



北京航空航天大学《材料综合911》考研辅导系列

《金属学原理》考点与考题精讲

第4讲 金属的塑性变形

主讲人：何 蓓

网学天地
www.e-studysky.com

第一部分 考点精讲

金属在外加应力作用下发生永久变形而不破坏的现象称为金属的**塑性**，其大小通过**断裂延伸率**或者**断面收缩率**表征。

塑性变形：在外加应力超过弹性极限后材料发生的不可恢复的永久变形称为塑性变形。

塑性变形的意义：塑性变形使材料具有优良的冷热加工成性能力，材料能够发生塑性变形是各种机械加工的基础。

一、单晶体的塑性变形

1. 滑移

(1) 滑移线与滑移带。当应力超过晶体的弹性极限后，晶体中就会产生层片之间的相对滑移，大量的层片间滑动的累积就构成晶体的宏观塑性变形。

(2) 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。

通常，滑移面和滑移方向往往是金属晶体中原子排列最密的晶面和晶向。这是因为：原子密度最大的晶面其面间距最大，点阵阻力最小，因而容易沿着这些面发生滑移；至于滑移方向为原子密度最大的方向是由于最密排方向上的原子间距最短，即位错最小。

一个滑移面和此面上的一个滑移方向合起来称为一个滑移系。在其他条件相同时，晶体中的滑移系愈多，滑移过程可能采取的空间取向便愈多，滑移容易进行，它的塑性便愈好。

(3) 滑移的临界分切应力。

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，该滑移系方可以首先发生滑移，该分切应力称为滑移的临界分切应力。

(4) 滑移时晶面的转动。

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，对于只有一组滑移面的hcp，这种现象尤为明显。

(5) 多系滑移。

对于具有多组滑移系的晶体，滑移首先在取向最有利的滑移系（其分切应力最大）中进行，但由于变形时晶面转动的结果，另一组滑移面上的分切应力也可能逐渐增加到足以发生滑移的临界值以上，于是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。

(6) 多系滑移。

两组以上的滑移系上的分切应力同时达到临界值以上，晶体的滑移就可能在两组或更多的滑移面上同时或交替地进行，从而产生多系滑移。

(7) 交滑移。

晶体在两个或多个不同滑移面上沿同一滑移方向进行的滑移。

2. 孪生

孪生是塑性变形的另一种重要形式，它常作为滑移不易进行时的补充。

(1) 孪生变形过程。

切变并未使晶体的点阵类型发生变化，却使均匀切变区中的晶体取向发生变更，变为与未切变区晶体呈镜面对称的取向，这一变形过程称为孪生。

变形与未变形两部分晶体合称为**孪晶**；均匀切变区与未切变区的分界面称为**孪晶界**；发生均匀切变的那组晶面称为**孪晶面**；孪生面的移动方向称为**孪生方向**。

(2) 孪生的特点。

- ① 孪生变形也是在切应力作用下发生的，所需的临界切应力要比滑移时大得多；
- ② 孪生是一种均匀切变，即切变区内与孪晶面平行的每一层原子面均相对于其毗邻晶面沿孪生方向位移了一定的距离，且每一层原子相对于孪生面的切变量跟它与孪生面的距离成正比；
- ③ 孪晶的两部分晶体形成镜面对称的位向关系。

(3) 孪晶的形成。

一是通过机械变形而产生的孪晶，也称为“变形孪晶”或“机械孪晶”，它的特征通常呈透镜状或片状；

二是“生长孪晶”，它包括晶体自气态（如气相沉积）、液态（液相凝固）或固体中长大时形成的孪晶；

三是变形金属在其再结晶退火过程中形成的孪晶，也称为“退火孪晶”，它往往以相互平行的孪晶面为界横贯整个晶粒，是在再结晶过程中通过堆垛层错的生长形成的。它实际上也应属于生长孪晶，系从固体中生长过程中形成。

(4) 孪生的位错机制。由于孪生变形时，整个孪晶区发生均匀切变，其各层晶面的相对位移是借助一个不全位错（肖克莱不全位错）运动而造成的。

二、多晶体的塑性变形（重点）

1. 晶粒取向的影响

晶粒取向对多晶体塑性变形的影响，主要表现在各晶粒变形过程中的相互制约和协调性。

当外力作用于多晶体时，由于晶体的各向异性，位向不同的各个晶体所受应力并不一致。处于有利位向的晶粒首先发生滑移，处于不利方位的晶粒却还未开始滑移。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，会造成空隙而导致材料的破裂。

为了使多晶体中各晶粒之间的变形得到相互协调与配合，每个晶粒不只是在取向最有利的单滑移系上进行滑移，而必须在几个滑移系其中包括取向并非有利的滑移系上进行，其形状才能相应地作各种改变。理论分析指出，多晶体塑性变形时要求每个晶粒至少能在5个独立的滑移系上进行滑移。

可见，多晶体的塑性变形是通过各晶粒的多系滑移来保证相互间的协调，即一个多晶体是否能够塑性变形，决定于它是否具备有5个独立的滑移系来满足各晶粒变形时相互协调的要求。这就与晶体的结构类型有关：滑移系甚多的面心立方和体心立方晶体能满足这个条件，故它们的多晶体具有很好的塑性；相反，密排六方晶体由于滑移系少，晶粒之间的应变协调性很差，所以其多晶体的塑性变形能力可低。

2. 晶界的影响

晶界上原子排列不规则，点阵畸变严重，何况晶界两侧的晶粒取向不同，滑移方向和滑移面彼此不一致，因此，滑移要从一个晶粒直接延续到下一个晶粒是极其困难的，在室温下晶界对滑移具有阻碍效应。

由于晶界数量直接决定于晶粒的大小，因此，晶界对多晶体起始塑变抗力的影响可通过晶粒大小直接体现。多晶体的屈服强度 σ_s 与晶粒平均直径 d 的关系可用著名的霍尔-佩奇 (Hall -Petch) 公式表示： $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ 。式中， σ_0 反映晶内对变形的阻力，相当于极大单晶的屈服强度； K 反映晶界对变形的影响系数，与晶界结构有关。

可见，细晶粒不仅使材料具有较高的强度、硬度，而且也使材料具有良好的塑性和韧性，即具有良好的综合力学性能。

三、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

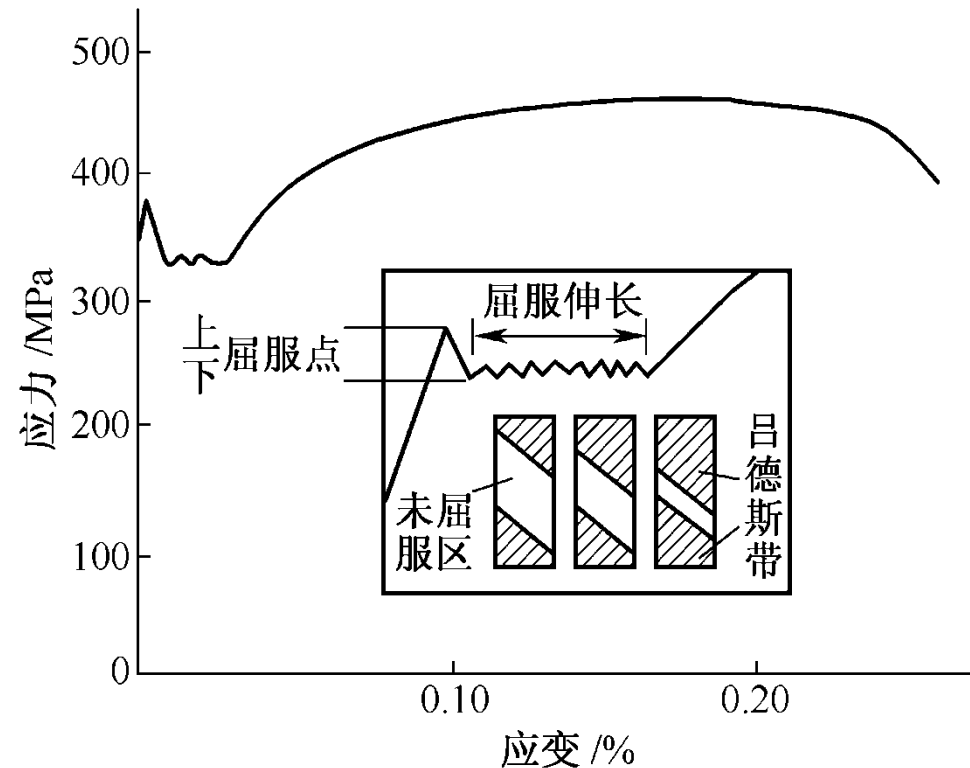
单相固溶体合金的塑性变形和纯金属相比最大的区别在于，单相固溶体合金中存在溶质原子。溶质原子对合金塑性变形的影响主要表现在固溶强化作用，提高了塑性变形的阻力，此外，有些固溶体会出现明显的屈服点和应变时效现象。

(1) 固溶强化。溶质原子的存在及其固溶度的增加，使基体金属的变形抗力随之提高。（第3讲已述及）

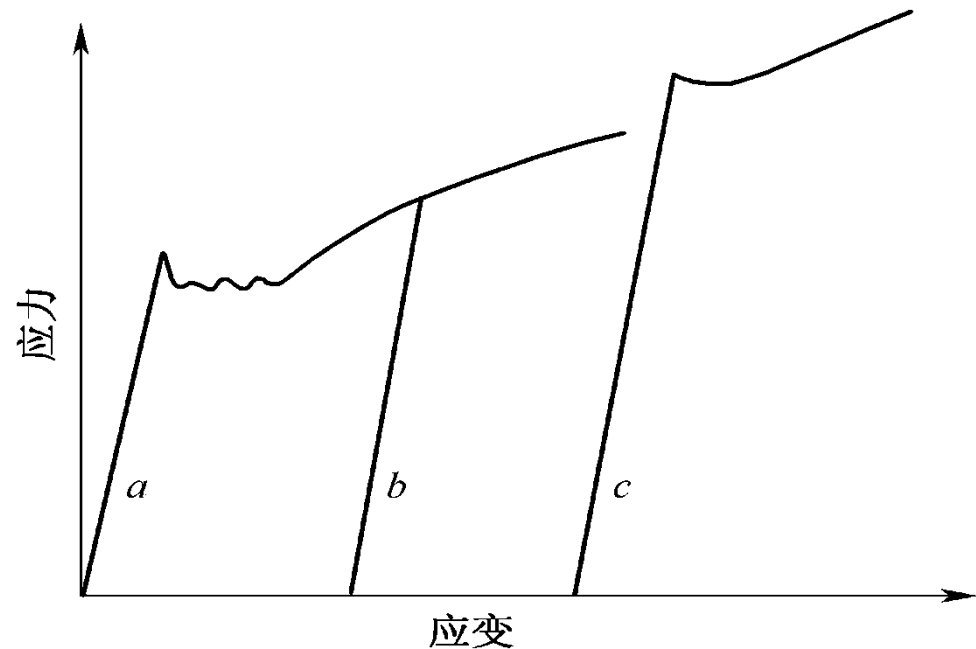
(2) 屈服现象与应变时效。如图为低碳钢典型的应力-应变曲线，与一般拉伸曲线不同，出现了明显的屈服点。

通常认为在固溶体合金中，溶质原子或杂质原子可以与位错交互作用而形成溶质原子气团，如柯垂尔 (Cottrell) 气团。

间隙型溶质原子和位错的交互作用很强，位错被牢固地钉扎住。位错要运动，必须在更大的应力作用下才能挣脱气团的钉扎而移动，这就形成了上屈服点；而一旦挣脱之后位错的运动就比较容易，因此有应力降落，出现下屈服点和水平台。这就是屈服现象的物理本质。



与低碳钢屈服现象相关连的还存在一种应变时效行为，如图所示。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°C 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**。

位错气团理论能很好地解释低碳钢的应变时效：当卸载后立即重新加载，由于位错已经挣脱出气团的钉扎，故不出现屈服点；如果卸载后放置较长时间或经时效则溶质原子已经通过扩散而重新聚集到位错周围形成了气团，故屈服现象又复出现。

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，它与基体相结合状况不一、以及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。

四、塑性变形对材料组织与性能的影响（重点）

1. 显微组织的变化

经塑性变形后，金属材料的显微组织发生明显的改变。除了每个晶粒内部出现大量的滑移带或孪晶带外，随着变形度的增加，原来的等轴晶粒将逐渐沿其变形方向伸长。当变形量很大时，晶粒变得模糊不清，晶粒已难以分辨而呈现出一片如纤维状的条纹，称为**纤维组织**。纤维的分布方向即是材料流变伸展的方向。

2. 亚结构的变化

晶体的塑性变形是借助位错在应力作用下运动和不断增殖。随着变形度的增大，晶体中的位错密度迅速提高。经一定量的塑性变形后，晶体中的位错线通过运动与交互作用，开始呈现纷乱的不均匀分布，并形成**位错缠结**。进一步增加变形度时，大量位错发生聚集，并由缠结的位错组成**胞状亚结构**。

3. 性能的变化

材料在塑性变形过程中，随着内部组织与结构的变化，其力学、物理和化学性能均发生明显的改变。

(1) 加工硬化（重点）。

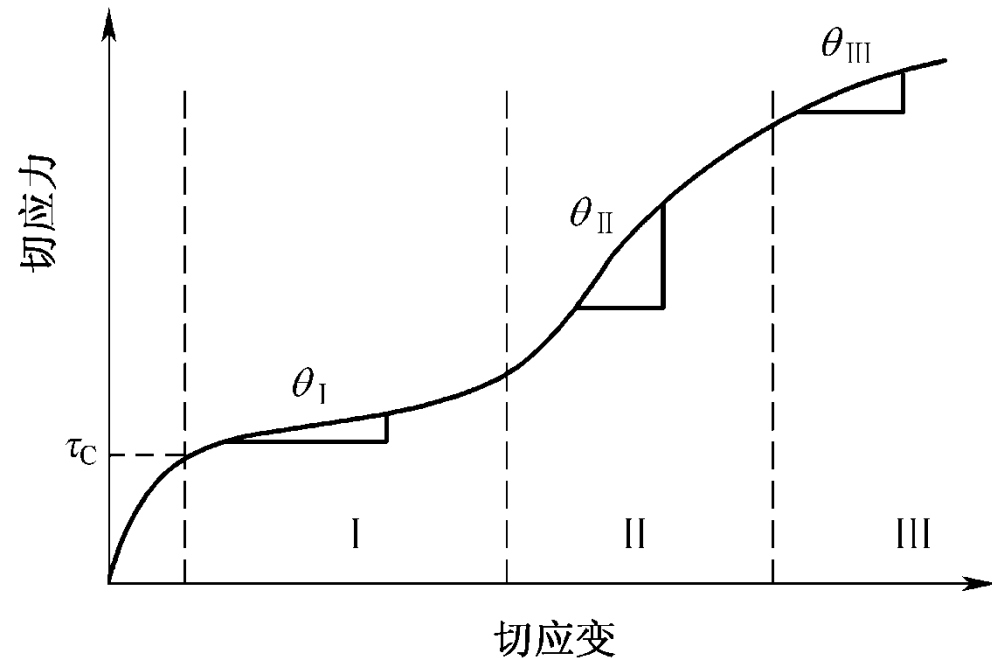
金属材料经冷加工变形后，强度（硬度）显著提高，而塑性则很快下降，即产生了加工硬化现象。加工硬化是金属材料的一项重要特性，可被用作强化金属的途径。特别是对那些不能通过热处理强化的材料如纯金属，以及某些合金，如奥氏体不锈钢等，主要是借冷加工实现强化的。

如图所示是金属单晶体的典型应力—应变曲线(也称**加工硬化曲线**)，其塑性变形部分是由三个阶段所组成(考点，要求会画)：

I 阶段，易滑移阶段：也称单系滑移阶段(**Single-Slip Stage**)，只有一个滑移系开动，滑移容易，加工硬化指数很低，晶体表面出现细长均匀的滑移线。

II 阶段，线性硬化阶段：加工硬化指数很高，由于晶体转动，两个以上滑移系同时开动，多个滑移系之间发生位错交割(形成割阶、网络、缠结)、位错反应(形成L-C位错锁等)，加工硬化强烈、加工硬化指数高，由于层错能低，难交滑移，线性硬化阶段很长。

III 阶段，抛物线型硬化阶段：加工硬化指数随变形增加而降低，在外力作用下，扩展位错束集，位错发生交滑移，异号位错抵消，加工硬化指数随应变增加而降低。



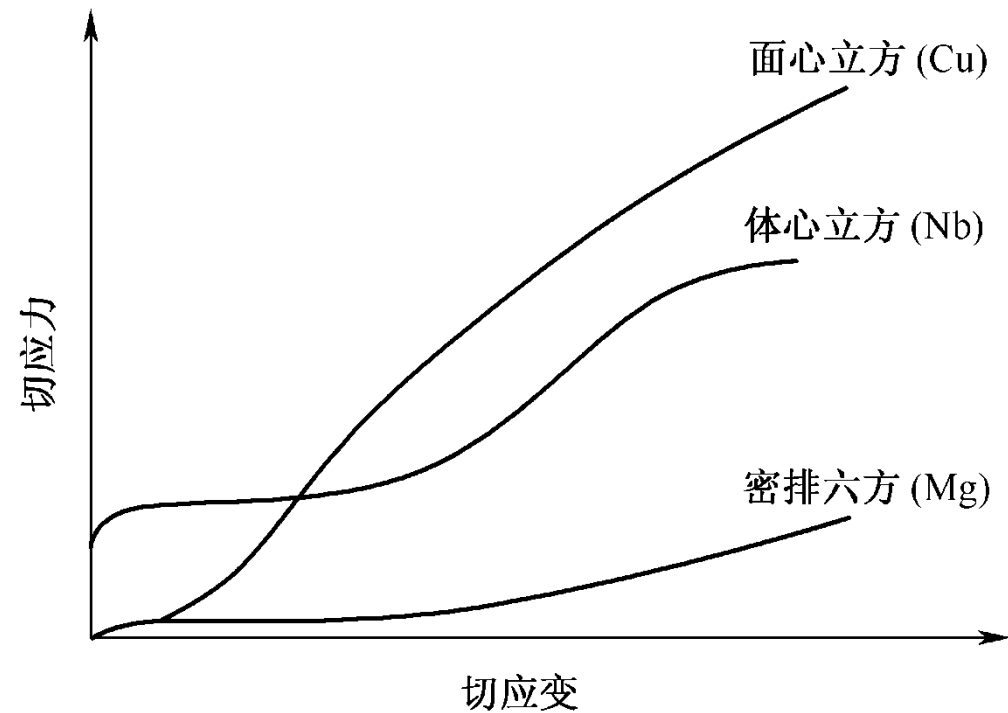
各种晶体的实际曲线因其晶体结构类型、晶体位向、杂质含量，以及试验温度等因素的不同而有所变化，但总的说，其基本特征相同，只是各阶段的长短通过位错的运动、增殖和交互作用而受影响，甚至某一阶段可能就不再出现。

FCC晶体：屈服应力低，但难交滑移，加工硬化指数高，线性硬化阶段很长。

BCC晶体：屈服应力高，极易交滑移，加工硬化指数低，第二阶段很短。

HCP晶体：屈服应力低，滑移系很少，第一阶段很长。

如图所示为三种典型晶体结构金属单晶体的硬化曲线，其中面心立方和体心立方晶体显示出典型的三阶段，至于密排六方金属单晶体的第 I 阶段通常很长，远远超过其他结构的晶体，以致于第 II 阶段还未充分发展时试样就已经断裂了。



多晶体的塑性变形由于晶界的阻碍作用和晶粒之间的协调配合要求，各晶粒不可能以单一滑移系动作而必然有多组滑移系同时作用，因此多晶体的应力-应变曲线不会出现单晶曲线的第 I 阶段，而且其硬化曲线通常更陡，细晶粒多晶体在变形开始阶段尤为明显。

(2) 其他性能的变化。

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。如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，热导率也有所降低，铁磁材料的磁滞损耗及矫顽力增大。

耐蚀性 (Corrosion resistance) 降低：由于塑性变形使得金属中的结构缺陷增多，自由焓升高，因而导致金属中的扩散过程加速，金属的化学活性增大，腐蚀速度加快。

4. 形变织构

在塑性变形中，随着形变程度的增加，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。

5. 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。储存能的具体表现方式为：宏观残余应力、微观残余应力及点阵畸变。按照残余应力平衡范围的不同，通常可分为三种：

(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。

(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, 即在晶粒或亚晶粒之间保持平衡。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(如空位、间隙原子、位错等)引起的。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, 使之处于热力学不稳定状态, 故它有一种使变形金属重新恢复到自由焓最低的稳定结构状态的自发趋势, 并导致塑性变形金属在加热时的回复及再结晶过程。

第二部分 典型题精讲

1. 滑移与孪晶塑性变形主要特点的比较。(考点)

不同点	滑移	孪生
晶体中位向	晶体中已滑移部分和未滑移部分的位向相同	孪晶和基体的位向不同且两部分之间有特定的位向关系（镜面对称）
位移的量	原子的位移是沿滑移方向上原子间距的整数倍，且在同一个滑移面上，总位移较大	原子位移小于孪生方向的原子间距，一般为孪生方向上的 $1/n$
对塑性变形的贡献	对塑性变形贡献很大，即总变形量大	对塑性变形贡献较小，即总变形量小
变形应力	有确定的临界分应力	所需分切应力一般高于滑移的分切应力
变形条件	一般情况下，先发生滑移变形	当滑移变形难进行时；或者晶体对称度很低，变形温度较低，加载速率较高时

2. 比较单晶与多晶金属塑性变形的特点。

答：（1）单晶只需一个滑移系开动，滑移容易，加工硬化指数低，晶体表面出现细长均匀的滑移系；多晶至少5个以上滑移系同时开动，才能保证变形过程中晶界处的连续性及相邻晶粒变形的协调性，加工硬化指数高。

（2）多晶材料开始变形就处于多滑移阶段，单晶经一段过程后发生交滑移。

（3）多晶位错受晶界阻碍强，屈服应力高。

（4）多晶不同晶粒取向不同，变形不同时且不均匀。

谢谢!