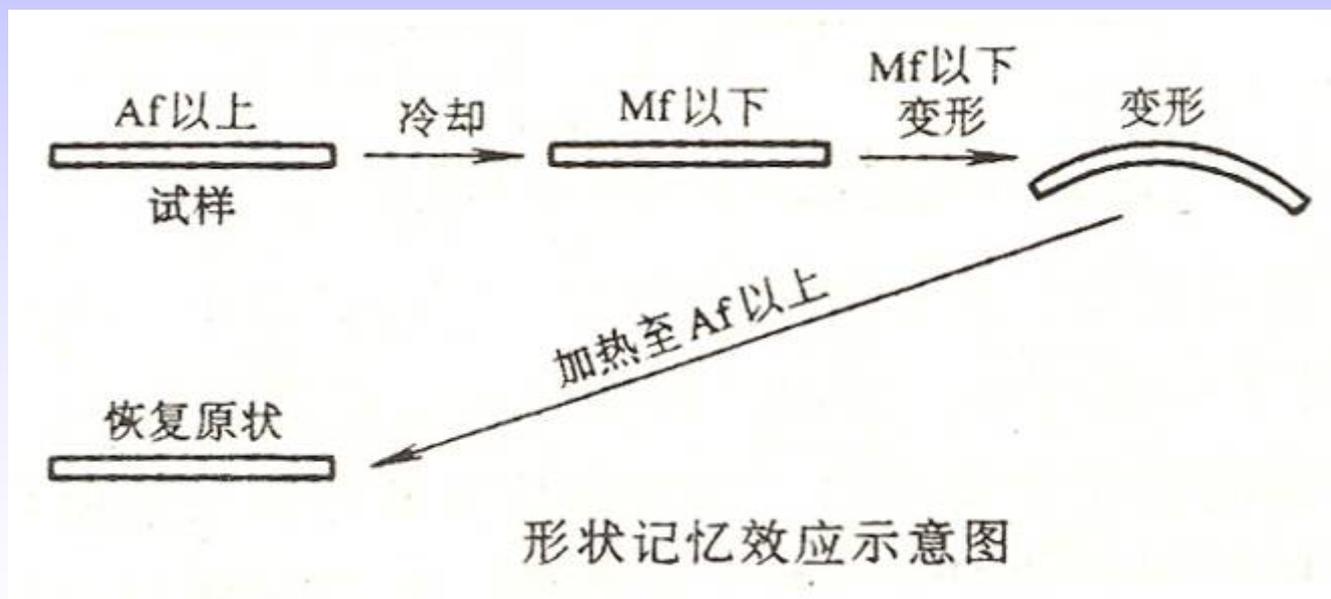
- 将具有某种初始形状的制品进行变形后，通过加热等手段处理时，制品又恢复到初始形状。
- 形状记忆材料通常包括：
 - 形状记忆合金
 - 形状记忆聚合物
 - 形状记忆陶瓷。

(一) 形状记忆合金

- 合金的形状记忆效应实质上是在温度和应力的作用下，合金内部热弹性马氏体形成、变化、消失的相变过程的宏观表现。
- 这种热弹性马氏体不像Fe-C合金中的马氏体那样，在加热转变成它的母相（奥氏体）之前即发生分解，而是**加热时直接转成它的母体**。
- 热弹性马氏体冷却时马氏体长大，加热时马氏体收缩，热弹性马氏体的相变是可逆的，且相变的过冷度很小。

热弹性马氏体形状记忆效应

- 将一定形状的记忆合金试样冷却到 M_f 点以下，对之进行一定限度的变形，卸去载荷后，变形被保留下来；
- 将变形了的试样加热到 A_s 以上，试样开始恢复，加热到 A_f 点，试样恢复到变形前的形状。



常用形状记忆合金

形状记忆合金

镍-钛系

目前用量最大
优点：抗拉强度高、疲劳强度高、耐蚀性好、密度小、与人体有生物相容性
缺点：成本高、加工困难

铜系

缺点：功能不如镍-钛系
优点：成本低、加工容易

铁系

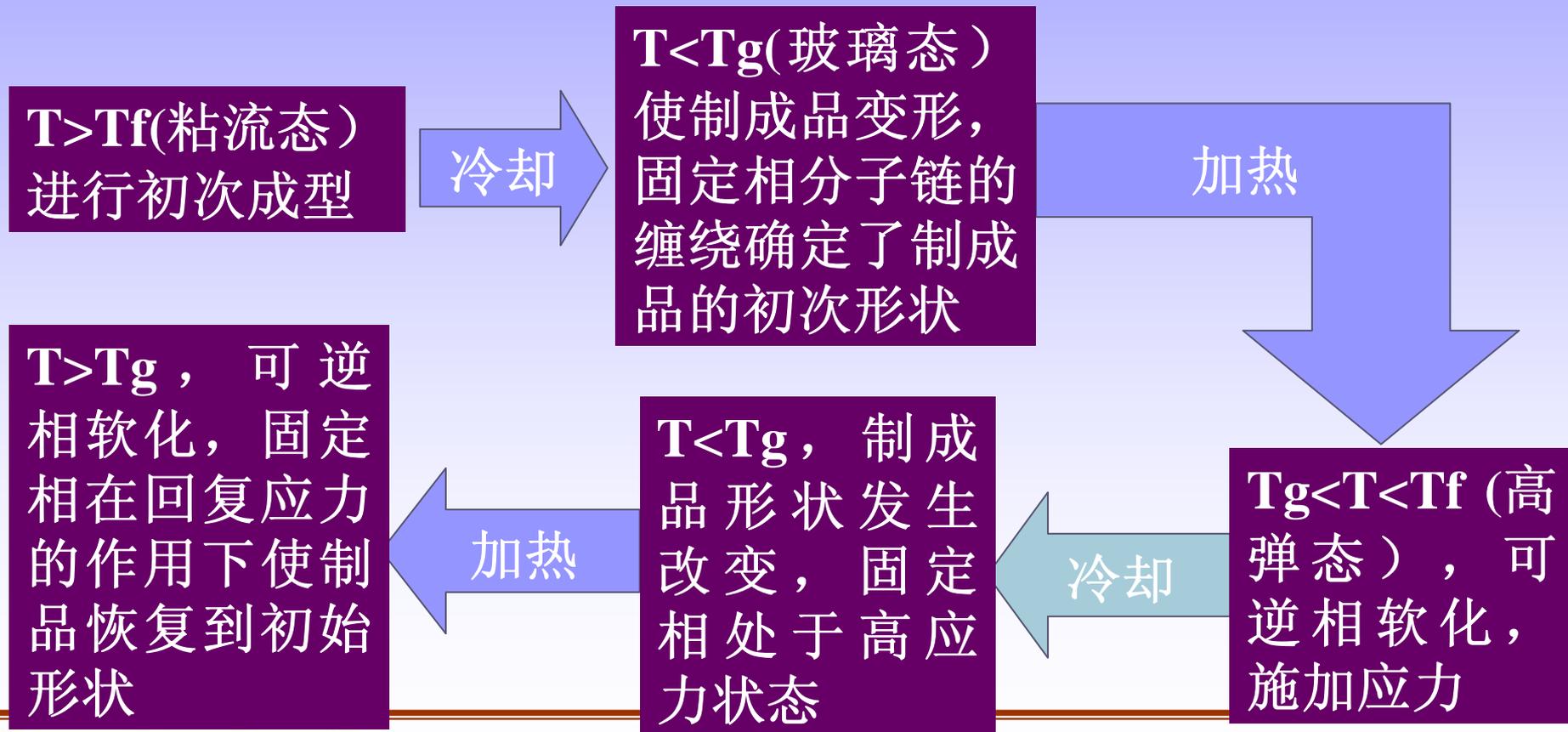
缺点：功能不如铜系
优点：具有价格竞争优势

(二) 形状记忆聚合物

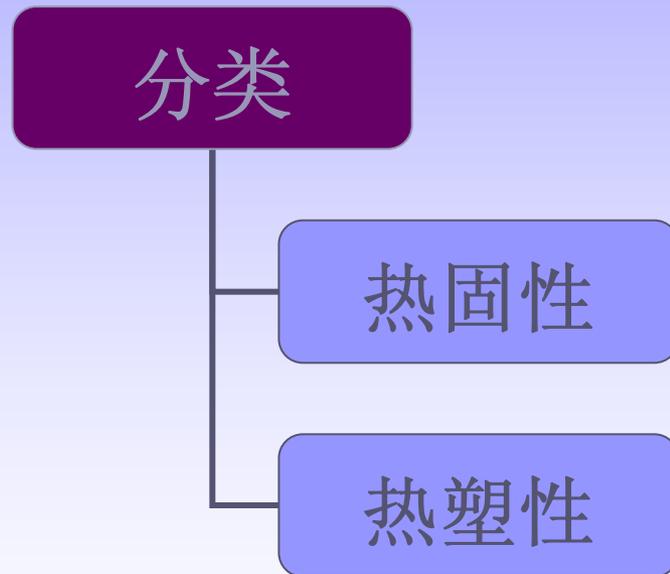
- 形状记忆聚合物不同于马氏体相变，而是基于高分子材料中分子链的取向与分布的变化过程；
- 这种聚合物具有两相结构，即固定相和可逆相；
- 可逆相是能够随温度变化在结晶与熔融态间，或者在玻璃态与高弹状态间可逆转变的相，随温度的升高或降低，可逆相的结构发生变化，使之发生软化、硬化。
- 固定相则在工作温度范围内保持不变。

聚合物的形状记忆原理

两相结构： 固定相+可逆相



凡是有固定相和可逆相结构的聚合物都具有形状记忆效应。以固定相可分：

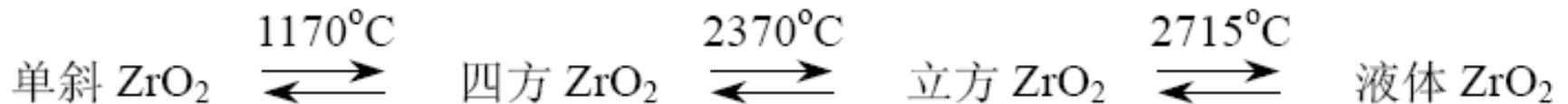


形状记忆聚合物的特点

- ◆ 密度小、强度较低、塑韧性较高
- ◆ 形状恢复可能允许的变形量大
- ◆ 形状恢复的温度范围窄
- ◆ 形状恢复应力及形状变化所需要的外力小
- ◆ 成本低

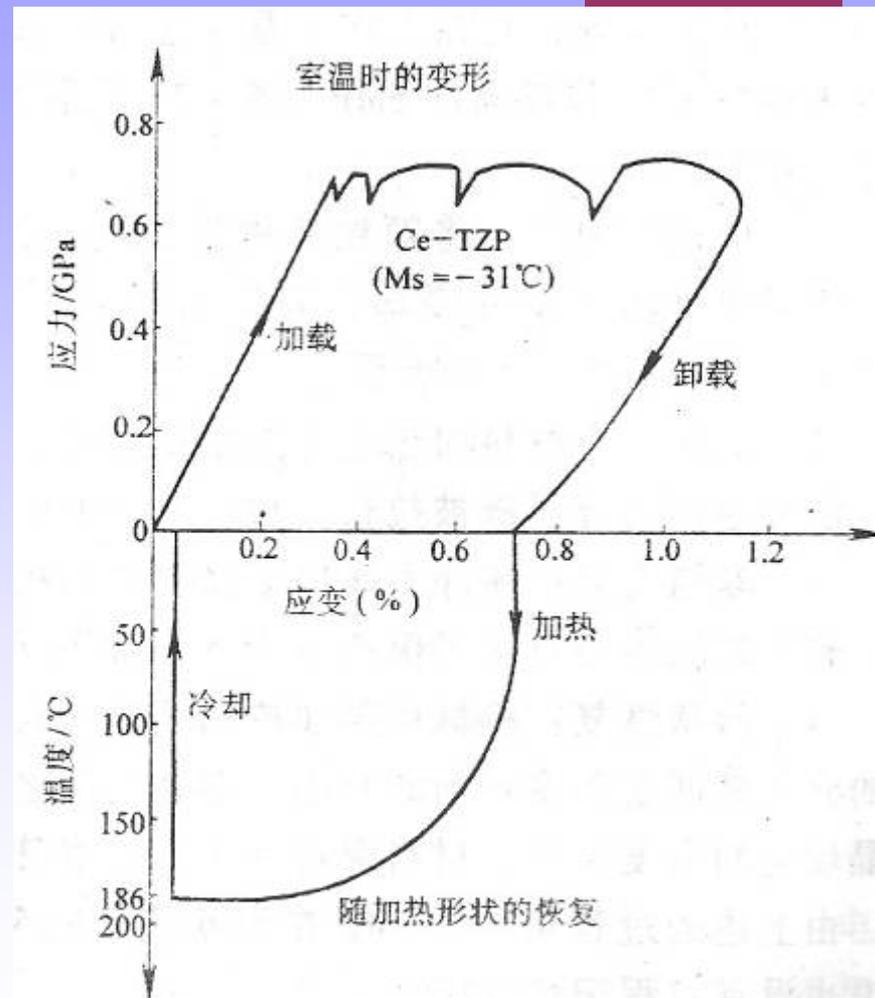
(三) 形状记忆陶瓷

- 20世纪60年底人们确认陶瓷材料也存在马氏体相变，一个著名的例子就是ZrO₂陶瓷中的马氏体相变，这一相变现象可以使陶瓷材料具有形状记忆效应。
- 随温度的变化纯ZrO₂有三种晶型：单斜晶系、四方晶系、立方晶系。单斜向四方转变有5%的体积变化，而且应力也可诱发单斜向四方的转变



氧化锆陶瓷的形状记忆效应

- 第一步：在室温下施加压力，样品首先发生弹性变形，接着在近乎恒定的应力下发生流变；
- 第二步：卸载。卸载后弹性变形消失而塑性变形则保留下来。
- 第三步：加热到 A_f 以上，样品从 60°C 开始逆转变，到 200°C 逆转变结束，变形也随着消失。



ZrO₂-12% CeO₂ 的形状记忆过程

形状记忆材料的应用

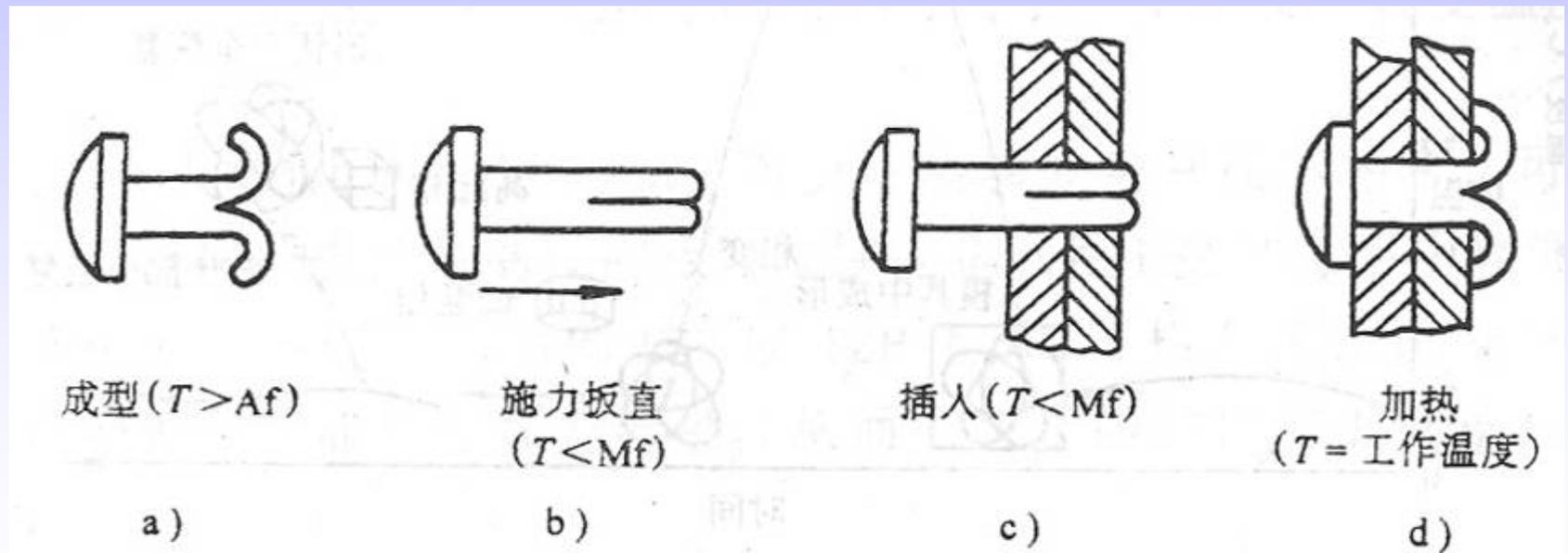
机械工程领域 热套

生物医学方面 接骨板、人工关节等

空间技术 压缩天线

记忆合金的应用

- 将记忆合金制成在 A_f 温度以上具有 (a) 所示形状铆钉，铆接时先将其冷却到 M_f 温度以下，这时合金处于完全的马氏体态很容易变形，略施加一点力将铆钉扳成 (b) 所示并插入铆钉孔 (c)，然后随温度回升到 A_f 以上，铆钉回复到变形前的形状达到铆接的目的 (d)。

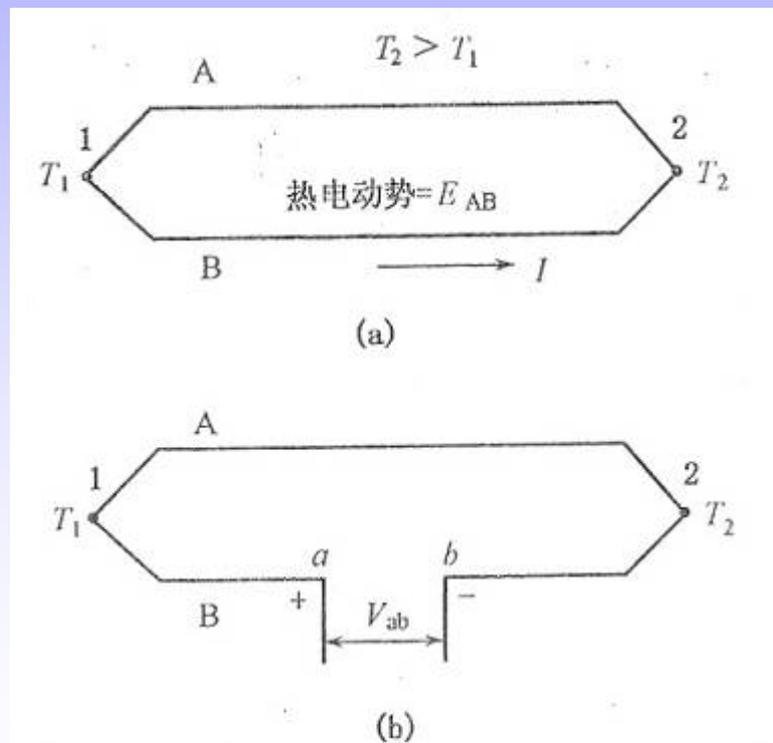


记忆合金用作铆钉的工作原理图



三、测温材料

- 热电偶是应用最广的一种测温原件，它是由两种不同材料导线连接成的回路，其感温的基本原理是热电效应。
- 由两种不同的导体（或半导体）A、B组成闭合回路，当两接触点保持在不同的温度 T_1 ， T_2 时，回路中将有电流通过，此回路称为热电回路。回路中出现的电流称为热电流。回路中出现的电动势 E_{AB} 称为珀尔贴电动势。



塞贝克效应

常用热电偶材料

热电偶材料

铜-康铜

适合温度范围
 $-200-400^{\circ}\text{C}$

镍铬-镍铝

适合温度范围
 $<1300^{\circ}\text{C}$

铂铑-铂

适合温度范围
 $<1350^{\circ}\text{C}$
短期可达 1600°C

钨-铼

适合温度范围
 $<2500^{\circ}\text{C}$
短期可达 2800°C

金铁

低温热电偶

适合温度范围
 $-270-0^{\circ}\text{C}$

适合温度范围
 $-269-0^{\circ}\text{C}$

常用热电偶材料

序号	热电偶名称或代号	正热电极材料		负极材料		热电偶材料
		代号	名义成分	代号	名义成分	
3	S型	SP	PtRh10	SN	Pt100	GB3772—83, IEC
4	N型	NP	NiCr14.5Si1.5	NN	NiSi45Mg0.1	ZBN05004—88, IEC
5	K型	KP	NiCr10	KN	NiSi3	GB2614—85, IEC
6	J型	JP	Fe	JN	NiCu55	GB4994—85, IEC
7	E型	EP	NiCr10	EN	NiCu55	GB4993—85, IEC
8	T型	TP	Cu100	TN	NiCu55	GB2903—82, IEC
9	镍铬—金铁	NiCr	NiCr10	AuFe	Au - 0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
10	铜—金铁	Cu	Cu100	AuFe	Au - 0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
11	钨铼3—钨铼25	WRe3	WRe3		WRe25	ZBN05003—88 ASTME696—84
12	钨铼5—钨铼26	WRe5	WRe5		WRe26	ZBN05003—88, ASTME988—84
13	钨铼5—钨铼20	BP5	BP5	BP20	BP20	ГОСТ3044—84
14	镍铬—考铜(XK)	HX9.5	HX9.5	MHML43 - 0.5	CuNi43Mn0.5	ГОСТ3044—84, ГОСТ492—73
15	HK—CA	HK	Ni17Co2Al2Mn1Si	CA	Ni35Al1.5Mn1Si	ГОСТ6071—51, ГОСТ6072—51

* x_B ——摩尔分数。



西

标准热电偶材料对标准铂的热电动势

标准化热电偶电极材料对标准铂(Pt-67)的热电动势

mV

温度 /°C	热 电 极 材 料											
	BP	BN	SP	RP	KP	KN	NP	NN	JP	JN	EN、TN	TP
-200	-	-	-	-	-3.41	2.48	-	-	-2.50	-	5.41	-0.19
-100	-	-	-	-	-2.23	1.32	-	-	-1.62	-	3.01	-0.37
100	0.619	0.586	0.645	0.647	2.813	-1.282	1.784	-0.989	1.78	-3.49	-3.51	0.77
200	1.451	1.273	1.440	1.468	5.969	-2.168	3.942	-1.970	3.37	-7.40	-7.45	1.83
300	2.440	2.009	2.323	2.400	9.322	-2.885	6.348	-2.993	4.68	-11.64	-11.71	3.15
400	3.553	2.767	3.260	3.407	12.762	-3.633	8.918	-4.055	5.74	-16.10	-16.18	4.69
500	4.778	3.536	4.234	4.471	16.210	-4.430	11.601	-5.144	6.69	-20.70	-20.79	-
600	6.107	4.316	5.237	5.582	19.616	-5.286	14.367	-6.242	7.73	-25.36	-25.47	-
700	7.538	5.108	6.274	6.741	22.950	-6.178	17.202	-7.324	9.08	-30.05	-30.16	-
800	9.068	5.914	7.345	7.949	26.206	-7.071	20.096	-8.361	10.69	-38.81	-34.82	-
900	10.692	6.735	8.448	9.203	29.385	-7.940	23.044	-9.326	12.47	-39.40	-39.40	-
1 000	12.405	7.572	9.585	10.503	32.493	-8.775	26.040	-10.208	14.07	-43.87	-43.86	-
1 100	14.202	8.425	10.754	11.846	35.535	-9.573	29.074	-11.002	-	-	-	-
1 200	16.074	9.291	11.947	13.224	38.500	-10.328	32.136	-11.700	-	-	-	-
1 300	18.009	10.164	13.155	14.624	41.356	-11.042	35.211	-12.091	-	-	-	-
1 400	19.990	11.038	14.368	16.035	-	-	-	-	-	-	-	-
1 500	21.997	11.903	15.576	17.445	-	-	-	-	-	-	-	-
1 600	24.007	12.750	16.771	18.842	-	-	-	-	-	-	-	-
1 700	25.993	13.567	17.942	20.215	-	-	-	-	-	-	-	-
1 800	27.939	14.354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



第五节 光功能材料



光功能材料按用途分为

光介质材料

● 固体激光材料

固体发光材料

非线性光学材料

金铁电光晶体材料

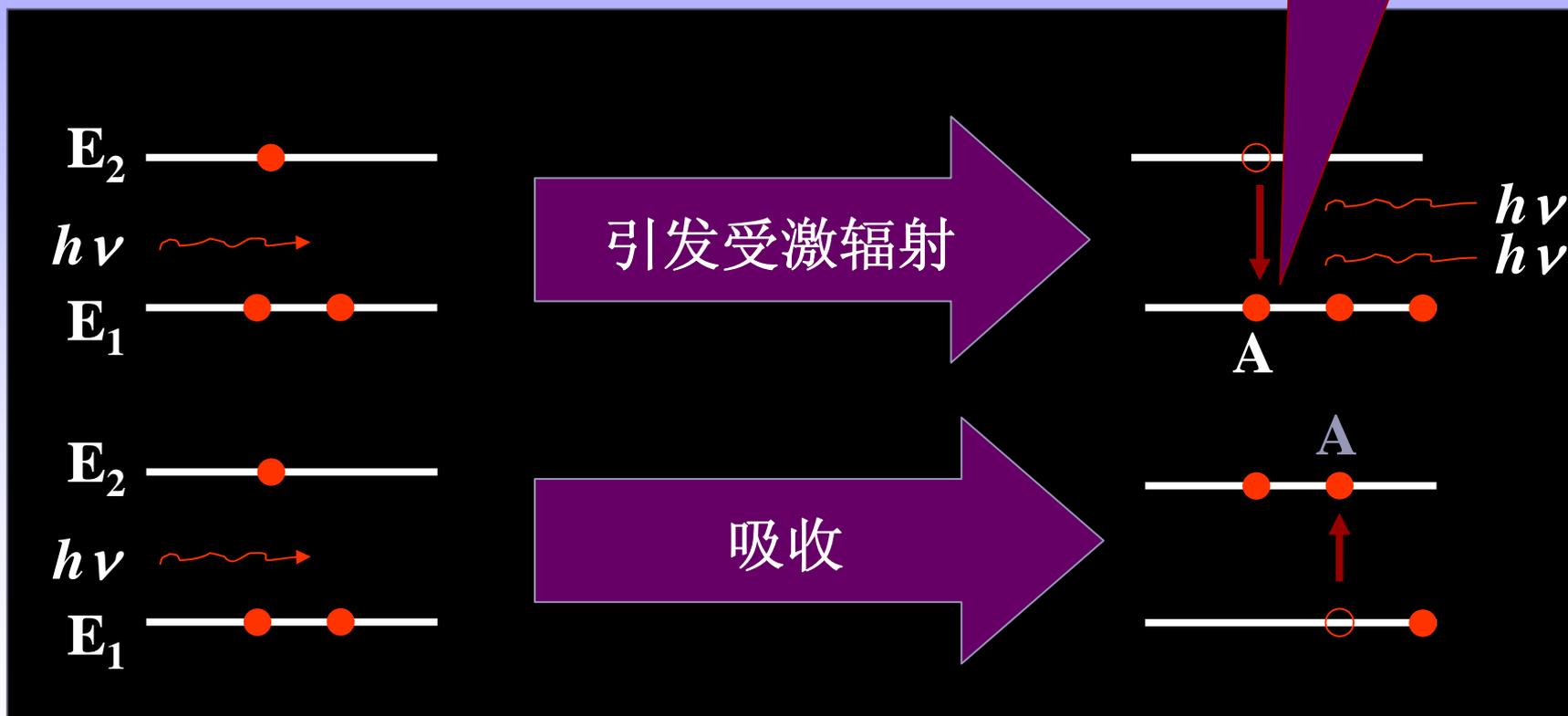
● 光导纤维

光学薄膜

弹光与声光材料等

一、固体激光材料

(一) 激光的产生



入射光子引发受激辐射或被吸收

- 只有能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子才能引起受激辐射；
- 受激辐射后，就有两个能量都是 $h\nu$ 的光子；
- 受激辐射光的位相、偏振都与入射光相同；
- 在外界光子引发受激辐射的同时，也发生吸收的过程；
- 处于低能态的原子数总是很多，外界光子被吸收的可能性更大，引发受激辐射的可能性很小。

产生激光的必要条件

只有让高能级的原子数大于低能级的原子数；（也叫粒子数反转）

才可能使受激辐射的几率大于吸收几率；

维持连续不断的受激辐射。

产生激光的充分条件

单色光

粒子数反转产生的激光寿命短、微弱，没有实用价值；

必须经过光谐振器，使光子不断增值，最后产生很强的位相相同的单色光，就是实用的激光。

激光器

- 自1960年梅曼研制出第一台红宝石激光器以来，激光器的研制和应用有了飞速发展，在工业、医疗、民用、国防等领域应用广泛。
- 激光器主要由三部分组成：激光工作物质、激励能源、光学共振腔。
 - 1) 工作物质是激光器的核心，只有能实现能级跃迁的物质才能作为激光器的工作物质。
 - 2) 激励能源（光泵）作用是给工作物质以能量，即将原子由低能级激发到高能级的外界能量。
 - 3) 光学共振腔是激光器的重要部件，其作用一是使工作物质的受激辐射连续进行；二是不断给光子加速；三是限制激光输出的方向。
- 根据激光工作物质，可把激光器分为气体激光器、固体激光器、分子激光器、半导体激光器等。

固体激光器

- ❏ 固体激光器发展最早，其体积小，输出功率大，应用方便。但由于工作物质很复杂，造价高。
- ❏ 用于固体激光器的物质主要有三种：
 - ❏ **红宝石**工作物质，它是在单晶体刚玉基质中掺入少量的三价铬离子后形成的激活晶体。掺入的三价铬离子是激活剂，起发光中心的作用。输出波长为694.3nm，为红色光；
 - ❏ **掺钕铝石榴石**（Nd: YAG）工作物质，输出的波长为1.06 μm 呈白蓝色光；
 - ❏ **钕玻璃**工作物质，输出波长1.06 μm 呈紫蓝色光。

气体激光器

- 工作物质主要以气体状态进行发射的激光器
- 在常温常压下是气体，但有的物质在通常条件下是液体（如非金属粒子的有水、汞），及固体（如金属离子结构的铜，镉等粒子），经过加热使其变为蒸气，利用这类蒸气作为工作物质的激光器，统归气体激光器之中。
- 典型的气体激光器为**氦-氖（He-Ne）激光器**
- 气体激光器与固体激光器相比较，两者中以气体激光器的结构相对简单得多，造价较低，操作简便，但是输出功率常较小。

分子激光器

- 分子气体激光器通过分子能级间的跃迁产生激发振荡的一和种激光器，分子气体激光器中主要使用的为 **CO₂激光器**；
- CO₂激光器效率高，不造成工作介质损害，发射出10.6 μ m波长的不可见激光，是一种比较理想的激光器。

二、光导纤维

- 光纤是一种非常细的可弯曲的导光材料。单根光纤的直径约为几到几百微米，它由内层材料（芯料）和包层材料（涂层）组成的复合结构。为了保护其不受损坏、最外面再加一层塑料套管。



覆层
高强材料

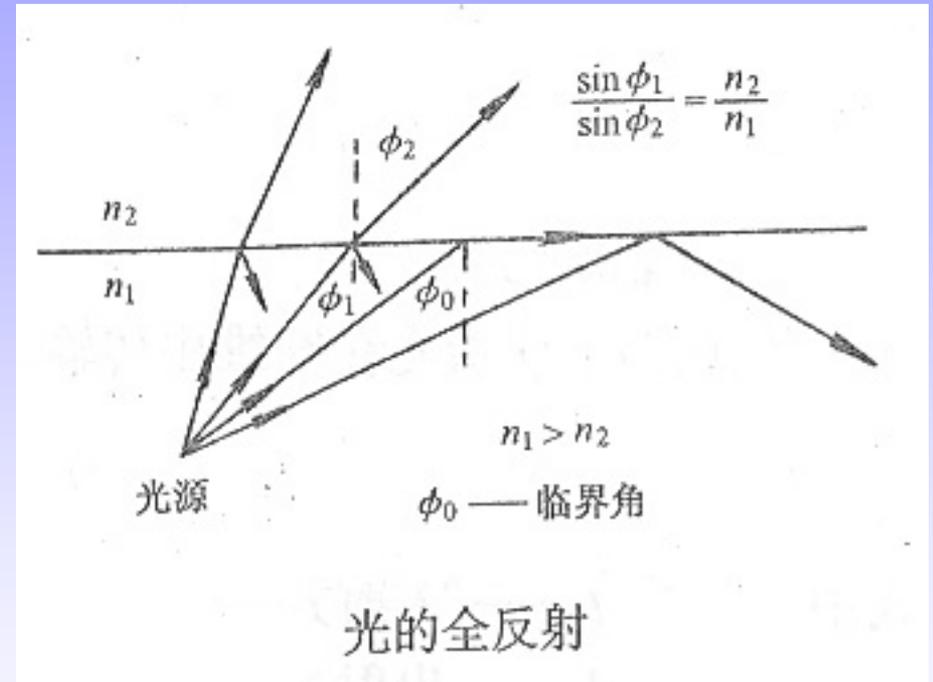
纤芯
高透明
固体材料

包层
折射率较纤芯低
固体材料

总外径
125~200 μm

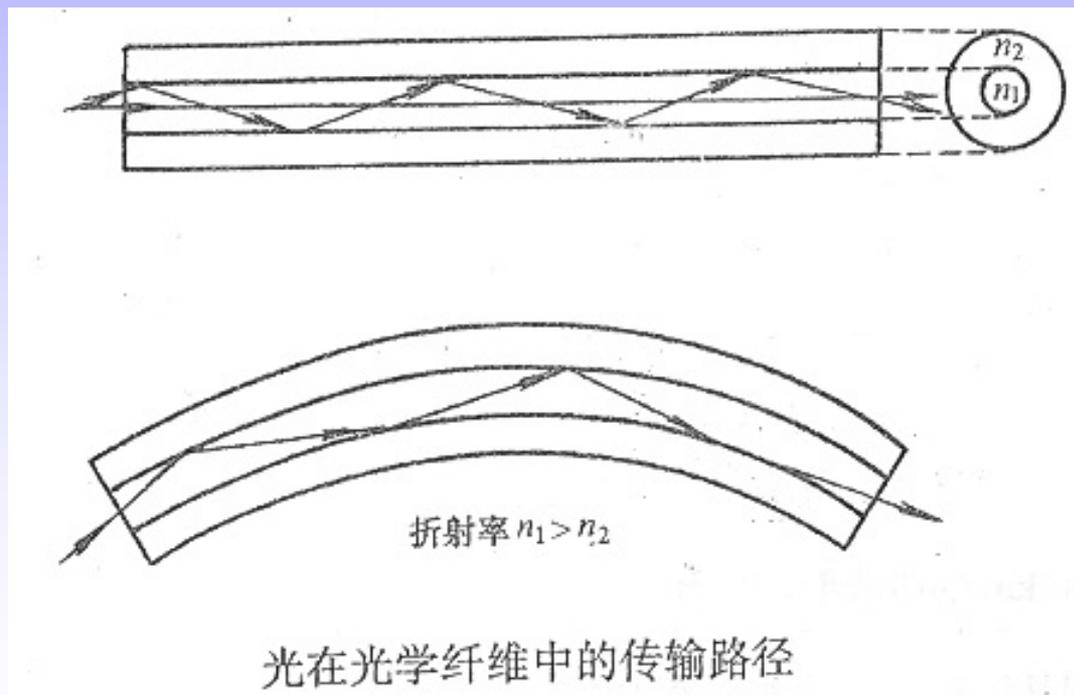
全反射现象

- 一切光纤的工作基础都是光的全反射现象。
- 如果一束光投射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种媒质的界面上时（设 $n_1 > n_2$ ），入射光将分为反射光和折射光。入射角 ϕ_1 与折射角 ϕ_2 之间服从 $n_1/\sin \phi_1 = n_2/\sin \phi_2$ 的折射定律。
- 当 ϕ_1 增大时， ϕ_2 也相应增加，当 $\phi_2 = \pi/2$ ， $\phi_1 = \arcsin(n_2/n_1)$ 时，入射光全部返回原来的介质中，这种现象叫做光的全反射。



光在光纤中的传播原理

- 光纤芯料的折射率高于包层材料的折射率，当入射光线由内层射到两层的界面时，只要入射角小于临界角，就可全反射折回内层，完全避免了传输过程中的折射损耗。



常用光纤材料

石英玻璃光纤、
多组分玻璃光纤、
高双折射偏振保持光纤、
单偏振光纤、
各种传感器用光纤等。

光纤材料

- 按光纤材料的组分不同可分为石英光纤、多组分氧化物玻璃光纤、非氧化物玻璃光纤、晶体光纤和高聚物光纤。
- 石英光纤是以 SiO_2 为主成分制成的。目前通讯用光纤都是 SiO_2 玻璃光纤。

石英玻璃光纤的各种特性参数

参数 光纤	结构参数		传输特性		连接耦合特性		适用领域
	(包层/芯径) / μm	相对折射率 差/%	损耗/ $(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$ (使用波长/ μm)	带宽 / $(\text{MHz}\cdot\text{km})$	连接	与光源 耦合效率	
阶跃型光纤	125/50 125/85 140/100	1.5 ~ 2.0	3.00 ~ 6.00 (0.85)	< 100	易	大	小容量光纤通信 非功能型光纤传感器
梯度型光纤	-	≈ 1.0	$\sim 3.00(0.85)$ $\sim 1.00(1.30)$	100 ~ 1 000	较易	中	中容量光纤通信 非功能型光纤传感器
单模光纤	-	≈ 0.3	~ 0.50 (1.30)	> 1 000	较难	小	大容量光纤通信 功能型光纤传感器

主要红外光纤的光学传输性能

- 光纤被大量地应用在光通讯方面，此外，光纤作为传感器在军事、医学都有重要应用。

主要红外光纤的光学传输性能

材 料	透光范围/ μm	最低损耗/ $(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$		最低损耗波长 / μm	零材料色散波长 / μm
		理论值	已达值		
氟化物玻璃	0.20 ~ 7.00	10^{-3}	0.65	2.59	1.62
氧化物玻璃	0.40 ~ 6.00	10^{-2}	13.00	2.05	1.69
硫化物玻璃	0.50 ~ 11.00	10^{-2}	35.00	2.44	4.89
多晶体	0.63 ~ 35.00	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	250.00	10.60	-
单晶体	0.13 ~ 35.00	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	300.00	10.60	-

第六节 其它功能材料



- ◆ 敏感材料
- ◆ 储氢材料
- ◆ 隐形材料
- ◆ 声功能材料

一、敏感材料

敏感材料可以分为：声、光、电压、磁、气、热、湿、力、电化学、生物等敏感材料

(一) 气敏感材料

随着环境气氛的变化，这类材料的电阻会明显改变，俗称“电鼻子”，用以检测环境中气氛的变化。

构成

成分：各种氧化物陶瓷。

典型的有：

SnO_2 、 ZnO 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 ZrO_2 、
 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 TiO_2 等

几何形状：

薄膜型、厚膜型、多孔型

应用

SnO₂气敏陶瓷:

用于氢、甲烷、丙烷、乙醇、丙酮、一氧化碳、煤气、天然气的检测。

ZrO₂气敏陶瓷:

用于钢水中含氧量的测定

γ-Fe₂O₃气敏陶瓷:

用于检测还原性气体

α - Fe₂O₃气敏陶瓷:

用于检测异丁烷气体、石油液化气等

ZnO掺入不同的催化剂

用于检测丁烷、丙烷等气体

（二）光敏感材料

光敏感材料是指与光发生作用后，某些性质会发生明显变化，以反映光信号的强弱及其携带的信息。

构成

主要有：

光敏电阻材料

光电池材料

光敏纤维

应用

探测光信号

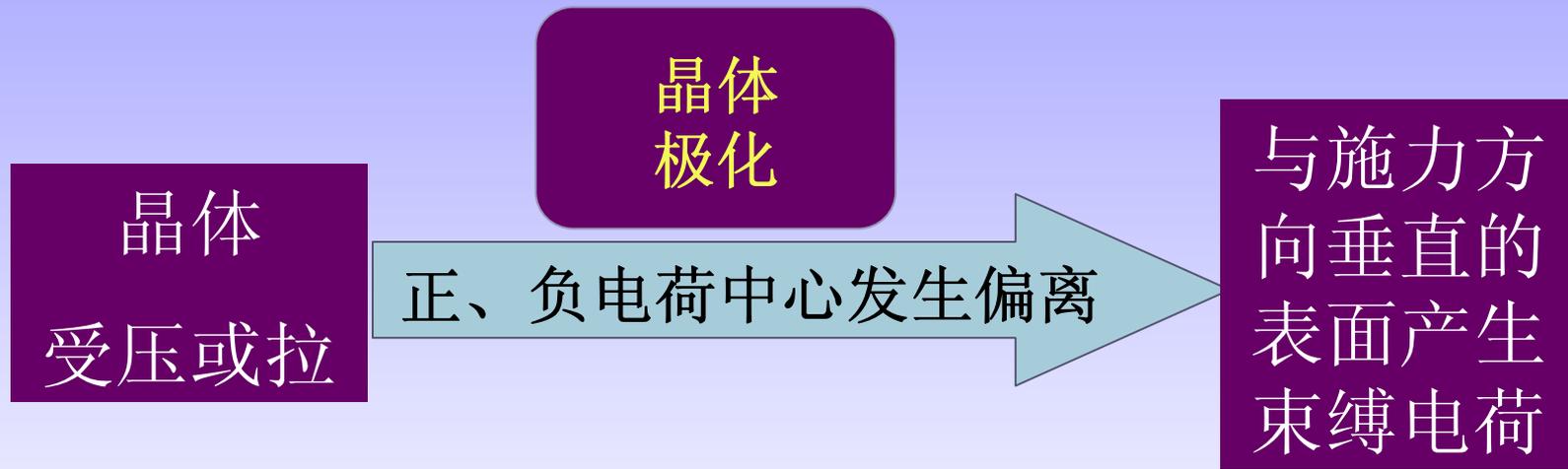
用光敏电阻材料（**CaAs**、**CdS**、**PbS**、**PbSe**），制成光电转换元件

太阳能电池

硅是较理想的太阳能电池材料，硫化镉、砷化镉、砷化镓、聚乙炔等也是太阳能电池材料。

(三) 声敏感材料

压电材料：压电晶体、压电陶瓷。

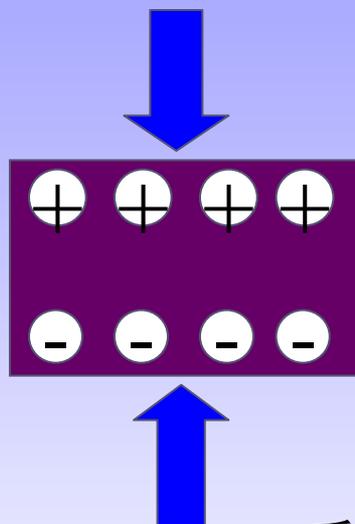


压电效应

压电效应



正负电荷中
心重合，故
不带电

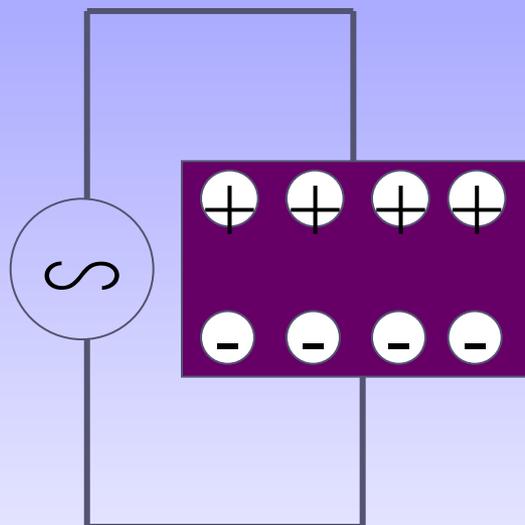


受压极化，
产生表面束
缚电荷

逆压电效应



正负电荷中心重合，故不带电



受外电场的作用，产生极化



压电晶体产生变形

压电晶体在外加电场作用下产生的变形与外加电场的大小及极性（方向）有关。在交变外加电场的作用下，压电晶体将产生拉伸及压缩变形，变形频率与外加电场的频率相同。

当外加电场的频率 $>20\text{kHz}$ 时，则压电晶体的变形频率亦 $>20\text{kHz}$ 。

超声波

利用逆压电效应，超声波探头可产生和发射超声波；利用正压电效应，探头可接收超声波。

常用的压电材料

压电晶体

石英、酒石酸钾钠、磷酸二氢铵、碘酸锂、钽酸锂等

压电陶瓷

钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅等

应用

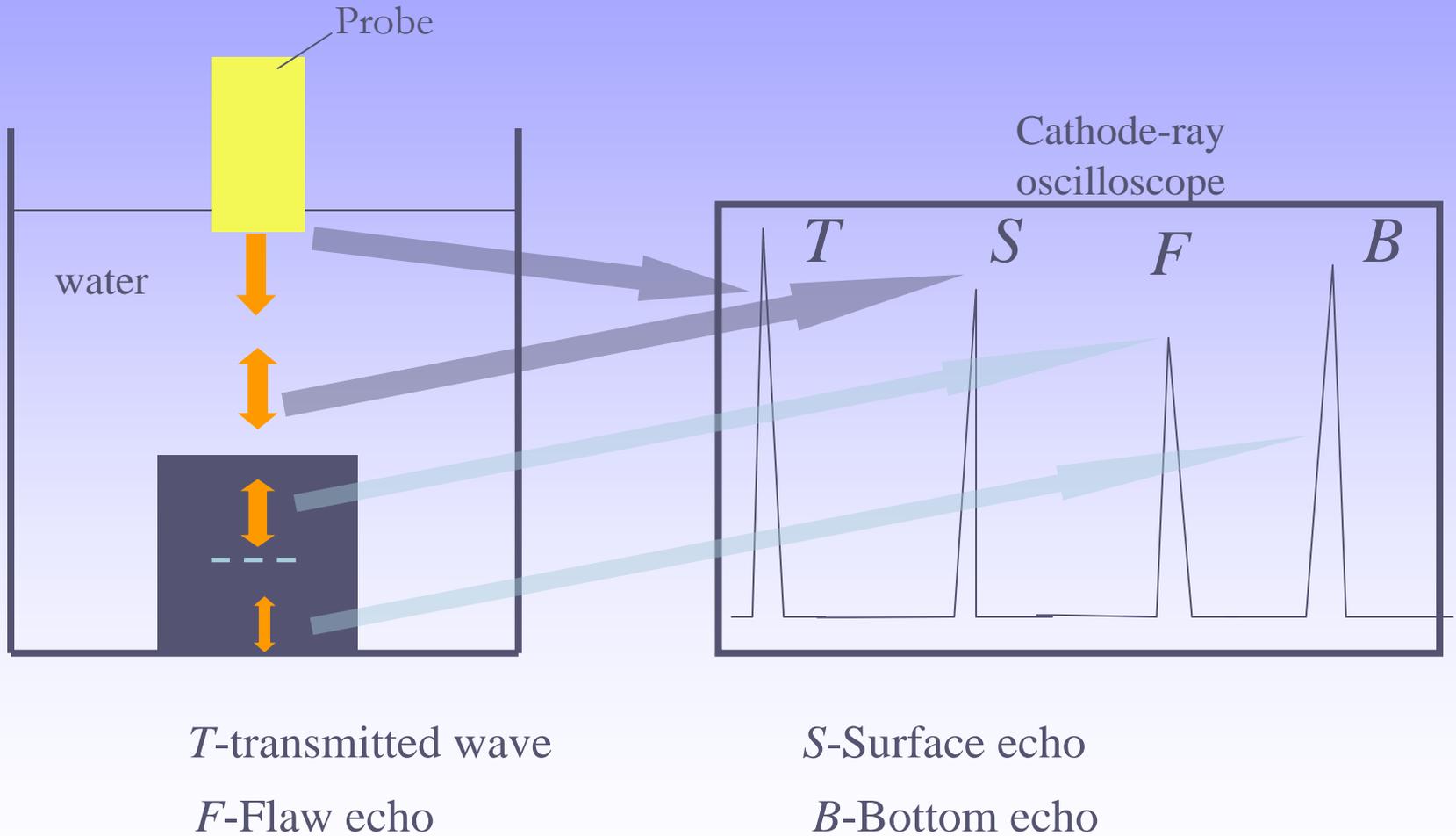
日用

扩音器、电话、钟表、频率稳定器等

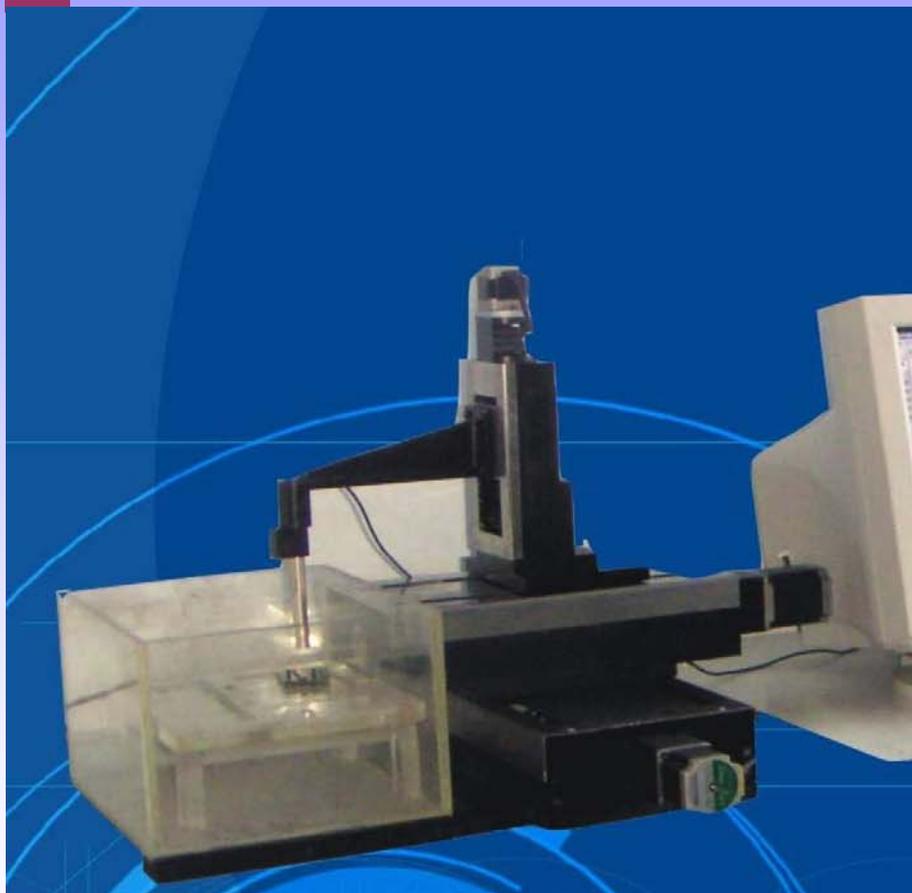
超声应用

水下观测、通信、探测、机械能转换成电能制成引爆装置、压电引火器、超声波清洗、焊接、打孔、无损检测等

Mechanism of A-Scan Ultrasonic NDT



JTUIS超声成像无损检测系统



获奖项目：钎焊接头的超声成像无损检测
技术研究及设备开发

获奖单位：西安交通大学
(第1完成单位)

奖励等级：二 等

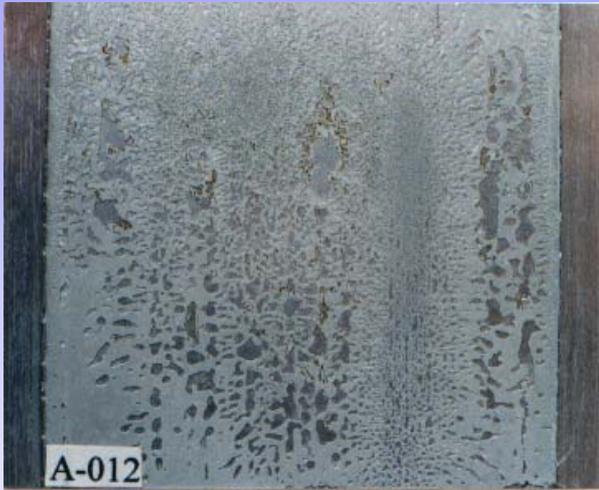
奖励日期：2005年01月

证书号：2004-220

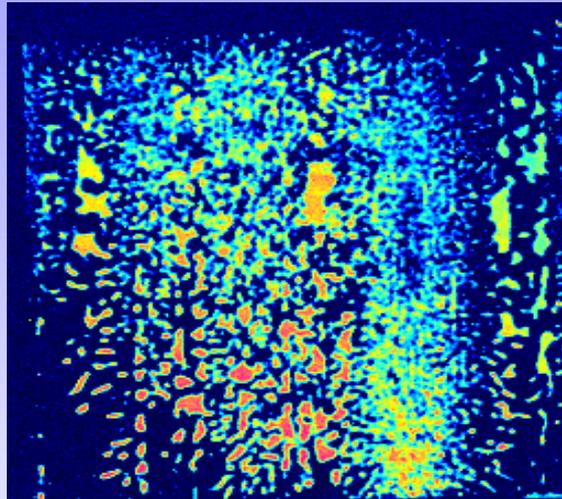


二〇〇五年一月二十日





a) A photo of a actual bonded interface

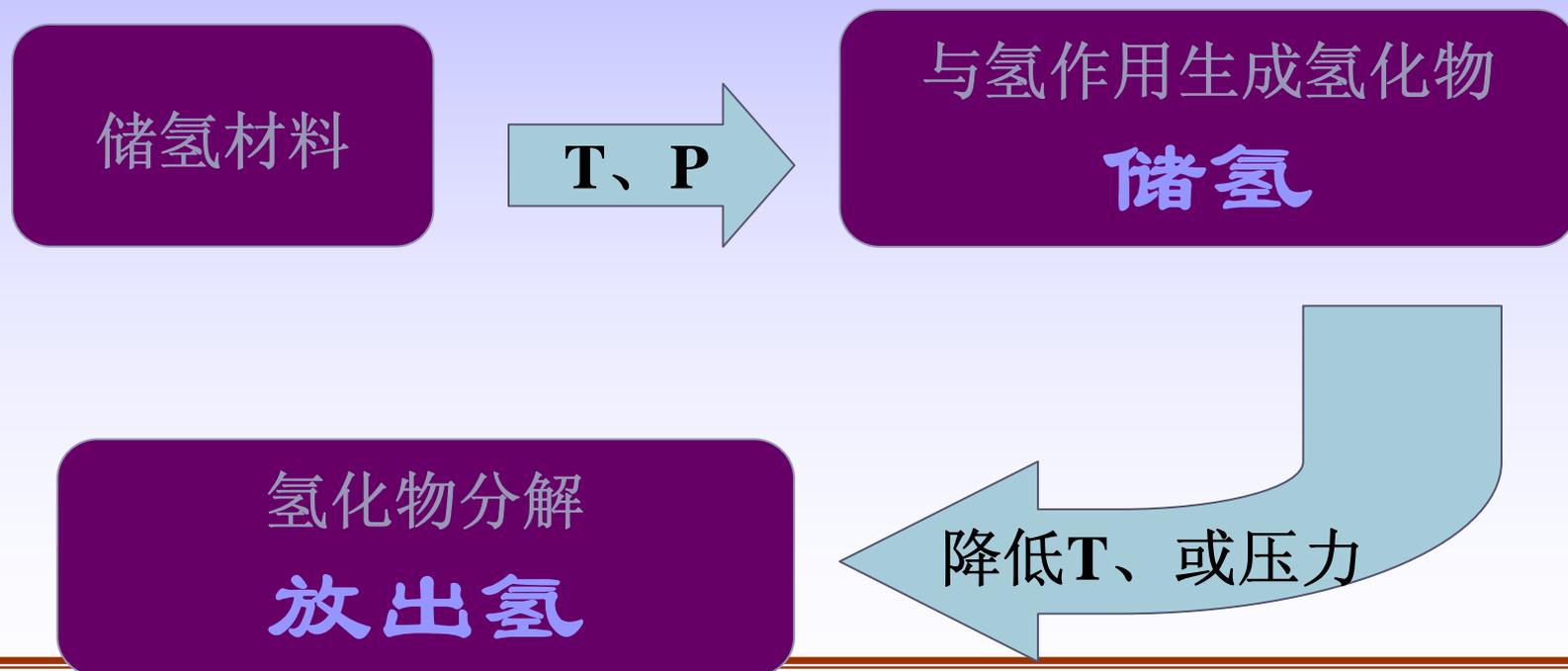


b) The image of the left obtained by JTUIS



二、储氢材料

(1) 基本原理



储氢合金

镁系

储氢量大、重量轻、资源丰富、价格低廉、但分解温度高 $>250^{\circ}\text{C}$

稀土系

LaNi₅

室温即可活化、吸氢释氢容易
但成本高

钛系

钛铁系和钛锰系
价格便宜
缺点：活化困难、反复吸氢后性能下降。

应用

储氢容器

储氢合金的储氢密度高于液态氢的密度。

氢化物电极

镍氢电池比能量高、对人体无害。

制备超纯氢

含有杂质的氢气与储氢合金接触，氢被合金吸收，杂质则被吸附在合金表面。

三、隐形材料

隐身技术是通过降低武器装备等目标的可探测信息特征，使敌方探测系统难以发现或者发现距离缩短的综合技术。

广泛用于：飞机、导弹、坦克、舰船等。

雷达隐形材料

雷达隐身技术中目前主要使用

吸波涂料

吸波结构材料

透波材料

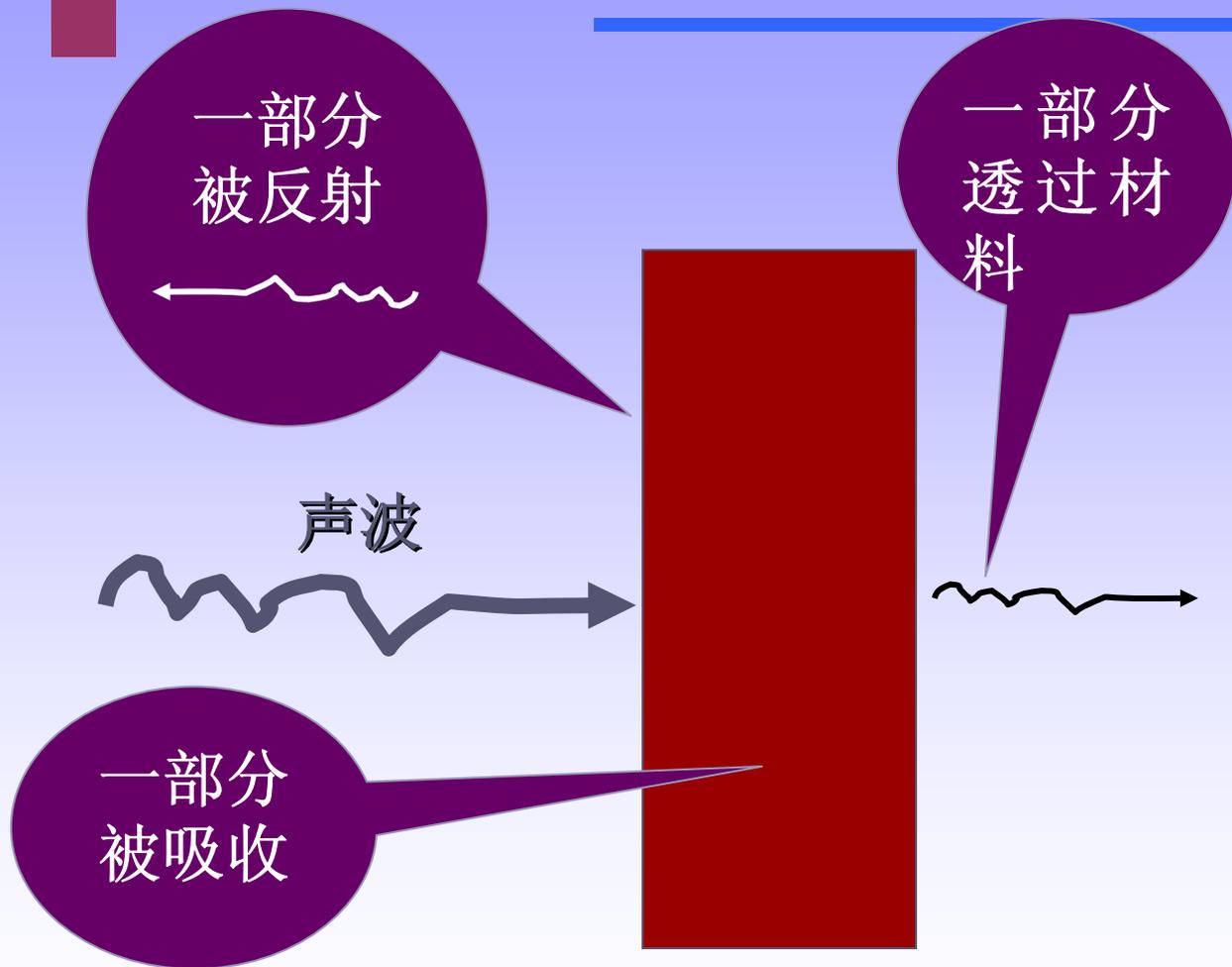
智能蒙皮材料

四、声功能材料

主要用在声发射、声接收、声光转换以及声吸收等方面。

本节主要介绍声吸收材料。

声吸收基本原理



声波入射到刚性界面时，大部分被反射。而当声波入射到多孔、透气或纤维材料时，声波会进入材料并引起空隙中的空气和纤维振动，从而使一部分声能转化为热量而耗散，故材料有吸声功能。

常用吸声材料

吸声材料

无机纤维

玻璃丝、
玻璃棉、
岩棉、
矿渣棉

泡沫塑料

氨基甲酸酯、
脲醛泡沫塑料

有机纤维

棉、麻等
植物纤维

要点总结

热功能材料
光功能材料
其它功能材料

三、磁致伸缩材料

磁致伸缩效应:

- 磁性材料在外磁场作用下，产生伸长或缩短的现象—为磁致伸缩效应。

Fe 随磁场强度的增大而伸长

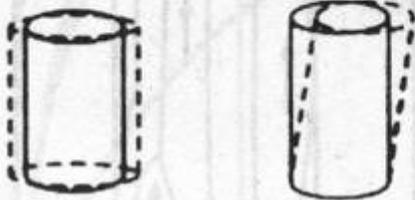
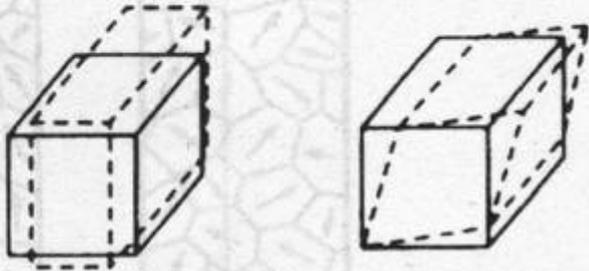
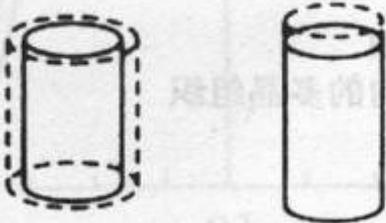
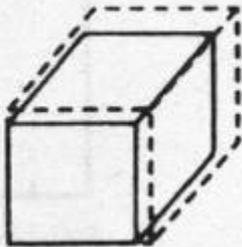
Ni 随磁场强度的增大而缩短

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}$$

λ 为磁致伸缩系数

常用磁致伸缩材料室温下的饱和磁致伸缩系数为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$

磁致收缩的各种变形模式

	六方晶系	立方晶系
体积不发生变化 (仅发生形状变化)		
体积发生变化		

常用磁致伸缩材料

常用磁致伸缩材料

镍

铁镍

铁铝

铁钴钒

铁氧体

磁致伸缩材料的应用

在磁（电） - 声换能器中的应用

声纳、超声换能器、扬声器等。

在磁(电) - 机械致动器中的应用

精密流体控制、超精密加工、超精密定位、机器人、精密阀门、微马达以及振动控制等工程领域。

传感器敏感元件

超磁致伸缩材料除用于驱动之外，利用其磁致伸缩效应或逆效应还可以制作检测磁场、电流、应变、位移、扭矩、压力和加速度等的传感器敏感元件。

磁致伸缩液位传感器，可实现对液位的高精度计量,其测量分辨率高于0.11 mm。

要点总结

电功能材料：

半导体材料

超导材料

磁功能材料

软磁材料

硬磁材料

磁致伸缩材料

第四节 热功能材料



内容

随着温度的变化，有些材料的某些物理性能会发生显著变化，如热胀冷缩、出现形状记忆效应或热电效应等，这类材料称为热功能材料。

本章主要内容：

- ◆ 膨胀材料
- ◆ 形状记忆材料
- ◆ 测温材料

膨胀材料

热膨胀是指材料的长度或体积在不加外力时随温度的升高而变大的现象。

材料热膨胀的本质是原子间的平均距离随温度的升高而增大，即是由原子的非简谐振动引起的。

材料热膨胀系数的大小与其原子间的接合键强弱有关，结合键越强，则给定温度下的热膨胀系数越小，材料中陶瓷的结合键（离子键和共价键）最强，金属的（金属键）次之，高聚物的（范德华力）最弱，因此热膨胀系数依次增大。

常用的膨胀材料包括低膨胀材料、定膨胀材料和热双金属材料

1、低膨胀材料

- 低膨胀材料是热膨胀系数较小的材料，也叫因瓦（Invar）合金。
- 主要应用于精密仪器、标准量具等以保证仪器精度的稳定及设备的可靠性。

低膨胀合金（因瓦 Invar 合金）

名称	成分	晶系	磁性	$\alpha/(1/^\circ\text{C})$	T_c 或 $T_N/^\circ\text{C}$
Fe-Ni 因瓦	35Ni-65Fe	立方	铁磁	1.2×10^{-6}	232
超因瓦	32Ni-64Fe-4Co	立方	铁磁	0.0	230
不锈因瓦	37Fe-52Co-11Cr	立方	铁磁	0.0	127
Fe-Pt 因瓦	75Fe-25Pt	立方	铁磁	-30×10^{-6}	80
Fe-Pd 因瓦	69Fe-31Pd	立方	铁磁	0.0	340
Cr 基因瓦	94Cr-5.5Fe-0.5Mn	立方	反铁磁性	$\sim 1 \times 10^{-6}$	~ 45
Mn 基因瓦	α -Mn	立方	反铁磁性	$< 10^{-6}$ (4.2K)	-178
Gd-Co 因瓦	67Co-33Gd	立方	亚铁磁	$\sim 3 \times 10^{-6}$	-160
Y2Fe17 因瓦	10.5Y-89.5Fe	六角	铁磁	—	-29
非晶态 Fe-B 因瓦	83Fe-17B	非晶态	铁磁	$(1\sim 2) \times 10^{-6}$	~ 320

注：1. 除指明温度外， α 都是室温值。

2. T_c 为铁磁物质的居里点， T_N （奈耳点）是反铁磁物质的居里点。



2、定膨胀材料

- 定膨胀材料是指在某一温度范围内具有一定膨胀系数的材料，也称可伐（Kovar）合金；
- 主要用于与玻璃、陶瓷等材料相封接，要求与被封接材料的膨胀系数相匹配。

定膨胀合金（可伐 Kovar 合金）

名称	成分 %				线膨胀系数 $\alpha / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$				用途
	Ni	Fe	Co	Cr	0~300℃	0~400℃	0~500℃	0~600℃	
4J42	41.5~42.5	余			4.4~5.6	5.4~6.6			与软玻璃、陶瓷封接
4J43	42.5~43.5	余			5.6~6.2	5.6~6.8			杜美丝芯材
4J45	44.5~45.5	余			6.5~7.7	6.5~7.7			与软玻璃、陶瓷封接
4J54	53.5~54.5	余			10.2~11.4	10.2~11.4			与云母封接
4J58	57.5~58.5	余			11.73	11.92	12.07	12.28	精密机床基尺
4J6	41.5~42.5	余		5.5/6.3	7.5~8.5	9.5~10.5			与软玻璃封接
4J28		余		27~29			10.4~11.6		与软玻璃封接
4J29	28.5~29.5	余	16.8~17.5		4.7~5.5	4.6~5.2	5.9~6.4		与硬玻璃封接
4J34	28.5~29.5	余	19.5~20.5		6.2~7.5	6.2~7.6	6.5~7.6	7.8~8.4	与 95% Al ₂ O ₃ 封接



3、热双金属材料

- 由膨胀系数不同的两种金属片沿层间焊接在一起的叠层复合材料；
- 较高膨胀系数金属层为主动层，较低的为被动层。如5J11热双金属是由Mn75Ni15Cu10（主动层）与Ni36（被动层）组成。受热时，双金属片向被动层弯曲，将热能转化成机械能。
- 可用作各种测量和控制仪表的传感元件。

未受热

高 主动层 Mn75Ni15Cu10

低 被动层 Ni36

受热后

可作为各种测量和控制仪表的传感元件

二、形状记忆材料

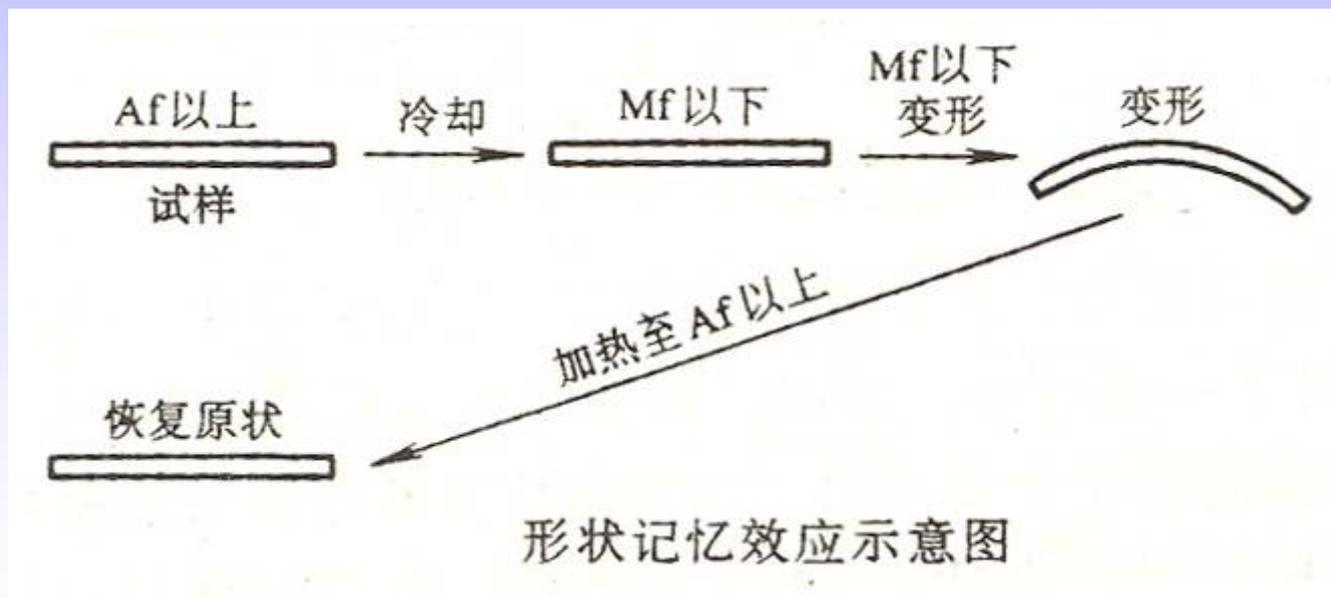
- 将具有某种初始形状的制品进行变形后，通过加热等手段处理时，制品又恢复到初始形状。
- 形状记忆材料通常包括：
 - 形状记忆合金
 - 形状记忆聚合物
 - 形状记忆陶瓷。

(一) 形状记忆合金

- 合金的形状记忆效应实质上是在温度和应力的作用下，合金内部热弹性马氏体形成、变化、消失的相变过程的宏观表现。
- 这种热弹性马氏体不像Fe-C合金中的马氏体那样，在加热转变成它的母相（奥氏体）之前即发生分解，而是**加热时直接转成它的母体**。
- 热弹性马氏体冷却时马氏体长大，加热时马氏体收缩，热弹性马氏体的相变是可逆的，且相变的过冷度很小。

热弹性马氏体形状记忆效应

- 将一定形状的记忆合金试样冷却到 M_f 点以下，对之进行一定限度的变形，卸去载荷后，变形被保留下来；
- 将变形了的试样加热到 A_s 以上，试样开始恢复，加热到 A_f 点，试样恢复到变形前的形状。



常用形状记忆合金

形状记忆合金

镍-钛系

目前用量最大
优点：抗拉强度高、疲劳强度高、耐蚀性好、密度小、与人体有生物相容性
缺点：成本高、加工困难

铜系

缺点：功能不如镍-钛系
优点：成本低、加工容易

铁系

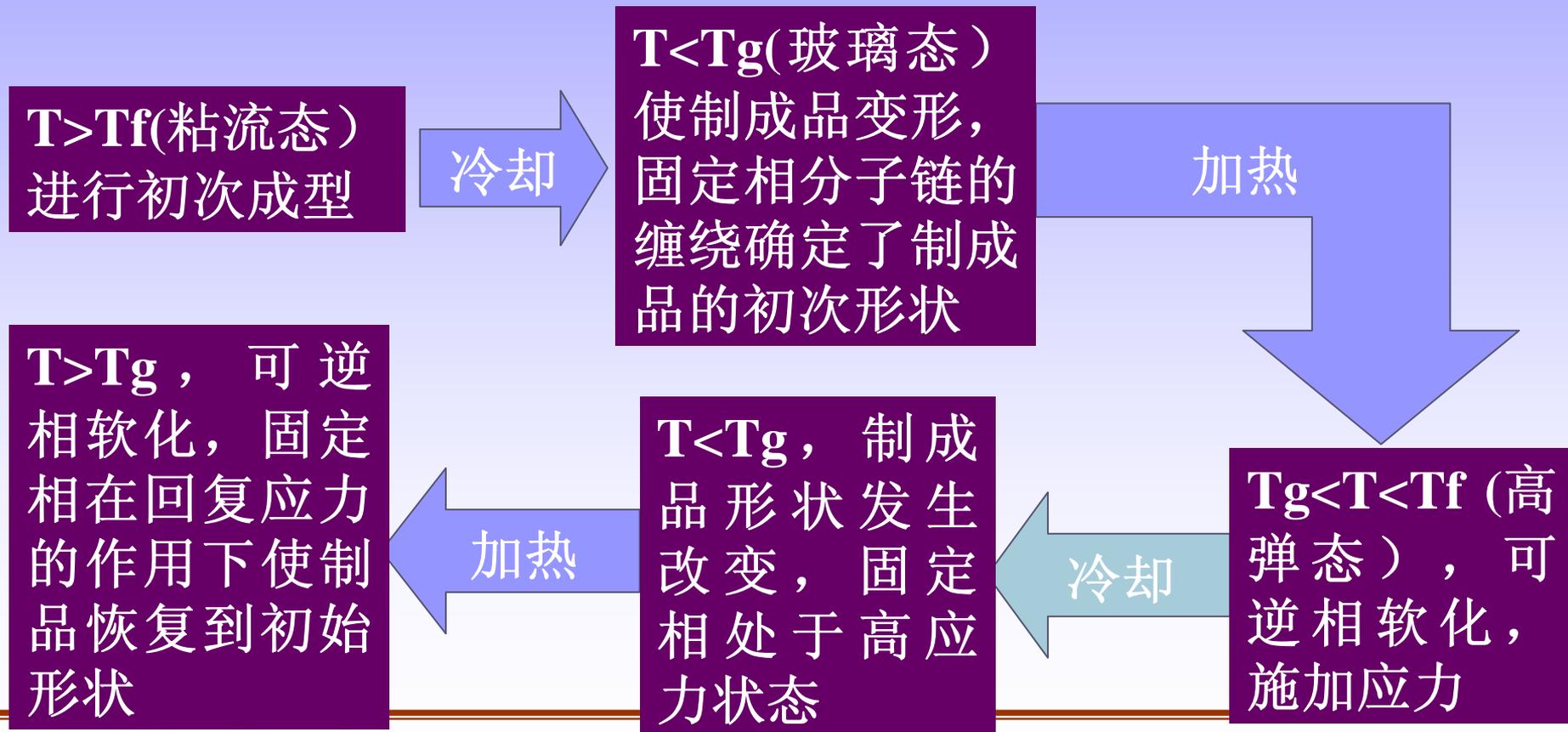
缺点：功能不如铜系
优点：具有价格竞争优势

(二) 形状记忆聚合物

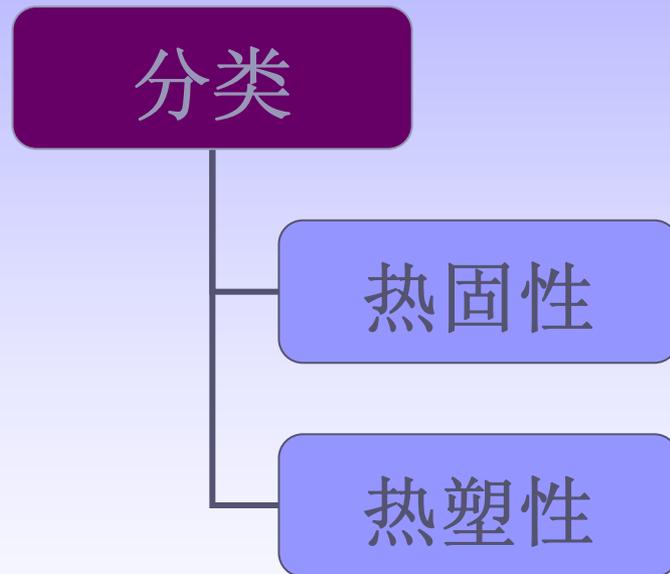
- 形状记忆聚合物不同于马氏体相变，而是基于高分子材料中分子链的取向与分布的变化过程；
- 这种聚合物具有两相结构，即固定相和可逆相；
- 可逆相是能够随温度变化在结晶与熔融态间，或者在玻璃态与高弹状态间可逆转变的相，随温度的升高或降低，可逆相的结构发生变化，使之发生软化、硬化。
- 固定相则在工作温度范围内保持不变。

聚合物的形状记忆原理

两相结构： 固定相+可逆相



凡是有固定相和可逆相结构的聚合物都具有形状记忆效应。以固定相可分：

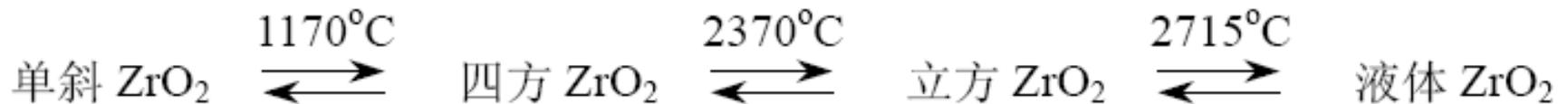


形状记忆聚合物的特点

- ◆ 密度小、强度较低、塑韧性较高
- ◆ 形状恢复可能允许的变形量大
- ◆ 形状恢复的温度范围窄
- ◆ 形状恢复应力及形状变化所需要的外力小
- ◆ 成本低

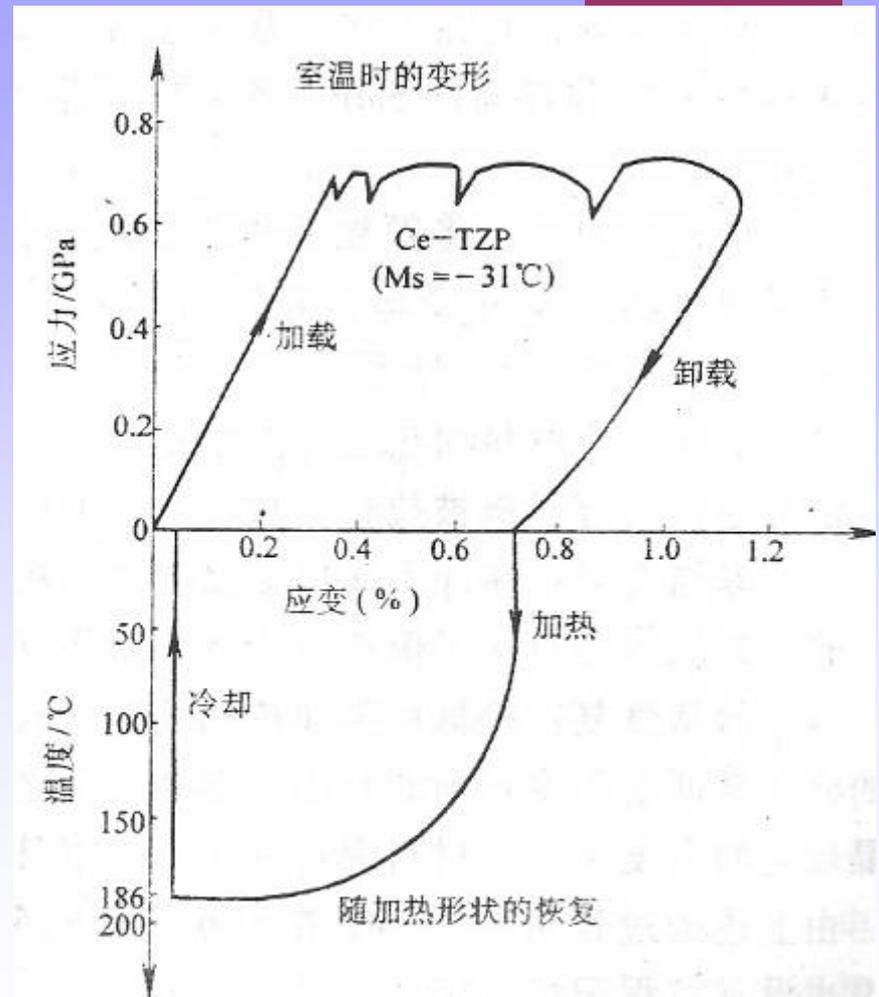
(三) 形状记忆陶瓷

- 20世纪60年底人们确认陶瓷材料也存在马氏体相变，一个著名的例子就是 ZrO_2 陶瓷中的马氏体相变，这一相变现象可以使陶瓷材料具有形状记忆效应。
- 随温度的变化纯 ZrO_2 有三种晶型：单斜晶系、四方晶系、立方晶系。单斜向四方转变有5%的体积变化，而且应力也可诱发单斜向四方的转变



氧化锆陶瓷的形状记忆效应

- 第一步：在室温下施加压力，样品首先发生弹性变形，接着在近乎恒定的应力下发生流变；
- 第二步：卸载。卸载后弹性变形消失而塑性变形则保留下来。
- 第三步：加热到 A_f 以上，样品从 60°C 开始逆转变，到 200°C 逆转变结束，变形也随着消失。



ZrO₂-12% CeO₂ 的形状记忆过程

形状记忆材料的应用

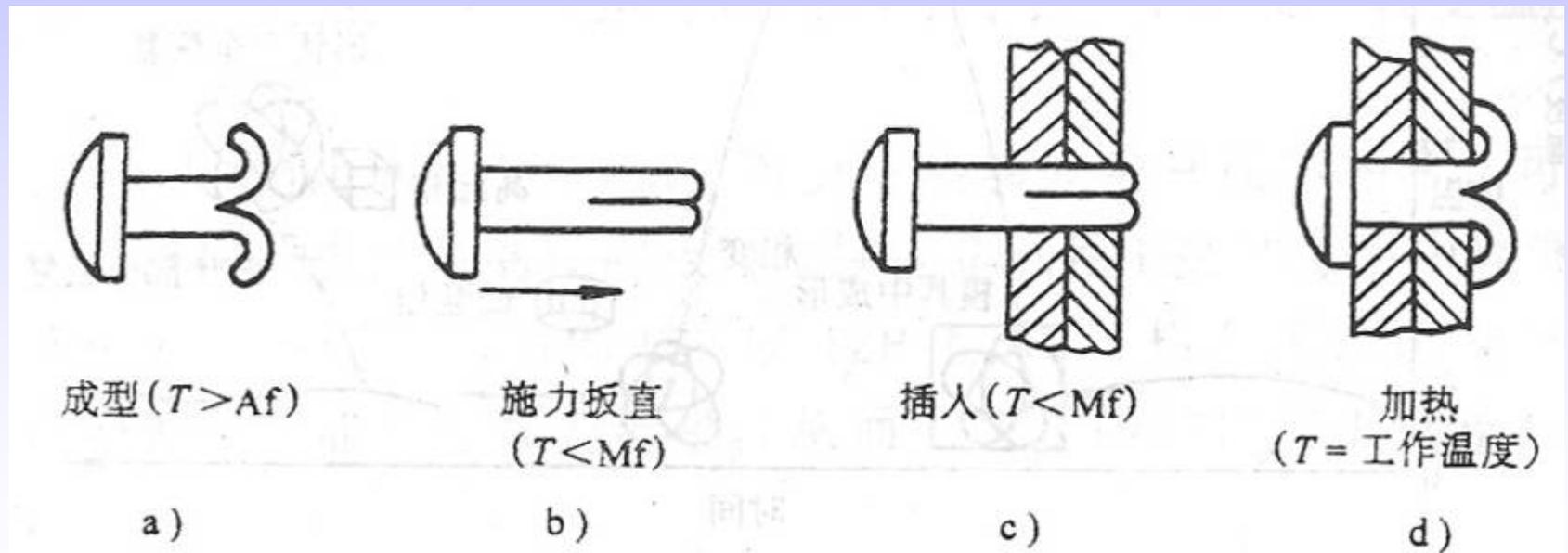
机械工程领域 热套

生物医学方面 接骨板、人工关节等

空间技术 压缩天线

记忆合金的应用

- 将记忆合金制成在 A_f 温度以上具有 (a) 所示形状铆钉，铆接时先将其冷却到 M_f 温度以下，这时合金处于完全的马氏体态很容易变形，略施加一点力将铆钉扳成 (b) 所示并插入铆钉孔 (c)，然后随温度回升到 A_f 以上，铆钉回复到变形前的形状达到铆接的目的 (d)。

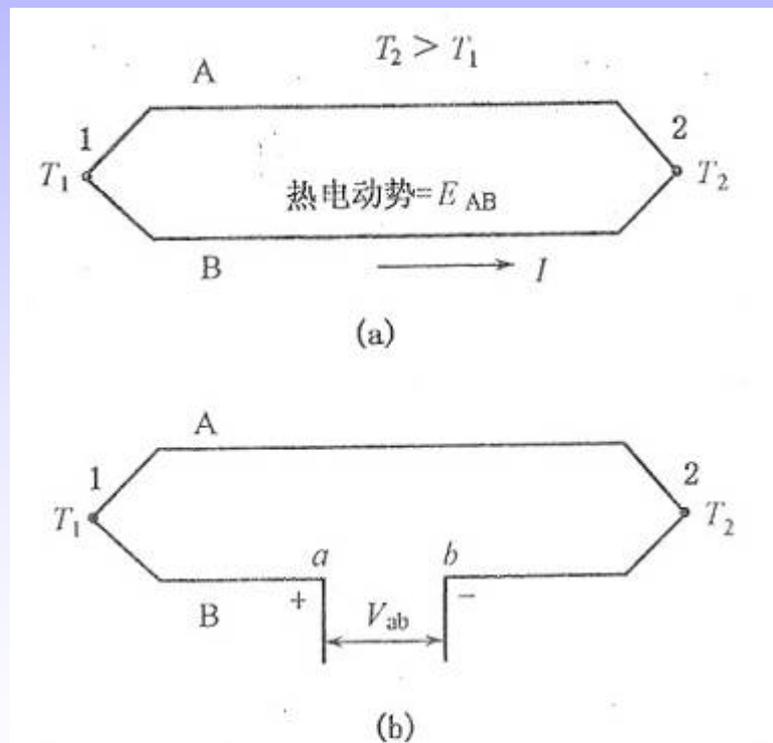


记忆合金用作铆钉的工作原理图



三、测温材料

- 热电偶是应用最广的一种测温原件，它是由两种不同材料导线连接成的回路，其感温的基本原理是热电效应。
- 由两种不同的导体（或半导体）A、B组成闭合回路，当两接触点保持在不同的温度 T_1 ， T_2 时，回路中将有电流通过，此回路称为热电回路。回路中出现的电流称为热电流。回路中出现的电动势 E_{AB} 称为珀尔贴电动势。



塞贝克效应

常用热电偶材料

热电偶材料

铜-康铜

适合温度范围
 $-200-400^{\circ}\text{C}$

镍铬-镍铝

适合温度范围
 $<1300^{\circ}\text{C}$

铂铑-铂

适合温度范围
 $<1350^{\circ}\text{C}$
短期可达 1600°C

钨-铼

适合温度范围
 $<2500^{\circ}\text{C}$
短期可达 2800°C

金铁

低温热电偶

适合温度范围
 $-270-0^{\circ}\text{C}$

适合温度范围
 $-269-0^{\circ}\text{C}$

常用热电偶材料

序号	热电偶名称或代号	正热电极材料		负极材料		热电偶材料
		代号	名义成分	代号	名义成分	
3	S型	SP	PtRh10	SN	Pt100	GB3772—83, IEC
4	N型	NP	NiCr14.5Si1.5	NN	NiSi45Mg0.1	ZBN05004—88, IEC
5	K型	KP	NiCr10	KN	NiSi3	GB2614—85, IEC
6	J型	JP	Fe	JN	NiCu55	GB4994—85, IEC
7	E型	EP	NiCr10	EN	NiCu55	GB4993—85, IEC
8	T型	TP	Cu100	TN	NiCu55	GB2903—82, IEC
9	镍铬—金铁	NiCr	NiCr10	AuFe	Au - 0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
10	铜—金铁	Cu	Cu100	AuFe	Au - 0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
11	钨铼3—钨铼25	WRe3	WRe3		WRe25	ZBN05003—88 ASTME696—84
12	钨铼5—钨铼26	WRe5	WRe5		WRe26	ZBN05003—88, ASTME988—84
13	钨铼5—钨铼20	BP5	BP5	BP20	BP20	ГОСТ3044—84
14	镍铬—考铜(XK)	HX9.5	HX9.5	MHML43 - 0.5	CuNi43Mn0.5	ГОСТ3044—84, ГОСТ492—73
15	HK—CA	HK	Ni17Co2Al2Mn1Si	CA	Ni35Al1.5Mn1Si	ГОСТ6071—51, ГОСТ6072—51

* x_B ——摩尔分数。



西

标准热电偶材料对标准铂的热电动势

标准化热电偶电极材料对标准铂(Pt-67)的热电动势

mV

温度 /°C	热 电 极 材 料											
	BP	BN	SP	RP	KP	KN	NP	NN	JP	JN	EN、TN	TP
-200	-	-	-	-	-3.41	2.48	-	-	-2.50	-	5.41	-0.19
-100	-	-	-	-	-2.23	1.32	-	-	-1.62	-	3.01	-0.37
100	0.619	0.586	0.645	0.647	2.813	-1.282	1.784	-0.989	1.78	-3.49	-3.51	0.77
200	1.451	1.273	1.440	1.468	5.969	-2.168	3.942	-1.970	3.37	-7.40	-7.45	1.83
300	2.440	2.009	2.323	2.400	9.322	-2.885	6.348	-2.993	4.68	-11.64	-11.71	3.15
400	3.553	2.767	3.260	3.407	12.762	-3.633	8.918	-4.055	5.74	-16.10	-16.18	4.69
500	4.778	3.536	4.234	4.471	16.210	-4.430	11.601	-5.144	6.69	-20.70	-20.79	-
600	6.107	4.316	5.237	5.582	19.616	-5.286	14.367	-6.242	7.73	-25.36	-25.47	-
700	7.538	5.108	6.274	6.741	22.950	-6.178	17.202	-7.324	9.08	-30.05	-30.16	-
800	9.068	5.914	7.345	7.949	26.206	-7.071	20.096	-8.361	10.69	-38.81	-34.82	-
900	10.692	6.735	8.448	9.203	29.385	-7.940	23.044	-9.326	12.47	-39.40	-39.40	-
1 000	12.405	7.572	9.585	10.503	32.493	-8.775	26.040	-10.208	14.07	-43.87	-43.86	-
1 100	14.202	8.425	10.754	11.846	35.535	-9.573	29.074	-11.002	-	-	-	-
1 200	16.074	9.291	11.947	13.224	38.500	-10.328	32.136	-11.700	-	-	-	-
1 300	18.009	10.164	13.155	14.624	41.356	-11.042	35.211	-12.091	-	-	-	-
1 400	19.990	11.038	14.368	16.035	-	-	-	-	-	-	-	-
1 500	21.997	11.903	15.576	17.445	-	-	-	-	-	-	-	-
1 600	24.007	12.750	16.771	18.842	-	-	-	-	-	-	-	-
1 700	25.993	13.567	17.942	20.215	-	-	-	-	-	-	-	-
1 800	27.939	14.354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



第五节 光功能材料



光功能材料按用途分为

光介质材料

● 固体激光材料

固体发光材料

非线性光学材料

金铁电光晶体材料

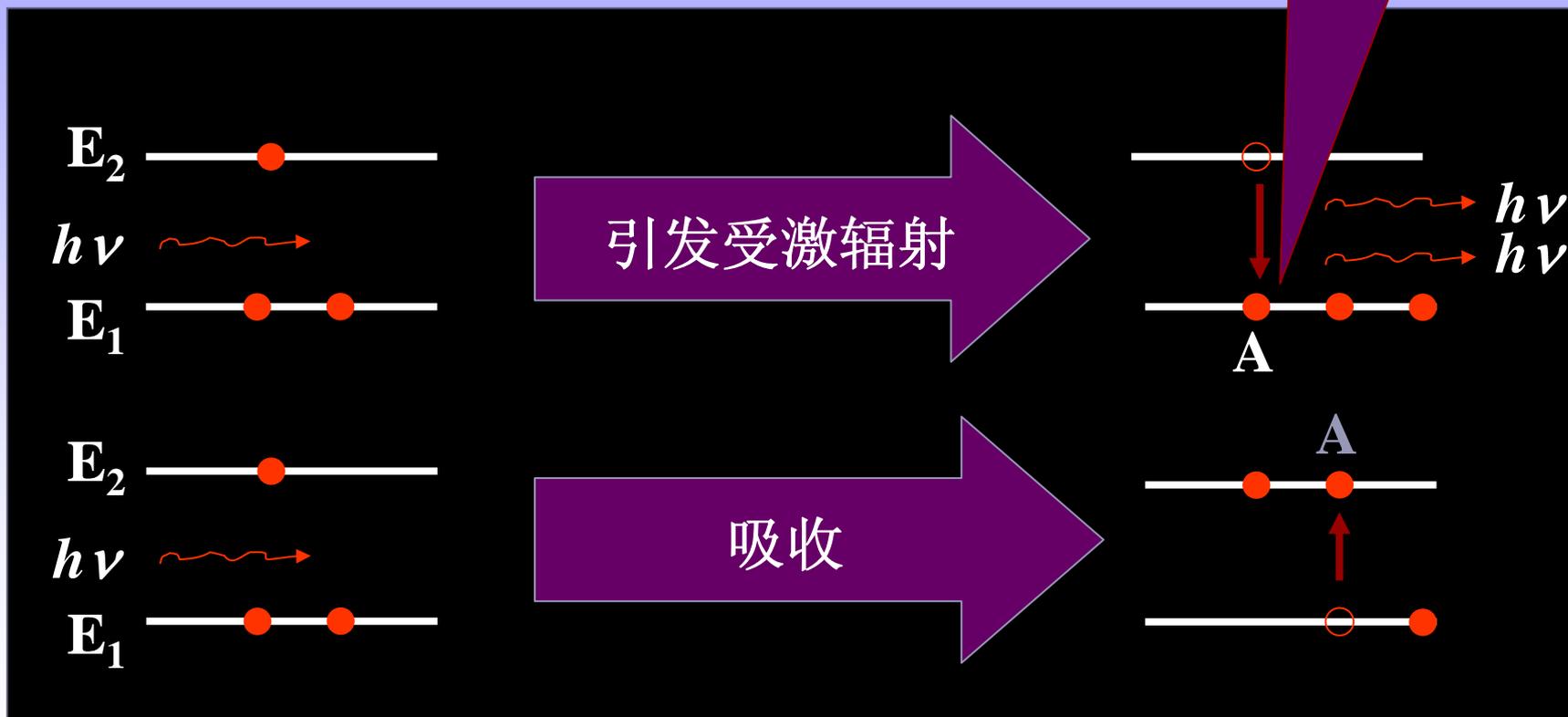
● 光导纤维

光学薄膜

弹光与声光材料等

一、固体激光材料

(一) 激光的产生



入射光子引发受激辐射或被吸收

- 只有能量为 $h\nu=E_2-E_1$ 的光子才能引起受激辐射；
- 受激辐射后，就有两个能量都是 $h\nu$ 的光子；
- 受激辐射光的位相、偏振都与入射光相同；
- 在外界光子引发受激辐射的同时，也发生吸收的过程；
- 处于低能态的原子数总是很多，外界光子被吸收的可能性更大，引发受激辐射的可能性很小。

产生激光的必要条件

只有让高能级的原子数大于低能级的原子数；（也叫粒子数反转）

才可能使受激辐射的几率大于吸收几率；

维持连续不断的受激辐射。

产生激光的充分条件

单色光

粒子数反转产生的激光寿命短、微弱，没有实用价值；

必须经过光谐振器，使光子不断增值，最后产生很强的位相相同的单色光，就是实用的激光。

激光器

- 自1960年梅曼研制出第一台红宝石激光器以来，激光器的研制和应用有了飞速发展，在工业、医疗、民用、国防等领域应用广泛。
- 激光器主要由三部分组成：激光工作物质、激励能源、光学共振腔。
 - 1) 工作物质是激光器的核心，只有能实现能级跃迁的物质才能作为激光器的工作物质。
 - 2) 激励能源（光泵）作用是给工作物质以能量，即将原子由低能级激发到高能级的外界能量。
 - 3) 光学共振腔是激光器的重要部件，其作用一是使工作物质的受激辐射连续进行；二是不断给光子加速；三是限制激光输出的方向。
- 根据激光工作物质，可把激光器分为气体激光器、固体激光器、分子激光器、半导体激光器等。

固体激光器

- 固体激光器发展最早，其体积小，输出功率大，应用方便。但由于工作物质很复杂，造价高。
- 用于固体激光器的物质主要有三种：
 - 红宝石**工作物质，它是在单晶体刚玉基质中掺入少量的三价铬离子后形成的激活晶体。掺入的三价铬离子是激活剂，起发光中心的作用。输出波长为694.3nm，为红色光；
 - 掺钕铝石榴石**（Nd: YAG）工作物质，输出的波长为1.06 μm 呈白蓝色光；
 - 钕玻璃**工作物质，输出波长1.06 μm 呈紫蓝色光。

气体激光器

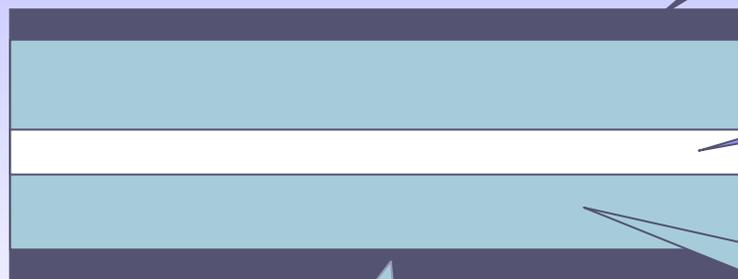
- 工作物质主要以气体状态进行发射的激光器
- 在常温常压下是气体，但有的物质在通常条件下是液体（如非金属粒子的有水、汞），及固体（如金属离子结构的铜，镉等粒子），经过加热使其变为蒸气，利用这类蒸气作为工作物质的激光器，统归气体激光器之中。
- 典型的气体激光器为**氦-氖（He-Ne）激光器**
- 气体激光器与固体激光器相比较，两者中以气体激光器的结构相对简单得多，造价较低，操作简便，但是输出功率常较小。

分子激光器

- 分子气体激光器通过分子能级间的跃迁产生激发振荡的一和种激光器，分子气体激光器中主要使用的为 **CO₂激光器**；
- CO₂激光器效率高，不造成工作介质损害，发射出 10.6 μ m波长的不可见激光，是一种比较理想的激光器。

二、光导纤维

- 光纤是一种非常细的可弯曲的导光材料。单根光纤的直径约为几到几百微米，它由内层材料（芯料）和包层材料（涂层）组成的复合结构。为了保护其不受损坏、最外面再加一层塑料套管。



覆层
高强材料

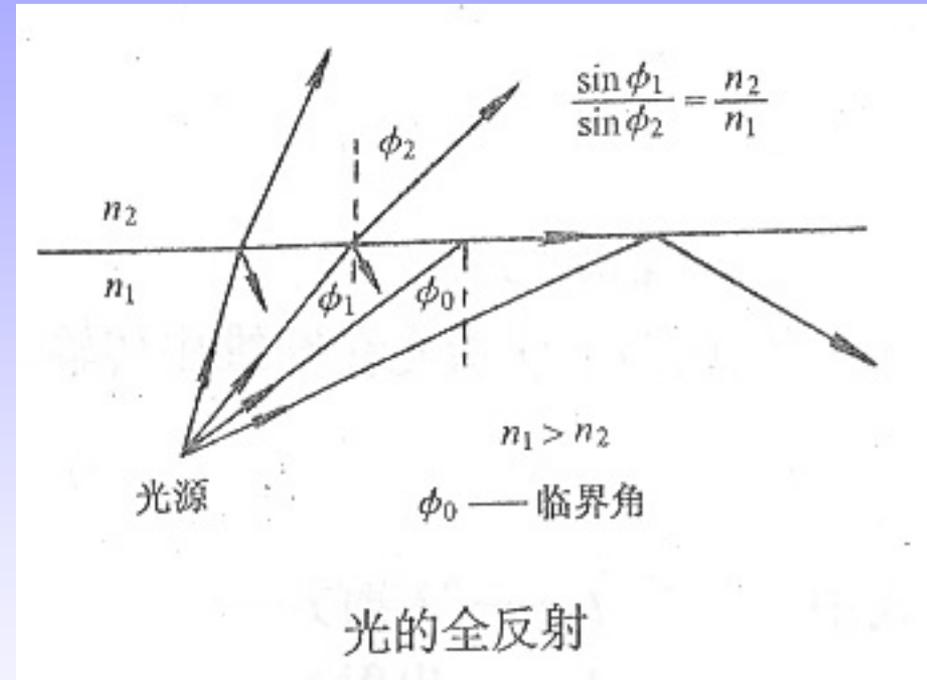
纤芯
高透明
固体材料

包层
折射率较纤芯低
固体材料

总外径
125~200 μm

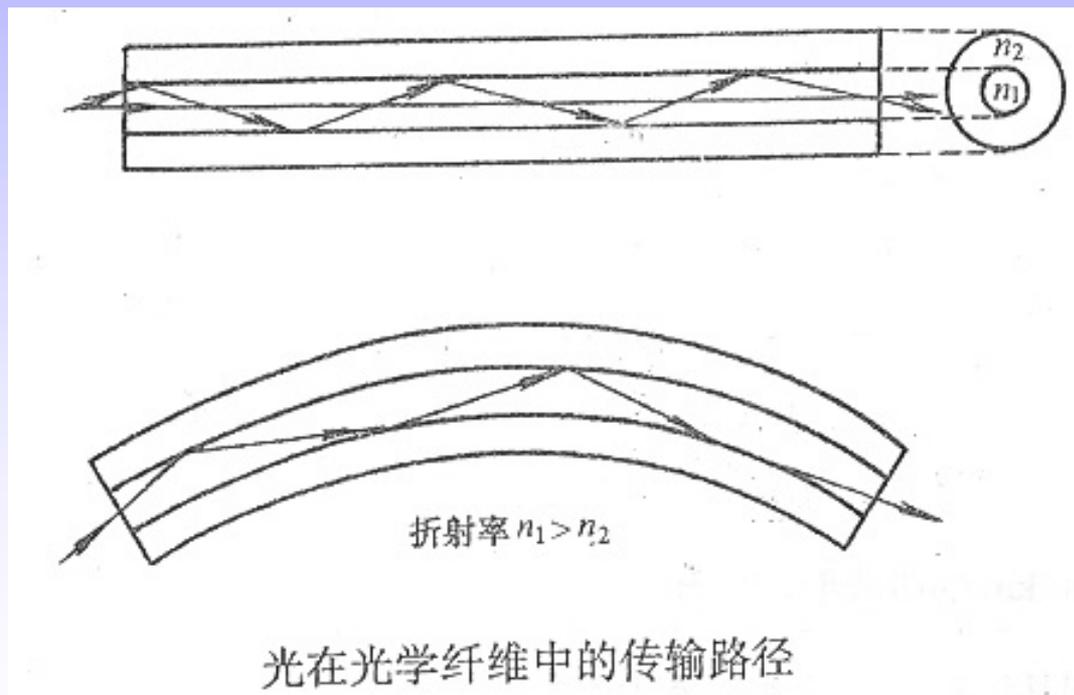
全反射现象

- 一切光纤的工作基础都是光的全反射现象。
- 如果一束光投射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种媒质的界面上时（设 $n_1 > n_2$ ），入射光将分为反射光和折射光。入射角 ϕ_1 与折射角 ϕ_2 之间服从 $n_1/n_2 = \sin \phi_1 / \sin \phi_2$ 的折射定律。
- 当 ϕ_1 增大时， ϕ_2 也相应增加，当 $\phi_2 = \pi/2$ ， $\phi_1 = \arcsin(n_2/n_1)$ 时，入射光全部返回原来的介质中，这种现象叫做光的全反射。



光在光纤中的传播原理

- 光纤芯料的折射率高于包层材料的折射率，当入射光线由内层射到两层的界面时，只要入射角小于临界角，就可全反射折回内层，完全避免了传输过程中的折射损耗。



常用光纤材料

石英玻璃光纤、
多组分玻璃光纤、
高双折射偏振保持光纤、
单偏振光纤、
各种传感器用光纤等。

光纤材料

- 按光纤材料的组分不同可分为石英光纤、多组分氧化物玻璃光纤、非氧化物玻璃光纤、晶体光纤和高聚物光纤。
- 石英光纤是以 SiO_2 为主成分制成的。目前通讯用光纤都是 SiO_2 玻璃光纤。

石英玻璃光纤的各种特性参数

参数 光纤	结构参数		传输特性		连接耦合特性		适用领域
	(包层/芯径) / μm	相对折射率 差/%	损耗/ $(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$ (使用波长/ μm)	带宽 / $(\text{MHz}\cdot\text{km})$	连接	与光源 耦合效率	
阶跃型光纤	125/50 125/85 140/100	1.5 ~ 2.0	3.00 ~ 6.00 (0.85)	< 100	易	大	小容量光纤通信 非功能型光纤传感器
梯度型光纤	-	≈ 1.0	$\sim 3.00(0.85)$ $\sim 1.00(1.30)$	100 ~ 1 000	较易	中	中容量光纤通信 非功能型光纤传感器
单模光纤	-	≈ 0.3	~ 0.50 (1.30)	> 1 000	较难	小	大容量光纤通信 功能型光纤传感器

主要红外光纤的光学传输性能

- 光纤被大量地应用在光通讯方面，此外，光纤作为传感器在军事、医学都有重要应用。

主要红外光纤的光学传输性能

材 料	透光范围/ μm	最低损耗/ $(\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$		最低损耗波长 / μm	零材料色散波长 / μm
		理论值	已达值		
氟化物玻璃	0.20 ~ 7.00	10^{-3}	0.65	2.59	1.62
氧化物玻璃	0.40 ~ 6.00	10^{-2}	13.00	2.05	1.69
硫化物玻璃	0.50 ~ 11.00	10^{-2}	35.00	2.44	4.89
多晶体	0.63 ~ 35.00	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	250.00	10.60	-
单晶体	0.13 ~ 35.00	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	300.00	10.60	-

第六节 其它功能材料



- ◆ 敏感材料
- ◆ 储氢材料
- ◆ 隐形材料
- ◆ 声功能材料

一、敏感材料

敏感材料可以分为：声、光、电压、磁、气、热、湿、力、电化学、生物等敏感材料

(一) 气敏感材料

随着环境气氛的变化，这类材料的电阻会明显改变，俗称“电鼻子”，用以检测环境中气氛的变化。

构成

成分：各种氧化物陶瓷。

典型的有：

SnO_2 、 ZnO 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 ZrO_2 、
 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 TiO_2 等

几何形状：

薄膜型、厚膜型、多孔型

应用

SnO₂气敏陶瓷:

用于氢、甲烷、丙烷、乙醇、丙酮、一氧化碳、煤气、天然气的检测。

ZrO₂气敏陶瓷:

用于钢水中含氧量的测定

γ-Fe₂O₃气敏陶瓷:

用于检测还原性气体

α-Fe₂O₃气敏陶瓷:

用于检测异丁烷气体、石油液化气等

ZnO掺入不同的催化剂

用于检测丁烷、丙烷等气体

（二）光敏感材料

光敏感材料是指与光发生作用后，某些性质会发生明显变化，以反映光信号的强弱及其携带的信息。

构成

主要有：

光敏电阻材料

光电池材料

光敏纤维

应用

探测光信号

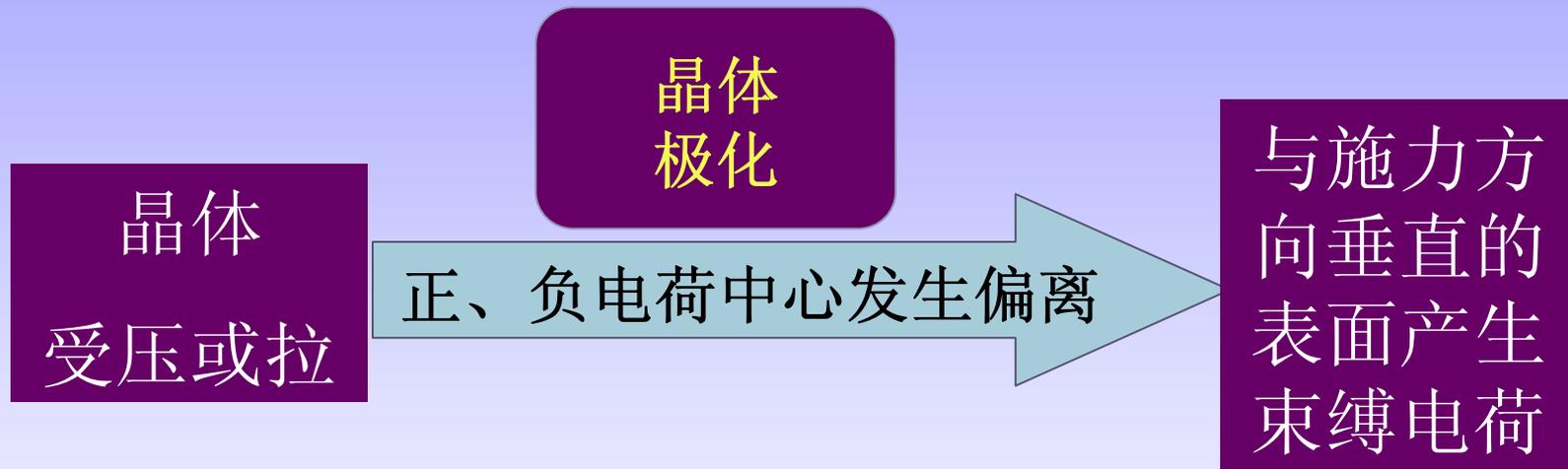
用光敏电阻材料（**CaAs**、**CdS**、**PbS**、**PbSe**），制成光电转换元件

太阳能电池

硅是较理想的太阳能电池材料，硫化镉、砷化镉、砷化镓、聚乙炔等也是太阳能电池材料。

(三) 声敏感材料

压电材料：压电晶体、压电陶瓷。

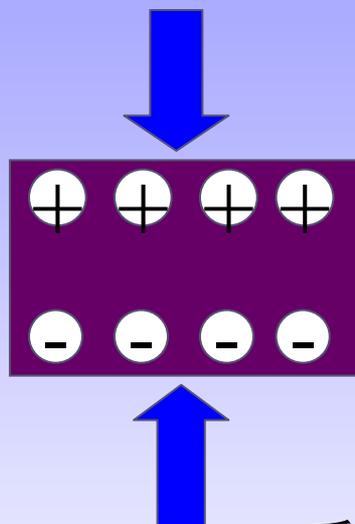


压电效应

压电效应



正负电荷中心重合，故不带电

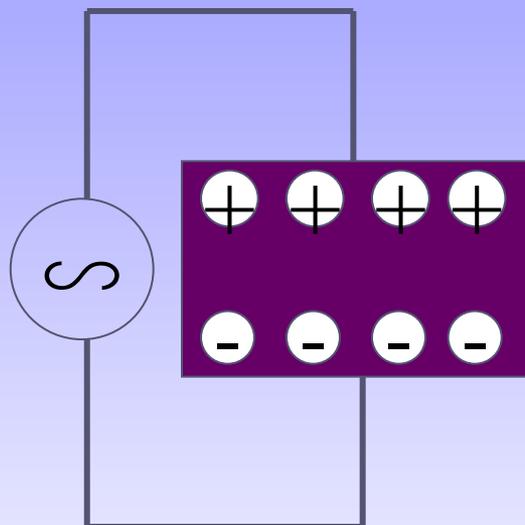


受压极化，产生表面束缚电荷

逆压电效应



正负电荷中心重合，故不带电



受外电场的作用，产生极化



压电晶体产生变形

压电晶体在外加电场作用下产生的变形与外加电场的大小及极性（方向）有关。在交变外加电场的作用下，压电晶体将产生拉伸及压缩变形，变形频率与外加电场的频率相同。

当外加电场的频率 $>20\text{kHz}$ 时，则压电晶体的变形频率亦 $>20\text{kHz}$ 。

超声波

利用逆压电效应，超声波探头可产生和发射超声波；利用正压电效应，探头可接收超声波。

常用的压电材料

压电晶体

石英、酒石酸钾钠、磷酸二氢铵、碘酸锂、钽酸锂等

压电陶瓷

钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅等

应用

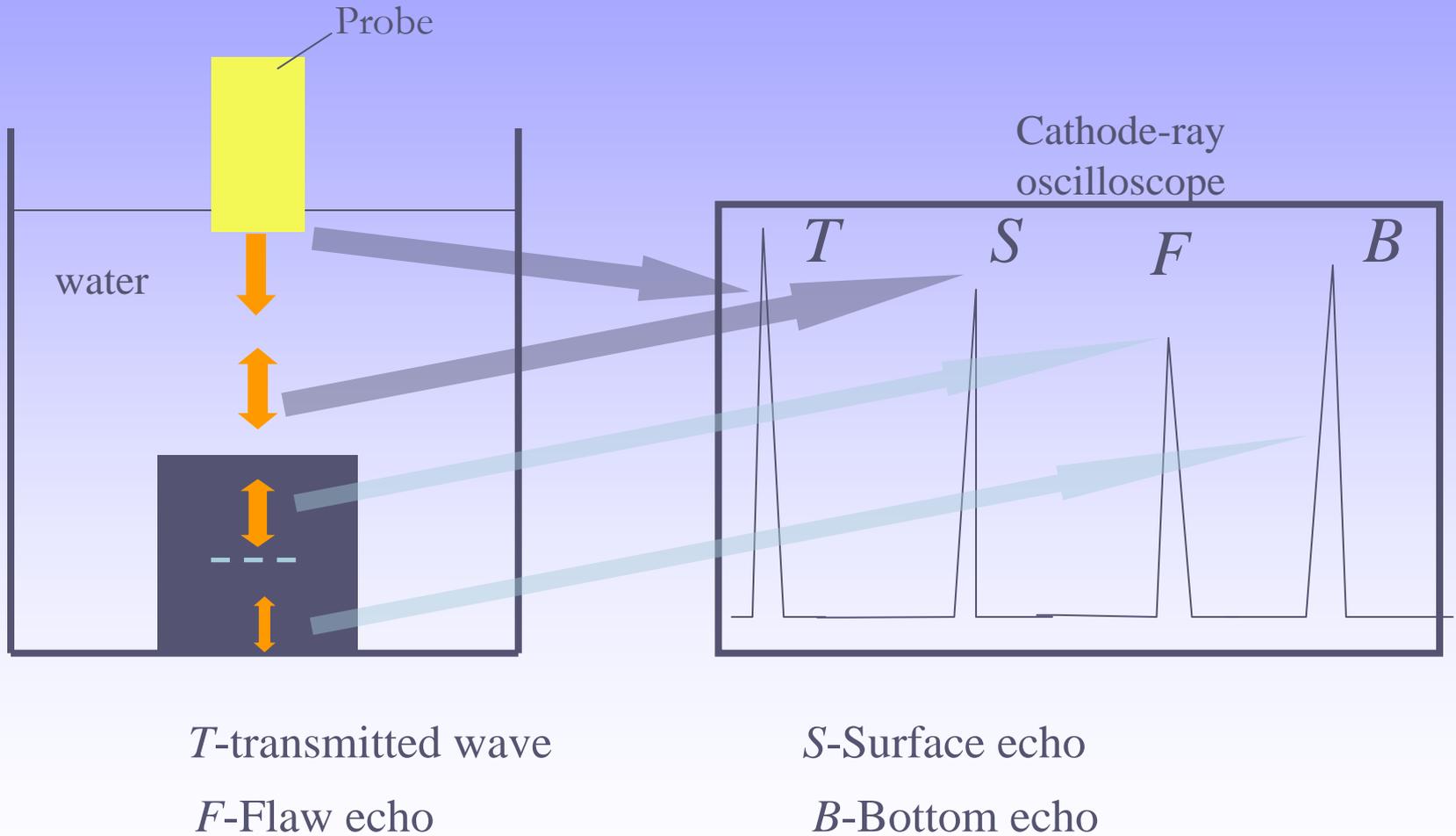
日用

扩音器、电话、钟表、频率稳定器等

超声应用

水下观测、通信、探测、机械能转换成电能制成引爆装置、压电引火器、超声波清洗、焊接、打孔、无损检测等

Mechanism of A-Scan Ultrasonic NDT



JTUIS超声成像无损检测系统



获奖项目：钎焊接头的超声成像无损检测
技术研究及设备开发

获奖单位：西安交通大学
(第1完成单位)

奖励等级：二 等

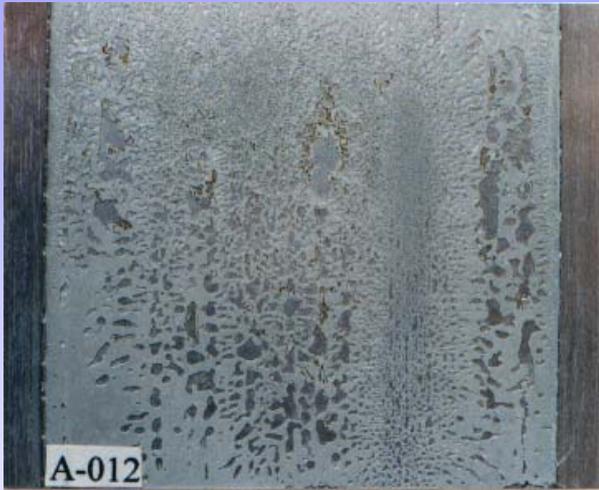
奖励日期：2005年01月

证书号：2004-220

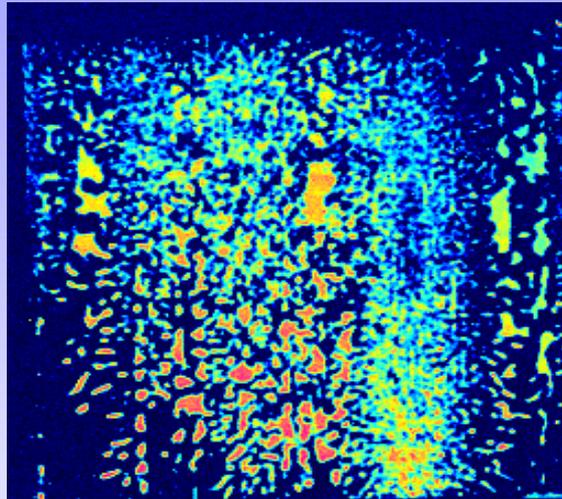


二〇〇五年一月二十日





a) A photo of a actual bonded interface

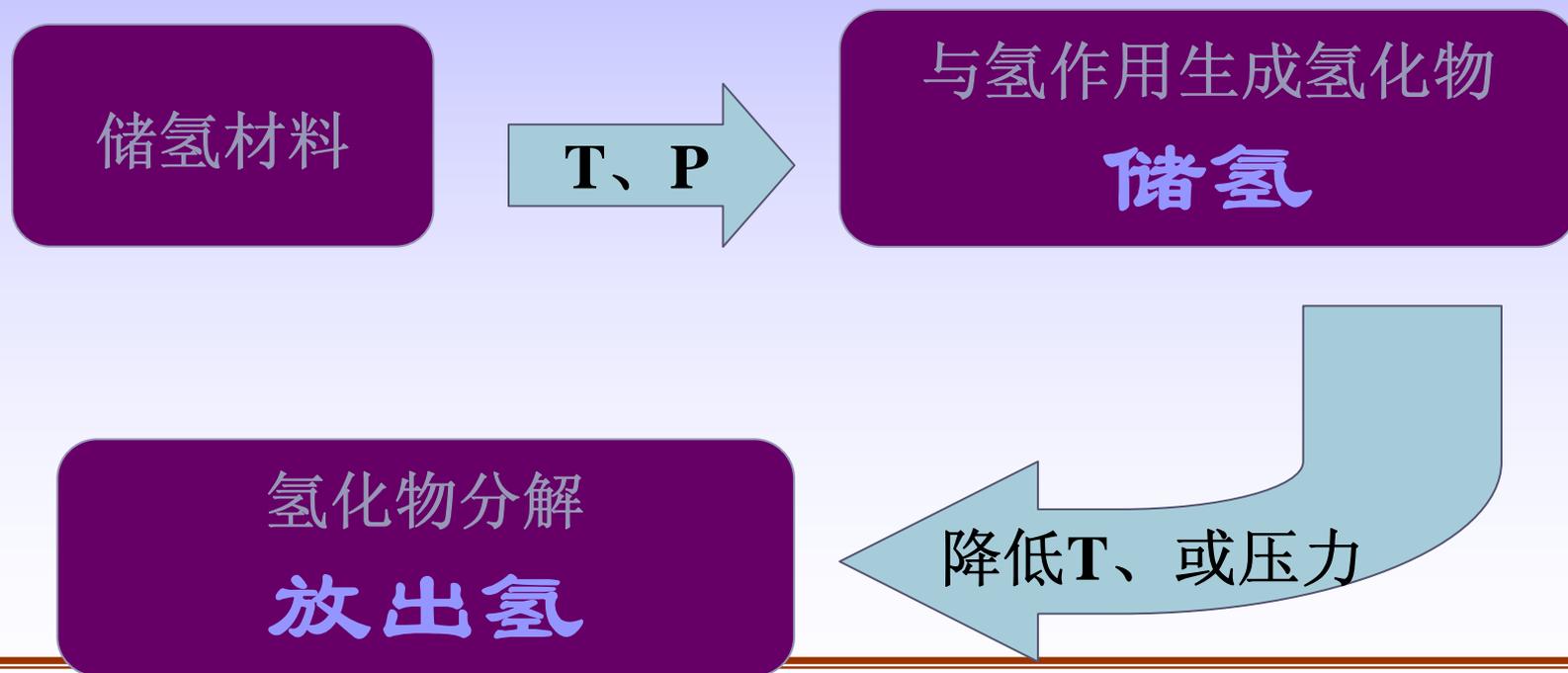


b) The image of the left obtained by JTUIS



二、储氢材料

(1) 基本原理



储氢合金

镁系

储氢量大、重量轻、资源丰富、价格低廉、但分解温度高 $>250^{\circ}\text{C}$

稀土系

LaNi₅

室温即可活化、吸氢释氢容易
但成本高

钛系

钛铁系和钛锰系
价格便宜
缺点：活化困难、反复吸氢后性能下降。

应用

储氢容器

储氢合金的储氢密度高于液态氢的密度。

氢化物电极

镍氢电池比能量高、对人体无害。

制备超纯氢

含有杂质的氢气与储氢合金接触，氢被合金吸收，杂质则被吸附在合金表面。

三、隐形材料

隐身技术是通过降低武器装备等目标的可探测信息特征，使敌方探测系统难以发现或者发现距离缩短的综合技术。

广泛用于：飞机、导弹、坦克、舰船等。

雷达隐形材料

雷达隐身技术中目前主要使用

吸波涂料

吸波结构材料

透波材料

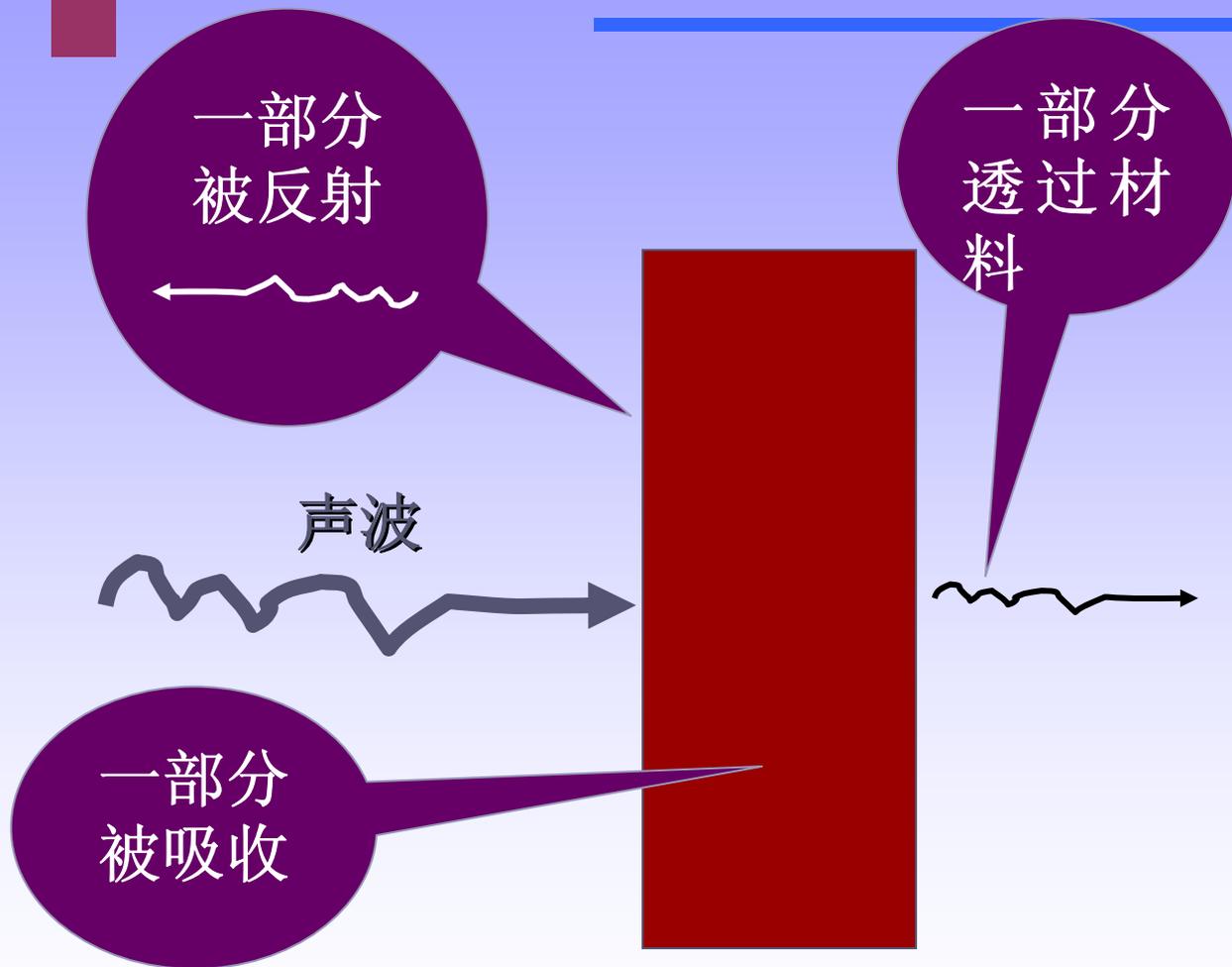
智能蒙皮材料

四、声功能材料

主要用在声发射、声接收、声光转换以及声吸收等方面。

本节主要介绍声吸收材料。

声吸收基本原理



声波入射到刚性界面时，大部分被反射。而当声波入射到多孔、透气或纤维材料时，声波会进入材料并引起空隙中的空气和纤维振动，从而使一部分声能转化为热量而耗散，故材料有吸声功能。

常用吸声材料

吸声材料

无机纤维

玻璃丝、
玻璃棉、
岩棉、
矿渣棉

泡沫塑料

氨基甲酸酯、
脲醛泡沫塑料

有机纤维

棉、麻等
植物纤维

要点总结

热功能材料
光功能材料
其它功能材料

10. 材料表面改性新技术

- ◆ 热喷涂
- ◆ 激光束
- ◆ 离子束
- ◆ 电子束
- ◆ 气相沉积

10.1 热喷涂技术

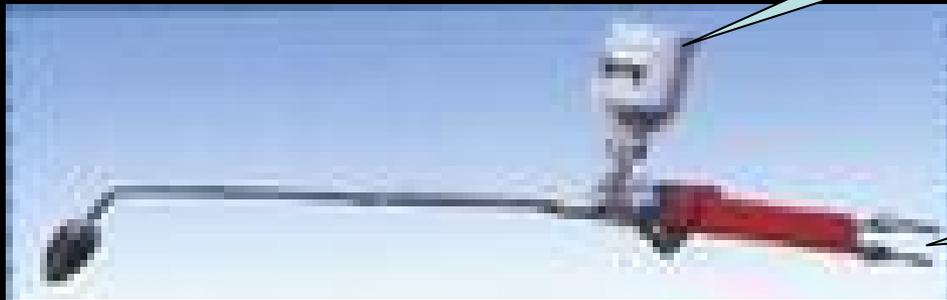
一、基本原理

将涂层材料加热熔化，用高速气流将其雾化极细的颗粒，并以很高的速度喷射到工件表面，形成涂层。

热喷涂方法

火焰喷涂 ✓
电弧喷涂
等离子喷涂
爆炸喷涂
超音速喷涂
高频感应喷涂

火焰喷涂是利用气体燃烧火焰的高温将喷涂材料（金属丝或粉末）熔化，并用压缩空气流将它以很高的速度喷射到工作表面上，形成涂层。



粉斗

C_2H_2
 O_2

二、涂层结构

热喷涂过程中，最先冲击到工件表面的颗粒变形为扁平状，与工件表面凹凸不平处产生机械咬合。

后来的颗粒打在先行颗粒的表面上也变为扁平状，并产生机械结合，逐渐堆积成涂层。

- 涂层的显微结构是大致平行的迭层状组织，疏松多孔（孔隙率最高达25%）。
- 因与空气接触，涂层中还有氧化物和氮化物。
- 涂层中存在残余应力（外拉内压）。
- 当涂层较厚或收缩率较高时，涂层中会产生裂纹。

涂层的性能特点

- 结合强度低；
- 良好的贮油和减摩性能；
- 涂层的抗拉强度一般比基体低；
- 硬度取决于喷涂材料、方法及工艺；
- 涂层强度低、硬而脆；
- 机加工性能差。

三、热喷涂技术的特点及应用

- 取材范围广 几乎所有金属、合金、陶瓷，甚至塑料均可作为喷涂材料；
- 可用于各种基体；
- 基体可保持较低的温度，以保证不变形，不弱化；
- 工效高；
- 对喷涂工件的形状、尺寸一般无限制；
- 涂层厚度易于控制；

- 可赋予普通材料特殊的表面性能；
- 可使工件满足耐磨、耐蚀、耐高温、隔热、密封、减摩、耐辐射、导电、绝缘等特殊性能要求。

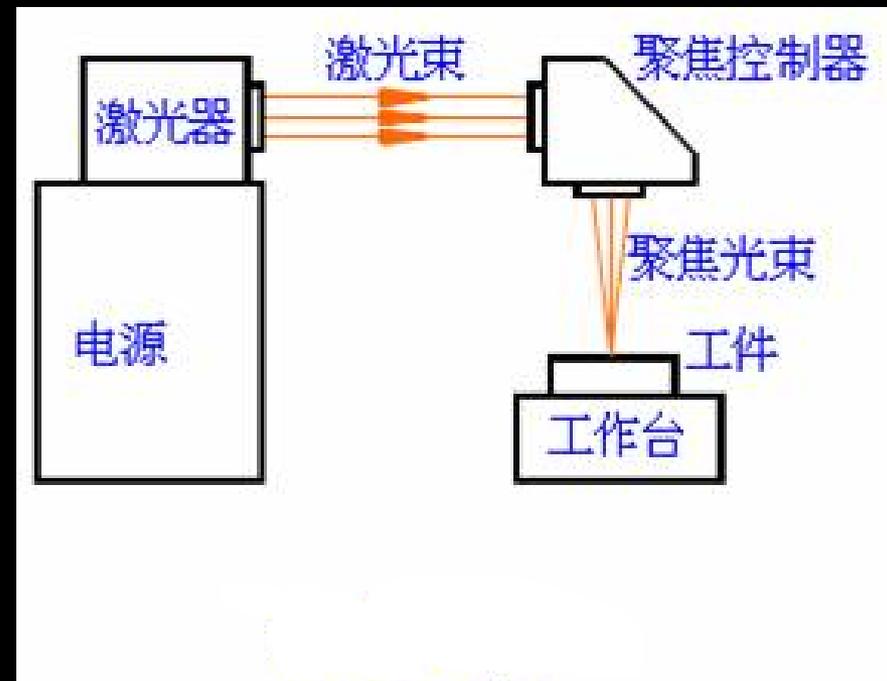


10.2 激光束、离子束及电子束技术

一、激光束表面合金化

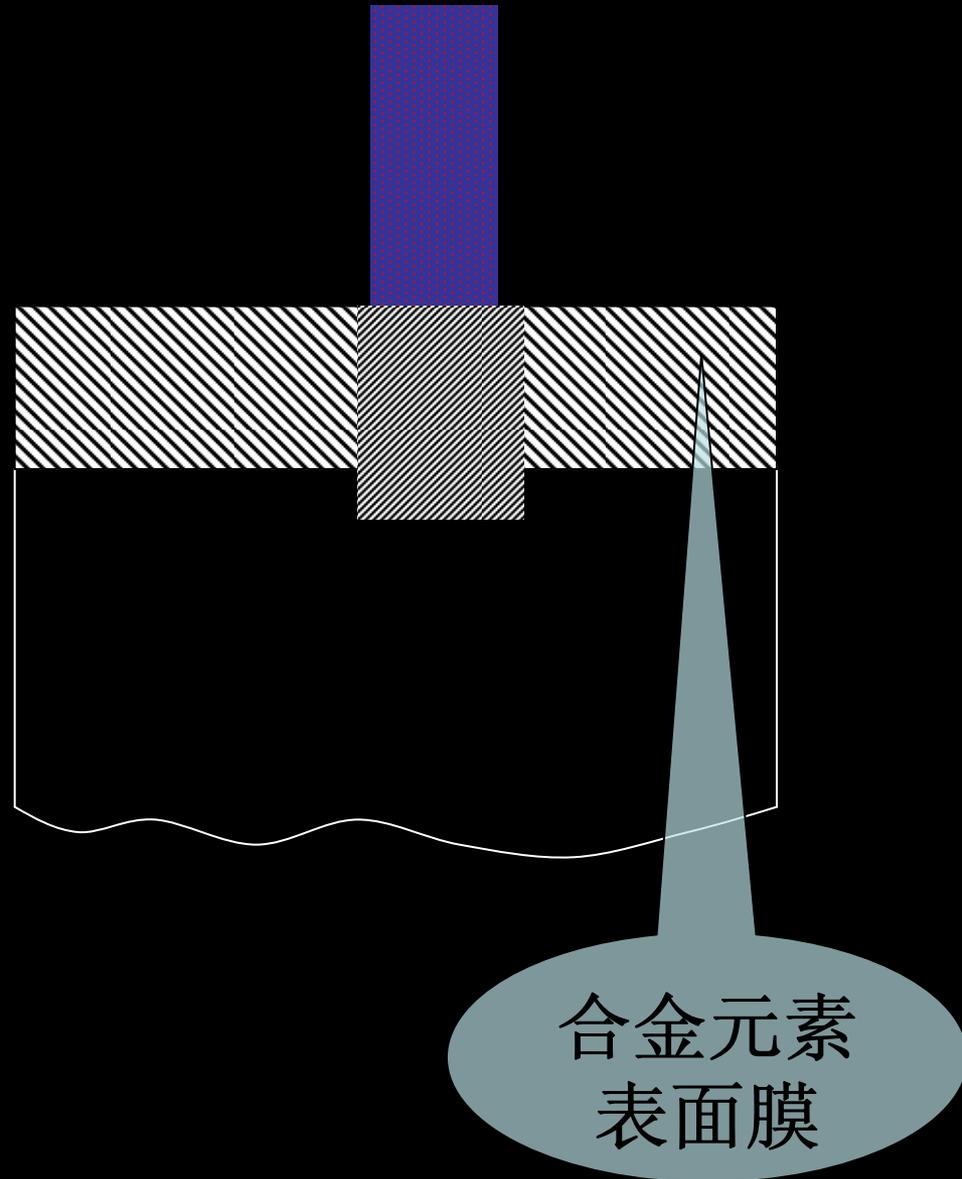
激光束的特点

- 高的方向性；
- 高亮度性；
- 高单色性。



预先通过蒸发、溅射、涂敷或喷涂的方法在金属工件表面上附着一层合金元素表面膜

受到激光束照射时，表面膜及工件浅表层熔化并迅速凝固成具有特殊成分和性能的合金化表层。



二、离子注入

离子注入是在离子注入机上进行的。其基本原理是：将适当的气体或固体工作物质的蒸气通入离子注入机，使其电离，形成正离子束。离子束被加速、聚焦和分选后，以 $10^7 \sim 10^8 \text{cm/s}$ 的速度射到工件表面上。载有一定能量的离子射入工件表层后，与其中的原子核和电子不断碰撞，消耗能量，最终在表层中某处停留下来，形成固溶体或化合物等。



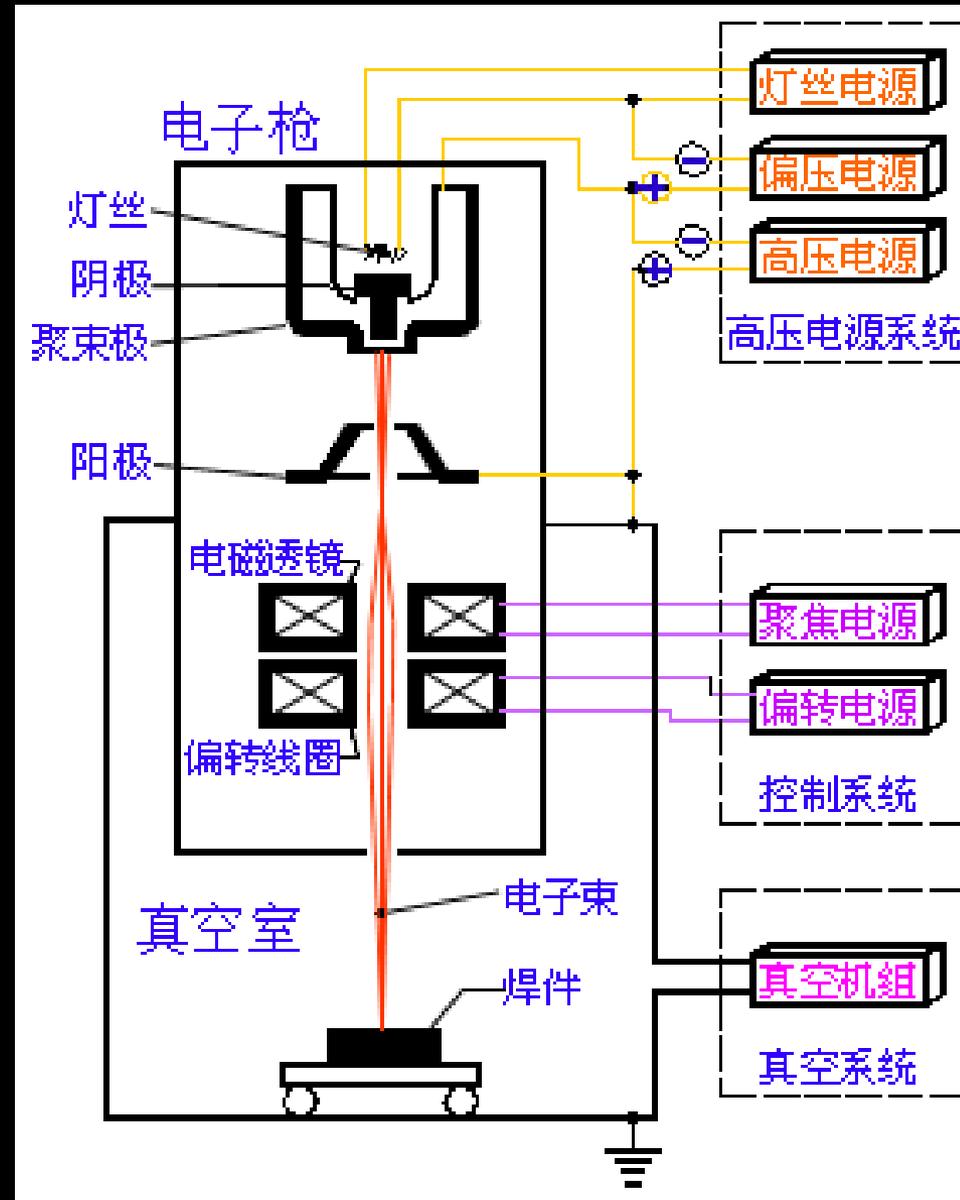
离子注入机实物照片

离子注入表面改性的特点

- ◆ 是一个非热平衡过程，任何元素都可注入任何基体材料；
- ◆ 注入元素的种类、能量、剂量可控，以得到不同的新合金相；
- ◆ 注入层相对于基体没有界面，因而不存在结合问题；
- ◆ 常在真空中进行；
- ◆ 能精确控制注入离子的密度及浓度；
- ◆ 表面形成残余压应力。

三、电子束表面热处理

电子枪由加热灯丝、阴极、阳极、聚束极、电磁透镜、偏转系统和合轴系统等组成



电子束以极高的速度轰击工件表面，能使工件表面以 $3000\sim 5000^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度急速升温，在极短时间内（ $1/3\sim 1/5\text{s}$ ）达到 1000°C ，使之达到奥氏体状态，但工件表层以下、以及没有受到电子束轰击的区域温度未变，处于冷态。

当电子束离开后，表层的热量向冷态的基体传导而以很快的速度（大于临界冷速）冷却，而完成工件表层“自冷”淬火。

电子束热处理的特点（与LB相比）

- ◆ 功率大，能量转换效率高；
- ◆ 成本低；
- ◆ 工件表面不需特殊处理；
- ◆ 操作维修方便；
- ◆ 在真空条件下进行，工件表面质量高，但限制了工件尺寸；
- ◆ 可控性比激光差。

◆ 电子束表面淬火

可用于各种碳钢及合金钢。淬硬层深度随设备功率增大而增加，随扫描速度增大而减小。

淬火组织与材料有关，如45钢表面可得到针状M，最高硬度达62.5HRC，20Cr钢表面可得到低碳M，最高硬度达40~41HRC。

10.3 气相沉积技术

气相沉积是将含有形成沉积元素的气相物质输送到工件表面，在工件表面形成沉积层的工艺方法。

依据沉积过程反应的性质，可分为

- ◆ 化学气相沉积
- ◆ 物理气相沉积

一、化学气相沉积

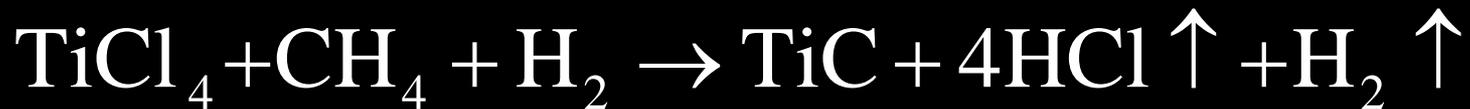
化学气相沉积（Chemical Vapour Deposition）是利用气态物质在一定温度下于固体表面上进行化学反应，生成固态沉积膜的过程，常称CVD法。

◆ 基本原理

将含有涂层材料元素的反应介质在较低温度下汽化，然后送入高温的反应室与工件表面接触产生高温化学反应，析出合金或金属及其化合物沉积于工件表面形成涂层。

◆ 在钢件表面沉积TiC层

将Ti以挥发性TiCl₄形式与气态或蒸气态的碳氢化合物一起送入高温的真空反应室，用氢气作为载体气和稀释剂，即会在反应室内钢件表面上发生化学反应：



TiC被沉积在工件的表面。

CVD法的主要特点

- 可沉积各种晶态或非晶态无机薄膜材料；
- 沉积层纯度高，与基体结合力强；
- 沉积层致密，气孔少；
- 均镀性好；
- 设备及工艺操作较简单；
- 反应温度较高， 1000°C 以上，限制了其应用。

二、物理气相沉积

物理气相沉积（Physical Vapour Deposition）是气态物质在工件表面直接沉积成固体薄膜的过程，常称PVD法。

PVD有三种基本方法

- ◆ 真空蒸镀
- ◆ 溅射镀膜
- ◆ 离子镀

◆ 真空蒸镀

在真空下将镀层材料加热变成蒸发原子，蒸发原子在真空条件下不与残余气体分子碰撞而到达工件表面，形成薄膜镀层。

特点：

- 设备及工艺操作简单；
- 可镀不良导体、玻璃、陶瓷等；
- 沉积速度快；
- 高熔点及低蒸气压物质蒸镀困难，绕镀性差，镀层较疏松，与基体结合弱，而冲击和磨损性差。

◆ 阴极溅射法

在气体辉光放电炉中，用正离子轰击阴极（待沉积材料作的靶），将其原子溅射出，并通过气相沉积到工件表面上形成薄膜镀层。

特点：

- 适于任何物质；
- 镀膜密度高、气孔少，与基体结合力强；
- 沉积速度慢，设备及工艺操作复杂。

◆ 离子镀

借助惰性气体（如Ar）的辉光放电使沉积材料蒸发成离子化，离子经电场加速，沉积在带负电荷的工件表面，形成薄膜镀层。

特点：

- 工艺温度低（600℃）；
- 离子绕射能力强，镀层均匀；
- 镀层与基体结合力强；镀层致密，气孔少；
- 沉积速度快；
- 高熔点合金及化合物离子镀困难，设备及工艺操作复杂。

第十二章

零件的选材 及工艺路线

- ◆ 常用力学性能指标在选材中的意义
- ◆ 断裂韧度在选材中的意义
- ◆ 零件实物性能试验的重要性
- ◆ 材料强度、塑性与韧性的合理配合
- ◆ 选材方法
- ◆ 典型零件选材及工艺路线

第一节 常用力学性能指标在选材中的意义

常用力学
性能指标

刚度

E/G

强度

σ_b 、 σ_s

硬度

HBS、HRC

塑性

δ 、 ψ

韧性

A_k 、 a_k

一、刚度与弹性指标

(一) 刚度指标

刚度是指零件在受力时抵抗弹性变形的能力。

零件刚度设计：零件的最大弹性变形量 ΔL 或最大扭转角 θ 必须小于许用弹性变形量 $[\Delta L]$ 或扭转角 $[\theta]$ ，即：

零件结构在外载作用下的变形量

$$\Delta l \leq [\Delta l]$$

$$\theta \leq [\theta]$$

产品要求

由材料力学知：

◆ 拉压
$$\Delta l = \frac{F l}{E A}$$

◆ 弯曲
$$\Delta l = \frac{4l^3 F}{E t^3}$$

◆ 扭转
$$\theta = \frac{M_n}{G I_p}$$

在零件刚度设计时要综合考虑：
外载、零件尺寸和材料刚度三个方面的因素。

外加载荷

F ：外力

M_n ：扭矩

零件尺寸

l ：零件长度

A ：截面积

t ：截面尺寸

I_p ：极惯性矩

材料刚度

E 、 G

例如：一根承受弯曲载荷的轴，进行挠曲弹性变形刚度设计，现有钢、铝合金、聚苯乙烯三种材料可供选择。

$$\Delta l = \frac{4l^3 F}{Et^3}$$

- ◆ 轴的尺寸 (l 、 t) 及外载 (F) 不变时
三者的E分别为：21、7、0.35 ($\times 10^7$) MPa，所以产生的挠曲变形量之比为1：3：60。
- ◆ 显然，钢的刚度最大，最合适。在给定变形量和外载的条件下，尺寸最小。

如果在刚度设计时，还要考虑零件的重量轻，则不能仅比较材料的刚度，还要考虑其密度，必须按比刚度来选材。

比刚度与材料的弹性模量、密度及加载方式有关。

加载方式对比刚度及比强度和比脆断强度的影响

加载方式	比刚度	比屈服强度	比脆断强度
拉棒	E / ρ	σ_s / ρ	K_{IC} / ρ
扭转棒或管	\sqrt{G} / ρ	$\sigma_s^{2/3} / \rho$	$K_{IC}^{2/3} / \rho$
受弯杆或管	\sqrt{E} / ρ	$\sigma_s^{2/3} / \rho$	$\sqrt{K_{IC}} / \rho$
受弯板	$E^{1/3} / \rho$	$\sqrt{\sigma_s} / \rho$	
纵向受压板	$E^{1/3} / \rho$	$\sqrt{\sigma_s} / \rho$	
受内压或旋转缸体	E / ρ	σ_s / ρ	K_{IC} / ρ
受内压球体	$E(1-\nu) / \rho$	σ_s / ρ	K_{IC} / ρ

例如：飞机机翼的受力状态为平板弯曲，比刚度为 $E^{1/3}/\rho$ 。

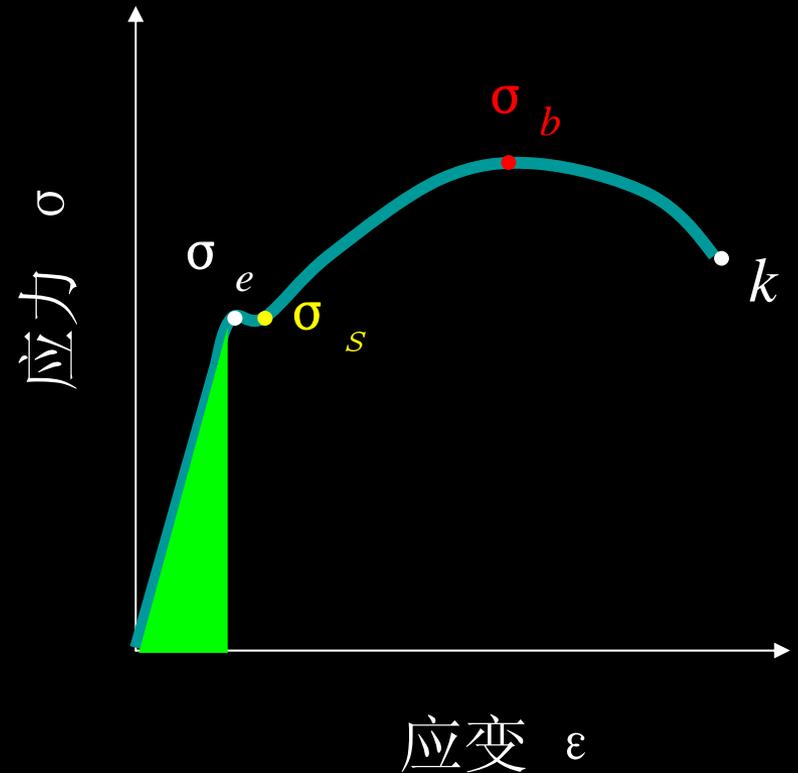
- ◆ 钢的 E 是铝合金三倍；
- ◆ 两者的密度分别为7.83和2.7g.cm⁻³；
- ◆ 比刚度分别为0.76和1.5；

铝合金的比刚度是钢的2倍，故飞机机翼应选用铝合金材料。

(二) 弹性指标

弹性是指材料的弹性变形的大小。通常用弹性变形时吸收的弹性能（又称弹性比功） u 来表示。

$$u = \frac{1}{2} \sigma_e \cdot \varepsilon_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_e^2}{E}$$



材料的弹性极限越高，弹性模量越低，则弹性能越大，零件的弹性越好。

在设计弹性零件时弹性极限和弹性模量是考虑的基本性能指标。

例如：弹簧，主要功能是起缓冲、减振和传递力的作用，故要求所用材料既要有高的弹性又不能发生塑性变形。

虽然降低材料的 E 有利于提高弹性比功，但 E 低的塑料、橡胶、低熔点金属等的屈服极限也低。

工程结构中，弹簧用材料，一般为弹性模量较大、弹性极限及屈服强度较高的材料。

如：汽车板簧，选用合金弹簧钢并经淬火+中温回火处理得到 $T_{\text{回}}$ 组织，具有高的弹性极限及屈服强度。

碳纤维增加复合材料屈服强度高、密度小、质量轻，也是板簧的理想材料，但成本高，目前尚末广泛应用。

二、硬度和强度指标

（一）硬度指标

硬度是材料抵抗局部塑性变形能力的性能指标。是工业生产上控制和检查零件质量的最常用、最简便的方法。

通常采用以淬火钢球或金刚石压头，用一定的载荷压入材料表面的方法来测量硬度。

硬度测试方法

- ◆ 布氏硬度HBS

 - 淬火钢球压头

- ◆ 洛氏硬度HRC

 - 锥角为 120° 的金刚石圆锥体压头

- ◆ 维氏硬度HV

 - 锥角为 136° 的金刚石四棱锥体压头

硬度与材料的其它力学性能之间有一定的关系。 $\sigma_b = kHBS$ ，淬火钢及铝合金1/3，铜及铜合金0.40~0.55。

- ◆ 通过测量硬度可以间接反映材料的其它力学性能。
- ◆ 刀具、冷成型模具和粘着磨损或磨粒磨损条件下服役的零件，其耐磨性能与材料的硬度成正比；
- ◆ 承受接触疲劳载荷的零件如齿轮、滚动轴承等，在一定范围内提高硬度对减轻麻点剥落是有效的。

由于硬度测量非常简便，且基本不损坏零件，所以硬度常作为金属零件的质量检验标准。在一定的处理工艺下，只要硬度达到了规定的要求，其它性能也基本会满足要求。

应予以注意的是：同样的硬度可以通过不同的处理工艺得到，所以，在用硬度作为控制材料性能的指标时，必须对处理工艺作出明确的规定。

例如：45钢制造车床主轴，要求硬度为220~240HBS。调质和正火都可达到要求，但调质处理后综合力学性能好，寿命更高。

(二) 强度指标

$$\sigma \leq [\sigma] = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{k} & \text{韧性材料} \\ \frac{\sigma_b}{k} & \text{脆性材料} \end{cases}$$

三、塑性和冲击韧性指标

（一）塑性指标

塑性指标 δ 、 Ψ 是材料产生塑性变形使应力重新分布而减小应力集中的能力的量度。

在设计时要求材料达到所要求的 δ 、 Ψ 。

由于 δ 、 Ψ 是在单向拉伸应力状态下材料的塑性，不能表示复杂应力状态下材料的塑性，也不能反映应力集中、工作温度、零件尺寸等的影响。

（二）冲击韧性指标

冲击韧性指标 A_K 或 a_K 是表征在有缺口时材料塑性变形能力的指标。它反映了应力集中和复杂应力状态下材料的塑性，且对温度很敏感，因此，在一定程度上弥补了 δ 、 Ψ 的不足。

在设计中，对于脆断是主要危险的零件，冲击韧性是判断材料脆断抗力的重要性能指标。但是， A_K 或 a_K 不能直接定量地用于设计，只能凭经验提出对冲击韧性值的要求。

第二节 断裂韧度在选材中的意义

一些高强度钢制造的结构和中低强度钢制造的大型锻件，由于在材料制备和冷、热加工过程中不可避免地会产生一些缺陷和裂纹，严重时将导致发生低应力脆断。

经典的设计无法避免低应力脆性断裂。故在这类零件的设计中，选用断裂力学参量-应力强度因子 K_I 作为设计准则：

$$K_I \leq K_{IC}$$

*例如：*火箭发动机壳体是用高强度薄钢板焊接制成的，工作应力 $\sigma = 1200\text{MPa}$ 。

- ❖ 为了减轻自重，应选择高强度材料；
- ❖ 为防止强度不足，安全系数 k 取 1.5，则应选用 $\sigma_s = 1800\text{MPa}$ 的超高强度钢。
- ❖ 但是，壳体在打压试验时，在应力远低于工作应力的情况下发生爆裂。
- ❖ 依据经典的设计思想，认为安全系数太小，于是加大安全系数，选用强度更高的超高强钢，但是发生爆裂的应力更低。

❖ 经断口分析表明，断裂是从焊缝中微小半椭圆形裂纹处开始的，根据断裂力学计算，平板表面半椭圆形裂纹前沿的应力强度因子为：

$$K_I = 1.5\sigma\sqrt{a}$$

如果 $a=1.5\text{mm}$ ，则 $K_I=67\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，故壳体材料应选择 K_{IC} 为 $68\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上的材料，才能防止脆断。

选择屈服强度 1800MPa 的超高强钢，其 K_{IC} 约为 $50 \sim 60\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，即 $K_I > K_{IC}$ ，故会产生脆断。

若提高安全系数，选用强度更高的材料，则其 K_{IC} 更低，所以，在更低的应力下就会产生脆断。

相反，降低安全系数 $k=1.1$ ，则可选择屈服强度为 1300MPa 左右的钢，其 K_{IC} 达到 $93\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右，此时， $K_I < K_{IC}$ ，故结构是安全的。而且成本大大降低。

第三节 零件实物性能试验的重要性

由于结构设计和加工工艺对材料的性能有显著影响，所以材料的实验室性能和真实零件的性能有时会有很大的差异。

一、结构设计对性能的影响

在零件结构设计上的尖角、油孔、过小的过渡圆角等不合理的设计，会在这些地方产生应力集中，使零件的性能低于实验室小试样的性能。

正火45钢试样、轴、压配合轴弯曲疲劳极限

试 件	光滑试样	未压配合的轴		压配合的轴	
		光滑轴	开卸载槽轴	光滑轴	开卸载槽轴
弯曲疲劳极限 MPa	280	240	240	91	155

二、加工工艺对性能的影响

加工工艺不良产生的缺陷，如锻造、热处理、焊接产生的过热、过烧、氧化、脱碳、裂纹，机加工产生的刀痕及磨削裂纹等，都会使零件的性能下降。

模锻
引起脱碳

调质40Cr钢试样、汽车半轴弯曲疲劳强度

试 样	光滑试验		半轴	
	未脱碳	脱碳	未脱碳	脱碳
弯曲疲劳极限 MPa	546	245	420~490	91~102

第四节 材料强度、塑性与韧性的合理配合

- ❖ 经典的零件设计方法
- ❖ 首先是以材料的强度指标 σ_b 、 σ_s 或 σ_{-1} 为依据进行强度计算；
- ❖ 然后再考虑零件在油孔、键槽、尖角等处有应力集中和工作时会遇到难以预料的过载或偶然的冲击等情况，再凭经验对材料的塑性、韧性提出一定的要求。

通常，材料的强度与塑性、韧性是相互矛盾的。

- ❖ 为确保安全，通常规定较高的塑性和冲击韧性，而牺牲强度。导致零件笨重；
- ❖ 或者选用强度和塑性、韧性都很好的高级合金钢或其它高级材料，致使零件成本增加，浪费材料。
- ❖ 有时过高的塑韧性未必能保证零件的安全可靠，因为大多数机件的断裂是由高周疲劳引起的，因强度不足发生早期疲劳断裂时，往往材料的塑韧性还有余。

例如：柴油机的曲轴、连杆和万能铣床的主轴。

过去为追求高的塑韧性，选用45钢调质处理，以获得优良的综合力学性能，但失效分析表明：这类零件的断裂方式大多为疲劳断裂，不必追求高的塑韧性。

现改用球墨铸铁制造，完全可满足性能的要求，简化了加工工序，降低了成本。

材料的强度、塑性、韧性必须合理配合

❖ 以高周疲劳断裂为主的零件， $\sigma_b < 1400\text{MPa}$ 时，材料的强度愈高，疲劳强度亦愈高，零件的寿命愈长，因此提高强度、适当降低塑韧性是有利的。

这类低中强度材料的 K_{IC} 较高，除低温或尺寸较大的零件外，不易发生脆断，故可用经典方法来设计和选材，提高强度可提高零件的许用应力和减轻自重。

❖ $\sigma_b > 1400\text{MPa}$ 的材料，对缺口、表面加工质量、热加工缺陷、冶金质量等都很敏感，强度增加，疲劳寿命反而会降低。

❖ 以低应力脆断为主要危险的零件，如中低强度钢制造的汽轮机转子、发电机转子、大型轧辊、低温或高压化工容器以及高强度钢制造的火箭发动机壳体等，材料的韧性比强度更重要。

这类零件应用 K_{IC} 来设计和选材，适当增加的塑韧性，牺牲强度是有利的。

第五节 选材方法

在工程结构和机械零件设计与制造中，合理选择材料是十分重要的。选材基本原则：材料的使用性能、工艺性能、经济性。

一、根据材料的使用性能选材

使用性能是材料在零件工作（使用）过程中所应具备的性能（力学性能、物理性能、化学性能），是选材的主要依据。

不同零件要求不同的使用性能。

选材时，首先必须准确判断零件所要求的使用性能，然后再确定所选材料的主要性能指标及具体数值并进行选材。

依据使用性能选材的具体方法

- 1. 分析零件的工作条件，确定作用性能**
受力分析；工作环境；特殊性能要求；在此基础上确定零件的使用性能。

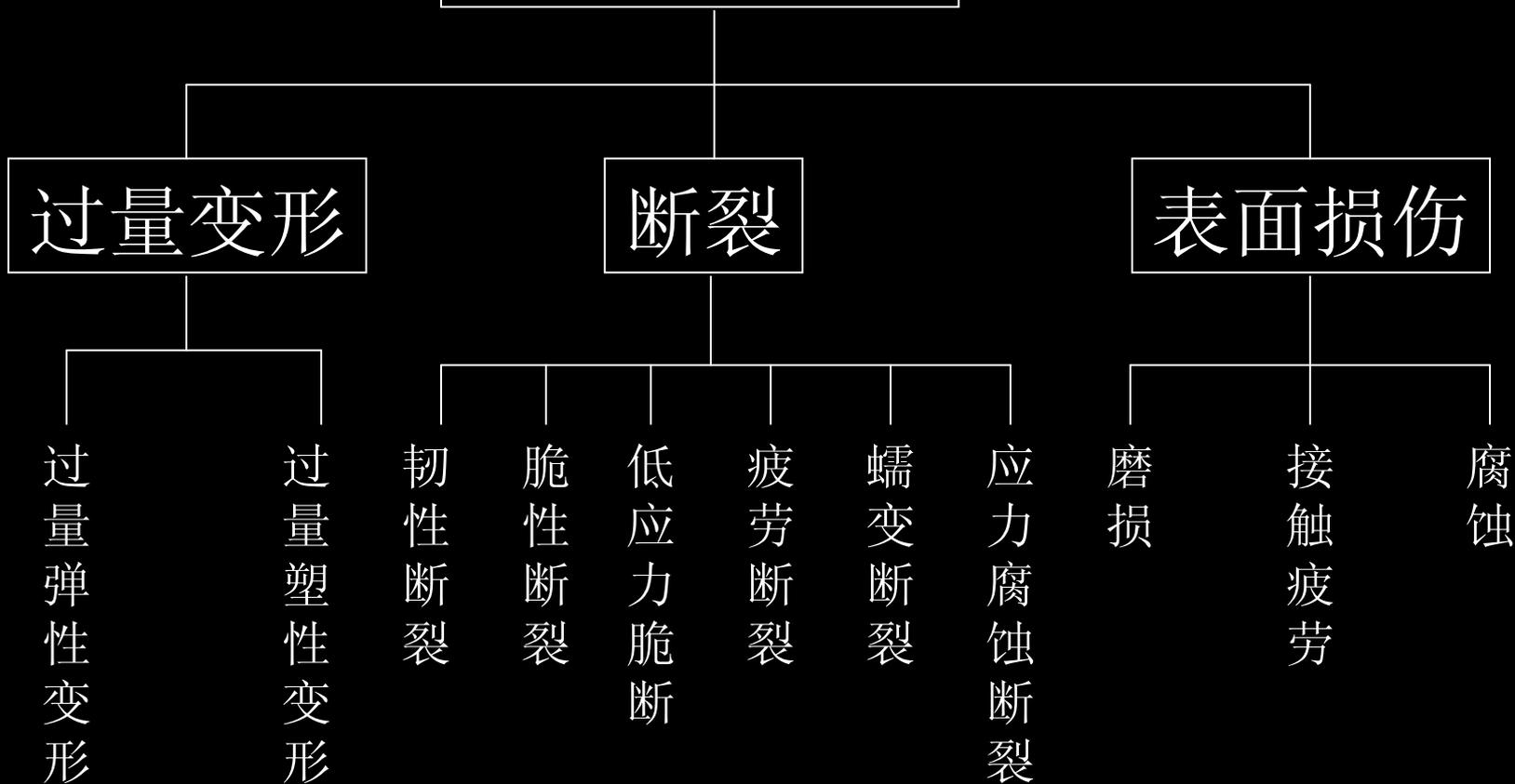
2. 失效分析，确定零件的主要使用性能

失效分析的目的在于：找出产生失效的主导因素，为较准确的确定零件主要使用性能提供经过实践检验的可靠依据。

零件失效方式多种多样，根据零件承受载荷的类型和外界条件及失效的特点，可将失效分为三大类：

过量变形、断裂、表面损伤。

零件失效方式



失效分析基本步骤:

- 1) 收集失效零件的残骸并拍照记录失效实况，找出失效的发源部位或能反映失效性质或特点的地方，然后在该部位取样。
- 2) 详细查询并记录、整理失效零件的有关资料，从设计、加工、使用等方面进行全面分析。
- 3) 试样宏观及微观断口分析，以及必要的金相分析，确定失效发源地及失效方式。

- 4) 试样成分、组织及性能分析测试。
 - 5) 对于重要、关键的零部件进行断裂力学计算，以确定失效的原因。
 - 6) 综合各方面资料，判断和确定失效的具体原因，提出改进措施，写出报告。
- 3. 从零件使用性能要求提出材料性能要求**

在零件工作条件和失效方式分析的基础上，明确了零件的使用性能要求，通过分析、计算转化为一些可测量的实验室性能和具体数值。

- ✓ 查找手册中各类材料的性能数据和大致应用范围进行选材。（根据常规力学性能指标）
- ✓ 对于高温和腐蚀介质中工作的零件还要示材料具有优良的抗氧化性和耐蚀性。
- ✓ 对于有特殊性能要求的零件应根据材料的物理、化学性能进行选材。如电性能、磁性能、热性能等。

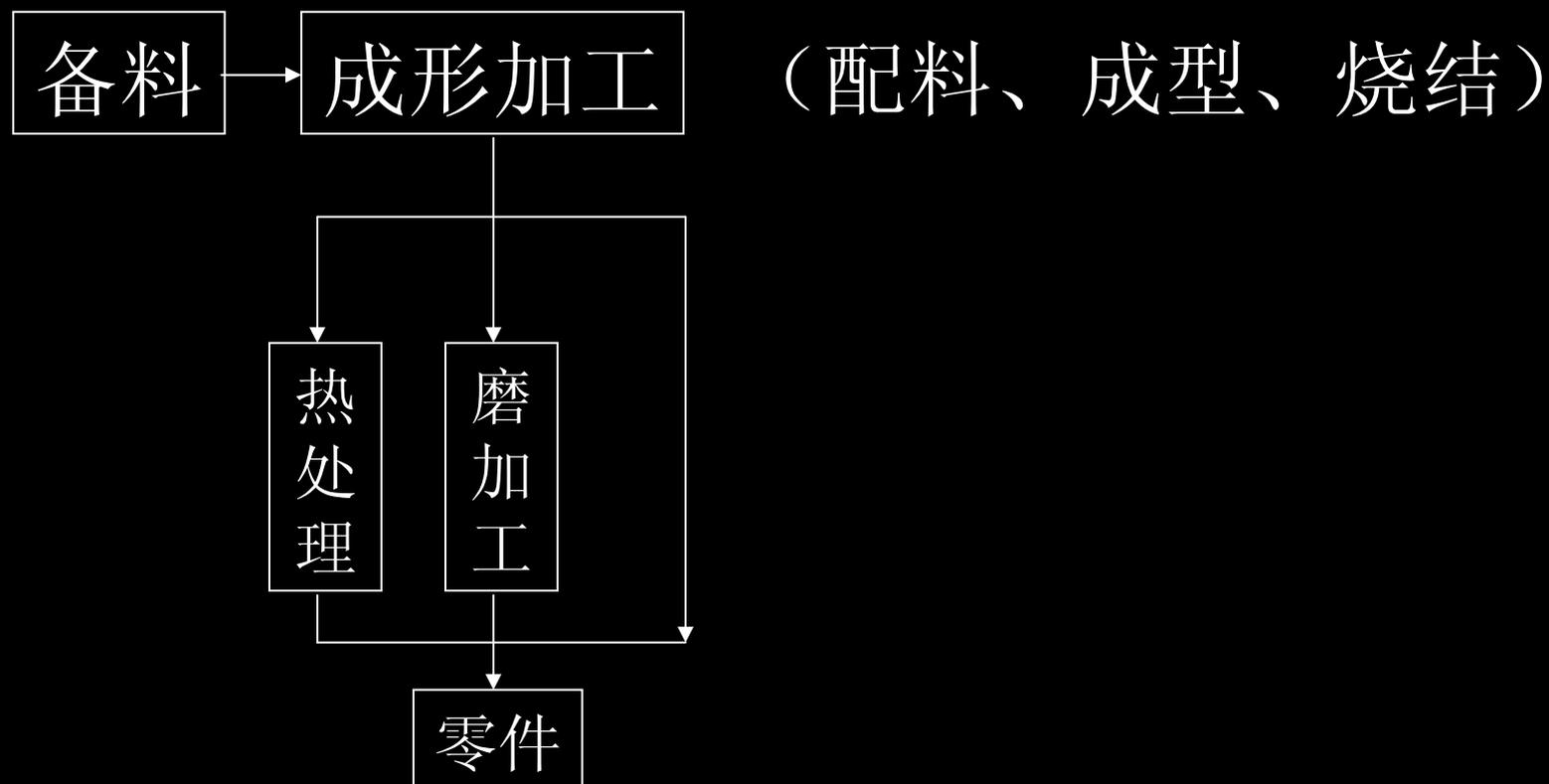
二、根据材料的工艺性能选材

材料的工艺性能指材料加工的难易程度。所选材料应具有好的工艺性能，即工艺简单、加工成形容易、能耗少、材料利用率高、产品质量好。

材料的工艺性能与加工工艺路线有关。陶瓷、高分子、金属材料的工艺性能各不相同。

(一) 陶瓷的工艺性能

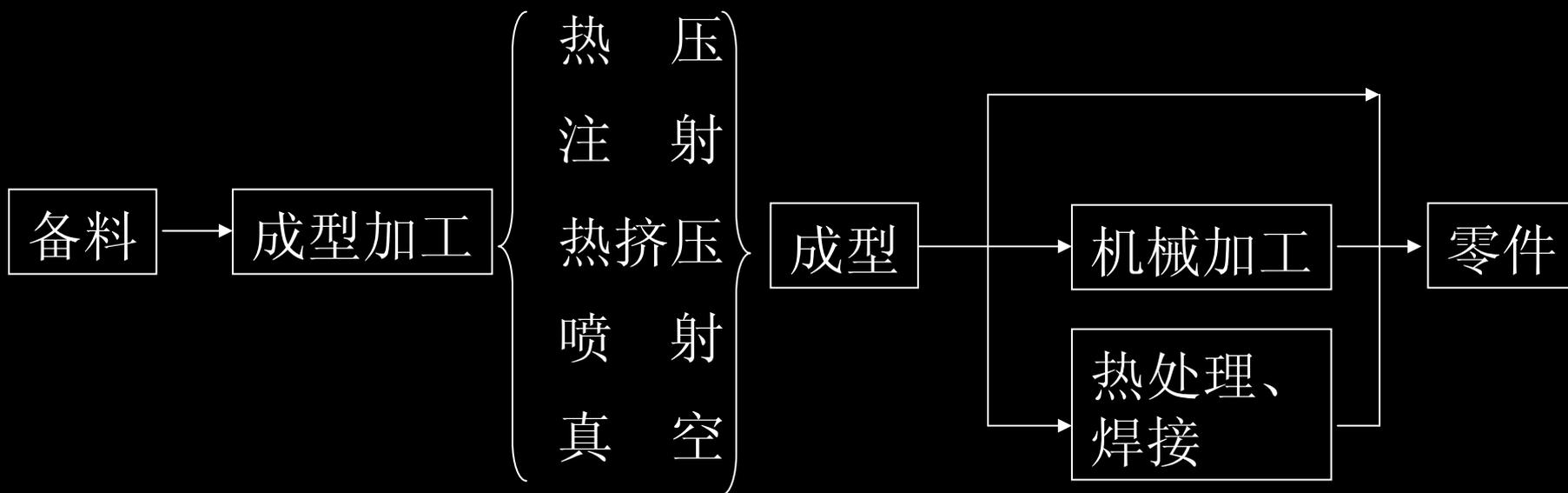
陶瓷零件的加工工艺路线:



- 陶瓷的加工工艺路线简单，工艺性能要求不高。可根据零件形状、尺寸精度和性能要求采用不同的成形方法。
- 陶瓷材料的切削加工性能差，除氮化硼陶瓷外，不能进行切削加工，只能用碳化硅或金刚石砂轮磨削加工。

(二) 高分子材料的工艺性能

高分子材料零件的加工工艺路线:



- 高分子材料零件的加工工艺路线也比较简单，对材料的工艺性能要求不高。
- 切削加工性能好，与金属基本相同，但导热性差，在切削加工过程中易使工件软化（热塑性塑料）或烧焦（热固性塑料）。

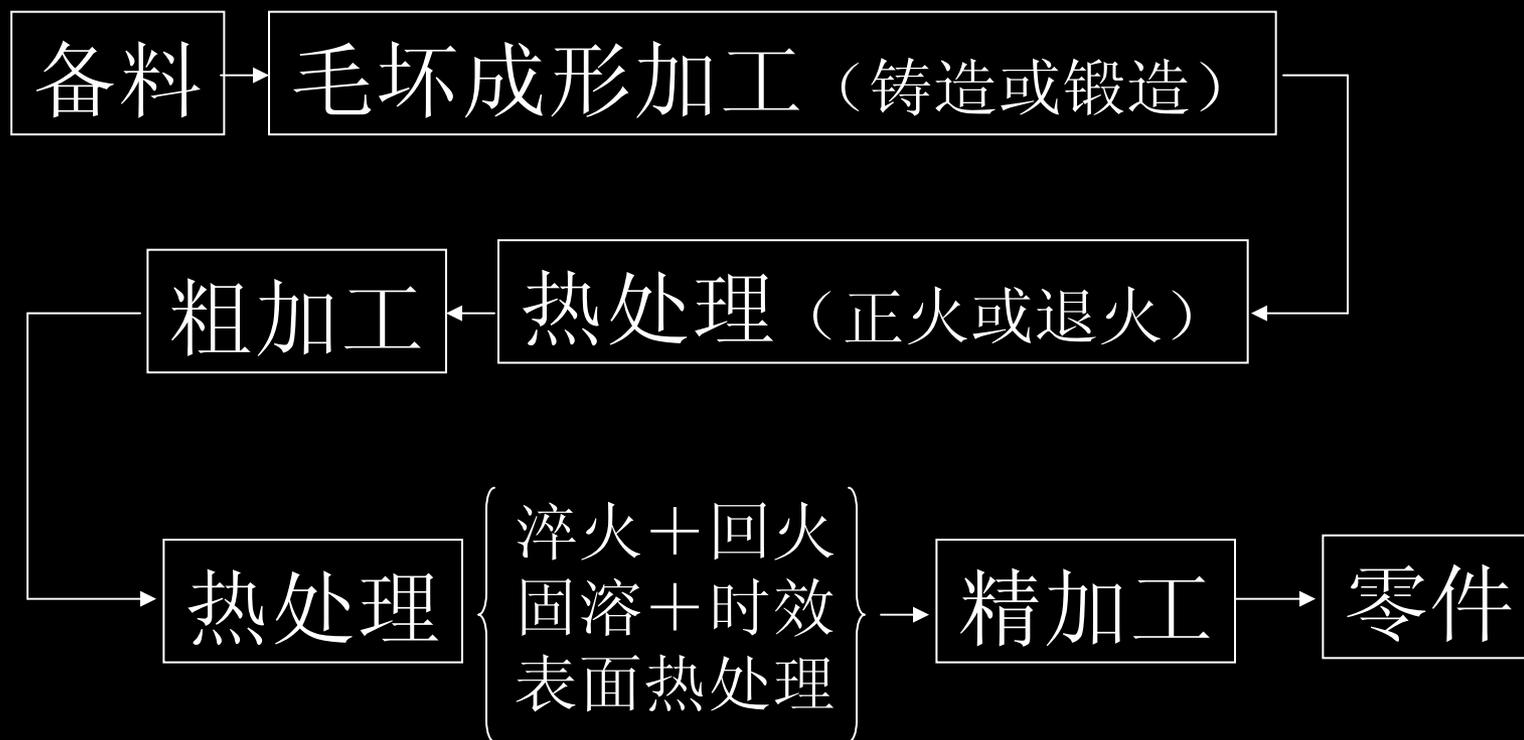
（三）金属材料的工艺性能

金属材料零件的加工工艺路线，按零件的形状及性能要求有不同的工艺路线。

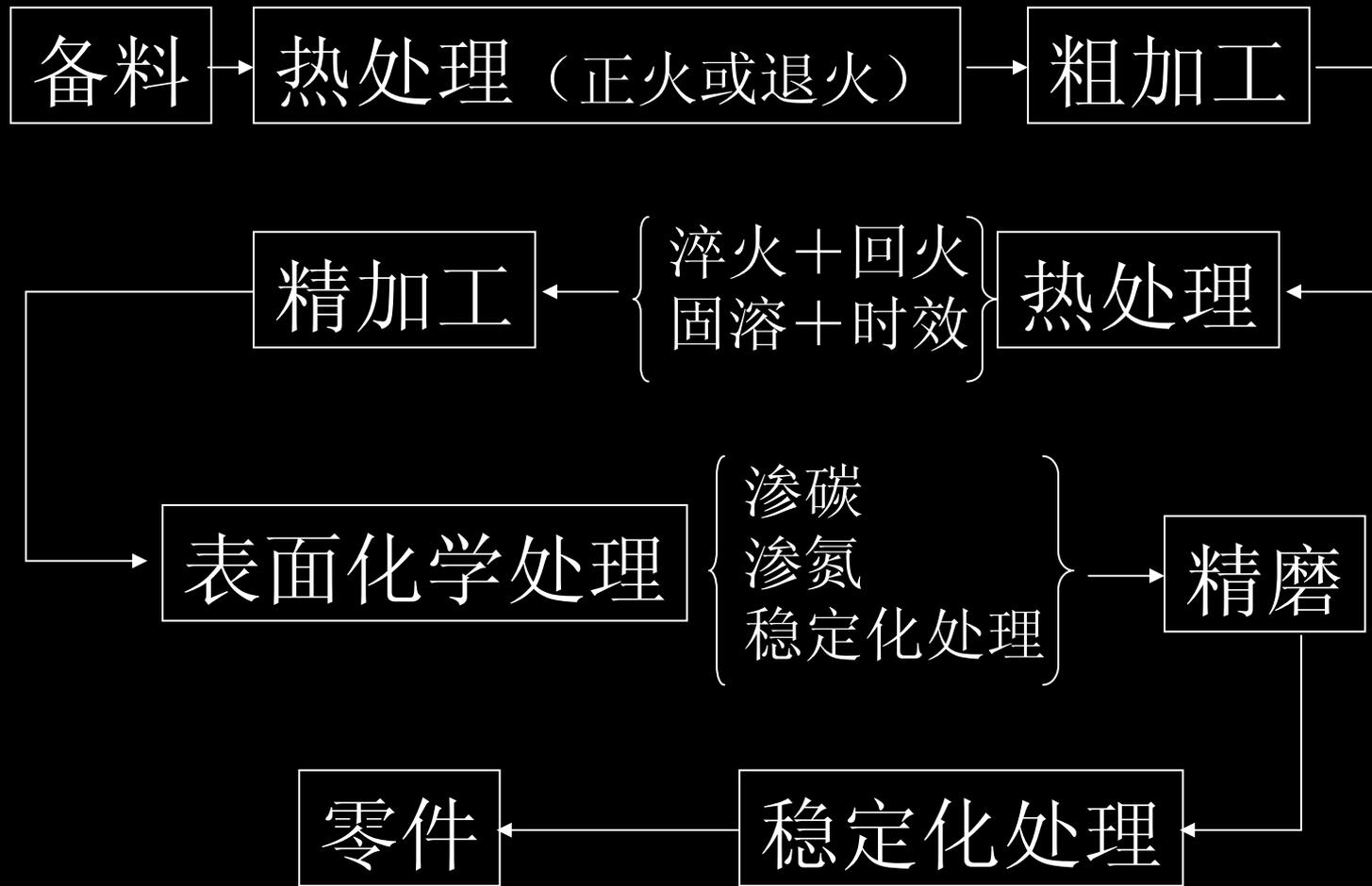
1) 性能要求不高的一般零件（铸件、碳钢件）



2) 性能要求较高的零件（合金钢、高强铝合金）



3) 性能要求高的精密零件（精密丝杠等）



金属材料的工艺性能

- 1) 铸造性能 适应于铸造的性能，主要指流动性、收缩、偏析、吸气性等；
- 2) 压力加工性能 指冷、热加工时的塑性和变形抗力及可热加工的温度范围，抗氧化性和加热冷却要求等；
- 3) 机械加工性能 主要指切削加工性、磨削加工性等；
- 4) 焊接性 主要指焊接区形成或热裂及气孔的倾向；
- 5) 热处理工艺性能 主要指加热温度范围、氧化和脱碳倾向、淬透性、变形开裂倾向等。

三、根据材料的经济性选材

在满足使用性能的前提下，经济性也是选材要考虑的重要因素。经济性不主要是指选用材料的价格便宜，更重要的是使生产零件的总成本降低。

但有时选用性能好的材料，虽然价格高，但因零件自重轻，使用寿命延长，维修费用降低，反而是经济的。

第六节 典型零件选材及工艺路线

金属、陶瓷及高分子材料是三类最主要的工程材料，从性能上说，各有其优劣。

- ◆ 高分子材料的强度、刚度、韧性低，一般不能用作重要的机器零件，但其弹性好、减振性及耐磨性或减摩性好、密度小，适于制作受力小、减振、耐磨、密封零件，如轻载传动齿轮、轴承、密封垫圈、轮胎等。

- ◆陶瓷材料硬而脆，也不能制作重要的受力构件，但其具有好的热硬性和化学稳定性，可用于制作高温下工作的零件和耐磨、耐蚀零件，如切削刀具、燃烧器喷嘴、石油化工容器等。
- ◆金属材料具有优良的综合力学性能，其强度、塑性、韧性好，可用于制作重要的机器零件和工程结构，是机械工程中使用的最广泛的材料，尤其是钢铁材料。

◆ 复合材料具有最优良的性能，但由于价格昂贵，一般机械工业中很少应用。复合材料主要用于航空、航天、船舶等国防工业领域，作为重要结构件材料。

一、齿轮

(一) 工作条件、失效方式及性能要求

■ 齿轮的功能

传递扭矩

变速

改变传力的方向



■ 工作条件

- ① 传递扭矩时齿根承受较大的交变弯曲应力；
- ② 齿啮合时齿面承受较大的接触压应力并受强烈的摩擦和磨损；
- ③ 换挡、启动、制动或啮合不均匀时承受一定的冲击力。

■ 失效方式

- ◆ 齿的折断（疲劳断裂、冲击过载断裂）
- ◆ 齿面损伤（接触疲劳麻点、过渡磨损）

性能要求:

- ① 高的弯曲疲劳强度，防止轮齿疲劳断裂；
- ② 高的齿心强度和韧性，防止轮齿过载断裂；
- ③ 高的齿面接触疲劳强度和高的硬度及耐磨性，防止齿面损伤；
- ④ 较好的工艺性能，如切削加工性，热处理变形小或变形有一定规律，过热倾向小，有一定淬透性等。

（二）选材及热处理

1、机床齿轮

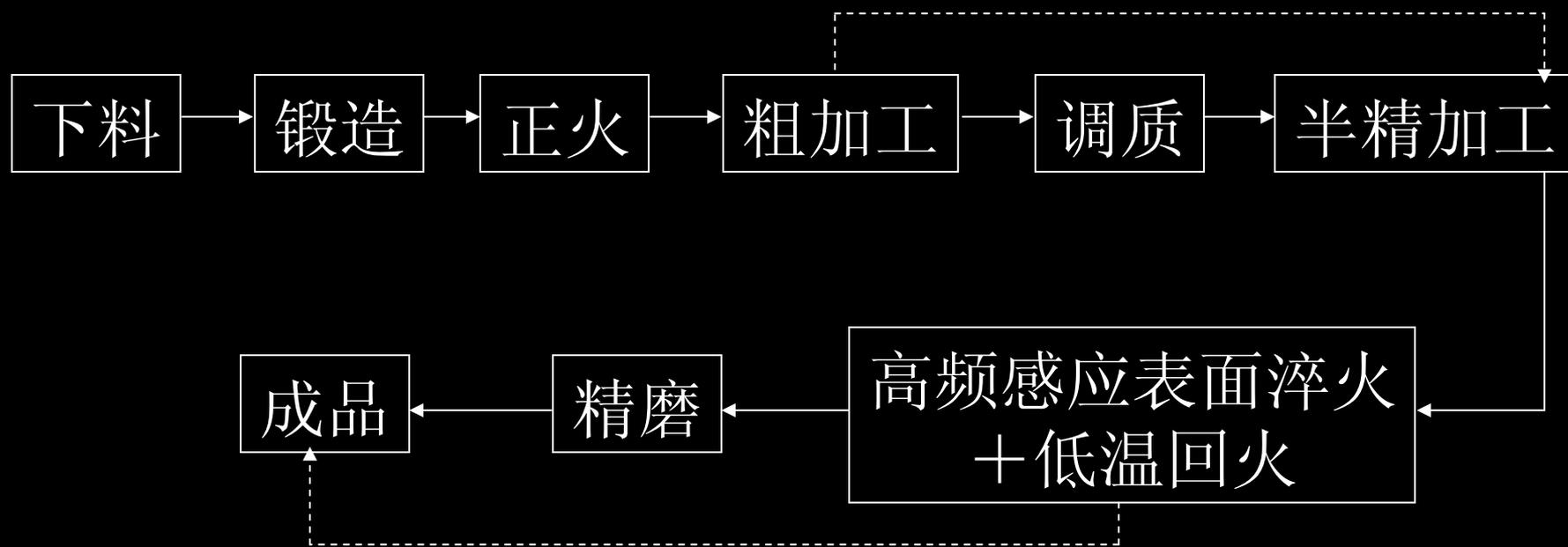
机床齿轮工作平稳，无强烈冲击，负荷不大，转速中等，对齿轮强度和韧性的要求不高。

材料：40或45钢

热处理：正火或调质处理后再经高频感应加热表面淬火，齿面硬度可达52HRC，齿心硬度为220~250HBS，能够满足性能要求。

性能要求较高的机床齿轮可选用中碳低合金钢40Cr、40MnB、45Mn2制造，齿面硬度可提高至58HRC，心部强度和韧性也有提高。

机床齿轮的加工工艺路线：



正火：使组织均匀化，消除锻造应力，调整硬度改善切削加工性。

调质：使齿轮具有较高的综合力学性能，提高齿心的强度和韧性使齿轮能承受较大的弯曲应力和冲击载荷，并减小淬火变形；

高频感应加热表面淬火：提高齿轮表面硬度和耐磨性，提高齿面接触疲劳强度；

低温回火：在不降低表面硬度的情况下，消除淬火应力，防止产生磨削裂纹，提高轮齿抗冲击能力。

2、汽车、拖拉机齿轮

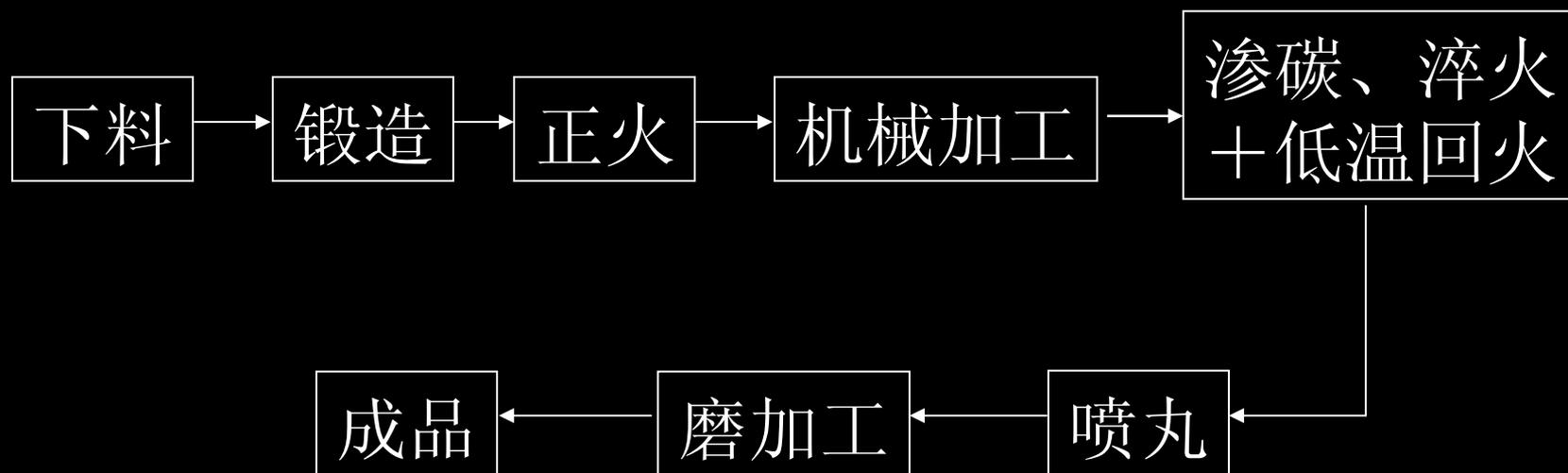
工作条件比机床齿轮恶劣，受力较大，超载与启动、制动和变速时受冲击频繁，对耐磨性、弯曲疲劳强度、接触疲劳强度、心部强度和韧性等要求均较高。

材料：渗碳钢

热处理：渗碳、淬火

性能：表面硬度58~62HRC，心部35~45HRC

汽车、拖拉机齿轮的加工工艺路线：



正火：使组织均匀化，消除锻造应力，调整硬度改善切削加工性。

渗碳：提高齿轮面碳的质量分数（0.8~1.05%）；

淬火：提高齿面硬度并获得一定淬硬层深度（0.8~1.3mm），提高耐磨性和齿面接触疲劳强度；

低温回火：消除淬火应力，防止产生磨削裂纹，提高轮齿抗冲击能力；

喷丸：提高齿面硬度约1~3HRC，增加表面残余压应力，提高接触疲劳强度。

二、轴

(一) 工作条件、失效方式及性能要求

轴的功能： 支承传动零件并传递扭矩。

工作条件： ①承受交变扭转载荷、交变弯曲载荷 或拉-压载荷； ②局部（轴颈、花键等处）承受摩擦和磨损； ③特殊条件下受温度或介质作用。

失效方式： 疲劳断裂和轴颈处磨损，有时发生冲击过载断裂，及塑性变形或腐蚀失效。

性能要求:

- ① 高疲劳强度，防止轴疲劳断裂；
- ② 优良综合力学性能，防止塑性变形及过载或冲击载荷余下下的折断和扭断；
- ③ 局部承受摩擦的部位具有高硬度和耐磨性，防止磨损失效；
- ④ 在特殊条件下工作的轴，材料应具有特殊性能（蠕变、耐蚀）。

(二) 选材及热处理

机床主轴

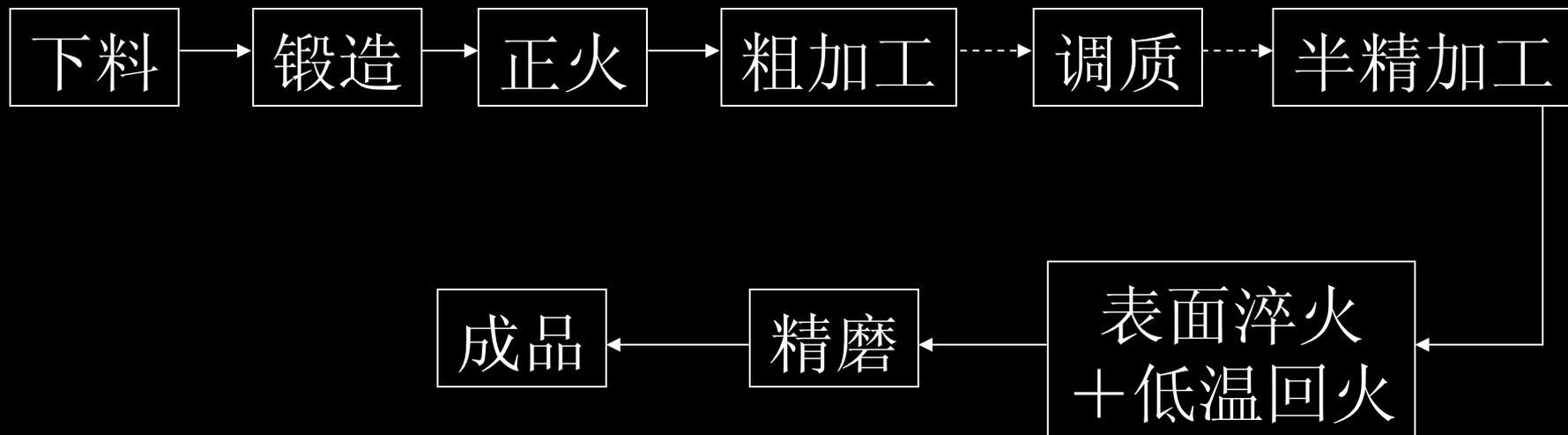
机床主轴承受中等扭转-弯曲复合载荷，转速中等并承受一定冲击载荷。

材料：45钢

热处理：调质处理后轴颈及锥孔处再进行表面淬火。

载荷较大的轴可选用40Cr制造。

机床主轴的加工工艺路线：



正火：使组织均匀化，消除锻造应力，细化晶粒，调整硬度改善切削加工性。

调质：获得较高的综合力学性能和疲劳强度；

表面淬火：提高表面硬度和耐磨性，提高接触疲劳强度；

低温回火：在不降低表面硬度的情况下，消除淬火应力，提高抗冲击能力。