

材料强度学 第六次作业答案

- 1, 阐述 Zener-Hollomon 参数高应变率与低温等价的本质。评判 $Z = k \frac{\dot{\epsilon}}{T}$ 和 $Z = \exp(\frac{Q}{RT} \dot{\epsilon})$ 两种形式的合理性。

答：温度和应变率对变形的效果或所需应力的影响可以用 Zener-Holloman 参数综合衡量，其形式为： $Z = \dot{\epsilon} \exp(\frac{Q}{RT})$ 。在该形式中高应变率和低温等价的本质与热激活有关。热激活对材料变形提供的帮助=尝试次数×成功概率。在高应变率下，变形速度更快，同样的变形在更短的时间内发生。位错克服障碍需要尝试的次数减少，因此热激活能提供的帮助减少，外力需要做的功增大，位错才能继续运动，因此体现为材料强度增强；对于低温而言，位错克服障碍的成功概率减小，因此热激活对变形提供的帮助也减小，外力需要做的功增大，位错才能继续运动，因此也体现为材料强度增强。故而两种情况是等价的。

对于 $Z = k \frac{\dot{\epsilon}}{T}$ 和 $Z = \exp(\frac{Q}{RT} \dot{\epsilon})$ 两种形式均表现出了应变速率增大和温度降低对于材料变形的影响效果一致，均使得材料硬化，变形更加困难，这在整体趋势上是合理的。但是前者式中未体现出激活能 Q 对于 Z 的影响，并且二者均将 $\dot{\epsilon}$ 和 $1/T$ 相乘，这意味着当 $\dot{\epsilon}$ 和 T 同比例变化时， Z 的大小不变，这显然是不合理的，因为在低温时 T 的影响程度更大，高温时 $\dot{\epsilon}$ 的影响程度更大。

- 2, 简述单晶体强度与位错密度的 U 型曲线的特点，并加以分析。

答：当晶体内部不存在缺陷时，这是一个完美晶体，此时晶体的强度最高；当位错密度较低时，随着位错密度的增加，晶体强度降低；当位错密度较高时，随着位错密度增加，晶体强度升高，呈 U 型曲线关系。其原因在于：当

晶体内部不存在缺陷时，晶体的强度处于曲线中的最高点；当位错密度较低时，晶体随着内部缺陷的增加更容易被破坏，即强度降低；当位错密度达到一定数量时，由于位错之间的相互作用（例如：割接、缠结等现象）导致位错运动的阻力变大，因而材料强度有所升高。

- 3, 证明：对于一个单晶，要实现任意的塑性变形（不考虑弹性变形），必须至少启动 5 个独立的滑移系。

答：应变张量具有 6 个独立分量，任意变形意味着 6 个独立分量可以任意变化。对于塑性变形，由于体积不变，因此增加了一个约束方程： $\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0$ ，故只有 5 个应变分量是独立的。那么任意的塑性变形需要这 5 个分量可以独立变化。将这 5 个独立分量的组合视为五维矢量，由于每个滑移系仅可以提供一个基矢量，因此必须启动至少 5 个独立的滑移系就可以得到 5 个独立的五维基矢量。任意的变形可以视为这五个基矢量的线性组合。

- 4, 已知铜单晶 ($a = 0.36 \text{ nm}$) 为 FCC 结构，在 $[112]$ 方向上受到拉应力的作用，该拉应力大小为 $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，在此条件下：(1) 请计算出 Schmid 因子（取向因子）最大的滑移系。(2) 请计算出在 Schmid 因子最大的滑移系上分切应力为多大。

答：(1) FCC 结构有 12 个滑移系，易滑移面为 $\{111\}$ ，滑移方向为 $\langle 110 \rangle$ ，由于 $[112]$ 方向已定，因此根据 Schmid 因子的计算公式 $\mu = \cos\phi \cos\lambda$ 可以得到滑移系 $\{\bar{1}11\}[101]$ 和 $\{1\bar{1}1\}[011]$ 的取向因子最大，其值为 $\frac{\sqrt{6}}{6}$ 。

(2) 当 Schmid 因子取 $\frac{\sqrt{6}}{6}$ 时， $\tau = \sigma \cos\phi \cos\lambda = 2.5 \times 10^5 \times \frac{\sqrt{6}}{6} = 1.02 \times 10^5 \text{ Pa}$

5, 请分别从 Cottrell 气团和位错动力学的角度对低碳钢的屈服现象进行解释。

答：低碳钢中的溶质原子由于与位错发生弹性交互作用，使得它们倾向于扩散到位错线附近，形成偏聚“气团”，从而钉扎位错。位错要在更大的应力下才能挣脱溶质原子的钉扎产生滑移，因此形成了上屈服点。而一旦挣脱钉扎后，位错运动遇到的阻力相对减少。因此应力会有降落，出现下屈服点和平台。

从动力学角度来看，材料塑性变形的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与晶体中可动位错密度 ρ_m ，位错运动平均速率 v 之间的关系为： $\dot{\epsilon} = b\rho_mv$ ，位错运动平均速率 v 与施加应力之间的关系为： $v = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$ 。在拉伸试验中，由于应变速率为恒定值，而初始状态下的可动位错密度较低，因此要维持一定的应变速率，势必要增大位错运动的平均速率，这就是上屈服点应力较高的原因。而随着变形的进行，位错迅速增殖，位错密度迅速增大，此时应变速率仍然维持不变，势必要使得位错运动平均速率降低，于是所需要的应力也下降，即为下屈服点。