



材料科学与工程学院

## 第19次课（续）

主讲：叶荣昌





材料科学与工程学院

# 第六章 金属材料的高温强度与强化



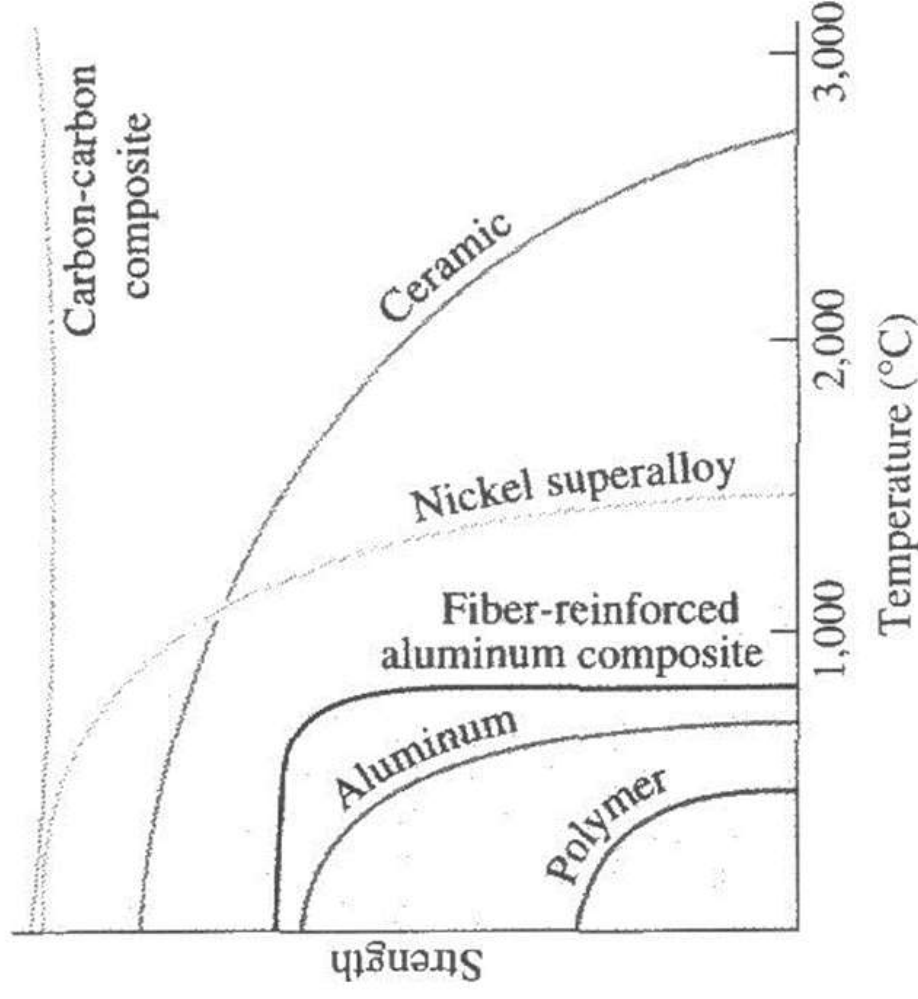
# Topic1 高温服役条件下材料的力学行为

## 1、“高温”的界定

对于不同材料，“高温”定义不同，对于一种材料是高温，对另一种材料也许算不上高温。

——约化温度

$$\frac{T(K)}{T_m(K)} > 0.5$$



## 2、时间效应

——材料的力学性能发生变化



——材料的组织结构发生变化

因此，与室温条件相比，材料在高温下的力学行为变得更为复杂，涉及到外部因素作用影响及材料内部组织结构变化，必须要考虑温度与时间两个因素的影响。



### 3、蠕变现象和规律

**蠕变**——材料在恒定载荷持续作用下缓慢产生塑性变形的现象  
**蠕变断裂**——由蠕变变形导致的材料断裂

**蠕变过程的三个阶段:**

(1) 减速蠕变阶段

$$\dot{\varepsilon} = At^{\frac{1}{n}}$$

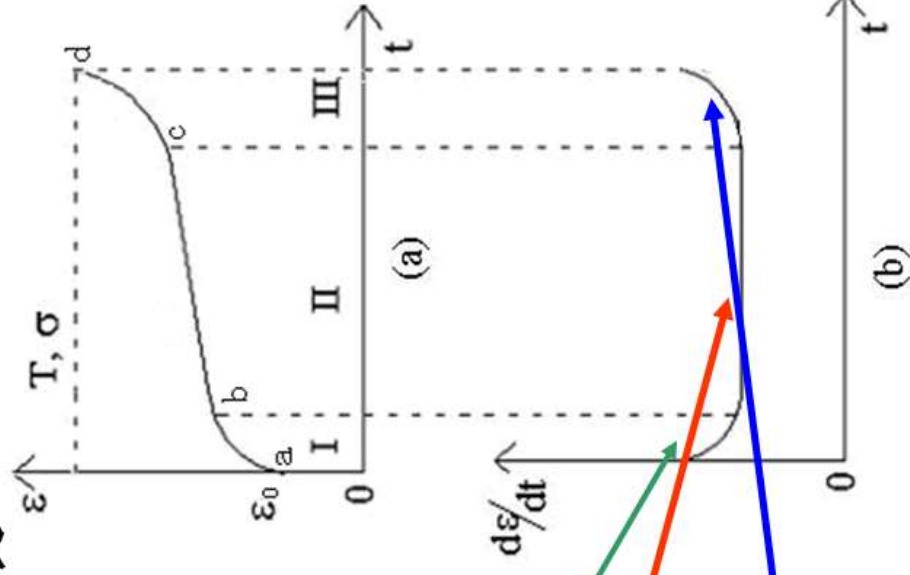
(2) 恒速蠕变阶段

$$\dot{\varepsilon} = \beta$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \dot{\varepsilon}t$$

(3) 加速蠕变阶段

$$\varepsilon = B + C\exp(\gamma t)$$



蠕变曲线示意图

材料的蠕变行为与应力水平、使用温度及晶体取向密切相关。

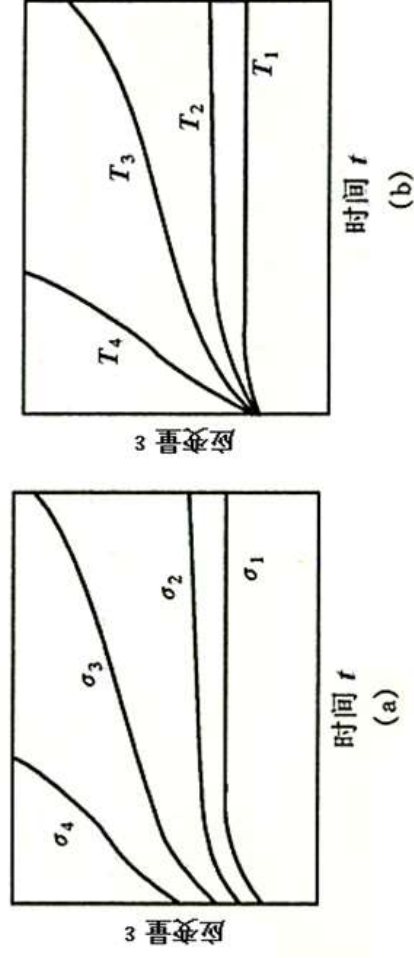


图6-5 应力和温度对蠕变曲线的影响

(a) 恒定温度下，应力变化 ( $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ )；(b) 恒定应力下，温度变化 ( $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ )

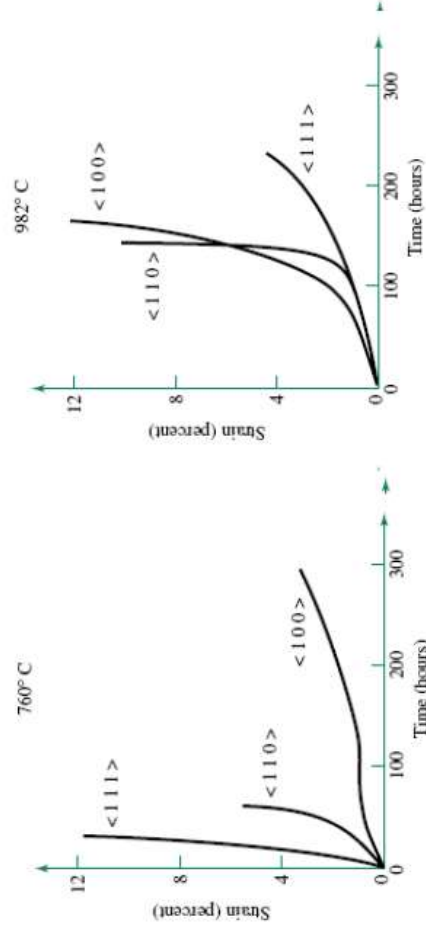


图6-3 单晶镍基高温合金PWA1480的典型蠕变曲线

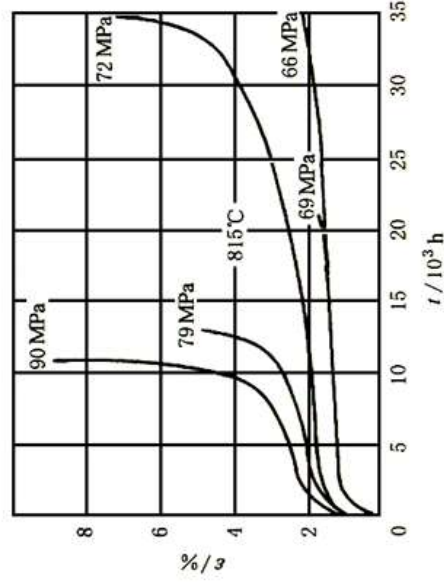
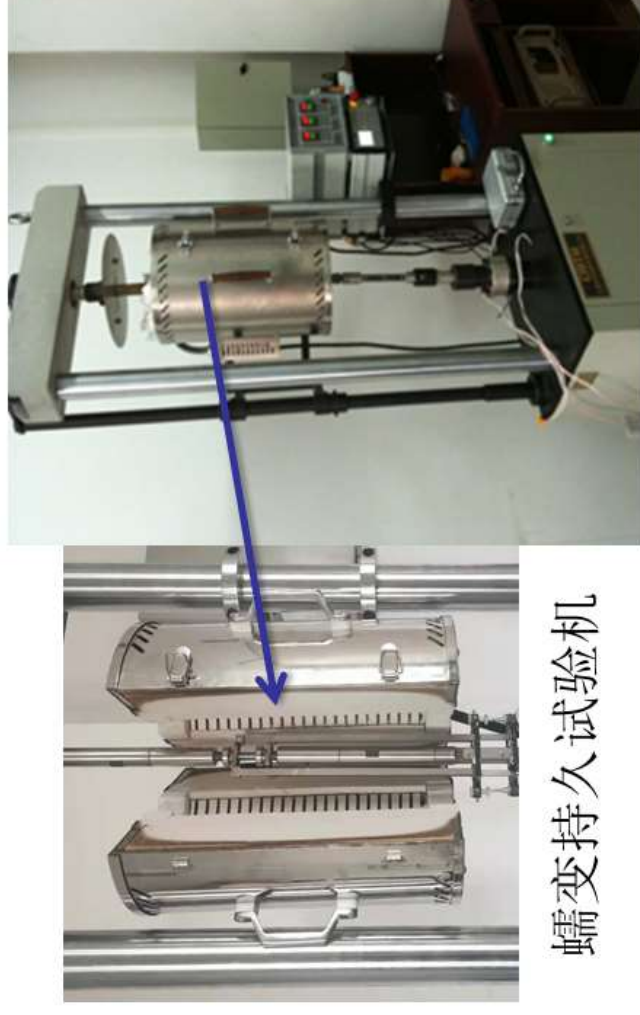


图6-6 钴基高温合金GH605棒材在不同应力下的蠕变曲线（815°C）

## 4、高温力学性能指标

### (1)蠕变试验

——测定试样在温度和应力恒定条件下蠕变变形量随时间的变化规律。



蠕变持久试验机

#### •蠕变极限

——高温长期载荷作用下材料的**塑变抗力指标**

在给定的温度下，使试样产生规定稳态蠕变速率的应力值

$$\sigma_{\varepsilon}^T \cdot \sigma_{0.0001\%/h}^{700}$$

在给定的温度和规定时间内，使试样产生规定蠕变伸长率的应力值

$$\sigma_{\delta/t}^T \quad \sigma_{1\%/10000h}^{700}$$

## (2)持久试验

采用高温拉伸试验机测定试样在规定温度和应力作用下的断裂时间。

### •持久强度

——材料在高温长期载荷作用下**断裂抗力指标**

$\sigma_t^T$  在给定温度下，蠕变断裂寿命达到预定值所允许承受的最大应力

$$\sigma_{1000}^{700} = 300\text{MPa}$$

——700℃下持久寿命为1000小时的最大应力许用应力为300MPa



大量试验结果表明，持久试验时外加应力 $\sigma$ 和断裂时间 $t$ 之间的关系为

$$t = K\sigma^{-n}$$

$$\lg t = \lg K - n \lg \sigma$$

式中， $K$ 和 $n$ 取决于试验温度及材料组织状态

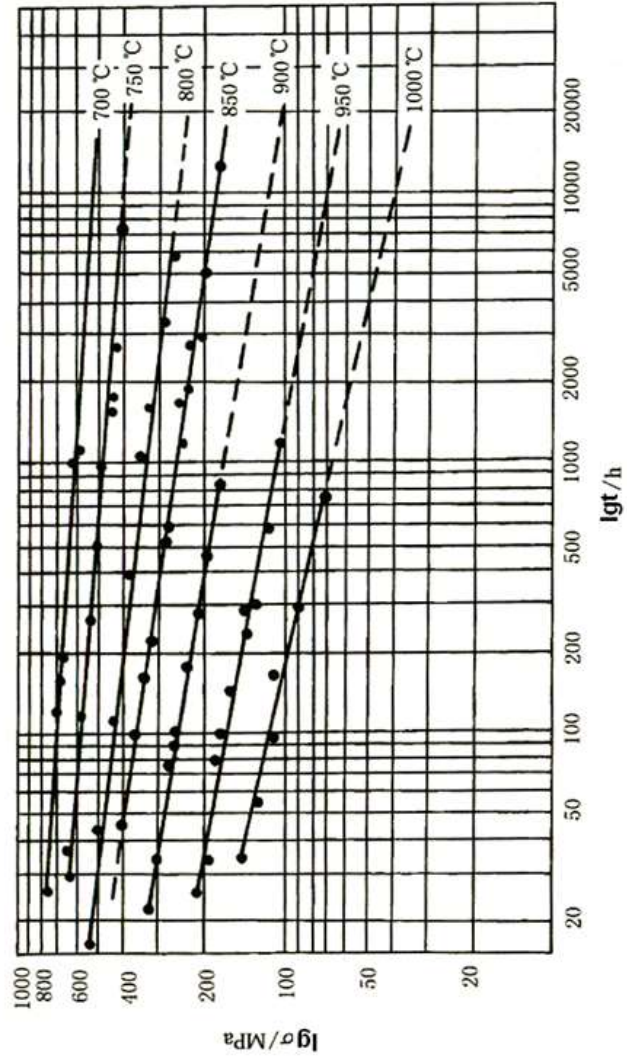


图6-23 铸造镍基高温合金K438的持久强度—寿命曲线

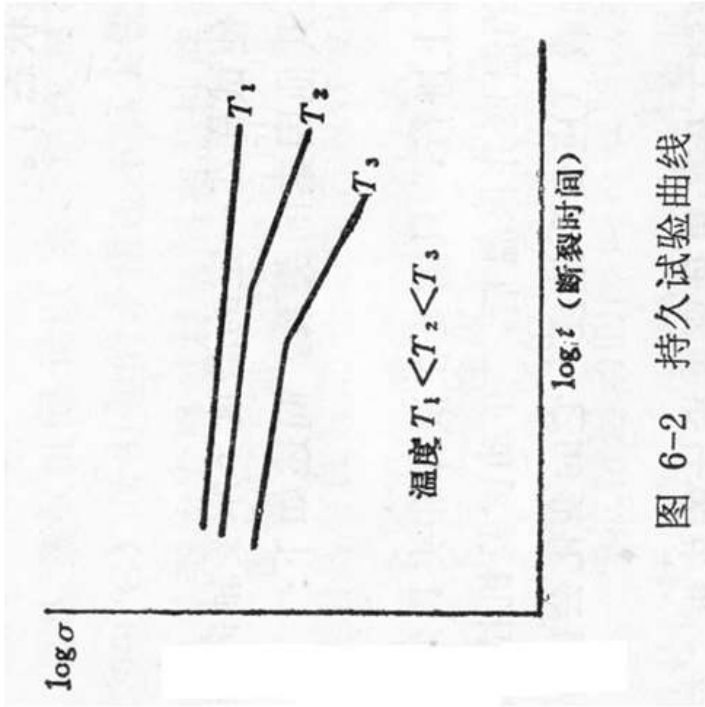


图 6-2 持久试验曲线

- 持久塑性

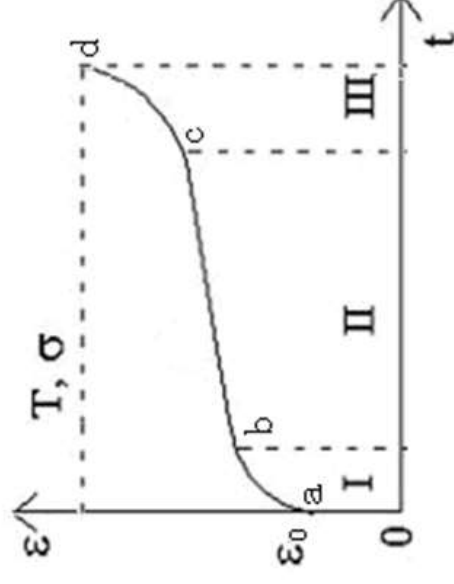
- 通过高温持久试验，测量试样断后伸长率及断面收缩率

- 持久寿命( $t_f$ )

- 在给定温度和应力下试样断裂的时间

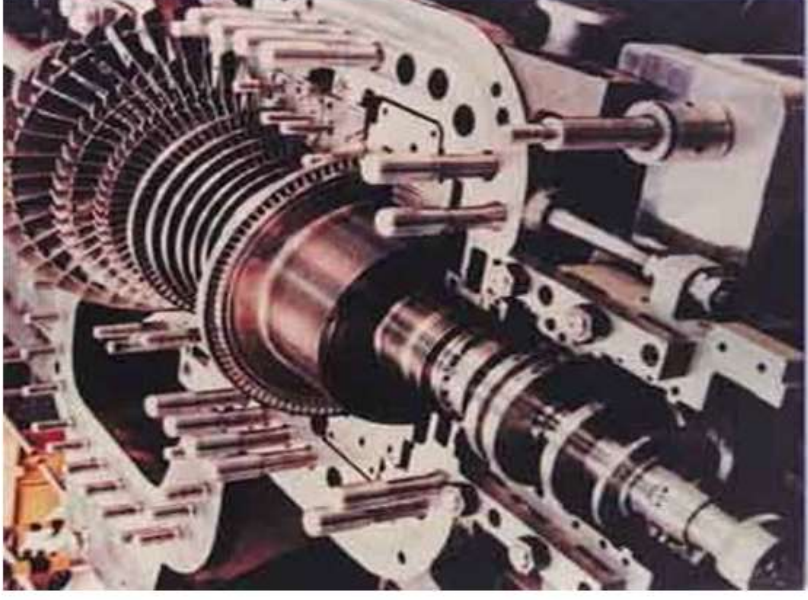
试验表明，材料的持久寿命与稳态蠕变速率之间存在一定的关系

$$\dot{\varepsilon} \cdot t_f = C$$



测定试样的持久寿命需要很长时间，但是，利用上述关系，在试验进入稳态蠕变阶段后，即可根据稳态蠕变速率来预测持久寿命。

## 5、应力松弛与松弛稳定性



——在高温下工作，依靠弹性变形获得紧固力，随着时间延长，在总变形量不变的条件下，弹性变形逐渐转变为塑性变形，从而使工作应力逐渐降低。



## •应力松弛

——在规定温度条件下，金属材料中的应力随时间增加而减小的现象。

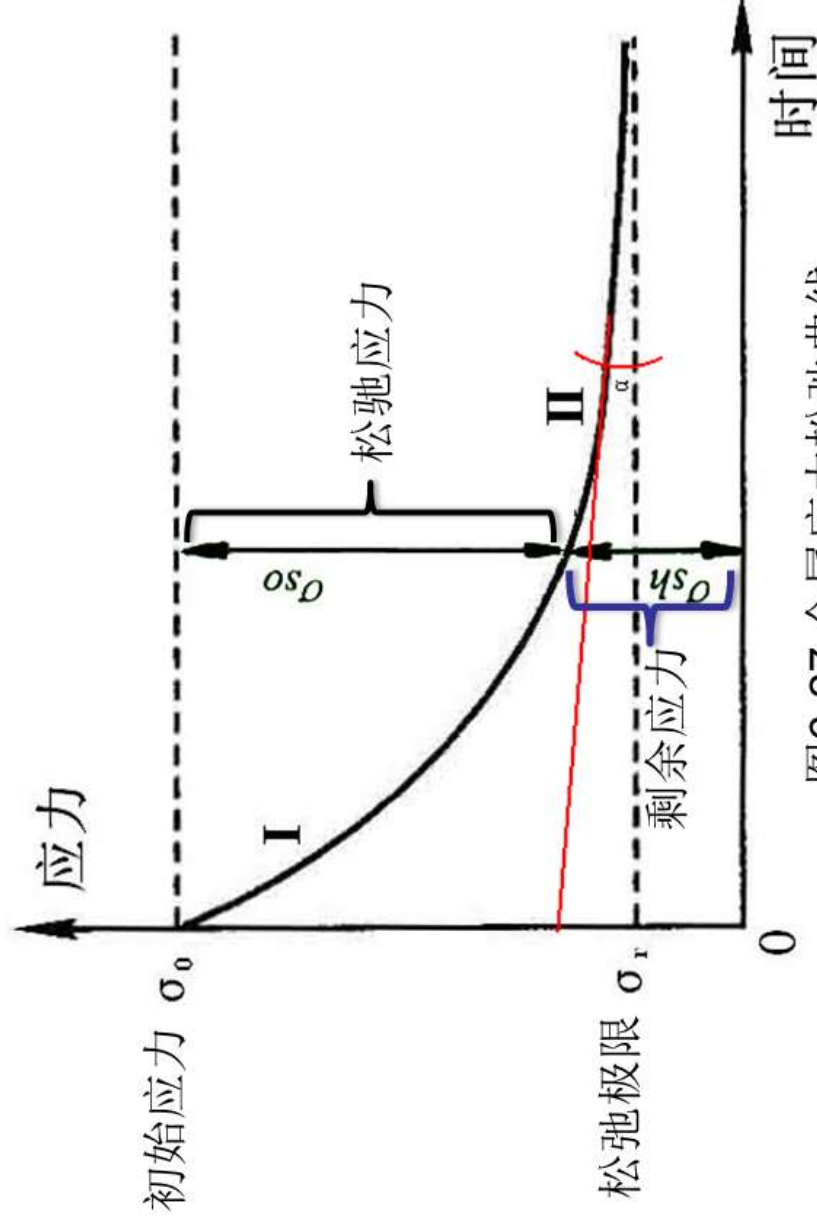


图6-27 金属应力松弛曲线



- 松弛稳定性及衡量指标
  - 金属材料抵抗应力松弛的性能
  - 在一定温度 $T$ 和初始应力 $\sigma_0$ 下，经规定时间 $t$ 后的剩余应力 $\sigma_{sh}$ 的大小。

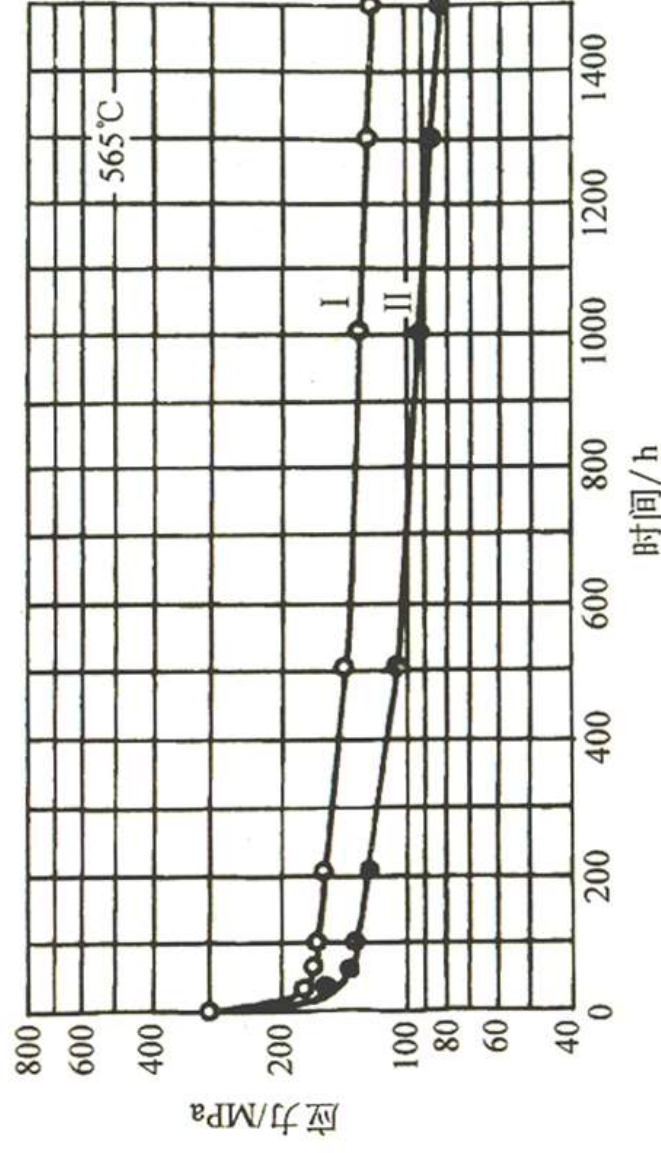


图6-28 热处理工艺对20Cr1Mo1V1钢应力松弛曲线的影响  
I—1000°C正火，700°C回火 II—1000°C油淬，700°C回火

## 6、蠕变变形和断裂的微观机理

### (1) 蠕变变形机理

#### A. 位错蠕变机制

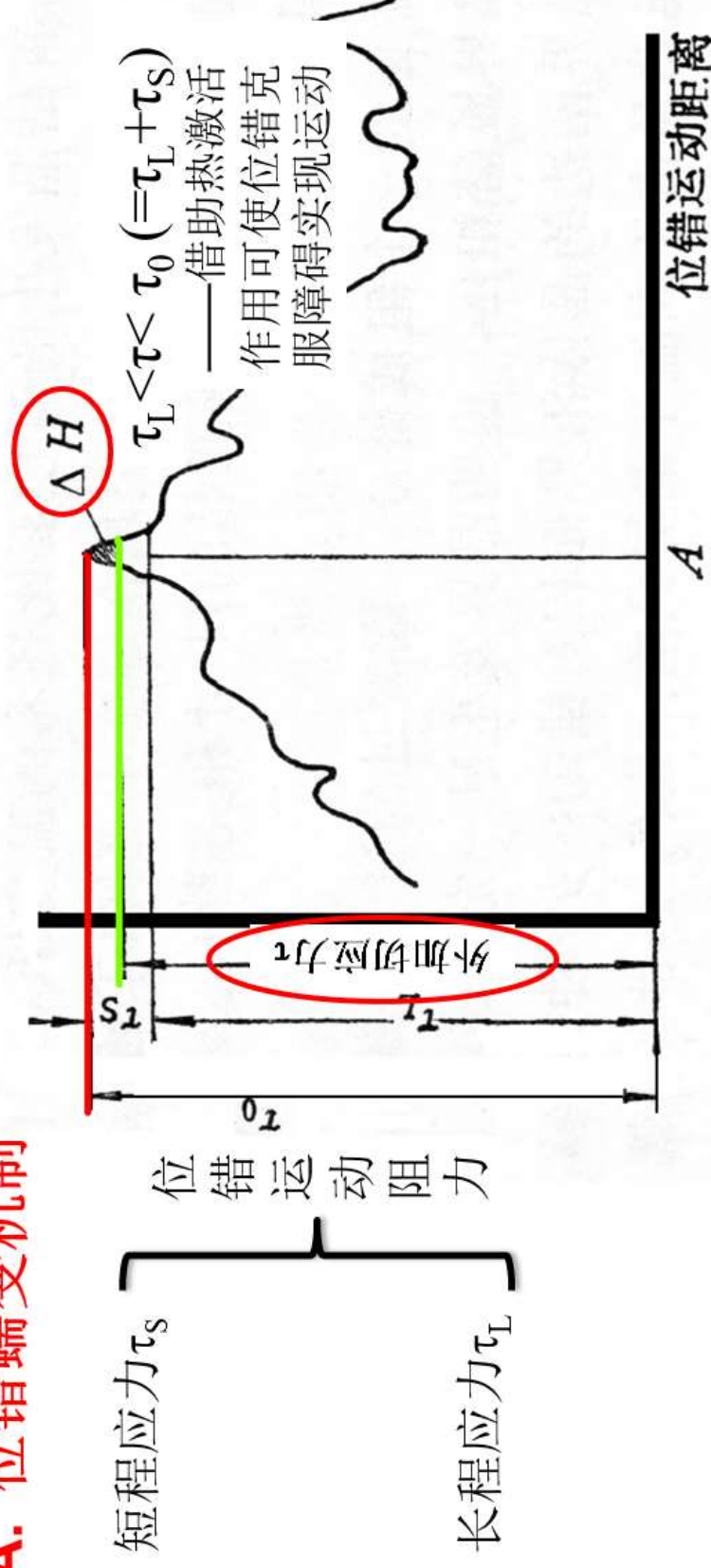


图6-7 位错运动阻力作用机制示意图

蠕变过程与能垒大小、温度高低及障碍密度等密切相关，并随时间而发展变化。

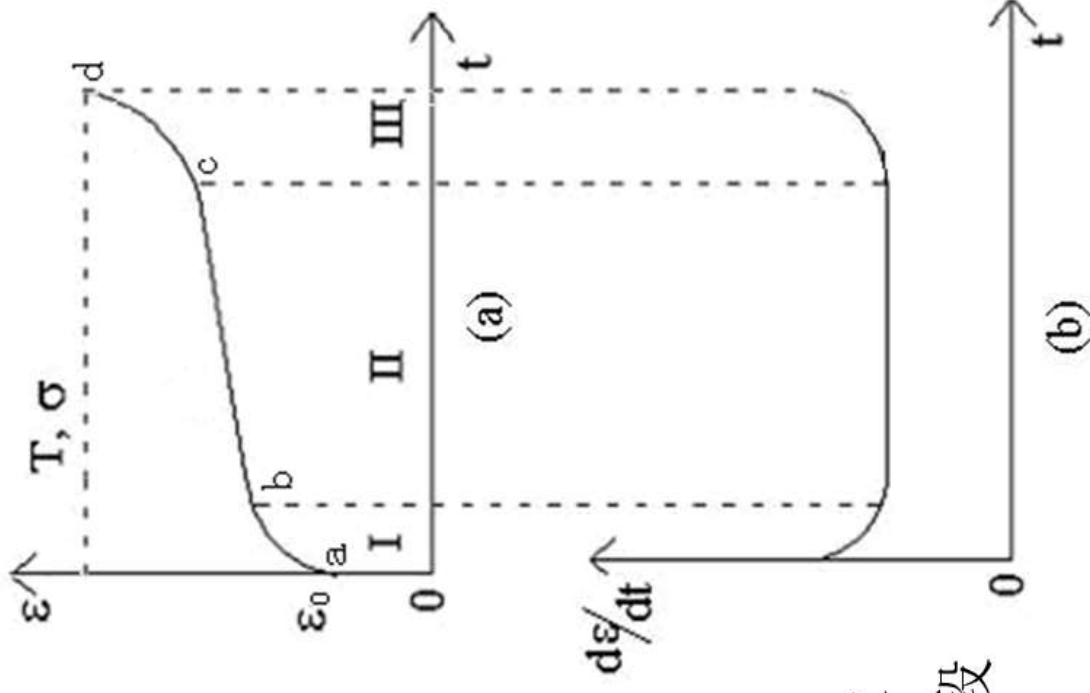
在蠕变过程中，材料内部两种过程相互竞争

——形变引起的加工硬化，使材料的变形抗力越来越大

——热激活促进变形晶体产生  
回复、再结晶及其它扩散过程，  
消除应变强化的效果，削弱材  
料的变形抗力

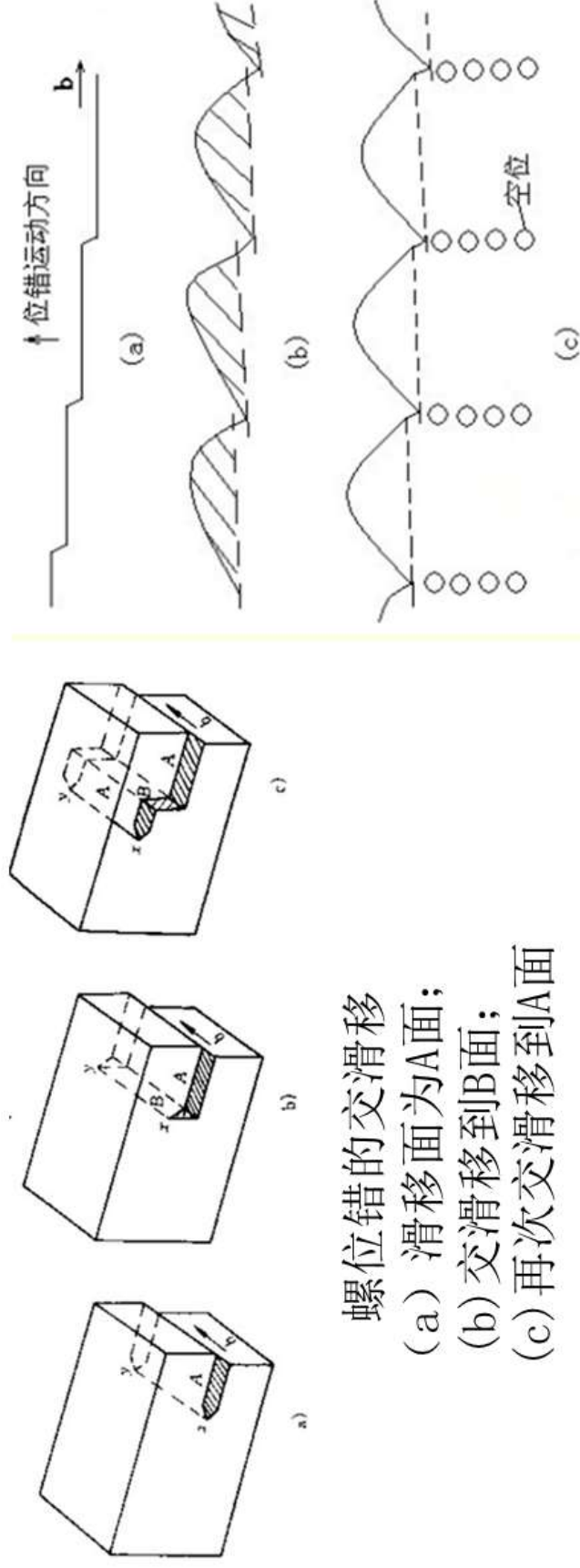
两个过程相互消长，形成了蠕变行为的不同阶段：

I-减速蠕变阶段  
II-恒速蠕变阶段  
III-加速蠕变阶段

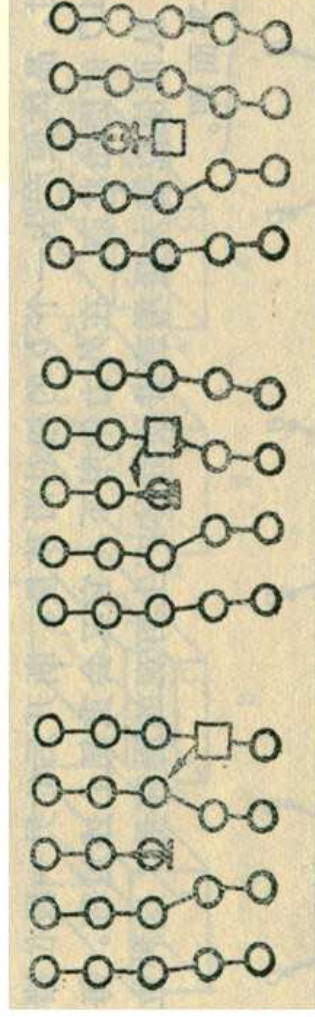




# 热激活对位错运动的影响方式



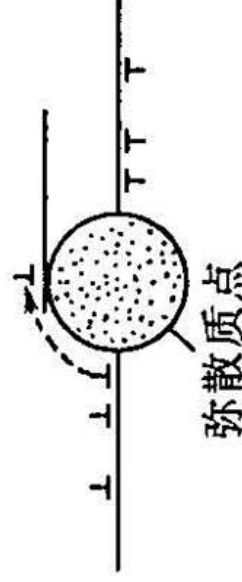
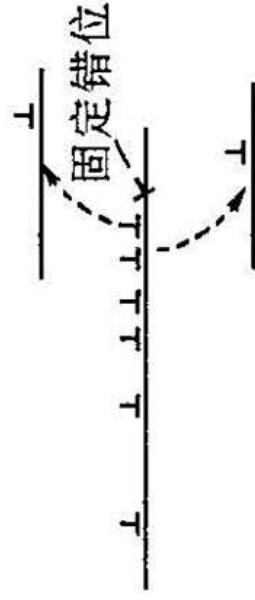
带割阶的螺型位错的运动



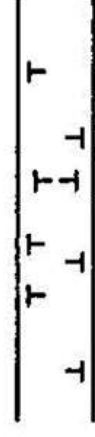
螺位错的交滑移  
(a) 滑移面为A面;  
(b) 交滑移到B面;  
(c) 再次交滑移到A面

空位运动引起刃型位错攀移

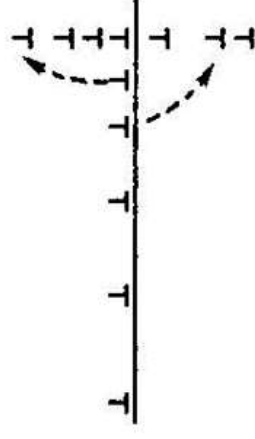




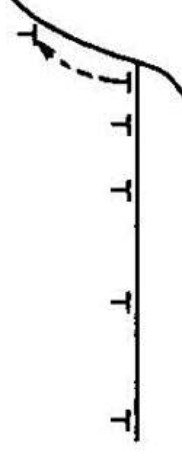
(a) 超过固定位错与弥散质点  
在新滑移面上运动



(b) 与邻近滑移面上异号位错相消



(c) 形成小角度晶界



(d) 消失于大角度晶界

蠕变过程中强化与软化同时发生，位错的运动、受阻、解脱的行为就是形变、强化又软化的过程。

温度的作用是提供热激活能量，与外加应力协同作用，帮助位错越过障碍，使之产生持续变形。

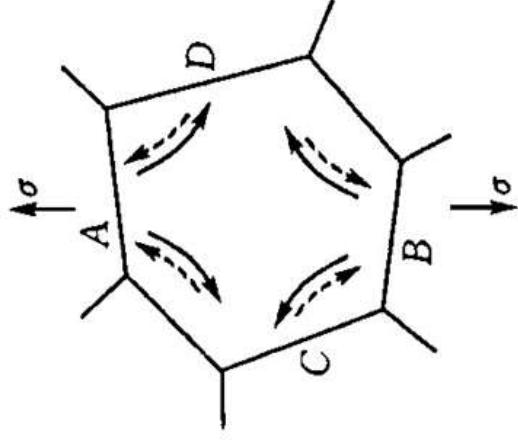
研究表明，在温度较低，应力水平较高的情况下，位错滑移机制起主导作用。

## B. 扩散蠕变机制

- 发生在蠕变温度相当高、蠕变速率又比较低的情况
  - 是高温外力作用下大量原子和空位定向移动的结果
- 在不受外力的情况下，多晶体材料中原子和空位的移动无方向性，宏观上不显示塑性变形。

### 在高温+应力作用下，多晶体内产生不均匀应力场

- 承受拉应力部（如A、B晶界）位空位浓度增加
- 承受压应力部位（如C、D晶界）空位浓度降低
- 由于不同区域的空位浓度不同，空位从拉应力区向压应力区扩散（虚线）（实线），原子则反向扩散（虚线），导致材料沿应力方向伸长。



扩散的两种途径:

➤ Nabarro-Herring机制——晶内途径

$$\dot{\varepsilon}_{\text{N-H}} = \frac{D_v \sigma \Omega}{d^2 k T}$$

其中,  $D_v$ 为晶内自扩散系数,  $\sigma$ 为应力,  $d$ 为晶粒尺寸  
 $k$ 为玻尔兹曼常数,  $T$ 为温度,  $\Omega$ 为原子体积

➤ Coble机制——晶界作为空位和原子的扩散通道

$$\dot{\varepsilon}_C = \frac{D_B \sigma \Omega \delta}{\pi d^3 k T}$$

其中,  $D_B$ 为晶界扩散系数,  $\delta$ 为晶界厚度。

**两者的共同点——蠕变速率与应力及自扩散系数成正比**

在高温时通常为Nabarro-Herring机制, 而温度较低时为Coble机制。在一定条件下两种机制可以同时发生。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{D_v \sigma \Omega}{k T d^2} \left[ 1 + \delta \frac{D_B}{\pi d D_v} \right]$$



## C. 晶界滑动

在高温下，受力后晶界易产生滑动，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。

