



第十二讲 金属材料的热变形



一、热变形

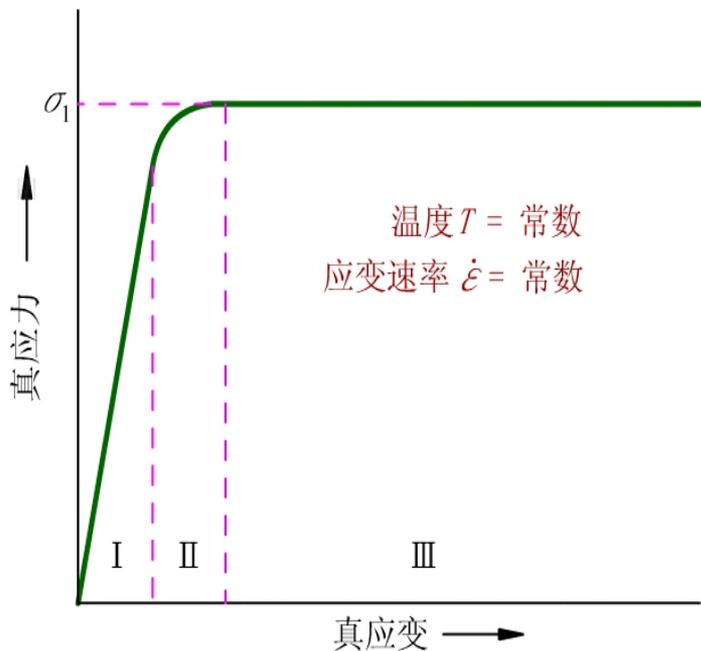
再结晶温度以上的加工变形

硬化速度 = 软化速度对应温度以上的加工变形

热变形 \neq 高温变形

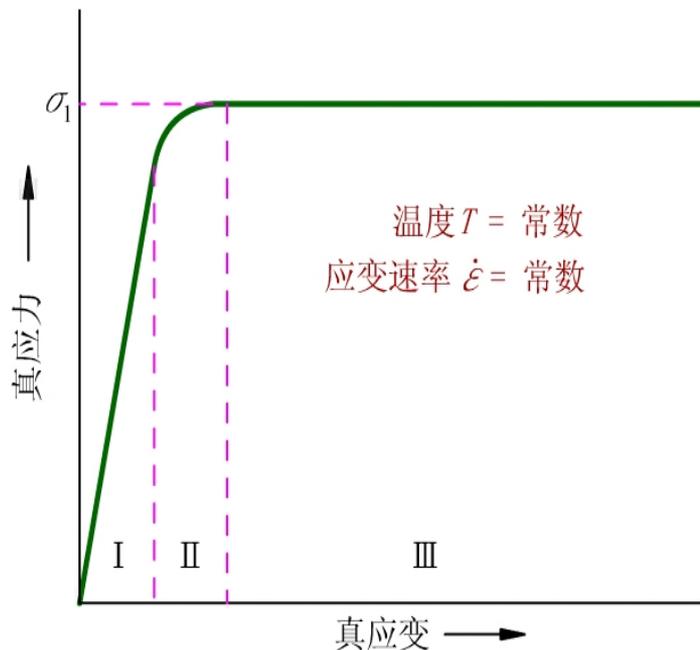


二、动态回复机理



动态回复时的真应力—应变曲线

- ① 第一阶段，微应变阶段
- ② 第二阶段，均匀塑性变形，加工硬化
- ③ 第三阶段，稳定流变阶段，持续形变



动态回复时的真应力—应变曲线



第一阶段:

位错密度由 $10^{10} \sim 10^{11} \text{m}^{-2}$ 增至 $10^{11} \sim 10^{12} \text{m}^{-2}$



第二阶段:

位错密度继续增大

形成位错缠结和位错胞

位错消失速率随应变增大



第三阶段:

位错密度达 $10^{14} \sim 10^{15} \text{m}^{-2}$,

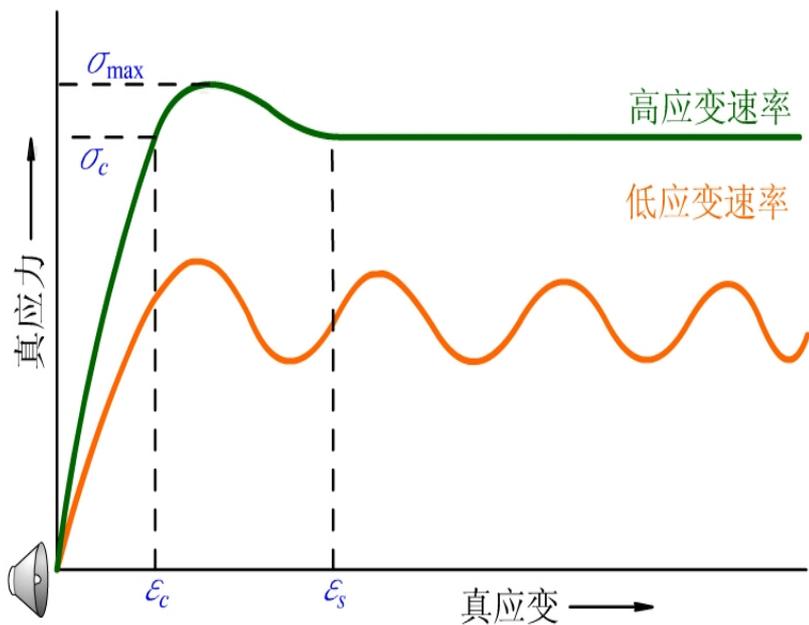
位错增殖速率 = 位错消失速率

稳态流变阶段 (无加工硬化)

位错构成亚晶界, 形成亚晶, 保持等轴状



三、动态再结晶机理



动态再结晶的真应力-真应变曲线

高应变速率：三个阶段

- ✦ 加工硬化阶段 ($0 < \epsilon < \epsilon_c$)
- ✦ 动态再结晶的初始阶段 ($\epsilon_c < \epsilon < \epsilon_s$)
- ✦ 稳态流变阶段 ($\epsilon \geq \epsilon_s$)

低应变速率：交替硬化-软化

- ✦ 加工硬化阶段 ($0 < \epsilon < \epsilon_c$)，位错增殖
- ✦ 动态再结晶软化，曲线下降
- ✦ 再结晶驱动力减小——硬化占优，曲线上升
- ✦ 再结晶驱动力增大——再结晶软化
- ✦ 下降 —— 上升 ——



四、动态回复与动态再结晶

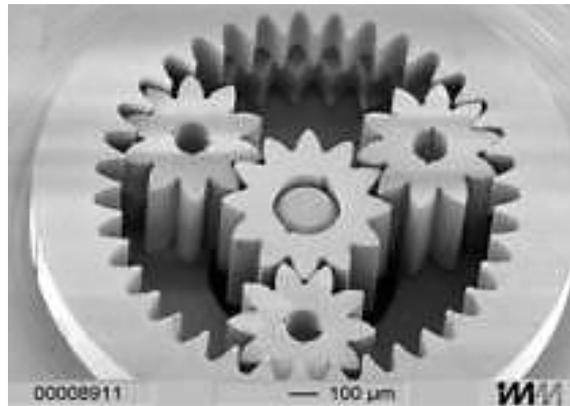
	动态回复	动态再结晶
适应材料	高层错能材料 (位错不易扩展, 易攀移、交滑移)	低层错能材料
软化机制	位错增殖与 位错抵消平衡	变形造成的畸变与 无畸变晶粒的形成平衡
组 织	拉长晶粒与恒尺寸亚晶粒	中心有畸变的极细等轴晶
力学性能	强度优于稳态 (静态) 回复	强度优于稳态 (静态) 再结晶
形变温度↓	亚晶细化	影响复杂
流变应力↑	亚晶细化	晶粒细化



五、热变形引起的组织性能变化

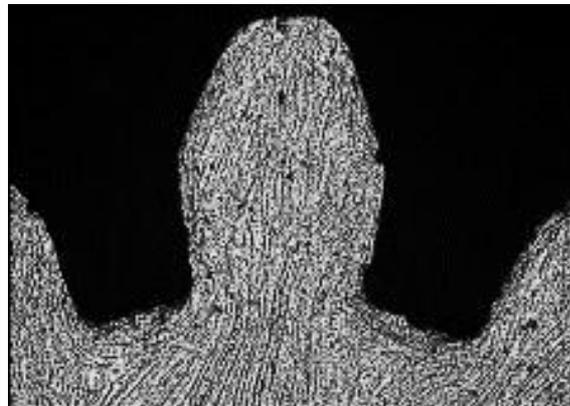
1. 改善铸态组织、改善性能

- 部分消除气孔、疏松
- 破碎枝晶



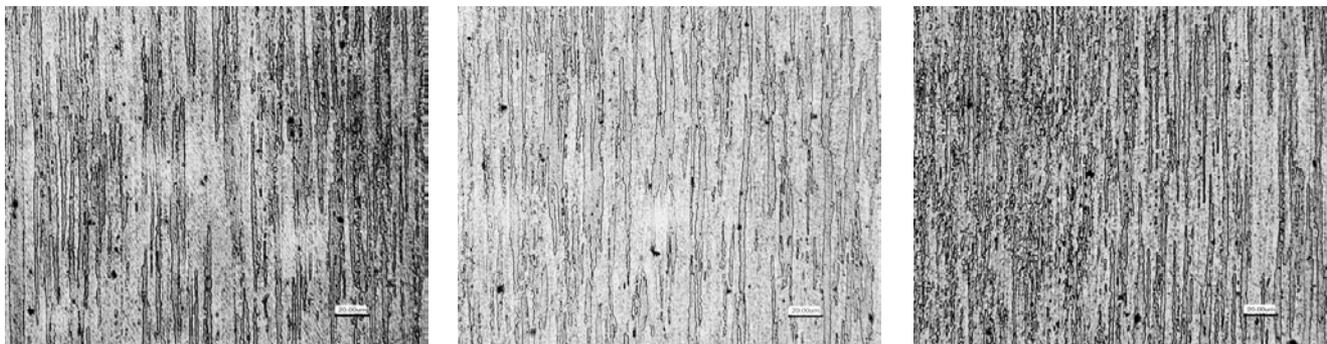
2. 流线

- 夹杂物沿变形方向分布
- 各向异性





3. 纤维组织 ——晶粒沿变形方向伸长 —— 各向异性



Al-Li 合金挤压型材中的纤维组织



Al-Li 合金厚板中的纤维组织



4. 带状组织 ——沉淀相沿变形方向分布 —— 各向异性

