



# 过程设备机械设计基础

---拉伸与压缩

主讲：付 尧

电话：64252096

email: [fuyao@ecust.edu.cn](mailto:fuyao@ecust.edu.cn)

学习资料及论坛: [www.chenjj.org](http://www.chenjj.org)

# 主要内容

- ✦ 材料力学的基本概念
- ✦ 拉伸和压缩
- ✦ 材料的力学性能
- ✦ 力学性能测试
- ✦ 交变应力下的强度问题
- ✦ 应力集中



# 1.材料力学的基本概念

---

## ● 静力学与材料力学的区别



1. 静态平衡下的刚体
2. 不改变几何形状
3. 外力作用下如何保持平衡状态



1. 不能无限制的承受外力
2. 发生形状和尺寸的改变
3. 弹性变形
4. 塑性变形

# 1.材料力学的基本概念

---

## ● 材料在力学角度需满足的基本要求

强度要求

- 构件抵抗破坏的能力。

刚度要求

- 构件抵抗变形的能力。

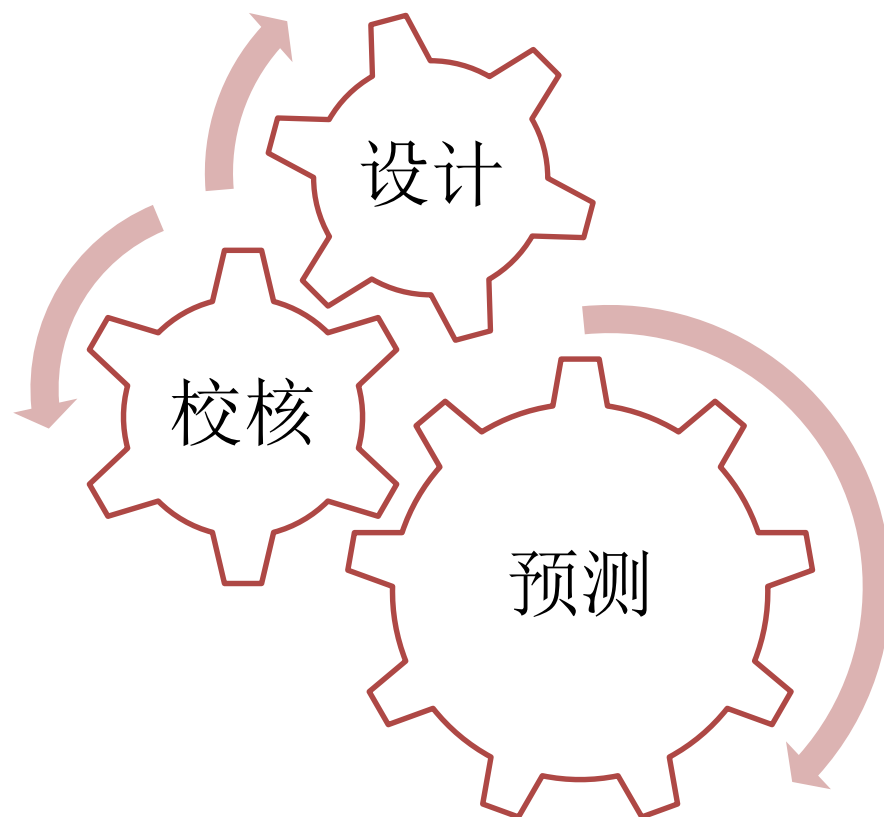
稳定性要求

- 构件保持其原有平衡状态的能力。

# 1.材料力学的基本概念

---

Q: 材料力学需要解决什么问题呢?



# 1.材料力学的基本概念

---

## 变形固体的四个基本假设：

### 连续性假设

- 认为整个物体体积内毫无空隙地充满物质

### 均匀性假设

- 认为物体内的任何部分，其力学性能相同

### 各向同性假设：

- 认为在物体内各个不同方向的力学性能相同

### 小变形假设

- 认为受力后形状和尺寸的改变可忽略不计

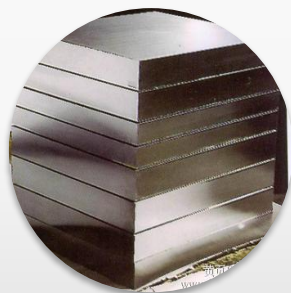
# 1.材料力学的基本概念

---

- 构件变形的基本形式：拉压、剪切、扭转、弯曲



杆



板

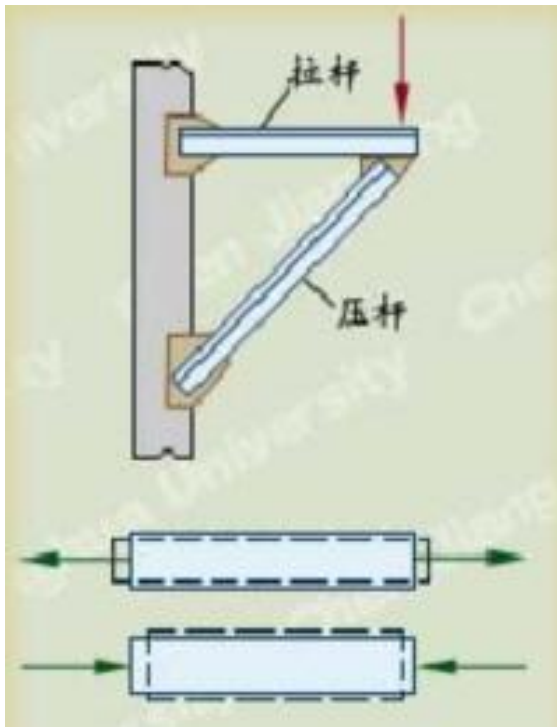


壳

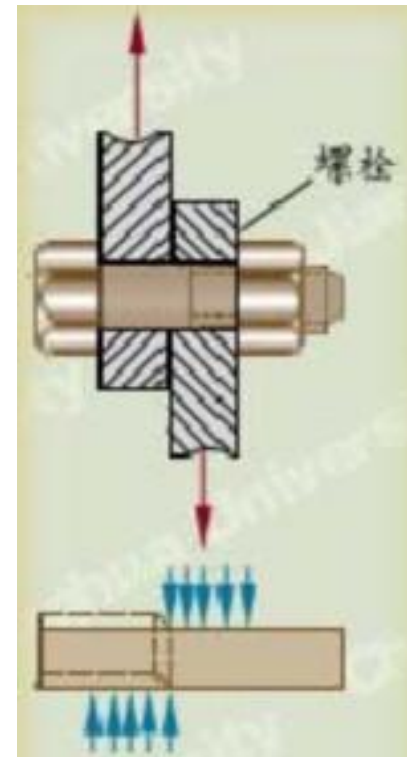
工程构件

# 1.材料力学的基本概念

---



拉压变形



剪切变形

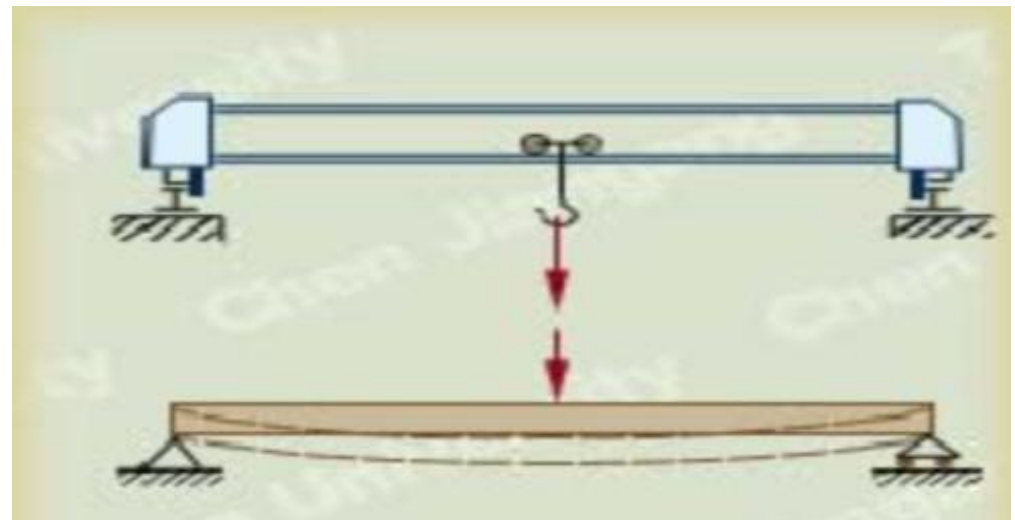


# 1.材料力学的基本概念

---



扭转变形



弯曲变形

# 1.材料力学的基本概念

---

## ● 外力

按  
外  
力  
作  
用  
的  
方  
式

**体积力:**是连续分布于物体内部各点的力

如物体的自重

**面积力:** 分布力: 如油缸内壁的压力, 水坝受到的水压力等均为分布力

集中力: 若外力作用面积远小于物体表面的尺寸, 可作为作用于一点的集中力。如火车轮对钢轨的压力等

按  
时  
间

**静载:** 缓慢加载 ( $a \approx 0$ )

**动载:** 快速加载 ( $a \neq 0$ ) , 或冲击加载

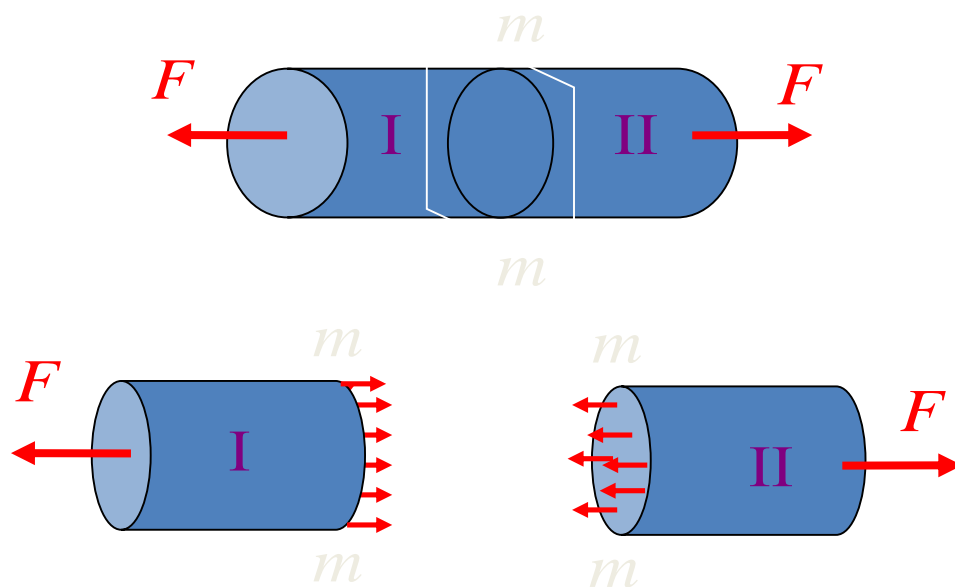
# 1.材料力学的基本概念

---

- **内力：**外力作用引起构件内部的附加相互作用力。

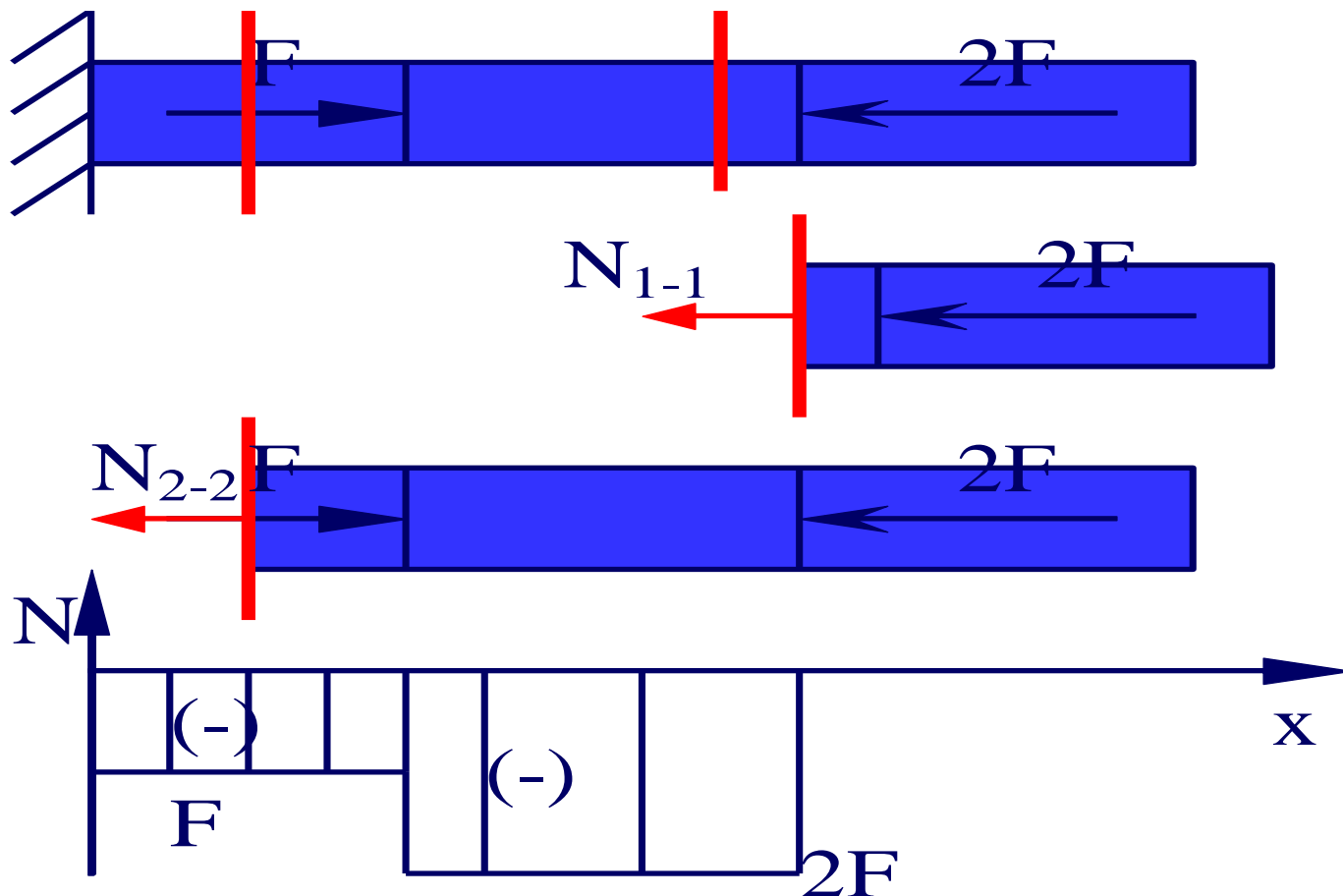
## 求内力的方法——截面法

- 1、切
- 2、留
- 3、代
- 4、平



# 1.材料力学的基本概念

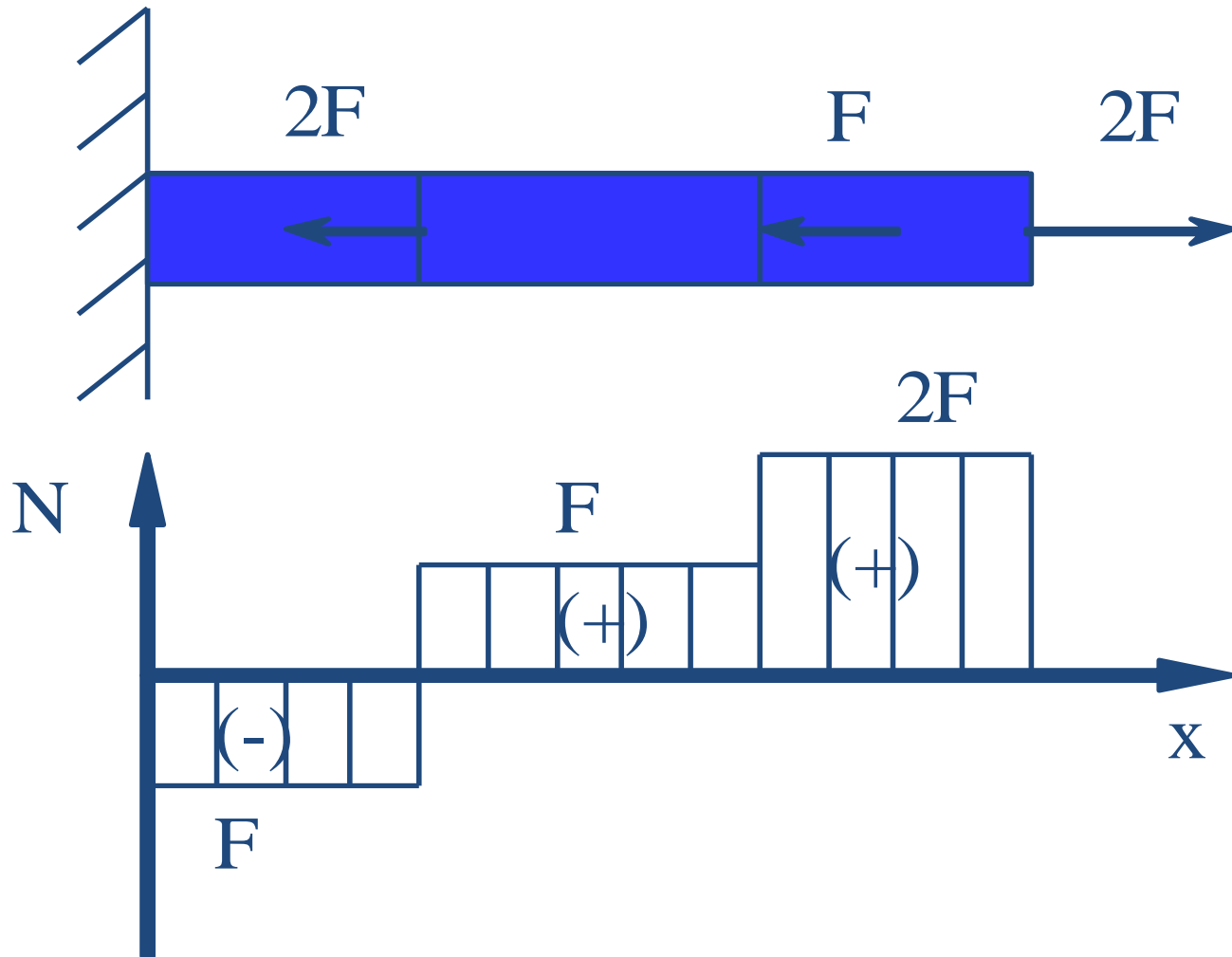
- 例1：求直杆的内力



# 1.材料力学的基本概念

---

- 例2:



# 实际生活中的拉伸和压缩

---





# 实际生活中的拉伸和压缩

---

拉伸与压缩工程实例



# 实际生活中的拉伸和压缩

---





# 实际生活中的拉伸和压缩

---



# 实际生活中的拉伸和压缩

---



# 几个案例

---

二次大战期间，400余艘全焊接舰船断裂





# 几个案例

---

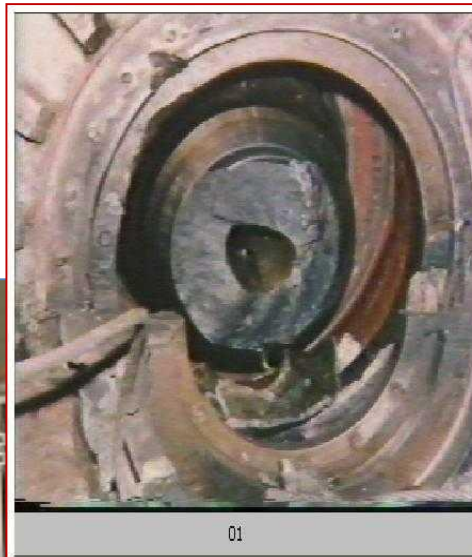


2005.4.25, 上午9:20, 日本兵库县尼崎市列车脱轨: 死亡106人, 伤400人

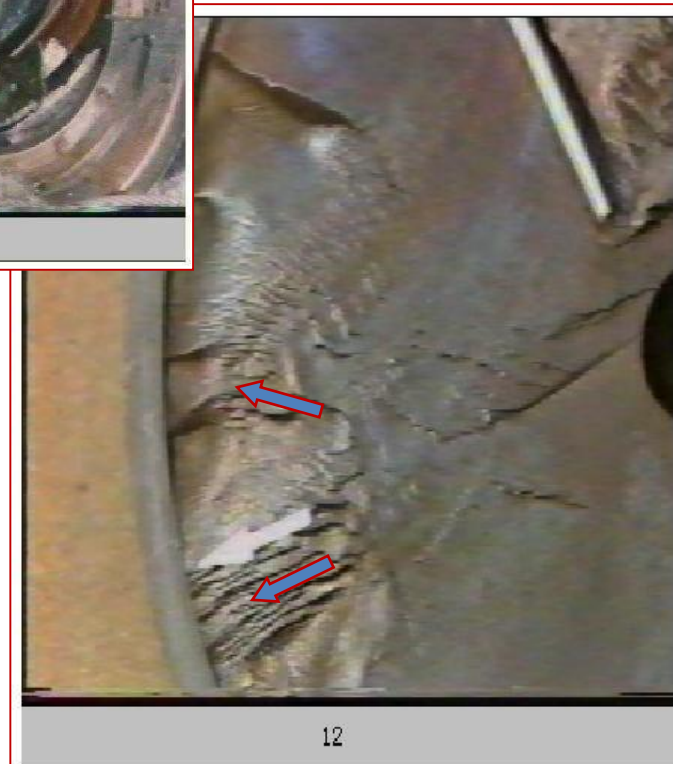
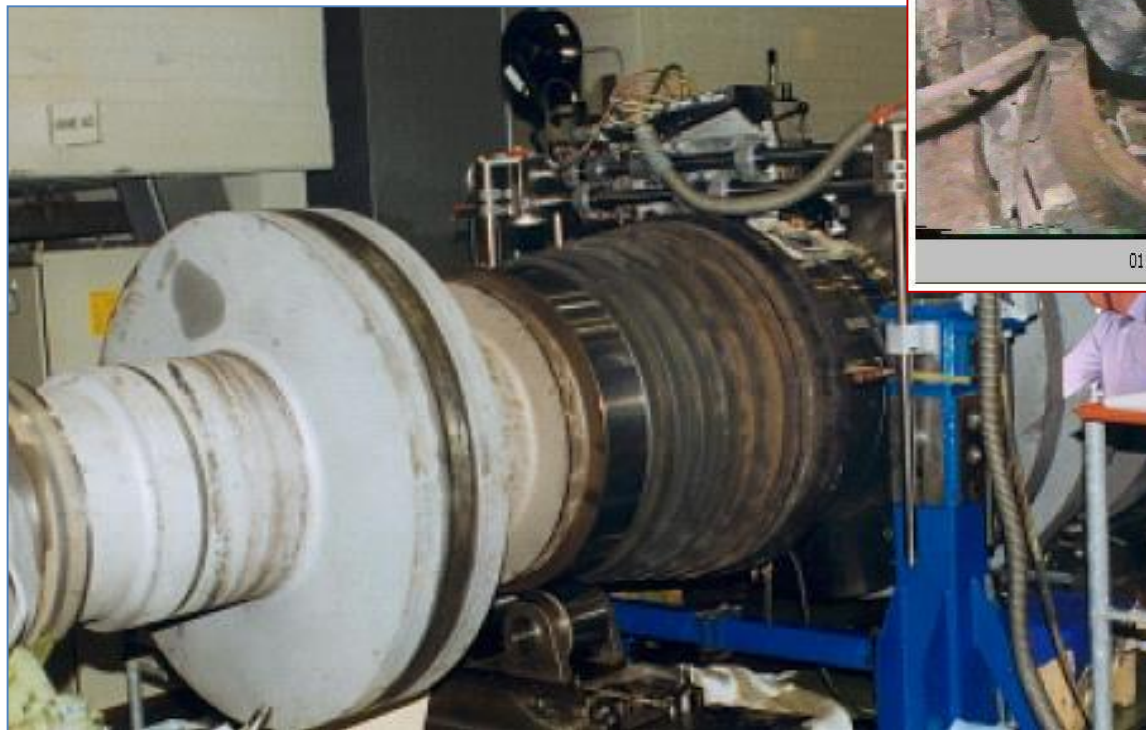


1998.6.3, 德国埃舍德小镇, 高速列车脱轨: 101人死亡, 200人受伤, 88人重伤

# 几个案例

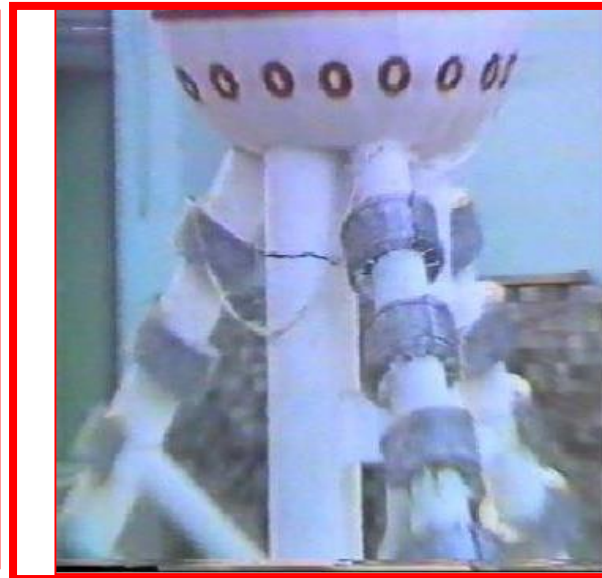
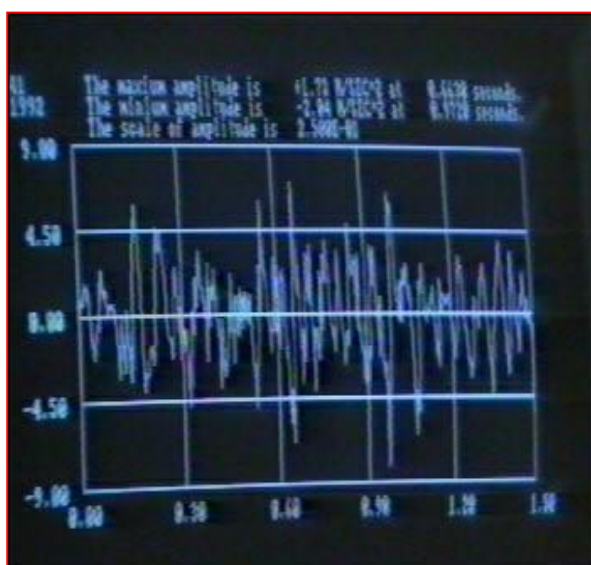
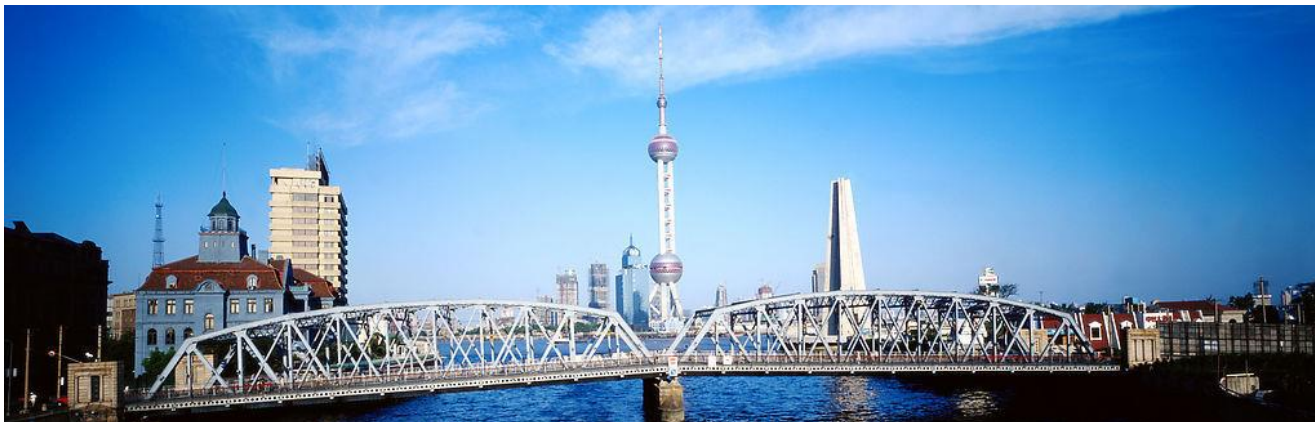


转子轴





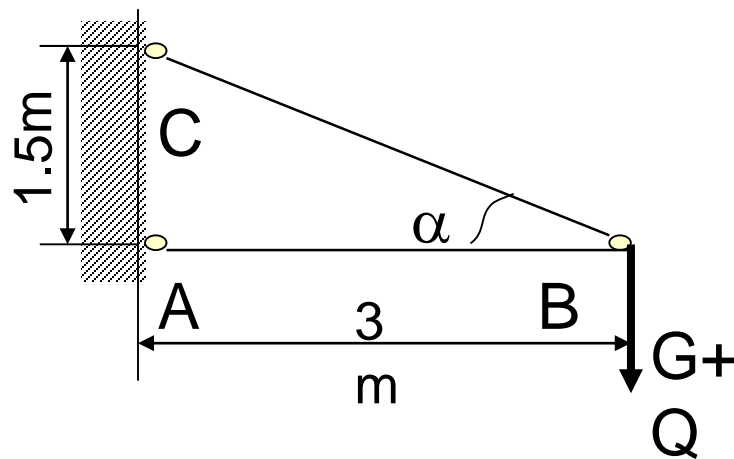
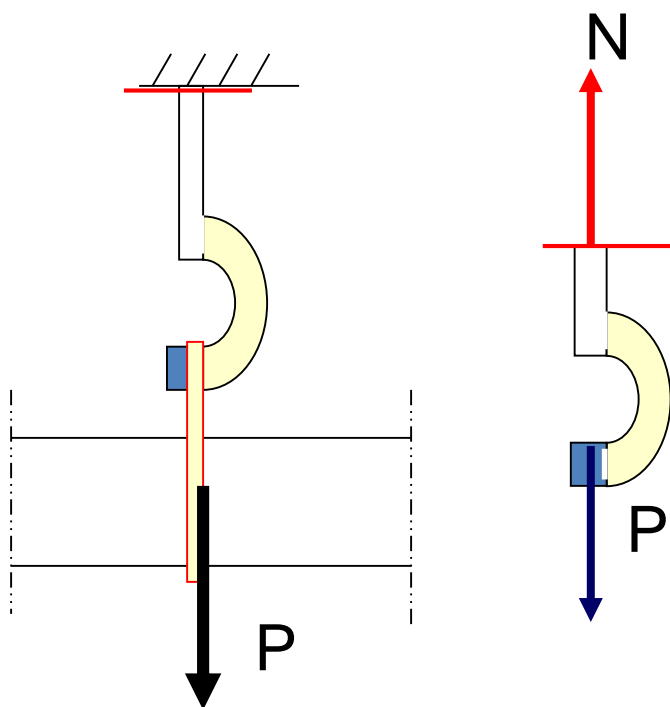
# 几个案例



上海 东方明珠电视塔高300m 球径45m

## 2. 拉伸和压缩

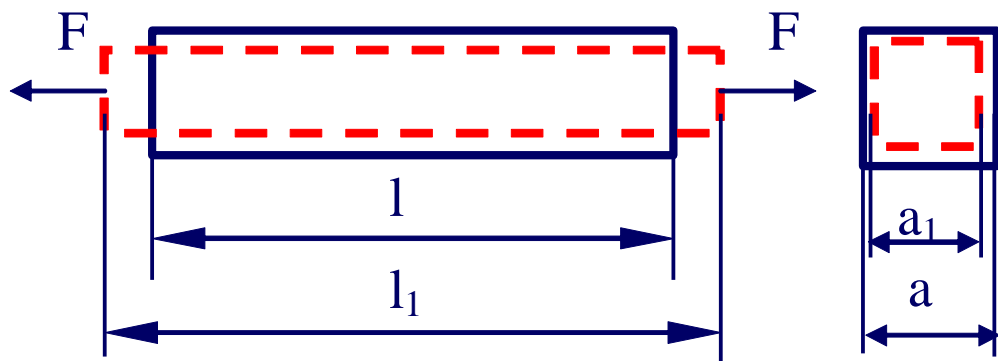
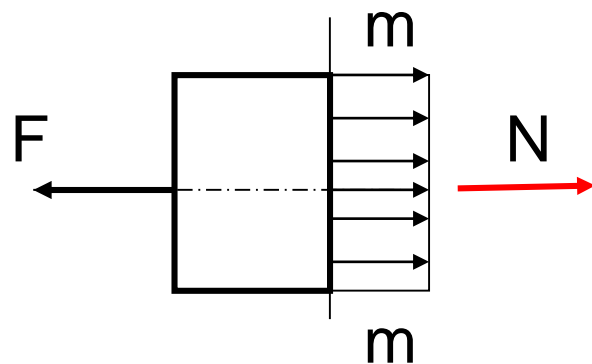
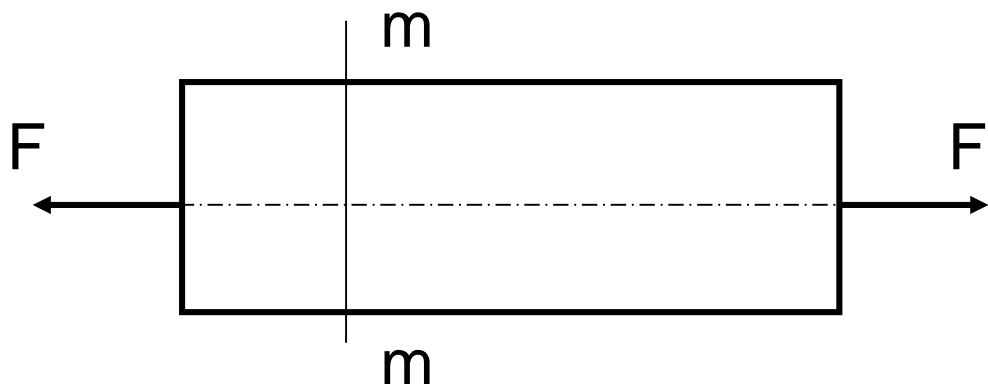
承受轴向拉压载荷的构件：



吊构、机架、联结螺栓、支腿、千斤顶的螺杆

## 2. 拉伸和压缩

### ●直杆轴向拉压时横截面上的应力



平面截面假设

### 什么是应力？

单位面积上内力的大小，衡量杆件受力的强弱程度。

$$\sigma = \frac{N}{A}$$



## 2. 拉伸和压缩

---

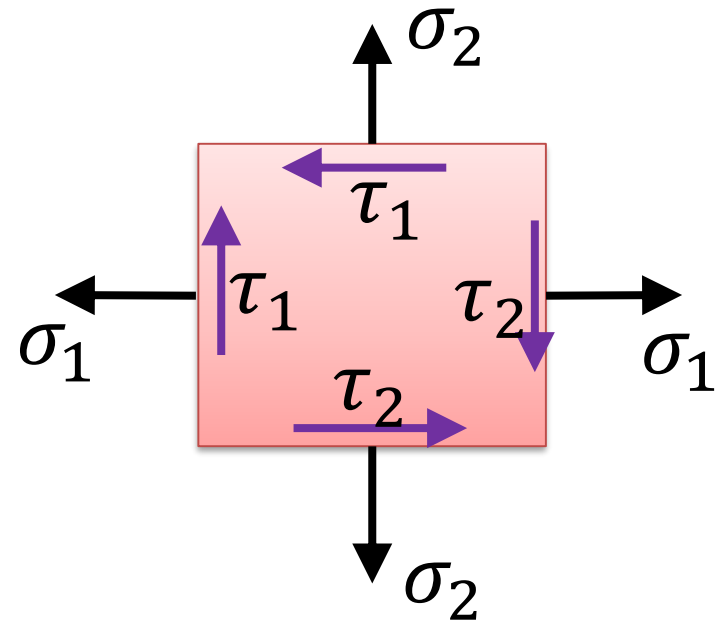
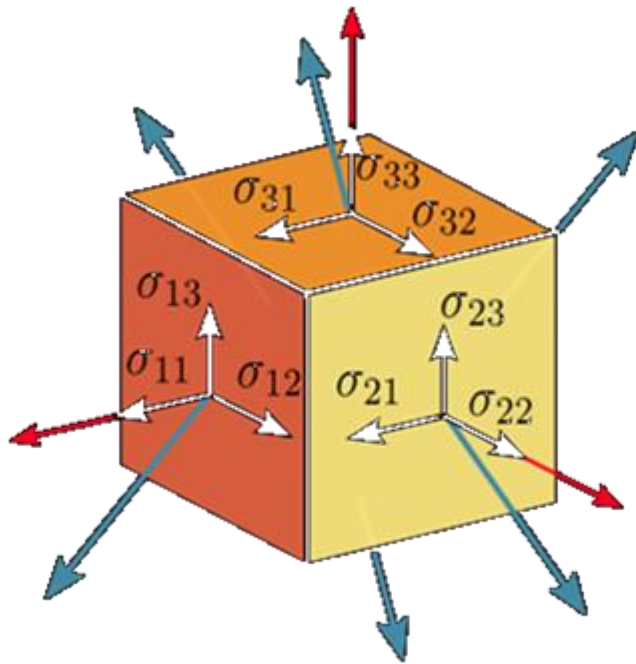
- **外力**：大小相等，方向相反，作用在直杆两端，作用线与轴线重合。
- **内力**：轴力；平面截面假设；
- **规定**：拉应力为正，压应力为负
- **单位**：帕， $\text{N/m}^2$ ；

$$1\text{N} / \text{mm}^2 = 10^6 \text{Pa} = 1\text{MPa}$$

教材P41：例3-2，计算搅拌釜轴的应力

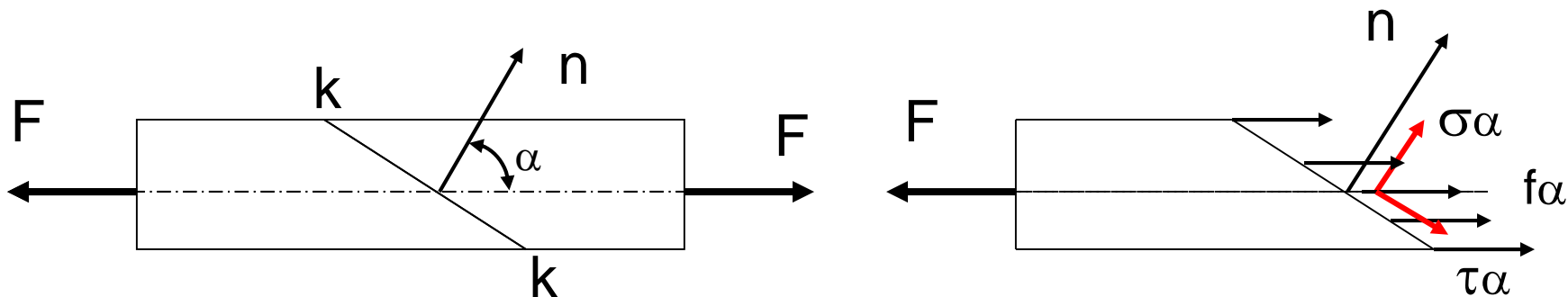
# 正应力和剪应力

- 应力方向与截面垂直为正应力 $\sigma$
- 应力方向与截面平行为剪应力（切应力） $\tau$



## 2. 拉伸和压缩

### ●直杆轴向拉压时斜面上的应力

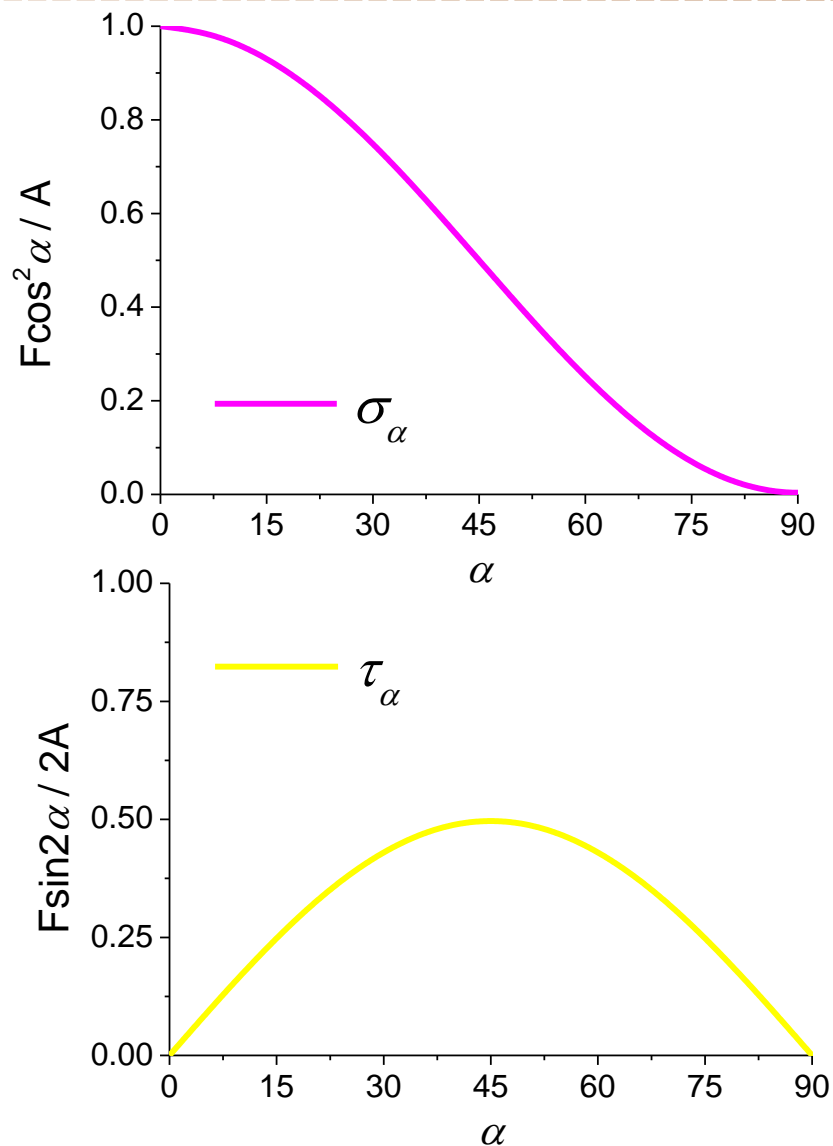


横截面上的正应力： $\sigma = \frac{F}{A}$

截面k-k的面积为 $A_\alpha$ ： $A_\alpha = \frac{A}{\cos \alpha}$   $\longrightarrow$   $f_\alpha = \frac{F}{A} \cos \alpha$

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = f_\alpha \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha \\ \tau_\alpha = f_\alpha \sin \alpha = \sigma \sin \alpha \cos \alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha \end{cases}$$

# 斜截面上应力的特点



(1)  $\alpha = 0$ 时，斜截面k-k垂直于轴线， $\sigma_\alpha$ 达到最大值，而 $\tau_\alpha = 0$

(2)  $\alpha = 45^\circ$ 时， $\tau_\alpha$ 达到最大值， $\tau_\alpha = \sigma / 2$

(3)  $\alpha = 90^\circ$ 时， $\sigma_\alpha = \tau_\alpha = 0$

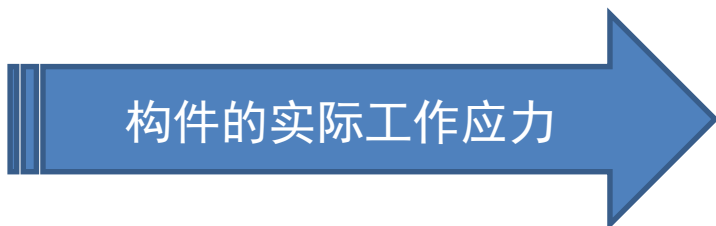
## 2. 拉伸和压缩

---

### ●直杆受轴向拉（压）时的强度条件

★ 极限应力：  $\sigma^0$    $\sigma_{\max} < \sigma^0$

★ 许用应力：  $[\sigma]$    $[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n}$ ,  $n$ 为安全系数

 构件的实际工作应力

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma]$$

## 2. 拉伸和压缩

---

根据强度条件可完成三项工作：

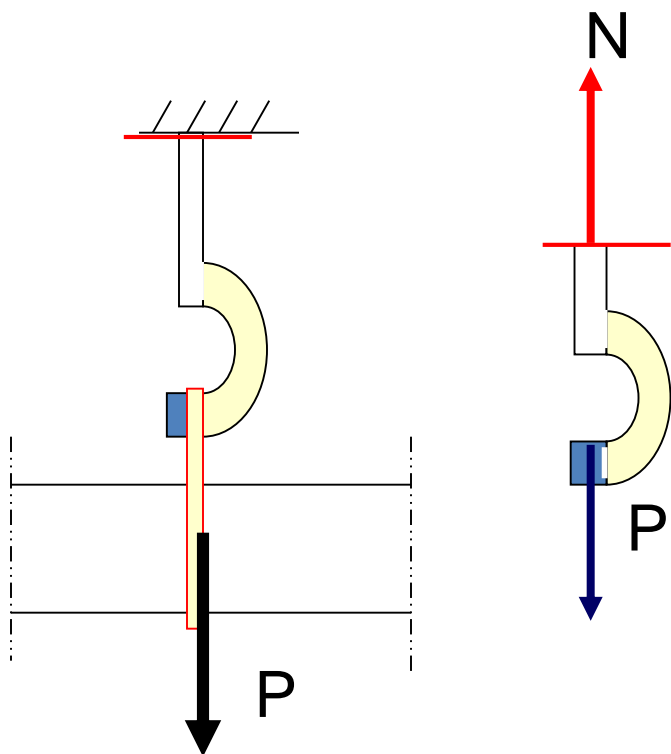
1) 强度校核：  $\sigma_{\max} < [\sigma]$

2) 截面设计：  $A > N / [\sigma]$

3) 确定许可工作载荷：  $N < [\sigma] \cdot A$

## 2. 拉伸和压缩

例 管道吊杆直径 $d=8\text{mm}$ ，材料为Q235，  
 $[\sigma]=125\text{MPa}$ ，管道重量 $P=10000\text{N}$ ，校核杆件强度。



解：  $N = P$

$$\sigma = N/A$$

$$= P / (\pi d^2 / 4)$$

$$= 199\text{MPa} > [\sigma]$$

强度不够，不安全

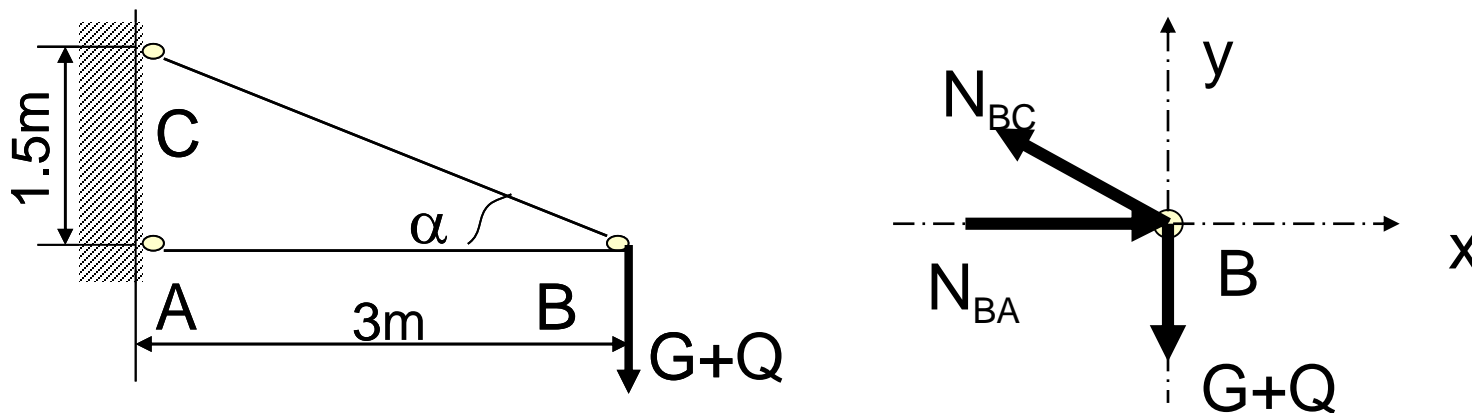
$$\sigma_{\max} = \frac{P}{\pi d^2 / 4} \leq [\sigma]$$

$$d \geq \sqrt{\frac{P}{\pi [\sigma] / 4}} = \frac{10000}{\pi \times 125 / 4} = 10.1\text{mm}$$

圆整后取吊杆直径 $d=12\text{mm}$ 。

## 2. 拉伸和压缩

例 已知  $G=5\text{KN}$ ,  $BC$ 杆 $d=20\text{mm}$ , 材料Q235,  $[\sigma]=120\text{MPa}$ , 求 $[Q]$



解：以B铰为研究对象，受力如图。

列出平衡方程：  $\sum F_y = 0$ ,  $N_{BC} \cdot \sin \alpha - (G+Q) = 0$

则  $N_{BC} = (G+Q) / \sin \alpha$ ,

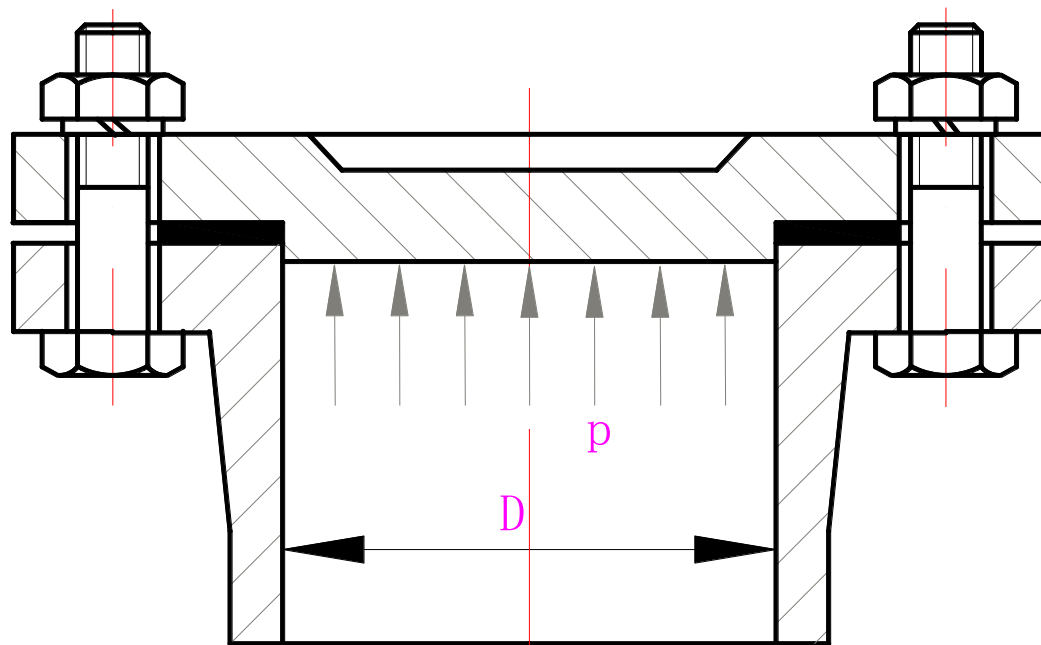
由强度条件  $\sigma = N_{BC} / (\pi d^2 / 4) \leq [\sigma]$ , 解得：

$[Q] \leq 11.85\text{KN}$



## 2. 拉伸和压缩

气缸盖用根径为20mm的8个螺栓与气缸体联接，如图所示。螺栓材料的许用应力 $[\sigma] = 100\text{Mpa}$ ，气缸体内径 $D_i = 600\text{mm}$ ，试求气缸内允许的最大压力 $p$ （不考虑螺栓的预紧力）



## 2. 拉伸和压缩

---

每个螺栓横截面积为： $a = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi \times 0.02^2}{4} = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

每个螺栓的许可轴力为： $F \leq [\sigma]a = 100 \times 10^6 \times 3.14 \times 10^{-4}$   
 $= 3.14 \times 10^4 \text{ N}$

8个螺栓所承受的总载荷为： $F_{max} = 8F = 8 \times 3.14 \times 10^4$   
 $= 2.512 \times 10^5 \text{ N}$

**即气缸盖所受最大载荷为  $2.512 \times 10^5 \text{ N}$**

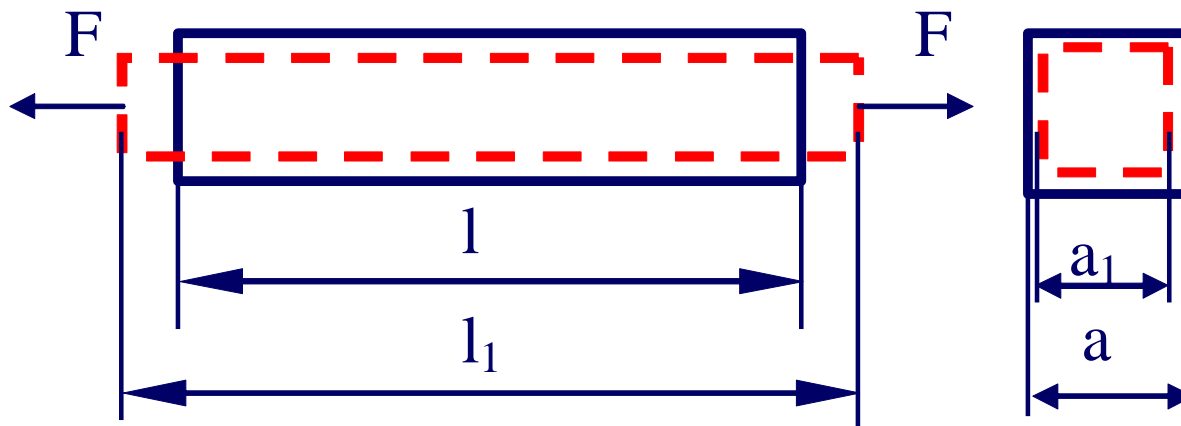
气缸盖的受力面积为： $A = \frac{\pi D_i^2}{4} = \frac{\pi \times 0.6^2}{4} = 0.2826 \text{ m}^2$

因此，缸内最大允许的压力为：

$$p = \frac{F_{max}}{A} = \frac{2.512 \times 10^5}{0.2826} = 8.889 \times 10^5 \text{ Pa}$$

## 2. 拉伸和压缩

### ●直杆受轴向拉（压）时的变形



绝对变形  
 $\left\{ \begin{array}{l} \Delta l \\ \Delta a \end{array} \right.$

相对变形  
 $\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \\ \varepsilon' \end{array} \right.$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_1 - l}{l}$$

纵向应变

$$\varepsilon' = \frac{\Delta a}{a} = \frac{a_1 - a}{a}$$

横向应变

泊松比：
$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$$

弹性范围内，材料固有的弹性常数

## 2. 拉伸和压缩

物理中  $F = K\Delta x$

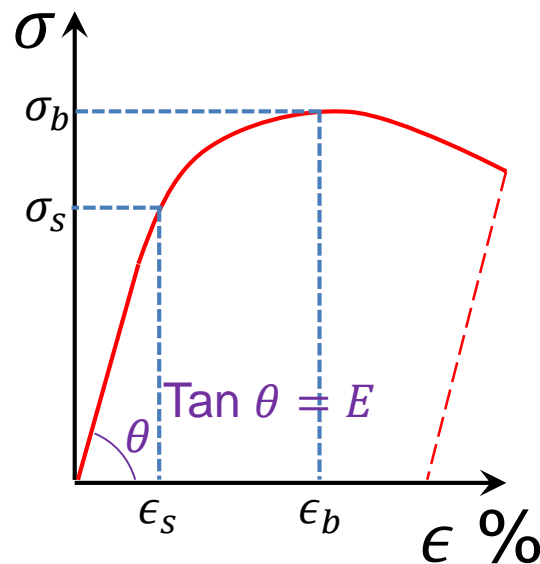
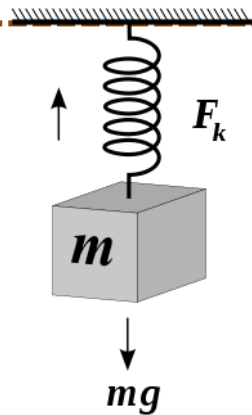
将上式两边除以截面积 $A$ ，则：

$$\frac{F}{A} = \frac{K\Delta l}{A} = \frac{Kl}{A} \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{因为} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\text{令 } E = \frac{Kl}{A} \Rightarrow \sigma = E\epsilon$$

$E$  称为材料的弹性模量，表示材料抵抗弹性变形的能力。

## 虎克定理(Hooke's Law)



## 2. 拉伸和压缩

- 虎克定律：载荷和变形间的关系

$$\sigma = E\varepsilon$$

材料	拉（压）弹性模量E X10 <sup>5</sup> (MPa)	剪切弹性模量G X10 <sup>5</sup> (MPa)	泊松比μ
碳钢	1.96~2.16	0.795~0.835	0.24~0.28
合金钢	1.86~2.06	0.795	0.24~0.33
灰铸铁	0.79~1.57	0.441	0.23~0.27
铜及其合金	0.73~1.57	0.39~0.45	0.31~0.42
铝合金	0.71	0.26~0.27	0.33
混凝土	0.14~0.35	-	0.16~0.18
橡胶	0.00078	-	0.47

$$\mu \approx 0.3$$

### 3. 材料的力学性能

---

- 材料的力学性能：材料在外力作用下表现出来的各种性能。



材料的内力

AND



材料的变形

# 3. 材料的力学性能

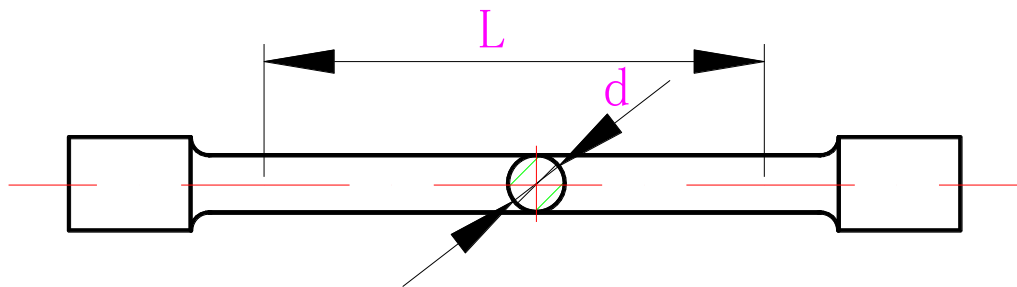
---

## 一. 标准:

GB228.1-2010 《金属材料 室温拉伸试验方法》

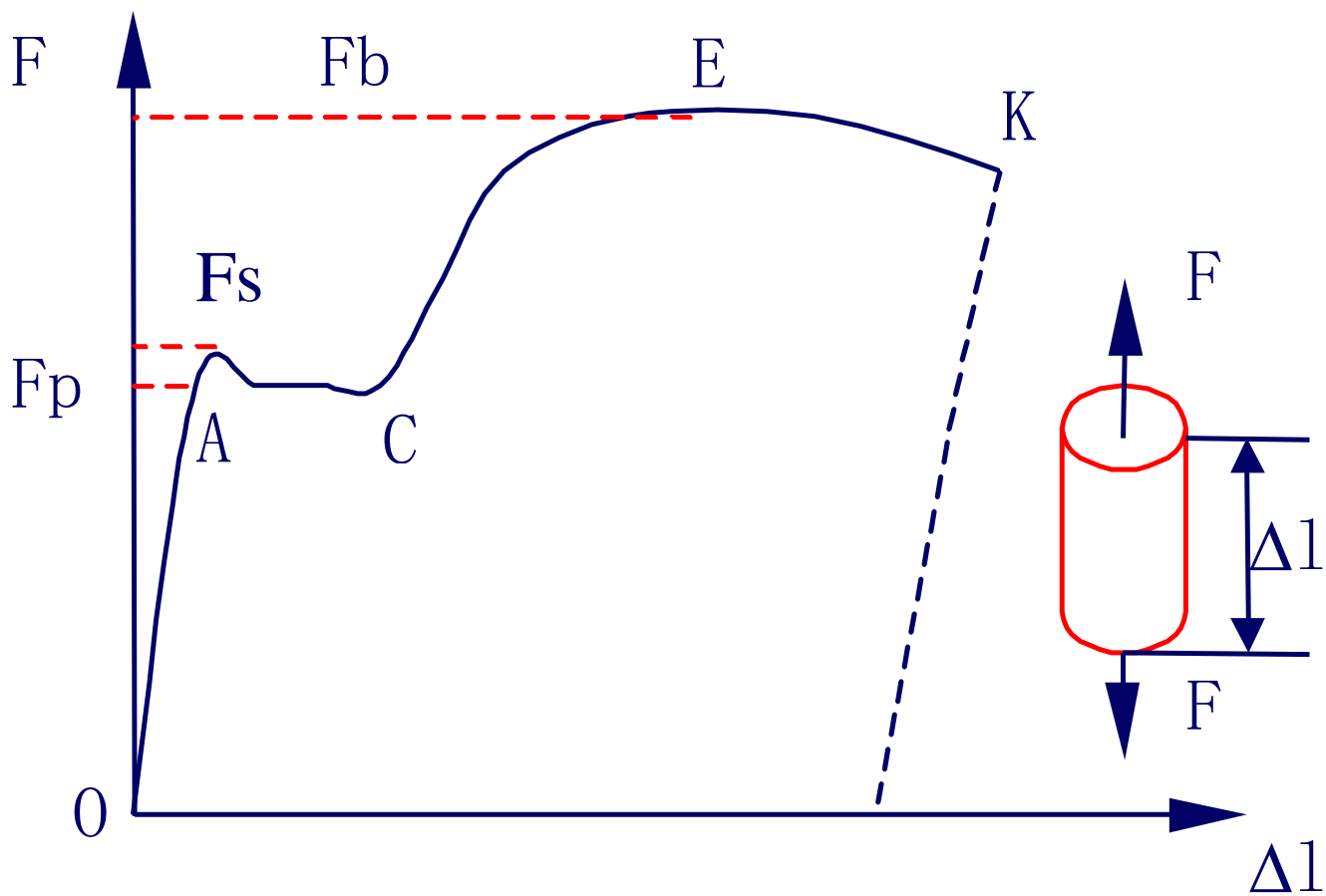
## 二. 试样

圆截面试样:  $L=10d$ 或 $L=5d$



### 3. 材料的力学性能

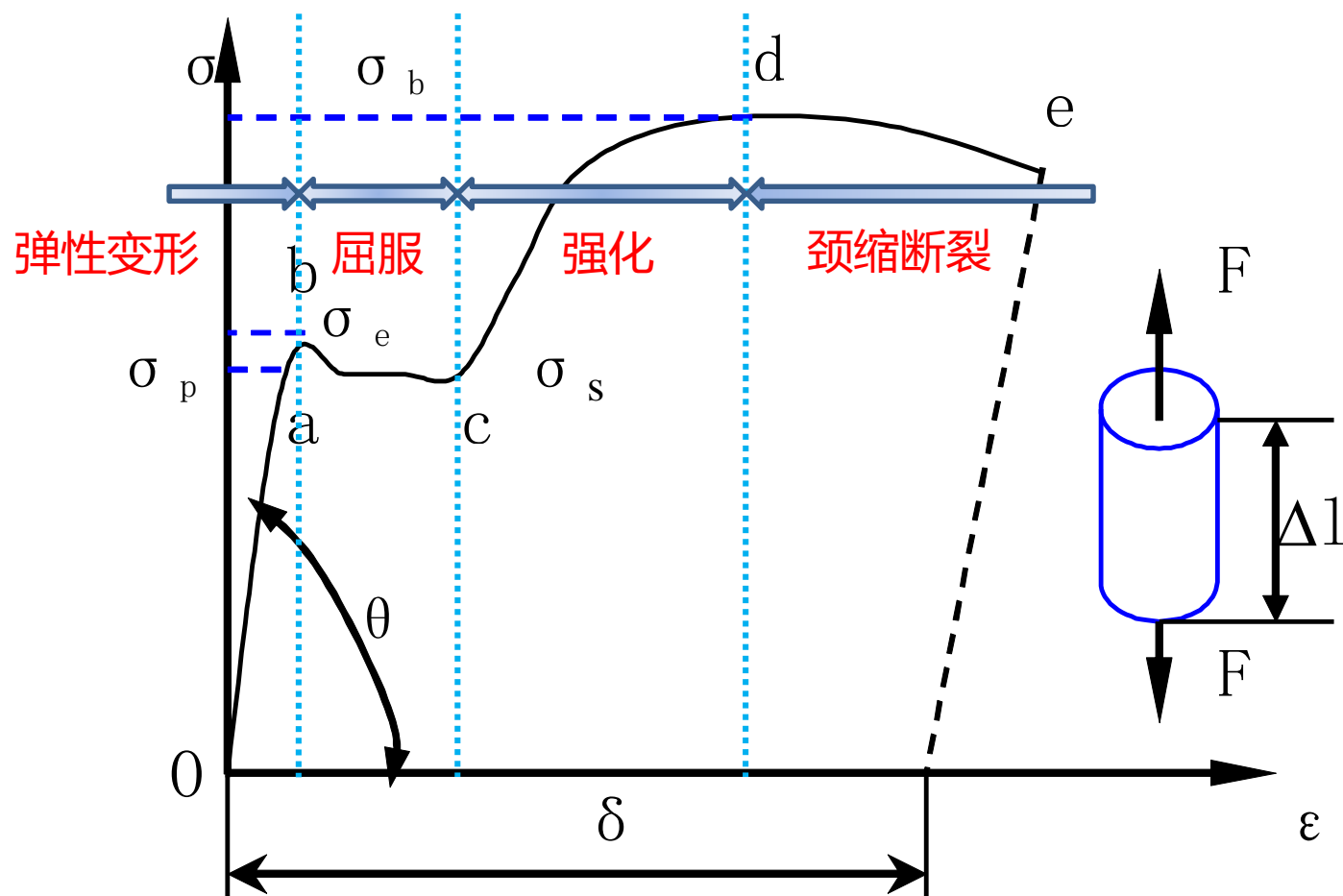
---



拉伸时载荷与伸长量曲线

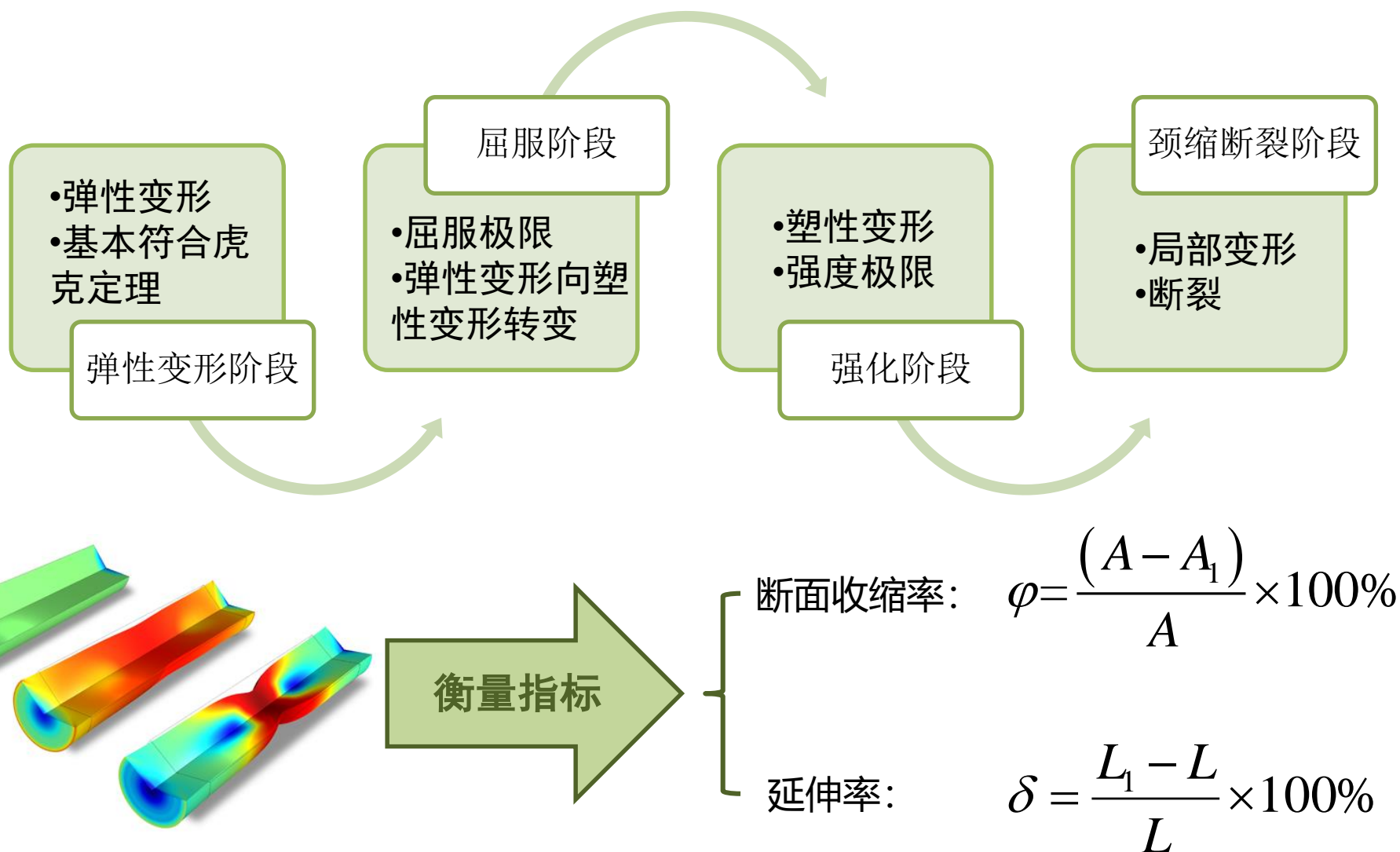


### 3. 材料的力学性能



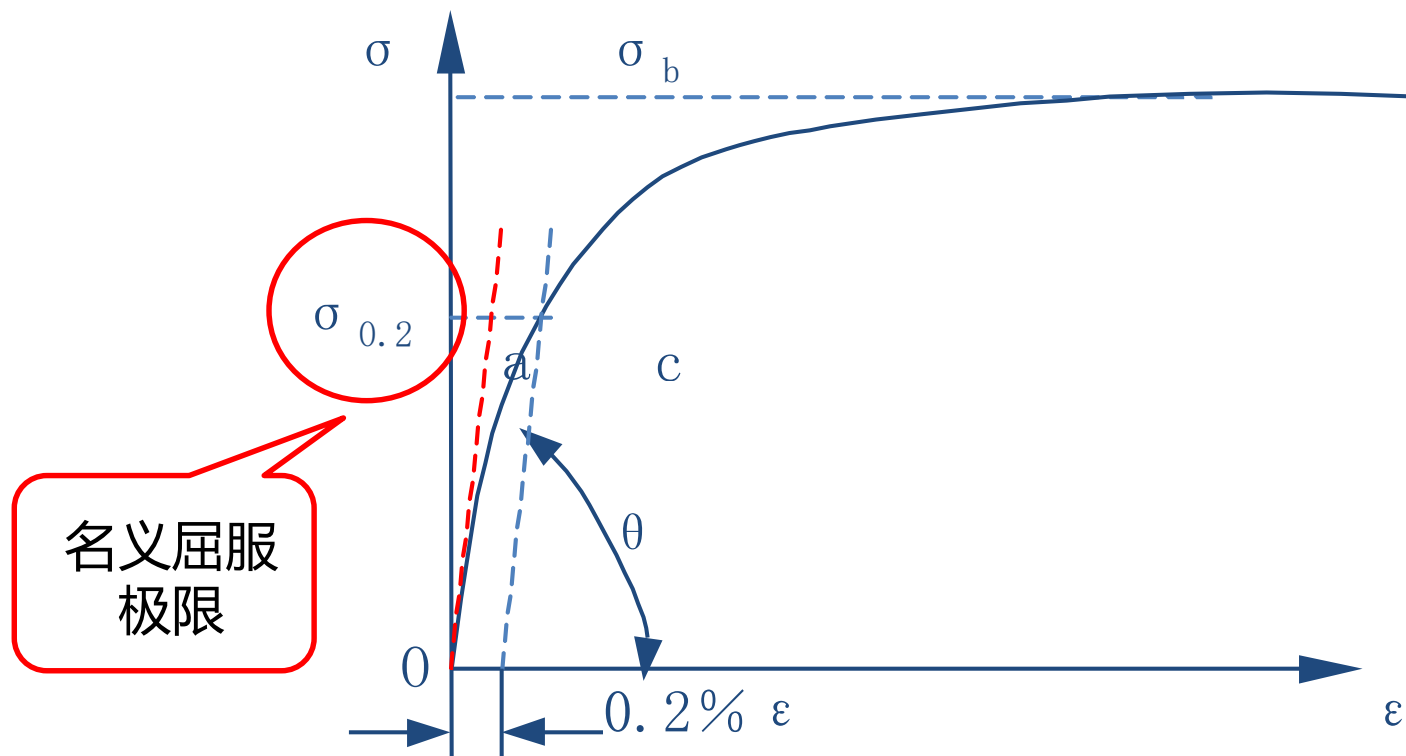
拉伸时应力与应变曲线

### 3. 材料的力学性能



### 3. 材料的力学性能

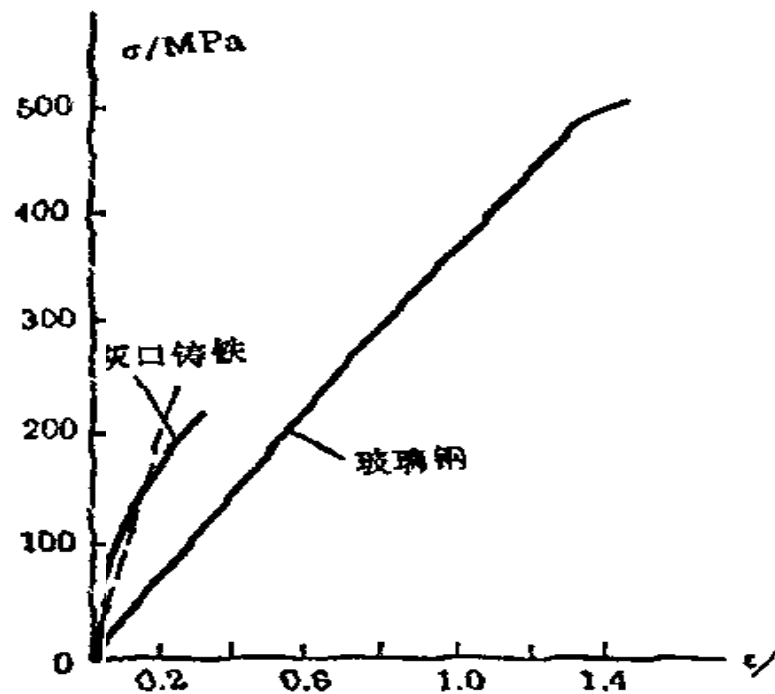
- 其他金属材料拉伸时的力学性能



塑性材料拉伸应力应变曲线

### 3. 材料的力学性能

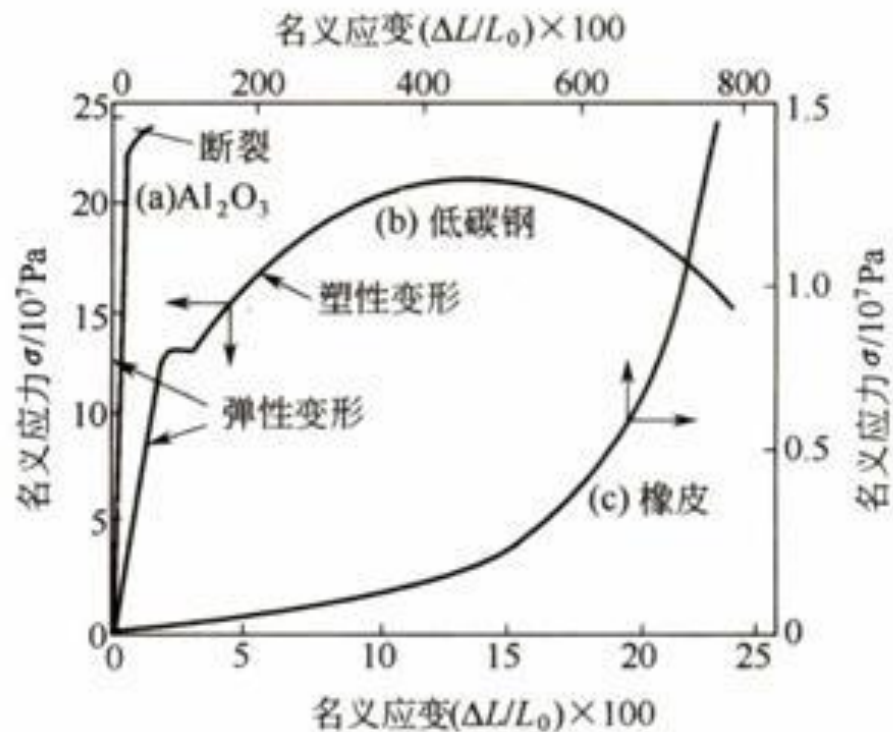
---



脆性材料拉伸应力应变曲线

### 3. 材料的力学性能

---

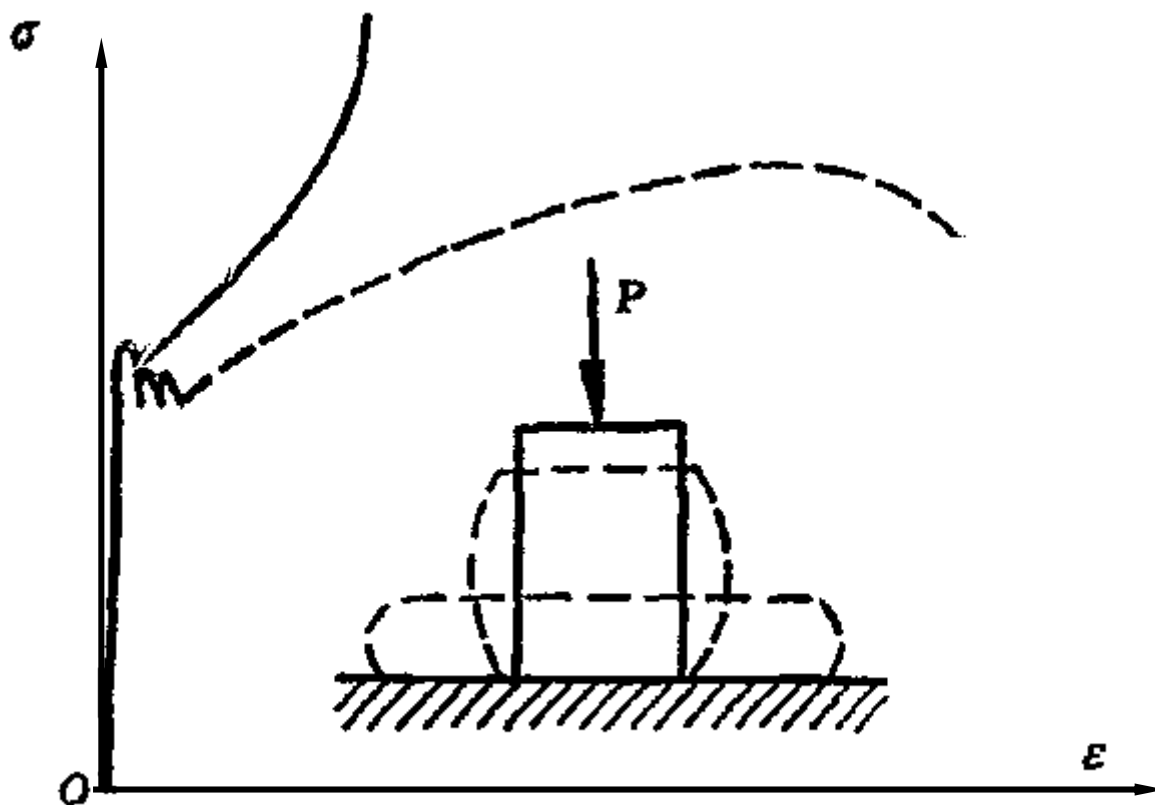


不同材料的应力应变曲线对比

### 3. 材料的力学性能

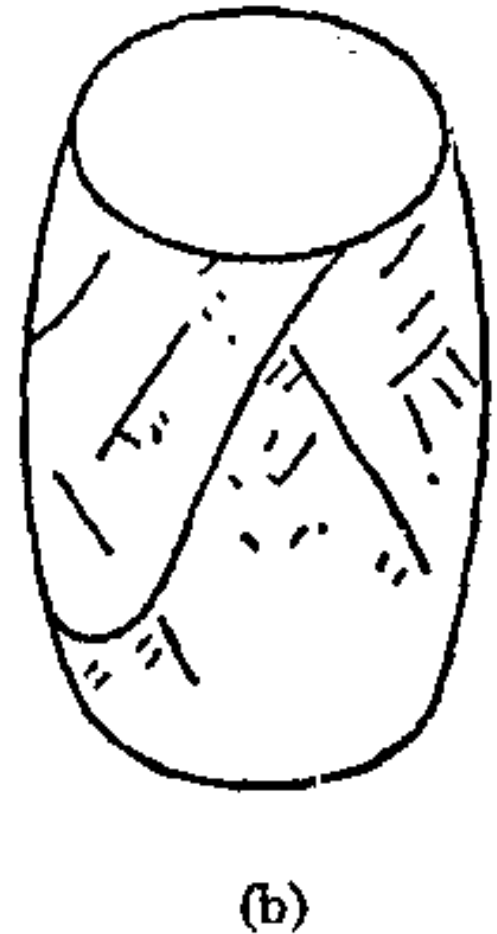
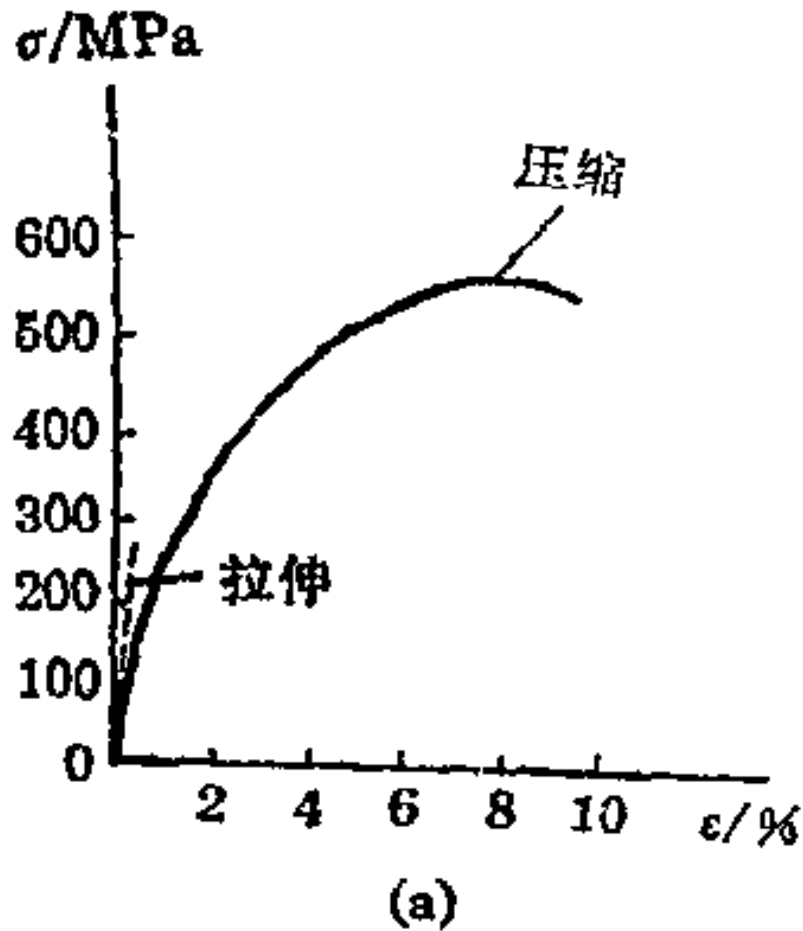
---

#### ● 压缩时的应力应变曲线



塑性材料压缩时的应力-应变曲线

### 3. 材料的力学性能



脆性材料压缩时的应力-应变曲线

# 3. 材料的力学性能

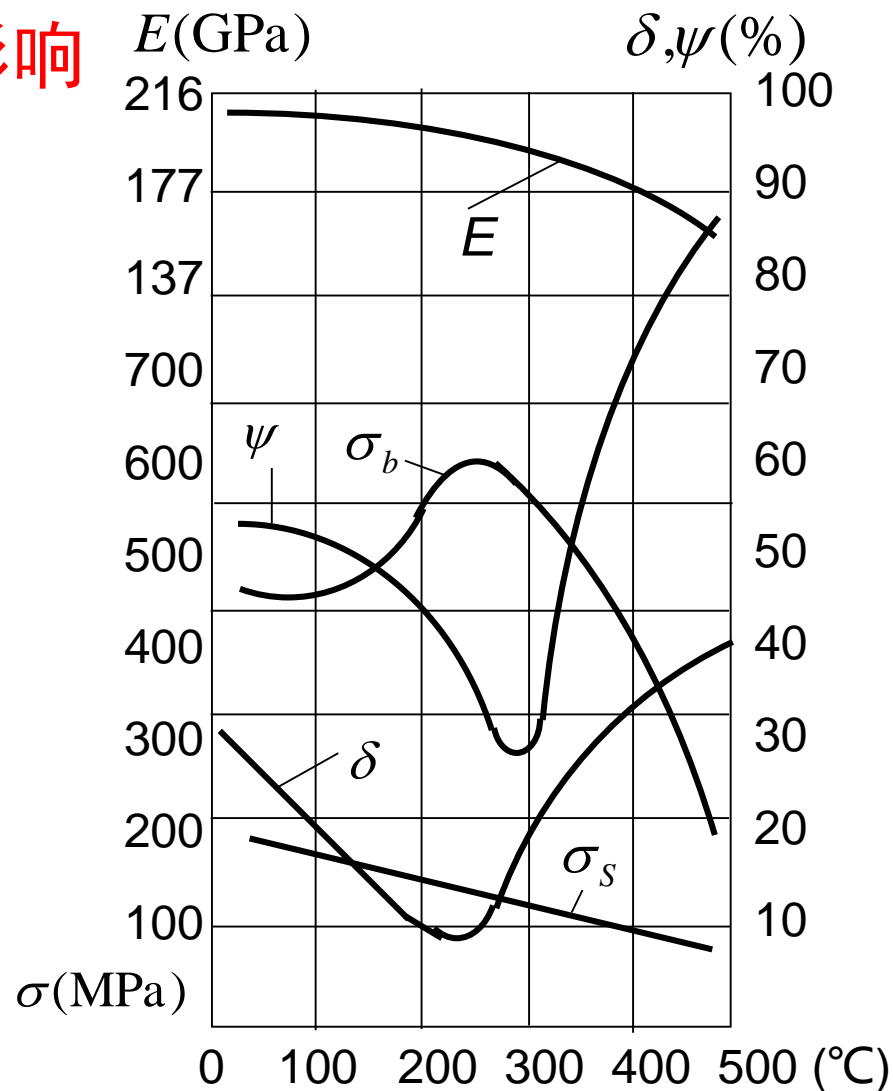
## ● 温度对材料力学性能的影响

总趋势：

温度升高,  $E$ 、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 下降；

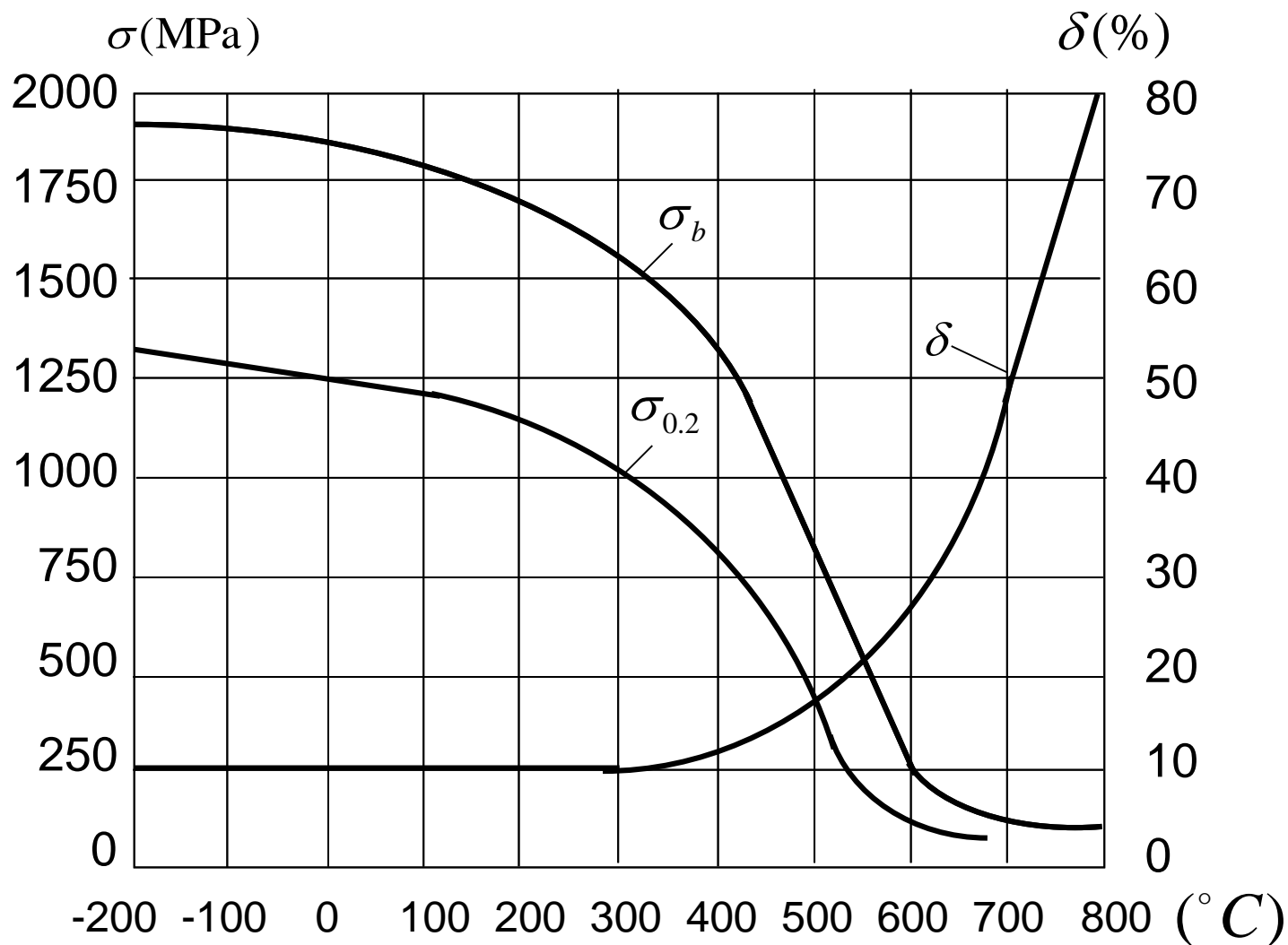
$\delta$ 、 $\psi$  增大。

但在 $260^{\circ}$  以前随温度的升高， $\sigma_b$ 反而增大，同时 $\delta$ 、 $\psi$ 却减小。  
但象低碳钢这种在 $260^{\circ}$  以前的特征，并非所有的钢材都具有。





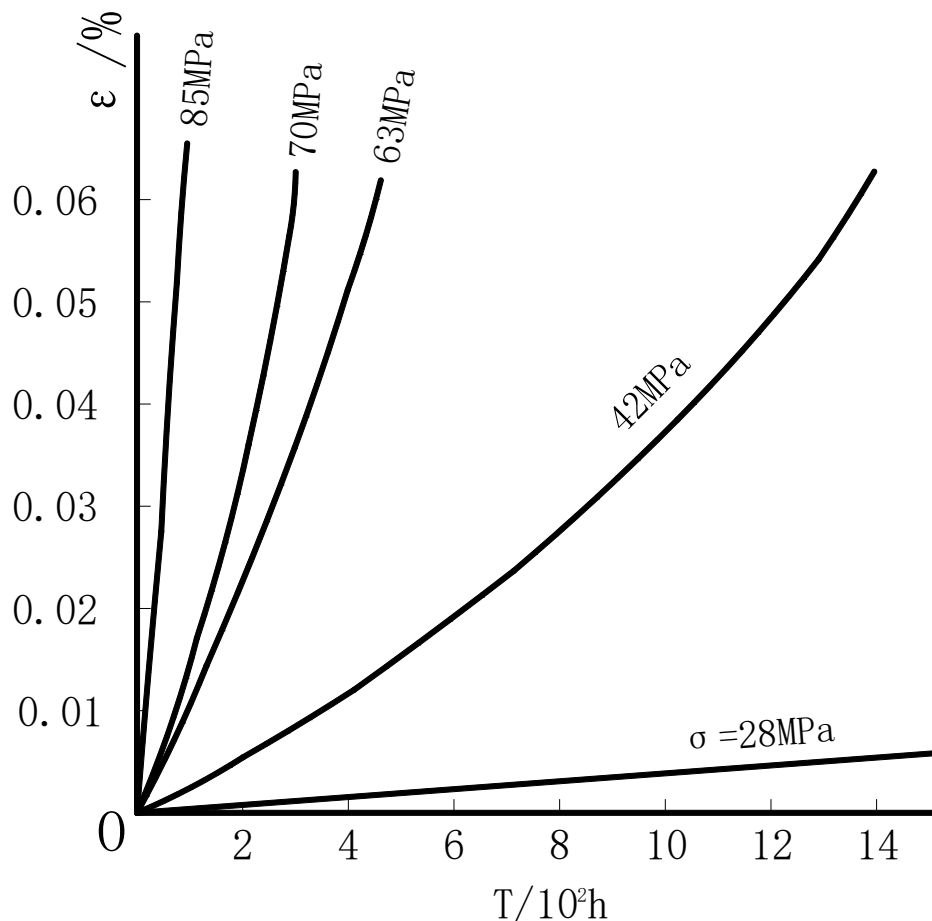
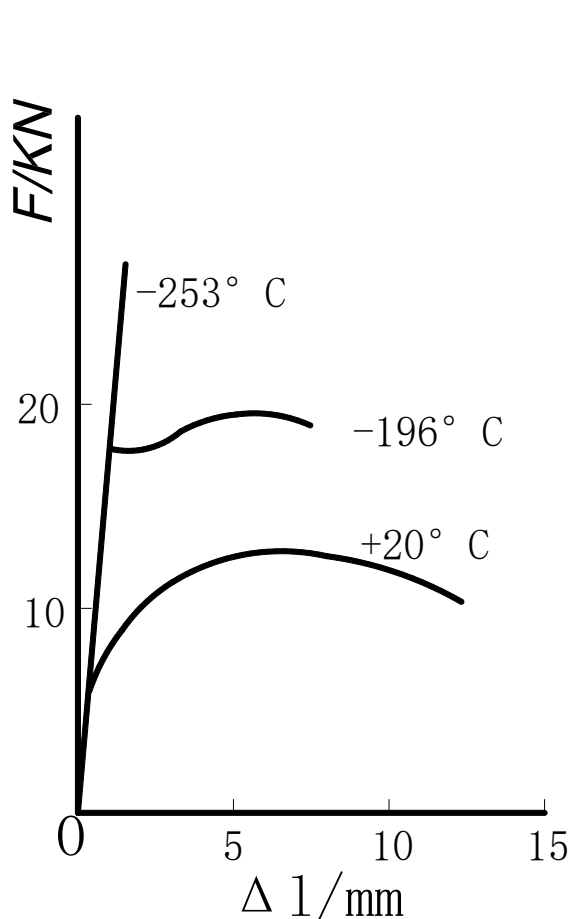
### 3. 材料的力学性能



温度对铬锰合金力学性能的影响

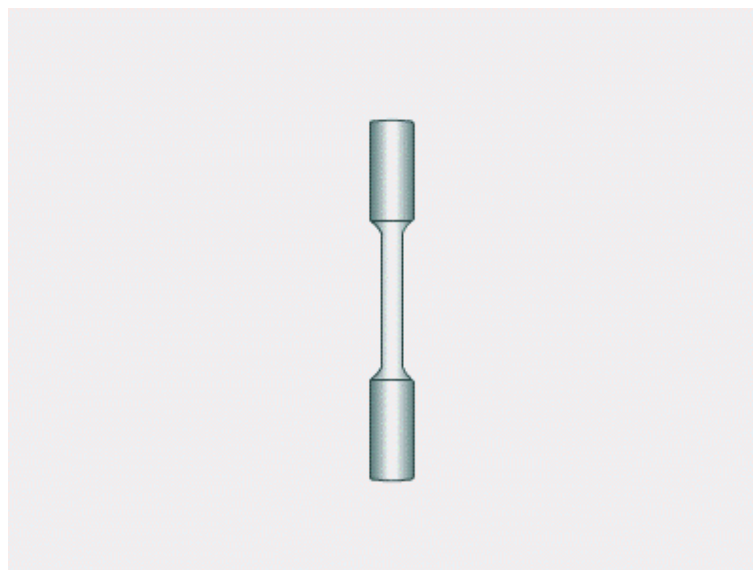
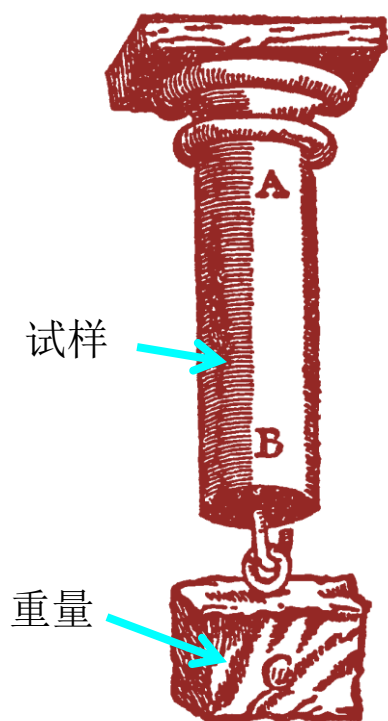
### 3. 材料的力学性能

#### 高温/低温下的材料性能



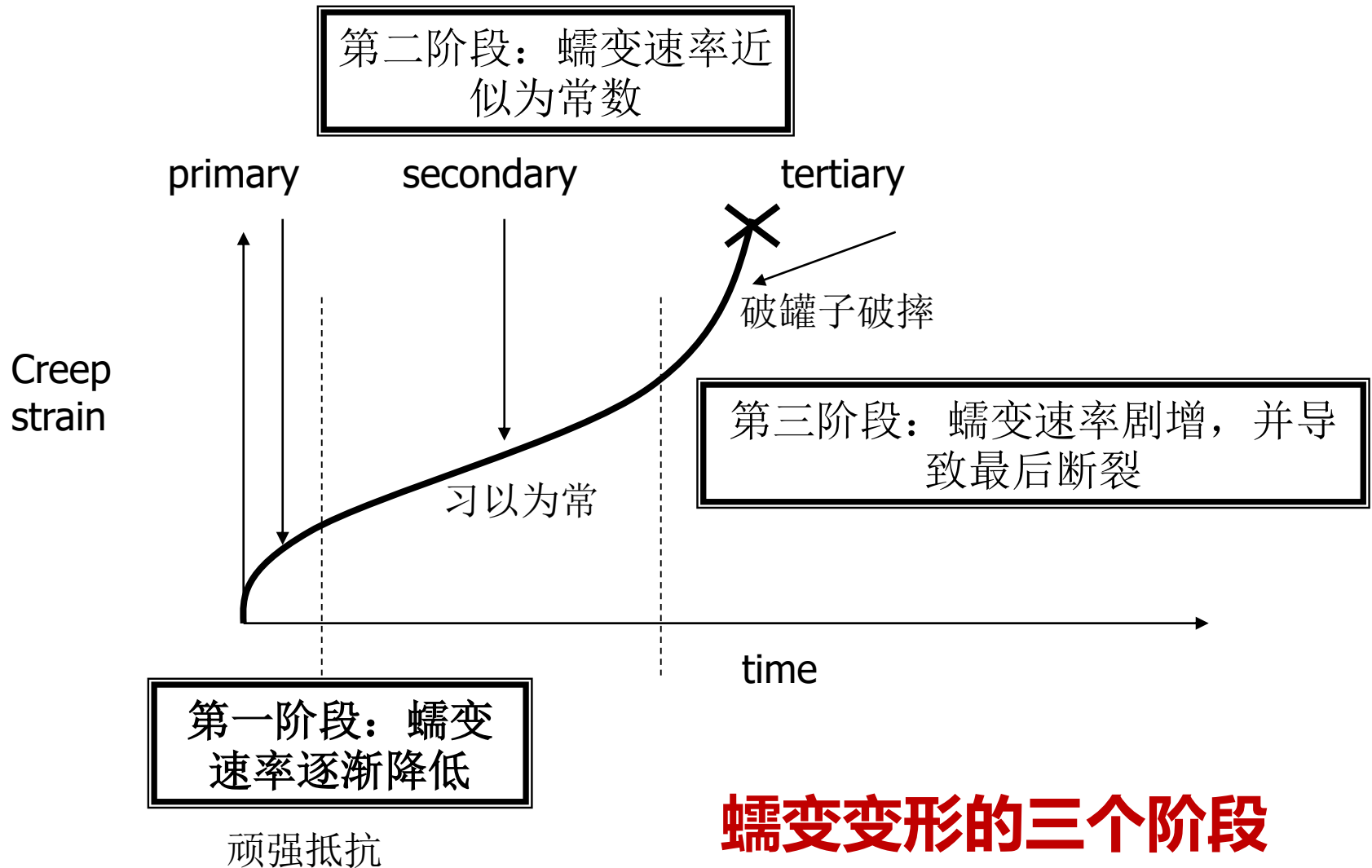
### 3. 材料的力学性能

在服役温度（35-70%熔点）下，即使应力远低于屈服强度时，结构/材料长度（变形）随时间增长而增加，卸载后变形无回复；破坏时无明显颈缩



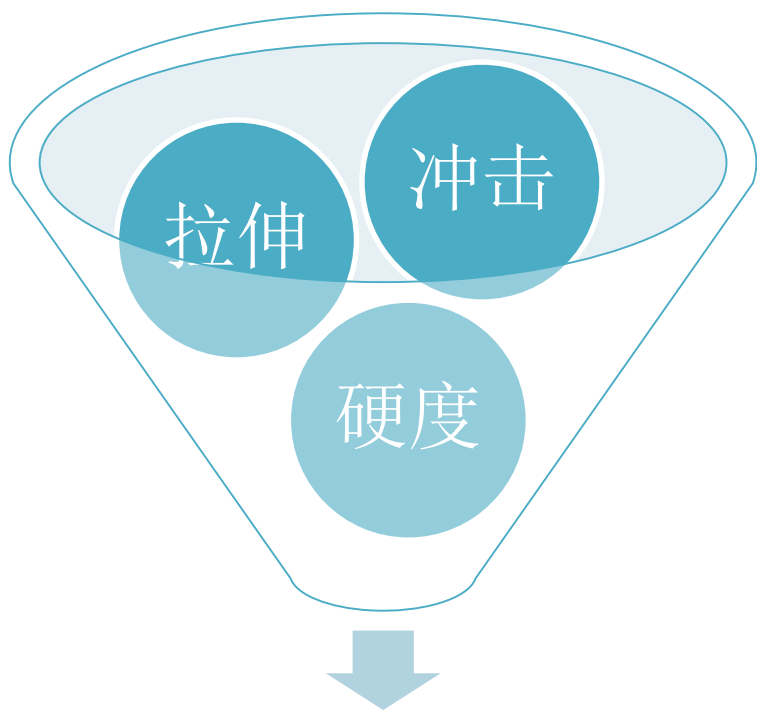
蠕变过程及失效机理

### 3. 材料的力学性能



## 4. 力学性能测试

---



材料的力学性能

### □ 拉伸:

屈服强度、抗拉强度、断面收缩率、延伸率.....

### □ 冲击:

冲击韧度：金属材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力。

以材料受冲击破坏时单位面积上所消耗的能量来表示。

单位：N · m (J)

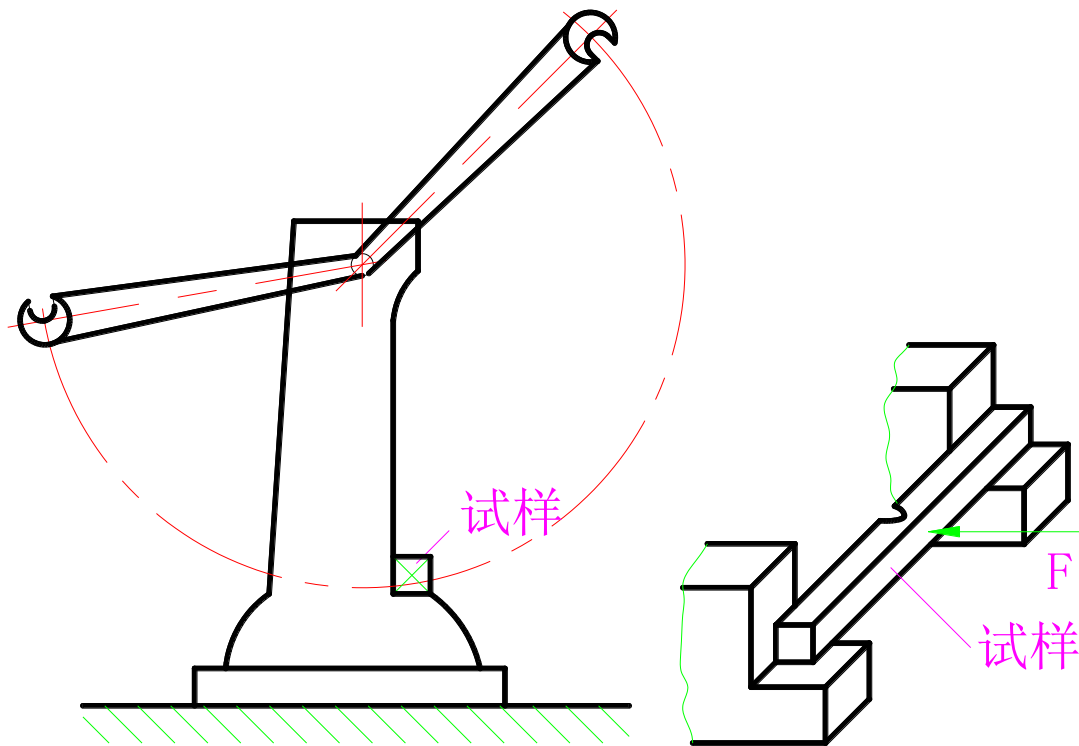
### □ 硬度:

常用的硬度测定法：压入法

硬度的表示方法：布氏硬度，洛氏硬度。

# 材料的其它力学性能指标 - 冲击

---



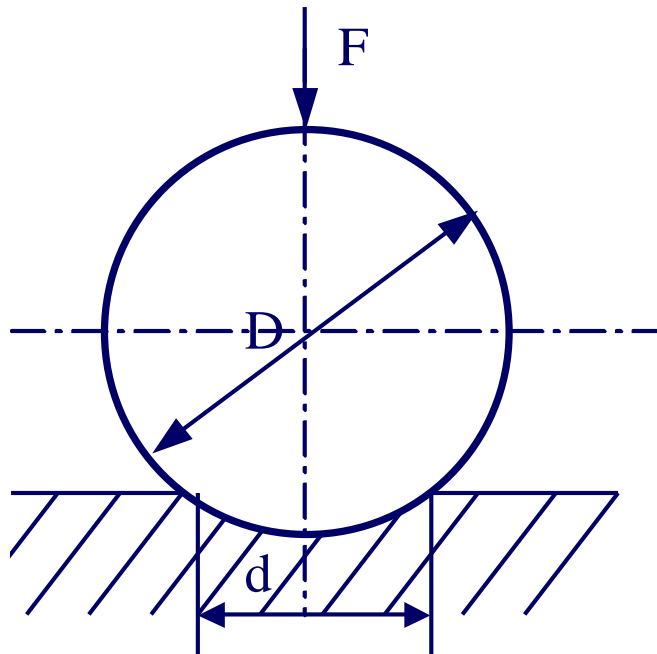
国标 《GB/T 229-2007夏比摆锤冲击试验方法》

## 4. 力学性能测试

---

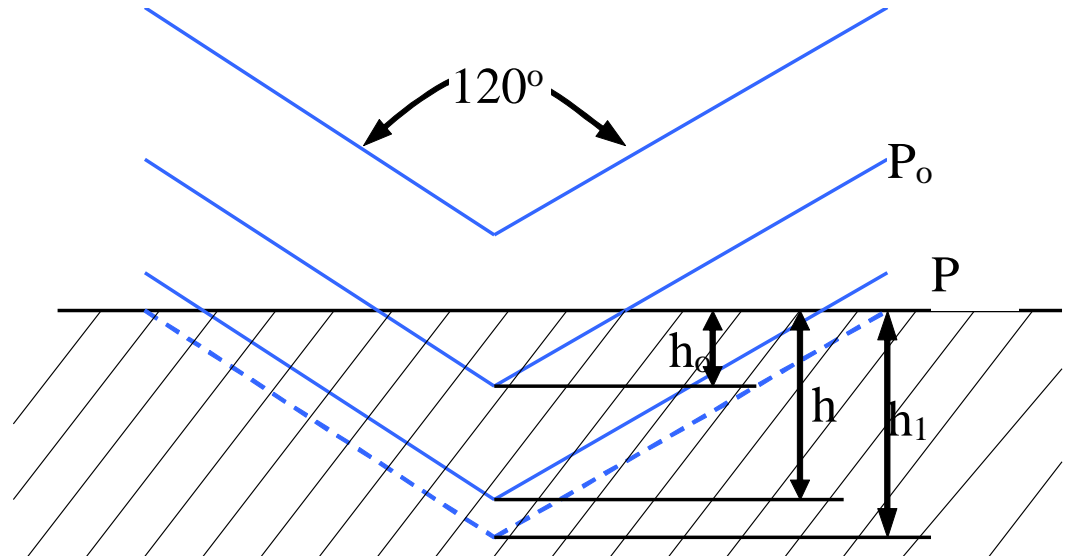
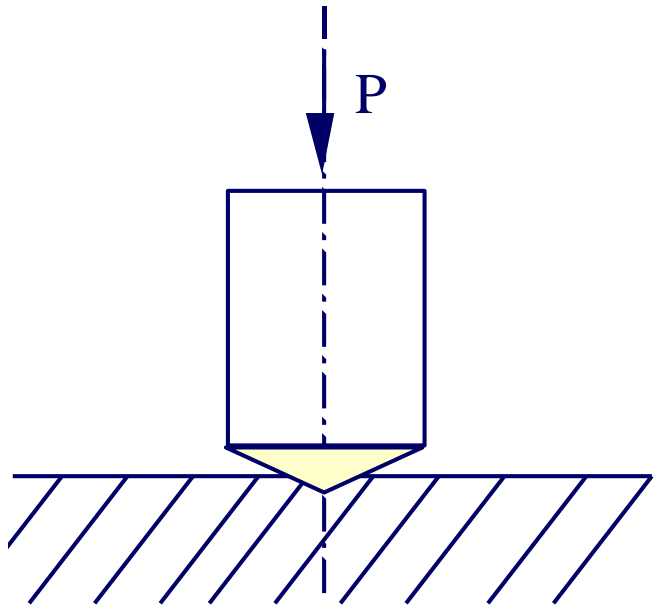
- **布氏硬度：** 瑞典工程师 T.A.Brinell 于1900年提出

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$



## 4. 力学性能测试

- 洛氏硬度：美国人Rockwell 于1919年提出



- 对于A、C级：
$$HRA(C) = 100 - \frac{h - h_0}{0.002}$$
- 对于B级：
$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0.002}$$



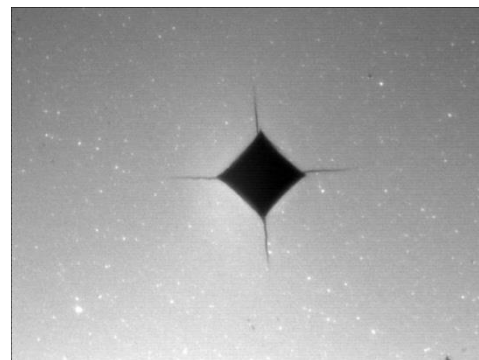
## 4. 力学性能测试

---

- **维氏硬度：** 由英国科学家维克斯首先提出

以一定的负荷,将相对面夹角为 $136^\circ$  的方锥形金刚石压入材料表面,保持规定时间后, 用测量压痕对角线长度, 再按公式来计算硬度的大小。它适用于较大工件和较深表面层的硬度测定

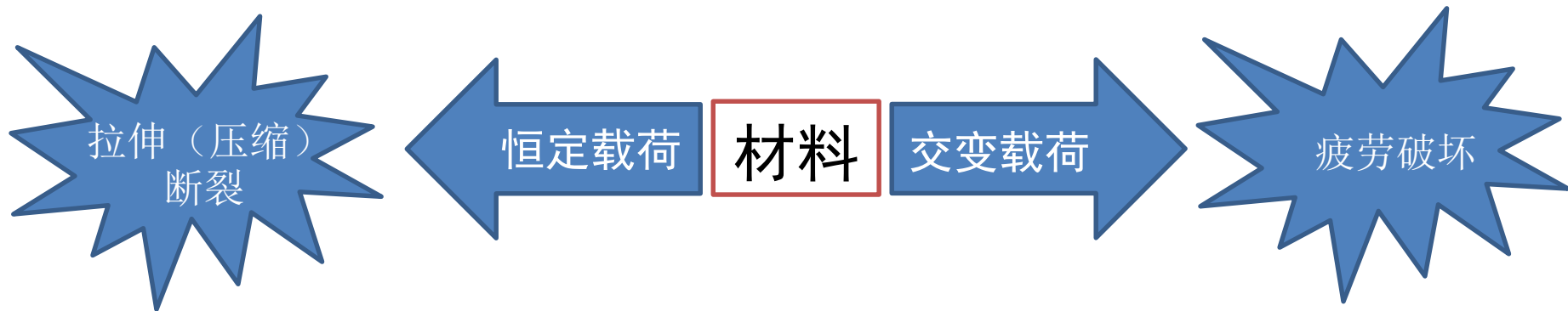
$$HV = \frac{0.204F \sin(136^\circ/2)}{d^2} = \frac{0.1891F}{d^2}$$



硬度是包含了材料的**弹性、塑性、硬化特性、强度和韧性**等的综合影响。

## 5. 交变应力下的强度问题

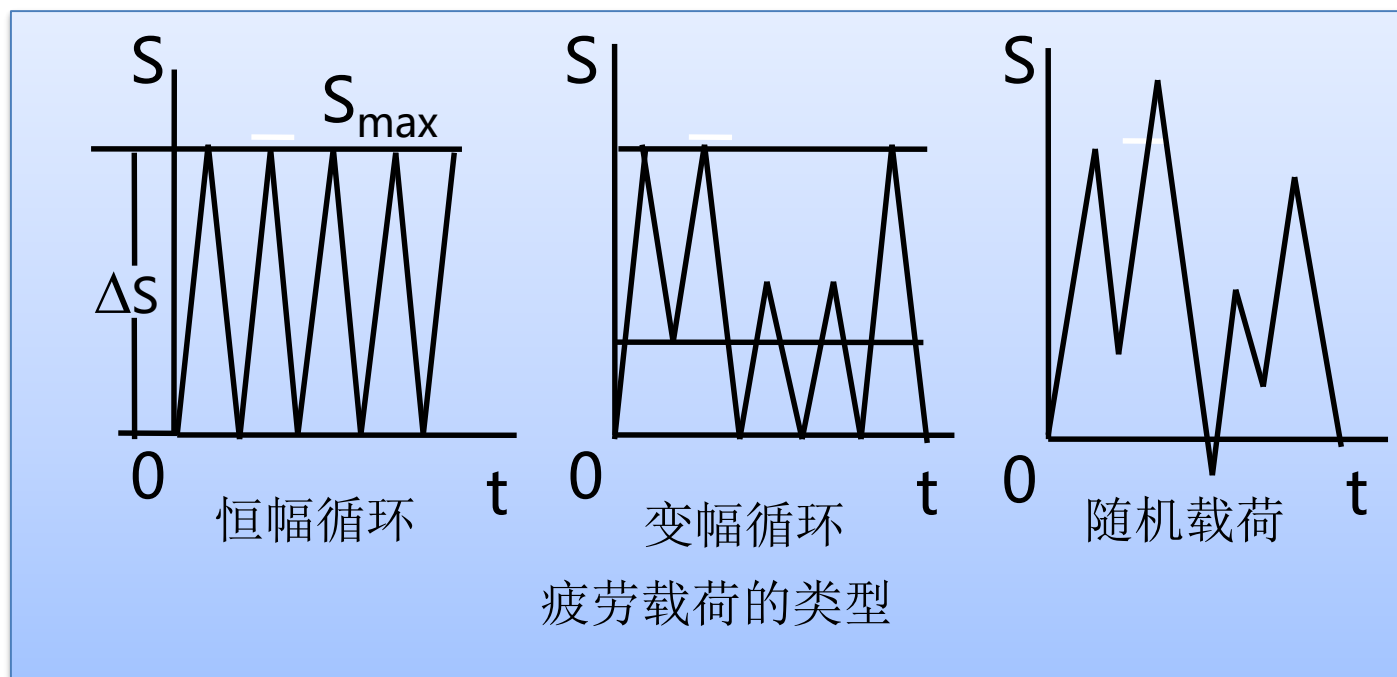
---



在某点或某些点承受**扰动应力**，且在足够多的循环扰动作用之后形成**裂纹**或完全断裂的材料中所发生的**局部**永久结构变化的**发展过程**，称为疲劳。

## 5. 交变应力下的强度问题

扰动应力（交变应力），是指随时间变化的应力。也可更一般地称为交变载荷（载荷可以是力、应力、应变、位移等）



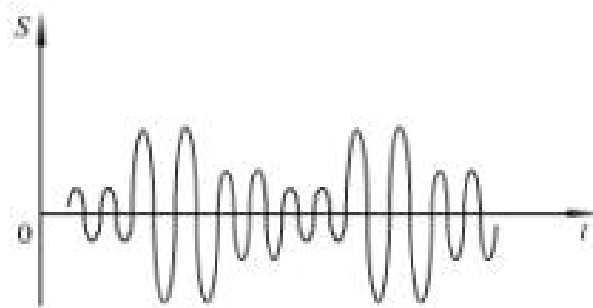
# 5. 交变应力下的强度问题

---

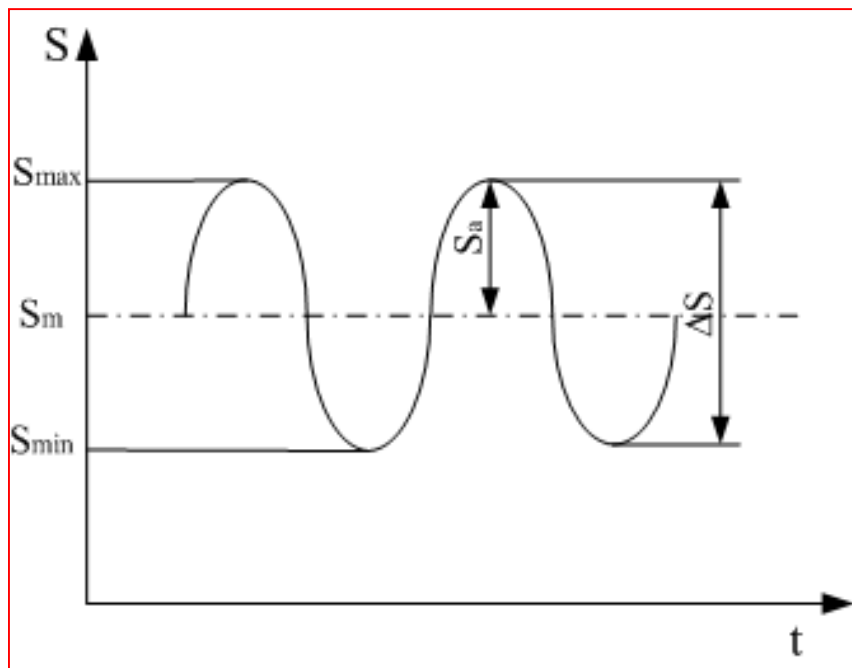
材料或构件在长期交变载荷持续作用下产生裂纹，直至失效或断裂的现象叫做**疲劳破坏**。

疲劳强度决定于：

1. 交变应力的最大值  $S_{\max}$
2. 循环次数， $N$
3. 交变应力的特征，应力比



# 5. 交变应力下的强度问题



平均应力:  $S_m = (S_{\max} + S_{\min})/2$

应力幅:  $S_a = (S_{\max} - S_{\min})/2$

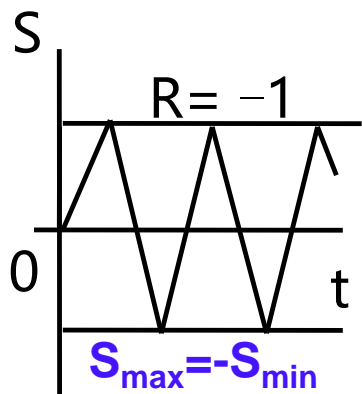
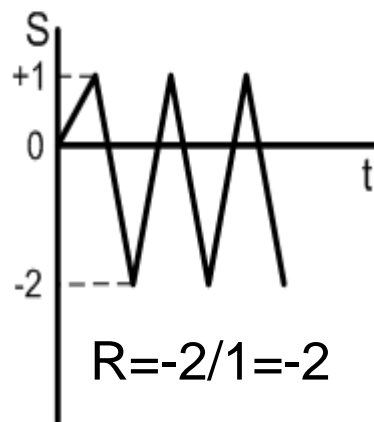
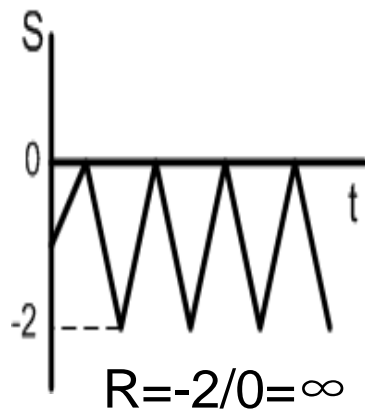
应力范围:  $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$

应力比:  $R = S_{\min} / S_{\max}$

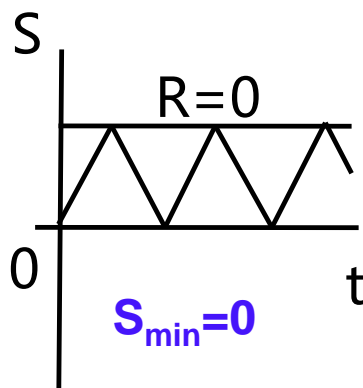
# 5. 交变应力下的强度问题

应力比R

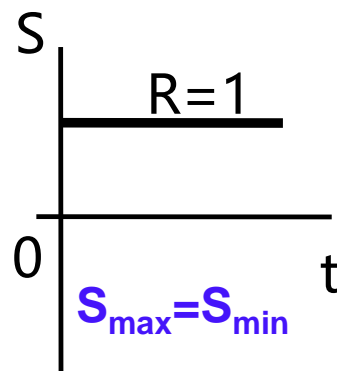
应力比R=? 疲劳极限最小?



对称循环



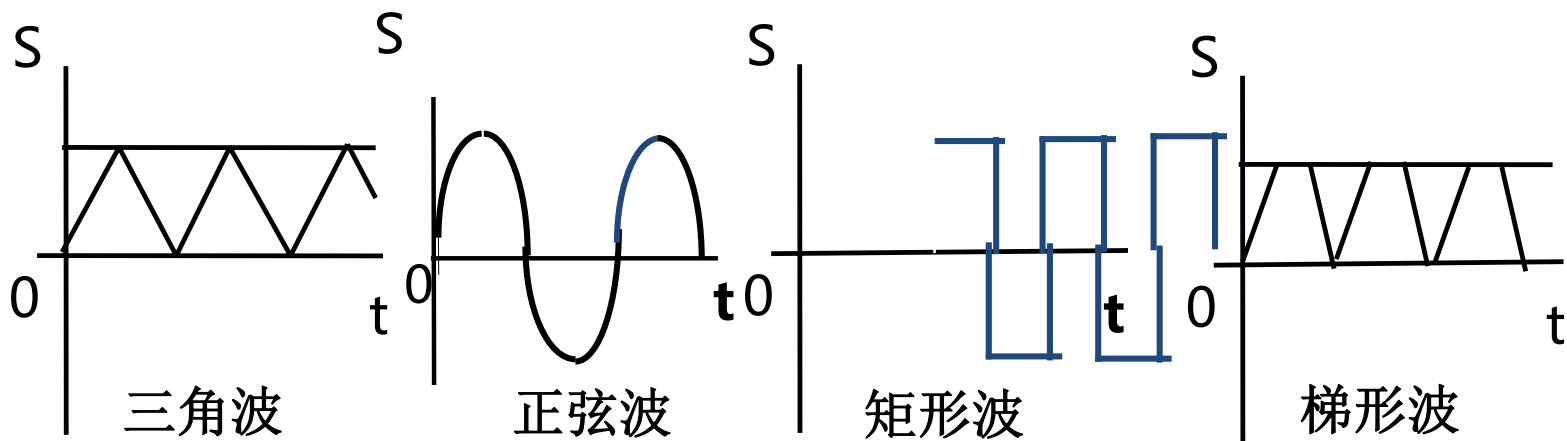
脉冲循环



静载

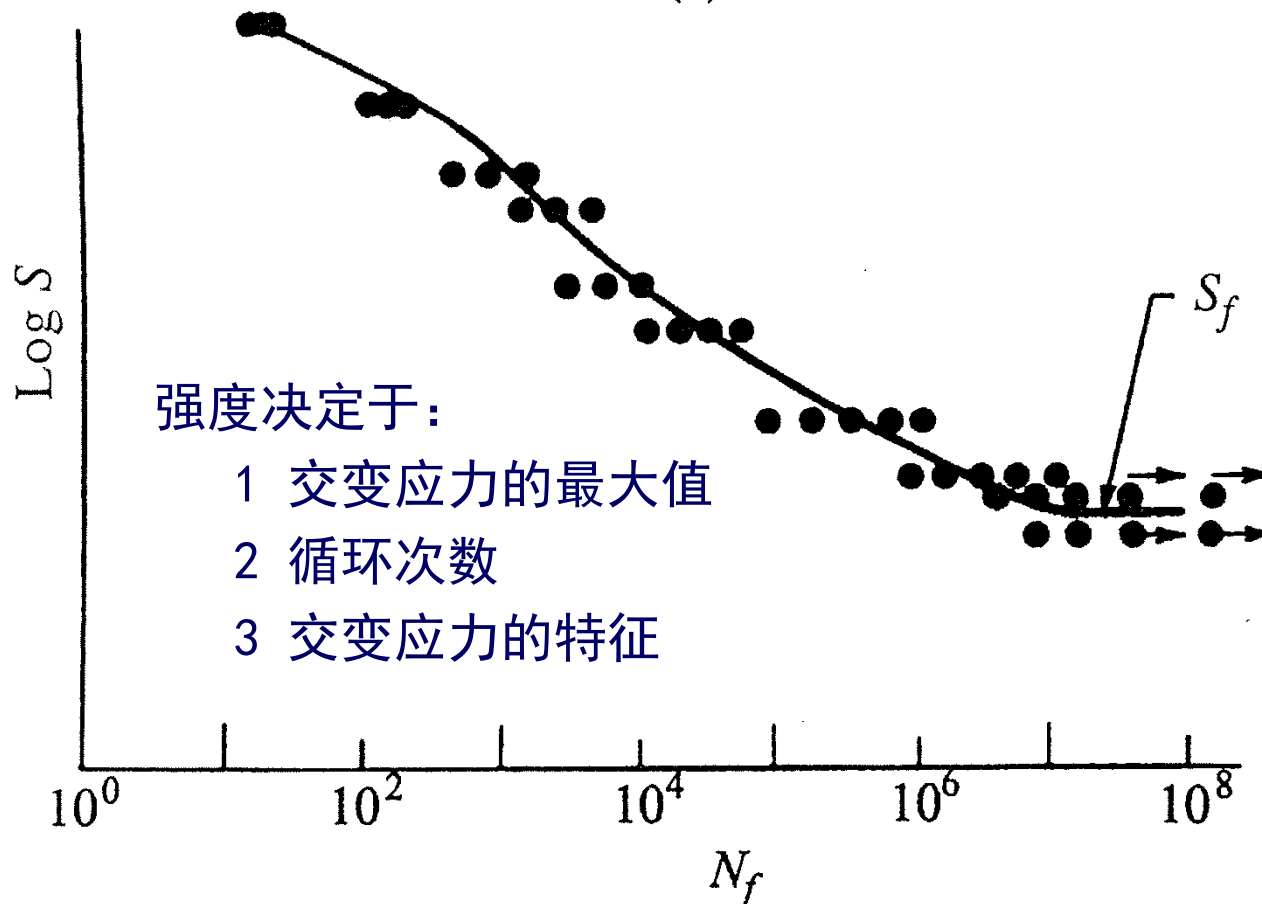
# 5. 交变应力下的强度问题

## 加载波形



# 5. 交变应力下的强度问题

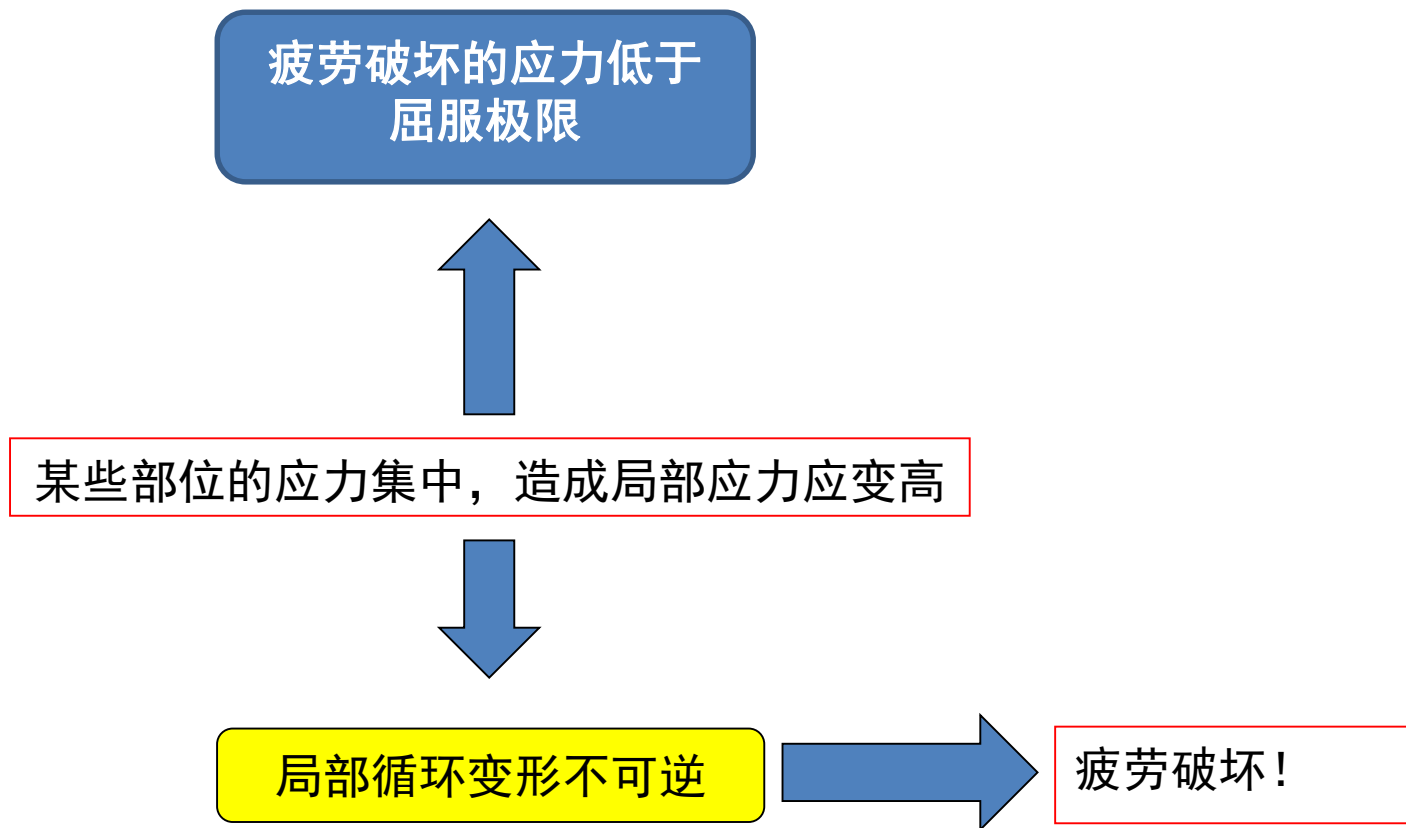
- 疲劳极限：S-N曲线





# 5. 交变应力下的强度问题

---



## 6. 应力集中的概念

- **应力集中**：因构件外形、承载等突然改变，导致构件局部应力急剧增大的现象。

- **应力集中系数**：
$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$$

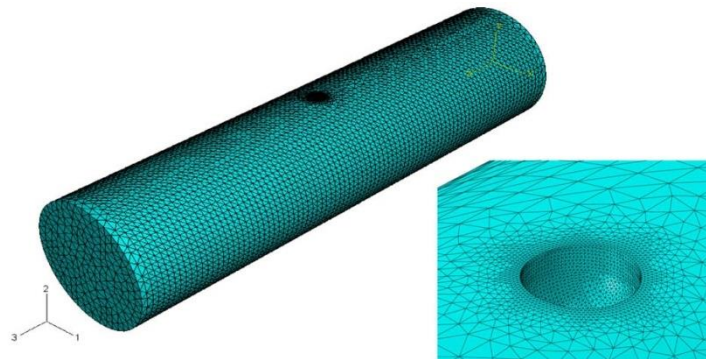
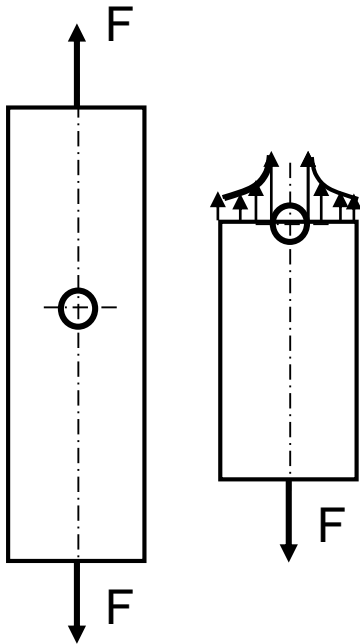
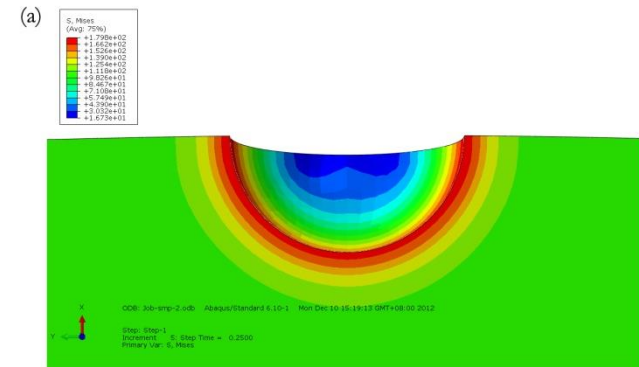


Fig. 3. Specimen geometry with mesh structure around 100  $\mu\text{m}$  pit highlighted. The specimen is axially loaded.








Maximum principal stress (a) and maximum principal strain (b) of 100  $\mu\text{m}$

# 总结

---

## 本章主要内容：

-  截面法求内力
-  拉压变形的外力、内力、应力
-  拉压变形的强度条件
-  虎克定律及拉伸和压缩的变形
-  材料的机械性能：强度、塑性、硬度、冲击韧性

作业： 3-2， 3-4， 3-6

---

谢谢大家！