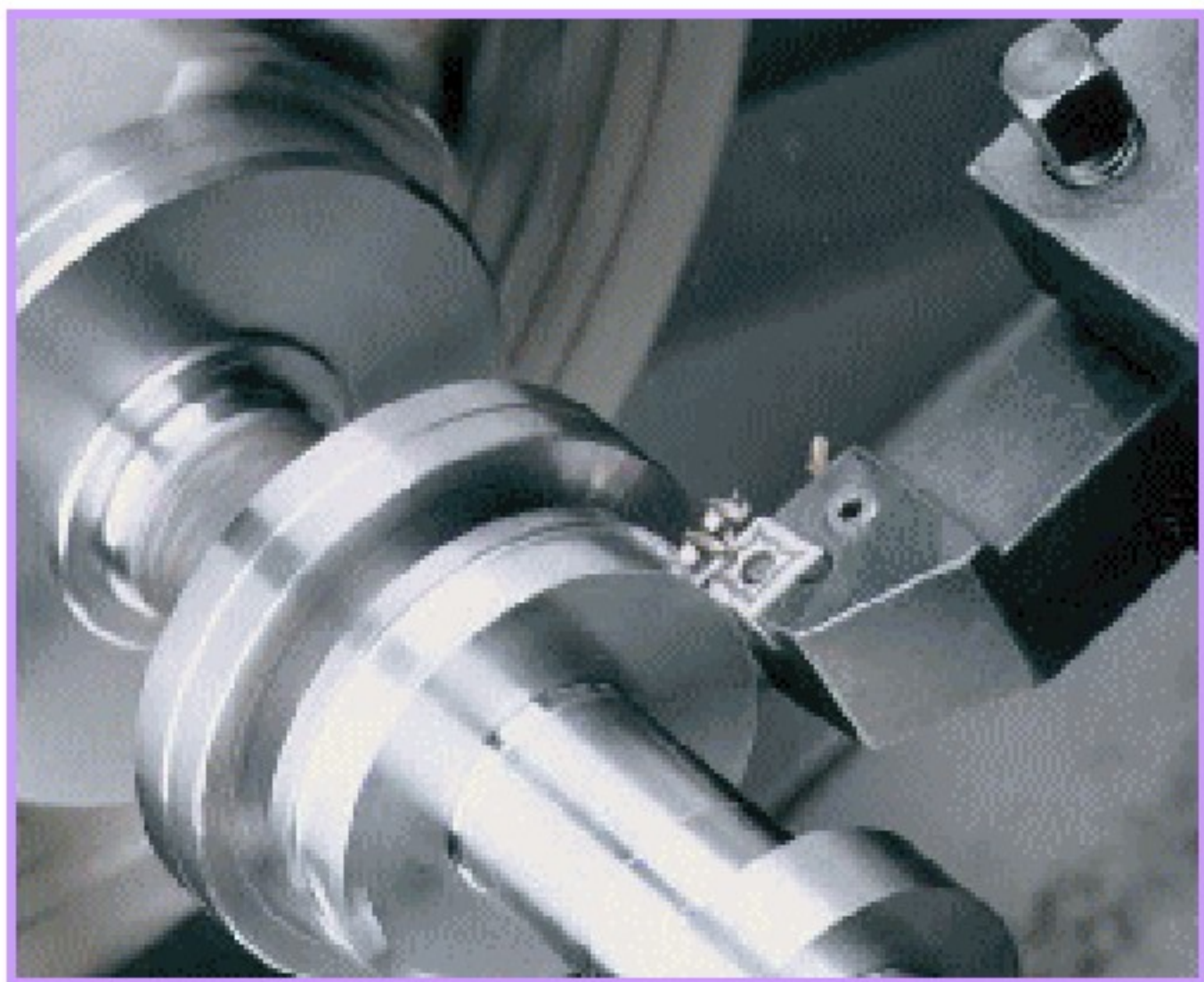


## § 3.2-3.3 钢的退火、正火、淬火和回火

- 机械零件的一般加工工艺为：毛坯（铸、锻）→预备热处理→机加工→最终热处理。
- 退火与正火主要用于预备热处理，只有当工件性能要求不高时才作为最终热处理。





# ■ 一、退火

- 将钢件加热至高于或低于钢的临界温度，经适当保温后随炉或埋入导热性较差的介质中缓慢冷却，以获得接近平衡状态组织的热处理工艺。
- 1、退火目的：
  - (1)调整硬度，便于切削加工。适合加工的硬度为170-250HB。
  - (2) 消除内应力，防止加工中变形。
  - (3) 细化晶粒，为最终热处理作组织准备。



真空退火炉

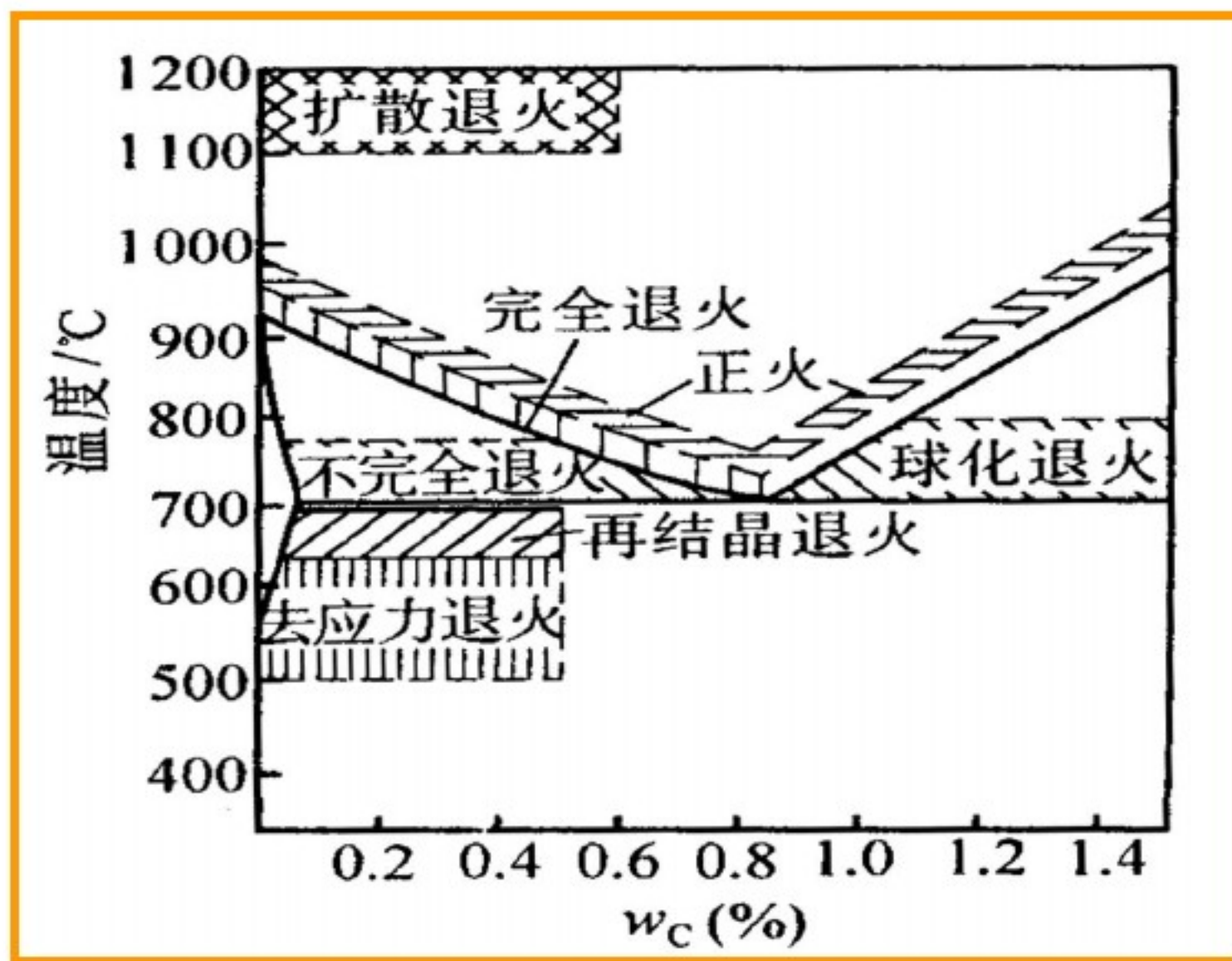


## ■ 2、退火工艺

- 退火的种类很多，常用的有完全退火、等温退火、球化退火、扩散退火、去应力退火、再结晶退火。

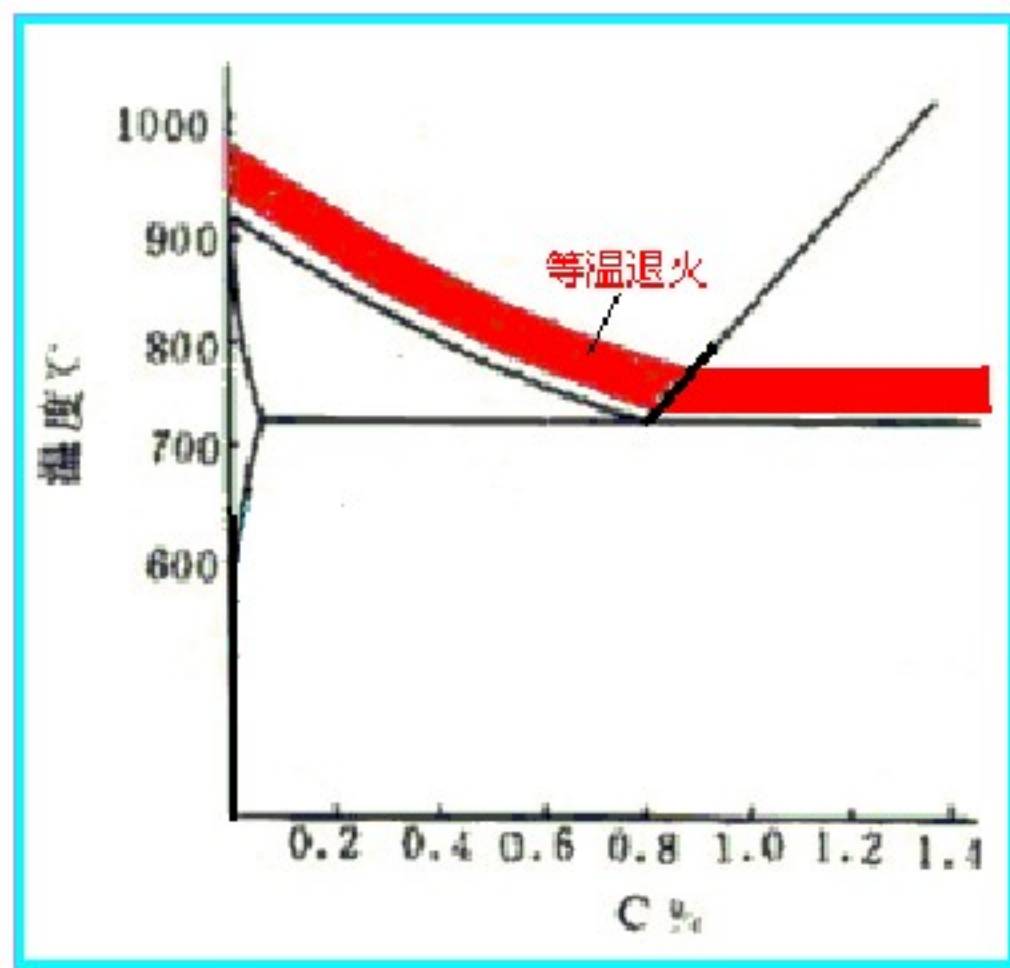
### ■ (1) 完全退火

- 将工件加热到  $A_{c3}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$  保温后缓冷的退火工艺，主要用于亚共析钢。

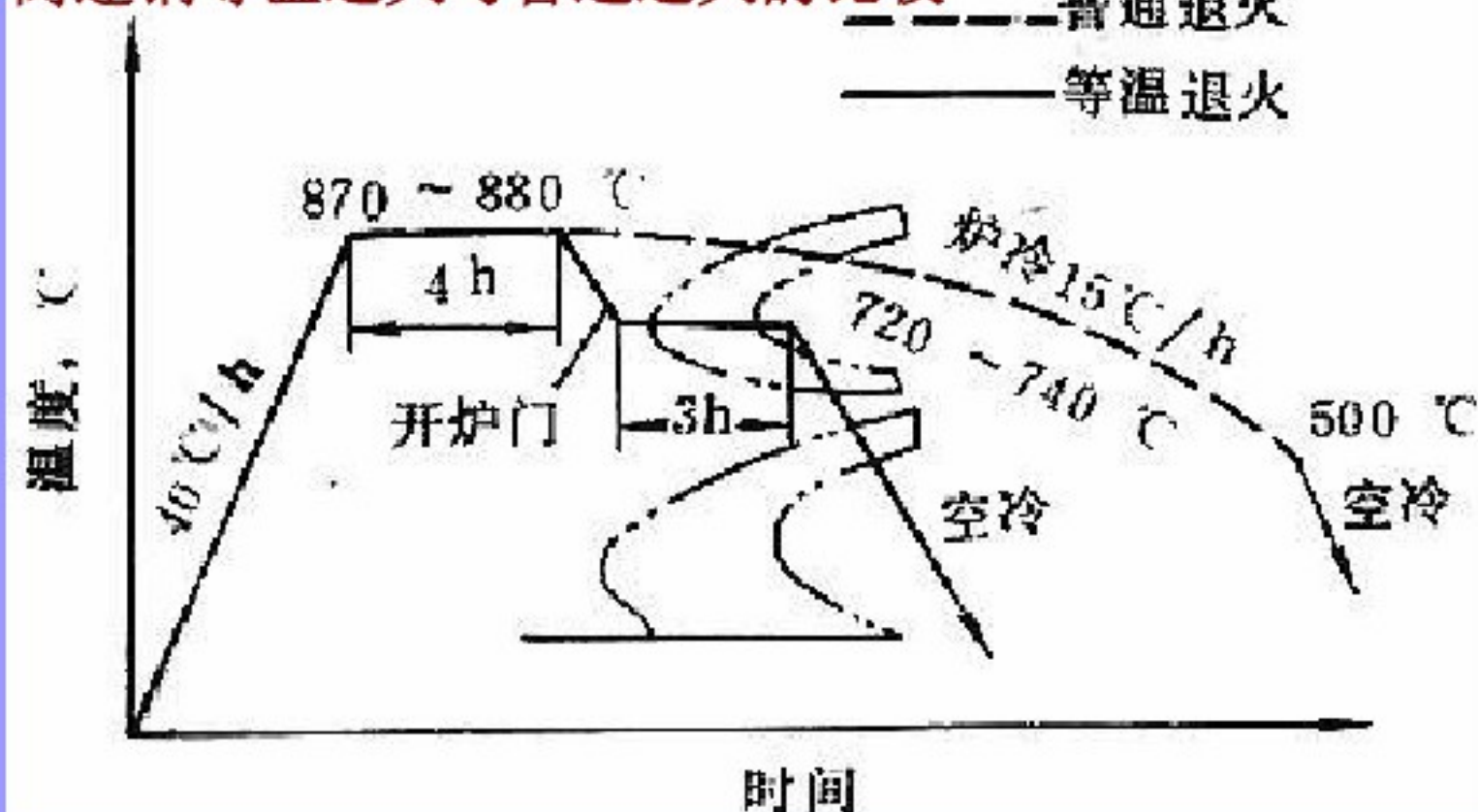


## ■ (2) 等温退火

- 亚共析钢加热到 $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ，共析、过共析钢加热到 $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ，保温后快冷到 $Ar_1$ 以下的某一温度下停留，待相变完成后出炉空冷。等温退火可缩短工件在炉内停留时间。



高速钢等温退火与普通退火的比较



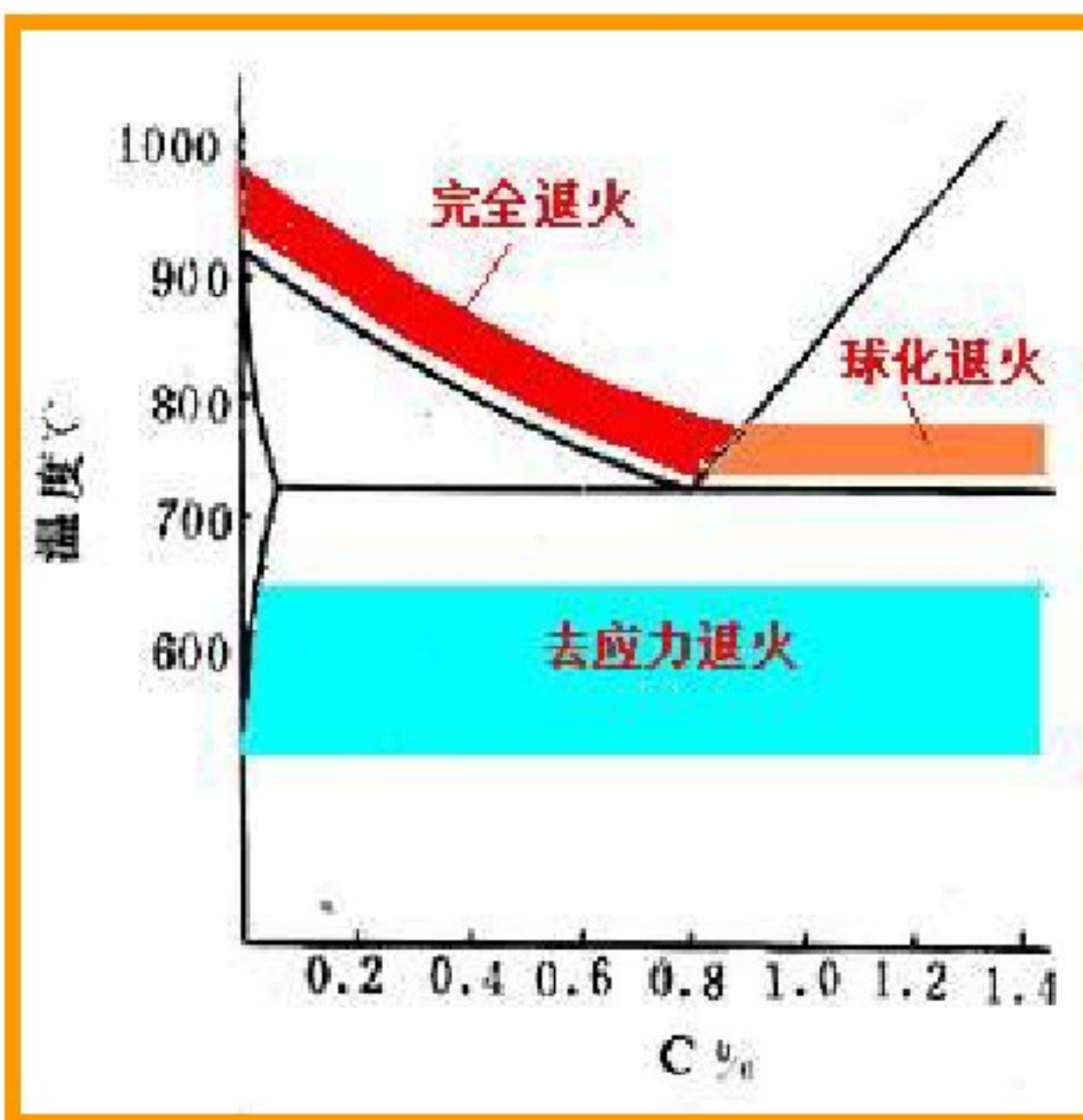


### ■ (3) 球化退火

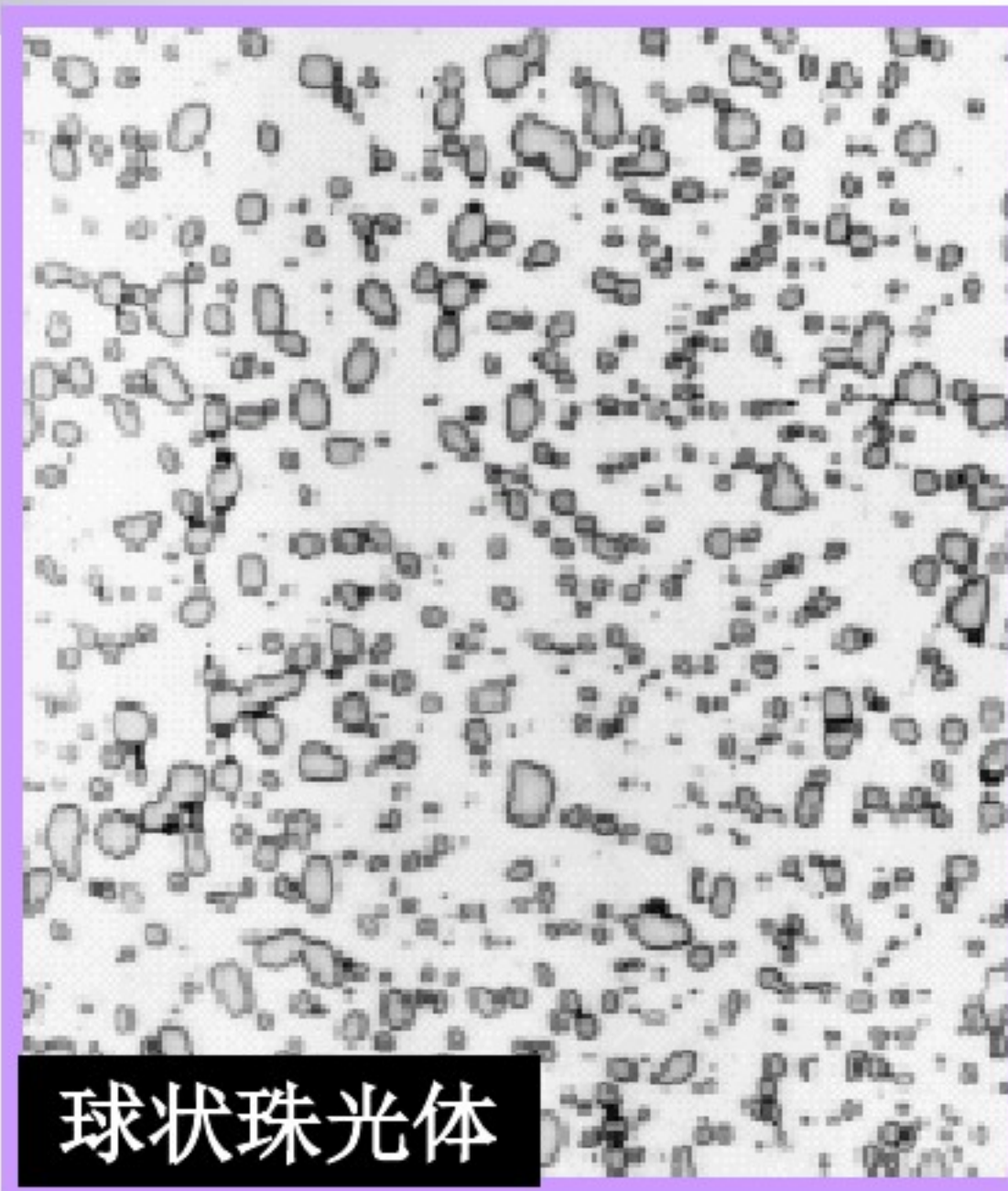
■ 球化退火是将钢中渗碳体球状化的退火工艺。

● 将工件加热到 $A_{c1} + 30-50^{\circ}\text{C}$

保温后缓冷，或者加热后快冷到略低于 $A_{r1}$ 的温度下保温，使珠光体中的渗碳体球化后出炉空冷。主要用于共析、过共析钢。



- 球化退火的组织为铁素体基体上分布着颗粒状渗碳体的组织，称球状珠光体，用 $P_{\text{球}}$ 表示。
- 对于有网状二次渗碳体的过共析钢，球化退火前应先进行正火，以消除网状。

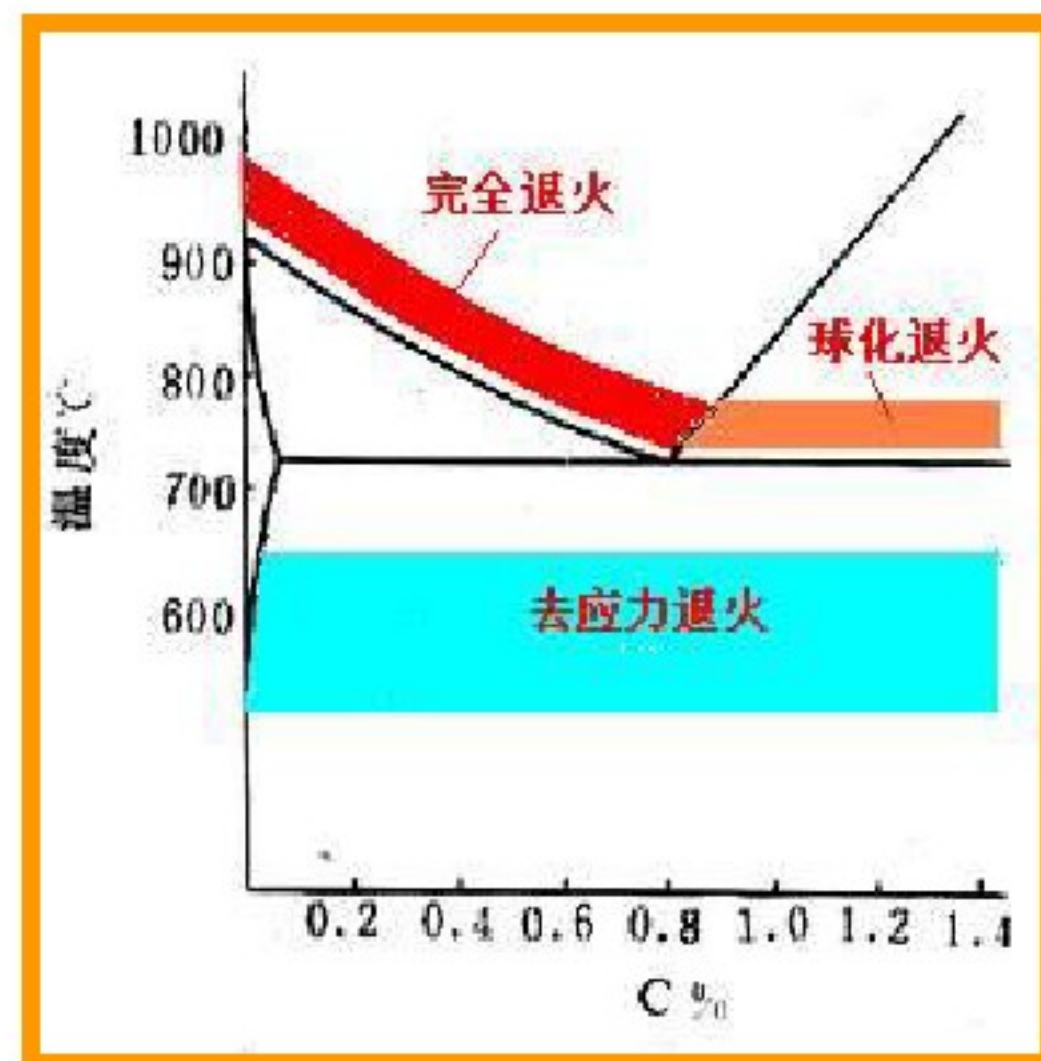


球状珠光体



## ■ (4) 去应力退火

- 将工件缓慢加热（100~150 °C/小时）到500~600 °C，经过一段保温后，随炉缓慢冷却到300~200 °C以下，再出炉空冷。
- 主要用来消除热加工、冷加工等工件中的残余内应力。
- 一般情况下，去应力退火应安排在精加工之前，或在淬火之前。



## ■ 二、正火

■ 正火是将亚共析钢加热到 $Ac_3+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，共析钢加热到 $Ac_1+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，过共析钢

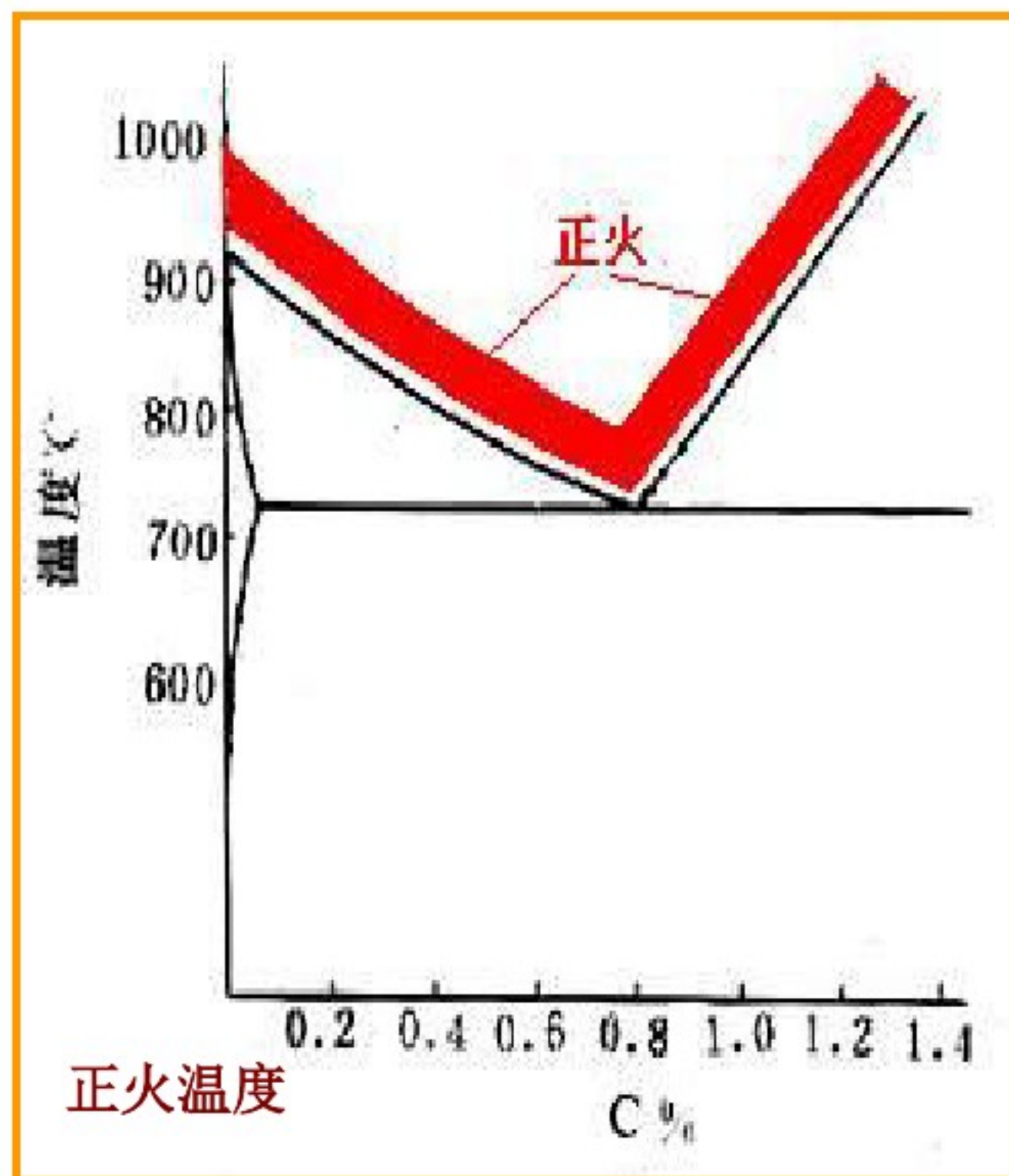
加热到 $Ac_{cm}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 保温后空冷的工艺。

■ 正火比退火冷却速度大。

■ 1、正火后的组织：

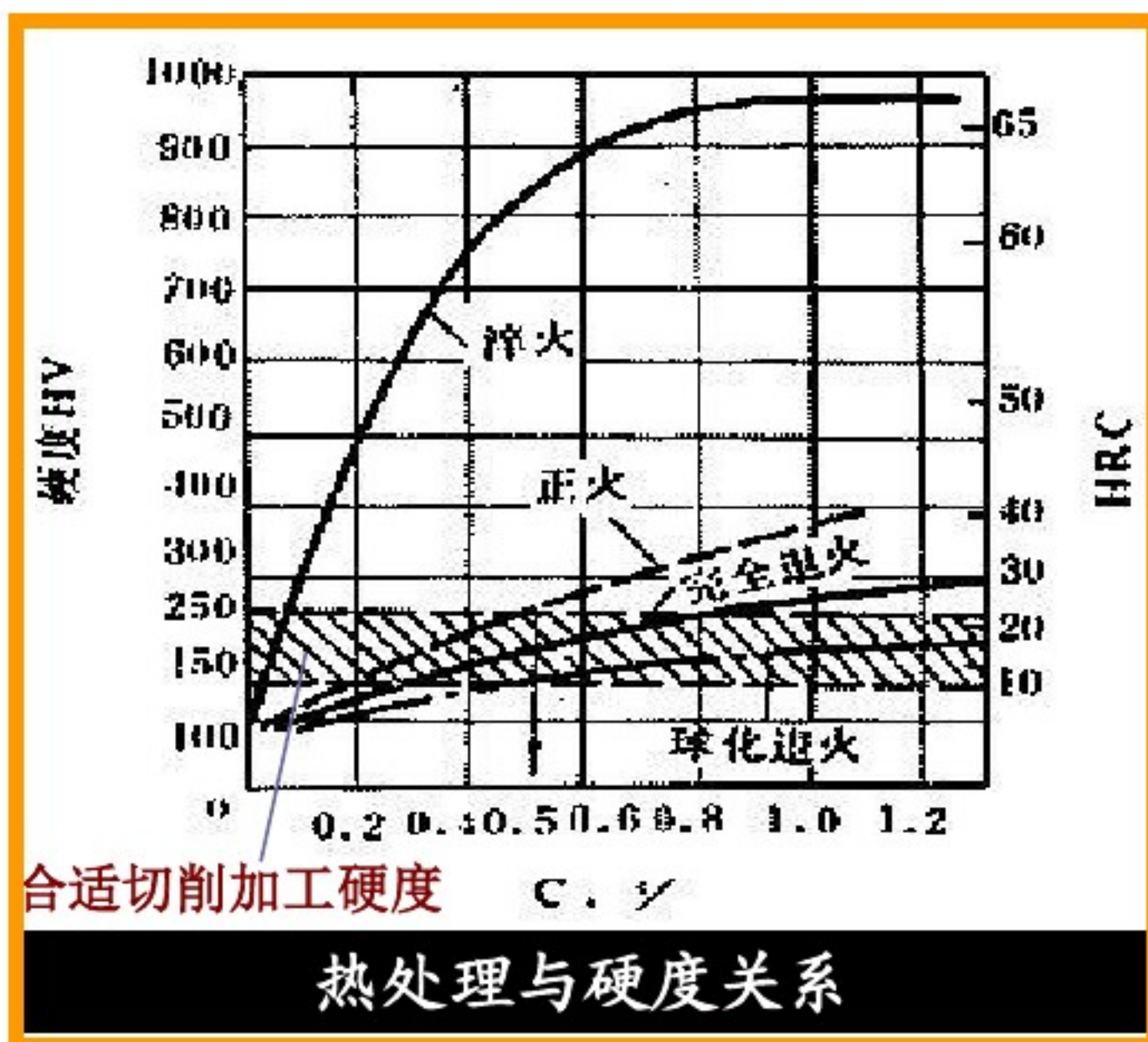
●  $<0.6\%\text{C}$ 时，组织为F+S；

●  $\geq 0.6\%\text{C}$ 时，组织为S。





- 2、正火的目的
- (1) 对于低、中碳钢( $\leq 0.6\text{C}\%$ ), 目的与退火的相同。
- (2) 对于过共析钢, 用于消除网状二次渗碳体, 为球化退火作组织准备。
- (3) 普通件最终热处理。
- 要改善切削性能, 低碳钢用正火, 中碳钢用退火或正火, 高碳钢用球化退火。





### 三、淬火

- 淬火是将钢加热到临界点以上，保温后以大于 $V_k$ 速度冷却，使奥氏体转变为马氏体的热处理工艺。
- 淬火是应用最广的热处理工艺之一。
- 淬火目的是为获得马氏体组织，提高钢的性能。



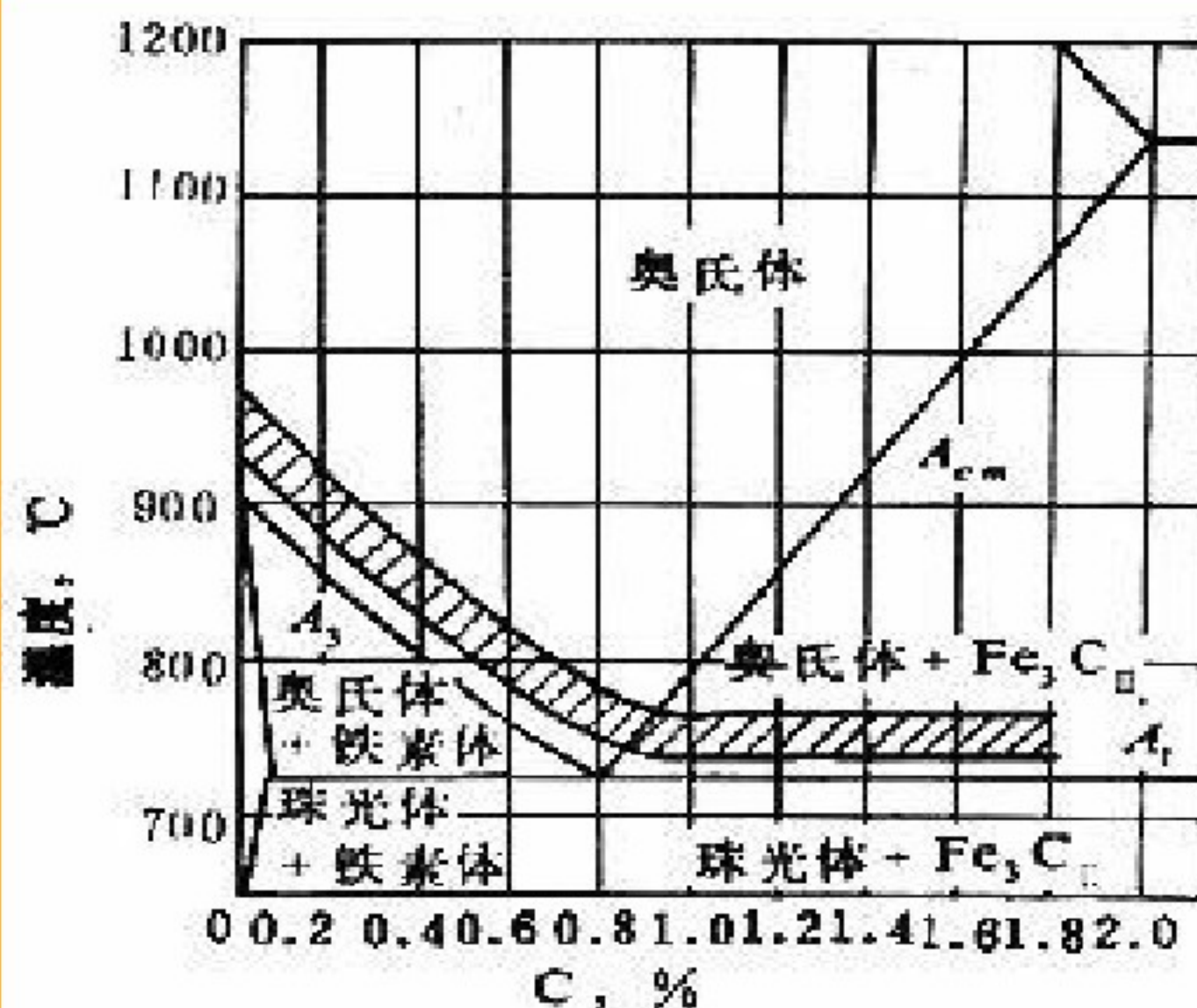
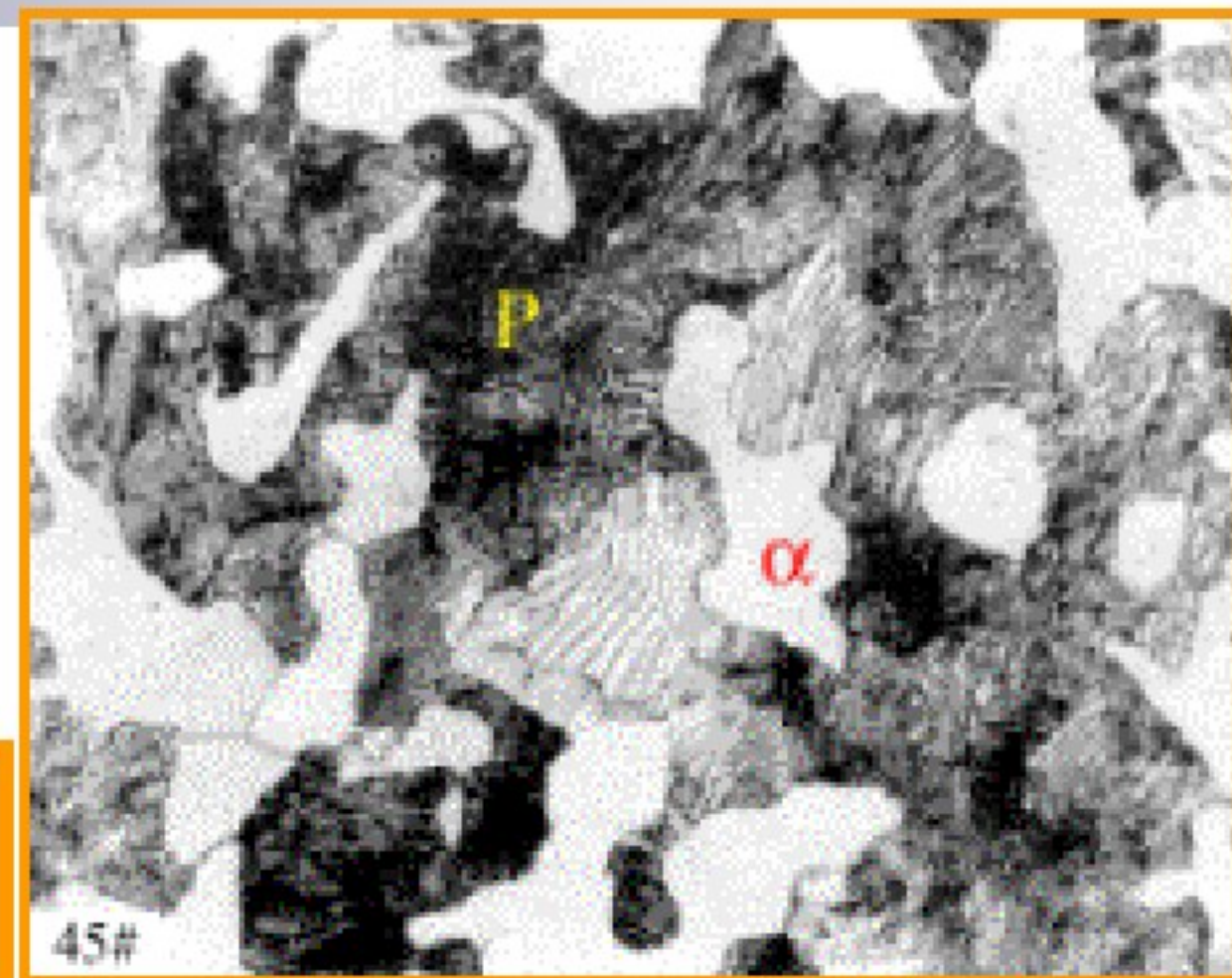
真空淬火炉



# 1、淬火温度

## ■ (1) 碳钢

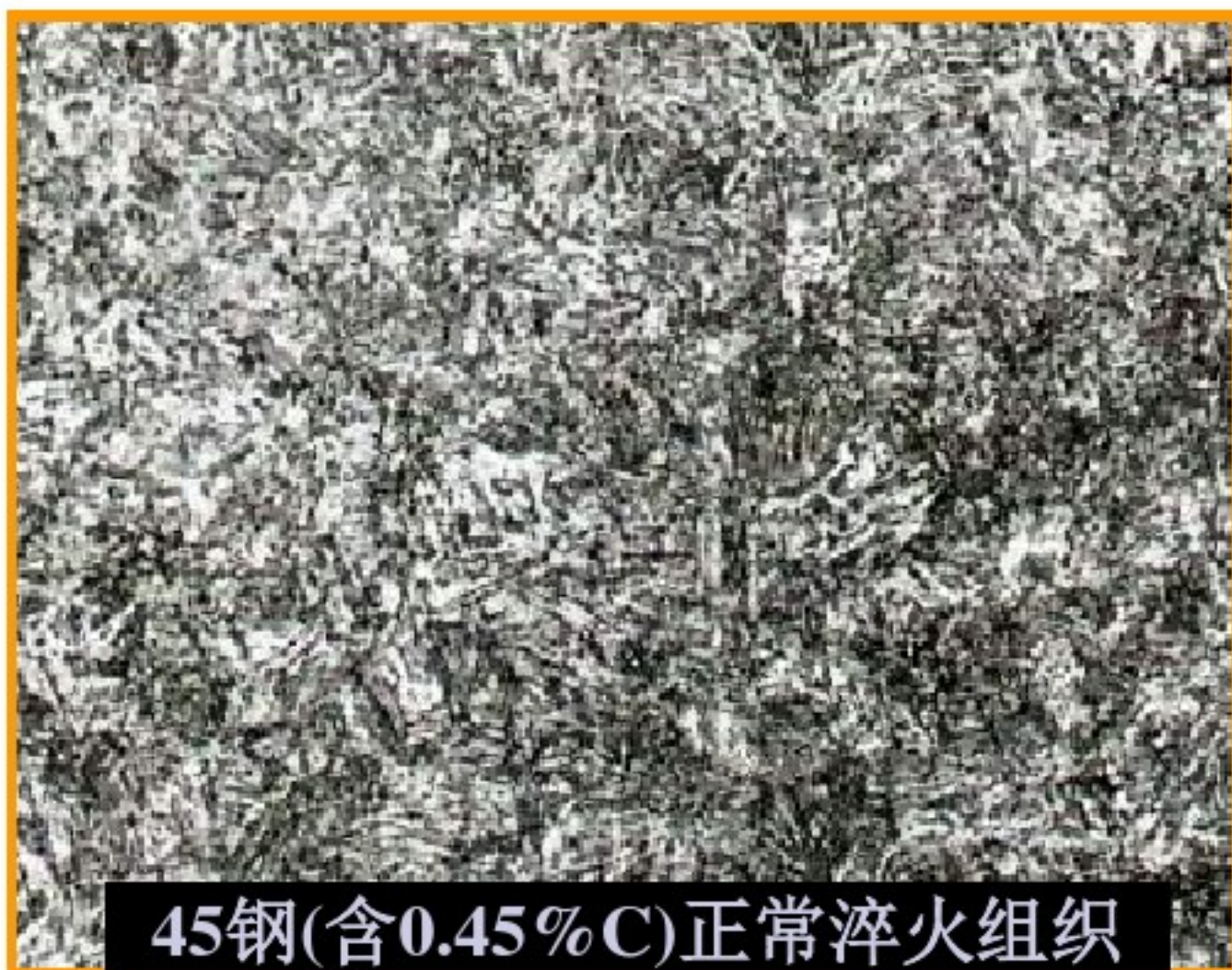
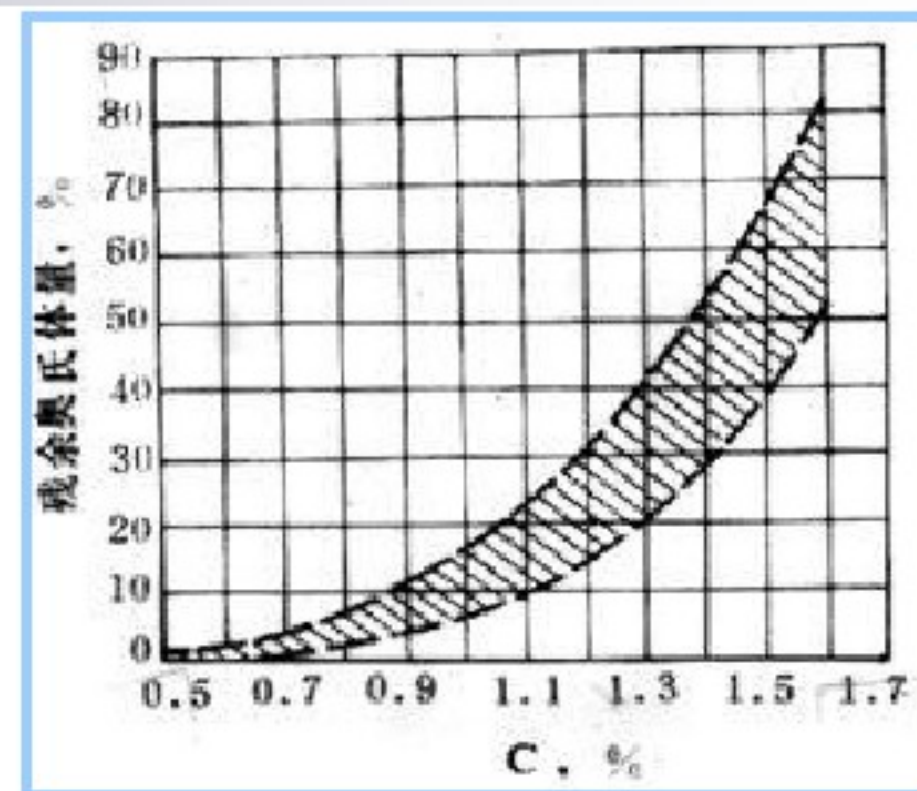
## ■ 亚共析钢



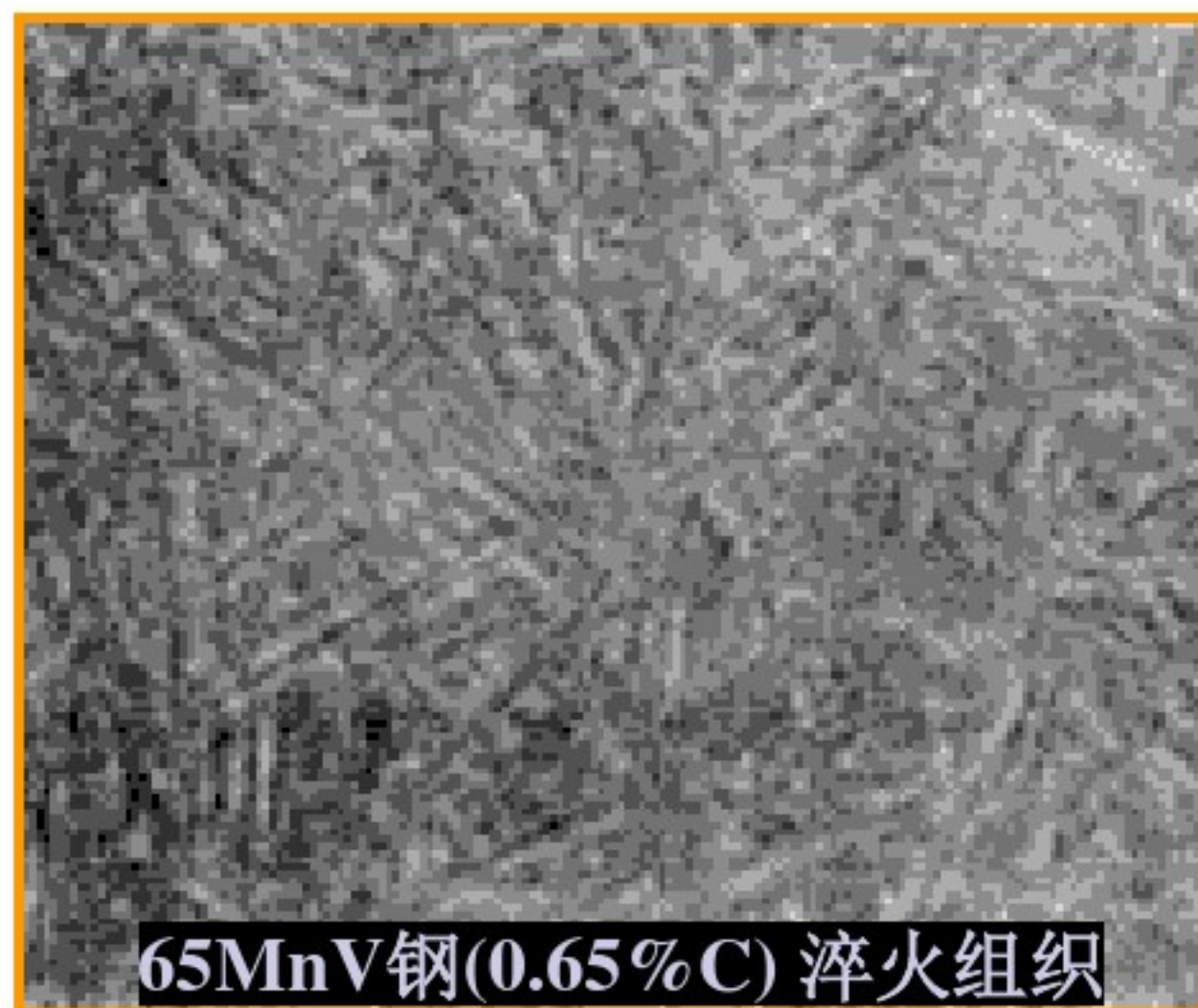
- 淬火温度为  $A_{c3} + 30 - 50^{\circ}C$ 。
- 预备热处理组织为退火或正火组织。



- 亚共析钢淬火组织：
- $\leq 0.5\%C$  时为M
- $> 0.5\%C$  时为M+A'。



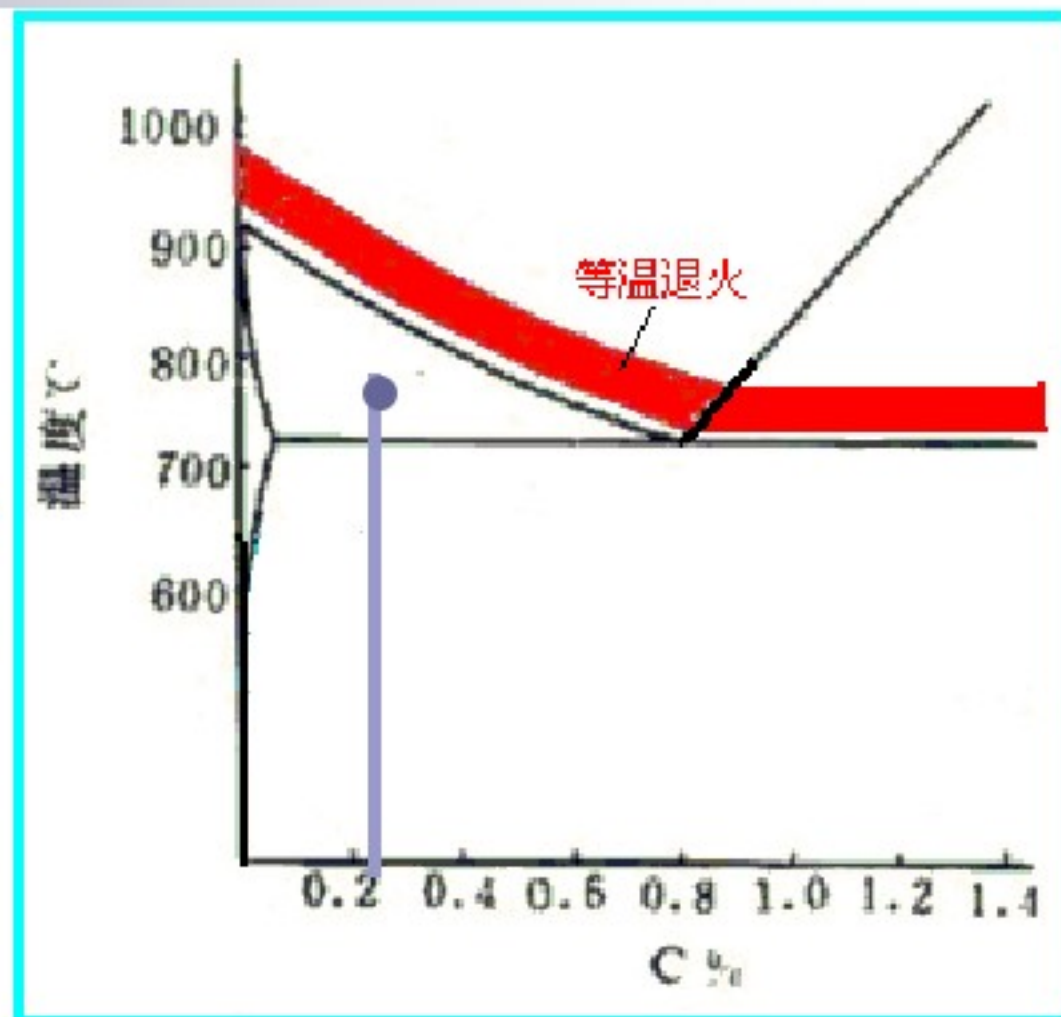
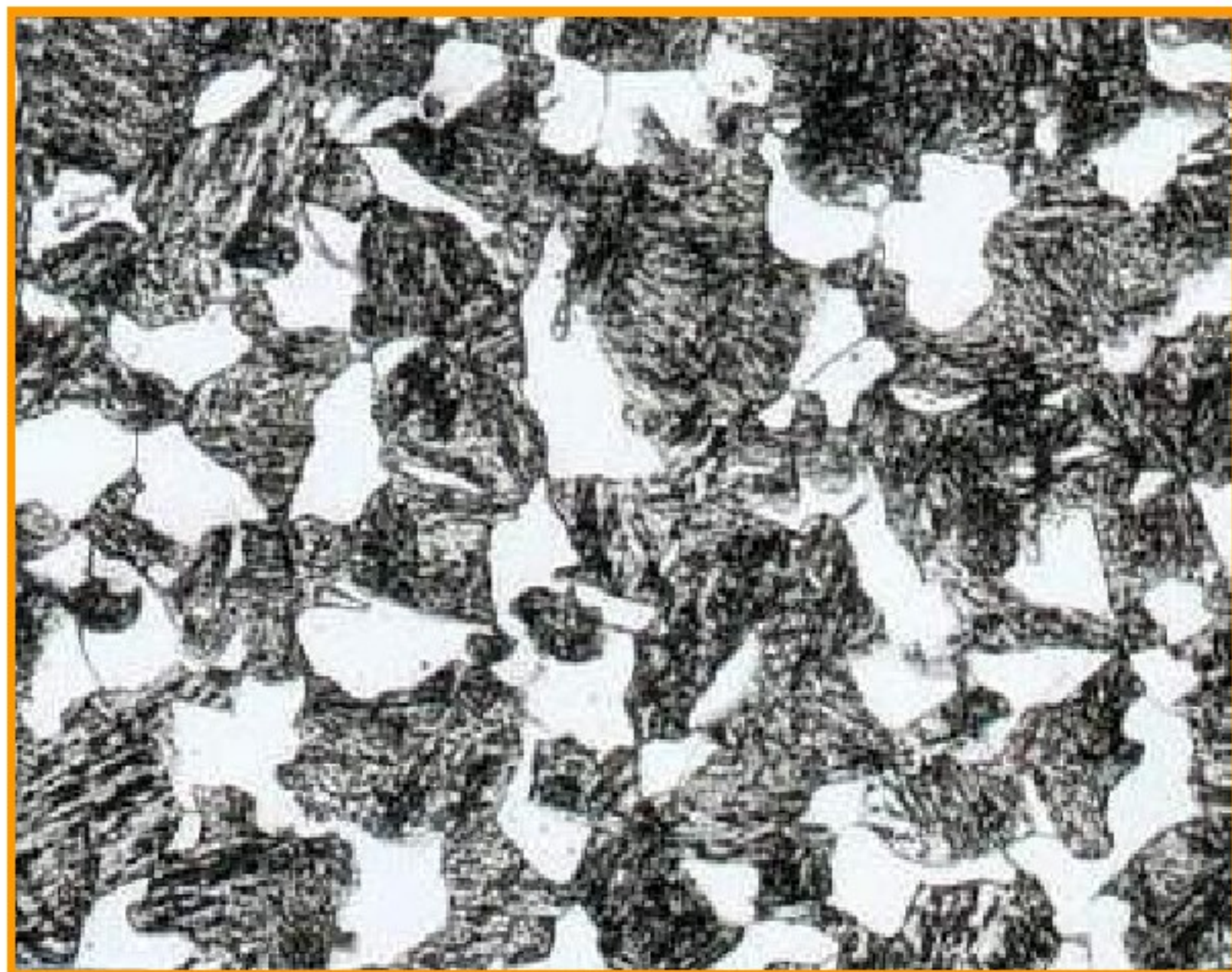
45钢(含0.45%C)正常淬火组织



65MnV钢(0.65%C) 淬火组织



- 在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间的加热淬火为亚温淬火。

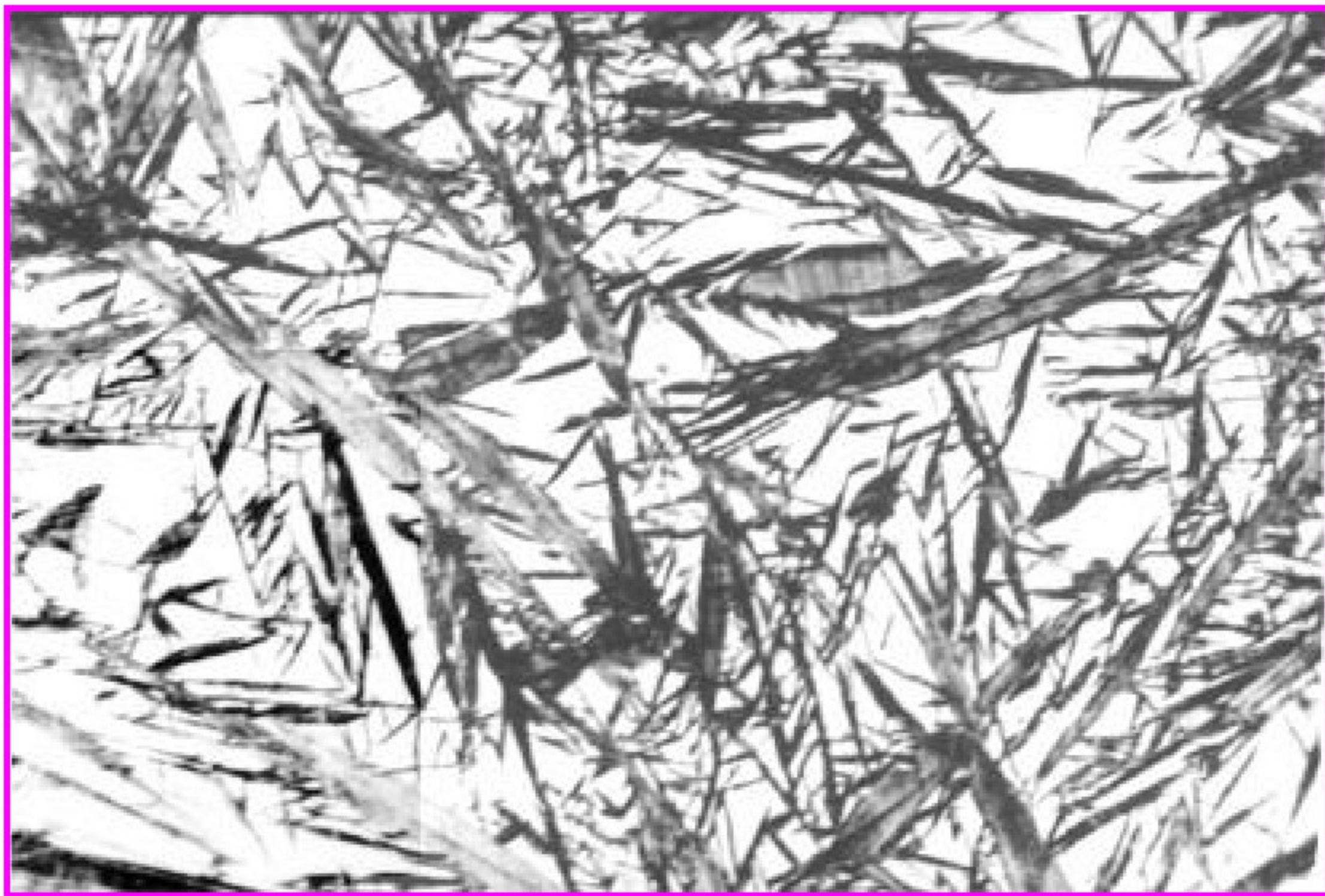


- 亚温淬火组织为F+M，强硬度低，但塑韧性好。

35钢（含0.35% C）亚温淬火组织



- 共析钢
- 淬火温度为  $A_{c_1}+30-50^{\circ}\text{C}$ ；淬火组织为  $M+A'$ 。





- **过共析钢**
- **淬火温度:  $Ac_1+30-50^{\circ}C$ 。**
- **温度高于 $Ac_{cm}$ ，则奥氏体晶粒粗大、含碳量高,淬火后马氏体晶粒粗大、 $A'$ 量增多。使钢硬度、耐磨性下降，脆性、变形开裂倾向增加。**
- **淬火组织:  $M+Fe_3C_{\text{颗粒}}+A'$ 。**  
(预备组织为 $P_{\text{球}}$ )



T12钢（含1.2%C）正常淬火组织



- (2)合金钢
- 由于多数合金元素(Mn、P除外)对奥氏体晶粒长大有阻碍作用，因而合金钢淬火温度比碳钢高。
- (1) 亚共析钢淬火温度为 $Ac_3 + 50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 共析钢、过共析钢淬火温度为 $Ac_1 + 50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

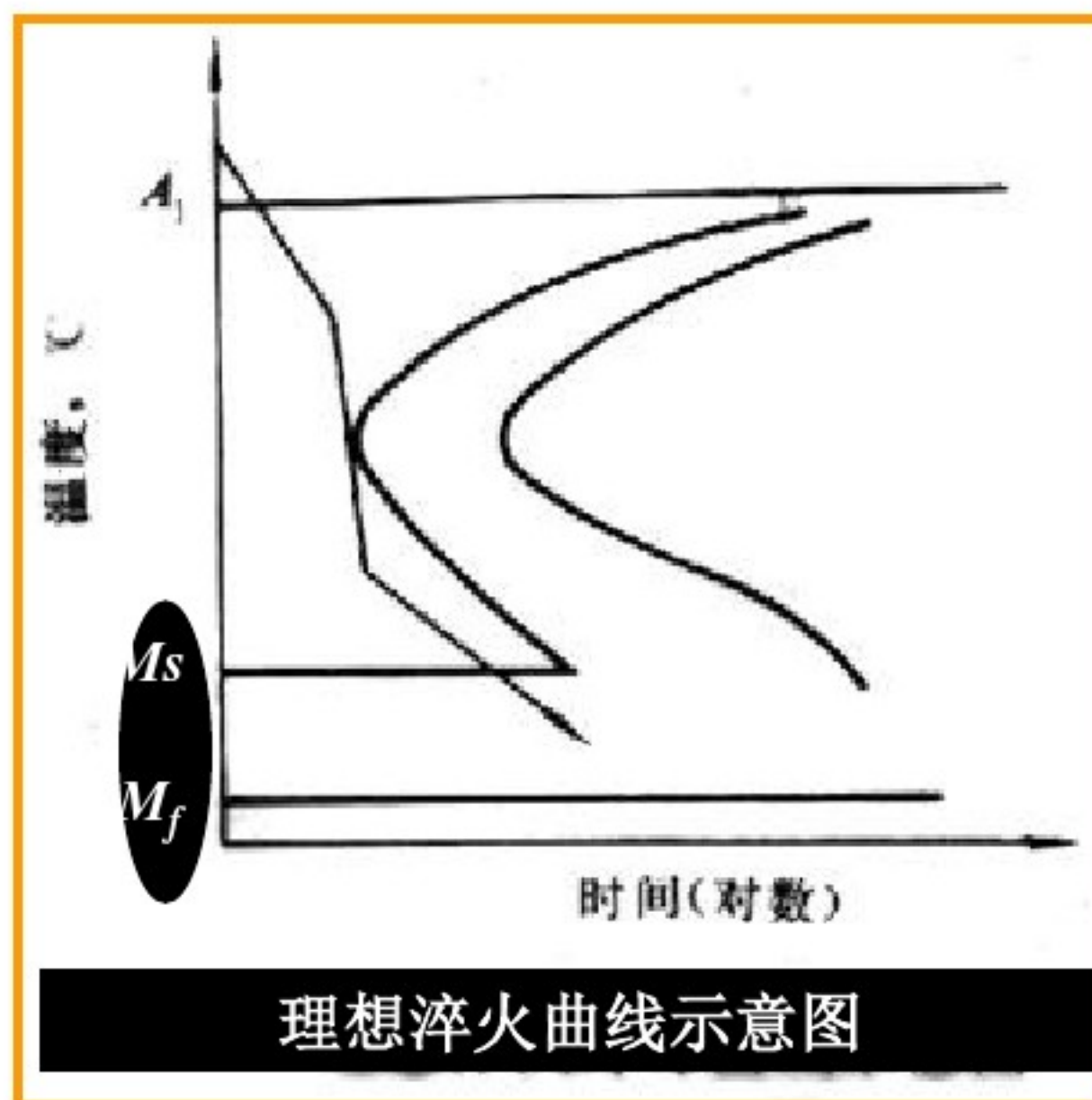


钢坯加热



## 2、淬火介质

- 理想的冷却曲线应只在C曲线鼻尖处快冷，而在Ms附近尽量缓冷，以达到既获得马氏体组织，又减小内应力的目的。但目前还没有找到理想的淬火介质。
- 常用淬火介质是水和油。
- 水的冷却能力强，但低温冷却能力太大，只使用于形状简单的碳钢件。





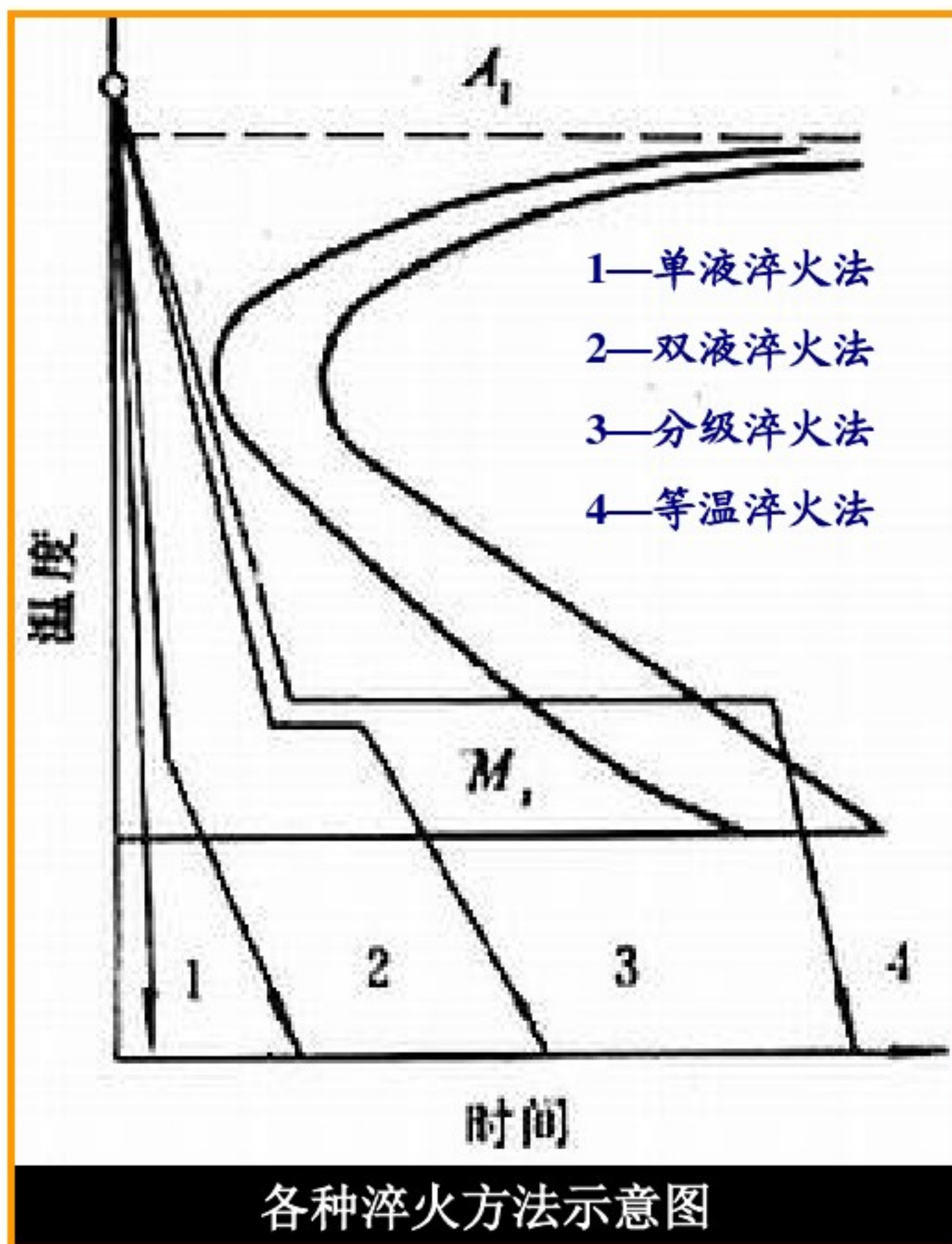
- 油在低温区冷却能力较理想，但高温区冷却能力太小，使用于合金钢和小尺寸的碳钢件。
- 熔盐作为淬火介质称盐浴，冷却能力在水和油之间，用于形状复杂件的分级淬火和等温淬火。
- 聚乙烯醇、硝酸盐水溶液等也是工业常用的淬火介质。

常用淬火介质的冷却能力		
淬 火 冷 却 介 质	冷却能力, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$	
	650~550 $^{\circ}\text{C}$	300~200 $^{\circ}\text{C}$
水(18 $^{\circ}\text{C}$ )	600	270
10%NaCl 水溶液(18 $^{\circ}\text{C}$ )	1100	300
10%NaOH 水溶液(18 $^{\circ}\text{C}$ )	1200	300
10%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 水溶液(18 $^{\circ}\text{C}$ )	800	270
矿物机油	150	30
菜籽油	200	35



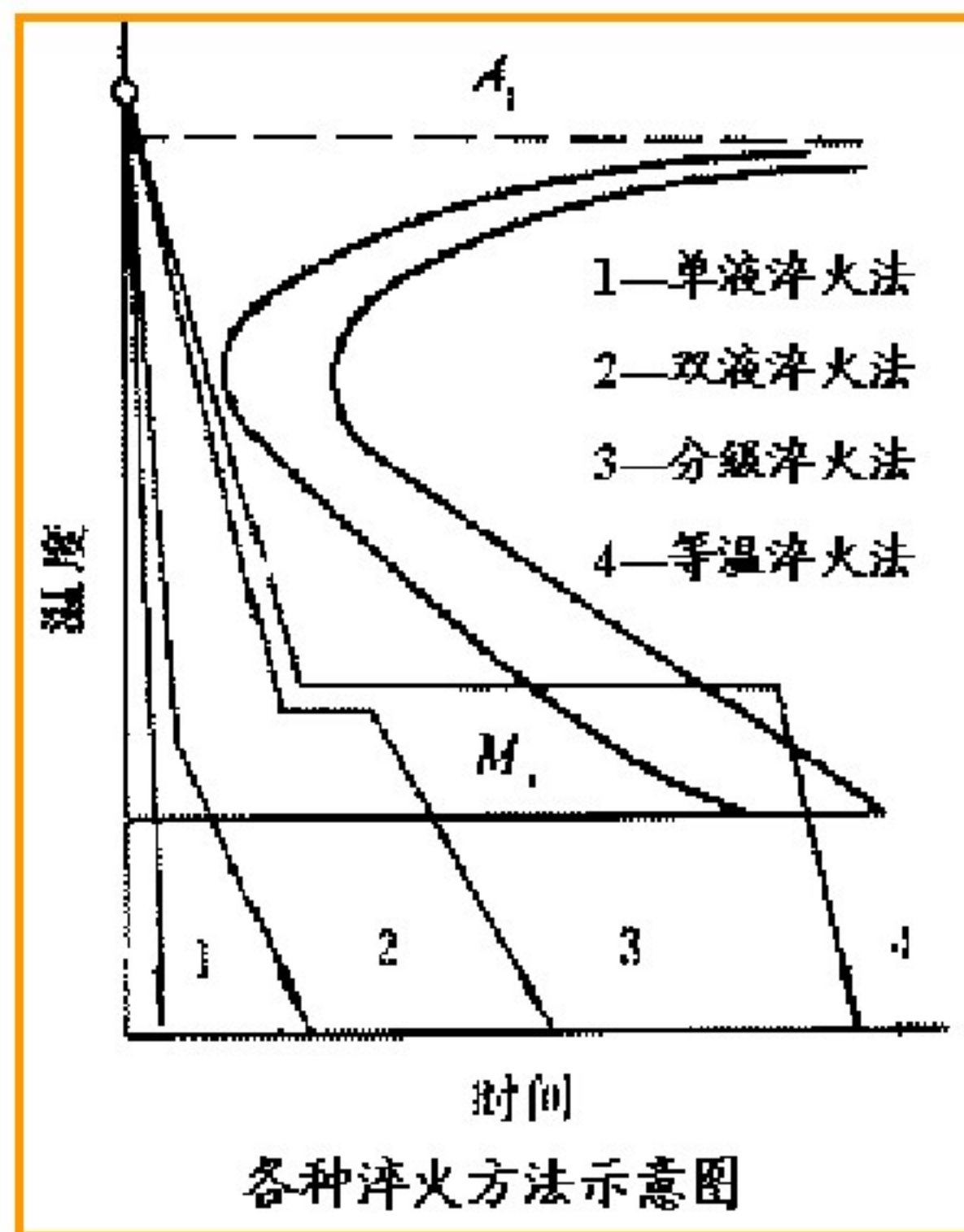
### 3、淬火方法

- 采用不同的淬火方法可弥补介质的不足。
- 1、单液淬火法
- 加热工件在一种介质中连续冷却到室温的淬火方法。
- 操作简单，易实现自动化。





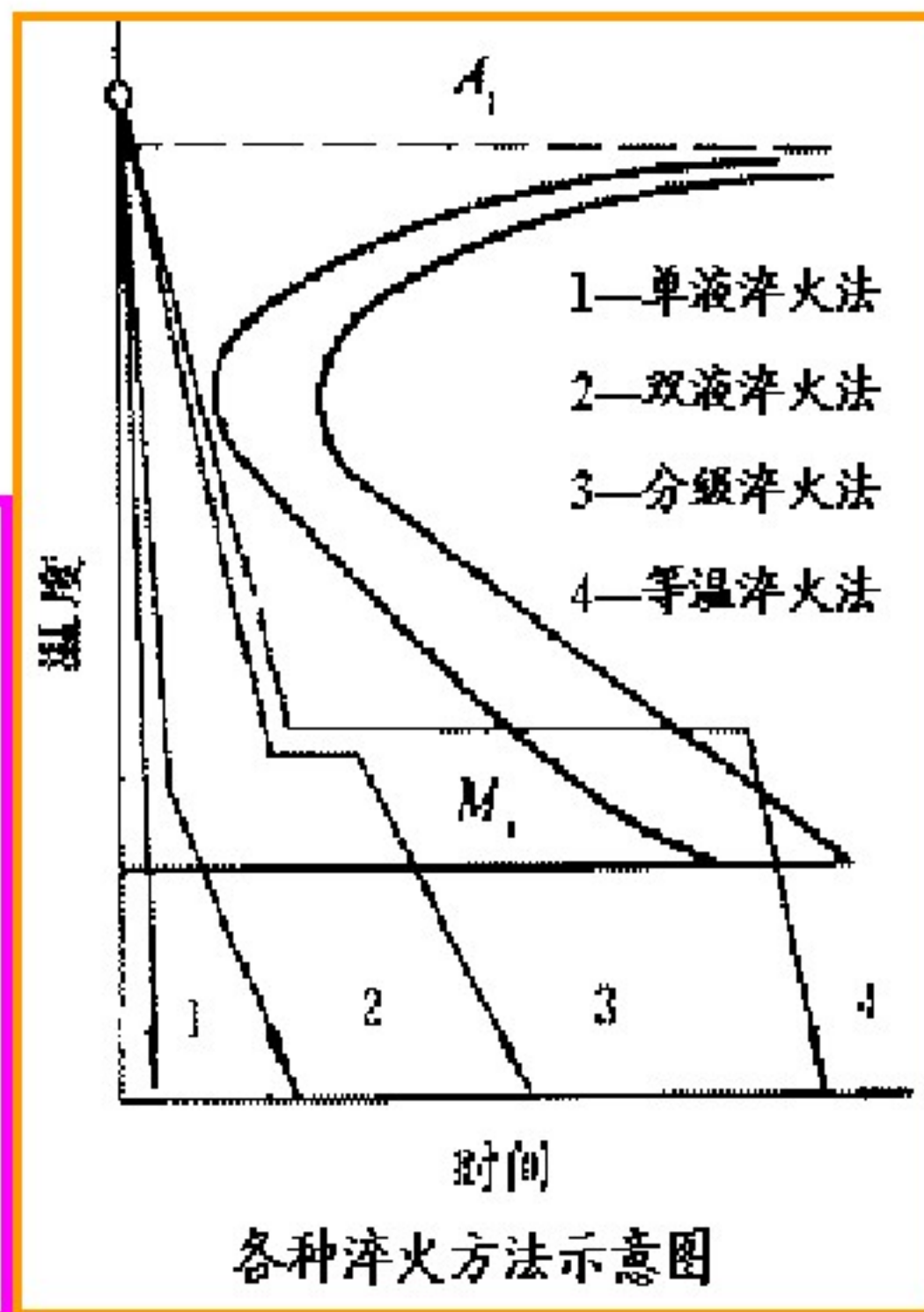
- 2、双液淬火法
- 工件先在一种冷却能力强的介质中冷，却躲过鼻尖后，再在另一种冷却能力较弱的介质中发生马氏体转变的方法。如水淬油冷，油淬空冷。
- 优点是冷却理想，缺点是不易掌握。用于形状复杂的碳钢件及大型合金钢件。





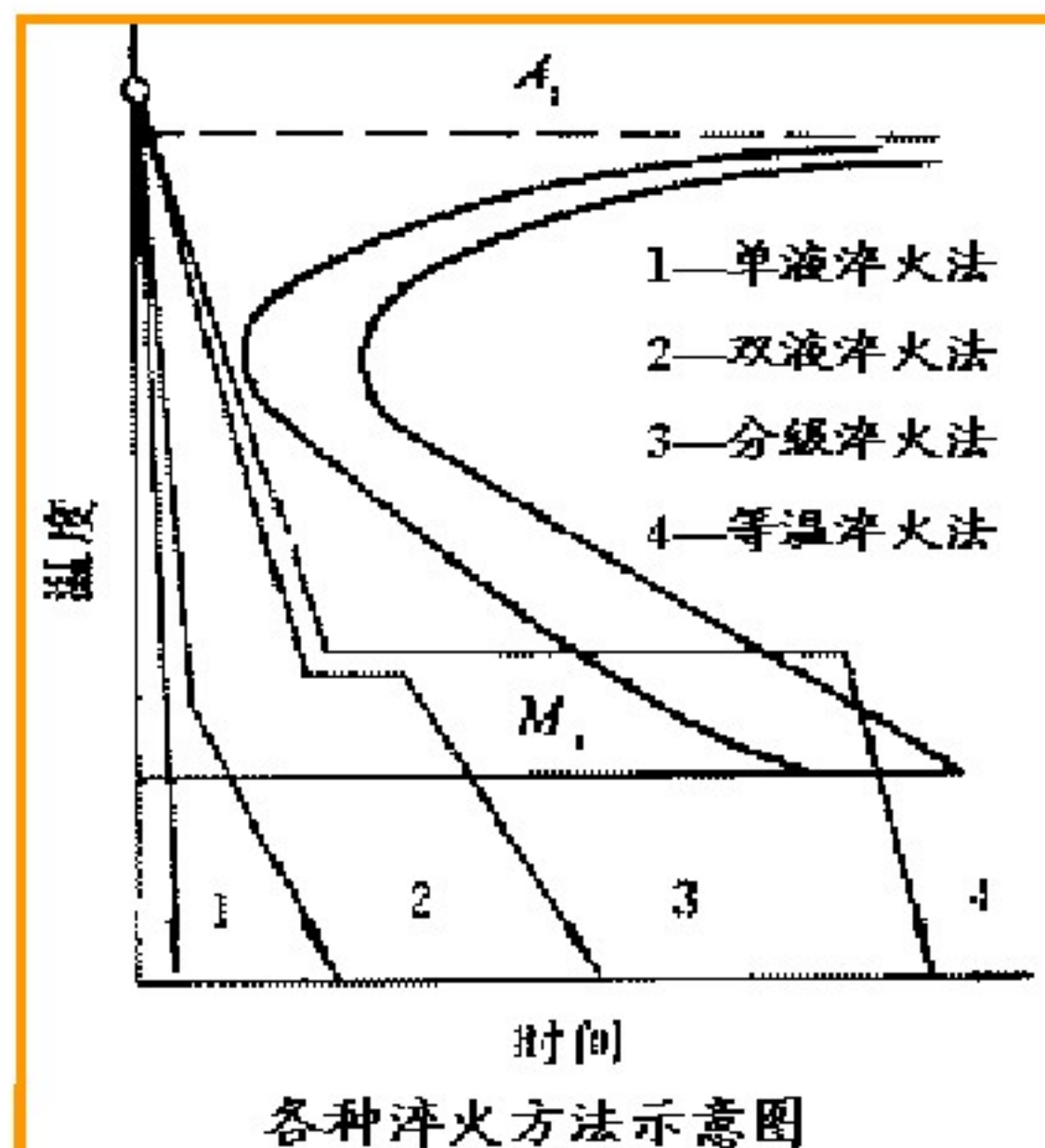
- 3、分级淬火法
- 在 $M_s$ 附近的盐浴或碱浴中淬火，待内外温度均匀后再取出缓冷。
- 可减少内应力，用于小尺寸工件。

盐浴炉





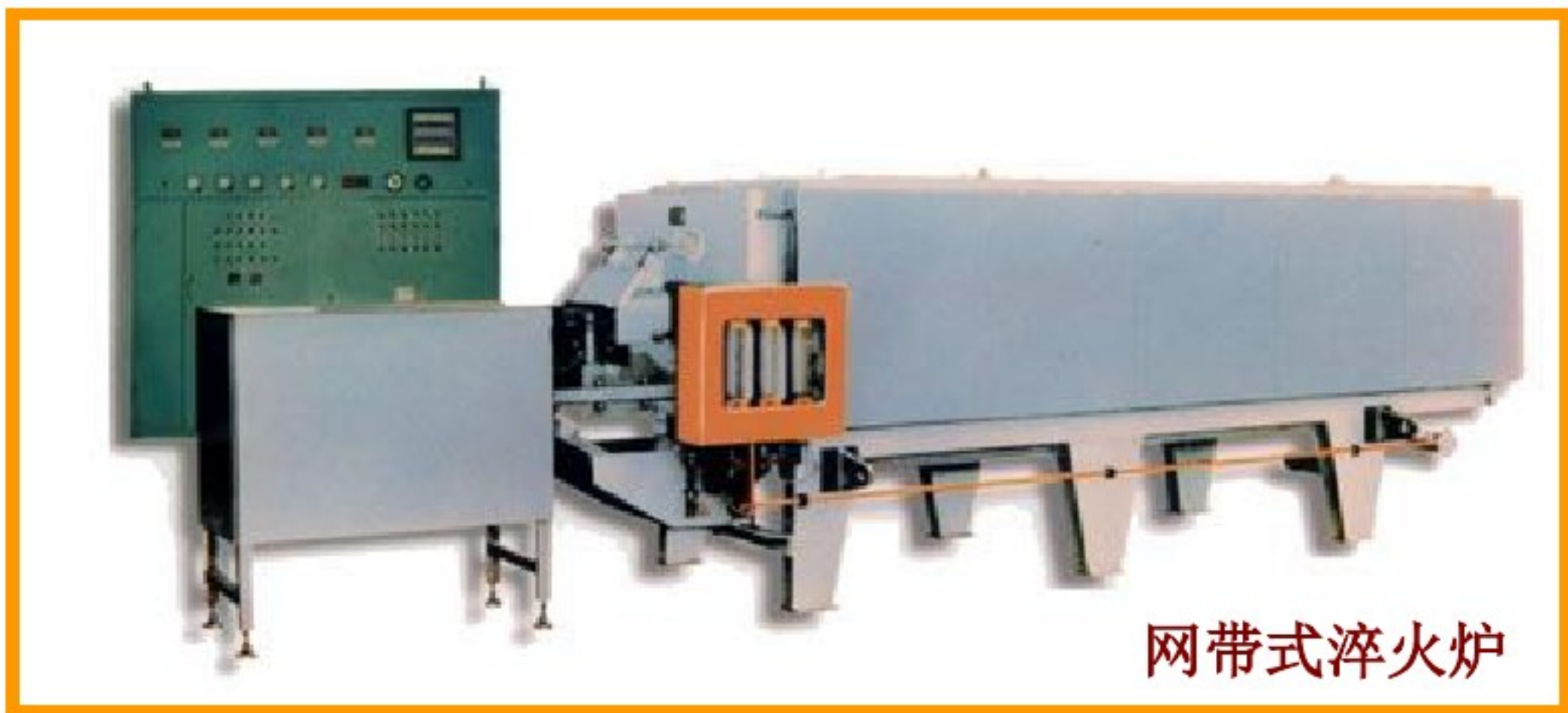
- 4、等温淬火法
- 将工件在稍高于  $M_s$  的盐浴或碱浴中保温足够长时间，从而获得下贝氏体组织的淬火方法。
- 经等温淬火零件具有良好的综合力学性能，淬火应力小。
- 适用于形状复杂及要求较高的小型件。





# 钢的淬透性

- 淬透性是钢的主要热处理性能。
- 是选材和制订热处理工艺的重要依据之一。

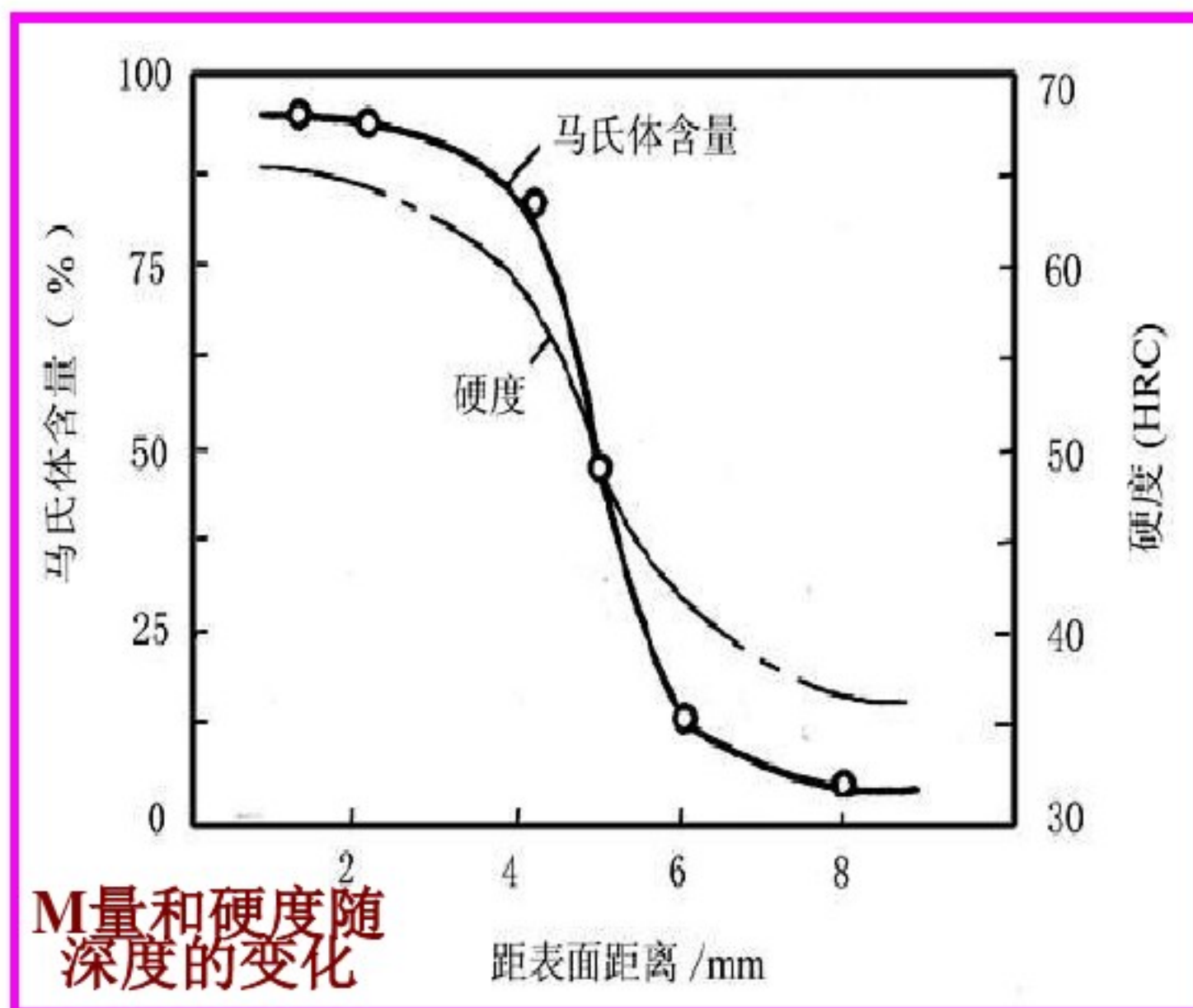


网带式淬火炉



## ①淬透性的概念

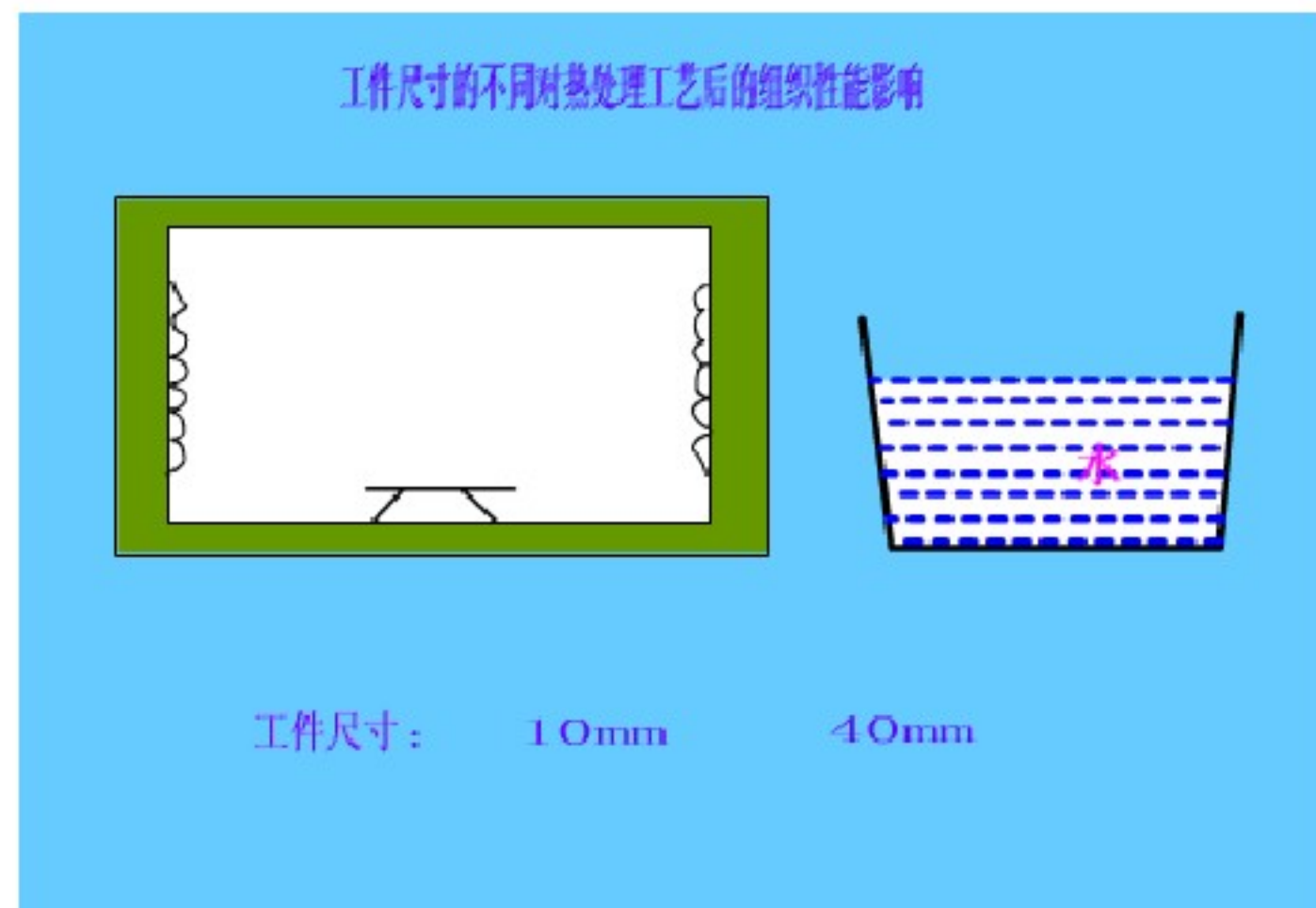
- **淬透性**是指钢在淬火时获得淬硬层深度的能力。其大小是用规定条件下淬硬层深度来表示。
- **淬硬层深度**是指由工件表面到半马氏体区(50%M + 50%P)的深度。
- **淬硬性**是指钢淬火后所能达到的最高硬度，即硬化能力。





## ②淬透性与淬硬层深度的关系

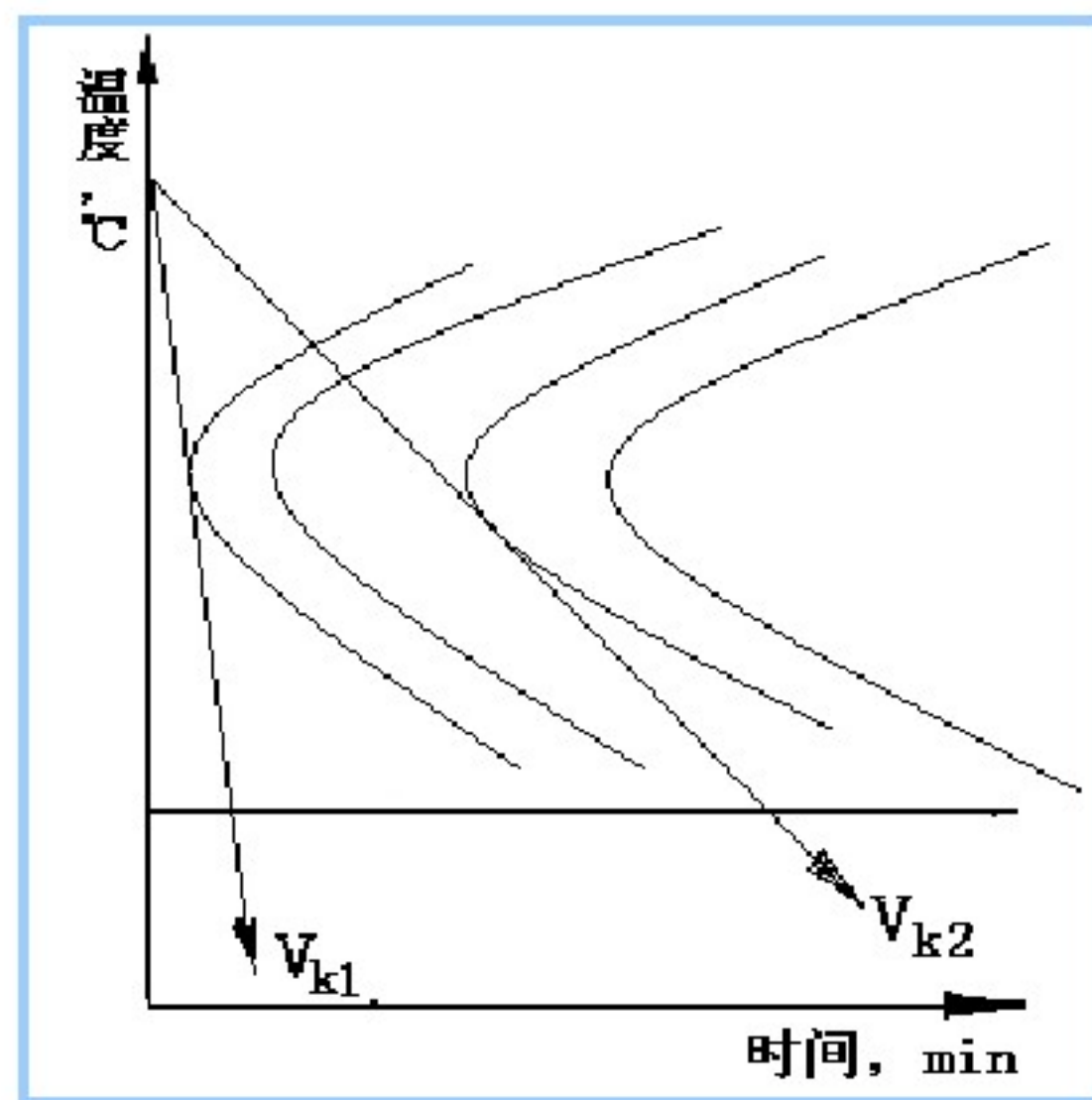
- 同一材料的淬硬层深度与工件尺寸、冷却介质有关。工件尺寸小、介质冷却能力强，淬硬层深。
- 淬透性与工件尺寸、冷却介质无关。它只用于不同材料之间的比较，是通过尺寸、冷却介质相同时的淬硬层深度来确定的。





### ③影响淬透性的因素

- 钢的淬透性取决于临界冷却速度 $V_k$ ， $V_k$ 越小，淬透性越高。
- $V_k$ 取决于C曲线的位置，C曲线越靠右， $V_k$ 越小。



- 因而凡是影响C曲线的因素都是影响淬透性的因素.即除 $C_o$ 外，凡溶入奥氏体的合金元素都使钢的淬透性提高；奥氏体化温度高、保温时间长也使钢的淬透性提高。

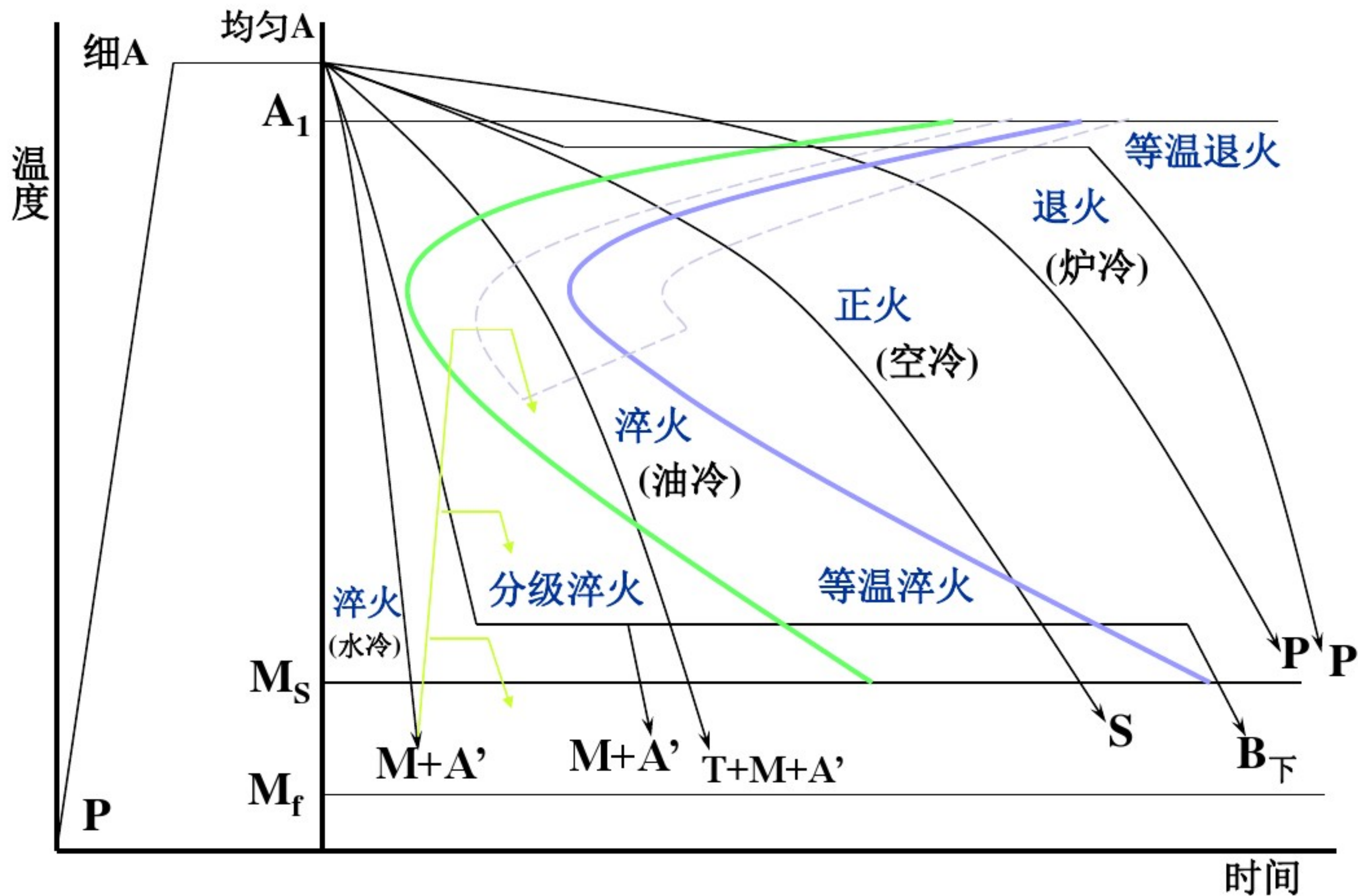


- 利用淬透性可控制淬硬层深度。
- 对于截面承载均匀的重要件,要全部淬透。如螺栓、连杆、模具等。
- 对于承受弯曲、扭转的零件可不必淬透(淬硬层深度一般为半径的 $1/2 \sim 1/3$ ),如轴类、齿轮等。
- 淬硬层深度与工件尺寸有关,设计时应注意尺寸效应。





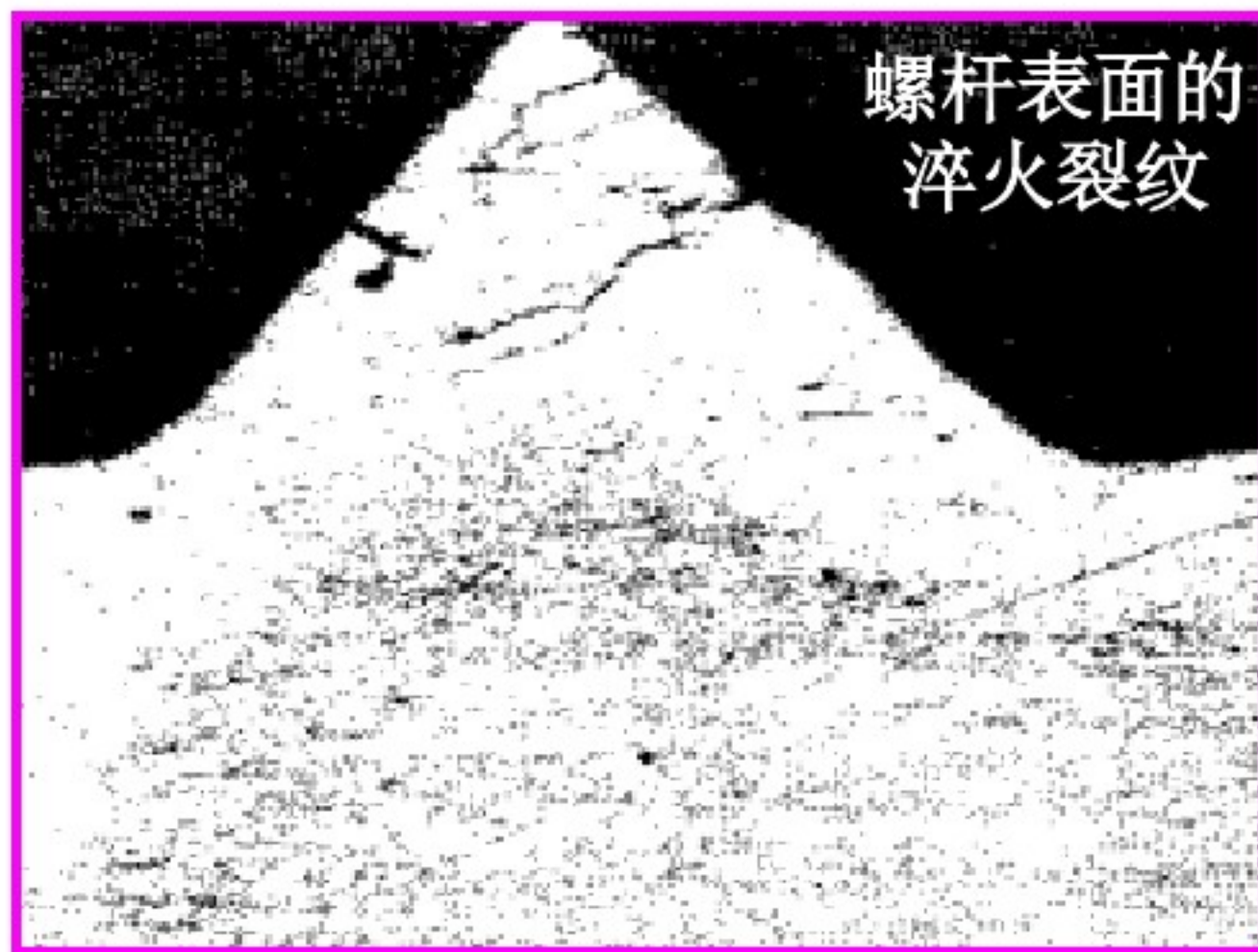
# ■ 不同冷却条件下的转变产物





## 四、钢的回火

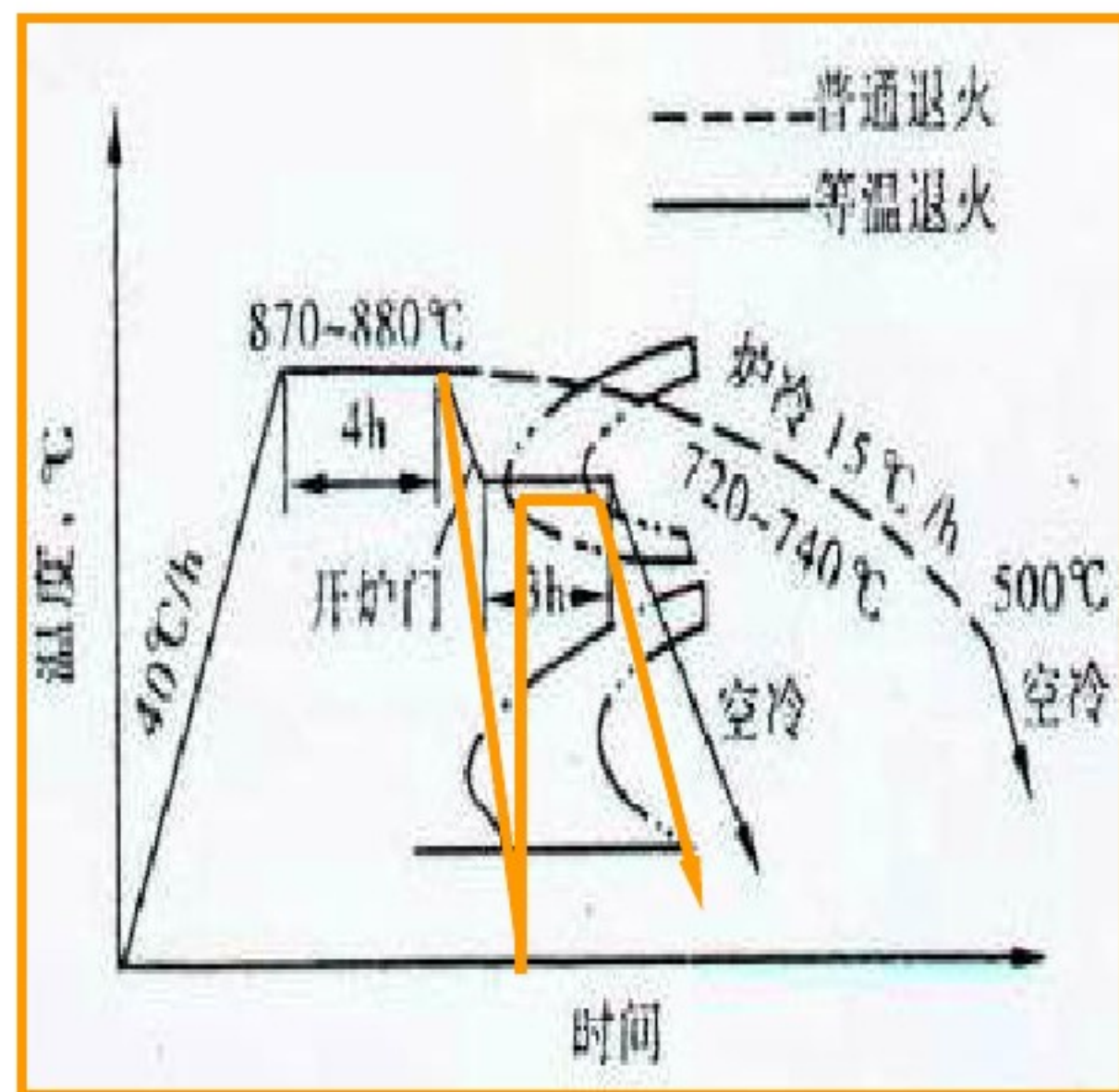
- 回火是指将淬火钢加热到  $A_1$  以下的某温度保温适当时间后，置于空气或水中冷却的工艺。
- 1、回火的目的
- (1)减少或消除淬火内应力，防止变形或开裂。
- (2)获得所需要的力学性能。淬火钢一般硬度高，脆性大，回火可调整硬度、韧性。



螺杆表面的  
淬火裂纹



- (3)稳定尺寸。淬火M和A'都是非平衡组织，有自发向平衡组织转变的倾向。回火可使M与A'转变为平衡或接近平衡的组织，防止使用时变形。
- (4)对于某些高淬透性的钢，空冷即可淬火，如采用回火软化既能降低硬度，又能缩短软化周期。
- 未经淬火的钢回火无意义，而淬火钢不回火在放置使用过程中易变形或开裂。钢经淬火后应立即进行回火。





## 2、钢在回火时的转变

- 淬火钢回火时的组织转变主要发生在加热阶段。随加热温度升高，淬火钢的组织发生四个阶段变化。

网带式回火电炉



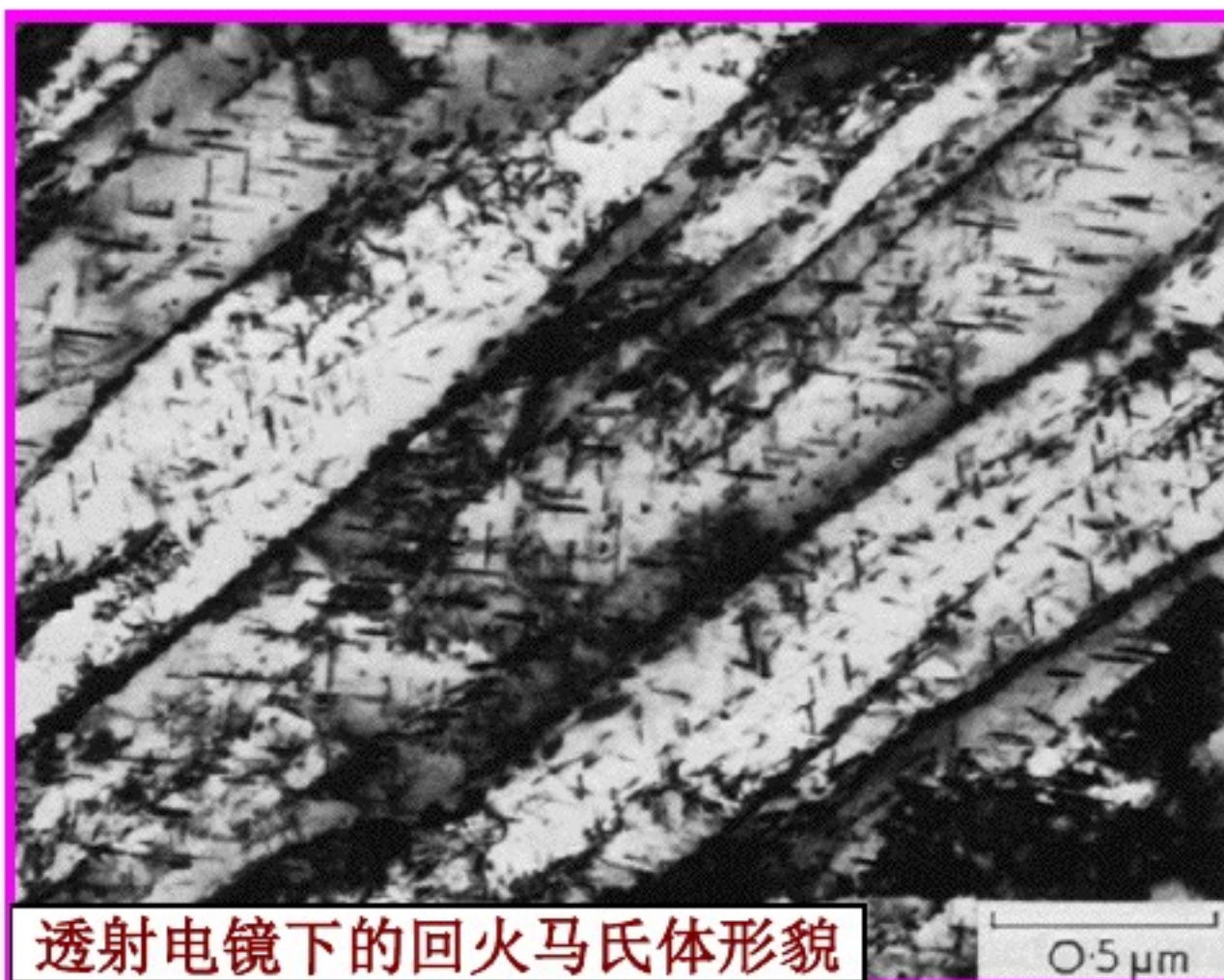


## ■ 回火时组织转变

### ■ ①马氏体的分解

■  $<100^{\circ}\text{C}$  回火时，钢的组织无变化。

■  $100\text{-}200^{\circ}\text{C}$  加热时，马氏体将发生分解，从马氏体中析出 $\varepsilon$ -碳化物( $\varepsilon\text{-FeXC}$ )，使马氏体过饱和度降低。析出的碳化物以细片状分布在马氏体基体上，这种组织称回火马氏体，用**M**回表示。



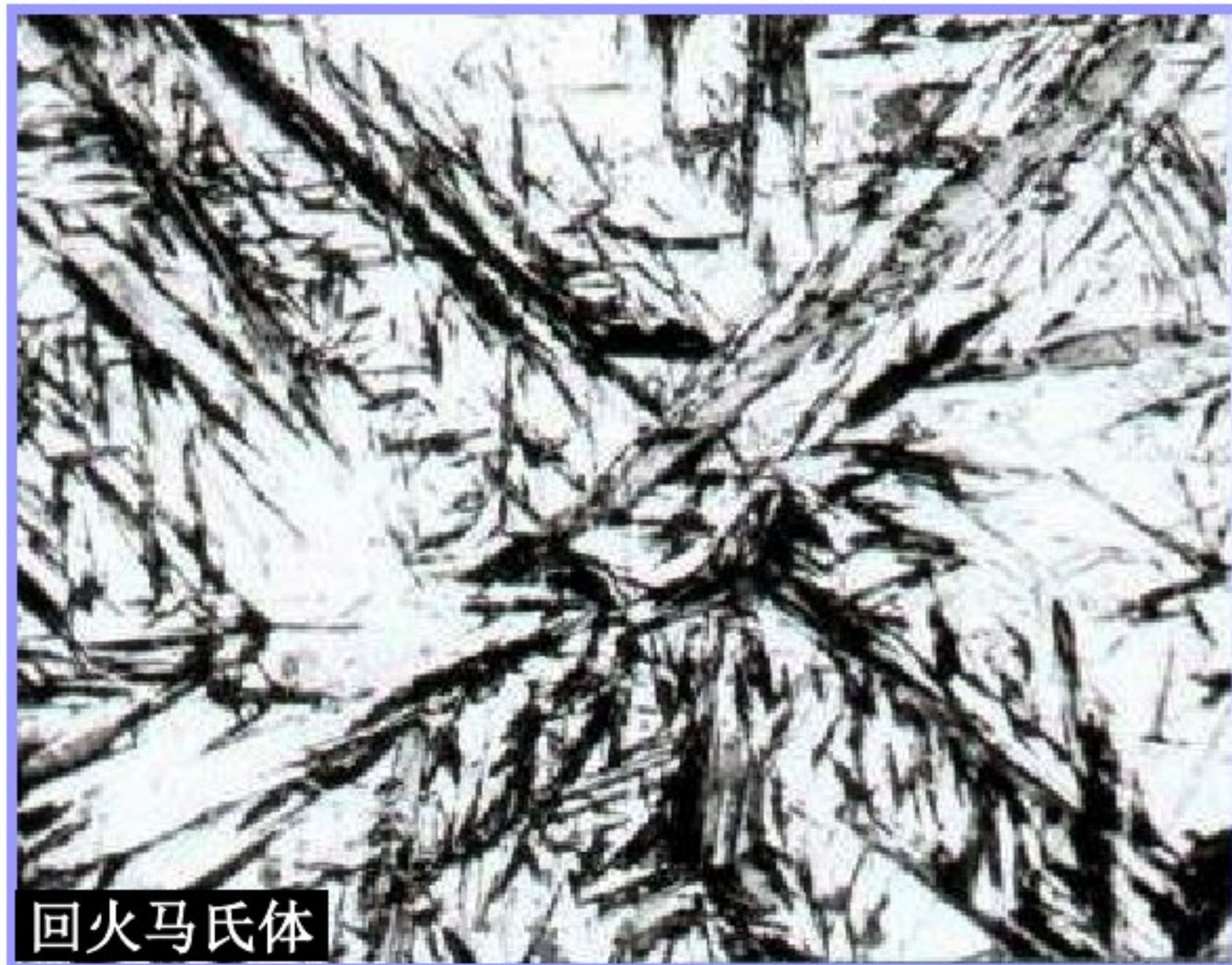
透射电镜下的回火马氏体形貌

0.5  $\mu\text{m}$



- 在光镜下 $M_{\text{回}}$ 为黑色， $A'$ 为白色。
- $< 0.2\%C$  时，不析出碳化物。只发生碳在位错附近的偏聚。

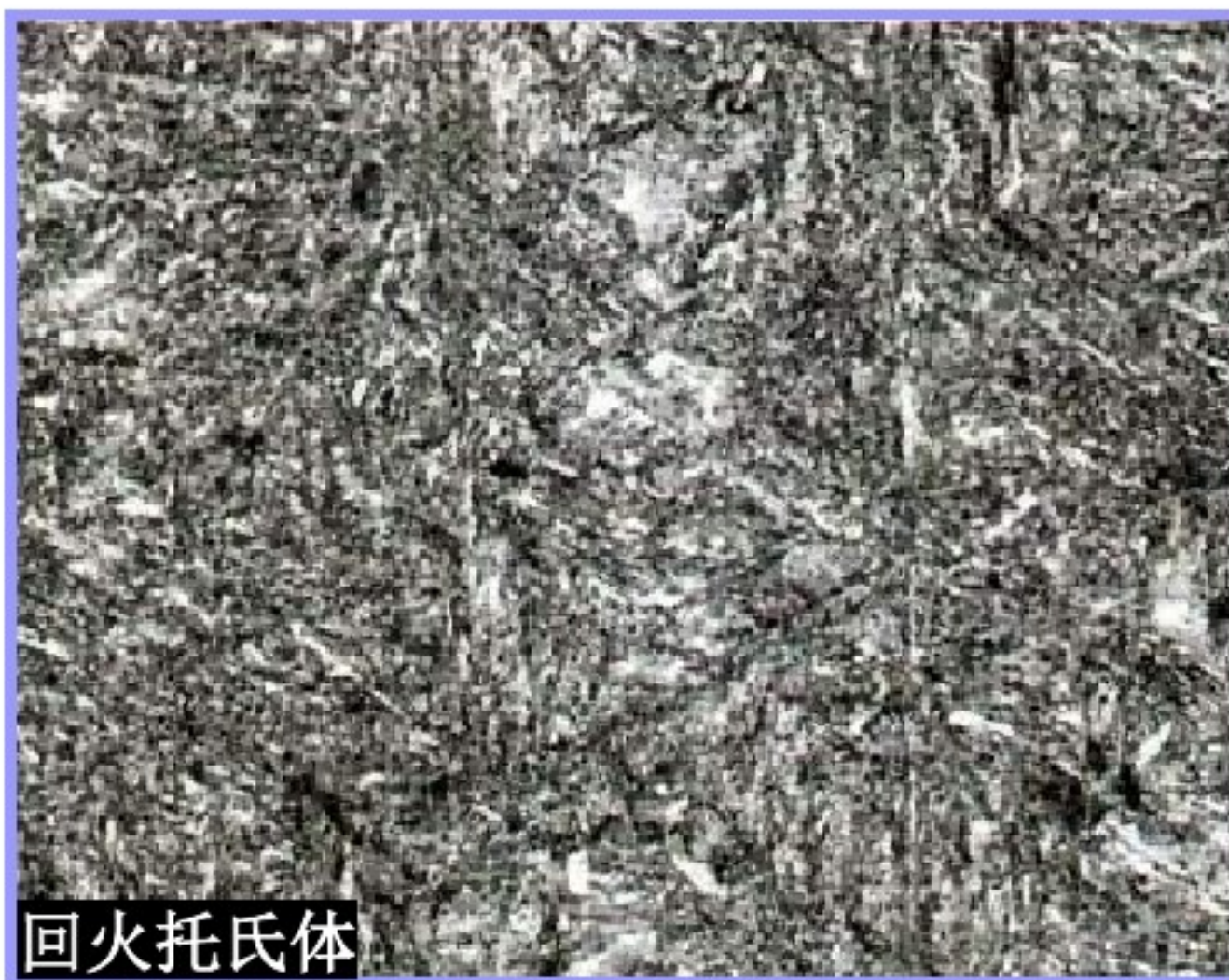
- ②残余奥氏体分解
  - $200-300^{\circ}\text{C}$  时，由于马氏体分解，奥氏体所受的压力下降， $M_s$  上升， $A'$  分解为 $\epsilon$ -碳化物和过饱和铁素体，即 $M_{\text{回}}$ 。



回火马氏体



- ③ $\epsilon$ -碳化物转变为 $\text{Fe}_3\text{C}$
- 发生于 $250-400^\circ\text{C}$ ，此时， $\epsilon$ -碳化物溶解于F中，并从铁素体中析出 $\text{Fe}_3\text{C}$ 。
- 到 $350^\circ\text{C}$ ，马氏体含碳量降到铁素体平衡成分，内应力大量消除，**M**回转变为在保持马氏体形态的铁素体基体上分布着细粒状 **$\text{Fe}_3\text{C}$** 组织，称回火托氏体，用**T回**表示。

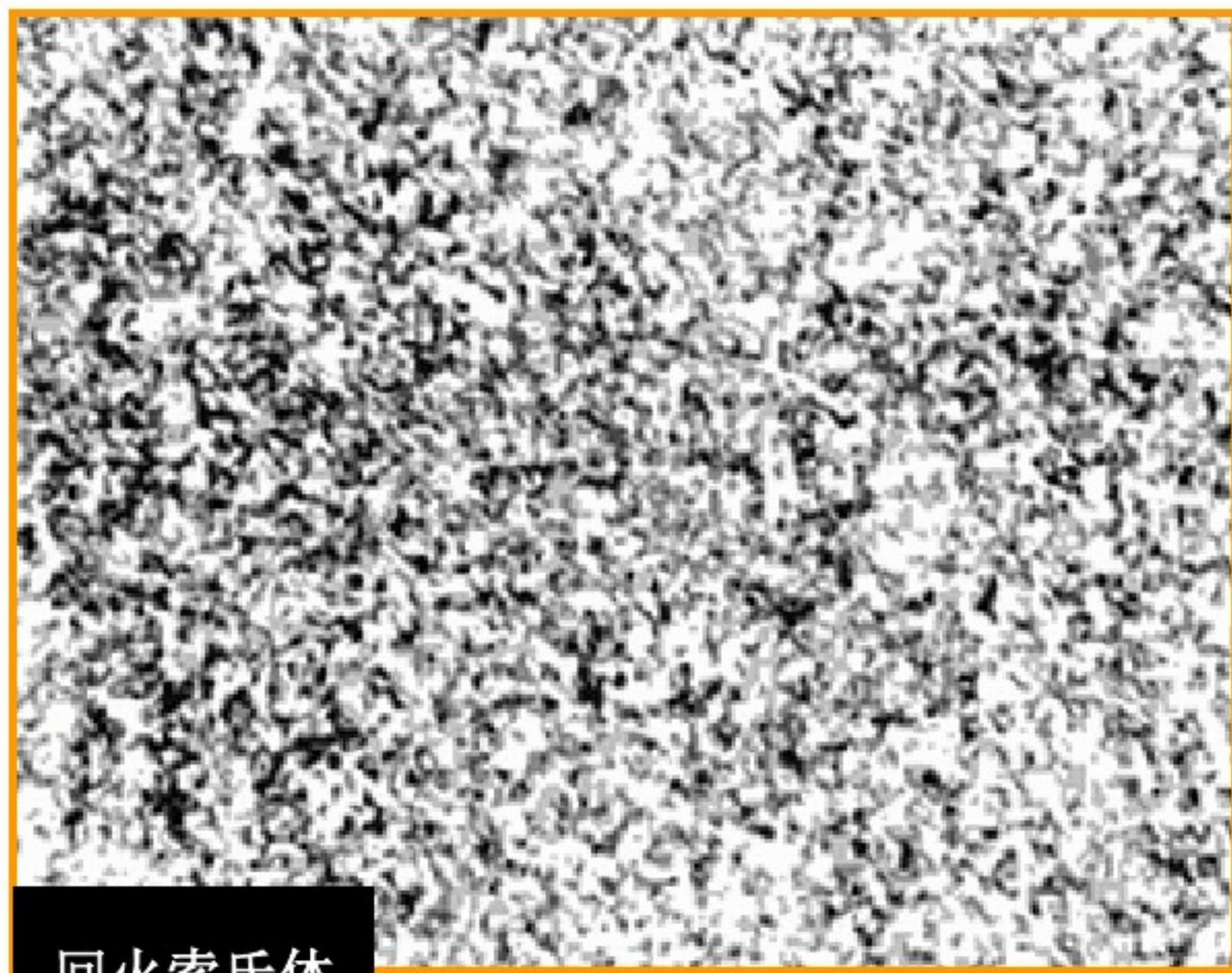


回火托氏体



#### ④ $\text{Fe}_3\text{C}$ 聚集长大和铁素体多边形化

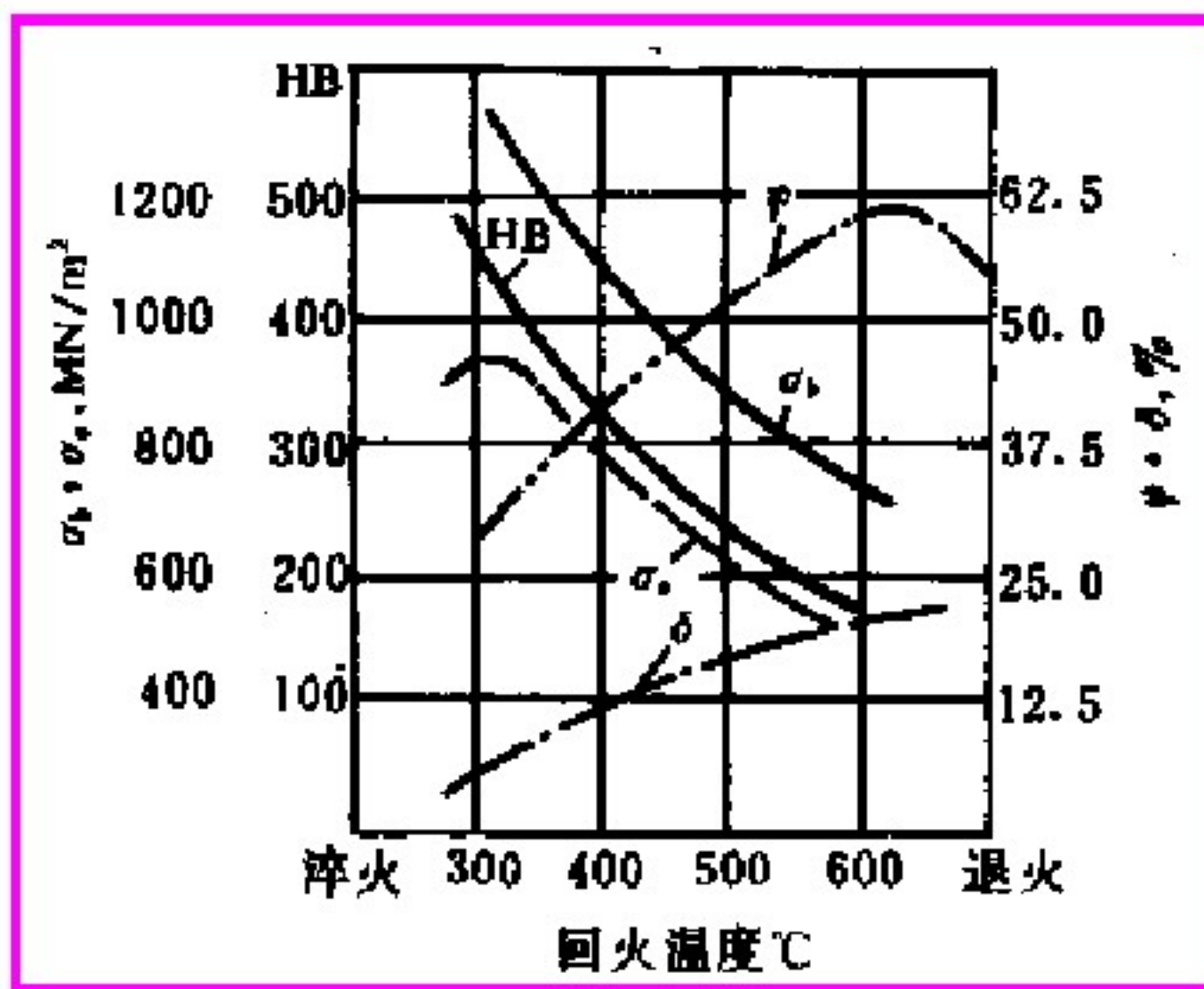
- 400℃以上, $\text{Fe}_3\text{C}$ 开始聚集长大。
- 450℃以上铁素体发生多边形化,由针片状变为多边形。
- 这种在多边形铁素体基体上分布着颗粒状 $\text{Fe}_3\text{C}$ 的组织称回火索氏体,用S回表示。



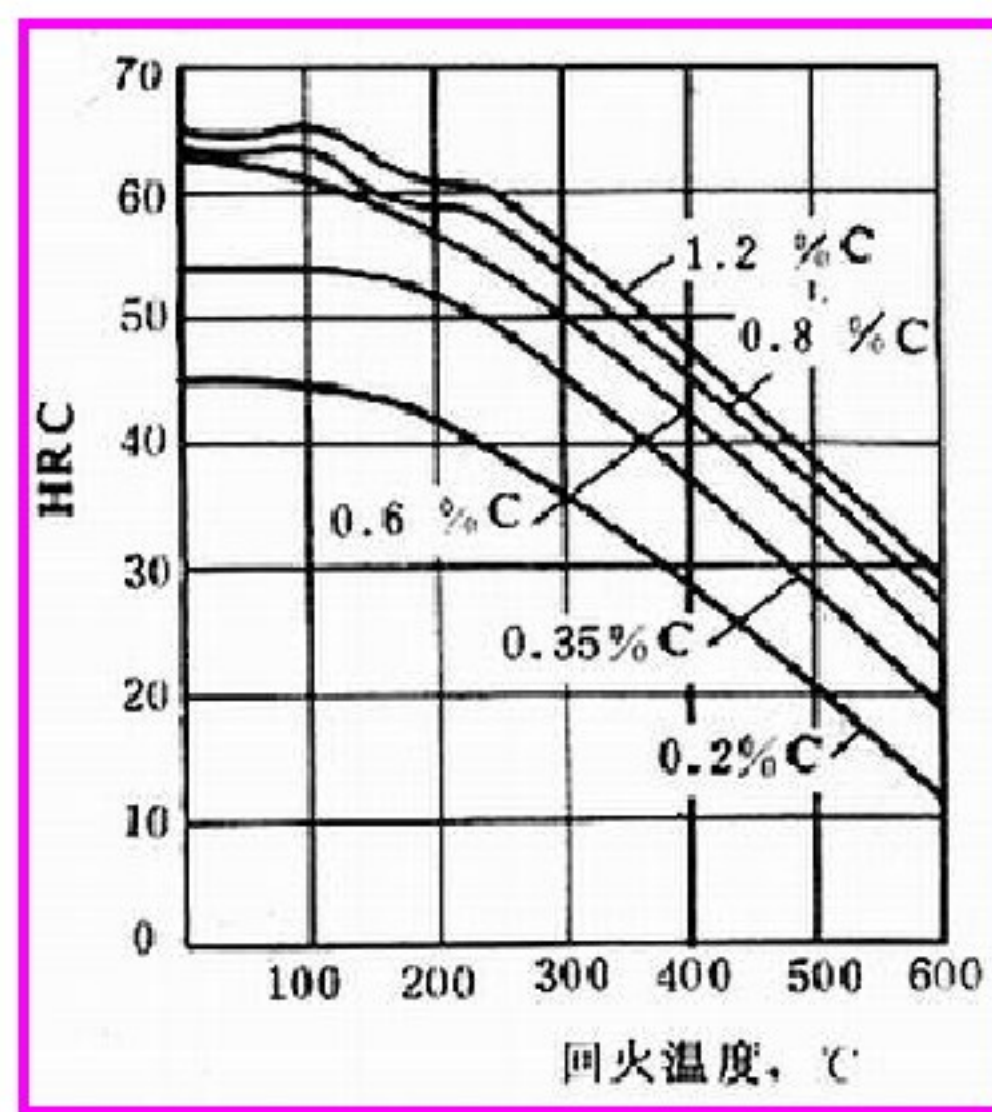
回火索氏体



- 回火时的性能变化
- 回火时力学性能变化总的趋势是随回火温度提高，钢的强度、硬度下降，塑性、韧性提高。



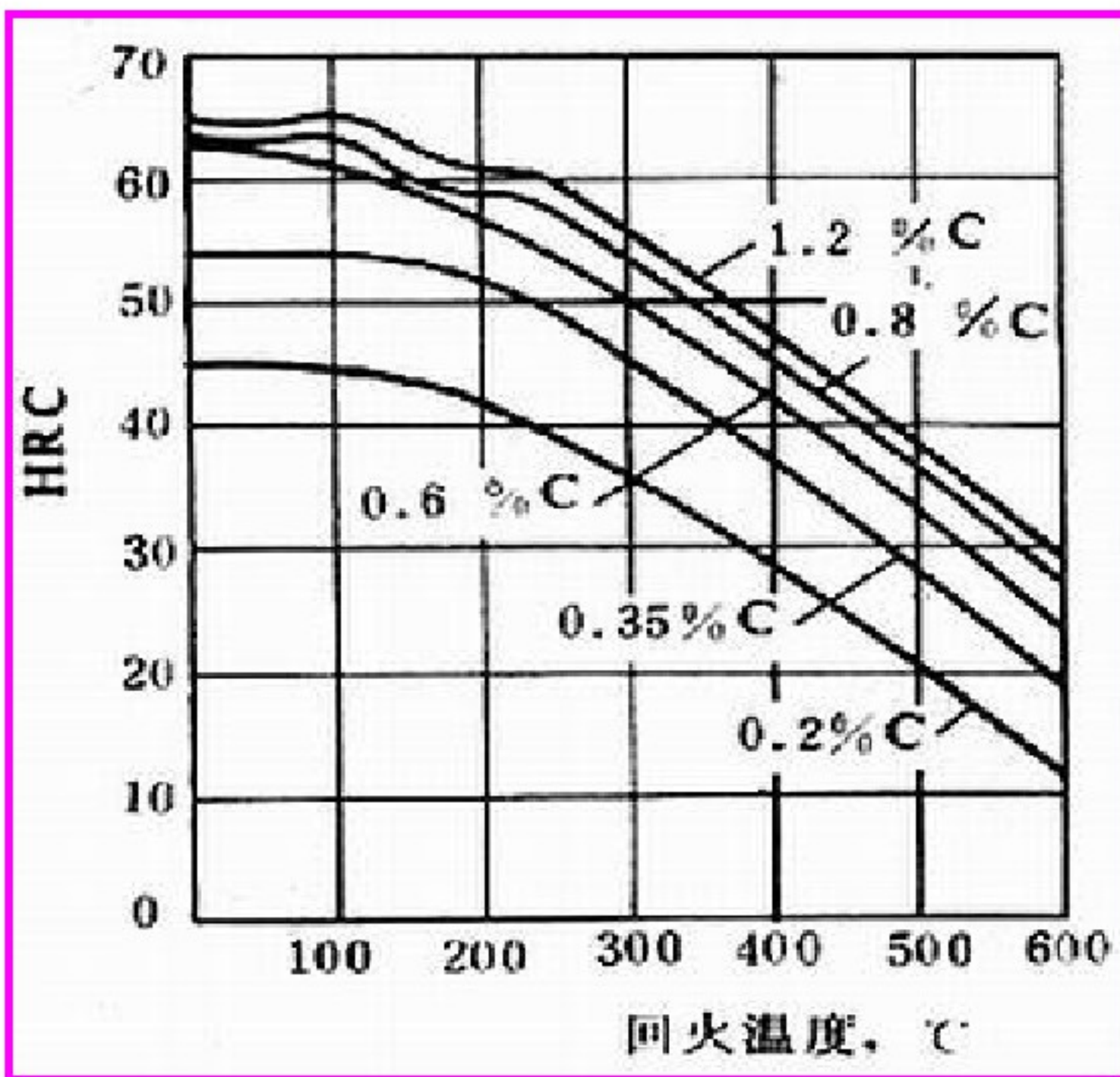
40钢力学性能与回火温度的关系



淬火钢硬度随回火温度的变化



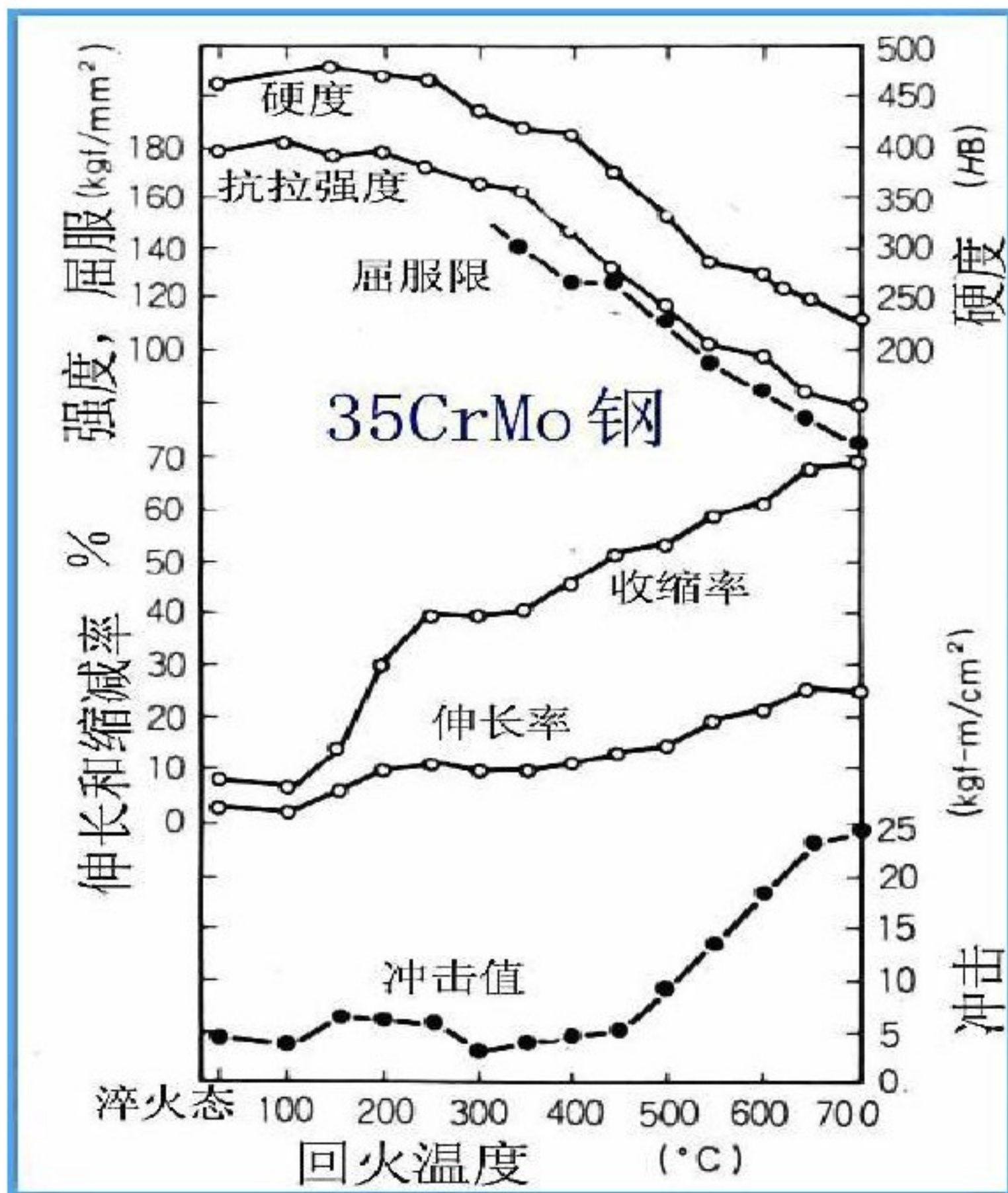
- 200℃以下，由于马氏体中碳化物的弥散析出，钢的硬度并不下降，高碳钢硬度甚至略有提高。
- 200-300℃，由于高碳钢中A'转变为M<sub>回</sub>，硬度再次升高。
- 大于300℃，由于Fe<sub>3</sub>C粗化，马氏体转变为铁素体，硬度直线下降。





### 3、回火脆性

- 淬火钢的韧性并不总是随温度升高而提高。
- 在某些温度范围内回火时，会出现冲击韧性下降的现象，称回火脆性。

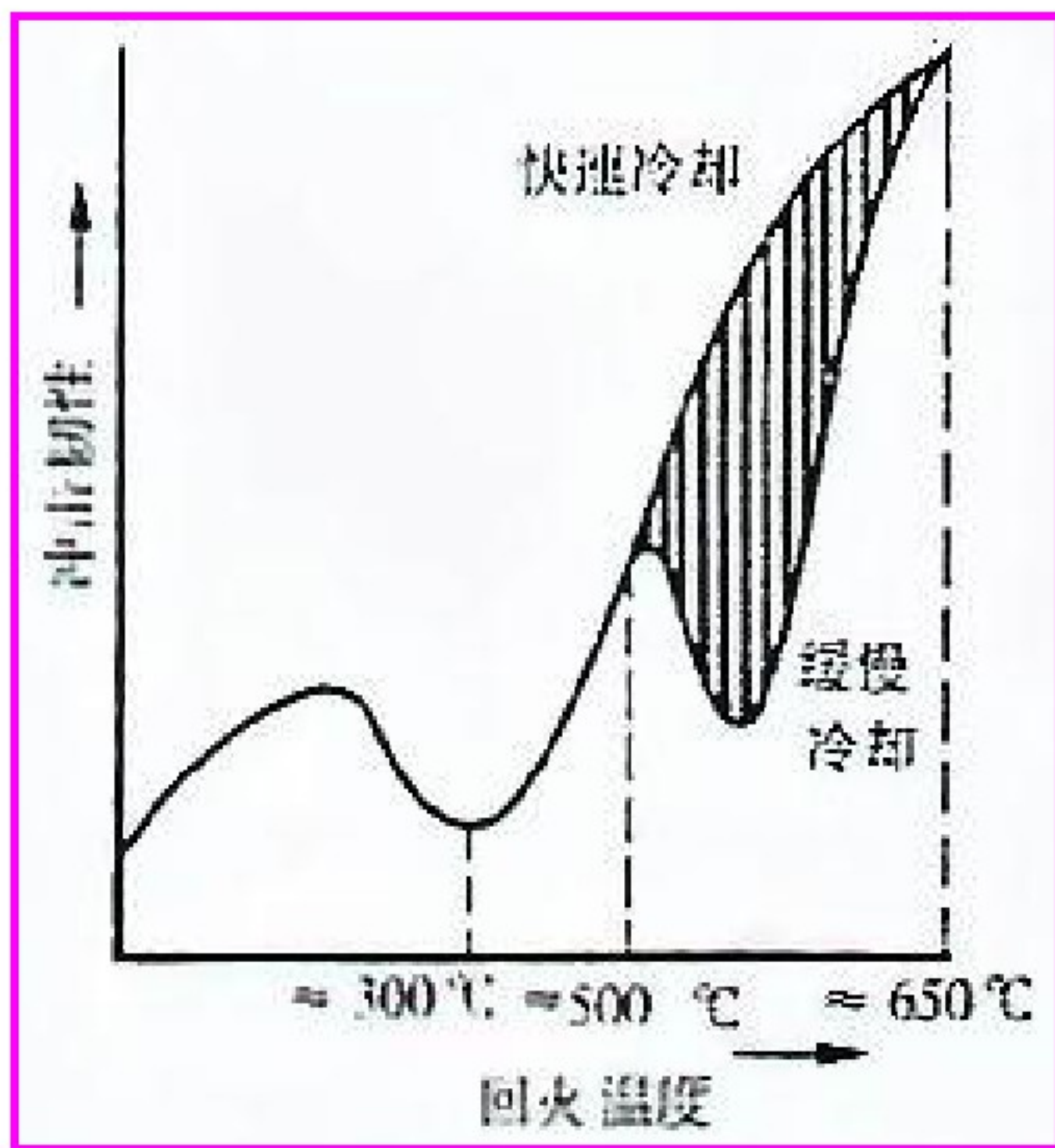




## ■ ①第一类回火脆性

■ 又称不可逆回火脆性。是指淬火钢在 $250-350^{\circ}\text{C}$ 回火时出现的脆性。

- 这种回火脆性是不可逆的，只要在此温度范围内回火就会出现脆性，目前尚无有效消除办法。
- 回火时应避开这一温度范围。

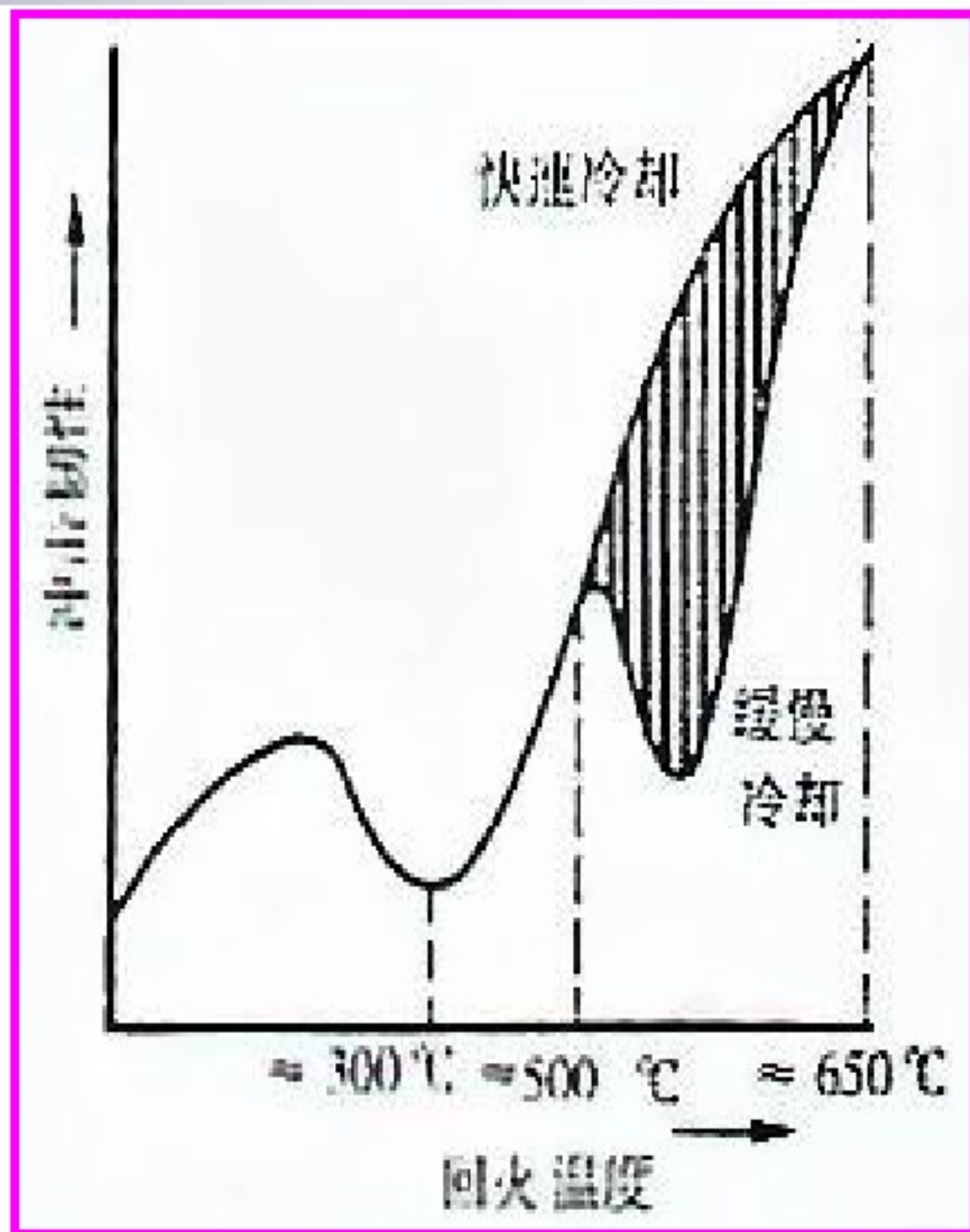




- ②第二类回火脆性
- 又称可逆回火脆性。是指淬火钢在 $500-650^{\circ}\text{C}$ 范围内回火后缓冷时出现的脆性。

回火后快冷不出现，是可逆的。

- 防止办法：
- (1) 回火后快冷。



- (2) 加入合金元素W (约1%)、Mo(约0.5%)。该法更适用于大截面的零部件。



## 4、回火种类

- 根据钢的回火温度范围，可将回火分为三类。

	低温回火	中温回火	高温回火
回火温度	150-250℃	350-500℃	500-650℃
回火组织	$M_{\text{回}}$	$T_{\text{回}}$	$S_{\text{回}}$
回火目的	在保留高硬度、高耐磨性的同时，降低内应力。	提高 $\sigma_e$ 及 $\sigma_s$ ，同时使工件具有一定韧性。	获得良好的综合力学性能，即在保持较高的强度同时，具有良好的塑性和韧性。
应用	适用于各种高碳钢、渗碳件及表面淬火件。	适用于 弹簧热处理	广泛用于各种结构件如轴、齿轮等热处理。也可作为要求较高精密件、量具等预备热处理。

- 淬火加高温回火的热处理称作调质处理，简称调质。