

## 5 材料的形变和再结晶

材料在加工制备过程中或是制成零部件后的工作运行中都要受到外力的作用。材料受力后要发生变形，外力较小时产生弹性变形；外力较大时产生塑性变形，而当外力过大时就会发生断裂。

本章主要内容：

### 一．晶体的塑性变形

单晶体的塑性变形

多晶体的塑性变形

合金的塑性变形

塑性变形对材料组织与性能的影响

### 二．回复和再结晶

冷变形金属在加热时的组织与性能变化

回复

再结晶

晶粒长大

再结晶组织与退火孪晶

### 5.1 晶体的塑性变形

塑性加工

金属材料获得铸锭后，可通过塑性加工的方法获得一定形状、尺寸和机械性能的型材、板材、管材或线材。

塑性加工包括锻压、轧制、挤压、拉拔、冲压等方法。

金属在承受塑性加工时，当应力超过弹性极限后，会产生塑性变形，这对金属的结构和性能会产生重要的影响。

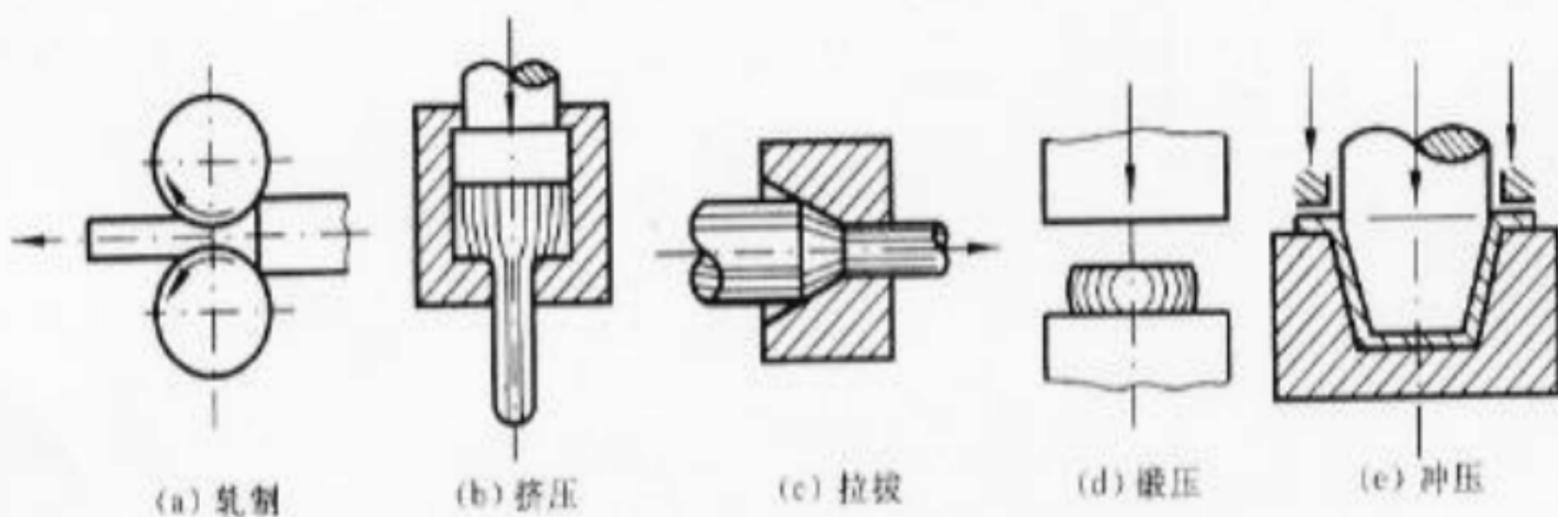


图 2-42 压力加工方法示意图  
5.1.1 单晶体的塑性变形

单晶体塑性变形的两种方式： 滑移 孪生

滑移：滑移是晶体在切应力的作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿着某些晶面和晶向发生相对滑动。

滑移线：为了观察滑移现象，可将经良好抛光的单晶体金属棒试样进行适当拉伸，使之产生一定的塑性变形，即可在金属棒表面见到一条条的细线，通常称为滑移线。

滑移带：在宏观及金相观察中看到的滑移带并不是单一条线，而是由一系列相互平行的更细的线所组成的，称为滑移带。

滑移系：塑性变形时位错只沿着一定的晶面和晶向运动，这些晶面和晶向分别称为“滑移面”和“滑移方向”。一个滑移面和此面上的一个滑移方向结合起来组成一个滑移系。

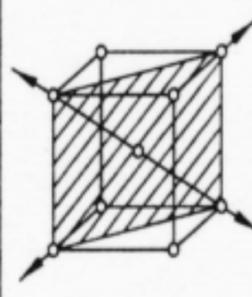
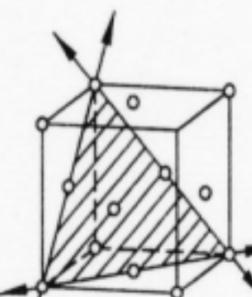
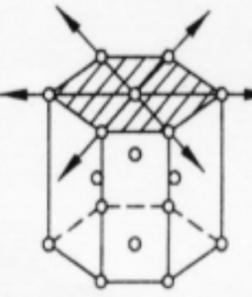
滑移的临界分切应力  $k$

晶体的滑移是在切应力作用下进行的，但其中许多滑移系并非同时参与滑移，而只有当外力在某一滑移系中的分切应力达到一定临界值时，该滑移系才可以首先发生滑移，该分切应力称为滑移的临界分切应力。

滑移的特点

晶体的滑移并不是晶体的一部分相对于另一部分同时做整体的刚性的移动，而是通过位错在切应力作用下沿着滑移面逐步移动的结果，因此实际滑移的临界分切应力  $k$  比理论计算的低得多。（滑移面为原子排列最密的面）

表 2-4 金属三种常见晶格的滑移系

晶格	体心立方晶格		面心立方晶格		密排六方晶格	
滑移面	$\{110\} \times 6$		$\{111\} \times 4$		$\{0001\} \times 1$	
滑移方向	$\langle 111 \rangle \times 2$		$\langle 110 \rangle \times 3$		$\langle 11\bar{2}0 \rangle \times 3$	
滑移系	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$	

单晶体滑移时，除滑移面发生相对位移外，往往伴随着晶面的转动。

多系滑移

对于具有多组滑移系的晶体，晶体的滑移就可能在两组或更多的滑移面上同时进行或交替地进行，从而产生多系滑移。

## 孪生

孪生是塑性变形的另一种常见形式，它常作为滑移不易进行时的补充。孪生是在切应力作用下的晶体相对于另一部分沿一定的晶面与晶向产生一定角度的均匀切变过程。发生切变的区域称为孪晶或孪晶带。

孪生的特点：与滑移相似，孪生也是在切应力的作用下发生的，但是孪生所需要的临界切应力远远高于滑移时的临界切应力，因此，只有在滑移很难进行的条件下，晶体才发生孪生变形。孪晶的形成改变了晶体的位向，从而使其中某些原来不处于不利取向的滑移系转变到有利于滑移的位置，于是，可以进一步激发滑移变形，使金属变形能力得以提高。

如何根据变形后的样品表面形貌来区别孪晶、滑移带：

先将变形后的样品表面磨光或抛光，使变形痕迹(孪晶、滑移带)全部消失。再选用适当的腐蚀剂腐蚀样品表面，然后在显微镜下观察。如果看不到变形痕迹(即样品表面处处衬度一样)，则该样品原来的表面形变痕迹必为滑移带。这是因为滑移不会引起位向差，故表面各处腐蚀速率相同，原来光滑的平面始终保持平面，没有反差。如果在腐蚀后的样品表面上重新出现变形痕迹，则它必为孪晶。因为孪晶内的位向是不同于周围未变形区域的，因而其腐蚀速率也不同于未变形区，故在表面就出现衬度不同的区域。

### 5.1.2 多晶体的塑性变形

工程上使用的金属绝大部分是多晶体，多晶体是由许多小的单晶体——晶粒构成的，多晶体中每个晶粒的变形基本方式与单晶体相同。但由于多晶体材料中存在单晶体所不具备的晶体学特征，包括：晶粒位向不同、晶粒大小不同，晶界的存在，因此着重讨论这些特征对变形的影响。

#### 1 多晶体塑性变形的微观特点：多滑移、多方式、不均匀。

多滑移：和单晶体不同，多晶体变形时开动的滑移系统不仅仅取决于外加应力，而且取决于协调变形的要求。理论分析表明，为了维持多晶体的完整性，即在晶界处既不出现裂纹，也不发生原子的堆积，每个晶粒至少要有五个滑移系统同时开动，虽然这些系统的分切应力并

非都最大。实验观察也证明，多滑移是多晶体塑性形变时的一个普遍现象。

多方式：多晶体的塑性形变方式除了滑移和孪生外，还有晶界滑动和迁移，以及点缺陷的定向扩散。

不均匀：和单晶体相比，多晶体的范性形变更加不均匀。除了更多系统的多滑移外，由于晶界的约束作用，晶粒中心区的滑移量也大于边缘区（即晶界附近的区域）。在晶体发生转动时中心区的转角也大于边缘区，因此多晶体变形后的组织中会出现更多、更明显的滑移带、形变带和晶面弯曲，也会形成更多的晶体缺陷。

以上讨论了多晶体塑性形变的三个基本特点。由于这些特点，特别是多滑移和变形的不均匀性，又派生出其它特点。包括：产生内应力；出现加工硬化；形成纤维组织（即杂质和第二相择优分布）和择优取向（织构）。

## 2 多晶体中晶粒位向，晶界，晶粒度，对塑性变形的作用

### 2.1 晶粒位向对变形的影响主要表现在各晶粒在变形过程中相互制约和协调。

多晶体中每个晶粒位向不一致。一些晶粒的滑移面和滑移方向接近于最大切应力方向（软位向），另一些晶粒的滑移面和滑移方向偏离最大切应力方向（硬位向）。在发生滑移时，软位向晶粒先开始。当位错在晶界受阻逐渐堆积时，其他晶粒发生滑移。因此多晶体变形时晶粒分批地逐步地变形。但多晶体中每个晶粒都处于其他晶粒包围之中，它的变形必然与其邻近晶粒相互协调和配合，不然就难以进行变形，甚至不能保持晶粒之间的连续性。

### 2.2 晶界在多晶体塑性形变中的作用（协调、室温下阻碍，高温下促进、起裂）

试验表明，低温或室温下，晶界强而晶粒本身弱；高温下则相反。

晶界对塑性变形的作用如下：

#### 协调作用

多晶体在塑性形变时各晶粒都要通过滑移或孪生而变形。但由于多晶体是一个整体，各晶粒的变形不能是任意的，而必须相互协调，否则在晶界处就会裂开。晶界正是起着协调相邻晶粒的变形的作用。由于协调变形的要求，在晶界处变形必须连续，亦即两个相邻晶粒在晶界处的变形必须相同。

#### 障碍作用

在低温或室温下变形时，由于晶界比晶粒强，故滑移主要在晶粒内进行。它不可能穿过晶界而在相邻晶粒内进行。可见，晶界限制了滑移。另一方面，由于晶界内大量缺陷的应力场，使晶粒内部（特别是靠近晶界区）滑移更困难，或者说，

需要更高的外加应力才能滑移。这就是晶界的障碍作用

促进作用

在高温下变形时，由于晶界比晶粒弱，故除了晶粒内滑移外，相邻两个晶粒还会沿着晶界发生相对滑动，此称为晶界滑动。晶界滑动也造成晶体宏观塑性变形，但变形量往往远小于滑移和孪生引起的塑性变形。

起裂作用

一方面，由于晶界阻碍滑移，此处往往应力集中；另一方面，由于杂质和脆性，第二相往往优先分布于晶界，使晶界变脆；这样在变形过程中裂纹往往起源于晶界。此外，由于晶界处缺陷多，原子处于能量较高的不稳定状态，在腐蚀介质作用下，晶界往往优先被腐蚀（晶间腐蚀），形成微裂纹

### 2.3 晶粒度的影响

晶粒度就是指晶粒的大小，较方便的表示方法是将晶粒近似地看成是球形，把各球形晶粒的平均直径  $d$  作为晶粒度。

晶粒度对晶体的各种性能都有影响，而影响最大的是变形过程的力学性能，特别是对屈服极限的影响。一般来说，晶粒越细，阻碍滑移的晶界便越多（或晶界面积越大），变形过程中晶界处位错塞积数目越多，屈服极限也就越高。

细晶粒不仅使材料具有较高的强度、硬度，而且也使它具有良好的塑性和韧性。即具有良好的综合力学性能，因此，一般在室温使用的结构材料都希望获得细小而均匀的晶粒。（细晶强化）

大多数金属的屈服极限和晶粒度符合 Hall-Petch 公式：

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y \cdot d^{-1/2}$$

$\sigma_i$  和  $k_y$  是两个和材料有关的常数， $d$  为晶粒直径

### 5.1.3 合金的塑性变形

按合金组成相不同，主要可分为单相固溶体合金和多相合金，它们的塑性变形又各具有不同特点。

## 1. 单相固溶体合金的塑性变形

和纯金属相比最大的区别在于单相固溶体合金中存在溶质原子。溶质原子对合金塑性变形的影响主要表现在固溶强化，提高塑性变形阻力，此外，部分固溶体会出现明显的屈服点和应变时效现象。

### 固溶强化

当溶质原子溶入溶剂原子形成固溶体时，使材料强度硬度提高，塑性韧性下降的现象。

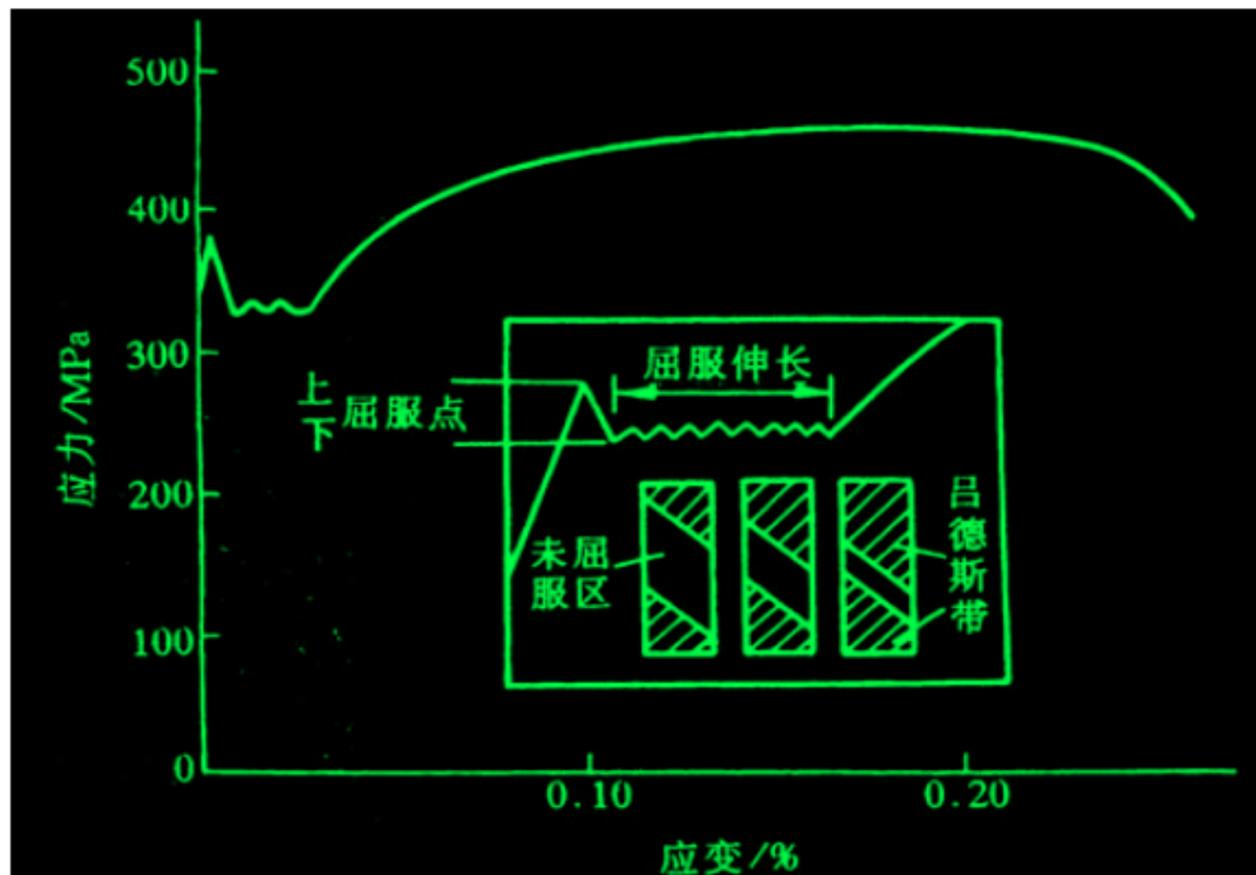
### 影响因素

不同溶质原子所引起的固溶强化效果存在很大差别，影响因素主要有：

- 1 溶质原子的原子数分数越高，强化作用也越大，特别是当原子数分数很低时的强化效应更为显著。
- 2 溶质原子与基体金属的原子尺寸相差越大，强化作用也越大。
- 3 间隙型溶质原子比置换原子具有较大的固溶强化效果。
- 4 溶质原子与基体金属的价电子数相差越大，固溶强化作用越显著。

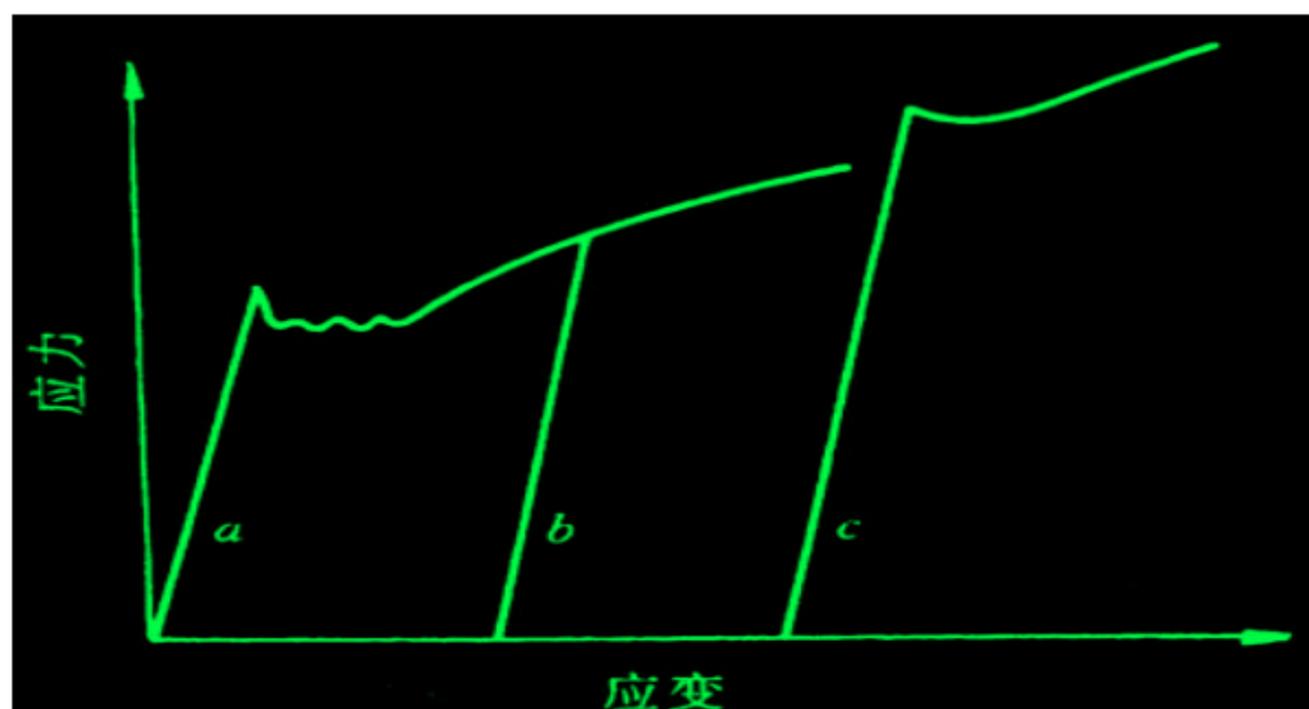
### 屈服现象

图为低碳钢典型的应力—应变曲线，与一般拉伸曲线不同，出现了明显的屈服点。当应力达到上屈服点时，首先在试样的应力集中处开始塑性变形，并在试样表面产生一个与拉伸轴约成  $45^\circ$  交角的变形带—吕德斯（Lüders）带，与此同时，应力降到下屈服点。随后这种变形带沿试样长度方向不断形成与扩展，从而产生拉伸曲线平台的屈服伸长。当屈服扩展到整个试样标距范围时，屈服延伸阶段就告结束



## 应变时效

当退火状态低碳钢试样拉伸到超过屈服点发生少量塑性变形后（曲线 a）卸载，然后立即重新加载拉伸，则可见其拉伸曲线不再出现屈服点（曲线 b），此时试样不发生屈服现象。如果不采取上述方案，而是将预变形试样在常温下放置几天或经 200℃ 左右短时加热后再行拉伸，则屈服现象又复出现，且屈服应力进一步提高（曲线 c），此现象通常称为 应变时效。



## 2. 多相合金的塑性变形

由于第二相的数量、尺寸、形状和分布不同，基体相结合状况不一、第二相的形变特征与基体相的差异，使得多相合金的塑性变形更加复杂。

根据第二相粒子的尺寸大小可将合金分成两大类：若第二相粒子与基体晶粒尺寸属同一数量级，称为聚合型两相合金；若第二相粒子细小而弥散地分布在基体晶粒中，称为弥散分布型两相合金。

### 弥散分布型合金的塑性变形

当第二相以细小弥散的微粒均匀分布于基体相中时，将产生显著的强化作用。弥散强化作用是通过第二相粒子对位错运动的阻碍作用而表现出来的。通常可将第二相粒子分为“不可变形的”和“可变形的”两类。

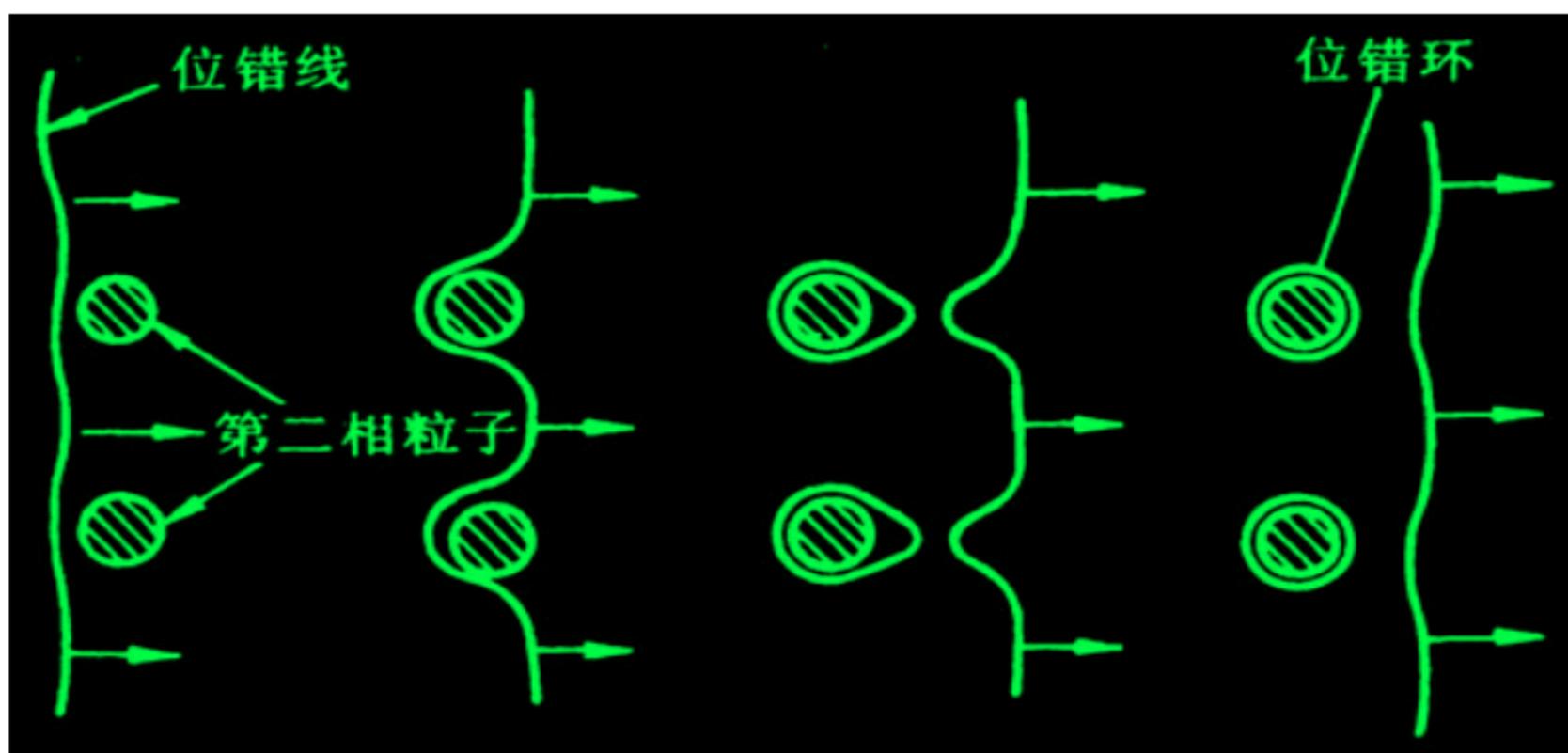
#### (1) 可变形微粒的强化作用（切过）

当第二相粒子为可变形微粒时，位错将切过粒子使之随同基体一起变形。在这种情况下，强化作用主要决定于粒子本身的性质，以及与基体的联系，其强

化机制甚为复杂。

## (2) 不可变形粒子的强化作用 (绕过)

当运动位错与其相遇时，将受到粒子阻挡，使位错线绕着它发生弯曲。随着外加应力的增大，位错线受阻部分的弯曲更剧，以致围绕着粒子的位错线在左右两边相遇，于是正负位错彼此抵消，形成包围着粒子的位错环留下，而位错线的其余部分则越过粒子继续移动。显然，位错按这种方式移动时受到的阻力是很大的，而且每个留下的位错环要作用于位错源一反向应力，故继续变形时必须增大应力以克服此反向应力。该位错绕过障碍物的机制通常称为奥罗万机制。



## 5.2.4 塑性变形对材料组织与性能的影响

### 1 对组织的影响（形成纤维组织，亚结构，形变织构）

#### 纤维组织形成

金属发生塑性变形后，晶粒发生变形，沿变形方向被拉长或压扁。当变形量很大时，晶粒变成细条状（拉伸时），金属中的夹杂物也被拉长，形成纤维组织。

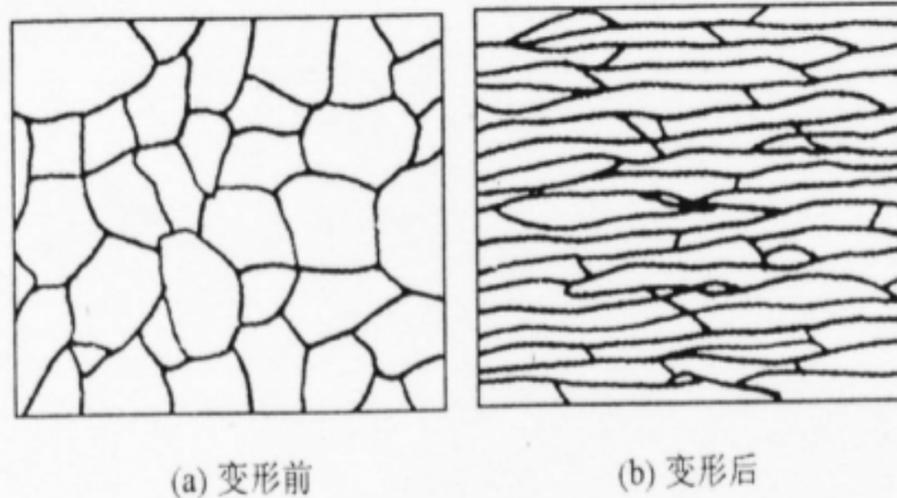


图 2-48 变形前后晶粒形状变化示意图

#### 亚结构形成

金属经大的塑性变形时，由于位错的密度增大和发生交互作用，大量位错堆积在局部地区，并相互缠结，形成不均匀的分布，使晶粒分化成许多位向略有不同的小晶块，而在晶粒内产生亚晶粒。

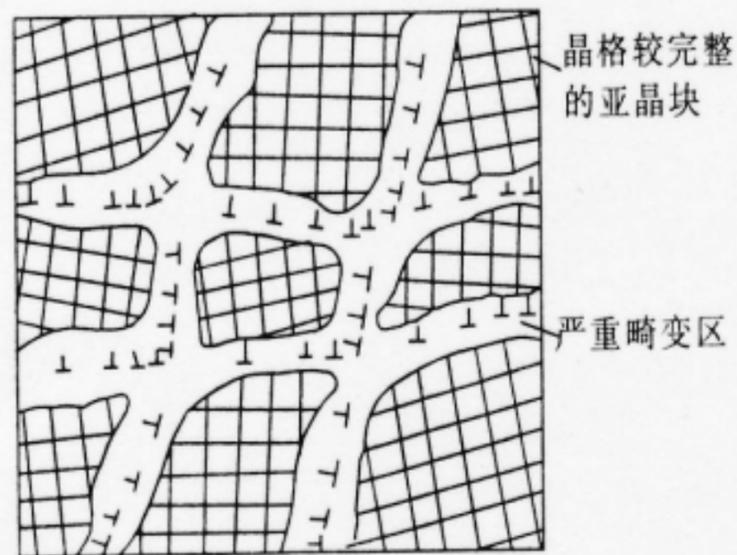


图 2-49 金属经变形后的亚结构

## 形变织构产生

金属塑性变形到很大程度时，各个晶粒的滑移面和滑移方向都要向主形变方向转动，逐渐使多晶体中原来取向互不相同的各个晶粒在空间取向上呈现一定程度的规律性，这一现象称为择优取向，这种组织状态则称为形变织构。形变织构随加工变形方式不同主要有两种类型：拔丝时形成的织构称为丝织构，其主要特征为各晶粒的某一晶向大致与拔丝方向相平行；轧板时形成的织构称为板织构，其主要特征为各晶粒的某一晶面和晶向分别趋于同轧面与轧向相平行。

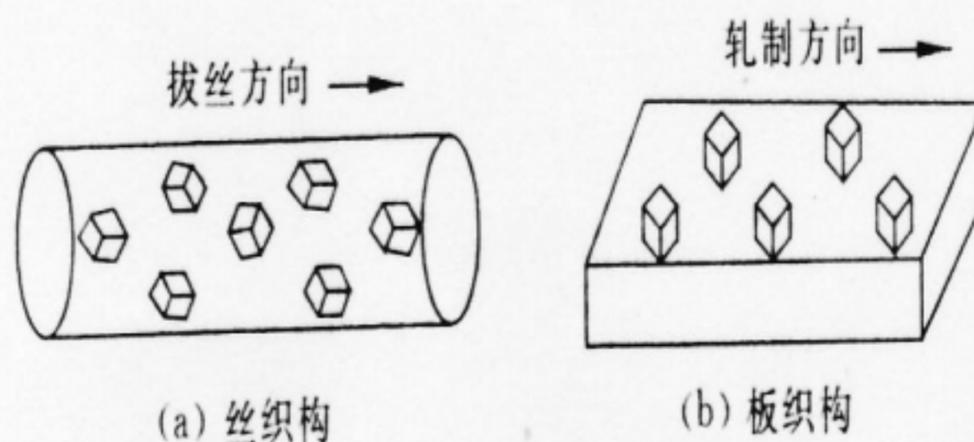


图 2-50 形变织构示意图

## 2 塑性变形对性能的影响（残余应力、各向异性、物化性能、加工硬化）

### 残余应力

塑性变形中外力所作的功除大部分转化成热之外，还有一小部分以畸变能的形式储存在形变材料内部，这部分能量叫做储存能。储存能的具体表现形式有三种：宏观残余应力，微观残余应力，点阵畸变。

按照残余应力平衡范围的不同，可将其分为三种：

- (1) 第一类内应力，又称宏观残余应力，它是由工件不同部分的宏观变形不均匀性引起的，故其应力平衡范围包括整个工件。这类残余应力所对应的畸变能不大，仅占总储存能的 0.1% 左右。
- (2) 第二类内应力，又称微观残余应力，它是由晶粒或亚晶粒之间的变形不均匀性产生的。其作用范围与晶粒尺寸相当。这种内应力有时可达到很大的数值，甚至可能造成显微裂纹并导致工件破坏。
- (3) 第三类内应力，又称点阵畸变。其作用范围是几十至几百纳米，它是由于工件在塑性

变形中形成的大量点阵缺陷。变形金属中储存能的绝大部分（80%~90%）用于形成点阵畸变。这部分能量提高了变形晶体的能量，并导致塑性变形金属在加热时的回复及再结晶过程。

### 各向异性

由于纤维组织和形变织物的形成，使金属的性能产生各向异性。如沿纤维方向的强度和塑性明显高于垂直方向的。

### 理化性能的变化

经塑性变形后的金属材料，由于点阵畸变，空位和位错等结构缺陷的增加，使其物理性能和化学性能也发生一定的变化：

塑性变形通常可使金属的电阻率增高，增加的程度与形变量成正比。另外，塑性变形后，金属的电阻温度系数下降，磁导率下降，热导率下降，铁磁材料的磁滞损耗及矫顽力增大。

### 加工硬化

金属发生塑性变形，随变形度的增大，金属的强度和硬度显著提高，塑性和韧性明显下降。这种现象称为加工硬化，也叫形变强化。

产生加工硬化的原因是：金属发生塑性变形时，位错密度大量增加，位错间的交互作用增强，相互缠结，使位错运动的阻力增大，引起塑性变形抗力提高。另一方面由于亚晶界的增多，使强度得以提高。

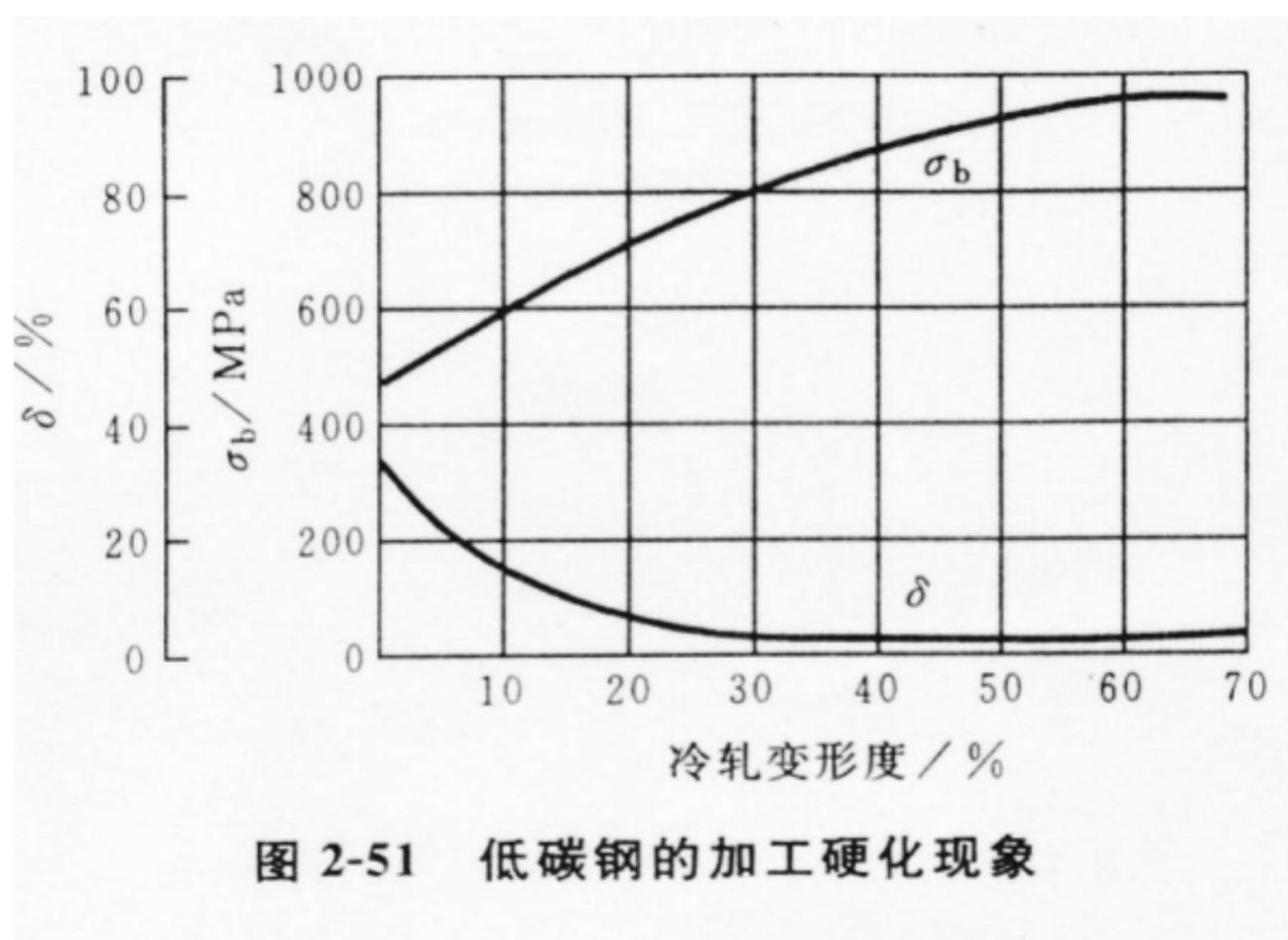


图 2-51 低碳钢的加工硬化现象

## 加工硬化在生产实际中的意义

### 不利方面

- 1)由于金属在加工过程中塑性变形抗力不断增加。使金属的冷加工需要消耗更多的功率；
- 2)由于加工硬化使金属变脆，因而在冷加工过程中需要进行多次中间退火，使金属软化，才能够继续加工而不致裂开；
- 3)有的金属 (如铌 )尽管某些使用性能很好，但由于难解决加工问题，其应用受到很大限制。

### 有利方面

- 1)有些加工方法要求金属必须有一定的加工硬化。例如，金属的拉伸过程 (如拉丝 )要求金属线材在模口处能迅速硬化。
- 2)可以通过冷加工控制产品的最后性能。例如，某些不锈钢冷轧后的强度可提高一倍以上。冷拉的钢丝绳强度高，表面光洁。工业上广泛应用的铜导线，由于要求导电性好，不允许加合金元素，加工硬化是提高其强度的唯一办法。
- 3)有些零部件在工作条件表面会不断硬化，以达到表面耐冲击、耐磨损的要求。例如，铁路的道岔由于经常受列火车轮的冲击和磨损，必须具有很高的冲击韧性和表面硬度。近年来有人采用爆炸硬化的办法对道岔进行预处理，这样可使表面硬度提高两倍。不过由于经济方面的原因，爆炸变形方法主要还是用于宇航工业，在普通工业中应用尚少。

### 5.3 回复和再结晶

经塑性变形的材料具有自发恢复到变形前低自由能状态的趋势。当冷变形金属加热时会发生回复、再结晶和晶粒长大等过程。了解这些过程的发生和发展规律，对于改善和控制金属材料的组织和性能具有重要的意义。

#### 5.3.1 冷变形金属在加热时的组织与性能变化

冷变形后材料经重新加热进行退火之后，其组织和性能会发生变化。观察在不同加热温度下变化的特点，可将退火过程分为回复、再结晶和晶粒长大三个阶段。

回复是指冷变形金属重新加热后，新的无畸变晶粒出现之前所产生的亚结构和性能变化的阶段；

再结晶是指出现无畸变的等轴新晶粒逐步取代变形晶粒的过程；

晶粒长大是指再结晶结束之后晶粒的继续长大。

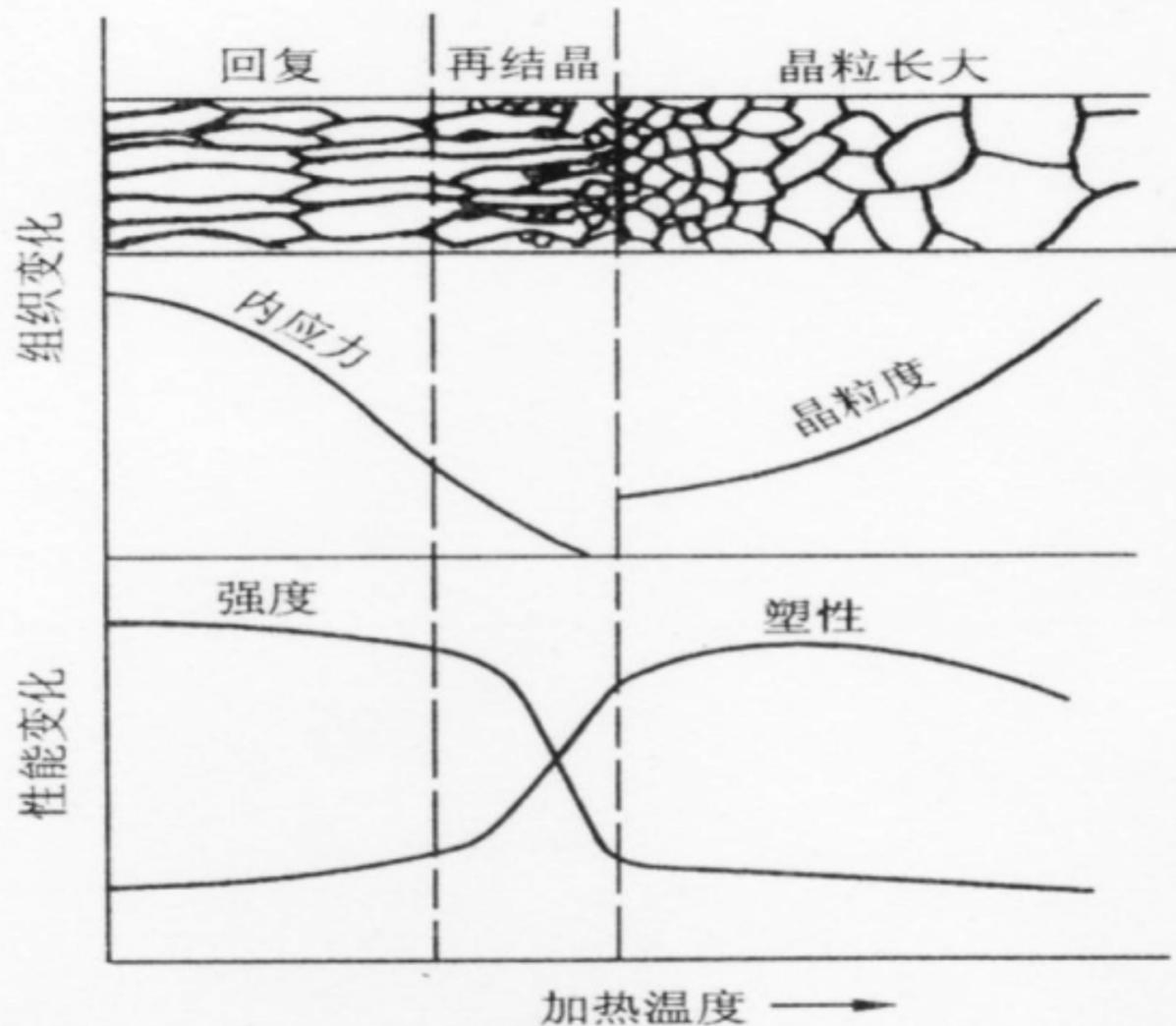


图 2-53 变形金属加热时组织和性能变化示意图

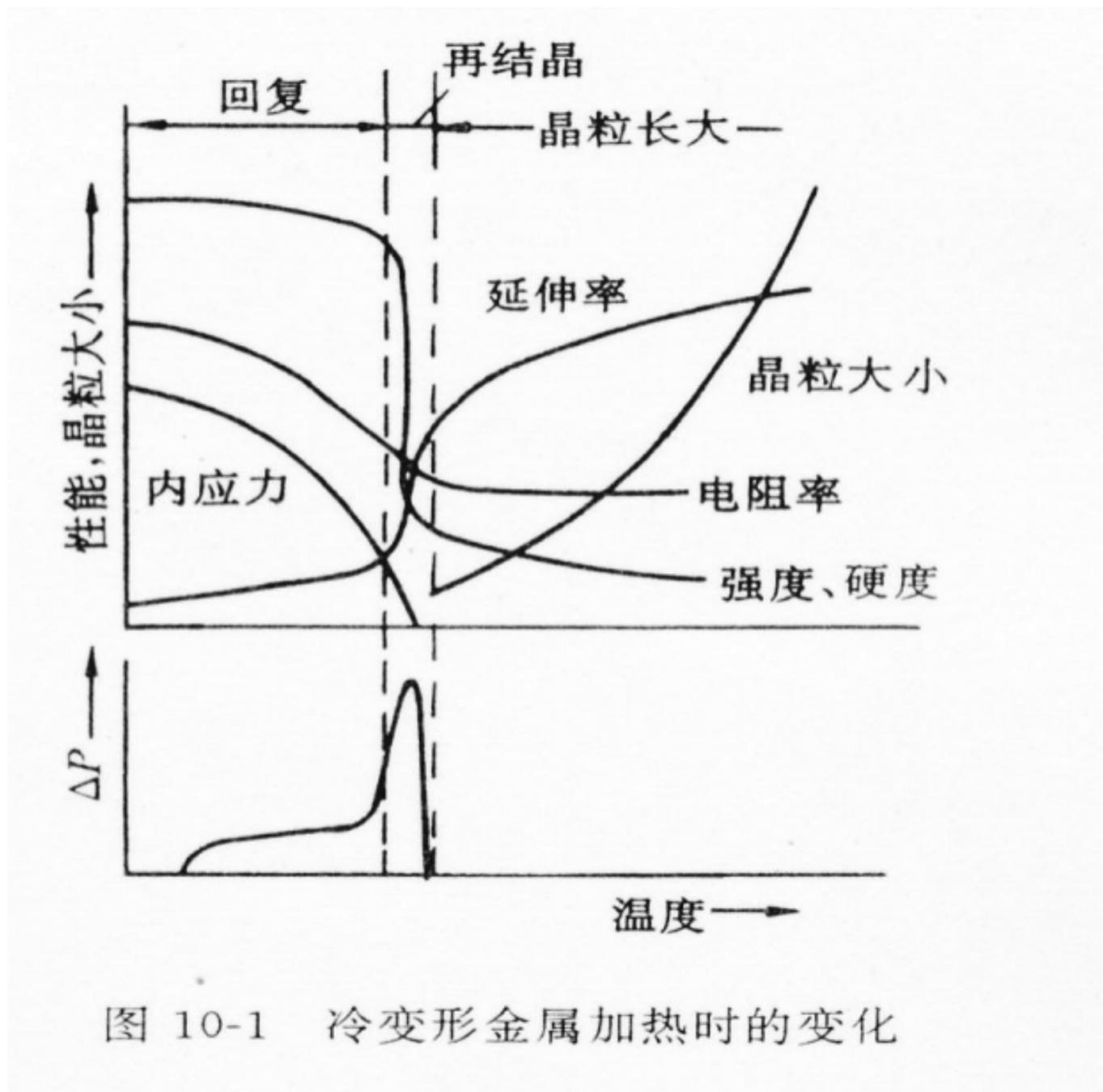


图 10-1 冷变形金属加热时的变化

### 5.3.2 回复

#### 1 回复过程的特征

回复是冷变形金属在退火时发生组织性能变化的早期阶段。回复过程的特征有：

**晶体缺陷大大减少：** 晶粒内部位错、空位、间隙原子等缺陷通过移动、复合消失而大大减少，而晶粒仍保持变形后的形态，变形金属的显微组织不发生明显的变化。

**残余应力大部分消除：** 回复过程使变形引起的宏观一类应力全部消除，微观二类应力大部消除；

**力学性能变化不大，物化性能变化较大：** 回复过程中一般力学性能变化不大，强度、硬度仅稍有降低，塑性稍有提高，某些物理性能有较大变化，电阻率显著降低，密度增大。

变形储存能在回复阶段部分释放。

## 2 回复过程机制

回复可区分为低温回复、中温回复和高温回复三段。

### (1) 低温回复

这个阶段回复主要与空位变化有关。由于空位的消失引起某些物理性能显著的变化，电阻率降低，密度增大，而对力学性能则不发生影响。

### (2) 中温回复

中温回复涉及异号位错的对消和位错密度的变化。由于位错密度的变化将对力学性能有所影响。

### (3) 高温回复

高温回复的主要机制是多边形化。因原始变形状态位错组态不同，有两类多边形化。第一类叫稳定多边形化，第二类为再结晶前多边形化。

## 3. 回复的应用

回复主要用于去应力，去除冷变形工件中的应力，防止变形和开裂。

例如深冲黄铜弹壳，在残余应力和外界腐蚀性气氛的联合作用下，会发生应力腐蚀、沿晶间开裂，冷冲后于 260℃ 退火消除应力，可防止应力腐蚀的发生。从图可以看出，经这样退火后，内应力可大部分消除，而强度、硬度基本不变。此外，用冷拉钢丝卷制弹簧，在卷成之后，要在 250℃ ~ 300℃ 退火，以降低内应力并使其定形。铸件、焊件在生产过程中产生应力，也利用回复进行去应力退火。

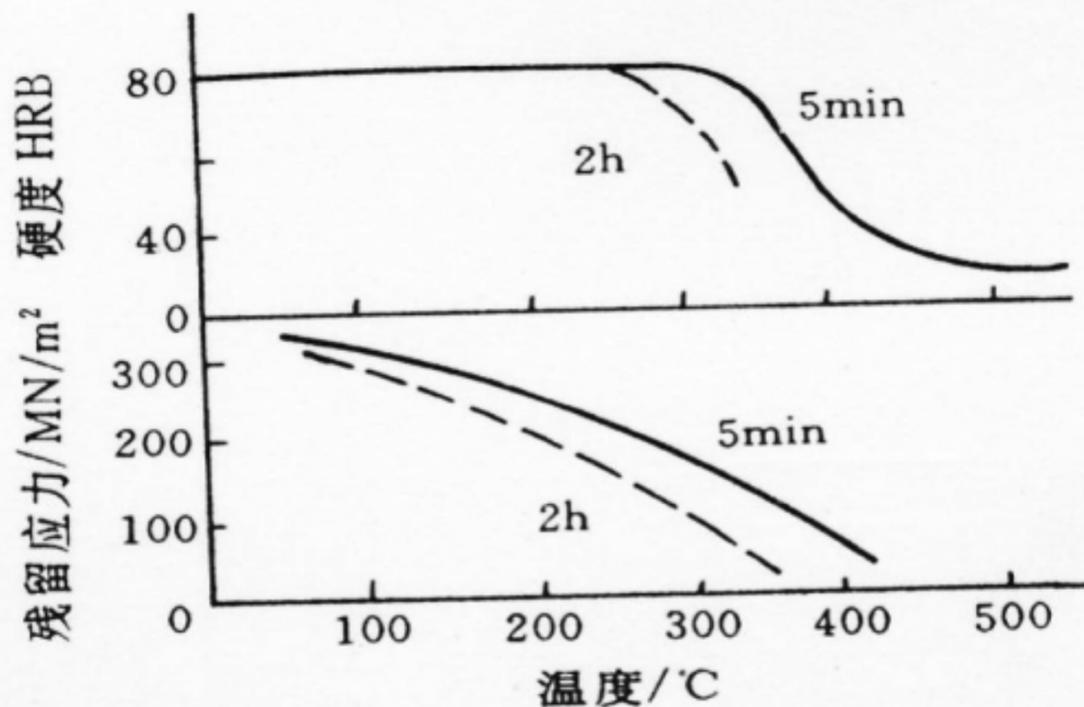


图 10-8 冷加工黄铜经加热后的硬度及内应力变化

### 5.3.3 再结晶

变形后的金属在较高温度加热时，晶粒通过重新生核、长大变成新的均匀、细小的等轴晶，这个过程称为再结晶。

再结晶过程特征如下：

变形金属再结晶后，金属的强度和硬度明显降低，而塑性和韧性大大提高，加工硬化现象被消除；

内应力全部消失，物理、化学性能基本上恢复到变形以前的水平；

再结晶生成的晶粒的晶格类型与变形前、变形后的晶格类型均一样。

再结晶形核率及影响因素

再结晶形核率指单位时间、单位体积形成的再结晶核心数目。影响因素：

1)变形程度 预先变形量愈大，形核率愈大。

2)材料纯度 材料纯度低，杂质原子多，对形核率有两方面影响，一方面阻碍变形，使变形储能增大，增加形核率；另一方面因杂质原子在界面处偏聚，阻碍形核时的界面迁移并且杂质钉扎位错，阻碍位错攀移和亚晶的长大，使再结晶核心不容易形成。而降低形核率。

3)晶粒大小 晶粒细小，增大变形阻力，相同变形量下，位错塞积、畸变区增多，储能增高；晶界面积大，生核区域多，这两个因素均使形核率增大。

4)温度 再结晶温度升高，位错攀移容易，亚晶界容易迁移长大，亚晶也容易转动、聚合，发展成为再结晶核心，从而使形核率增大。

再结晶温度

变形后的金属发生再结晶的温度是一个温度范围，并非某一恒定温度。冷变形金属开始进行再结晶的最低温度称为再结晶温度，它可用金相法或硬度法测定，即以显微镜中出现第一颗新晶粒时的温度或以硬度下降50%所对应的温度，定为再结晶温度。

再结晶温度并不是一个物理常数，它不仅随材料而改变，同一材料其冷变形程度、原始晶粒度等因素也影响着再结晶温度。

再结晶温度的影响因素：

1 变形程度的影响：随着冷变形程度的增加，储能也增多，再结晶的驱动力就越大，因此再结晶温度越低，同时等温退火时的再结晶速度也越快。

2 原始晶粒尺寸：在其他条件相同的情况下，金属的原始晶粒越细小，则变形的抗力越大，冷变形后储存的能量较高，再结晶温度则较低。

3 微量溶质原子：微量溶质原子显著提高再结晶温度，原因可能是溶质原子与位错及

晶界间存在着交互作用，使溶质原子倾向于在位错及晶界处偏聚，对位错的滑移与攀移和晶界的迁移起着阻碍作用，从而不利于再结晶的形核和核的长大，阻碍再结晶过程。

4 第二相粒子：第二相粒子的存在既可能促进基体金属的再结晶，也可能阻碍再结晶。

影响再结晶后的晶粒大小的因素（主要为变形程度和退火温度）

#### a. 变形度的影响

变形度很小时，造成的储存能不足以驱动再结晶，晶粒度不变。

变形度增大到临界变形度内（一般金属在 2%—10%），再结晶后晶粒粗大。

这是因为此时变形度小，再结晶核心很少，生长速度却很大。

变形度大于临界变形度之后，变形度愈大，再结晶后晶粒越细。因为此时随变形度增加，再结晶形核率和长大速度都增加，但形核率增加大于长大速度。

变形度达到一定程度后，晶粒大小基本保持不变。

#### b. 退火温度的影响

当变形度和退火保温时间一定时，退火温度越高，再结晶后晶粒度越粗。提高退火温度可使再结晶晶粒的长大速度加快。

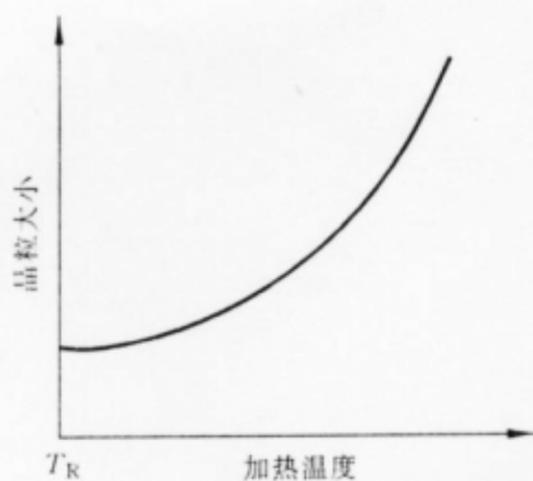


图 2-55 再结晶退火加热温度对晶粒度的影响

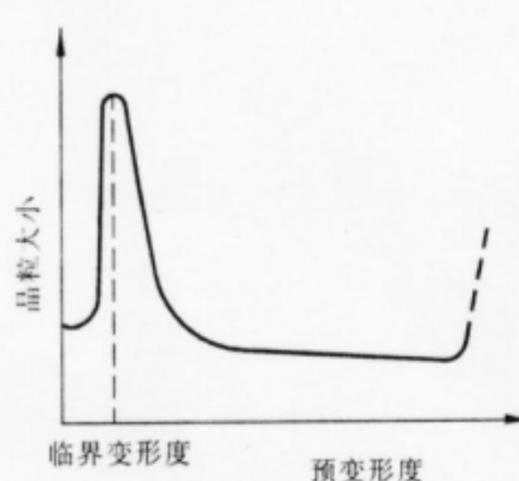


图 2-56 预先变形度与再结晶晶粒度的关系

### 5.3.4 晶粒长大

再结晶结束后，材料通常得到细小等轴晶粒，继续提高加热温度或延长加热时间，将引起晶粒明显长大，使金属的强度、硬度、塑性、韧性等机械性能显著降低。一般情况下晶粒长大是应当避免的现象。晶粒长大是通过晶界移动实现的，晶界移动的驱动力通常来自总的界面能的降低。晶粒长大按其特点可分为两类：正常晶粒长大与异常晶粒长大（二次再结晶）。

#### 正常晶粒长大

正常晶粒长大是在再结晶完成后继续加热或保温过程中，在界面曲率驱动力的作用下，晶粒发生均匀长大的过程。表现为晶粒尺寸分布均匀，连续增大，随温度升高，晶粒的平均尺寸增大。

##### 影响因素：

温度：温度愈高，则晶界迁移速度愈大，因而晶粒长大速度越快。

保温时间：正常晶粒长大时，一定温度下，保温时间越久晶粒越大。

第二相粒子：第二相粒子对界面迁移有约束力，会阻碍界面迁移、晶粒长大。晶粒长大的极限平均直径决定于第二相粒子的尺寸及其体积分数。粒子尺寸愈小，粒子的体积分量愈大，极限的平均晶粒尺寸也愈小。

#### 异常晶粒长大（二次再结晶）

异常晶粒长大是在一定条件下，继晶粒正常、均匀长大后发生的晶粒不均匀长大的过程。长大过程中，晶粒尺寸相差悬殊，少数几个晶粒（核心）择优生长，逐渐吞并周围小晶粒直至这些择优长大的晶粒互相接触，周围细小晶粒消失，全部形成粗大晶粒，过程结束，如图所示。

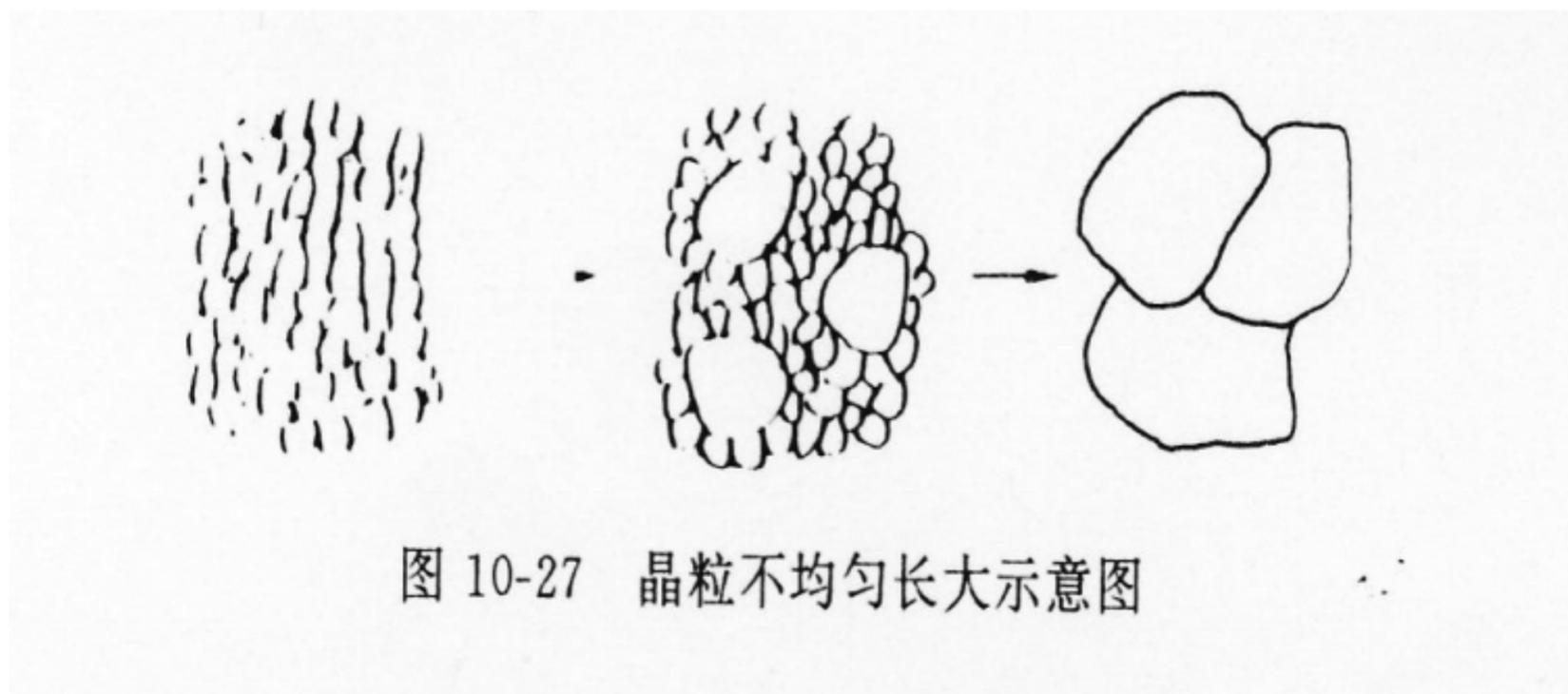


图 10-27 晶粒不均匀长大示意图