

第六章 金属及合金的塑性变形和断裂

6-1 锌单晶体试样截面积 $A=78.5\text{mm}^2$ ，经拉伸试验测定的有关数据如下表：

屈服载荷/N	620	252	184	148	174	273	525
ϕ 角 ($^\circ$)	83	72.5	62	48.5	30.5	176	5
λ 角 ($^\circ$)	25.5	26	38	46	63	74.8	82.5
τ_k (Mpa)	0.87	0.87	0.87	0.87	0.89	0.9	0.87
$\cos \lambda \cos \phi$	0.11	0.27	0.37	0.46	0.4	0.26	0.13
σ_s (Mpa)	7.90	3.21	2.34	1.89	2.22	3.48	6.69

- 1) 根据以上数据求出临界分切应力 τ_k 并填入上表
- 2) 求出屈服载荷下的取向因子，作出取向因子和屈服应力的关系曲线，说明取向因子对屈服应力的影响。

答：

- 1) 需临界临界分切应力的计算公式： $\tau_k = \sigma_s \cos \phi \cos \lambda$ ， σ_s 为屈服强度=屈服载荷/截面积
需要注意的是：在拉伸试验时，滑移面受大小相等，方向相反的一对轴向力的作用。当载荷与法线夹角 ϕ 为钝角时，则按 ϕ 的补角做余弦计算。
- 2) $\cos \phi \cos \lambda$ 称作取向因子，由表中 σ_s 和 $\cos \phi \cos \lambda$ 的数值可以看出，随着取向因子的增大，屈服应力逐渐减小。 $\cos \phi \cos \lambda$ 的最大值是 ϕ 、 λ 均为 45° 时，数值为 0.5，此时 σ_s 为最小值，金属最易发生滑移，这种取向称为软取向。当外力与滑移面平行 ($\phi=90^\circ$) 或垂直 ($\lambda=90^\circ$) 时， $\cos \phi \cos \lambda$ 为 0，则无论 τ_k 数值如何， σ_s 均为无穷大，表示晶体在此情况下根本无法滑移，这种取向称为硬取向。

6-2 画出铜晶体的一个晶胞，在晶胞上指出：

- 1) 发生滑移的一个滑移面
- 2) 在这一晶面上发生滑移的一个方向
- 3) 滑移面上的原子密度与 $\{001\}$ 等其他晶面相比有何差别
- 4) 沿滑移方向的原子间距与其他方向有何差别。

答：

解答此题首先要知道铜在室温时的晶体结构是面心立方。

- 1) 发生滑移的滑移面通常是晶体的密排面，也就是原子密度最大的晶面。在面心立方晶格中的密排面是 $\{111\}$ 晶面。
- 2) 发生滑移的滑移方向通常是晶体的密排方向，也就是原子密度最大的晶向，在 $\{111\}$ 晶面中的密排方向 $\langle 110 \rangle$ 晶向。
- 3) $\{111\}$ 晶面的原子密度为原子密度最大的晶面，其值为 $2.3/a^2$ ， $\{001\}$ 晶面的原子密度为 $1.5/a^2$
- 4) 滑移方向通常是晶体的密排方向，也就是原子密度高于其他晶向，原子排列紧密，原子间距小于其他晶向，其值为 $1.414/a$ 。

6-3 假定有一铜单晶体，其表面恰好平行于晶体的 (001) 晶面，若在 $[001]$ 晶向施加



应力，使该晶体在所有可能的滑移面上滑移，并在上述晶面上产生相应的滑移线，试预计在表面上可能看到的滑移线形貌。

答：

对受力后的晶体表面进行抛光，在金相显微镜下可以观察到在抛光的表面上出现许多相互平行的滑移带。在电子显微镜下，每条滑移带是由一组相互平行的滑移线组成，这些滑移线实际上是晶体中位错滑移至晶体表面产生的一个个小台阶，其高度约为 1000 个原子间距。相临近的一组小台阶在宏观上反映的就是一个大台阶，即滑移带。

所以晶体表面上的滑移线形貌是台阶高度约为 1000 个原子间距的一个个小台阶。

6-4 试用多晶体的塑性变形过程说明金属晶粒越细强度越高、塑性越好的原因？

答：

多晶体的塑性变形过程：

- 1、多晶体中由于各晶粒的位向不同，则各滑移系的取向也不同，因此在外加拉伸力的作用下，各滑移系上的分切应力也不相同。由此可见，多晶体中各个晶粒并不是同时发生塑性变形，只有那些取向最有利的晶粒随着外力的增加最先发生塑性变形。
- 2、晶粒发生塑性变形就意味着滑移面上的位错源已开启，位错将会源源不断地沿着滑移面上的滑移方向运动。但是，由于相邻晶粒的位向不同，滑移系的取向也不同，因此运动着的位错不能够越过晶界，滑移不能发展到相邻晶粒中，于是位错在晶界处受阻，形成位错的平面塞积群。
- 3、位错平面塞积群在其前沿附近造成很大的应力集中，这一集中应力与不断增加的外加载荷相叠加，使相邻晶粒某些滑移系上的分切应力达到临界值，于是位错源开动，开始塑性变形。
- 4、为了协调已发生变形的晶粒形状的改变，要求相邻晶粒必须进行多系滑移，这样就会使越来越多的晶粒参与塑性变形。
- 5、在多晶体的塑性变形中，由外加载荷直接引起塑性变形的晶粒只占少数，不产生明显的宏观效果，多数晶粒的塑性变形是由已塑性变形的晶粒中位错平面塞积群所造成的应力集中所引起，并造成一定的宏观塑性变形效果。
- 6、多晶体的塑性变形具有不均匀性。由于各晶粒间以及晶粒内和晶界位向不同的影响，各个晶粒间及晶粒内的变形都是不均匀的。

晶粒越细强度越高、塑性越好的原因：

强度：由多晶体的塑性变形过程可知，多数晶粒的塑性变形是由先塑性变形晶粒中的位错平面塞积群引起的应力集中于外加载荷相叠加而引起的。由位错运动理论可以得知，位错塞积群在障碍处产生的应力集中与位错数目有关，位错数目越多，造成的应力集中越大，而位错数目与位错源到障碍物的距离成正比。所以晶粒越小，位错源到障碍物（晶界）的距离越短，位错数目越少，造成的应力集中越小，此时如果要是相邻晶粒发生塑性变形，则需要较大的外加载荷，也就是抵抗塑性变形的能力越强，强度越高。

塑性：由多晶体的塑性变形过程可知，多晶体的塑性变形具有不均匀性。晶粒越细，各晶粒间或晶粒内部与晶界处的应变相差越小，变形较均匀，相对来说因不均匀变形产生应力集中引起开裂的机率较小，这就有可能在断裂前承受较大的塑性变形量，可以得到较高的伸长率和断面收缩率。

韧性：由于细晶粒的变形较均匀，不易产生应力集中裂纹，而且晶粒越细晶界面积



越大，对裂纹扩展的阻力越大，因此在断裂过程中可以吸收更多的能量，表现出较高的韧性。

6-5 口杯采用低碳钢板冷冲而成，如果钢板的晶粒大小很不均匀，那么冲压后常常发现口杯底部出现裂纹，这是为什么？

答：

裂纹原因：

- 1、低碳钢板冷冲时，各部分的塑性变形是不均匀的，在口杯局内在宏观内应力。
- 2、由于多晶体晶粒变形的不均匀性，加上原始晶粒大小不一，则更加促进了变形的不均匀性，由此产生较大的第二类内应力。
- 3、所以，冲压后口杯底部出现裂纹的原因是由钢板不均匀变形产生的宏观内应力和晶粒变形不均匀造成的内应力相叠加，超过了钢板的断裂强度，出现裂纹。

6-6 滑移与孪生有何区别，试比较它们在塑性变形过程中的作用。

答：

滑移定义：晶体在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿某些晶面（滑移面）和晶向（滑移方向）发生滑动的现象。**本质：**滑移并不是晶体的一部分相对于另一部分作整体的刚性移动，而是位错在切应力的作用下沿着滑移面上的滑移方向逐步移动的结果。

孪生定义：晶体在切应力作用下，晶体的一部分沿一定的晶面（孪生面）和一定的晶向（孪生方向）相对于另一部分晶体做均匀地切变；在切变区域内，与孪生面平行的每层原子的切变量与它距离孪生面的距离成正比，而且不是原子间距的整数倍，这种切变不会改变晶体的点阵类型，但可使变形部分晶体的位向发生变化，并与未变形部分的晶体以孪晶界为分界面构成镜面对称的位向关系。通常把对称的两部分晶体称为孪晶，而将形成孪晶的过程称为孪生。

滑移在塑性变形过程中的作用：

在常温和低温下金属的塑性变形主要通过滑移方式进行。

- 1、晶体中滑移系越多，则可供滑移采用的空间位向越多，塑性变形越容易进行。当沿滑移面上滑移方向的分切应力达到临界分切应力时，滑移就可进行，而且位错只需一个很小的切应力就可以实现运动。
- 2、在晶体发生滑移的同时，滑移面和滑移方向会发生转动，造成滑移系取向的变化，有可能使其他滑移系的分切应力达到临界值，产生多滑移现象，促进晶体的塑性变形。

孪生在塑性变形过程中的作用：

孪生对塑性变形的贡献比滑移要小。

- 1、孪生的临界分切应力要比滑移的临界分切应力大得多，只有在滑移很难进行的条件下，晶体才进行孪生变形。
- 2、但是，由于孪生后变形部分的晶体位向发生改变，可能会使原来处于不利取向的滑移系转变为新的有利取向，这样可以激发晶体的进一步塑性变形。所以当金属中存在大量孪晶时，可以促进塑性变形。

6-7 试述金属经塑性变形后组织结构与性能之间的关系，阐明加工硬化在机械零件生产和服役过程中的重要意义。

答：



金属塑性变形后组织结构与性能之间的关系:

- 1、金属塑性变形后,晶粒形状发生变化,沿变形方向伸长,当变形量很大时出现纤维组织,使金属的力学性能呈方向性。
- 2、金属塑性变形后,晶体中的亚结构得到细化,形成大量的胞状亚结构。位错密度增加,位错相互交割出现位错割阶和位错缠结现象,产生加工硬化,硬度、强度增加,塑性、韧性降低。
- 3、金属塑性变形后,当变形量很大时,多晶体中原为任意取向的各个晶粒逐渐调整其取向而趋于彼此一致,产生形变织构。金属性能表现为各向异性。
- 4、金属塑性变形后,晶体缺陷增加,产生大量的空位。空位增加,电阻率增大,导电性能和导热性能略为下降。内能增加,化学性提高,耐腐蚀性能降低。

加工硬化在机械零件生产和服役过程中的重要意义:

加工硬化:金属在塑性变形过程中,随着变形程度的增加,金属的硬度、强度增加,而塑性、韧性下降的现象。又称形变强化。

原因:随着塑性变形的进行,位错密度不断增大,位错在运动时的相互交割加剧,产生位错割阶和位错缠结等障碍,使位错运动的阻力增大,造成晶体的塑性变形抗力增大。

在零件生产中的意义:

- 1、对于用热处理方法不能强化的材料来说,可以用加工硬化方法提高其强度。如塑性很好而强度较低的铝、铜及某些不锈钢,在生产中往往制成冷拔棒材或冷轧板材使用。
- 2、加工硬化也是某些工件或半成品能够加工成型的重要因素。例如钢丝冷拔过程中产生加工硬化保证其不被拉断。

在零件使用过程中的意义:

提高零件在使用过程中的安全性。零件在使用过程中各个部位的受力是不均匀的,往往会在某些部位产生应力集中和过载现象,使该处产生塑性变形。如果没有加工硬化,则该处变形会越来越大直至断裂。正是由于加工硬化的原因,这种偶尔过载部位的变形会因为强度的增加而自行停止,从而提高零件的安全性。

需要指出的是:加工硬化现象也会给零件生产和使用带来一些不利因素

- 1、金属随着塑性变形程度的增加,塑性变形抗力不断增大,进一步的变形就必须增大设备功率,增加能源动力的消耗。
- 2、金属经加工硬化后,塑性大为降低,在使用过程中,如果继续变形容易导致开裂。

6-8 金属材料经塑性变形后为什么会保留残留内应力,研究这部分内应力有什么意义?

答:

残留内应力的形成原因:

金属材料经塑性变形后,外力所做的功大部分转化为热能消耗掉,但尚有一小部分(约占总变形功的10%)保留在金属内部,形成残留内应力。

主要分为以下三类:

- 1、宏观内应力(第一类内应力):它是由于金属材料各部分的不均匀变形引起的,是整个物体范围内处于平衡的力。
- 2、微观内应力(第二类内应力):它是由于晶粒或亚晶粒不均匀变形而引起的,是在晶粒或亚晶粒范围内处于平衡的力。



- 3、点阵畸变（第三类内应力）：它是由于塑性变形使金属内部产生大量的位错和空位，使点阵中的一部分原子偏离其平衡位置，造成点阵畸变。它是只在晶界、滑移面等附近不多的原子群范围内保持平衡的力。

研究这部分内应力的意义：

- 1、通常情况下，残留内应力的存在对金属材料的力学性能是有害的，它会导致材料的变形、开裂和产生应力腐蚀，降低材料的力学性能。
- 2、但是当工件表面残留一薄层压应力时，可以在服役时抵消一部分外加载荷，反而对使用寿命有利。

因此，研究这部分内应力可以降低其对金属材料的损害，甚至可以利用内应力来提高工件的使用寿命。

6-9 何谓脆性断裂和塑性断裂，若在材料中存在裂纹时，试述裂纹对脆性材料和塑性材料断裂过程的影响。

答：

塑性断裂：又称为延性断裂，断裂前发生大量的宏观塑性变形，断裂时承受的工程应力大于材料的屈服强度。

脆性断裂：又称为低应力断裂，断裂前极少有或没有宏观塑性变形，但在局部区域仍存在一定的微观塑性变形，断裂时承受的工程应力通常不超过材料的屈服强度，甚至低于按宏观强度理论确定的许用应力。

裂纹对材料断裂的影响：

当存在裂纹的材料受到外力作用时，会在裂纹尖端附近产生复杂的应力状态，并引起应力集中。

对于塑性材料，在外力作用下裂纹尖端区域的应力集中很快会超过材料的屈服极限，形成塑性变形区，微孔很容易在此变形区形成、扩大，并与裂纹连接，使裂纹失稳扩展，导致材料发生断裂。

对于脆性材料，其塑性较差，在裂纹尖端区域出现析出质点的几率很大，因此，一旦在裂纹尖端附近形成一个不大的塑性变形区后，此区的析出相质点附近就可能形成微孔并导致裂纹失稳扩展，直至断裂。此时整个裂纹界面的平均应力 σ_c 仍低于 $\sigma_{0.2}$ ，也就是说含裂纹的脆性材料往往表现出低应力断裂，但断裂源于微孔聚集方式，微观断口形貌仍具有韧窝特征。

6-10 何谓断裂韧度，它在机械设计中有何功用？

答：

应力强度因子：材料中不可避免的存在裂纹，当含有裂纹的材料受外加应力 σ 作用时，裂纹尖端应力场的各应力分量中均有一个共同因子 K_I ($K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, a 为裂纹长度的一半)，用 K_I 表示裂纹尖端应力场的强弱，简称应力强度因子。

断裂韧度：当外加应力达到临界值 σ_c 时，裂纹开始失稳扩展，引起断裂，相应地 K_I 值增加到临界值 K_{Ic} ，这个临界应力场强度因子 K_{Ic} 称为材料的断裂韧度，可以通过实验测得。

平面应变断裂韧度：对同一材料来说， K_{Ic} 取决于材料的厚度：随着厚度的增加， K_{Ic} 单调减小至一常数 K_{Ic} ，这时裂纹尖端区域处于平面应变状态， K_{Ic} 称为平面应变断裂韧度。

在机械设计中的功用：

- 1、确定构件的安全性。根据探伤测定构件中的缺陷尺寸，在确定构件工作应力后，



即可算出裂纹尖端应力强度因子 K_I 。与构件材料的 K_{Ic} 相比，如果 $K_I < K_{Ic}$ ，则构件安全，否则有脆断危险。

- 2、确定构件承载能力。根据探伤测出构件中最大裂纹尺寸，通过实验测得材料的 K_{Ic} ，就可由 $\sigma_c = K_{Ic} / \sqrt{\pi a}$ 计算出断裂应力，从而确定构件的安全承载能力。
- 3、确定临界裂纹尺寸。若已知材料 K_{Ic} 的和构件的实际工作应力，则可根据 $a_c = K_{Ic}^2 / \pi \sigma^2$ 求出临界裂纹尺寸。如果探伤测定构件实际裂纹尺寸 $a < 2a_c$ ，则构件安全，否则有脆断危险。

