



北京航空航天大学《材料综合911》考研辅导系列

《金属学原理》考点与典型题精讲

第5讲 变形金属的回复、再结晶

主讲人：何 蓓

网学天地

www.e-studysky.com

一、冷变形金属在加热时的组织与性能变化

1. 冷变形金属进行退火之后的组织和性能变化

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。

(1) **回复**是指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；

(2) **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；

(3) **晶粒长大**是指再结晶结束之后晶粒的继续长大。

(1) 在回复阶段，由于不发生大角度晶界的迁移，所以晶粒的形状和大小与变形态的相同，仍保持着纤维状或扁平状，从光学显微组织上几乎看不出变化。

(2) 在再结晶阶段，首先是在畸变度大的区域产生新的无畸变晶粒的核心，然后逐渐消耗周围的变形基体而长大，直到形变组织完全改组为新的、无畸变的细等轴晶粒为止。

(3) 最后，在晶界表面能的驱动下，新晶粒互相吞食而长大，从而得到一个在该条件下较为稳定的尺寸，称为晶粒长大阶段。

2. 冷变形金属在退火过程中的性能和能量变化

(1) 强度与硬度。回复阶段的硬度变化很小，约占总变化的 $1/5$ ，而再结晶阶段则下降较多。可以推断，强度具有与硬度相似的变化规律。上述情况主要与金属中的位错机制有关，即回复阶段时，变形金属仍保持很高的位错密度，而发生再结晶后，则由于位错密度显著降低，故强度与硬度明显下降。

(2) 电阻。变形金属的电阻在回复阶段已表现明显的下降趋势。因为电阻率与晶体点阵中的点缺陷（如空位、间隙原子等）密切相关。点缺陷所引起的点阵畸变会使传导电子产生散射，提高电阻率。它的散射作用比位错所引起的更为强烈。因此，在回复阶段电阻率的明显下降就标志着在此阶段点缺陷浓度有明显的减小。

(3) 内应力。在回复阶段，大部或全部的宏观内应力可以消除，而微观内应力则只有通过再结晶方可全部消除。

(4) 亚晶粒尺寸。在回复的前期，亚晶粒尺寸变化不大，但在后期，尤其在接近再结晶时，亚晶粒尺寸就显著增大。

(5) 密度。变形金属的密度在再结晶阶段发生急剧增高，显然除与前期点缺陷数目减小有关外，主要是在再结晶阶段中位错密度显著降低所致。

(6) 储能的释放。当冷变形金属加热到足以引起应力松弛的温度时，储能就被释放出来。回复阶段时各材料释放的储存能量均较小，再结晶晶粒出现的温度对应于储能释放曲线的高峰处。

二、回复

1. 回复动力学

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，

回复特征通常可用一级反应方程来表达 $\frac{dx}{dt} = -cx$ 。

式中， t 为恒温下的加热时间； x 为冷变形导致的性能增量经加热后的残留分数； c 为与材料和温度有关的比例常数。

c 值与温度的关系具有典型的热激活过程特点，可由阿累尼乌斯（Arrhenius）方程来描述： $c = c_0 e^{-Q/RT}$ 。式中， Q 为激活能； R 为气体常数； T 为绝对温度； c_0 为比例常数。

回复方程式： $\ln t = A + \frac{Q}{RT}$ 。式中， A 为常数。

作 $\ln t$ - $1/T$ 图，如为直线，则由直线斜率可求得回复过程的激活能。

2. 回复机制

(1) 低温回复。低温时，回复主要与点缺陷的迁移有关。

(2) 中温回复。加热温度稍高时，会发生位错运动和重新分布小回复的机制主要与位错的滑移有关。

(3) 高温回复。高温 ($\sim 0.3T_m$) 时，刃型位错可获得足够能量产生攀移。通过攀移使同一滑移面上异号位错相消，位错密度下降，位错重排成较稳定的组态，构成亚晶界，形成回复后的亚晶结构。

总之，回复过程中电阻率的明显下降主要是由于过量空位的减少和位错应变能的降低；内应力的降低主要是由于晶体内弹性应变的基本消除；硬度及强度下降不多则是由于位错密度下降不多，亚晶还较细小之故。

三、再结晶

再结晶的驱动力是变形金属经回复后未被释放的储存能（相当于变形总储能的90%）。通过再结晶退火可以消除冷加工的影响，故在实际生产中起着重要作用。

1. 再结晶过程

再结晶是一种形核和长大过程，即通过在变形组织的基体上产生新的无畸变再结晶晶核，并通过逐渐长大形成等轴晶粒，从而取代全部变形组织的过程。

(1) 形核。

晶界弓出形核。对于变形程度较小（一般小于20%）的金属，其再结晶核心多以晶界弓出方式形成，即应变诱导晶界移动或称为凸出形核机制。

亚晶形核。此机制一般是在大的变形度下发生。借助亚晶作为再结晶的核心，其形核机制又可分为以下两种：①亚晶合并机制；②亚晶迁移机制。

上述两机制都是依靠亚晶粒的粗化来发展为再结晶核心的。亚晶粒本身是在剧烈应变的基体只通过多边化形成的，几乎无位错的低能量地区，它通过消耗周围的高能量区长大成为再结晶的有效核心，因此，随着形变度的增大会产生更多的亚晶而有利于再结晶形核。这就可解释再结晶后的晶粒为什么会随着变形度的增大而变细的问题。

(2) 长大。再结晶晶核形成之后，它就借界面的移动而向周围畸变区域长大。

2. 再结晶温度及其影响因素

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（名词解释）。

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。

(1) 变形程度。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。但当变形量增大到一定程度后，再结晶温度就基本上稳定不变了。对工业纯金属，经强烈冷变形后的最低再结晶温度 TR/K 约等于其熔点 T_m/K 的0.35~0.4。

(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。微量溶质原子的存在对金属的再结晶有很大的影响。微量溶质原子存在显著提高再结晶温度的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。

(5) 再结晶退火工艺参数。加热速度、加热温度与保温时间等退火工艺参数，对变形金属的再结晶有着不同程度的影响。若加热速度过于缓慢时，再结晶温度上升。当变形程度和退火保温时间一定时，退火温度愈高，再结晶速度愈快。

3. 再结晶后的晶粒大小

由于晶粒大小对材料性能将产生重要影响，因此，调整再结晶退火参数，控制再结晶的晶粒尺寸，在生产中具有一定的实际意义。

(1) 变形度的影响。当变形程度很小时，晶粒尺寸即为原始晶粒的尺寸，这是因为变形量过小，造成的储存能不足以驱动再结晶，所以晶粒大小没有变化。当变形程度增大到一定数值后，此时的畸变能已足以引起再结晶，但由于变形程度不大， N/G 比值很小，因此得到特别粗大的晶粒。通常，把对应于再结晶后得到特别粗大晶粒的变形程度称为“临界变形度”。当变形量大于临界变形量之后，变形度愈大，晶粒愈细化。

(2) 退火温度的影响。退火温度对刚完成再结晶时晶粒尺寸的影响比较弱。提高退火温度可使再结晶的速度显著加快，临界变形度数值变小。

四、晶粒长大

再结晶结束后，材料通常得到细小等轴晶粒，若继续提高加热温度或延长加热时间，将引起晶粒进一步长大。

对晶粒长大而言，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），前者表现为大多数晶粒几乎同时逐渐均匀长大；而后者则为少数晶粒突发性的不均匀长大。

1. 正常长大

晶粒的长大是连续地，均匀地进行，晶粒平均尺寸的增大也是连续的。

2. 影响晶粒长大的因素

(1) 温度。温度越高，晶粒长大速度越快，晶粒越粗大；

(2) 第二相。晶粒长大的极限半径 $R=4/3(r/\phi)$ ，第二相质点的数量越多，颗粒越小，则阻碍晶粒长大的能力越强；

(3) 杂质或合金元素。阻碍晶界迁移，特别是晶界偏聚显著的元素，其阻碍作用更大。当温度很高时，晶界偏聚可能消失，其阻碍作用减弱甚至消失；

(4) 晶粒位向差。位向差大，晶界迁移速度快。

3. 再结晶晶粒正常长大的驱动力及长大方向

(1) 驱动力：界面能差。界面能越大，曲率半径越小，驱动力越大。

(2) 长大方向：指向曲率中心，而再结晶晶核的长大方向相反。

4. 再结晶晶粒正常长大后的稳定形状

晶界趋于平直；晶界夹角趋于 120° ；二维坐标中晶粒边数趋于6。

五、再结晶组织与退火孪晶

1. 再结晶组织

通常具有变形组织的金属经再结晶后的新晶粒若仍具有择优取向，称为再结晶组织。

再结晶组织与原变形组织之间可存在以下三种情况：

- (1) 与原有的组织相一致；
- (2) 原有组织消失而代之以新的组织；
- (3) 原有组织消失不再形成新的组织。

2. 退火孪晶

某些面心立方金属和合金如铜及铜合金，镍及镍合金和奥氏体不锈钢等冷变形后经再结晶退火后，其晶粒中会出现退火孪晶。

三种典型的退火孪晶形态：A为晶界交角处的退火孪晶；B为贯穿晶粒的完整退火孪晶；C为一端终止于晶内的不完整退火孪晶。孪晶带两侧互相平行的孪晶界属于共格的孪晶界，由 (111) 组成；孪晶带在晶粒内终止处的孪晶界，以及共格孪晶界的台阶处均属于非共格的孪晶界。

典型题精讲

1. 试述冷变形金属加热过程中（回复、再结晶过程中）组织结构及性能变化情况。（重点考题）

答：冷变形金属经重新加热退火之后其组织和性能会发生变化观察不同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取代变形晶粒的过程；

晶粒长大是指再结晶之后晶粒的继续长大。

(1) 组织结构变化。

回复—①点缺陷及晶格弹性畸变消除；②位错密度显著降低；③形成亚晶及亚晶合并。

回复阶段由于不发生大角度晶界的迁移，所以晶粒的形状和大小与变形态相同，仍保持纤维状或者扁平状，从光学显微镜下几乎看不出来变化。

再结晶—完全无应变的等轴晶组织。再结晶阶段首先在畸变度大的区域产生新的无畸变晶粒的核心，然后逐渐消耗周围的变形机体而长大直至形变组织完全变为新的无畸变细等轴晶粒为止。

(2) 性能变化。

回复—①内应力急剧降低；②电阻显著降低；③密度增加，强度提高，耐腐蚀性提高。

再结晶—①内应力完全消除；②强度硬度降低；③塑性大幅提高；④密度急剧增加。

2. 试述影响再结晶过程及再结晶晶粒度的主要因素，简述回复过程及再结晶形核的微观机制。（北航版答案）

答：（1）影响再结晶温度的因素（冷变形金属开始进行再结晶的最低温度称为再结晶温度）：

① **变形程度的影响**：变形程度越大储能越多，再结晶的驱动力越大，再结晶温度越低。

② **原始晶粒尺寸**：金属的原始晶粒越细，则变形抗力越大，冷变形后储存的能量越高，再结晶温度越低。

③ **微量溶质原子**：微量溶质原子的存在能显著提高再结晶温度。可能是由于溶质原子与位错及晶界间交互作用，使溶质原子在位错和晶界处偏聚阻碍位错滑移和晶界迁移，不利于再结晶形核和核长大，阻碍再结晶过程。

④ **第二相粒子**：比较复杂。

⑤ **再结晶退火工艺参数**：加热速度、加热温度与保温时间等退火工艺参数对变形金属的再结晶有着不同程度的影响。

(2) 再结晶晶粒大小的影响因素:

①**变形度的影响**: 当变形度很小时晶粒尺寸即为原始晶粒尺寸, 当变形程度增大到一定数值后 (临界变形度), 得到特别粗大的晶粒 (在临界变形度时再结晶晶粒尺寸最大), 在超过临界变形度后, 变形度越大, 晶粒越细化。

②**退火温度的影响**: 退火温度对刚完成再结晶时晶粒尺寸的影响比较弱, 但是提高再结晶温度可使再结晶的速度显著加快, 临界变形度数值变小。在再结晶完成后的晶粒长大阶段, 温度越高, 晶粒越粗。

(3) **回复过程**: 冷变形金属退火时发生了点缺陷及点缺陷群的消除, 位错相消和新排列, 多边化或亚晶的形成和长大, 再结晶晶粒形成等组织变化的阶段。

(4) **再结晶形核**: 由小角度晶面和与之相连接的具有较大取向差的界面间交互作用能作为驱动力, 亚晶间的聚合导致再结晶形核。

(5) 再结晶结束后晶粒长大过程，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以分为两类：

①**正常晶粒长大**，表现为大多数晶粒几乎同时逐渐均匀长大。

②**异常晶粒长大**：少数晶粒突发性的不均匀长大。

正常晶粒长大的驱动力是降低其总的界面能，通过大角度晶界的迁移来进行。

(6) **回复的位错机制**：异号位错互相抵消，位错重新排列，形成位错墙（小角度晶界）。

再结晶形核的位错机制：亚晶的合并（在晶界位错的攀移或者滑移），亚晶的长大，大角度晶界的弓出。

3. A、B两种金属在室温下塑性变形，变形后发现A具有纤维状晶粒且其亚结构为位错胞，B具有细小的等轴晶组织，试分析其原因。

答：（1）A经过了动态回复，通过位错重组形成了位错密度较低的胞状组织，回复得越多胞壁组织越明显。当温度大约高于熔点一半时，胞壁成为位错的三维网络，故A变形后具纤维状晶粒且其亚结构为位错胞。

（2）B是在应变速率较小，温度较高时，经动态再结晶，随着应变的增加周期地进行。每一次再结晶循环的结果，都使新的等轴晶粒取代变形晶粒，故B形成细小等轴晶组织。

谢谢!