

第九章 回复、再结晶与金属热加工

金属经过塑性变形，会发生加工硬化现象，而且内部产生残余内应力。为了去除内应力，或者为了消除加工硬化现象以便继续变形，需要对冷变形金属进行加热处理。

由于变形金属内部存在严重的晶格畸变，原子处于不稳定状态，本身就有向稳定状态转变的倾向。加热时，原子的活动扩散能力提高了，促使其向稳定状态转变，并使金属的组织结构和性能发生变化。这种变化可分为**回复**（recovery）、**再结晶**（recrystallization）和**晶粒长大**（grain growth）这三个阶段，如图 4.11 所示。

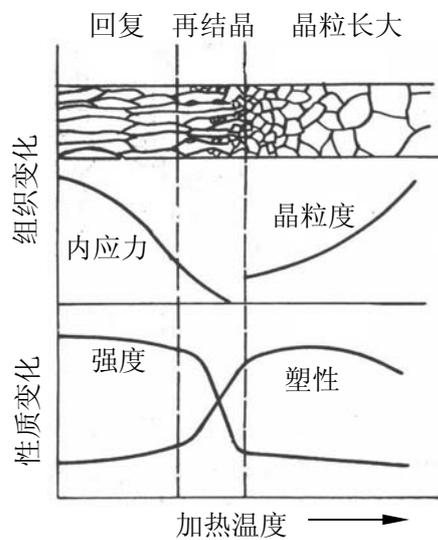


图 4.11 变形金属加热时组织和性能变化的示意图

9-1 回复

回复是指冷变形金属在加热温度较低时，金属中的一些点缺陷和位错的迁移，使晶格畸变逐渐减小，内应力逐渐降低的过程。这时因为原子活动能力不大，所以金属的晶粒大小和形状尚无明显的变化，因而其强度、硬度和塑性等机械性能变化不大，而只会使内应力及电阻率等理化性能显著降低。

工业上，对冷变形后金属要保持其因加工硬化而提高的强度、硬度，又需消除残余内应力的，则可在低温回复阶段加热保温，以基本去除其内应力，这种热处理称为**去应力退火**。例如，用冷拉钢丝绕制弹簧，绕成后应在 280~300℃消除应力退火使其定形。

9-2 再结晶

冷变形金属的加热温度高于回复阶段以后，当温度继续升高时，由于原子活动能力增大，金属的显微组织发生明显的变化，由破碎拉长或压扁的晶粒变为均匀细小的等轴晶粒。这一过程实质上是一个新晶粒重新形核和长大的过程，故称为“再结晶”。再结晶以后，只是晶粒外形发生了变化，而晶格类型并未变，仍与原始晶粒相同。

再结晶的晶核一般是在变形晶粒的晶界或滑移带及晶格畸变严重的地方形成，晶核形成后，依靠原子的扩散移动，向附近周围长大，直至各晶核长大到相互接触，形成新的等轴晶粒为止。

通过再结晶，金属的显微组织发生了彻底的改变，故其强度和硬度显著降低，而塑性和韧性大大提高，加工硬化现象得以消除，变形金属的所有机械和物理性能全部恢复到冷变形以前的状态。因此，再结晶在工业上主要用于金属在冷变形之后或在变形过程中，使其硬度降低，塑性升高，以便于进一步加工，这样的热处理称为再结晶退火。

9-3 晶粒长大

再结晶完成以后，若再继续升高加热温度或过分地延长加热时间，金属的晶粒便会继续长大。因为通过晶粒长大可减少晶界的面积，使表面能降低，所以晶粒长大是一个降低能量的自发过程。只要温度足够高，使原子具有足够的活动能力，晶粒便会迅速长大。晶粒长大实际上是一个晶界迁移的过程，即通过一个晶粒的边界向另一晶粒的迁移，把另一晶粒中的晶格位向逐步转变为与这个晶粒相同的晶格位向，于是另一晶粒便逐步地被这一晶粒“吞并”，合并成一个大晶粒。如图 4.12 所示。

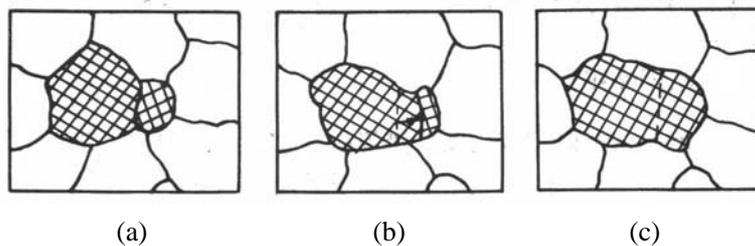


图 4.12 晶粒长大示意图

通常在再结晶后获得细小均匀的等轴晶粒的情况下，晶粒长大的速度并不很大，但如果原来的变形不均匀，经过再结晶后得到的是大小不均匀的晶粒，那么，由于大小晶粒之间的能量相差悬殊，便很容易发生大晶粒吞并小晶粒而愈长愈大的现象，从而得到异常粗大的晶粒，使金属的机械性能显著降低。为了区别于通常的晶粒正常长大，常把晶粒的这种不均匀急剧长大的现象称为“二次再结晶”。

9-4 再结晶温度和再结晶晶粒大小的影响因素

一、再结晶温度及其影响因素

再结晶不是一个恒温过程，而是在一定的温度范围内进行的。工程上规定，大变形量（~70%以上）的冷变形金属经一小时保温，能完成再结晶（>95%转变量）的最低温度，称为该金属的**再结晶温度**。

每种金属的再结晶温度都各不相同，即便是同一种金属，其再结晶温度也不是固定的，而是受到诸多因素影响：

(1)冷变形程度：冷变形程度越大，金属畸变能越高，向低能量状态变化的倾向也越大，因此再结晶温度越低，如图 4.13 所示。当变形达到一定程度之后，再结晶温度将趋近某一最低极限值，称为“**最低再结晶温度**”。

实验证明，工业纯金属的熔点与最低再结晶温度之间有如下关系：

$$T_{\text{再}} \approx (0.35 \sim 0.40)T_{\text{熔}} \quad (4.6)$$

式中温度按热力学温度（绝对温度）计。

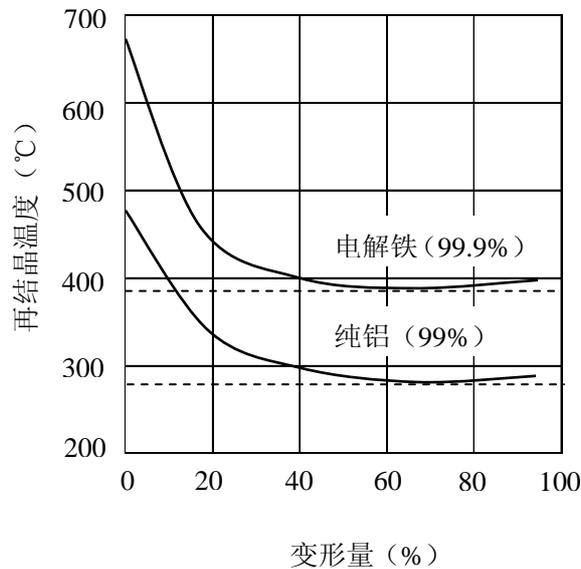


图 4.13 金属的再结晶温度与变形量的关系

(2)保温时间：加热时保温时间越长，原子的扩散移动越能充分进行，再结晶温度就越低。

(3)原始晶粒度：原始晶粒越粗大，变形阻力越小，变形后内能集聚较少，所以再结晶温度较高。

(4)金属纯度及成分：金属中加入的合金元素或所含的杂质元素，常会阻碍原子的扩散与晶界的迁移，推迟再结晶的进行，因此金属的纯度低，可以明显提

高再结晶温度。

考虑到以上各因素的影响，为了缩短退火周期，在工业上选择再结晶退火温度，一般比最低再结晶温度高 100~200℃。

表 4.1 为几种工业上常用的金属及合金的再结晶温度。

表 4.1 几种金属及合金的再结晶温度

材 料	再结晶温度 (°C)	材 料	再结晶温度 (°C)
铜 (99.999%)	120	铜 (无氧铜)	200
铜-5%锌	320	铜-5%铝	290
铝 (99.999%)	80	铝 (99.0%)	290
镍 (99.99%)	370	镍 (99.4%)	600

二、再结晶后晶粒大小的因素

变形金属在再结晶退火后得到的晶粒大小，不仅影响到金属的强度和塑性，还影响到金属的韧性，因此控制再结晶后的晶粒大小是非常重要的。影响再结晶后晶粒大小的因素主要有以下几种：

(1) 退火加热温度：再结晶退火时加热温度越高，金属的晶粒尺寸越大，如图 4.14 所示。当加热温度一定时，时间过长也会使晶粒长大，但其影响不如温度的影响大。

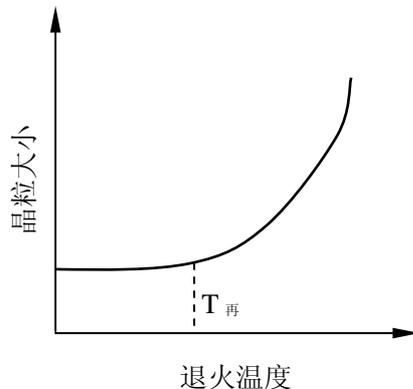


图 4.14 再结晶退火温度与晶粒大小的关系

(2) 冷变形程度：金属的冷变形程度是影响再结晶晶粒大小的另一重要因素。图 4.15 表明再结晶后的晶粒大小与冷变形程度的关系。当金属的冷变形量在 2%~10% 的范围内时，再结晶后的晶粒会异常粗大。通常把再结晶时晶粒异常粗大所对应的冷变形量称为“**临界变形量**”。当变形量超过临界变形量后，随着变形量的增加，再结晶的晶粒逐渐变细。因此，为了获得优良的组织 and 性能，在制定压力加工工艺时，必须避免在临界变形量附近进行冷变形。

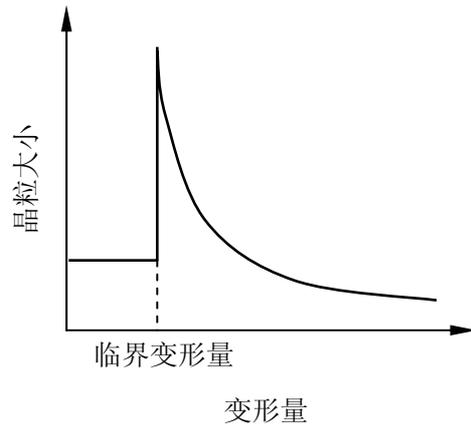


图 4.15 再结晶后的晶粒大小与冷变形程度的关系

为了综合考虑加热温度和冷变形程度对再结晶晶粒大小的影响，常将三者的关系绘在一张立体图中，称为金属的**再结晶图**，作为制定热加工工艺的参考。如图 4.16 所示。

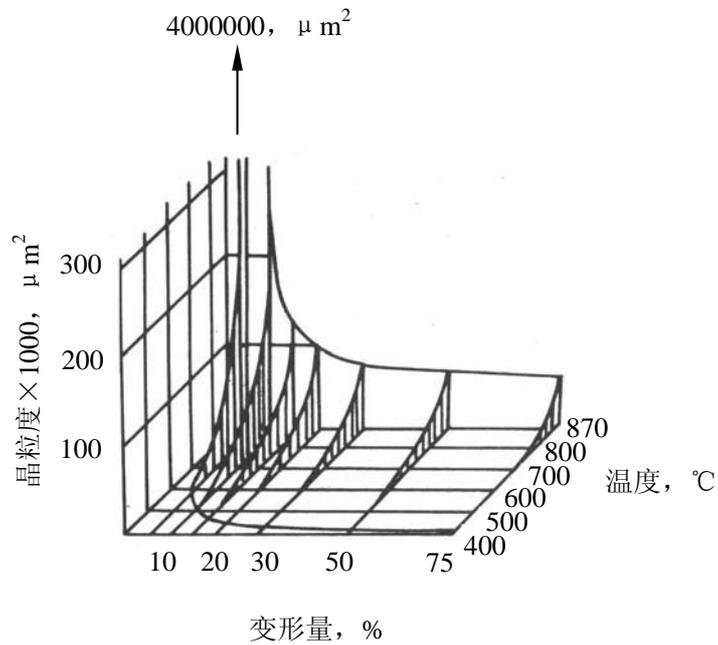


图 4.16 纯铁的再结晶图

9-5 金属的热加工

如前所述，冷塑性变形引起的加工硬化，可以通过加热发生再结晶来加以消除。如果金属在再结晶温度以上进行压力加工，那么塑性变形所引起的加工硬化就可以立即被再结晶过程所消除。在再结晶温度以上的加工称为**热加工**，在再结晶温度以下的加工称为**冷加工**。

在热加工过程中，金属内部同时进行着加工硬化和再结晶软化这两个相反的过程，不过此时的再结晶是在加工的同时发生的，称为**动态再结晶**，它与上一章介绍的冷加工后退火时发生的再结晶是不尽相同的。有时在热加工过程中硬化和软化这两个因素不能刚好全部抵消。

热加工虽然不致引起加工硬化，但也会使金属的组织 and 性能发生很大的变化，如：

(1) 通过热加工，可以使铸态金属中的气孔焊合，从而使其致密度得以提高。

(2) 通过热加工，可以使铸态金属中的粗大枝晶和柱状晶粒破碎，从而使其晶粒细化，机械性能得以提高。

(3) 通过热加工，可以使铸态金属中的枝晶偏析和非金属夹杂的分布发生改变，使它们沿着变形的方向细碎拉长，形成所谓热加工“**纤维组织**”，又称“**流线**”，从而使金属的机械性能具有明显的各向异性，纵向上的性能显著优于横向上的。因此，热加工时应力求工件流线分布合理。图 4.17(a)为锻造曲轴的合理流线分布，它可保证曲轴工作时所受的最大拉应力与流线一致，而外加切应力或冲击力与流线垂直，使曲轴不易断裂；图 4.17(b)为切削加工制成的曲轴，其流线分布不合理，易沿轴肩发生断裂。

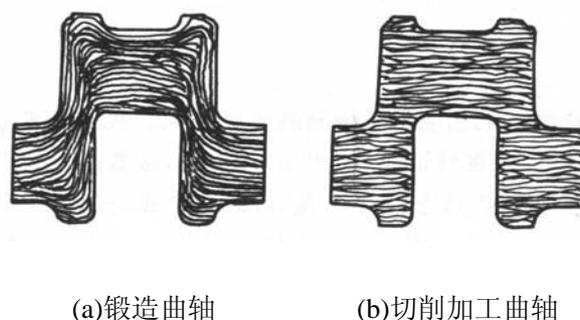


图 4.17 曲轴的流线分布