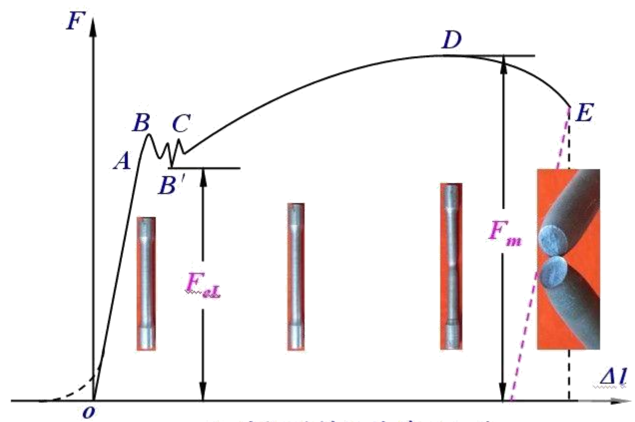
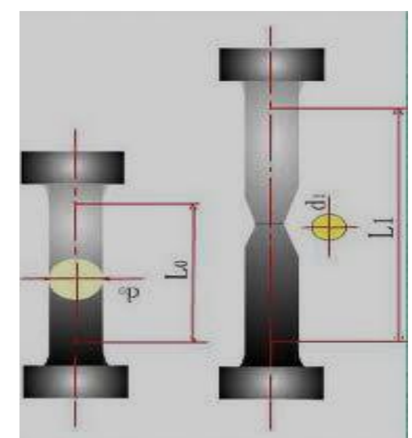
过程设备机械设计基础

3. 拉伸与压缩

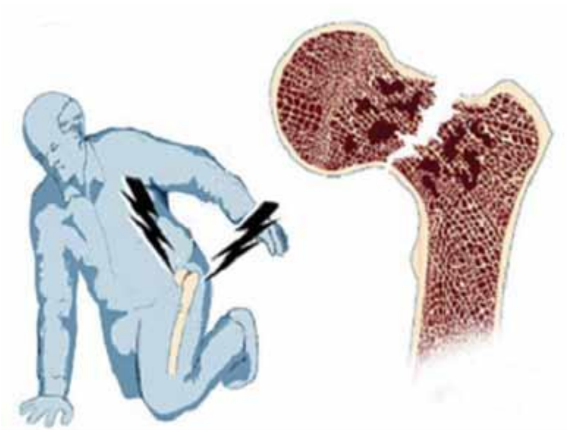


低碳钢材料拉伸特性曲线



材料安全工作的三个要求

1. 强度要求：抵抗破坏的能力
2. 刚度要求：抵抗变形的能力
3. 稳定性要求：保持原有平衡形状的能力

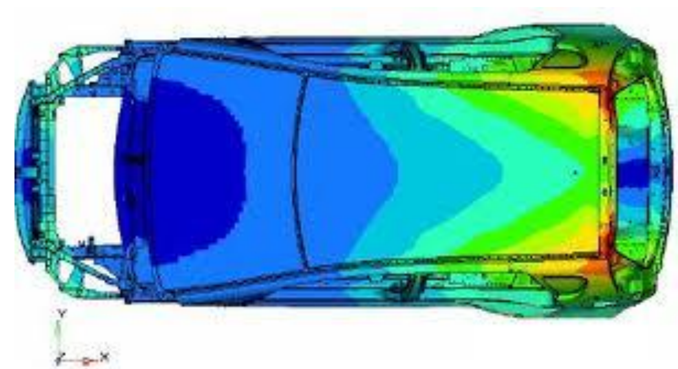


经济性与安全性间的矛盾

构件承载能力—强度(strength)

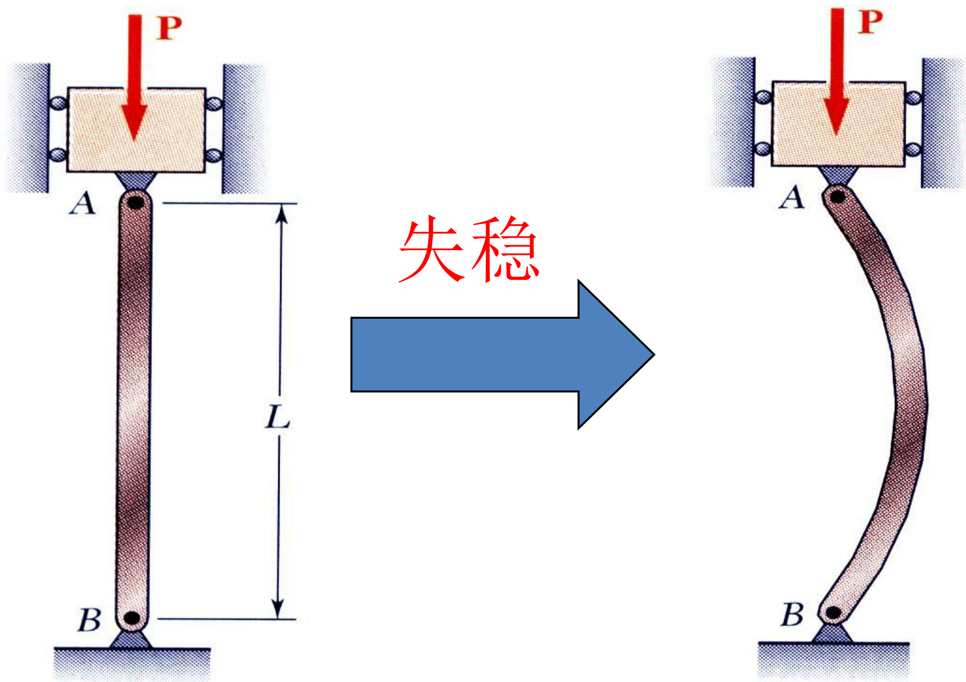
材料在外力作下抵抗永久变形和断裂的能力称为强度。包括抗压强度、抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度。

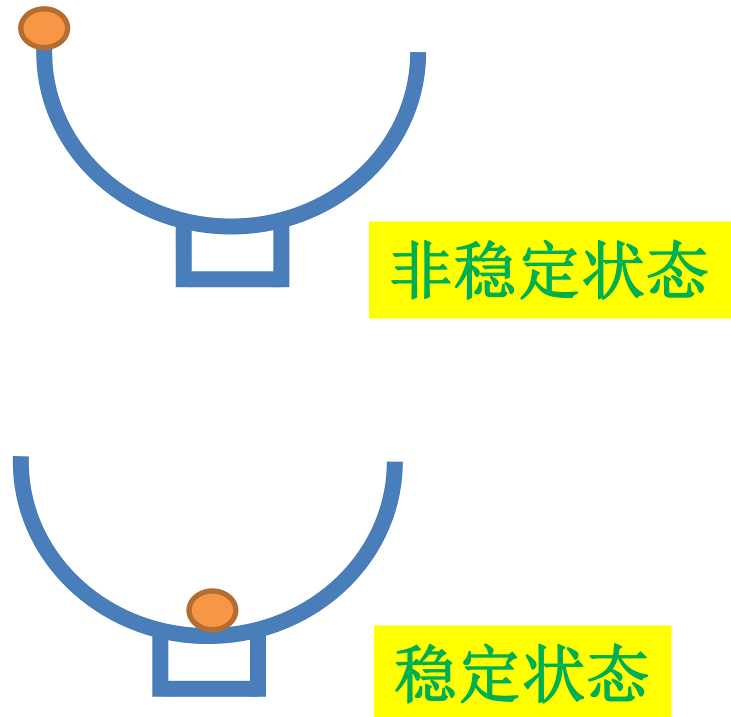
构件承载能力—刚度(stiffness)



刚度：材料抵抗变形的能力，即引起单位位移所需的力，大小和材料的弹模相关。刚度的倒数称为柔度，即单位力引起的位移。

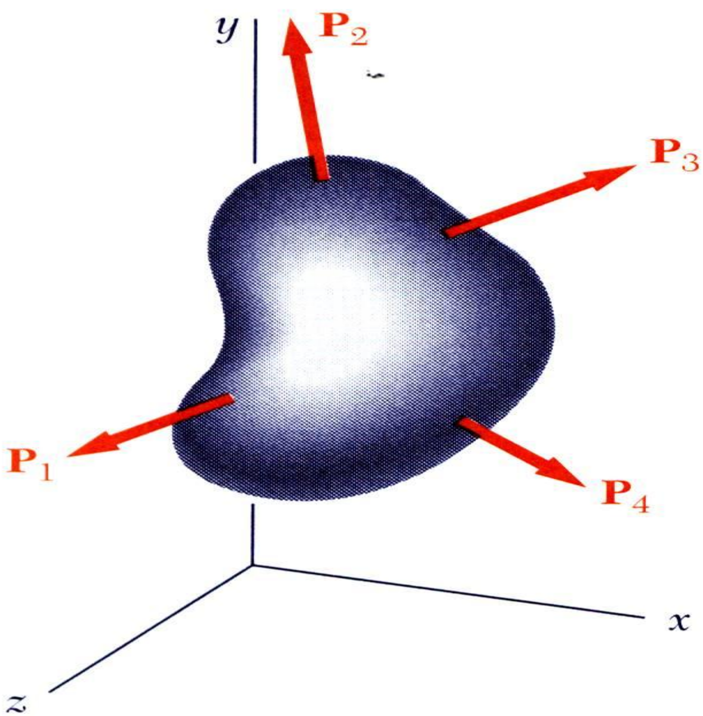
构件承载能力—稳定性(buckling)





受外力作用下，构件经过一个外部扰动过程仍然能够回到原来的平衡状态，我们称这个构件就是稳定的，否则称不稳定。

材料力学的基本假定



• 小变形：变形很微小

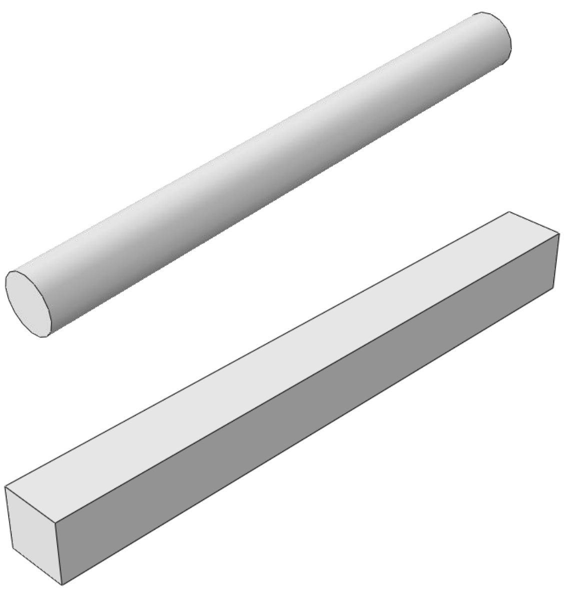
• 连续均匀：物质结构是密实的、连续的

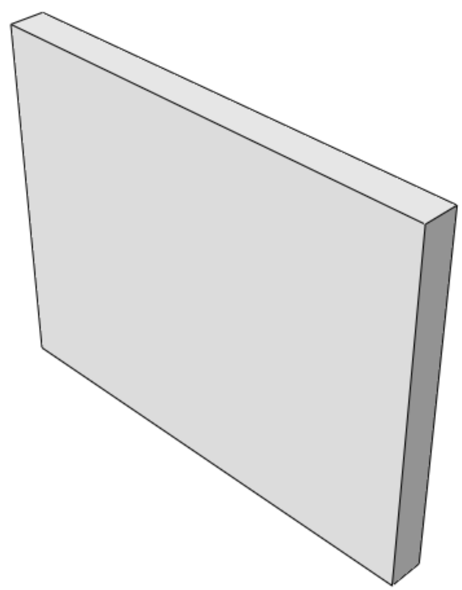
• 各向同性：材料在各个方向的力学性质都相同

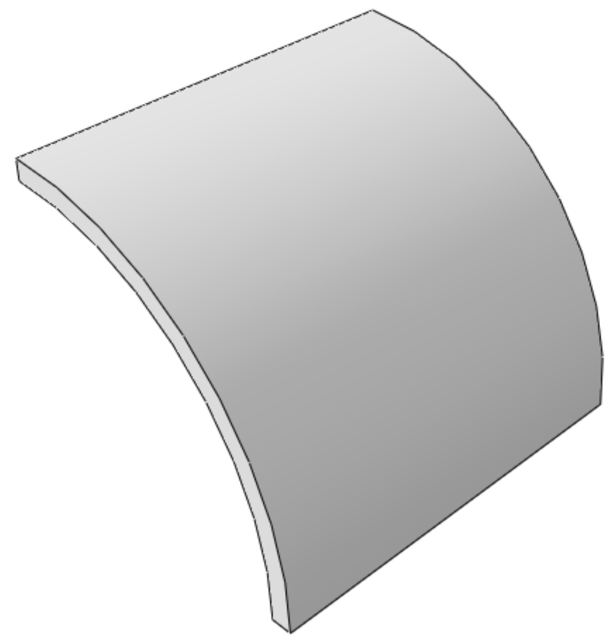
实际工程构件能满足吗?

构件类型

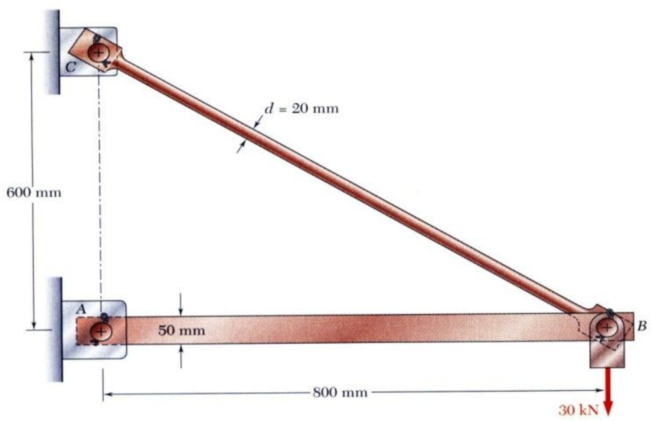
- 杆：纵向尺寸远大于横向尺寸的构件
- 板：厚度比其长度和宽度小的多的平面构件
- 壳：厚度比其长度和宽度小的多，但其几何形状不是平面，而是曲面的构件



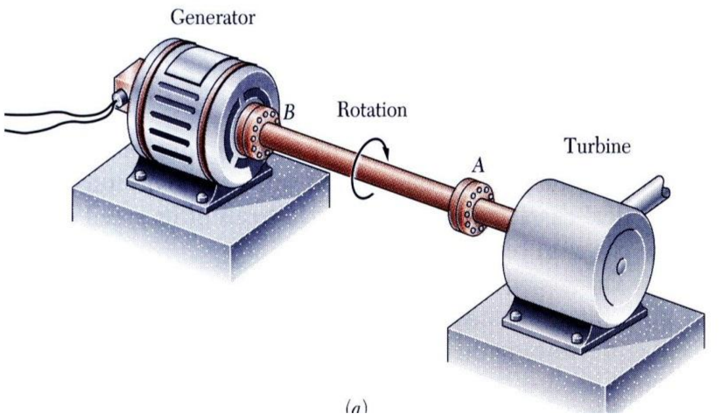




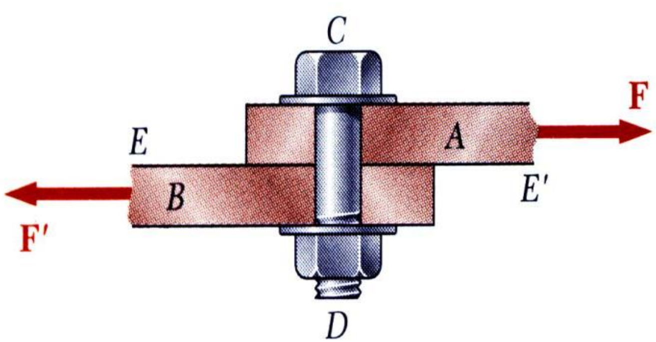
四种基本的变形



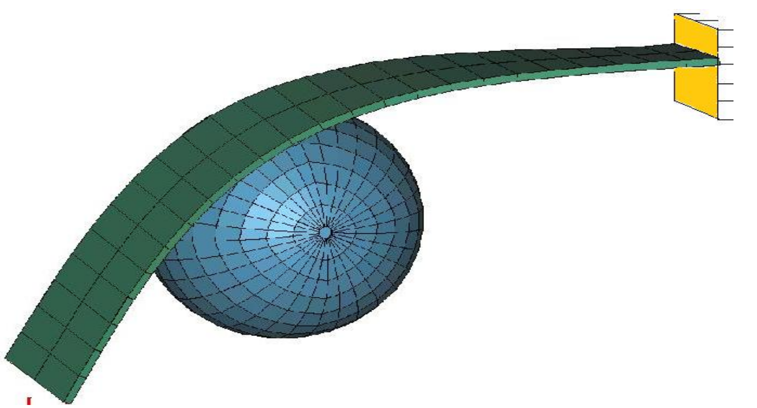
1）拉-压



3）扭转



2）剪切

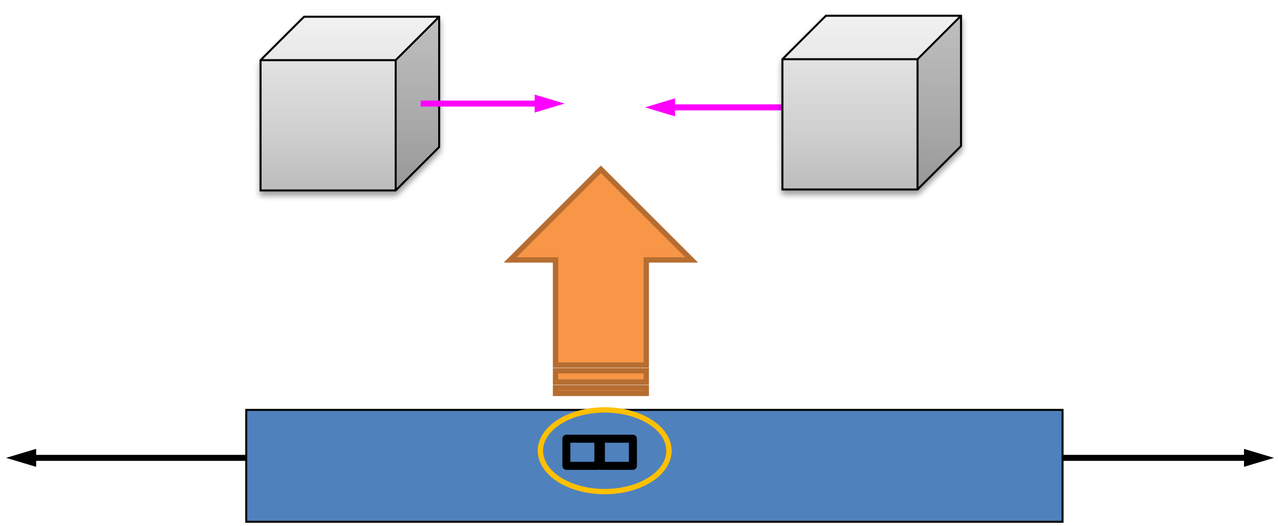


4）弯曲

外力和内力

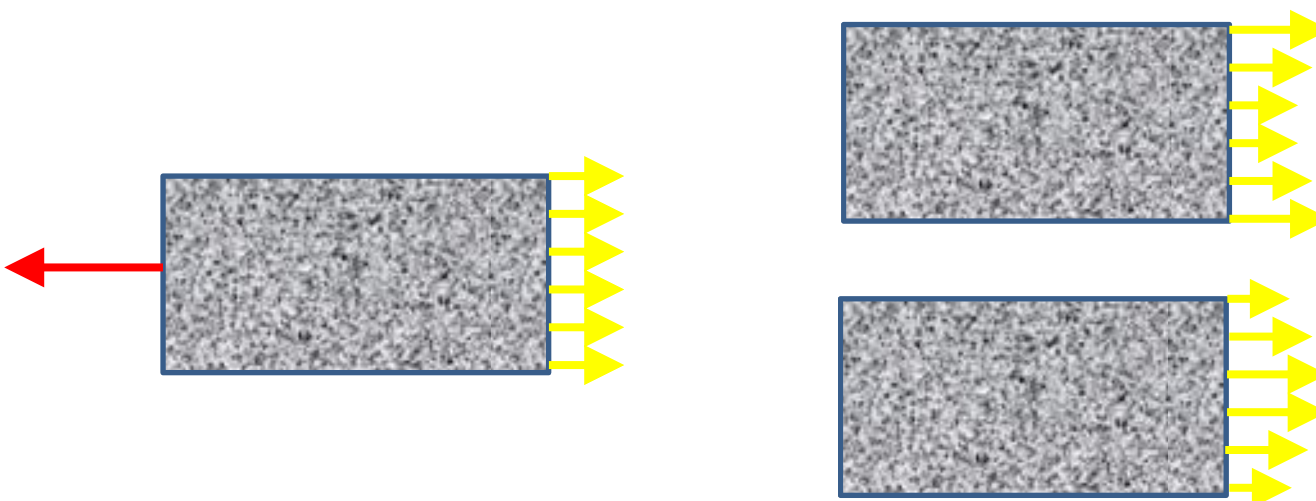
外力：物体对构件的作用，如约束反力、主动力

内力：构件一部分与相邻部分之间的相互作用力。拉伸为正，压缩为负



圣维南原理

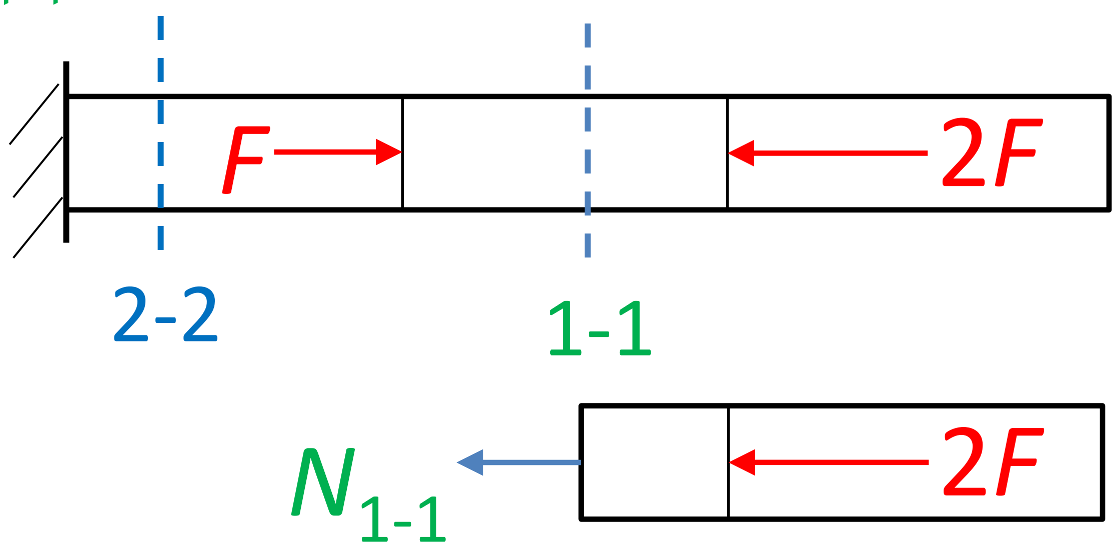
分布于弹性体上一小块面积（或体积）内的载荷所引起的物体中的应力，在离载荷作用区稍远的地方，基本上只同载荷的合力和合力矩有关；载荷的具体分布只影响载荷作用区附近的应力分布。



截面法

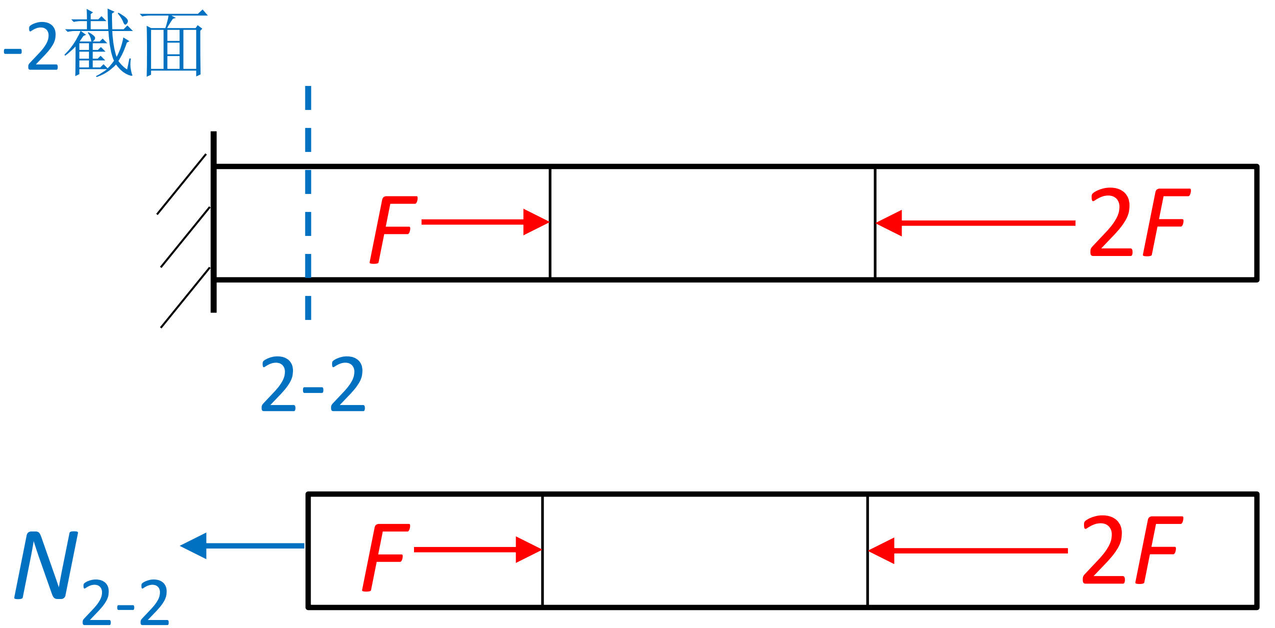
截面法：假想将杆件切开，使内力转化为外力，运用静力平衡条件求出截面上内力的方法。（拉力为正，压力为负）

1-1截面



$$\sum F_x = 0 \qquad N_{1-1} = -2F$$

截面法

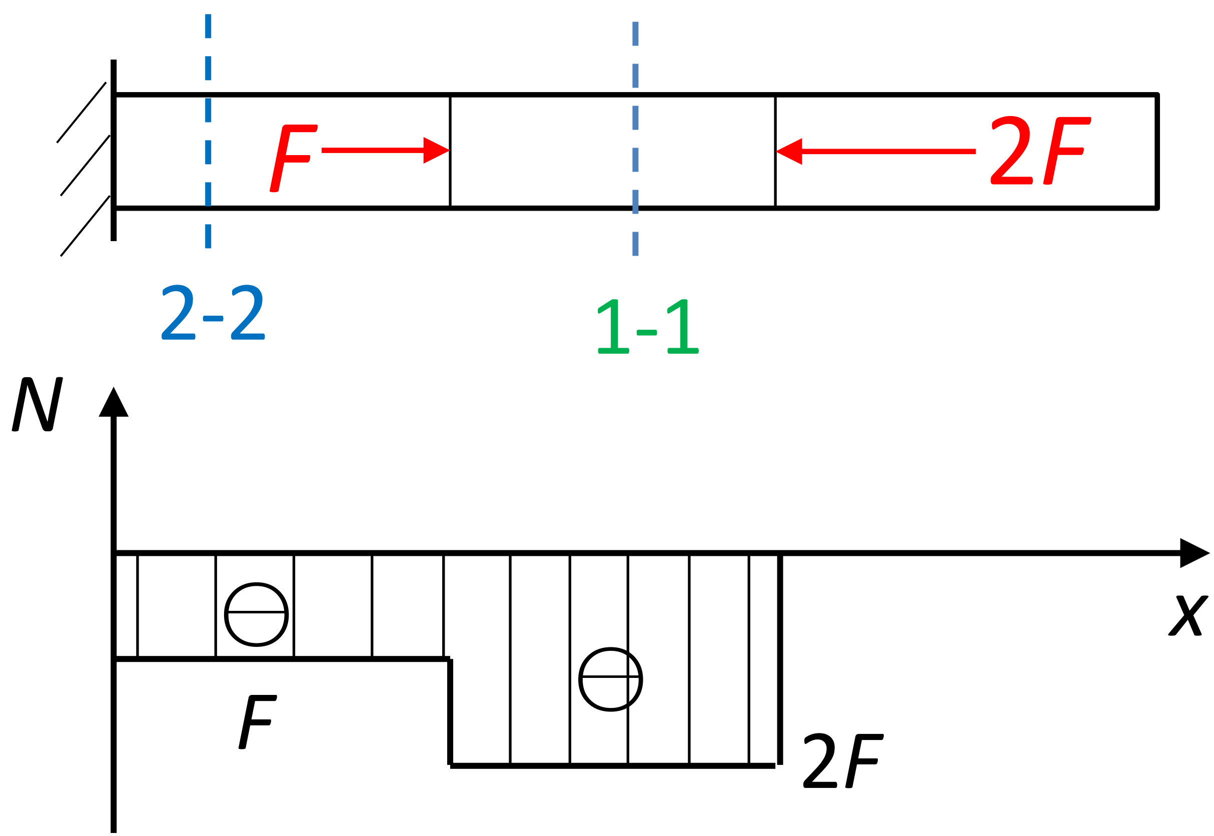


$$\sum F_x = 0 \qquad N_{2-2} - F + 2F = 0$$

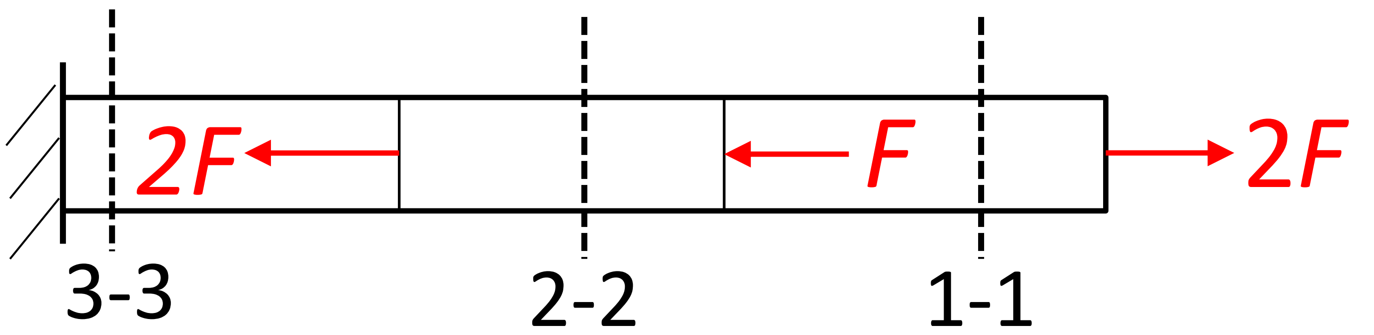
$$N_{2-2} = -F$$

轴力图

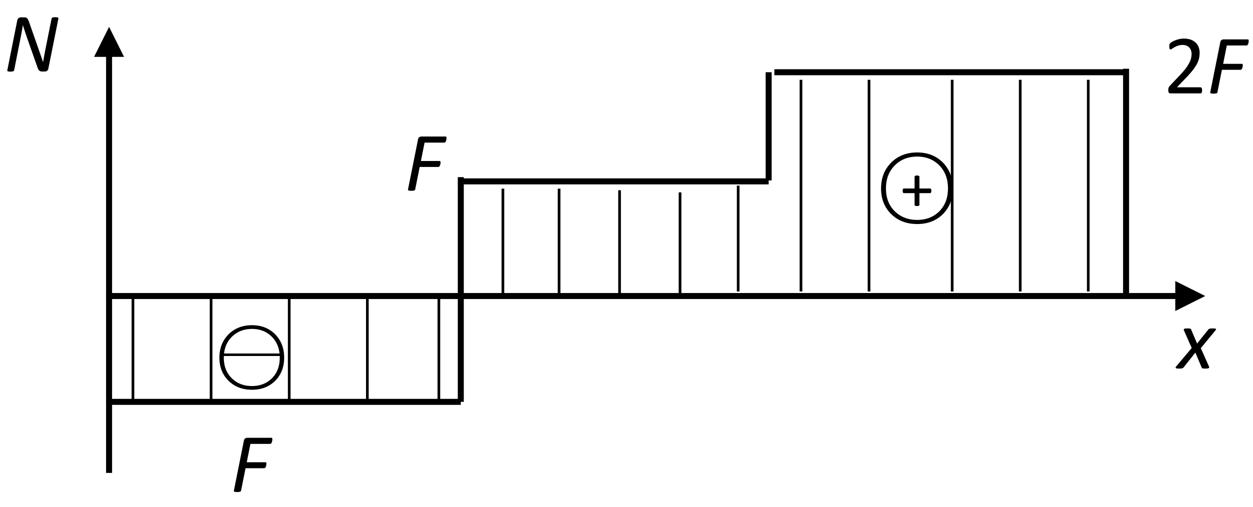
轴力图：拉力画在轴的上侧，压力画在轴的下测。



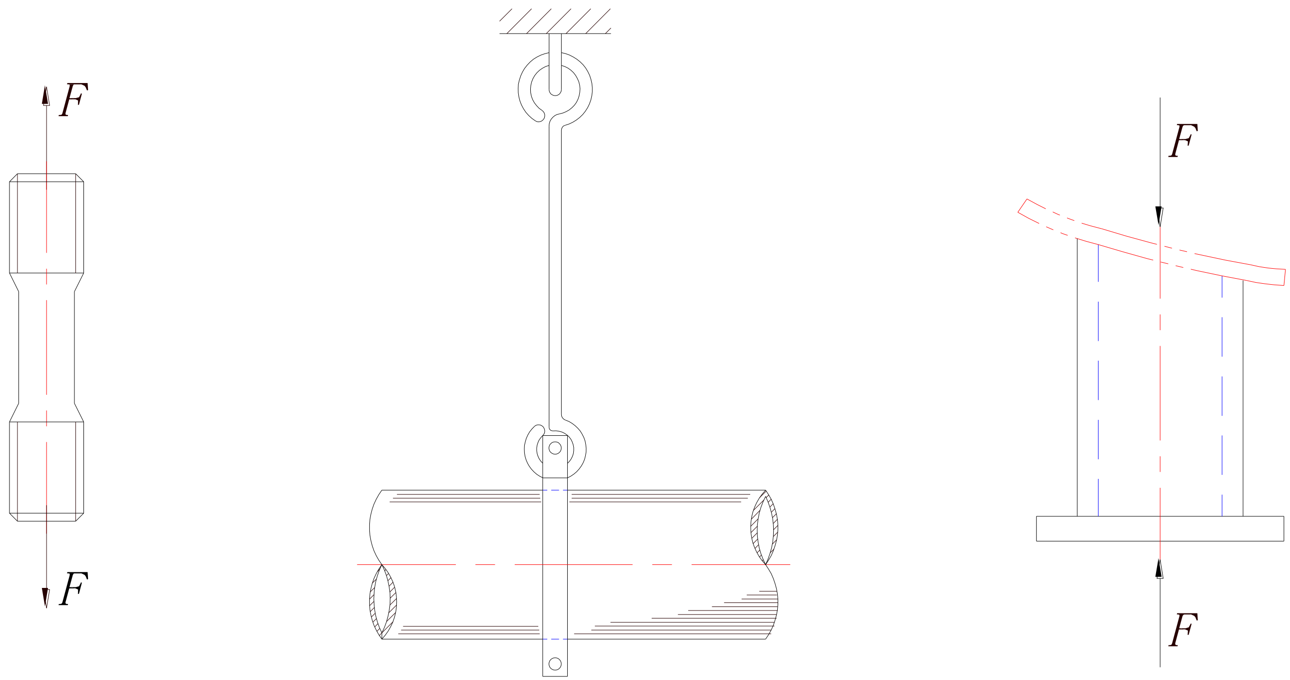
轴力图



$$N_{1-1} = 2F \qquad N_{2-2} = F \qquad N_{3-3} = -F$$



应力的基本概念

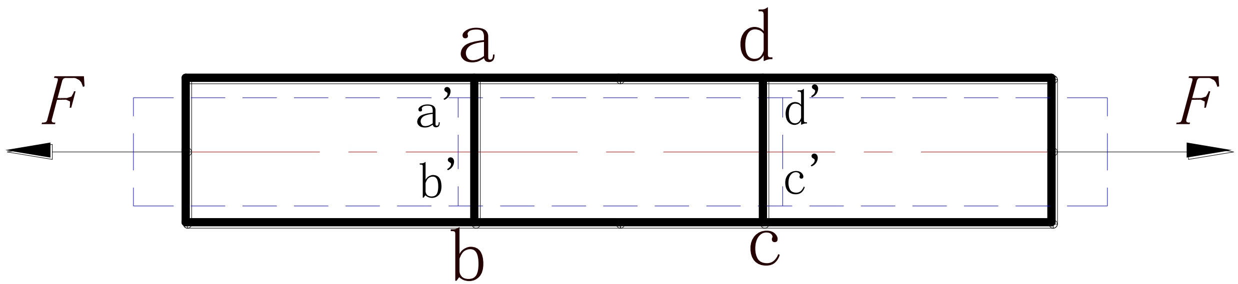


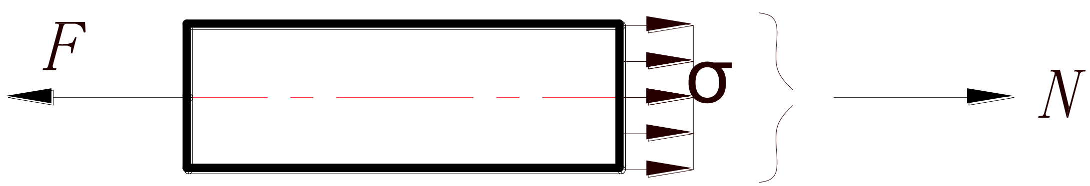
(a) (b) (c)

外力大小并不能判断杆件的受力程度，单位面积上的内力大小才能衡量构件的受力强弱

平面截面假设

变形前后，横截面轮廓线ab(a’ b’)和cd(c’ d’)始终为直线，且垂直于杆轴线





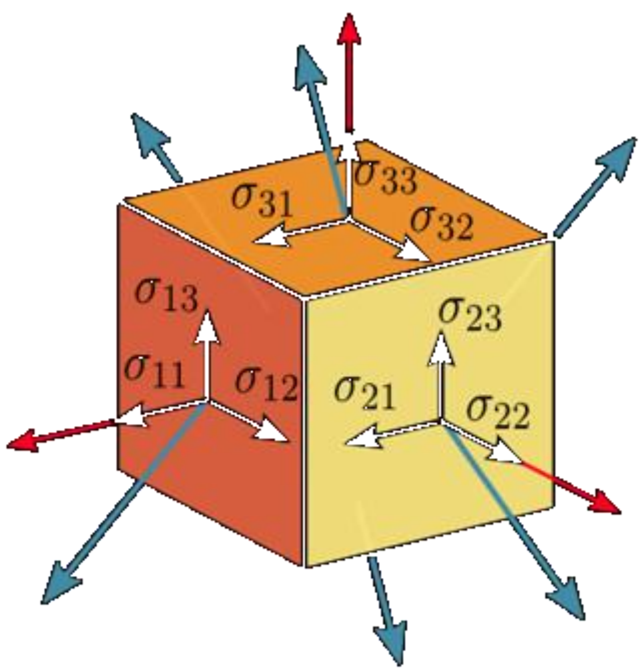
应力的定义 $\sigma = \dfrac{N}{A} = \dfrac{F}{A}$

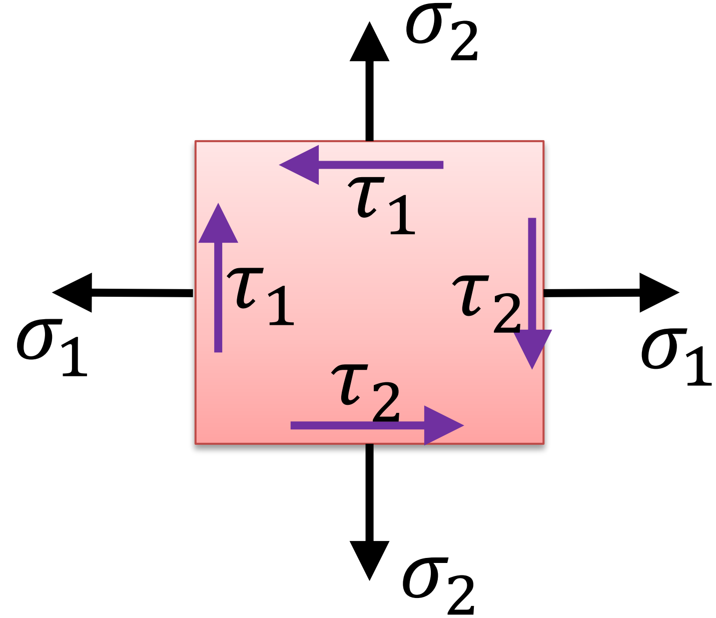
正值为拉应力，负值为压应力

国际单位：帕斯卡 Pa

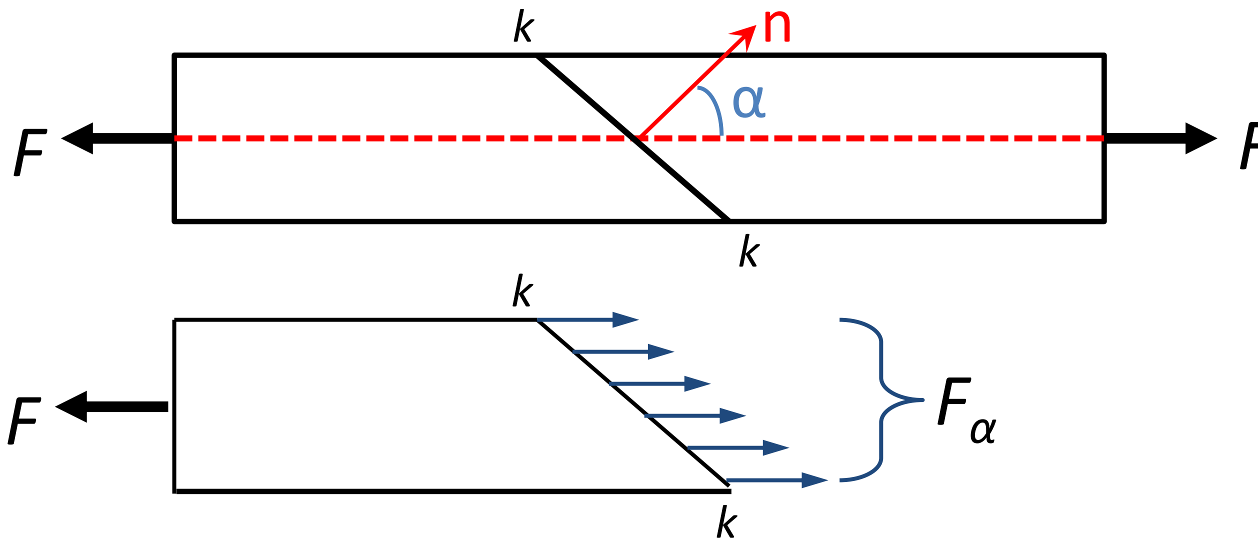
正应力和剪应力

- 应力方向与截面垂直为正应力 σ
- 应力方向与截面平行为剪应力 τ

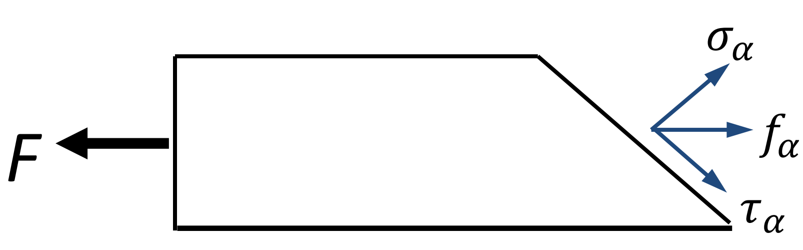




直杆拉伸时斜截面上的应力



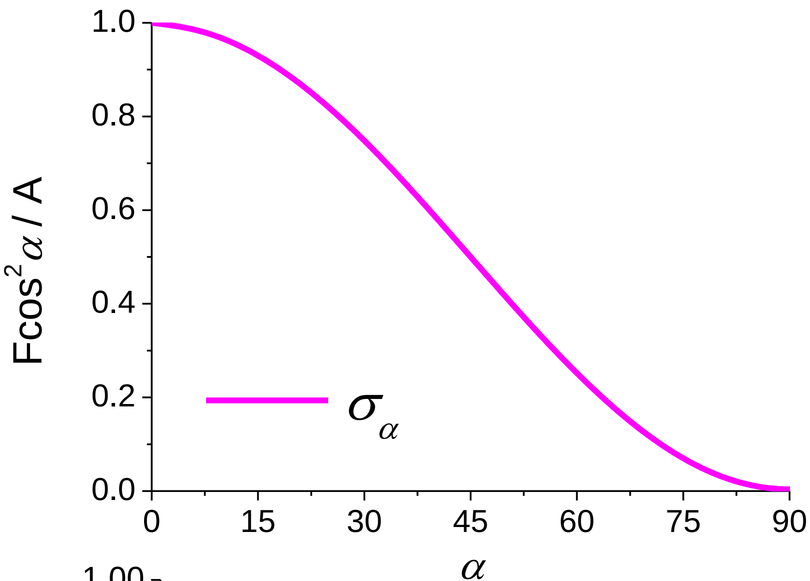
以f_α表示斜截面k–k上的应力 $f_\alpha = \dfrac{F_\alpha}{A_\alpha} = \dfrac{F\cos\alpha}{A}$

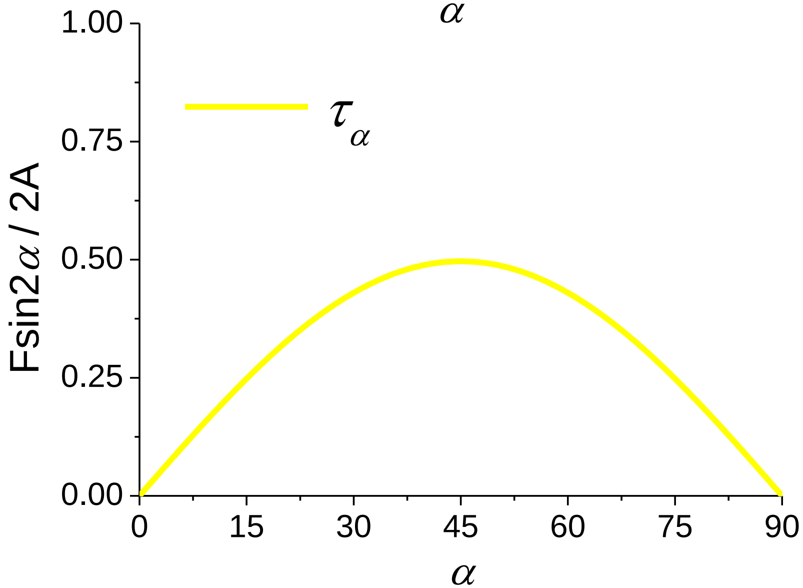


$$\sigma_\alpha = f_\alpha \cos\alpha = \frac{F\cos^2\alpha}{A}$$

$$\tau_\alpha = f_\alpha \sin\alpha = \frac{F\sin 2\alpha}{2A}$$

斜截面上应力的特点



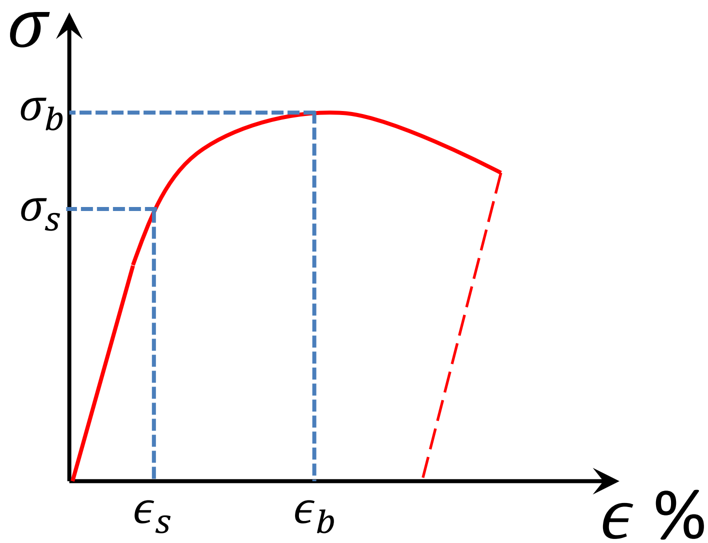


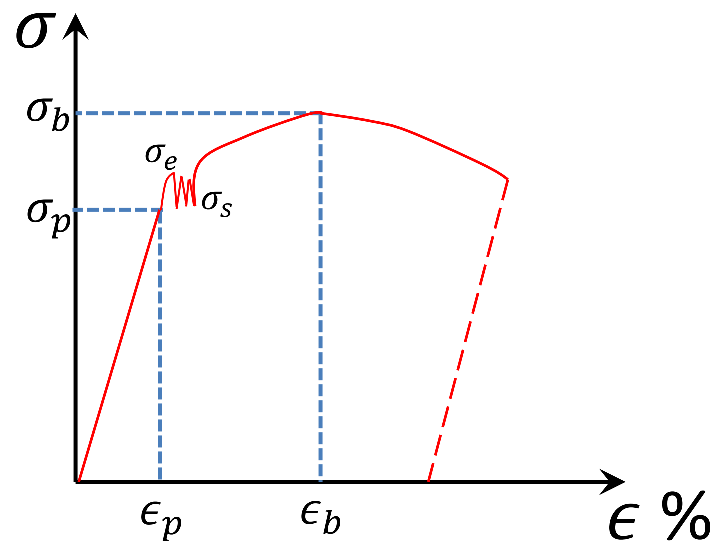
(1) $\alpha = 0$时，斜截面k-k垂直于轴线，σ_α达到最大值，而$\tau_\alpha = 0$

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

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

强度条件





危险应力σ^0：构件开始破坏时的应力

强度条件：$\sigma_{max} < \sigma^0$

考虑实际情况及必要强度储备取，许用应力$[\sigma]$：

$[\sigma] = \dfrac{\sigma^0}{n}$　　n：安全系数

脆性材料：$[\sigma] = [\sigma_b]/n_b$　　塑性材料：$[\sigma] = [\sigma_b]/n_b$

强度条件：$\sigma_{max} \leq [\sigma]$

杆件的三类强度计算

对于杆件

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

取许用应力[σ]的理由：

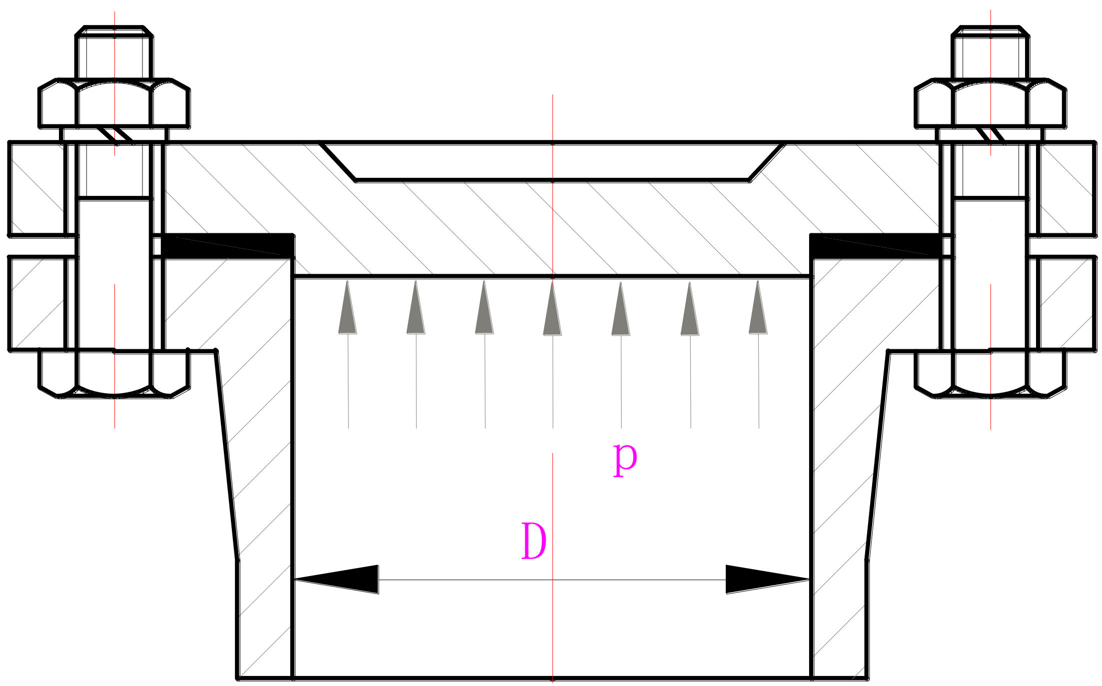
1. 补偿构件实际工作情况与设计计算时所设想的条件不一致
2. 必要的强度储备

根据强度条件可完成三件工作：

1. 强度校核： $\sigma_{max} \leq [\sigma]$
2. 截面设计： $A \geq N/[\sigma]$
3. 确定许用工作载荷： $N_{max} \leq [\sigma]A$

例

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[σ]= 100Mpa，气缸体内径D_i=600mm，试求气缸内允许的最大压力p（不考虑螺栓的预紧力）



解答

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

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

$$=3.14\times 10^4\ \mathrm{N}$$

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

$$=2.512\times 10^5\ \mathrm{N}$$

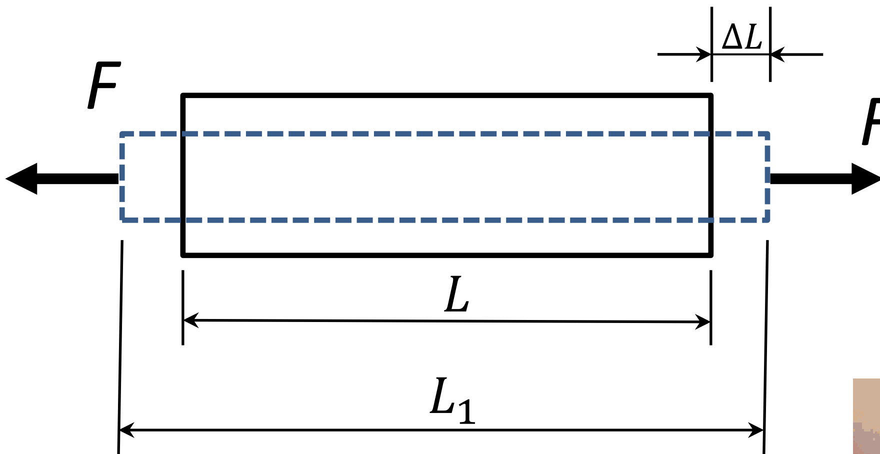
即气缸盖所受最大载荷为2.512×10^{5}N

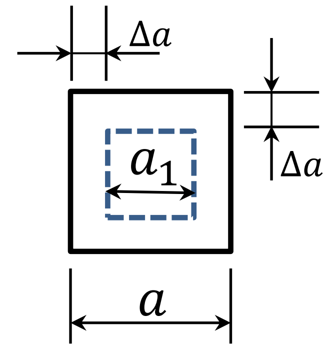
气缸盖的受力面积为：$A=\dfrac{\pi D_i^2}{4}=\dfrac{\pi\times 0.6^2}{4}=0.2826\ \mathrm{m}^2$

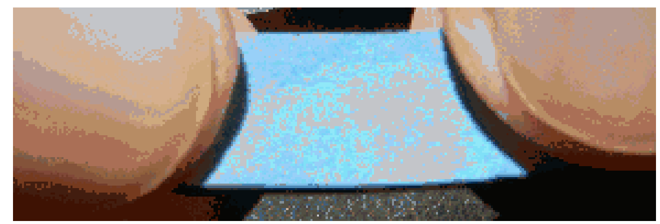
因此，缸内最大允许的压力为：

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

泊松系数







应变定义： $\epsilon = \dfrac{\Delta L}{L} = \dfrac{L_1 - L}{L}$

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

泊松系数 (Poisson’s ratio) $\mu = -\dfrac{\epsilon'}{\epsilon}$ $\qquad \mu = -\dfrac{\mathrm{d}\epsilon'}{\mathrm{d}\epsilon}$

$$\mu = \left|\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right| = \mathrm{const}$$

变形前后的体积变化

$$\mu = -\frac{\mathrm{d}\epsilon'}{\mathrm{d}\epsilon} = -\frac{\frac{\mathrm{d}a}{a}}{\frac{dL}{L}}$$

$$\int_L^{L+\Delta L} \mu \frac{dL}{L} = -\int_a^{a-\Delta a} \frac{\mathrm{d}a}{a}$$

$$\left(1+\frac{\Delta L}{L}\right)^{-\mu} = 1-\frac{\Delta a}{a}$$

$$\mu \ln\frac{L+\Delta L}{L} = -\ln\frac{a-\Delta a}{a}$$

一阶近似得

$$1-\mu\frac{\Delta L}{L} \approx 1-\frac{\Delta a}{a}$$

$$\mu \approx \frac{\frac{\Delta a}{a}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

变形前后体积分别为$\mathrm{V} = La^2$

$$\mathrm{V}+\Delta V = (L+\Delta L)(a-\Delta a)^2$$

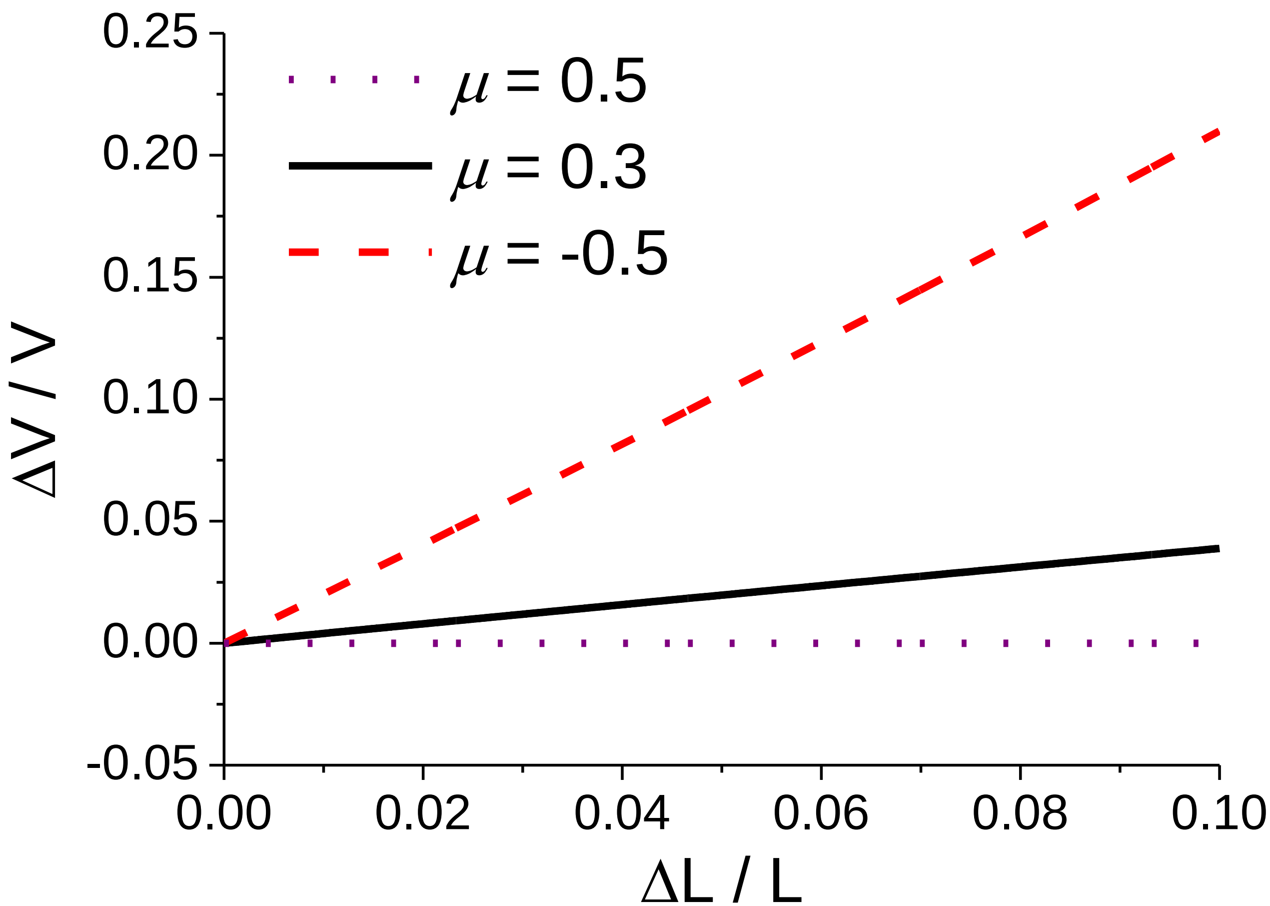
$$\frac{\Delta V}{\mathrm{V}} = \frac{(L+\Delta L)(a-\Delta a)^2 - La^2}{La^2}$$

$$= \left(1+\frac{\Delta L}{L}\right)\left(1-\frac{\Delta a}{a}\right)^2 - 1$$

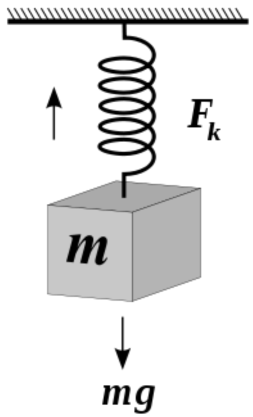
$$= \left(1+\frac{\Delta L}{L}\right)^{1-2\mu} - 1$$

变形前后的体积变化

一阶近似得 $\dfrac{\Delta V}{V} \approx (1-2\mu)\dfrac{\Delta L}{L}$



虎克定理(Hooke's Law)



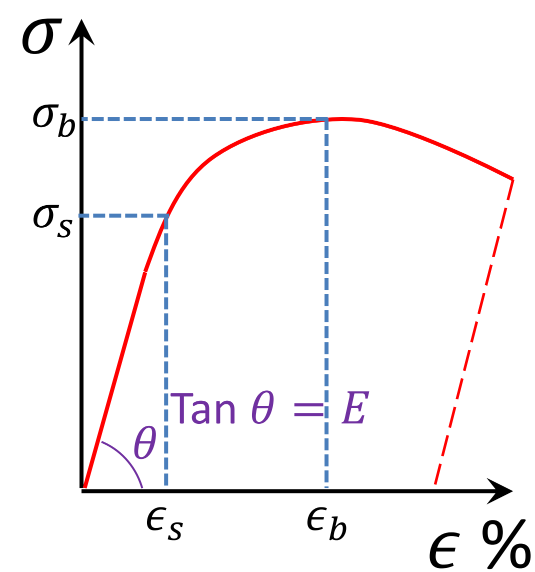
物理中 $F = K\Delta x$

将上式两边除以截面积A，则：

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

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

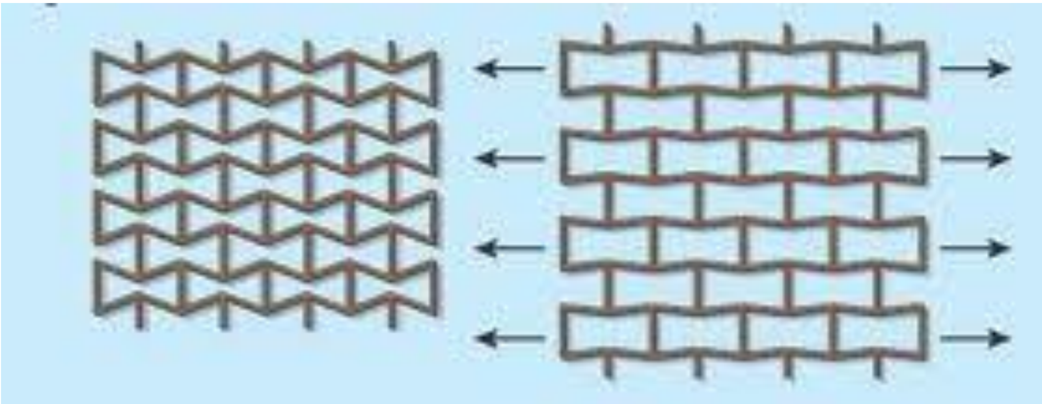
E 称为材料的弹性模量(杨氏模量)，表示材料抵抗弹性变形的能力。



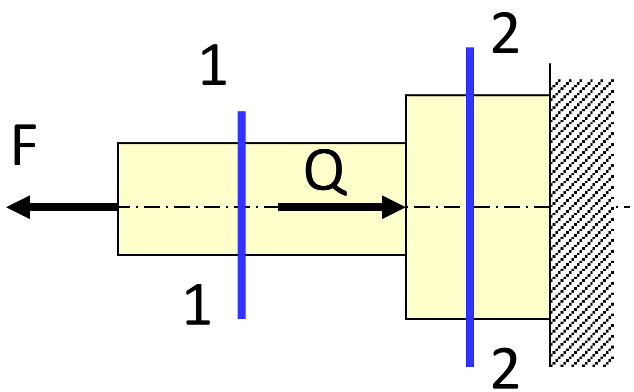
常用材料的弹性模量和泊松比

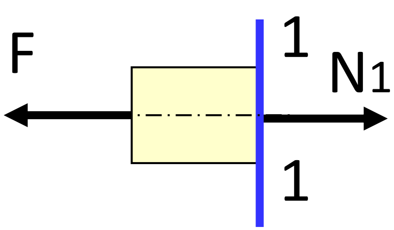
材料	拉(压)弹性模量E $\times 10^5$ MPa	剪切弹性模量G $\times 10^5$ MPa	泊松比μ
碳钢	1.96 ~ 2.16	0.795 ~ 0.835	0.24 ~ 0.28
灰铸铁	0.79 ~ 1.57	0.441	0.23 ~ 0.27
铜及其合金	0.73 ~ 1.57	0.39 ~ 0.45	0.31 ~ 0.42
铝合金	0.71	0.26 ~ 0.27	0.33
橡胶	0.00078		0.47

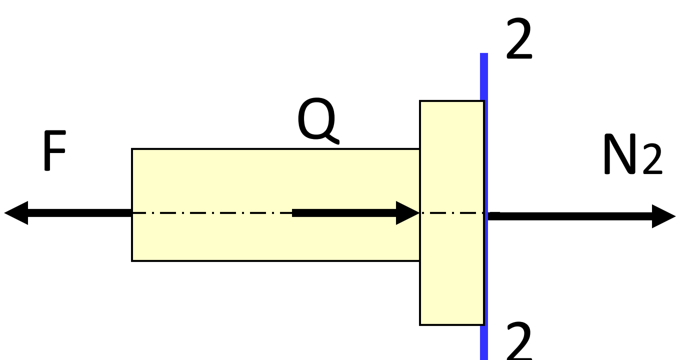
负泊松比材料
(内凹多胞材料)



已知F=10N, Q=15N, A_1=10mm^2, A_2=20mm^2, l_1=1m, l_2=0.5m，材料弹性模量E=2x10^5 MPa，求各杆应力、应变和杆的总伸长。







解：$N_1 = F = 10\text{N}$

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{A_1} = 1\text{MPa}$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = 5 \times 10^{-6}$$

$$\Delta L_1 = \frac{N_1 l_1}{EA_1} = \epsilon_1 l_1 = 5 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$N_2 = F - Q = -5\text{N}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{A_2} = -0.25\text{MPa}$$

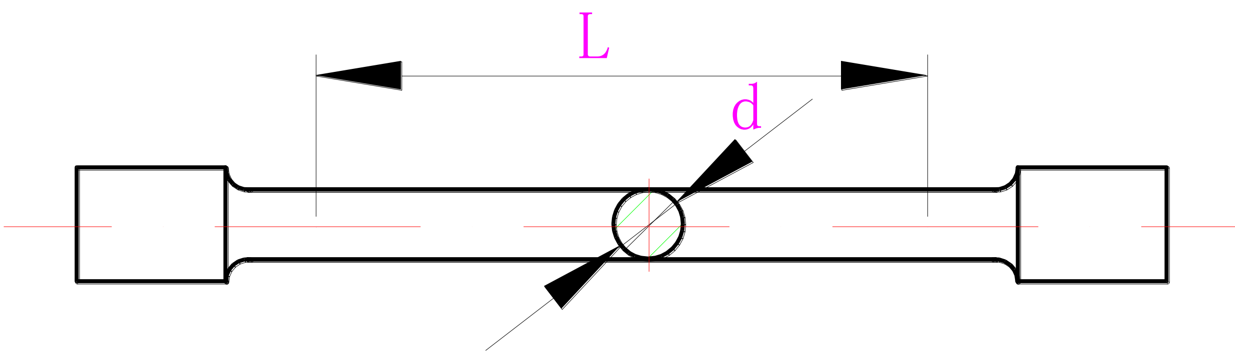
$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} = -1.25 \times 10^{-6}$$

$$\Delta L_2 = \frac{N_2 l_2}{EA_2} = \epsilon_2 l_2 = -6.25 \times 10^{-7}\text{m}$$

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 4.375 \times 10^{-6}\text{m}$$

材料的力学性能

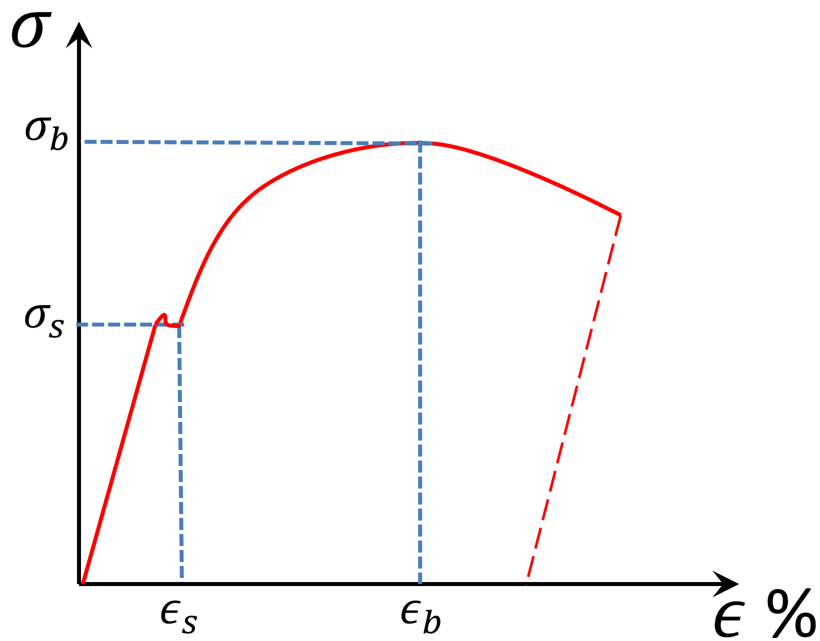
材料的强度及测定(GB228-2002)

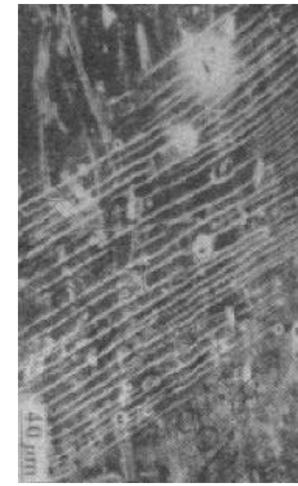


金属拉伸试验试样

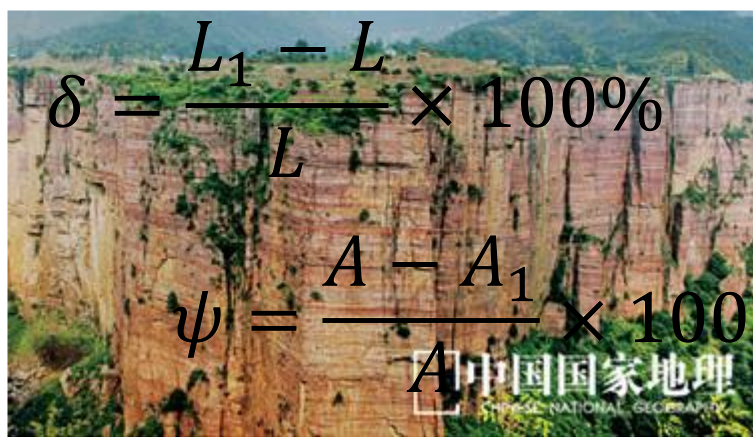
国家标准规定：$l=10d$和$l=5d$

拉伸时应力与应变曲线





延伸率

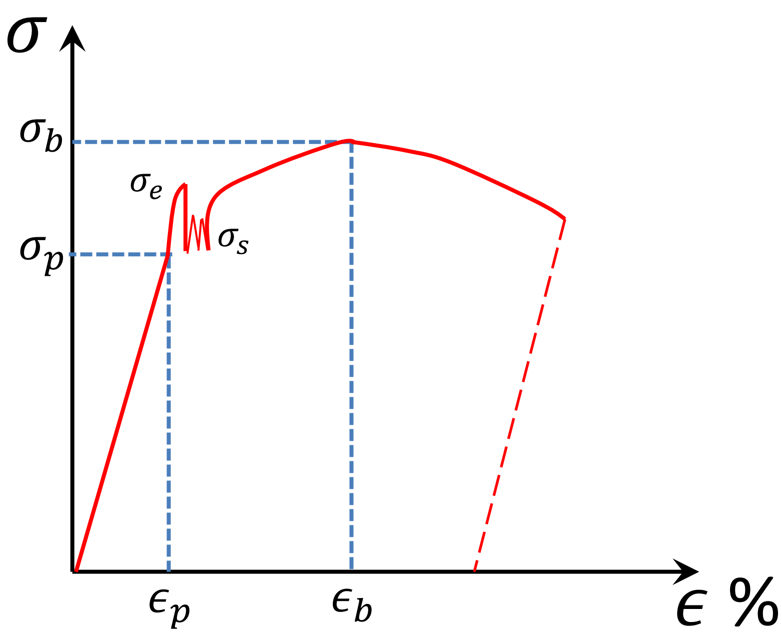


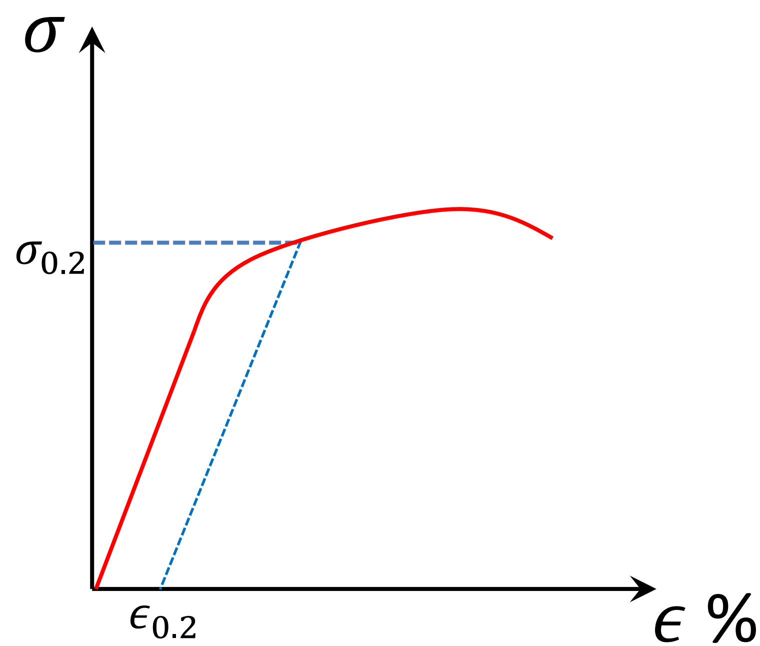
$$\delta = \frac{L_1 - L}{L} \times 100\%$$

断面收缩率

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\%$$

材料的拉伸曲线





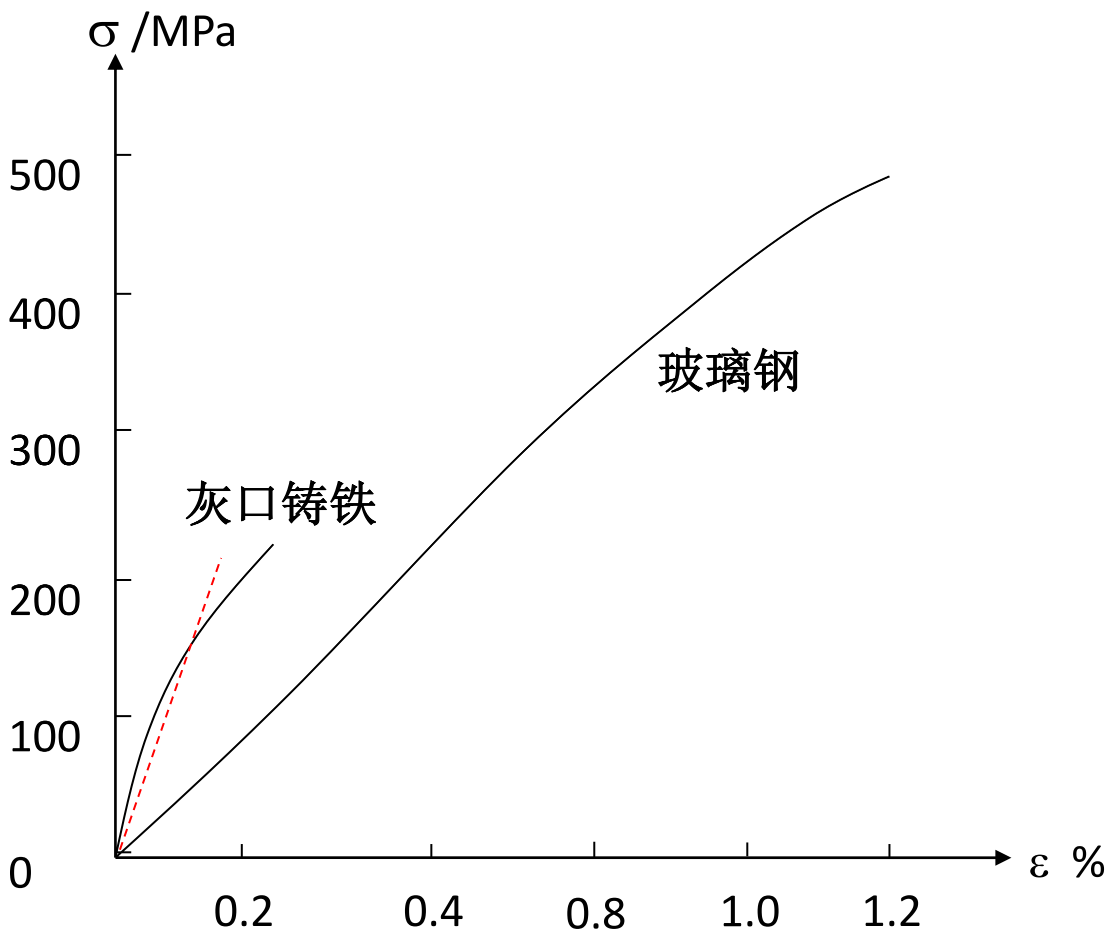
比例极限(proportional limit) σ_p

弹性极限(elastic limit) σ_e

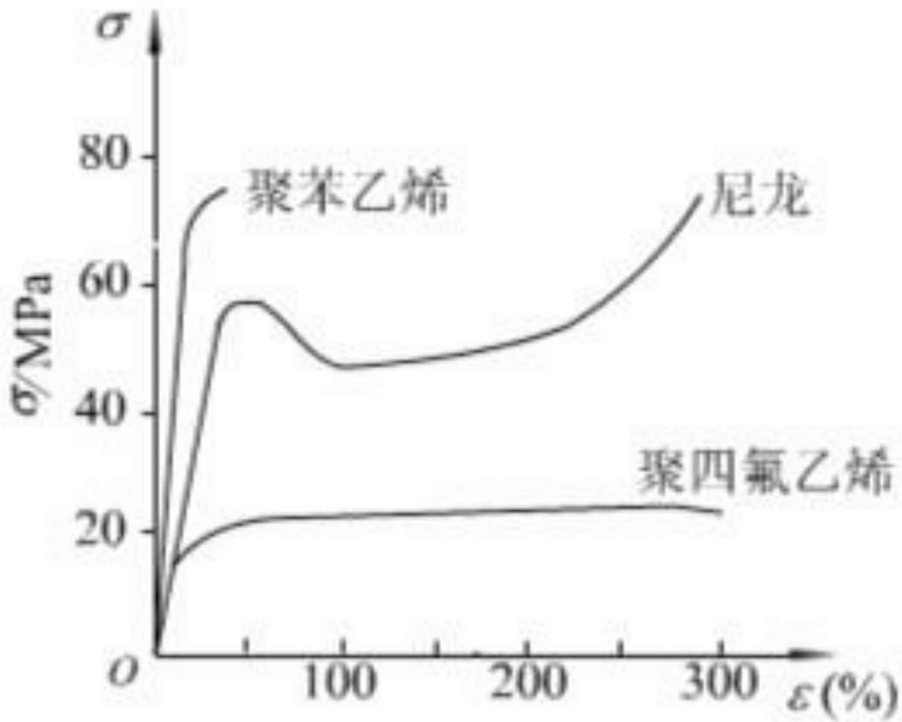
屈服强度(yield strength) σ_s

抗拉强度(断裂强度 breaking strength) σ_b

脆性材料拉伸应力应变曲线

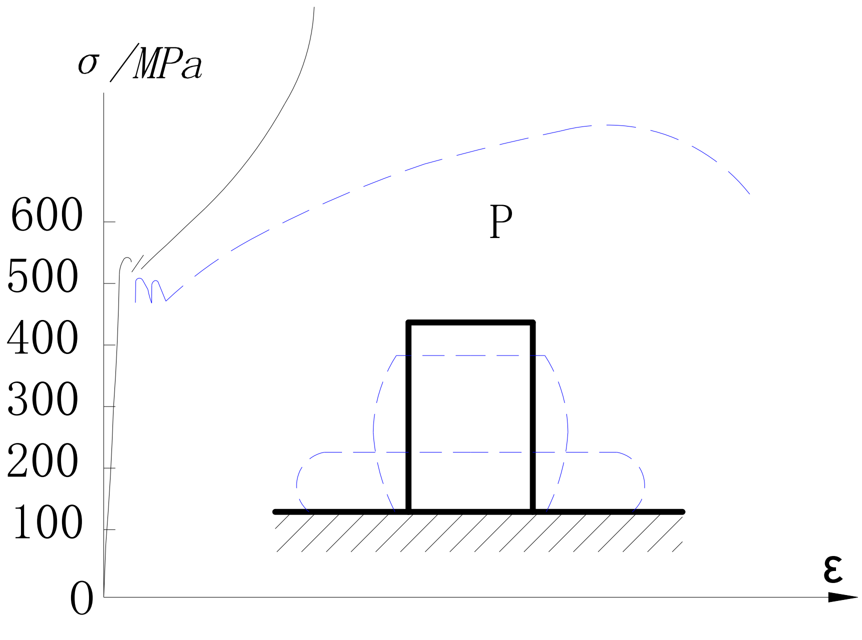


高分子材料的拉伸曲线

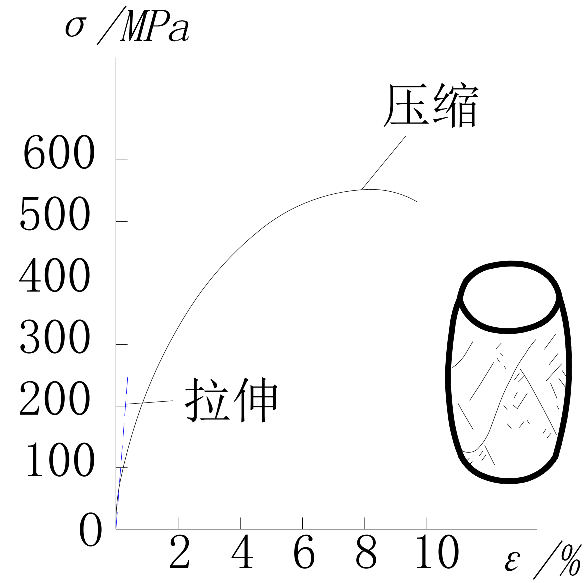


高分子材料种类很多，它们的力学性能有很大差异。主要分这样几类，一类为硬而脆的高分子材料，如聚苯乙烯、有机玻璃等；第二类为具有一定强度和塑性的结晶态高分子材料，如尼龙、聚碳酸脂等；第三类为高弹性材料，如橡胶等。

压缩时的应力应变曲线



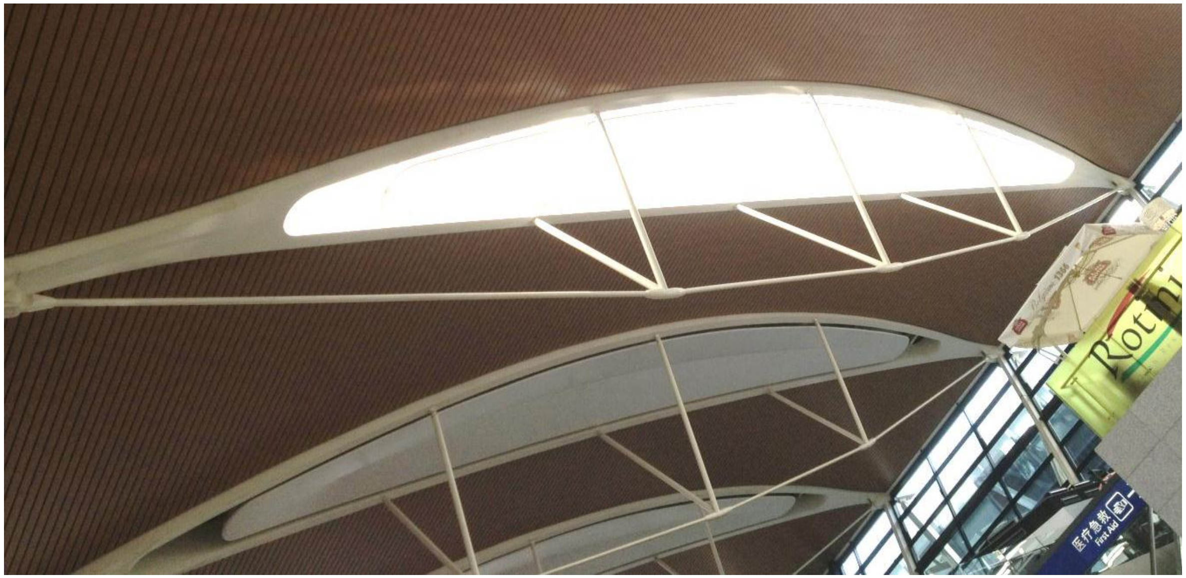
(a)



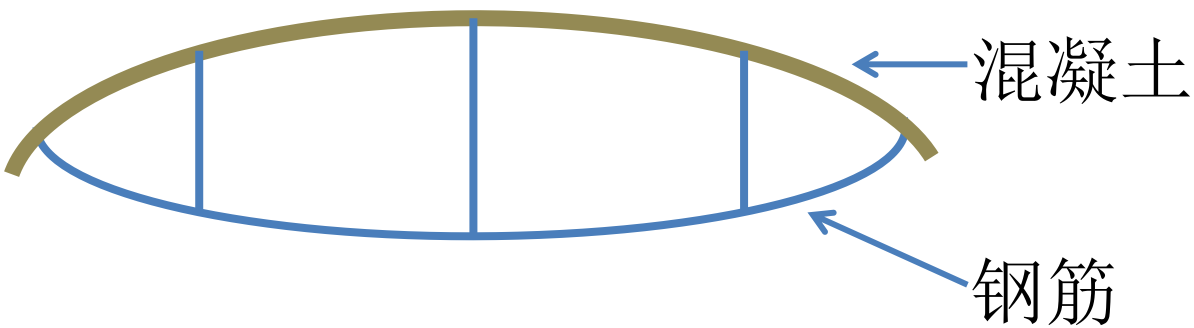
(b)

- 对于塑性材料不作压缩试验，屈服应力可直接引用拉伸试验结果
- 对于脆性材料，抗压强度比抗拉强度高许多，因此常用于制造承受压力的构件

鱼腹梁结构



浦东机场候机
厅屋顶结构

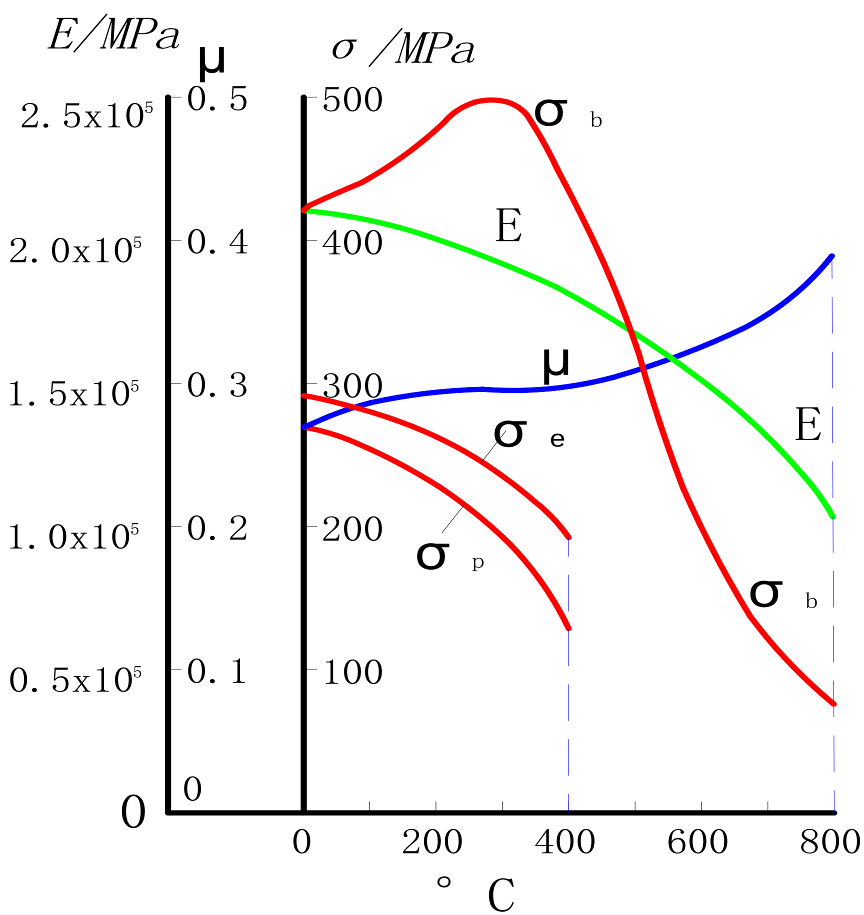


为什么要设计成这样的结构，从受力角度看混凝土上承受什么力？钢筋承受什么力？

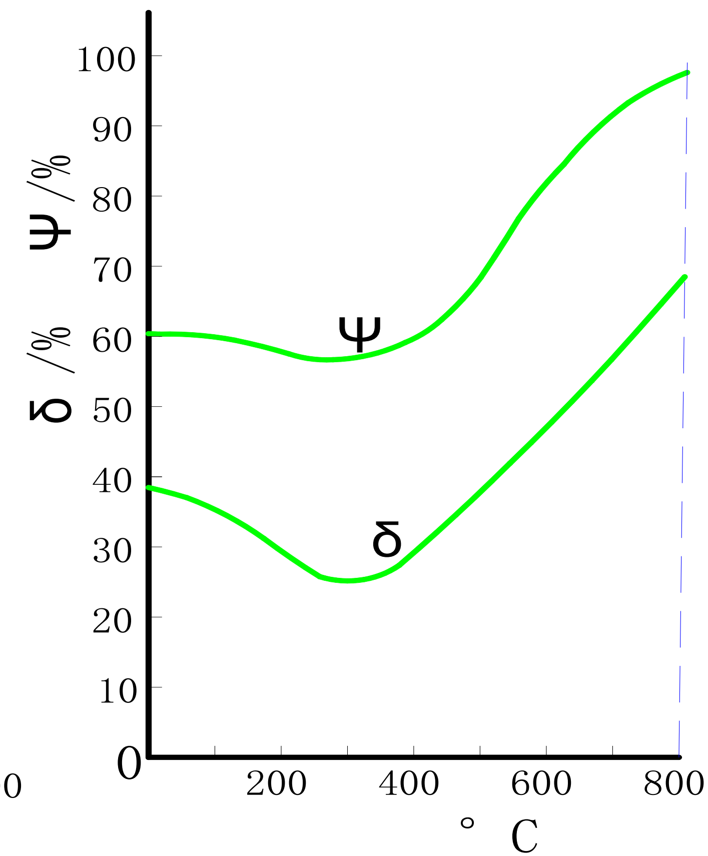
材料的其它力学性能指标

前面所测试的材料强度实际上只有在实验室条件下测得的，工程构件的受力是多样和复杂的，其受力可能为外载应力、变形应力和交变应力，材料的强度还与温度等因素存在密切的关系。

与温度相关的材料性能

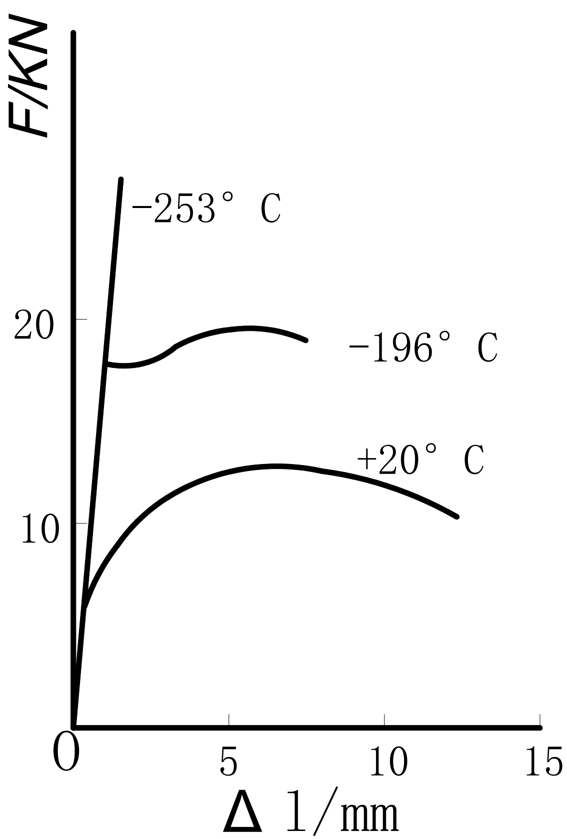


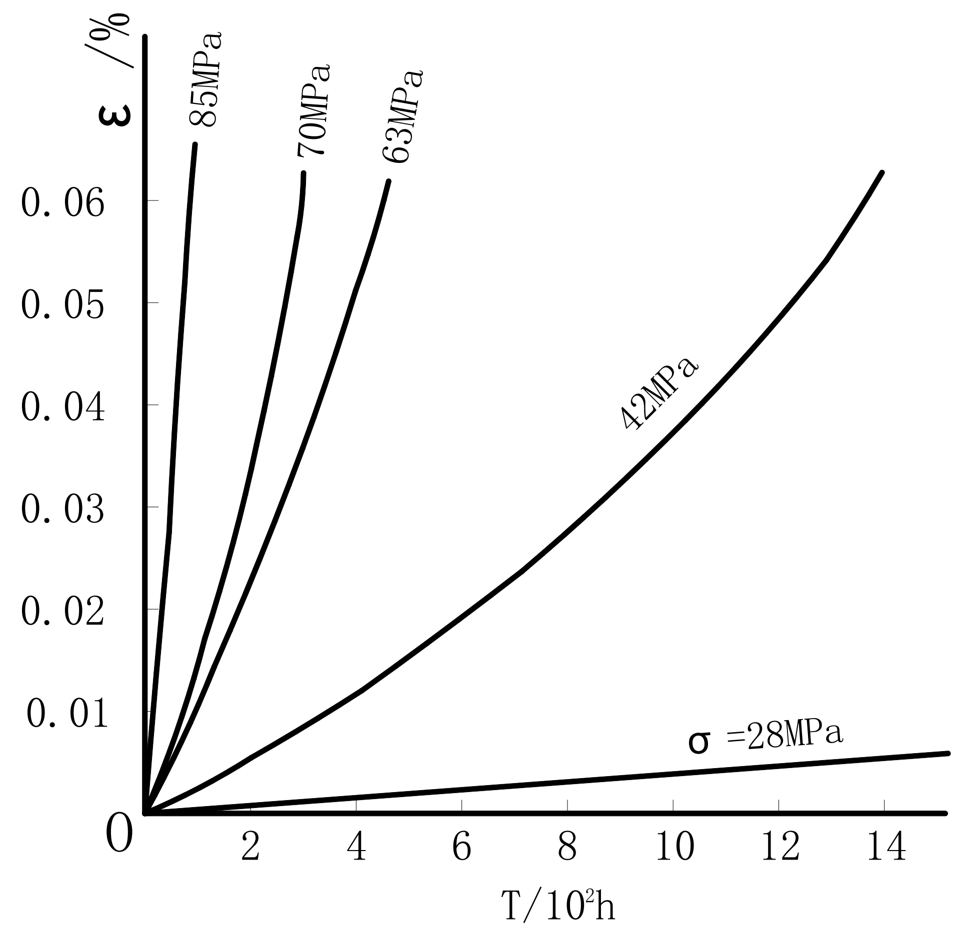
E/MPa
μ
σ /MPa
2.5x10⁵
2.0x10⁵
1.5x10⁵
1.0x10⁵
0.5x10⁵
0
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
500
400
300
200
100
0
200
400
600
800
°C
σ b
E
μ
σ e
σ p
E
σ b



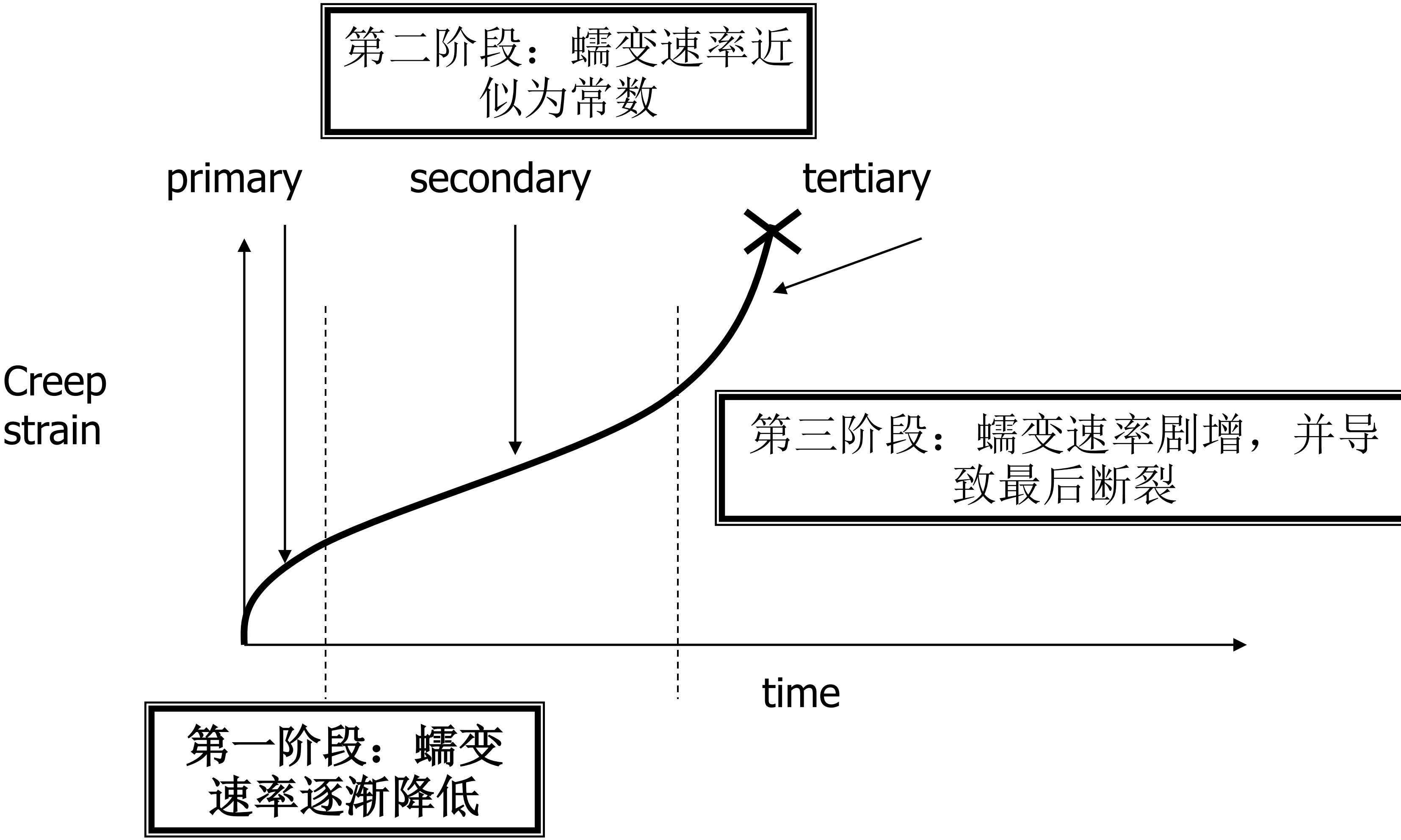
ψ /%
δ /%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
200
400
600
800
°C
ψ
δ

高温/低温下的材料性能


F/KN
20
10
0
5
10
15
Δ 1/mm
−253° C
−196° C
+20° C

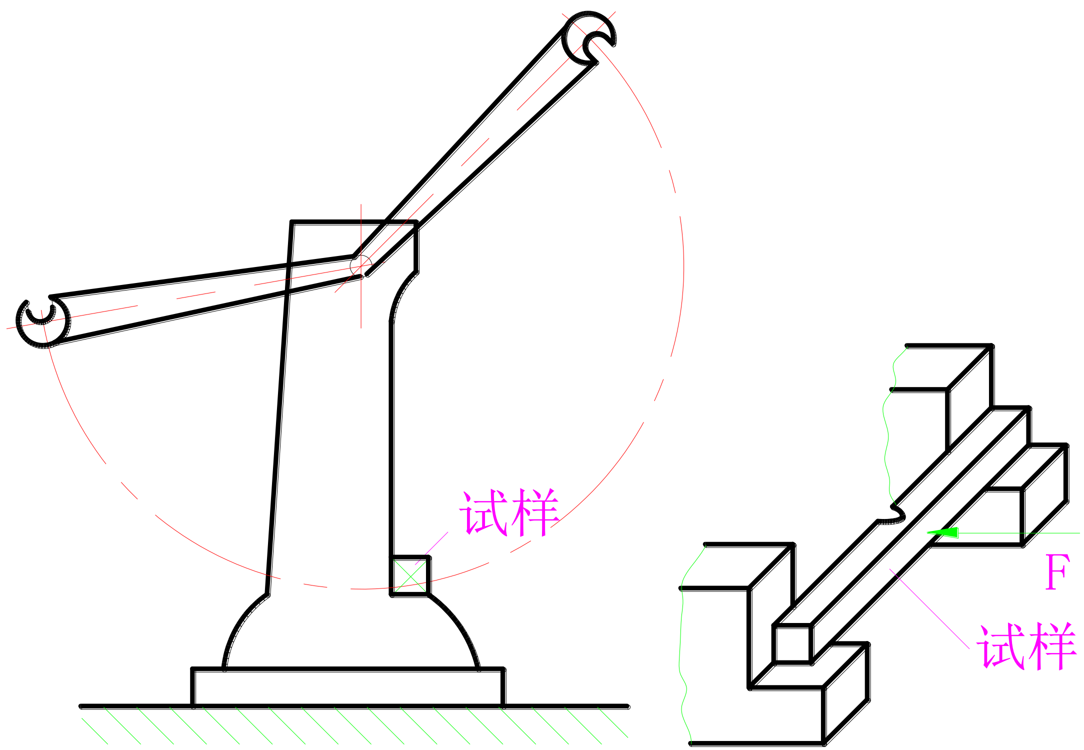

ε /%
0. 06
0. 05
0. 04
0. 03
0. 02
0. 01
0
2
4
6
8
10
12
14
T/10²h
85MPa
70MPa
63MPa
42MPa
σ =28MPa

蠕变变形的三个阶段



第二阶段：蠕变速率近似为常数
primary
secondary
tertiary
Creep strain
第三阶段：蠕变速率剧增，并导致最后断裂
time
第一阶段：蠕变速率逐渐降低

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》

材料的其它力学性能指标—硬度

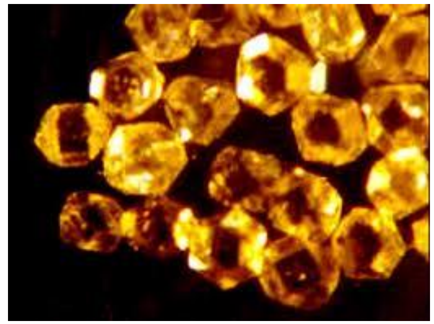
硬度表示其它物体对它表面局部压入的能力。

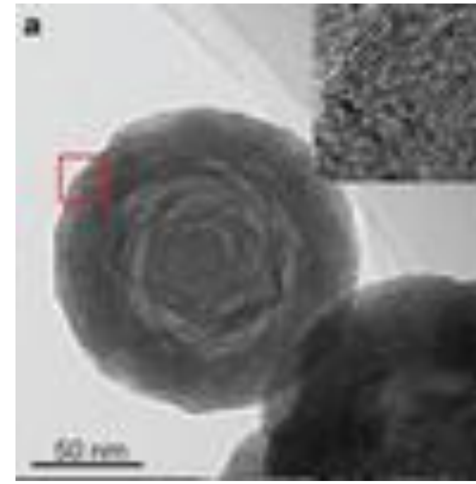
早在1822年，Friedrich mohs提出用10种矿物来衡量世界上最硬的和最软的物体，这是所谓的摩氏硬度计。

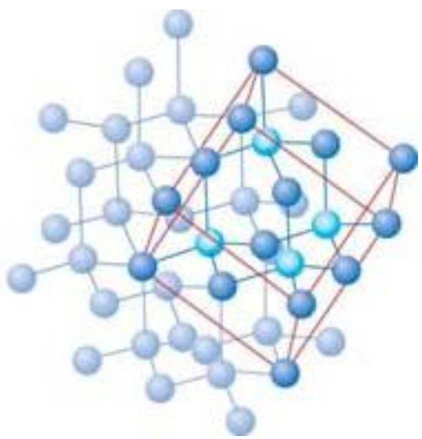
1）滑石 2）石膏 3）方解石 4）萤石 5）磷灰石6）正长石 7）石英8）黄玉 9）刚玉 10）金刚石

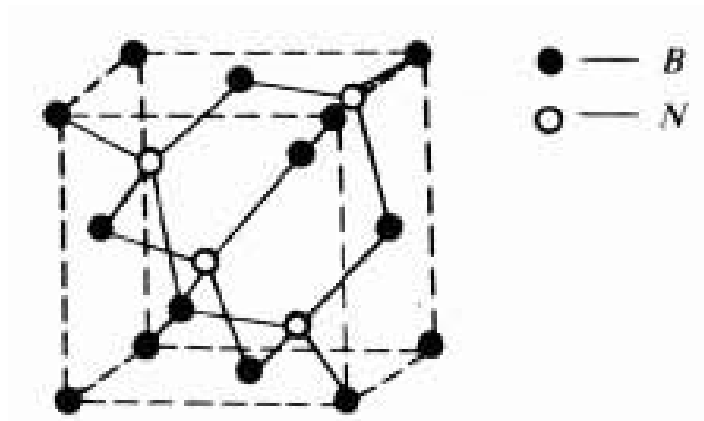
硬度不是一个简单的物理概念，而是材料弹性、塑性、强度和韧性等力学性能的综合指标。。

最硬的材料







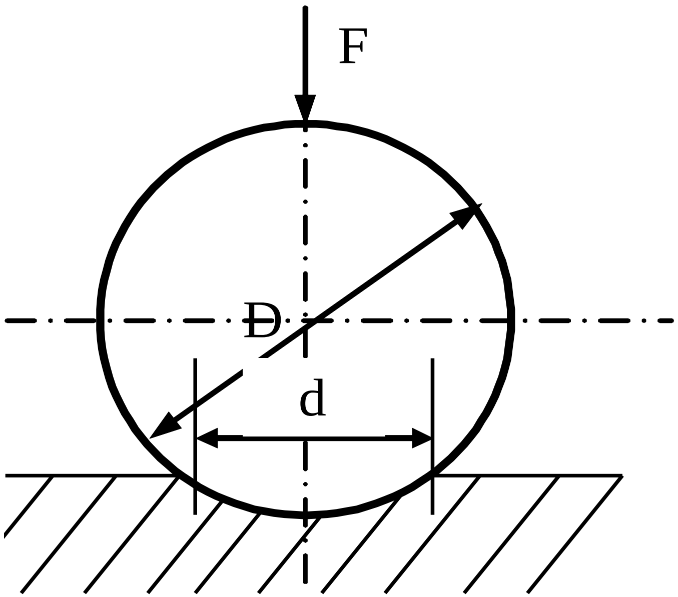


- 金刚石C

c-BN

纳米孪晶
结构立方
氮化硼
Nature，2013

布氏硬度

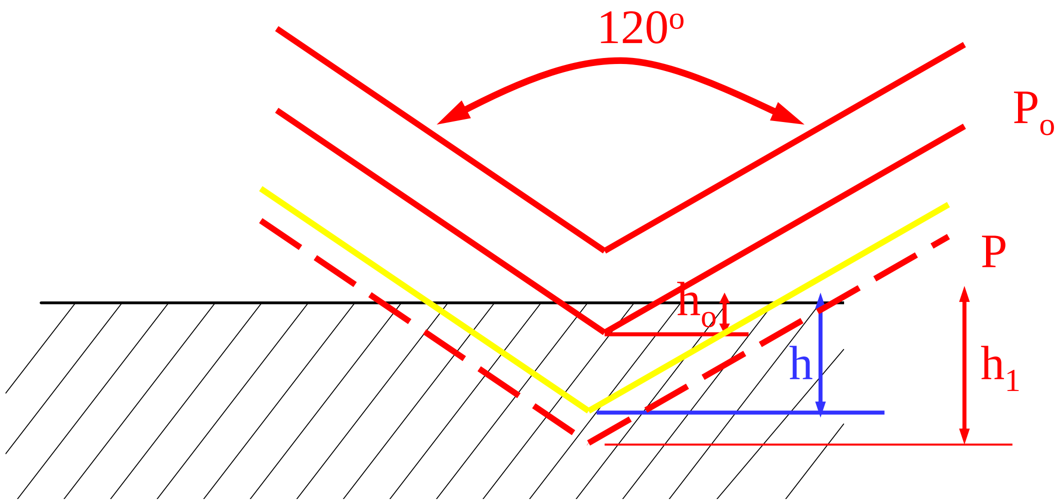


$$HB = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi D}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

布氏硬度：单位压痕表面积A上所承受的平均压力

瑞典工程师T.A.Brinell于1900年提出。布氏硬度测量法适用于铸铁、非铁合金、各种退火及调质的钢材，不宜测定太硬、太小、太薄和表面不允许有较大压痕的试样或工件。

洛氏硬度



$$HR = K - \frac{h - h_o}{0.002}$$

由美国人Rockwell于1919年提出。用120°金刚石圆锥体或硬度钢球做压头，根据试样的压痕深度来表示硬度高低。

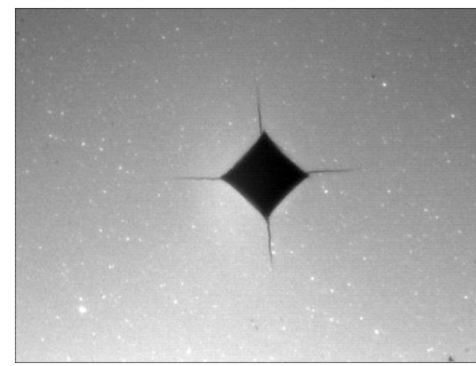
当被测样品过小或者布氏硬度（HB）大于450时，就改用洛氏硬度计量。

常用的有HRA、HRB、HRC三个等级

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°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

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



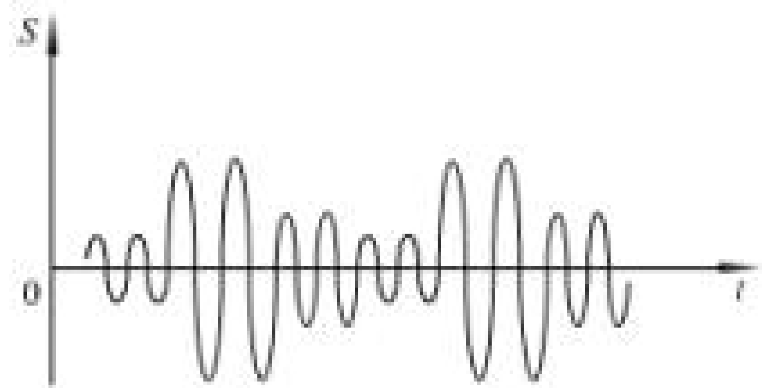
显微硬度：小载荷的维氏硬度，实验载荷比维氏硬度实验低一、二个数量级，压痕在微米量级

材料的其它力学性能指标—疲劳

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**。

疲劳强度决定于：

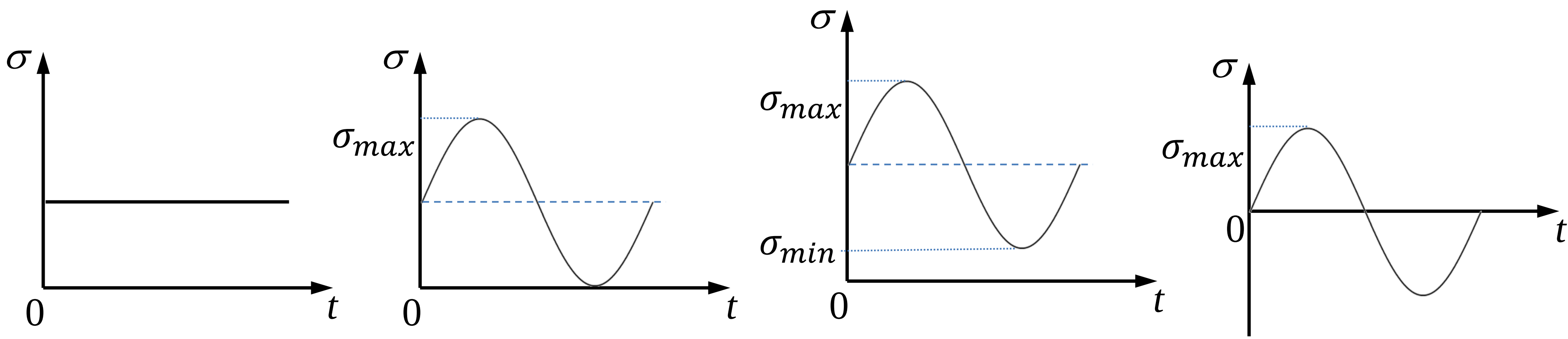
1. 交变应力的最大值 σ_{max}
2. 循环次数，N
3. 交变应力的特征



循环特性：$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

应力幅值：$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

典型的疲劳循环



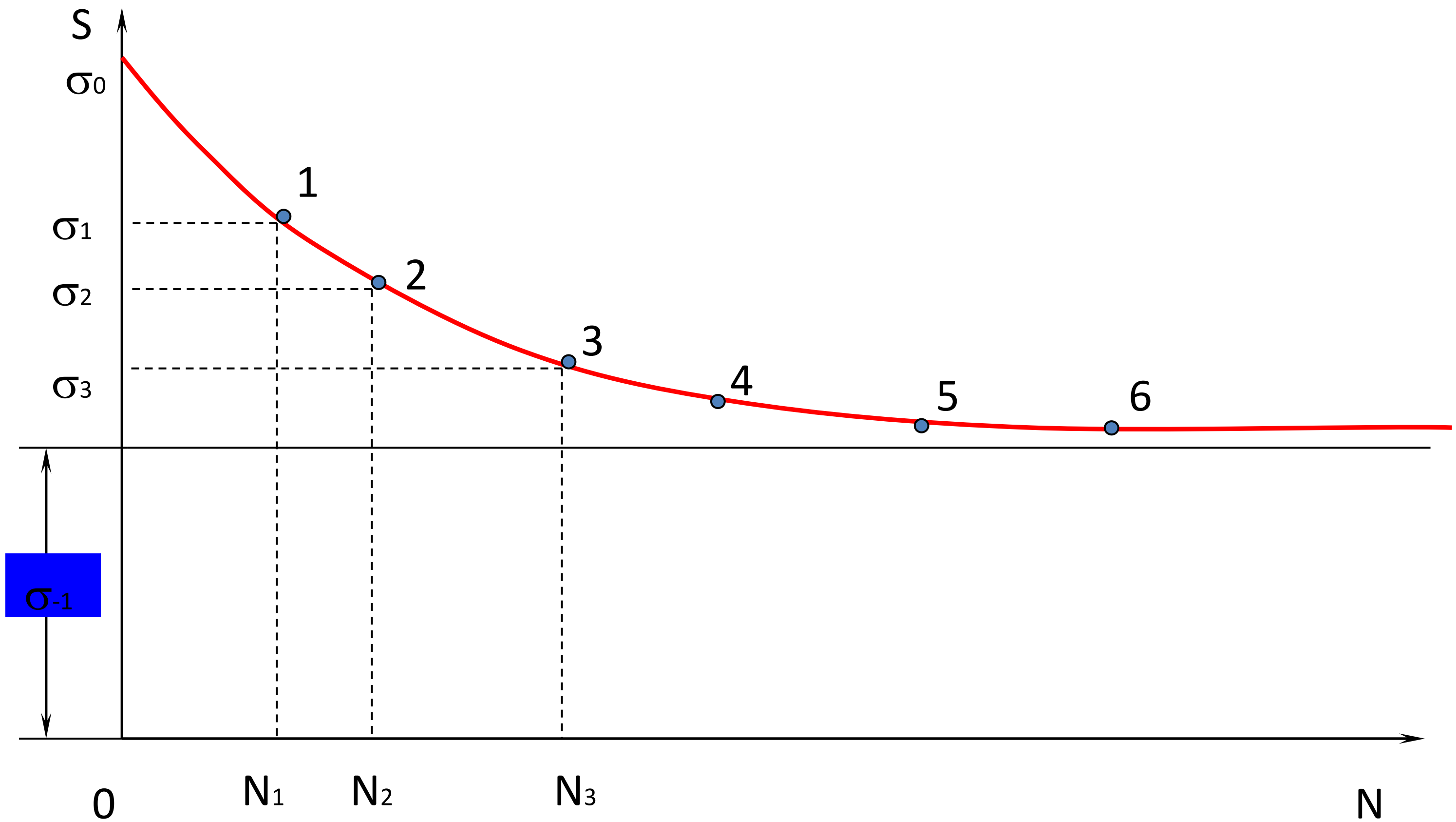
$$r = 1$$
$$\sigma_a = 0$$

$$r = 0$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max}}{2}$$

$$r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

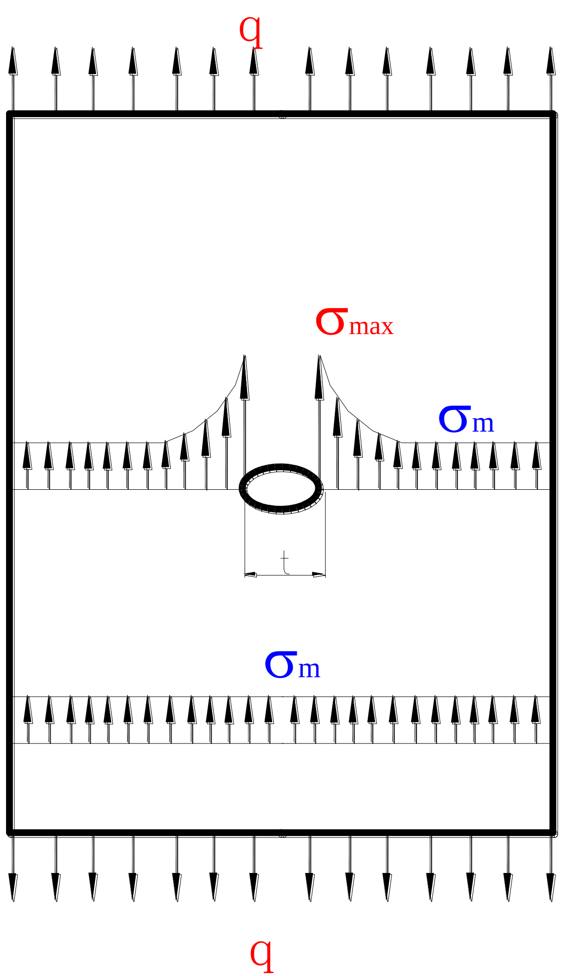
$$r = -1$$
$$\sigma_a = \sigma_{max}$$

材料的疲劳曲线(S-N曲线)



10^7次应力循环所对应的应力值称为疲劳极限（或持久极限）

应力集中的表达



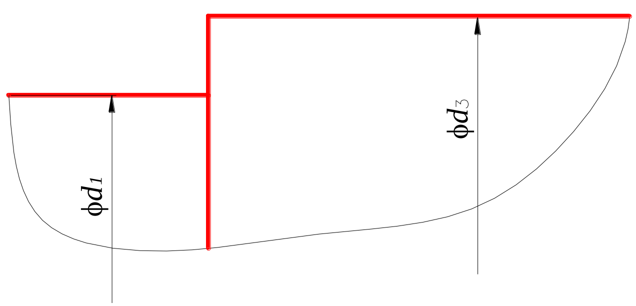
应力集中系数的定义：

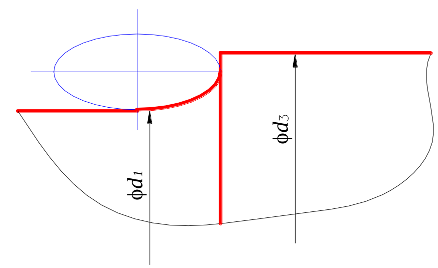
$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$

应力集中系数的表达：

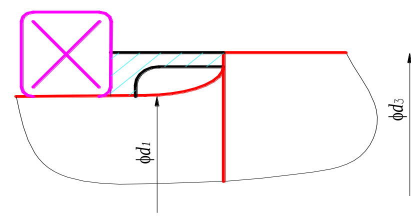
$$k = 1 + 2\frac{a}{b} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

如何降低应力集中

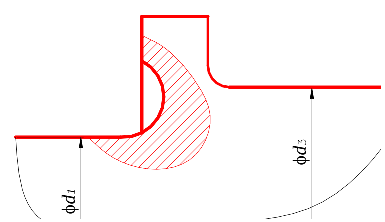




倒圆角



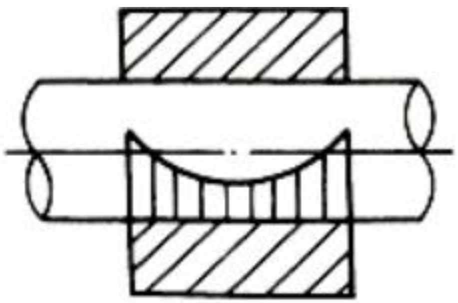
局部加强孔边（间隔环）



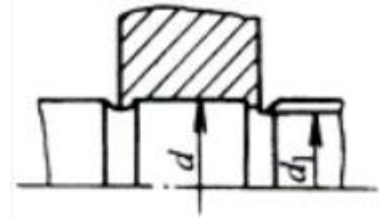
沉割槽

为避免应力集中造成构件破坏，可采取消除尖角、改善构件外形、局部加强孔边以及提高材料表面光洁度等措施

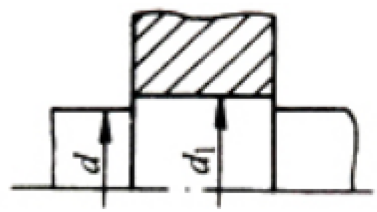
如何降低应力集中



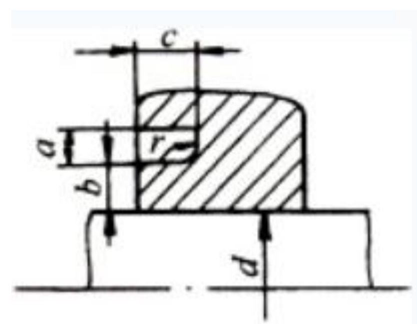
配合端部的应力分布



轴上开减载槽



增大配合处直径



毂端开减载槽

降低应力集中增加疲劳寿命；对材料表面作喷丸、辊压、氧化等处理，以提高材料表面的疲劳强度