

## 材料的强化

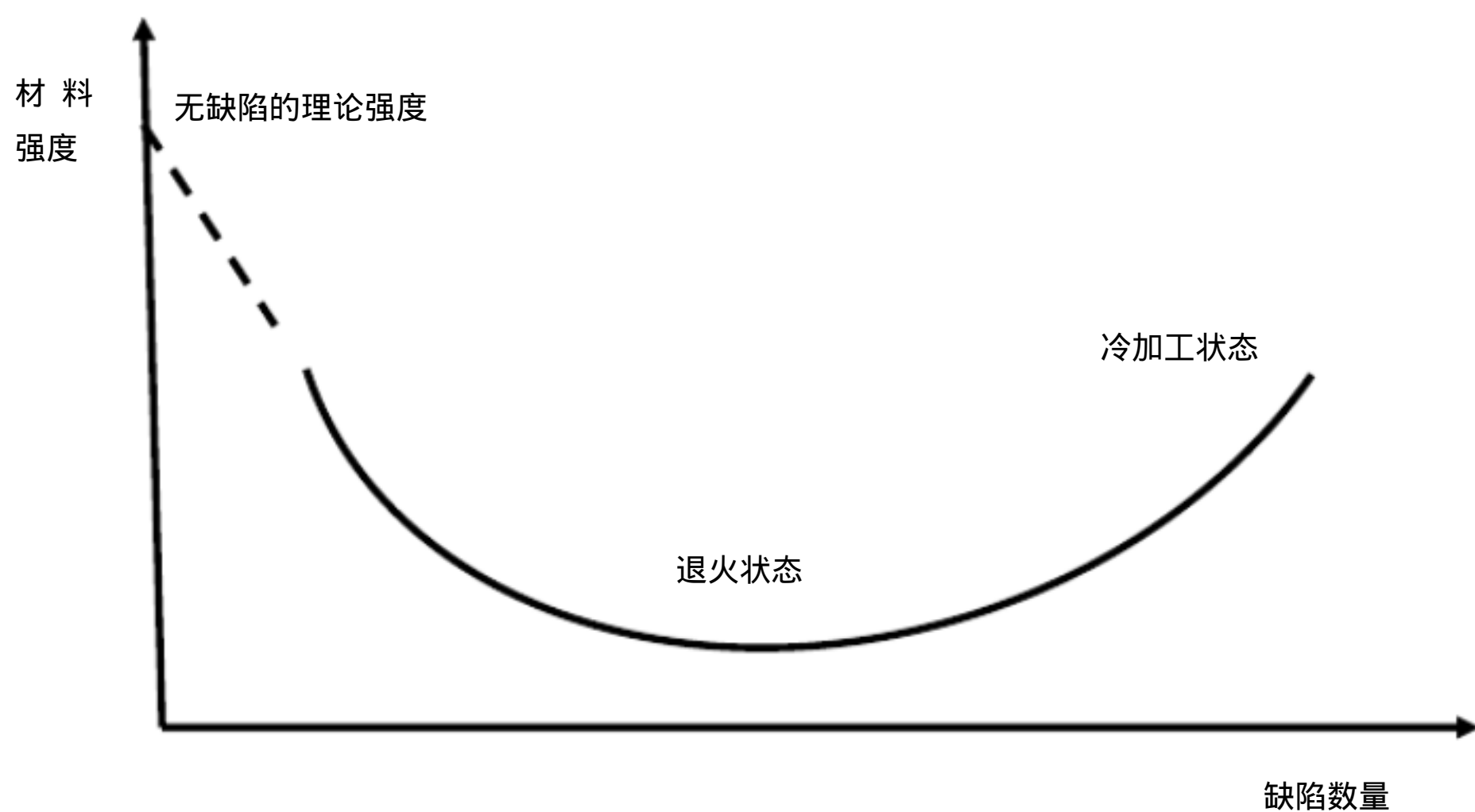
### 强韧化意义

希望材料既有足够的强度，又有较好的韧性，通常的材料二者不可兼得。提高材料的强度和韧性，节约材料，降低成本，增加材料在使用过程中的可靠性和延长服役寿命

### 提高金属材料强度途径

强度是指材料抵抗变形和断裂的能力，提高强度可通过以下两种途径：

- 1 完全消除内部的缺陷，使它的强度接近于理论强度
- 2 大量增加材料内部的缺陷，提高强度



材料强度与缺陷数量的关系

增加材料内部缺陷，提高强度，即在金属中引入大量缺陷，以阻碍位错的运动

四种强化方式：

固溶强化

细晶强化

形变强化（加工硬化）

第二相粒子强化

实际上，金属材料的强化常常是多种强化方式共同作用的结果。

## 一．固溶强化

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。

强化本质：利用点缺陷（间隙原子和置换原子）对位错运动的阻力使金属基体获得强化

强化机理：1 溶质原子的溶入使固溶体的晶格发生畸变，对在滑移面上的运动的位错有阻碍作用；2 位错线上偏聚的溶质原子对位错的钉扎作用。

### 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。
- 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。

固溶强化效果与溶质原子的质量分数成正比关系。大多数溶质原子在室温的溶解度比较小，为了提高固溶度从而提高固溶强化的效果，可以将其加热到较高温度，经过保温后快速冷却到室温，使溶质原子来不及析出而得到过饱和固溶体，这就是固溶处理。

经过固溶处理后还可以经过时效处理进一步提高其强度。对过饱和固溶体在适当温度下进行加热保温，析出第二相，使强度硬度升高的热处理工艺称为时效。时效硬化的本质是从过饱和固溶体中析出弥散第二相，属于第二相强化途径。

固溶和时效广泛用于有色金属的强化，如铜合金，铝合金，镁合金，钛合金等。

## 二．细晶强化

定义 — 用细化晶粒的方法提高材料强度的方法称为 细晶强化。

细晶强化最显著的特点： 不仅可以提高材料的强度硬度， 也可以提高塑性韧性。

强化机理

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，对位错运动的阻碍越大，强度也就越高。

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， 从而具有良好的综合力学性能。

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

## 三．形变强化（加工硬化）

定义

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。

强化机理：

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。

不利方面

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

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。

## 四．第二相粒子强化

### 分类

通过相变（热处理）获得 — 析出硬化、沉淀强化或时效强化  
通过粉末冶金法（烧结或内氧化）获得 — 弥散强化

### 强化效果

相粒子的强度、体积分数、间距、粒子的形状和分布等都对强化效果有影响  
第二相粒子强化比固溶强化的效果更为显著

### 强化机理（第二相质点的存在阻碍基体中的位错运动）

第二相粒子与基体晶粒尺寸属同一数量级的块状分布（聚合型）：

一般认为，块状第二相阻碍滑移使基体产生不均匀塑性变形，由于局部塑性变形约束而导致强化。

第二相粒子细小而弥散地分布在基体晶粒中（弥散型）：

可将第二相粒子分为不可变形的和可变形的粒子

不可变形的粒子

根据位错理论，位错线只能绕过不可变形的第二相粒子，为此，必须克服弯曲位错的线张力。绕过粒子的位错线在粒子周围留下位错环，随着绕过粒子的位错数量增加，位错环增多，相当于粒子的间距减小，对位错线运动的阻力就越大。

可变形的粒子

对于可变形的第二相质点，位错可以切过，使之同基体一起产生变形，由此也能提高屈服强度。这是因为质点与基体间晶格错排及位错线切过第二相质点产生新的界面需要做功等原因造成的。

切过粒子引起强化的机制

短程交互作用：

位错切过粒子形成新的表面积，增加了界面能

位错扫过有序结构时会形成错排面或叫做反相畴，产生反相畴界面能

粒子与基体的滑移面不重合时，会产生割阶；粒子的派-纳力  $P-N$  高于基体等，都会引起临界切应力增加

长程交互作用（作用距离大于  $10b$ ）：

由于粒子与基体的点阵不同（至少是点阵常数不同），导致共格界面失配，从而造成应力场