

## 第八章 形变

### 一、学习的意义、基本线路及要求

强度和塑性两个力学性能指标都与形变有密切关系，在材料加工及使用中也都涉及形变，在微观上两个性能指标的高低都与位错运动的难易有关，位错运动难与容易分别对应高的强度和高的塑性。晶体材料（金属、陶瓷、单相、多相、低温、高温）变形时的不同行为及内在原因，对加工成合格产品或更限度地发挥其潜力至关重要。形变过程应用在结构件的生产及使用上，如汽车冲压板，船板桥梁，3C 产品等。

讲解的基本线路是：1) 研究形变过程的意义；2) 单晶形变：滑移系，分切应力定律，交/多系滑移及其判断；晶体的转动/取向择优；应力应变曲线特征；3) 机械孪生：特点、要素、组织、不同结构中的孪生；孪生与位错关系；孪生的应力应变曲线；4) 扭折带与形变带；5) 多晶形变：晶界影响/取向不同与形变不同时性/形变的协调性与  $\rho$  的关系；加工硬化；形变组织变化（晶粒形状的变化/亚结构、形变不均匀区/内应力）；6) 形变织构：取向的概念及取向择优，变化原因；轧制压缩是的变化规律；织构的表达：数字/图形。

学习本章后应掌握：1) 形变的基本方式，微观上如何实现，各典型晶体结构中的滑移及孪生要素。2) 相关的理论计算，滑移量、孪生量；3) 组织变化基本规律；4) 加工硬化原理，单、多晶变形时的差异；5) 形变造成取向择优的原因、表达方式及对性能的影响。

### 二、主要内容

材料的变形有弹性变形、塑性变形或粘滞性流变等。金属塑性变形的本质是位错运动，滑移靠全位错运动完成（不全位错滑移至少造成层错），孪生由不全位错运动完成。位错的核心结构决定了材料塑性变形的难易，位错宽度窄的材料滑移难，相反，位错宽度大的材料滑移容易而塑性好；位错核心单纯沿滑移面扩展时，对应材料的临界分切应力对温度变化不敏感，相反，位错易作非共面扩展时，其运动难易受热激活的影响大。交滑移是螺位错先后沿不同滑移面运动的结果，而多系滑移是不同滑移系沿不同  $b$  方向同时开动的结果，尽管两者可能在样品表面产生类似的滑移台阶。对 FCC 材料单晶体，当力轴处于某一取向时，可通过计算各滑移系的取向因子、或利用标准极图上的映射原则、或对单胞的分析来确定首先开动的滑移系。不论是哪种方式的塑性变形，晶粒的取向都会发生不同的但有规律的转动；拉伸时单系滑移使滑移方向力图与力轴平行，压缩时滑移面力图与压缩轴垂直。但单系滑移到一定程度会出现多系滑移，相继发生超射现象。因宏观滑移及塑性屈服都是位错微观运动及相互间交互作用的结果，不论是以 F-R 源模型、位错间的长程作用还是短程作用机制，都能导出屈服强度  $\sigma = \alpha G \frac{b}{l} = \alpha G b \sqrt{\rho}$  的关系。应力应变曲线是材料内部不同形变机制或形变模式相互作用的结果和表现，因此应力应变曲线的变化规律与微观形变机制有对应性。单晶体在软取向下的应力应变曲线可分为三个阶段，易滑移阶段、线性硬化阶段和动态回复阶段。每个阶段都有特定的位错相互作用行为或特征。易滑移阶段以单系滑移为主，位错间强烈的交互作用造成的线性硬化阶段、位错交滑移摆脱障碍的动态回复阶段。孪生是另一种塑性变形机制，与滑移有多方面的差异，出现在滑移系少的金属或低层错能的 FCC 金属中。孪生的难易还与晶粒取向、孪生切变量  $s$ 、形变温度及应变速率有关。单晶体孪生时的应力应变曲线出现锯齿状，但多晶难以出现这个特点。以滑移为主和以孪生为主发生时的形变组织明显不同，它们对塑性的贡献不同、取向变化的方式不同，受温度的影响也不同。从低应变量下的位错缠结、稠密位错墙、显微带，到较大变形量下的扭折带、形变带、层带、过渡带、切变带，其中过渡带、切变带是典型的形变不均匀区，它们是高位错储能区，也是再结晶过程（下一章介绍）的优先形核地点。多晶中晶界的存在阻碍位错运动，迫使晶粒间的应变协调而造成晶界强化。多晶中的形变不均匀性表现在不同晶粒滑移

系开动的早晚和多少不同，还表现在同一晶粒内不同区域开动的滑移系多少不同。后者导致晶粒的碎化及新大角晶界的产生。多晶大应变后必然造成晶粒择优取向，即织构的出现。织造成性能的各向异性，并可能导致退火时新织构的出现。常见的形变织构类型有轧制织构和（拔）丝织构。晶粒取向和织构有不同的含义。织构可用一组面、线密勒指数或 3 个欧拉角的数字表示，也可用极图、反极图或取向分布函数表示。

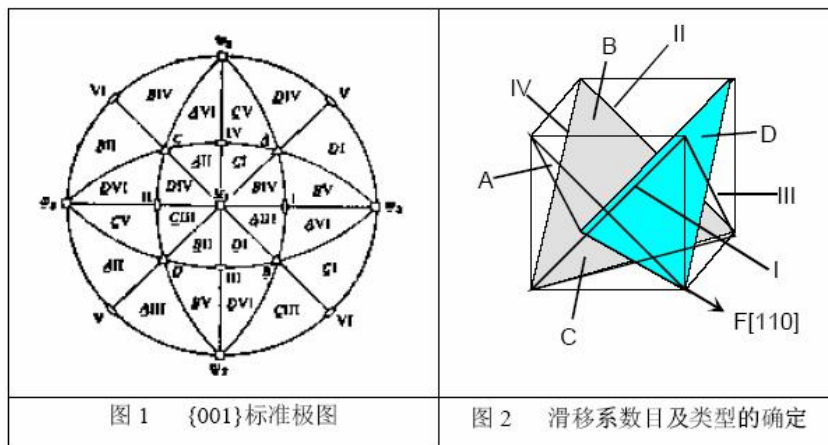
### 三、常见问题及学习难点

- 1) 不同材料滑移难易的本质。
- 2) 交滑移与多系滑移的区别。
- 3) 先开动滑移系的确定。
- 4) 临界分切应力为何与温度有关？
- 5) 不同的加工硬化行为对材料性能有何影响？
- 6) 孪生为何也只发生的特定的晶面及晶向上？
- 7) 孪生在什么情况下会大量出现？
- 8) 孪生有利还是有害？
- 9) 什么是形变带、过渡带、切变带？了解它们有何用？
- 10) 形变织构的图形表达太难理解；了解织构现象有何用？

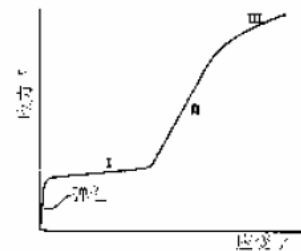
### 四、典型题解答

1. 当力轴为 FCC 单晶的[110]方向时，先开动的滑移系有几个？分别是哪些？

解答：可直接利用晶体学方向间的夹角公式分别算出 12 个滑移系的取向因子  $m = \cos\lambda \cos\phi$ ，最大的  $m$  对应最先开动的滑移系。也可从 (001) 标准极射赤面投影图中找出（见右图 1），[110]极点周围有 4 个曲边三角形，因而有 4 个滑移系会同时开动，分别是 CI, CIII, BII, BIV；还可通过单胞图分析，如右图 2 所示。因 A, D 面与力轴平行，上面的 3 个滑移系不能开动（取向因子为 0）；B, C 面上与力轴垂直的滑移方向对应的滑移系不能开动；只有 B 面上的 IV 和 II 和 C 面上的 I, III 组成的 4 个滑移系可同时开动（因取向因子相同），分别是 BIV (111) [10  $\bar{1}$ ]，BII (111) [01  $\bar{1}$ ]，CI (  $\bar{1}$  11) [011]，CIII (  $\bar{1}$   $\bar{1}$  1) [101]。

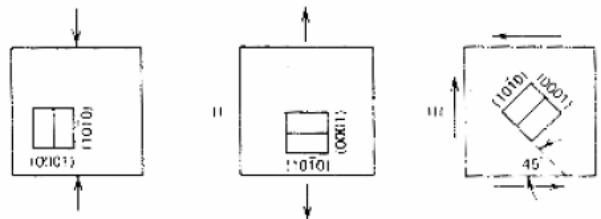


2. 示意画出单晶的应力-应变 ( $\tau$ - $\gamma$ ) 曲线, 并表出各阶段。铝 (层错能约为  $200\text{mJ/m}^2$ ) 和不锈钢 (层错能约为  $10\text{mJ/m}^2$ ) 哪一种材料形变第 III 阶段开始得更早? 这两种材料滑移特征有什么区别?



解: 右图是单晶的应力-应变( $\tau$ - $\gamma$ )曲线的示意图。第 III 阶段是动态回复阶段, 主要的机制是在塞积群中的螺位错交滑移, 使得塞积群前的应力集中得以松弛, 从而使硬化率下降。所以越容易交滑移的材料第 III 阶段开始越早。铝的层错能很高, 位错一般不能扩展, 所以其螺位错容易交滑移; 而不锈钢的层错能很低, 位错通常都会扩展, 所以螺位错不容易交滑移。所以铝在受力时更早进入第 III 阶段。

3.  $c/a=1.800$  的 hcp 金属, 它最可能的滑移系是什么? 如图 8-65 的三种取向及加载方式, 确定哪一种



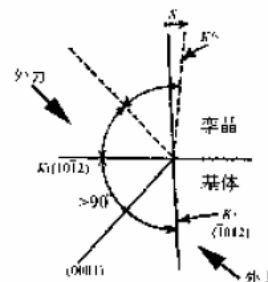
方式会产生滑移, 哪一种方式会产生孪生 (只考虑  $\{10\bar{1}2\}$  的孪生)。

图 8-65

解:  $c/a=1.800$  的 hcp 晶体, 开动的滑移系是  $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 。上图 I 的  $(0001)$  面与力轴垂直, 图 II 的  $(0001)$  面与力轴平行, 所以在滑移系的分切应力都为 0, 这两种情况都不能滑移。图 III 的应力状态相当于在  $45^\circ$  对角线方向上受拉伸应力, 这时力轴和  $(0001)$  面平行, 相当于图 II 的情况, 所以也不能滑移。

$c/a=1.800$  的 hcp 晶体, 孪生元素  $K_1$  为  $\{10\bar{1}2\}$ ,  $\eta_1$  为  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ 。

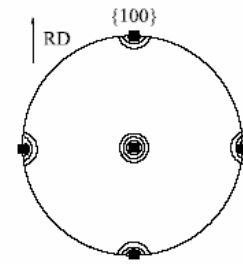
上图 I 的压缩力在  $(10\bar{1}2)$  面及上有分切应力, 又因  $c/a > \sqrt{3}$ , 分切应力的方向必须如右图的  $S$  方向。现加的外力是垂直  $(0001)$  面的压应力, 从图看出, 它在  $K_1$  面的分且应力的方向是可以产生孪晶的, 如果所加的力足够大, 可以发生孪生。上图 II 的拉伸力平行于  $(0001)$  面, 拉伸也可形成孪晶。上图 III 的受力情况与图 II 的等效, 所以也能产生孪晶。



4. 画出立方系  $(100)[001]$  轧制组织的  $(100)$  极图的示意图。

解: 极图是表示被测材料中各个晶粒的某一选定晶面  $\{hkl\}$  的取向分布的图形。对于轧制组织的  $\{hkl\}$  极图, 以轧向 RD、横向 TD 和轧面法线 ND 作坐标架, 以轧面作为投影面, 作出各晶粒

某晶面  $\{hkl\}$  极点在球面上极密度分布的投影。立方系(100)[001]轧制织构在(100)极图表现为晶粒的  $\{100\}$  面极点密集于(100)极图上的  $\{100\}$  极点上，如右示意图所示。



#### 五、小测验及解答

- 1、什么是临界分切应力定律？是不是所有晶体在任何条件下都服从这一定律？举出示例子。（10 分）
- 2、画出典型的面心立方单晶取向下的拉伸应力应变曲线示意图。以位错行为解释各阶段的特点。讨论晶体取向、层错能以及温度对单晶应力应变曲线的影响。（20 分）
- 3、塑性形变有哪些主要方式？比较各种形变方式出现的难易程度。（15 分）
- 4、对  $c/a > 1.633$  的六方单晶，沿  $[0001]$  方向加拉伸力，问可能以哪种方式变形，为什么？（10 分）
- 5、什么形变会产生织构？说明用极图表示织构的方法。画出高斯织构  $\{110\} \langle 001 \rangle$  的  $\{100\}$  极图和  $\{111\}$  极图的示意图？（20 分）
- 6、如何理解孪生方向是有极性的？（10 分）
- 7、简述形变带、过渡带、切变带的含义？了解它们有何用途？（15 分）