



材料科学与工程学院

第20次课

主讲：叶荣昌

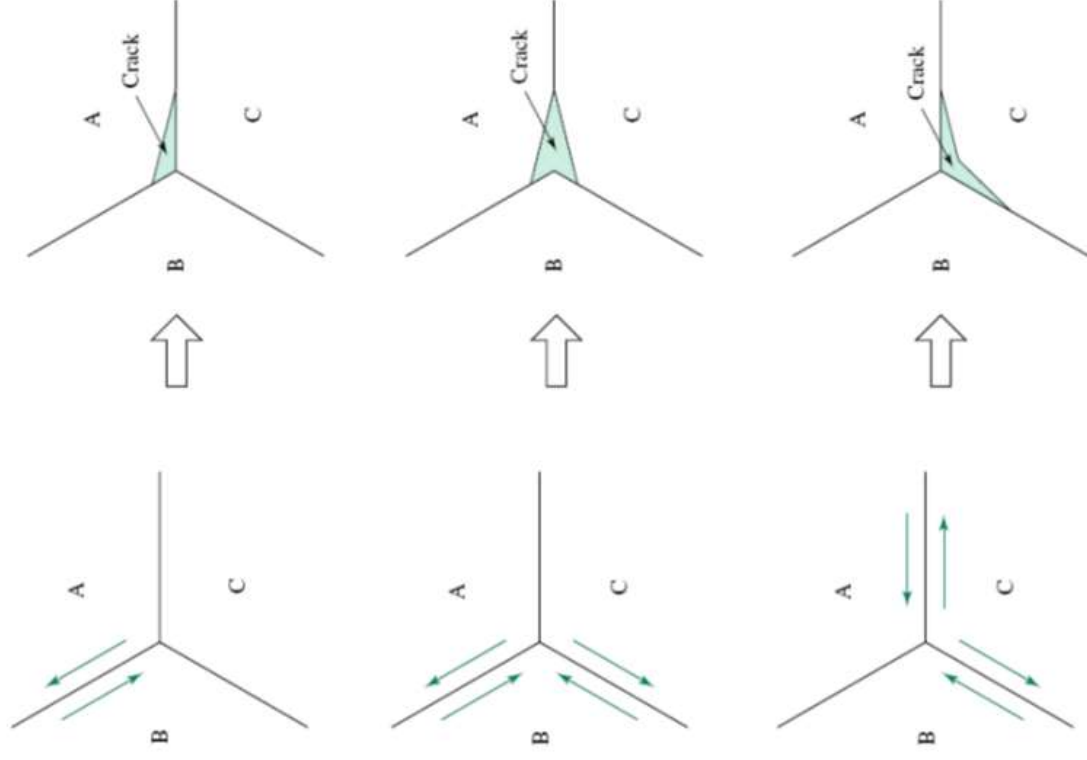


C. 晶界滑动

在高温下，受力后晶界产生滑动，也会促进蠕变进行，但晶界滑动对蠕变的贡献并不大，其主要作用在于协调晶内变形。

晶界滑动可由外加应力直接引起，也可由相邻晶粒蠕变变形差异所引起的沿晶界的应力梯度造成。

注意：晶界滑动不是独立的蠕变机理，因为晶界滑动一定要和晶内滑移变形配合进行，否则就无法维持晶界的连续性，会导致晶界萌生裂纹。



蠕变变形实际上可通过多种机制产生。假如这些机制都起作用但互不相关，那么速率最快的就是支配机制。如果各种机制互相依存，则激活能最高的、速率最低的机制控制整个过程。

温度和应力改变，蠕变机理也会随之发生变化。

变形机理图

——将不同温度-应力情况下的蠕变机制汇总在同一图中，并给出等蠕变速率曲线，同时将蠕变速度最大的一种机制确定为主要机制，这样即可分出不

- 位错机制区(高应力区)
- Coble机制区(低应力-低温区)
- N-H区(低应力-高温区)

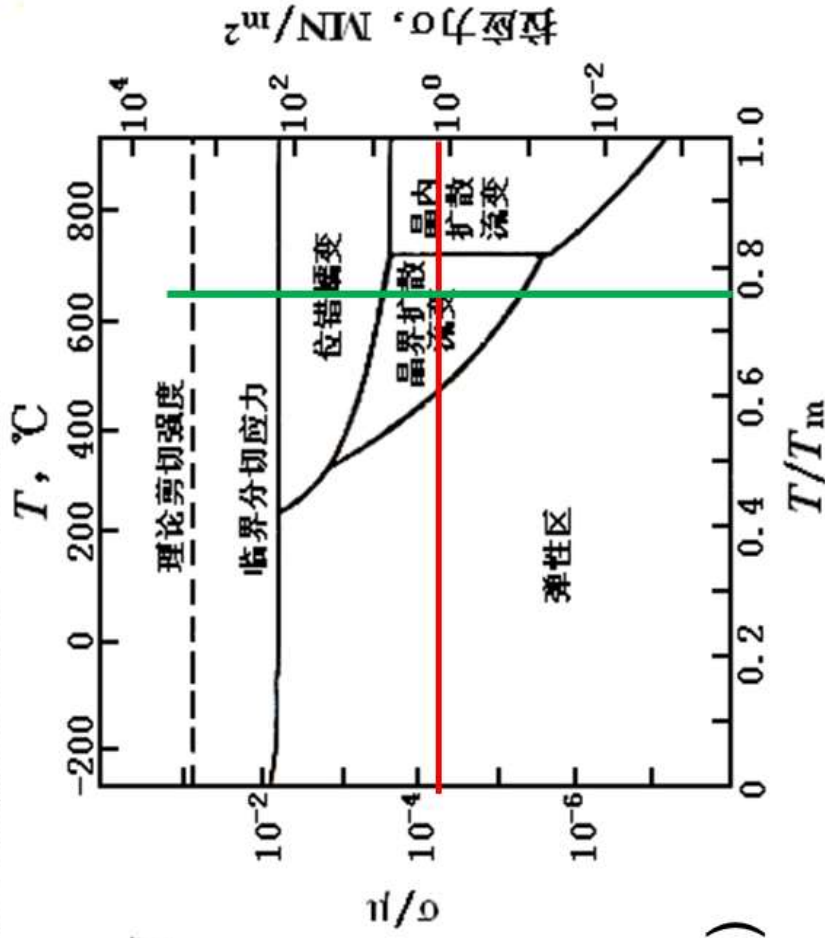
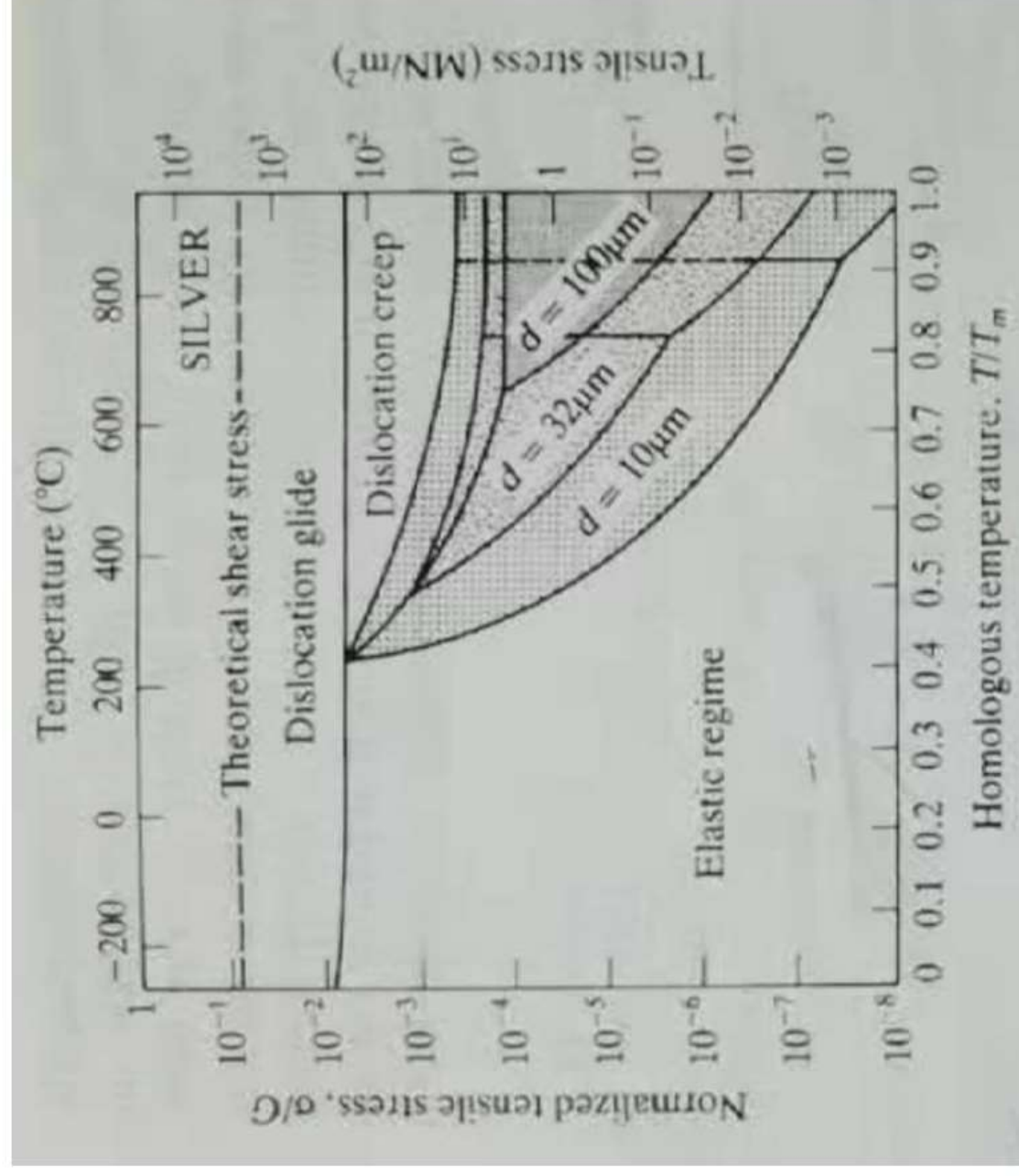


图6-14 银的形变机理图



晶粒细化对银的形变机理图的影响

(2) 蠕变断裂机理

• 穿晶断裂

- 与普通韧性断裂情况相似，断裂之前有大量塑性变形，断裂后延伸率高，往往形成颈缩，断口是韧性断裂形态。
- 产生于较低温度且应力较大的条件下

• 沿晶断裂

- 断裂前塑性变形很小，延伸率很低，颈缩很小或没有，在材料内部常出现的细小裂纹。
- 多在试验温度高、应力小的情况下出现，是高温蠕变断裂中最普遍的现象。

一般情况下，断裂模式从穿晶到沿晶形式的过渡与多晶体中晶界强度随温度的变化有关。随着温度升高，由穿晶断裂过渡到沿晶断裂。

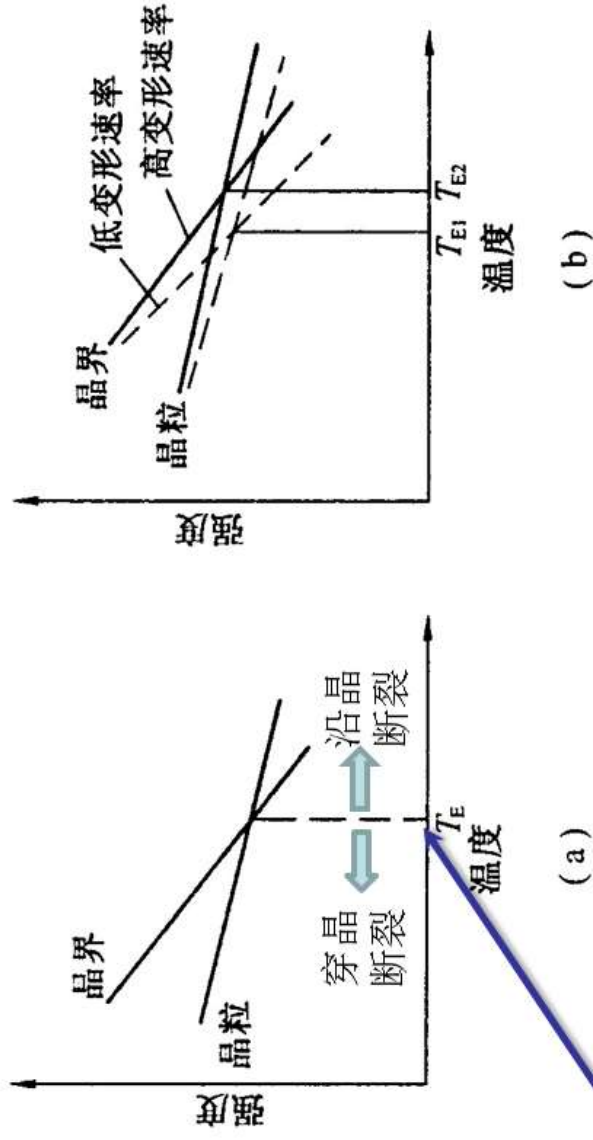


图6-15 温度和应变速率对金属断裂路径的影响

(a) 等强温度 T_E (b) 应变速率对 T_E 的影响

“等强温度”， T_E

——晶粒与晶界强度相等的温度

——等强温度不是固定不变的，应变速率和冶金因素对它都有重要的影响。应变速率升高，等强温度升高。

一般认为，金属材料在高温长期载荷作用下发生沿晶断裂与裂纹沿晶界的萌生和扩展有关。

➤ 裂纹形核机制

- 在三晶粒交会处形成楔形裂纹

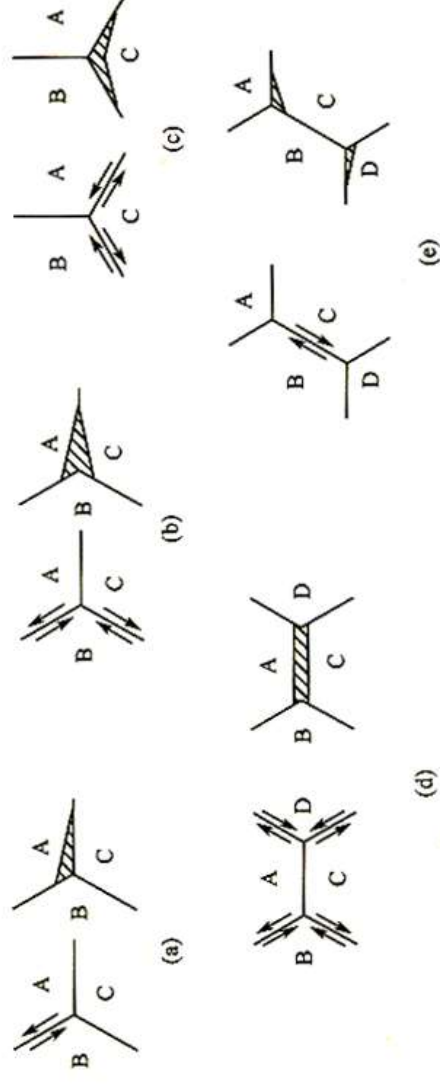


图6-16 晶界滑动与楔形裂纹的形成

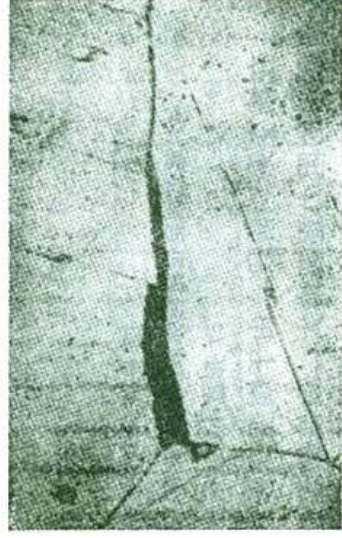


图6-17 耐热合金中的楔形裂纹

•在晶界上由空洞形成晶界裂纹

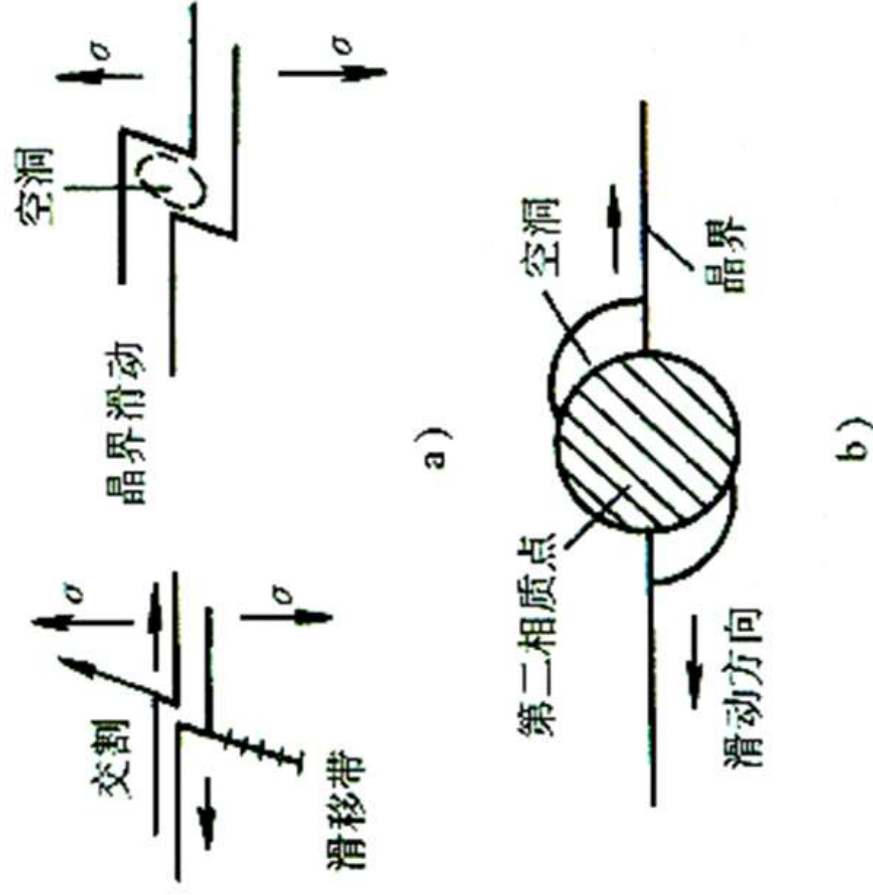


图6-18 晶界滑动形成空洞示意图

a) 晶界滑动与晶内滑移带交割

b) 晶界上存在第二相质点

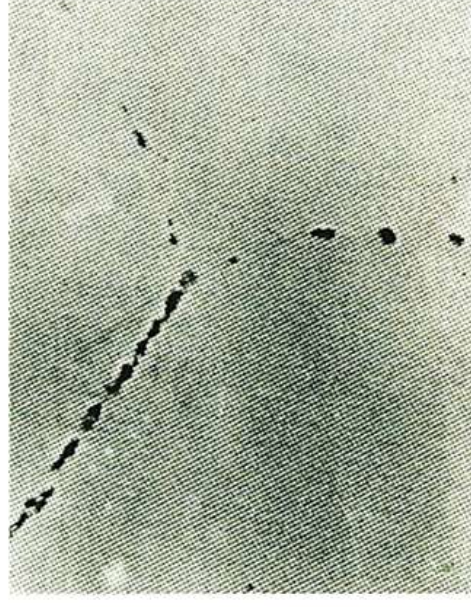


图6-19 耐热合金晶界上形成的空洞

➤ 裂纹扩展机制

裂纹萌生后，进一步依靠晶界滑动、空位扩散和空洞连接而扩展，最终导致沿晶断裂。

➤ 蠕变断裂断口特征

宏观特征：（1）断口附近存在塑性变形，在变形区域附近有很多裂纹，断裂构件表面存在龟裂现象；（2）由于高温氧化，断口表面往往被一层氧化膜覆盖。

微观特征：主要为冰糖状花样沿晶断裂形貌。

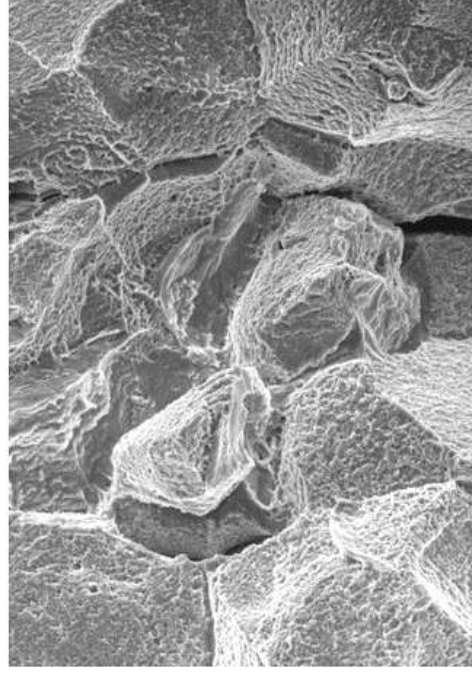
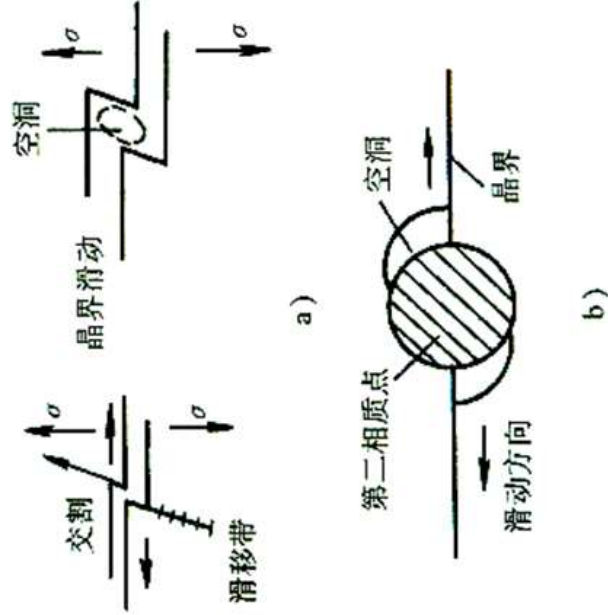
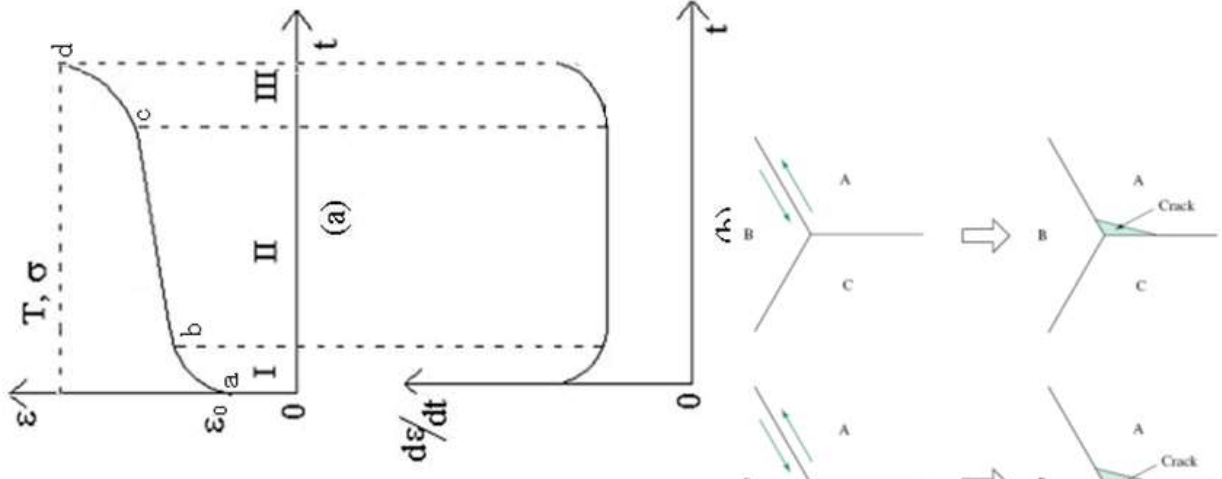


图6-20 镍基高温合金Waspaloy服役7200小时后的断口微观形貌

蠕变变形与断裂机制总结

• 第一阶段

- 以晶内滑移和晶界滑移方式进行
- 蠕变初期，滑移造成的形变强化效应超过软化效应，因而，蠕变速率不断降低。
- 蠕变初期可能在晶界台阶处或第二相质点附近形成裂纹核心，也可能由于晶界滑动的三晶粒交汇处受阻而形成裂纹核心。



- 第二阶段

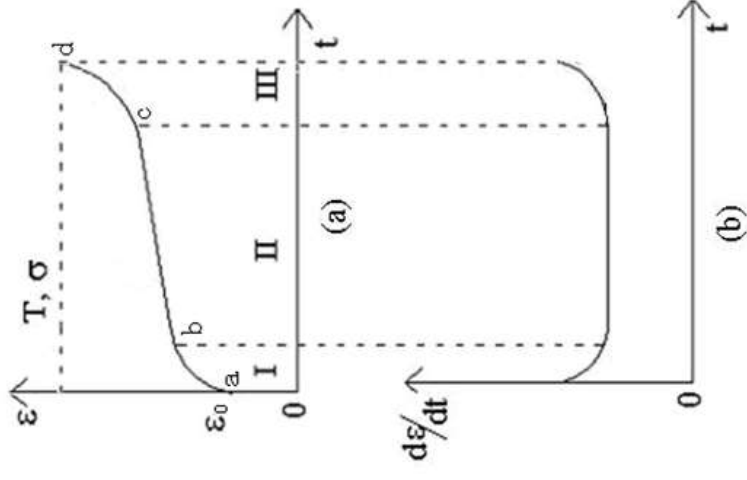
- 晶内变形以位错滑移和攀移交替方式进行，晶界变形以晶界滑动和迁移交替方式进行。

- 位错滑移和晶界滑动使金属强化，但位错攀移和晶界迁移使金属软化，强化与软化作用达到动态平衡时，蠕变速率保持恒定。

蠕变第二阶段在应力和空位流同时作用下，裂纹优先在与拉应力垂直的晶界上长大，形成楔形和洞形裂纹。

- 第三阶段

- 在第二阶段后期开始联接的楔形和洞形裂纹进一步依靠晶界滑动、空位扩散和空洞连接而扩展，蠕变速度加快，直至裂纹达到临界尺寸而断裂。



7、蠕变变形过程中的组织结构变化

- 新的滑移系可能会起开动。高温变形时产生的滑移带较之室温下的更粗，间距也更宽。
- 亚晶形成
 - 高温下位错攀移容易发生，排列成小角度晶界。

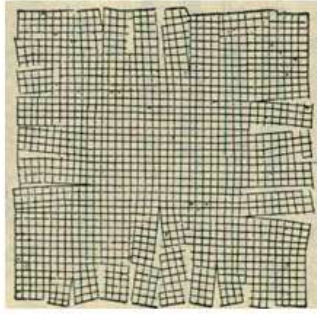


图6-39亚结构示意图

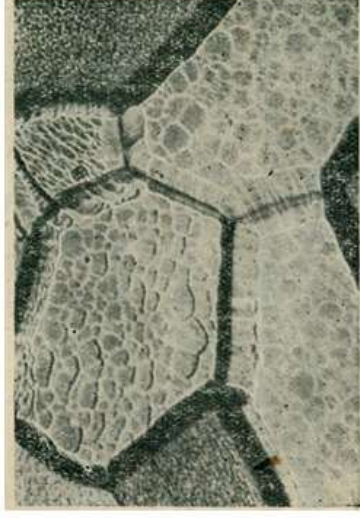


图6-40 Au-Ni合金中的亚晶粒×290

——在蠕变减速阶段可以观察到亚晶的形成，不过完整性较差。进入恒速阶段后，亚晶逐渐变得完整，而且尺寸也增加，但其大小达到一定后就基本不变，即使到蠕变加速阶段也没有较大的变化。

——亚晶的尺寸随应力减小和温度提高而增加。

- **再结晶**

- 再结晶发生的温度比通常要低，而且不一定是在回复过程完成之后才开始。

- **晶界运动**

- 在应力较低、温度较高、晶粒尺寸细小的时候，晶界运动比例增大，但是与晶内形变相比，对总蠕变变形量的贡献相对较小，最多只能达到百分之十几。

- 晶界运动的主要作用是协调晶内变形。

- **析出相**

- 由于高温下持续应力的作用，合金内部析出相的沉淀动力学要改变，其形核与长大加速；

- 第二相质点的稳定性降低，除了集聚过程加速外，质点的形态还往往随应力状态而变化；

- 合金中的固溶原子会沿应力梯度发生定向流动，使第二相沿某应力方向优先溶解或集聚。

上述组织变化均能强烈影响蠕变过程，造成合金性能显著变化。

8、金属材料高温力学行为的影响因素与强化措施

由蠕变变形和断裂机理可知，提高蠕变极限和持久强度的主要途径是**增加位错移动阻力、抑制晶界滑动和空位扩散**。

- 合金化学成分
 - 选用熔点高、自扩散激活能大或层错能低的金属及合金
 - 加入合金元素，产生固溶强化、弥散强化或晶界强化
- 冶炼工艺
 - 改进冶金质量，减少有害杂质在晶界的偏聚
 - 减少非金属夹杂和冶金缺陷
- 热处理工艺
 - 提高材料在使用温度下的组织稳定性
- 晶粒度
 - 最佳晶粒度范围

Topic2 超塑性

材料在一定内部条件（如晶粒尺寸、相变组织等）和外部条件（如形变温度、应变速率等）下，显示异常高的塑性。

——宏观均匀变形能力好，抗局部变形能力强。

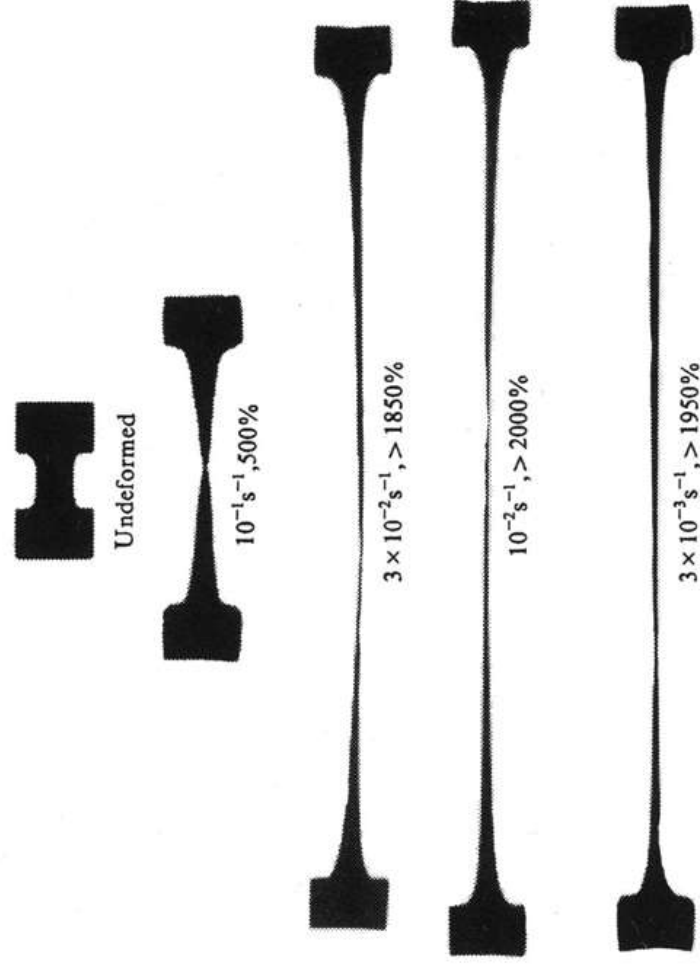


图6-29 平均晶粒尺寸小于1 μ m的 α -Ti + Ti₂Co超细双相组织Ti-12Co-5Al合金，在700°C和10⁻²s⁻¹应变速率下的延伸率接近2000%

(1) 金属超塑性变形的行为特征

超塑变形的应力-应变关系与变形速率密切相关，在不同的变形速率下，获得同等应变所需的应力不同，应变速率高的所需应力明显提高。

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m$$

——应变速率敏感指数 m 变化范围在0.3~0.9之间。

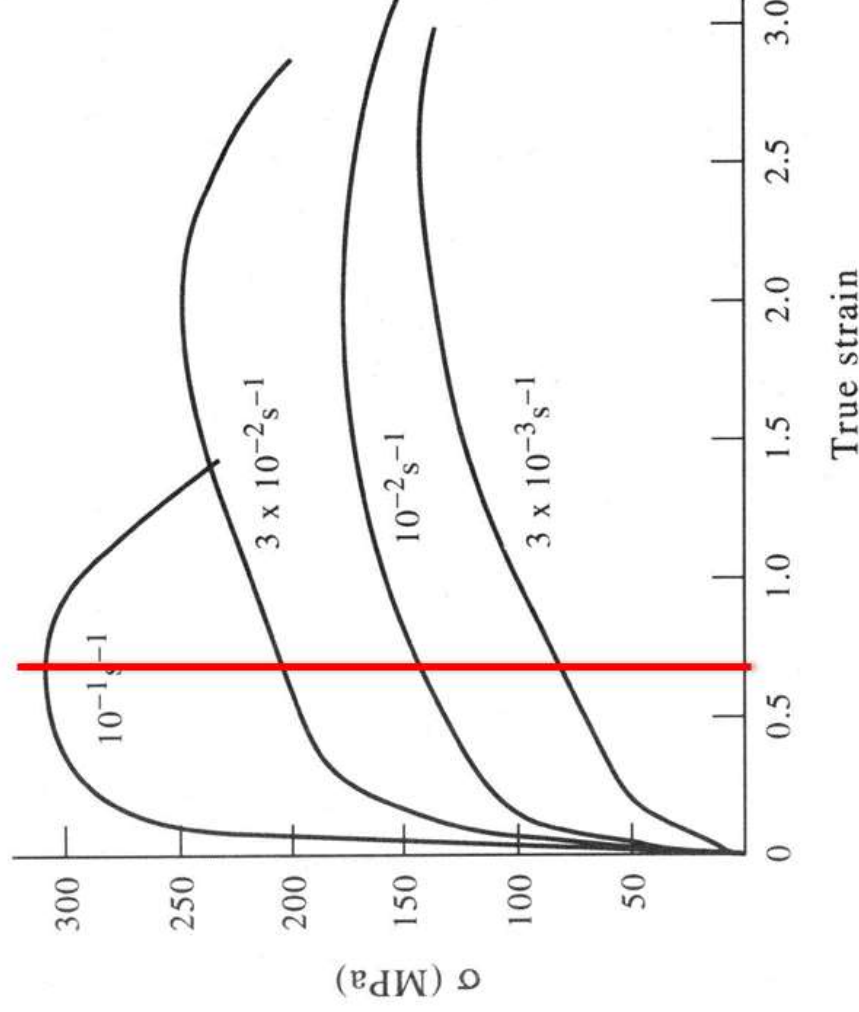


图6-31 加载速率对超塑性金属 (Ti-12Co-5Al) 工程应力-应变曲线的影响

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

$$\lg \sigma = \lg K + m \lg \dot{\epsilon}$$

$$m = \frac{d \lg \sigma}{d \lg \dot{\epsilon}}$$

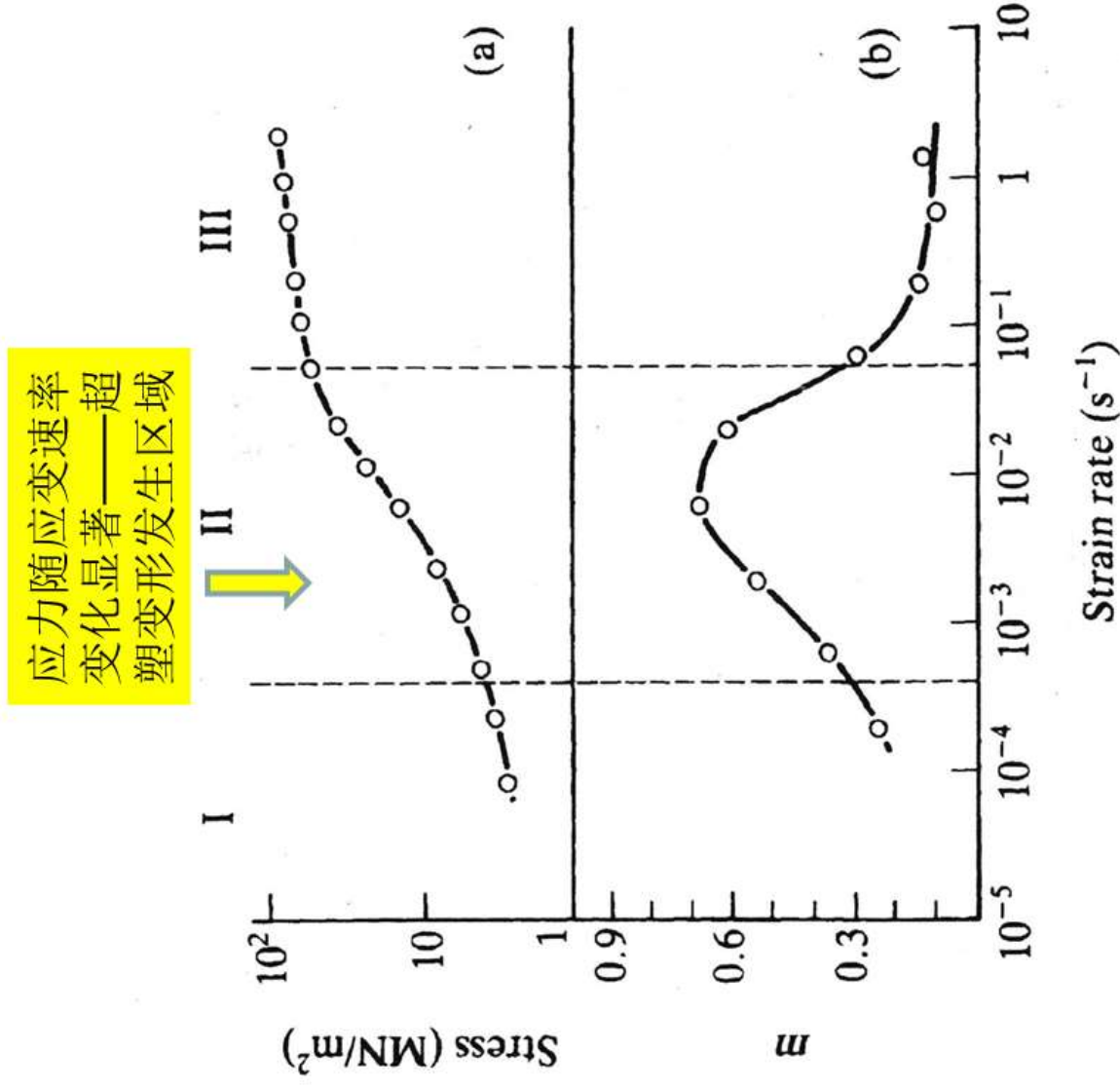
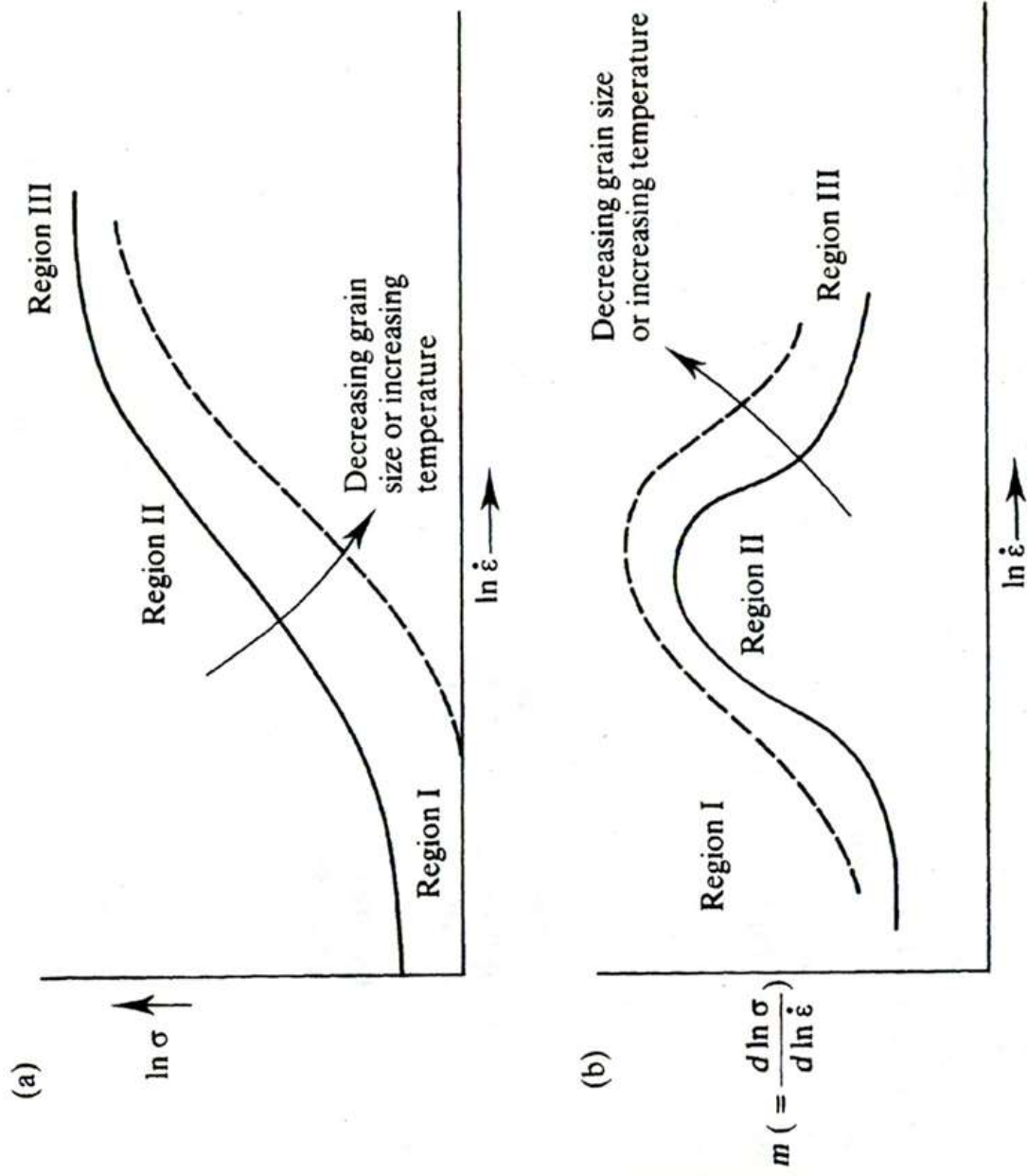


图6-32 晶粒直径为 $10.6\mu\text{m}$ 的超塑Mg-Al共晶合金在 623K 变形
(a) 应力-应变速率关系, (b) 应力敏感指数-应变速率关系



提高变形温度或减小晶粒尺寸，都可以提高 m 的最大值及降低流变应力，且关系曲线整体向高应变速率方向移动。

图6-33 形变温度、应变速率和晶粒大小对超塑变形行为影响示意图

(a) 不同形变温度、应变速率和晶粒大小的应力-应变速率关系

(b) 不同形变温度、应变速率和晶粒大小的 m -应变速率关系

超塑性变形的内部条件:

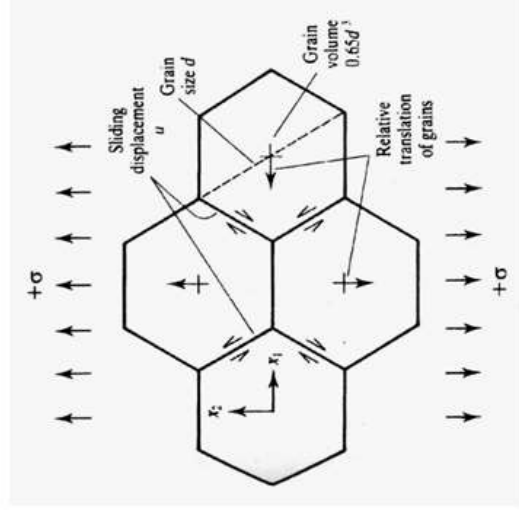
- 结构超塑性: 细小、无取向、等轴晶
- 相变超塑性

超塑性变形时的组织变化:

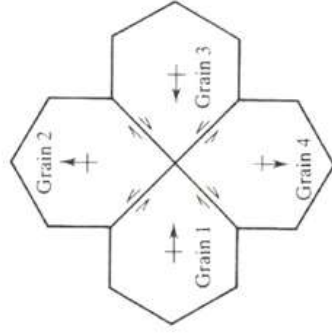
- (a) 没有明显的晶内滑移, 也没有位错密度的显著增高。
- (b) 晶粒有所长大, 但长大速率很低。
- (c) 晶粒形状始终保持等轴。
- (d) 两相呈带状分布的合金, 超塑形变后两相呈均匀分布。
- (e) 如合金具有组织, 超塑形变后组织消失。

(2) 金属超塑性机理

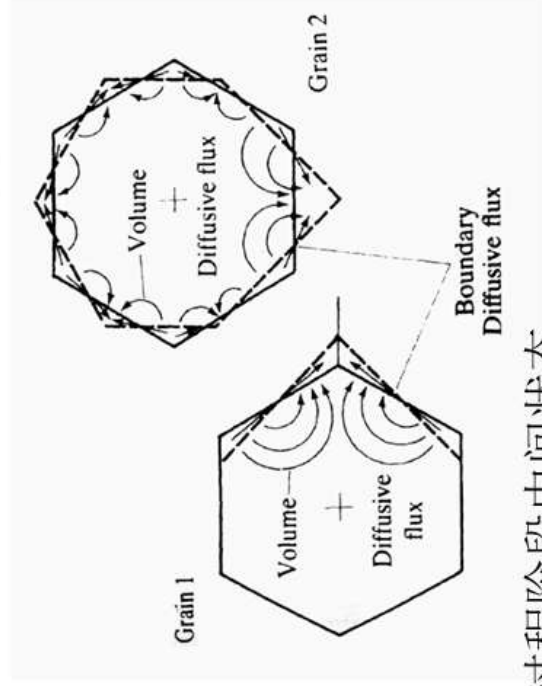
- 晶界运动+晶内变形
- 晶界滑动+扩散



(a) 初始状态



(b) 超塑变形过程阶段中间状态



(c) 最终完成

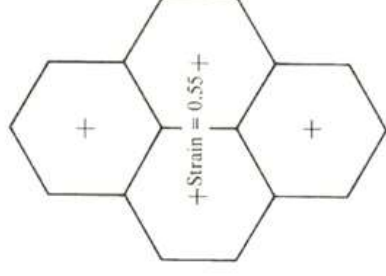


图6-34超塑变形过程中晶粒重组示意图

扩散蠕变+位错蠕变混合机制，
晶界滑动和晶内变形共同配合。

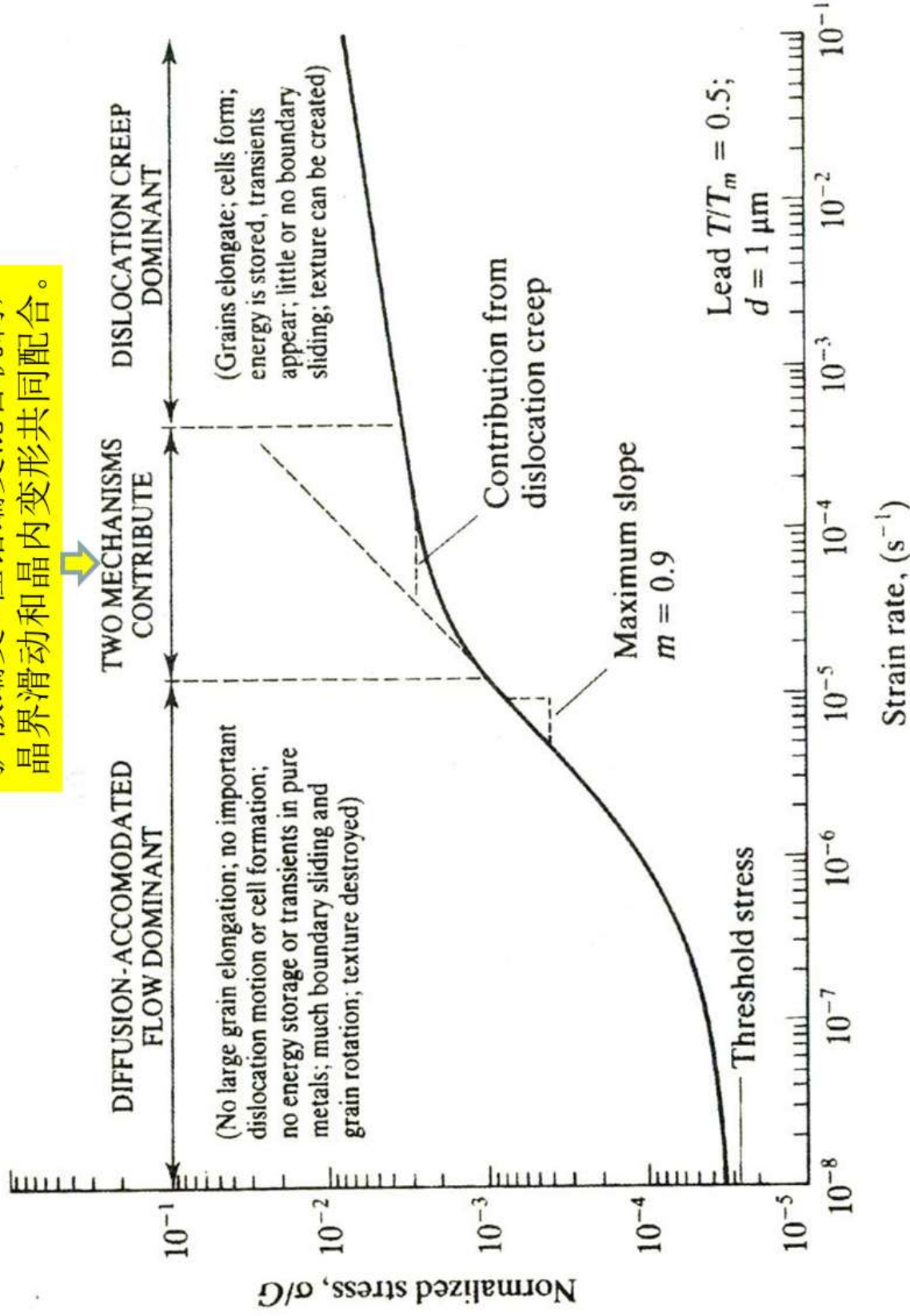


图6-35具有结构超塑性材料的流变应力与应变速率关系曲线及其对应微观机制

本章结束

个人对本课程成绩预期：

A >90

B 80~89

C 70~79

D 60~69

E 60分以下

投票 最多可选1项

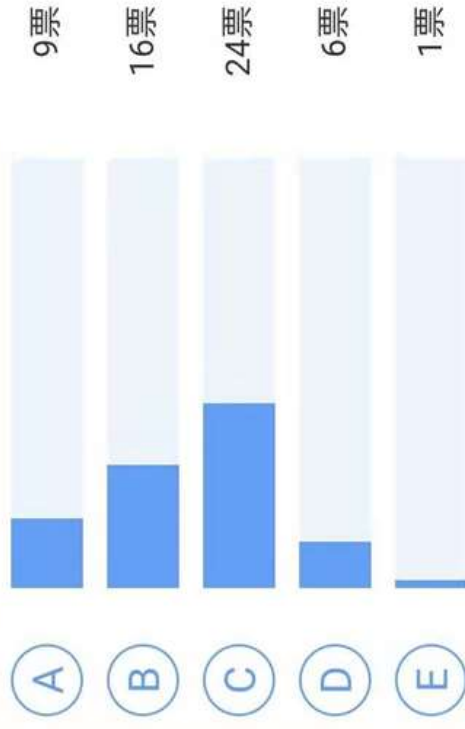
个人对本课程成绩预期：

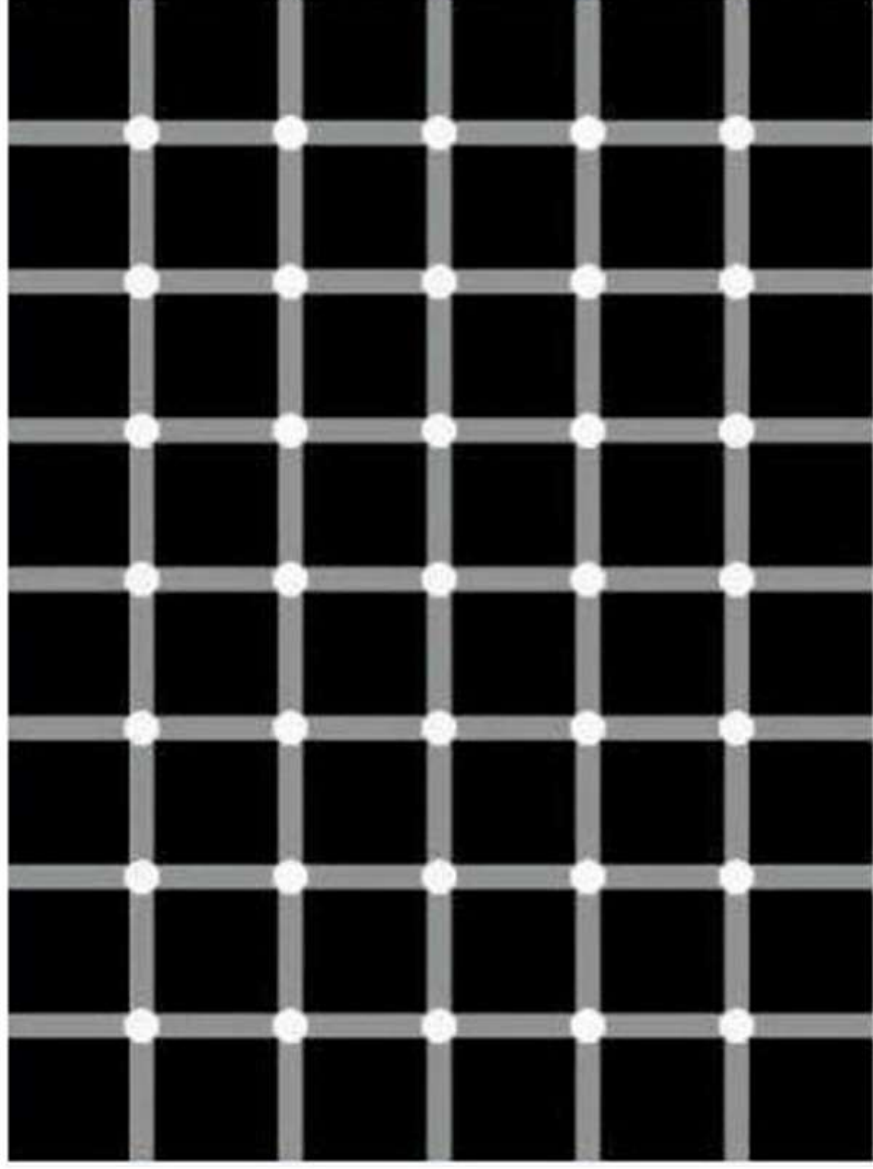
- ☐ A >90
- ☐ B 80~89
- ☐ C 70~79
- ☐ D 60~69
- ☐ E 60分以下



学厚质朴 百炼成材

材料科学与工程学院





材料力学性能课堂进度及教学内容检查表

学号 姓名

序号	上课时间	教学内容及要点	存在问题	备注
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				

提交材料力学性能课堂进度及教学内容自查表
yerch@ustb.edu.cn

找 错

表2-4 不同加载方式下的应力状态软性系数（取 $\nu = 1/3$ ）

加载方式	主应力			软性系数 α		
	σ_1	σ_2	σ_3			
三向等拉伸	σ	σ	σ	0		
三向不等拉伸 (平面应变) (设 $\sigma_1 = \sigma_2$)	σ	σ	$2\nu\sigma$	$3/8$		
单向拉伸	σ	0	0	$1/2$		
扭转	σ	0	$-\sigma$	$3/4$		
二向等压缩	0	$-\sigma$	$-\sigma$	1		
单向压缩	0	0	$-\sigma$	$3/2$		
三向等压缩	$-\sigma$	$-\sigma$	$-\sigma$	∞		