

# 第二章 轴向拉伸与压缩 剪切与挤压（三）

## 第 4 讲

# 内容 (contents)

---

§ 2.5 材料拉伸时的力学性能

§ 2.6 材料压缩时的力学性能

§ 2.7 失效、安全因数和强度计算

## § 2.5 材料拉伸时的力学性能

### Mechanical behavior of materials under tension & compression

以低碳钢和铸铁为主要代表，介绍材料拉伸时的力学性能

#### 一、 低碳钢拉伸时的力学性能

低碳钢是指碳含量在0.3%以下的碳素钢。这类钢材在工程使用较广，力学性能也最为典型。



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 228.1—2021  
代替 GB/T 228.1—2010

## 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

Metallic materials—Tensile testing—  
Part 1: Method of test at room temperature

(ISO 6892-1: 2019, MOD)

2021-12-31 发布

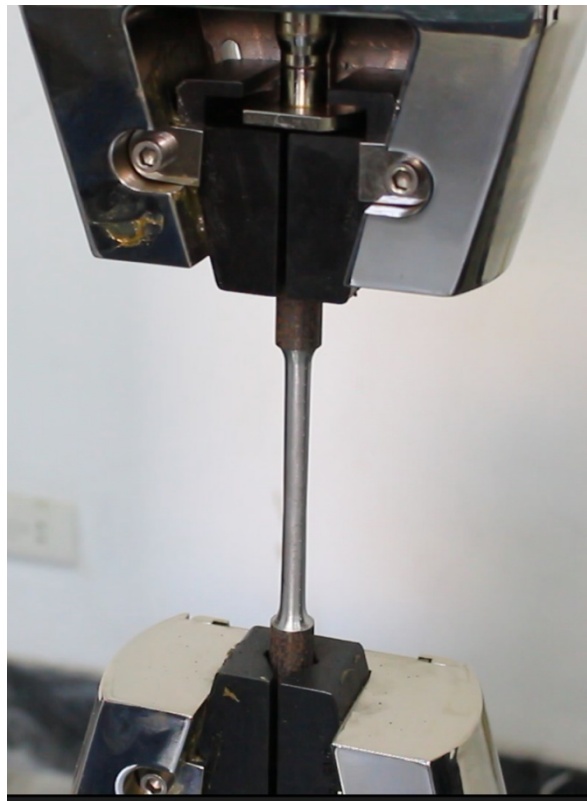
2022-07-01 实施



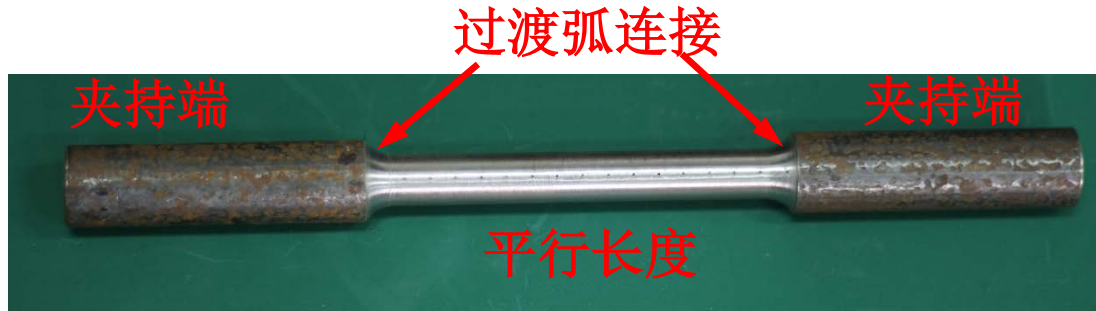
国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

82页

试验条件  
实验要求  
试验方法  
试验参数  
结果处理



圆形截面拉伸试件

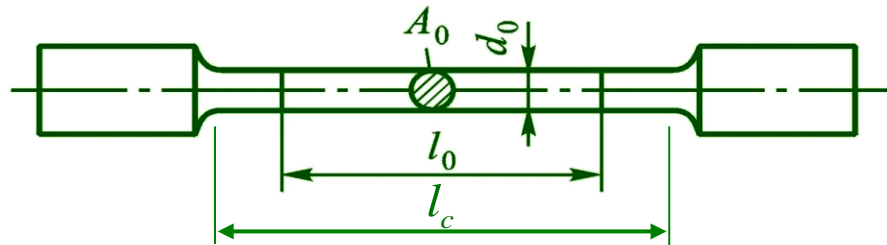


矩形截面拉伸试件

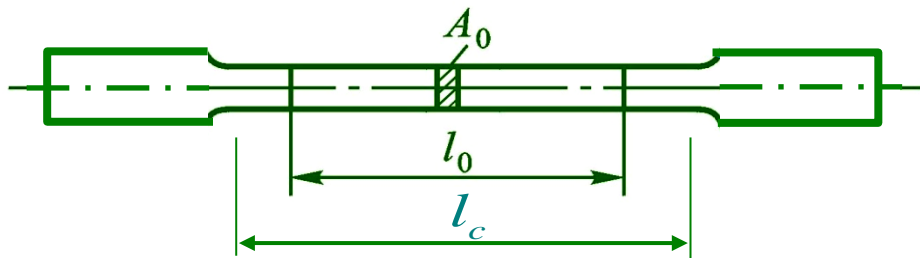


常见的两种试样：

圆形试样



板状试样



其中  $l_c$  称为平行长度， $l_0$  称为工作段长度或称**标距**（gauge length）； $d_0$  为圆截面试样标距内的初始直径； $A_0$  为试样标距内的初始横截面面积。

## $l_0$ 的取值

对于比例试样，原始标距有两种选择：

$$l_0 = 5.65\sqrt{A_0} \text{ 和 } l_0 = 11.3\sqrt{A_0}$$

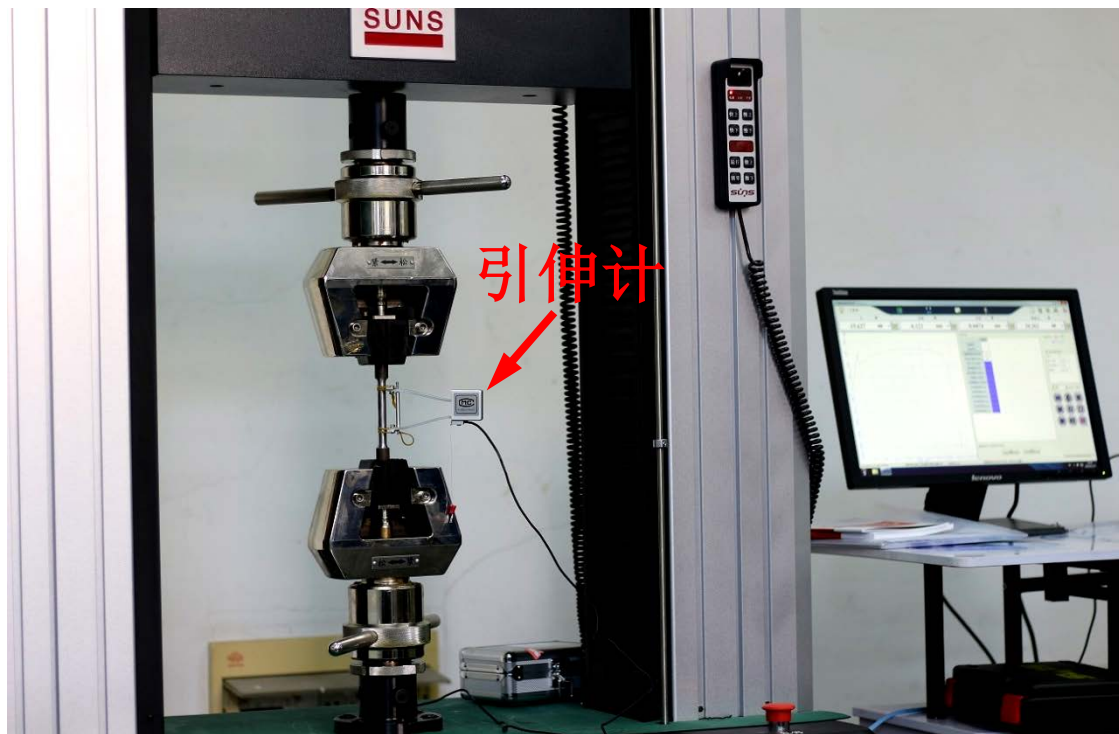
实心圆截面试样：

$$5.65\sqrt{A_0} \longrightarrow 5\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 5d_0$$

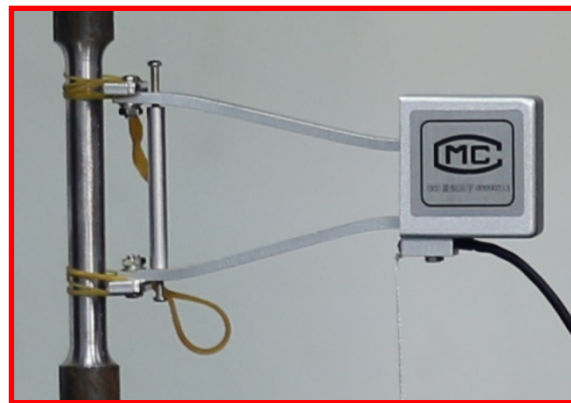
$$11.3\sqrt{A_0} \longrightarrow 11.3\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 10d_0$$

# 低碳钢拉伸试验

浙江大学力学国家级实验教学示范中心 <http://www.merc.zju.edu.cn/>



电子式万能试验机



引伸计

标距 ( $l_e$ ) 各不相同，  
通常是50mm

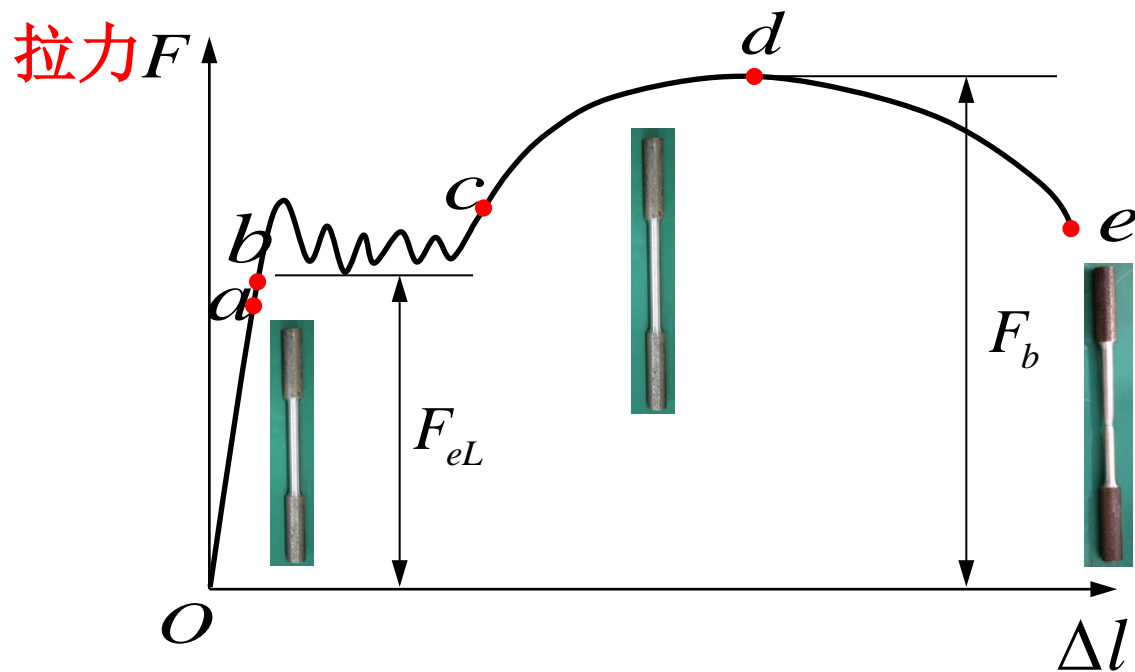


颈缩现象：

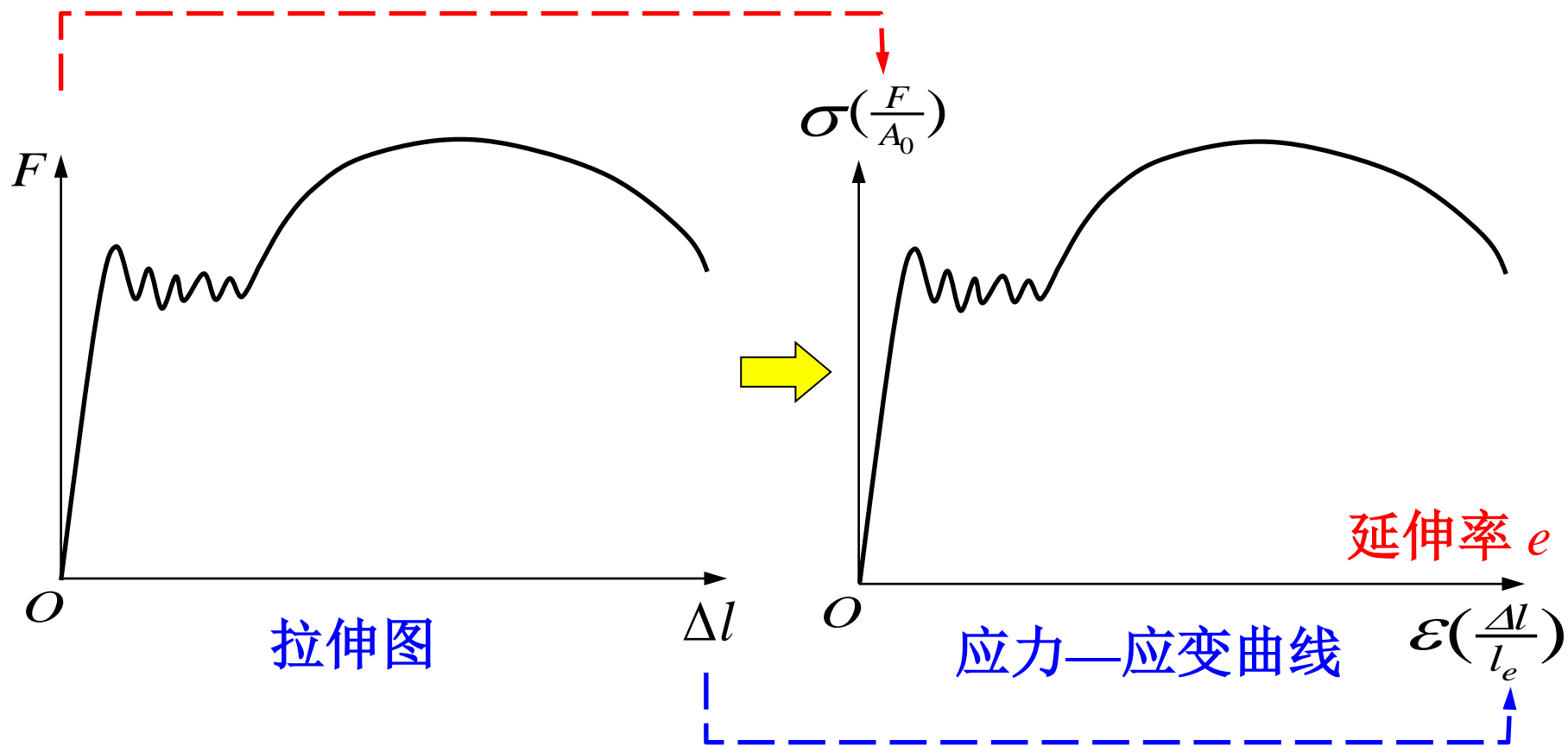
## 低碳钢拉伸实验 缩颈现象

[点击播放视频](#)

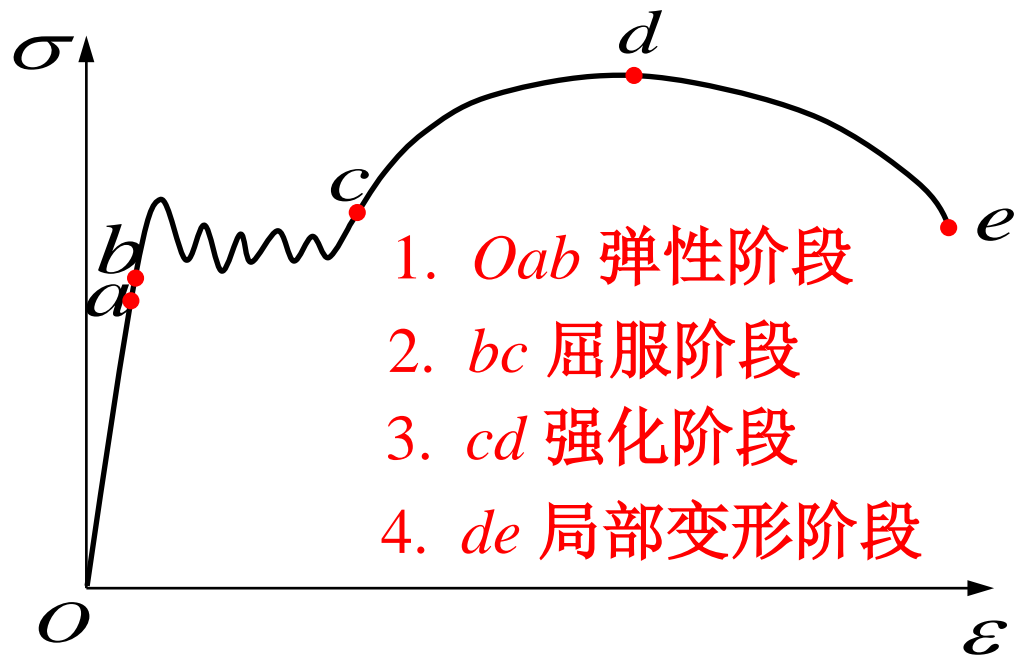
# 低碳钢拉伸的拉力—伸长曲线（拉伸图）



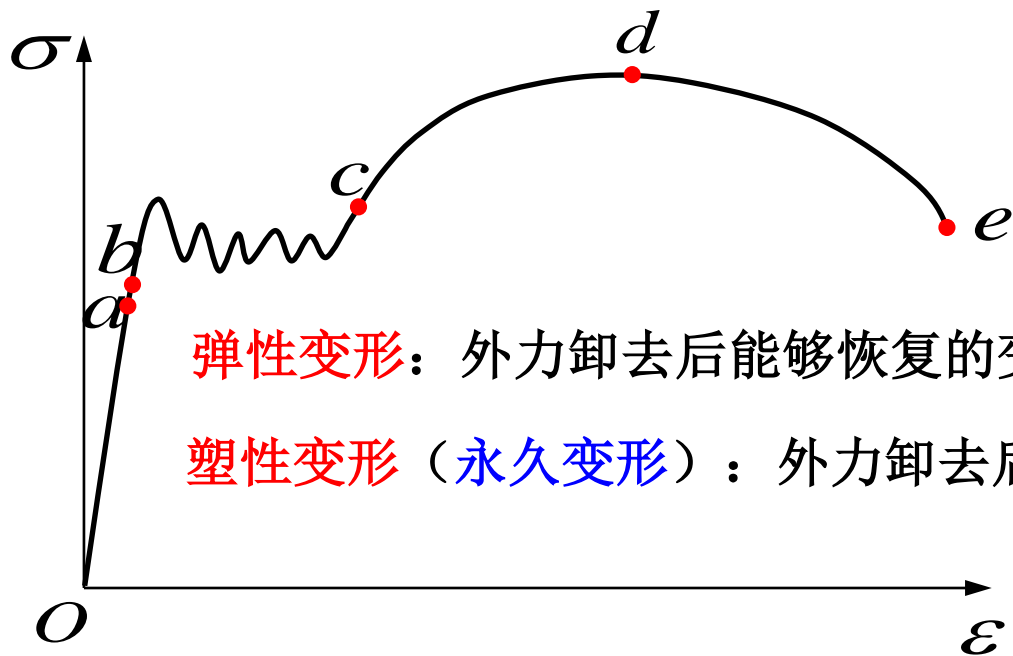
引伸计标距长度内的伸长（称为延伸）



# 应力—应变曲线（四个阶段）



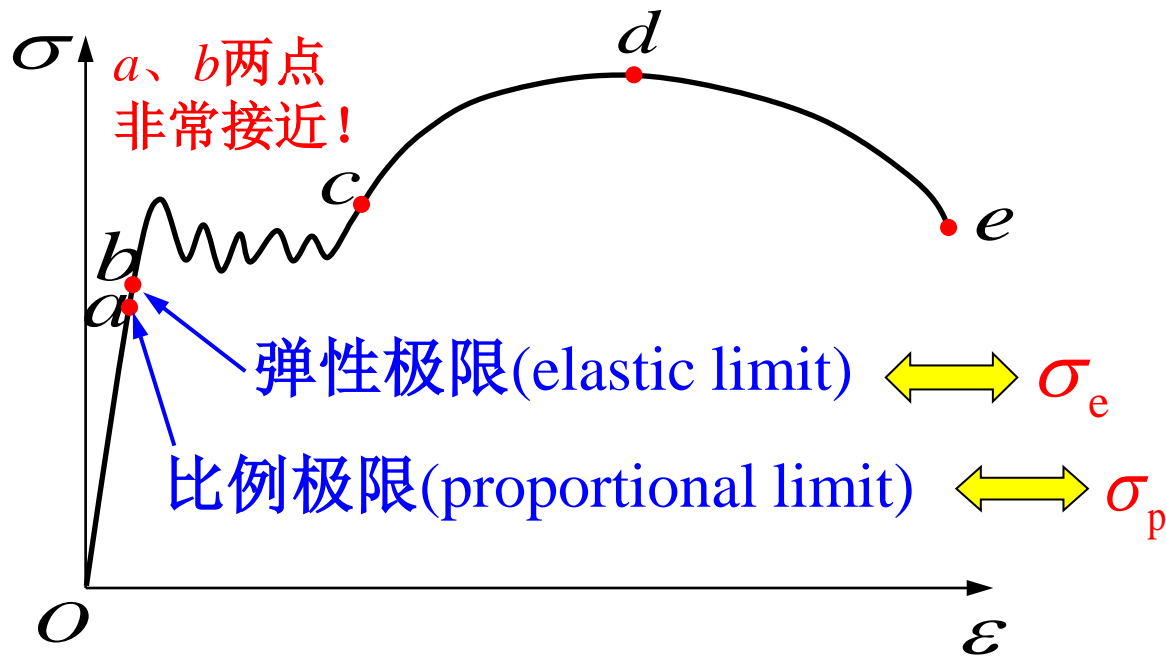
# 1. 弹性阶段 $Oab$



弹性变形：外力卸去后能够恢复的变形

塑性变形（永久变形）：外力卸去后不能恢复的变形

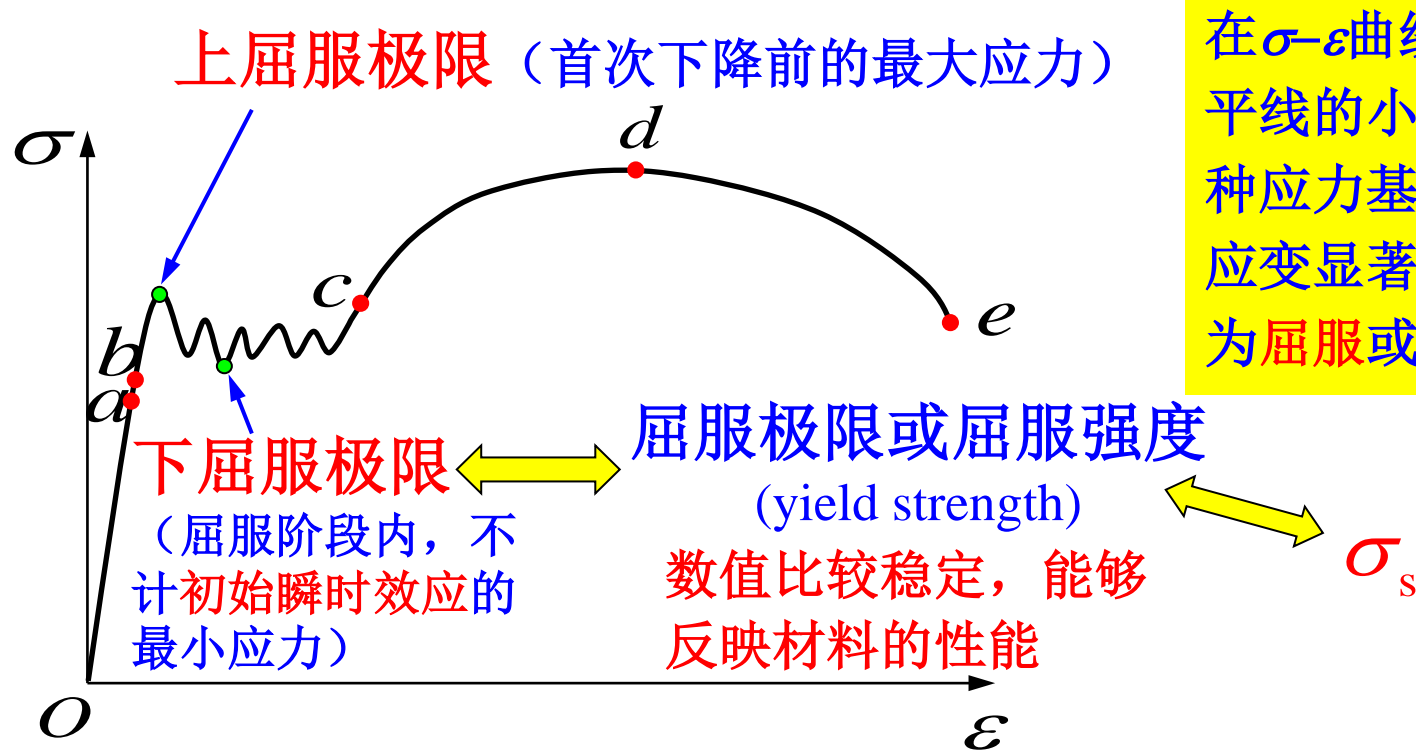
这一阶段可分为：斜直线 $Oa$ 和微弯曲线 $ab$



只有应力低于比例极限时，应力与应变才成正比，即材料服从胡克定律，称材料是线弹性的

$Oa$ 段直线的斜率即为弹性模量!

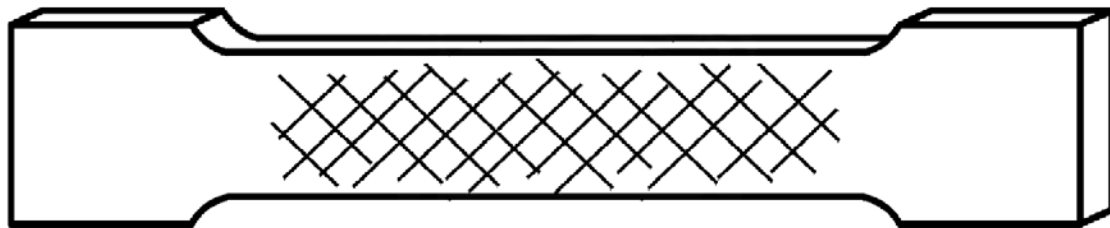
## 2. 屈服阶段 $bc$



在 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线上出现接近水平线的小锯齿形线段。这种应力基本保持不变, 而应变显著增加的现象, 称为屈服或流动。

## 现象观察：

表面磨光的试件，屈服阶段可在试件表面看见与轴线大致成 $45^\circ$ 倾角的条纹。这是由于材料内部晶格之间相对滑移而形成的，称为滑移线。



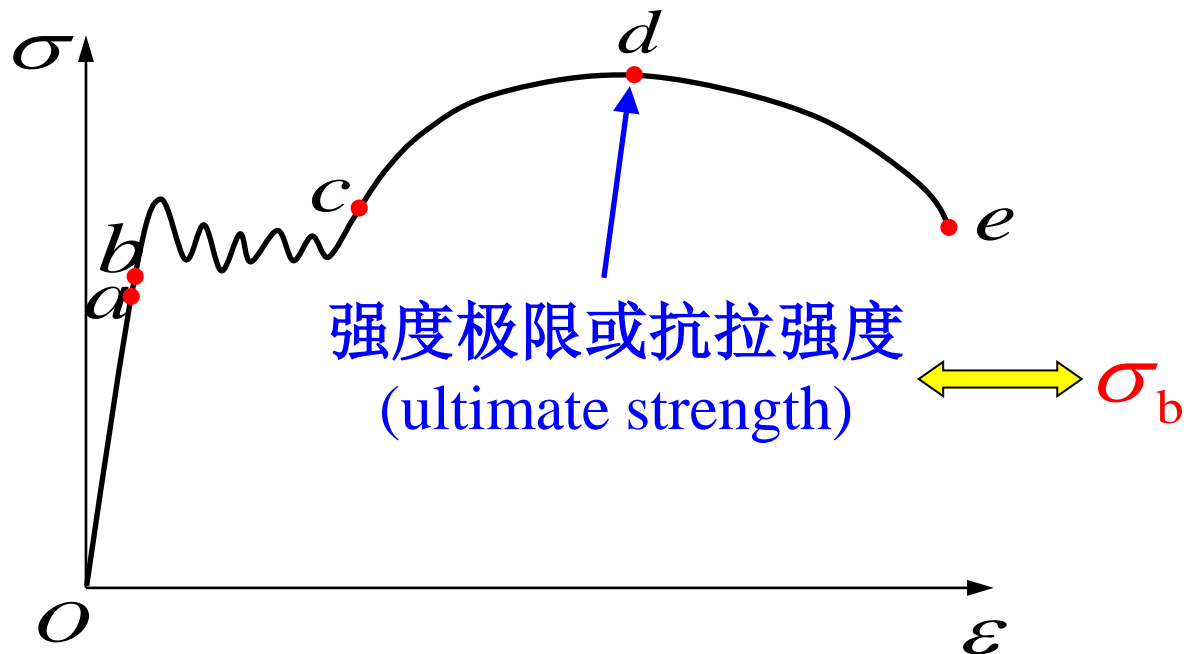
在 $45^\circ$ 的斜截面上切应力最大。

可见，屈服现象的出现与最大切应力有关。

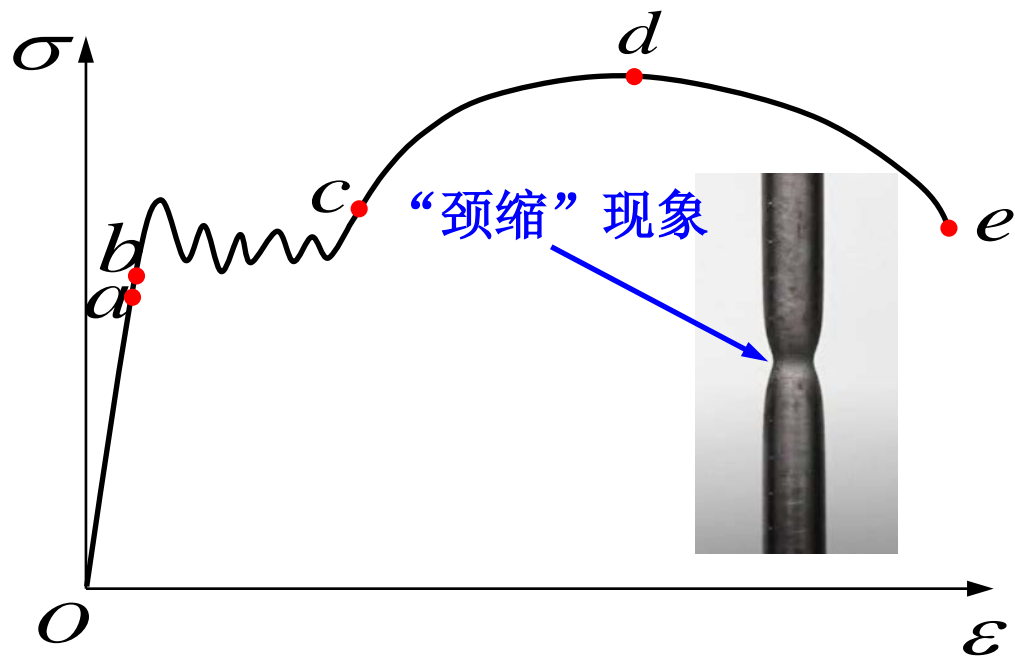


### 3. 强化阶段 $cd$

强化阶段的变形绝大部分是塑性变形



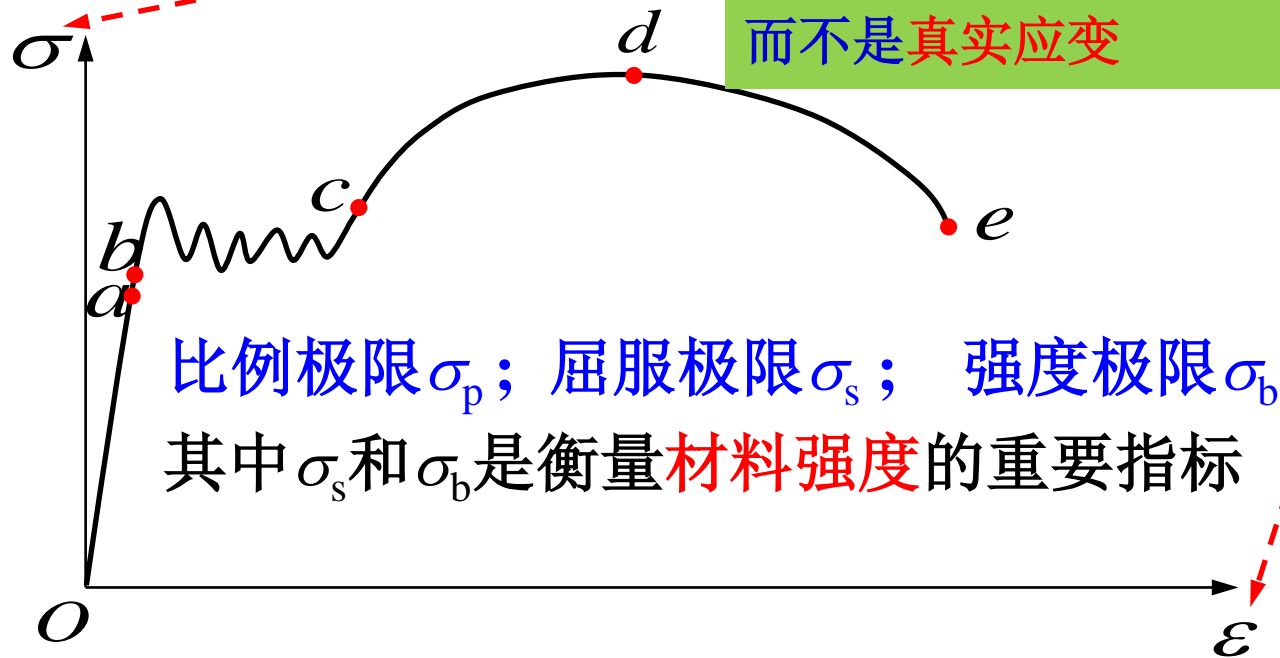
## 4. 局部变形阶段 $de$



断口形貌

注意：这里的应力是名义应力（工程应力），  
而不是真实应力

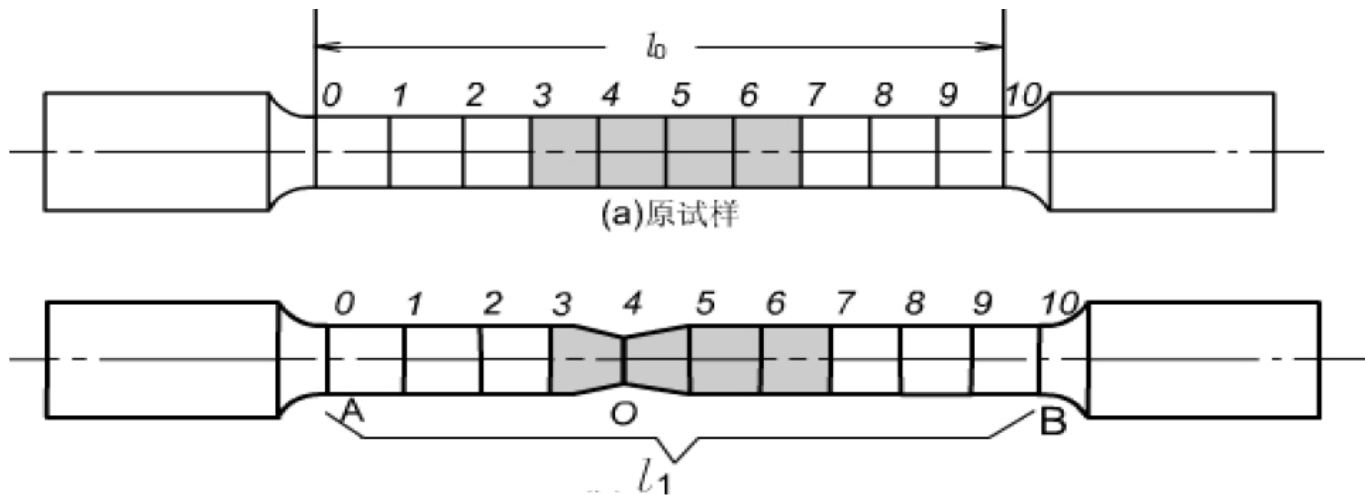
这里的应变是名义应变（工程应变），  
而不是真实应变



断后伸长率:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

(结果以百分数表示)

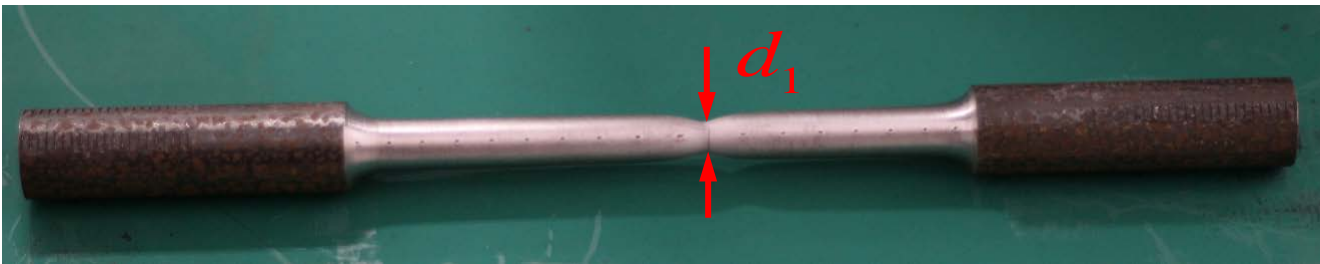
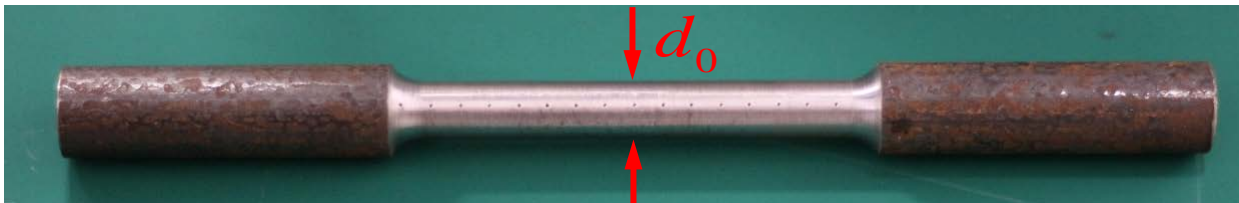


问：断后伸长率的测试值与标距 $l_0$ 的取值有关吗？

截面收缩率：

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

（结果以百分数表示）



对Q235钢:

(碳素结构钢的牌号)

$$\sigma_s = 215 \sim 235 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = 370 \sim 500 \text{ MPa}$$

$$\delta = 25\% \sim 27\%; \quad \psi = 60\%$$

$\delta$  和  $\psi$  是衡量材料塑性的两个重要指标

$\delta$  和  $\psi$  数值较高的材料, 通常称为塑性材料。

通常称  $\delta < 5\%$  的材料为脆性材料。

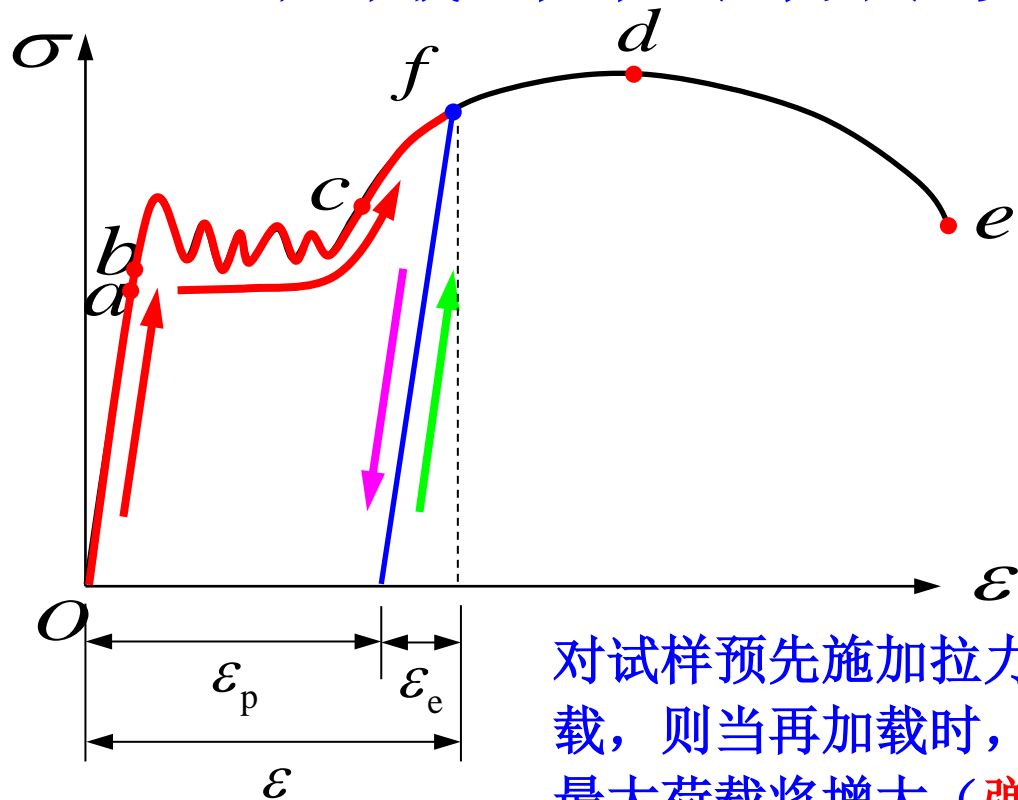
注意

## 力学性能名词的符号说明

GB/T 228.1-2021 抗拉强度的符号  $R_m$

教材中仍沿用原来标准的符号  $\sigma_b$

**卸载定律：**在卸载过程中，应力和应变按线性规律变化！



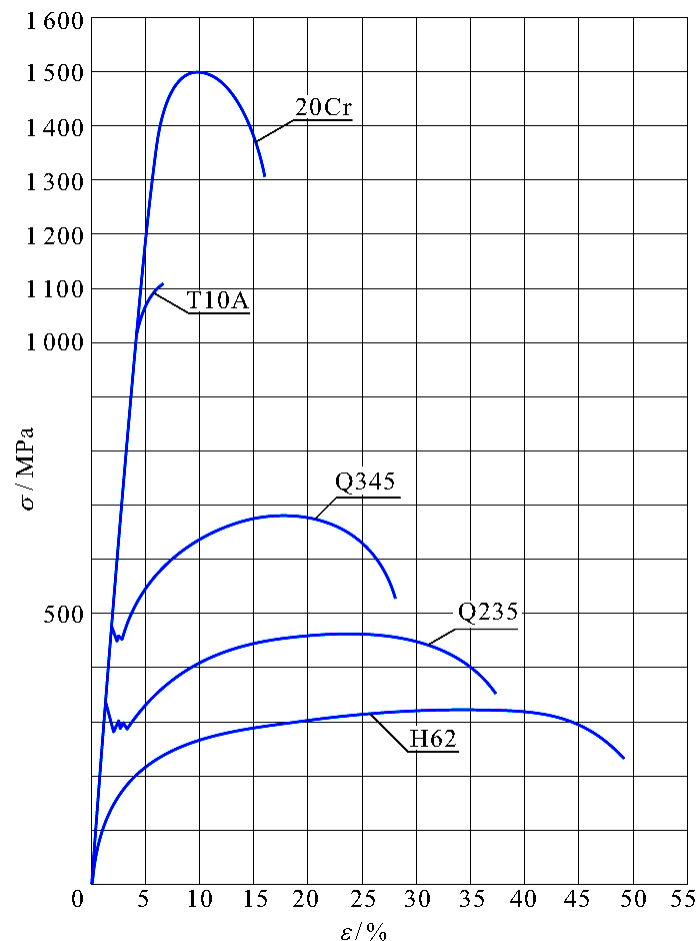
对试样预先施加拉力，使之达到强化阶段，然后卸载，则当再加载时，试样在线弹性范围内所承受的最大荷载将增大（**弹性极限提高**），但**塑性变形**和**断后伸长率**却有所降低，这一现象称为**冷作硬化**。

## 二、其它塑性材料拉伸时的力学性能

Q235钢和Q345钢， $\sigma-\varepsilon$ 曲线也有明显的四个阶段。

黄铜H62的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线没有屈服阶段，其他三个阶段很明显。

高碳钢T10A 的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线只有弹性阶段和强化阶段，没有屈服阶段和局部变形阶段。



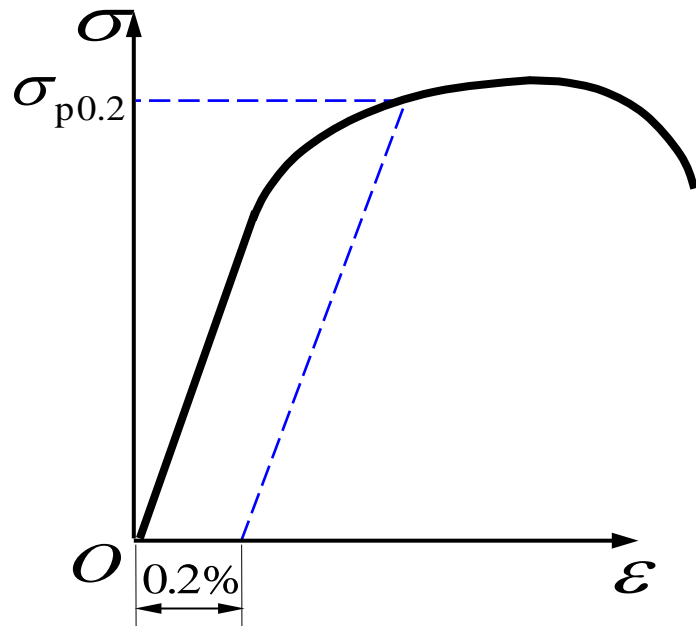
几种塑性材料的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线



高碳钢T10A、黄铜H62、铝合金、锰钢等，在拉伸过程中没有明显屈服阶段。

将对应于0.2%的塑性延伸率（塑性应变）的应力定义为规定塑性延伸强度，用 $\sigma_{p0.2}$ 来表示。

$$\begin{aligned}\varepsilon_p &= 0.2\% \\ &= \frac{0.2}{100} = 2 \times 10^{-3} = 2000 \times 10^{-6} \quad \text{即2000微应变}\end{aligned}$$



### 三、铸铁拉伸时的力学性能

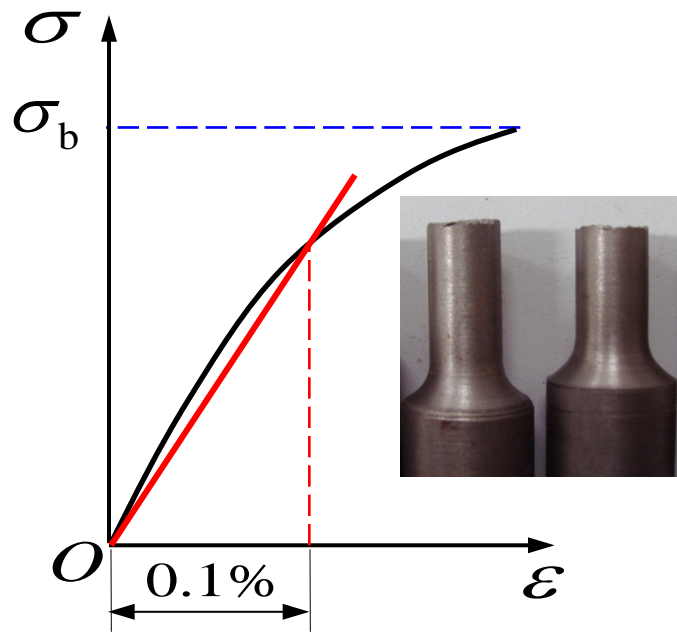
#### $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线的特征

1. 没有屈服现象和颈缩现象
2. 没有明显的直线部分
3. 只能测出其抗拉强度
4. 拉断前的应变很小，断后伸长率也很小

在工程中，铸铁构件的拉应力不能很高，在较低的拉应力下，可近似地认为服从**胡克定律**。

#### 割线弹性模量

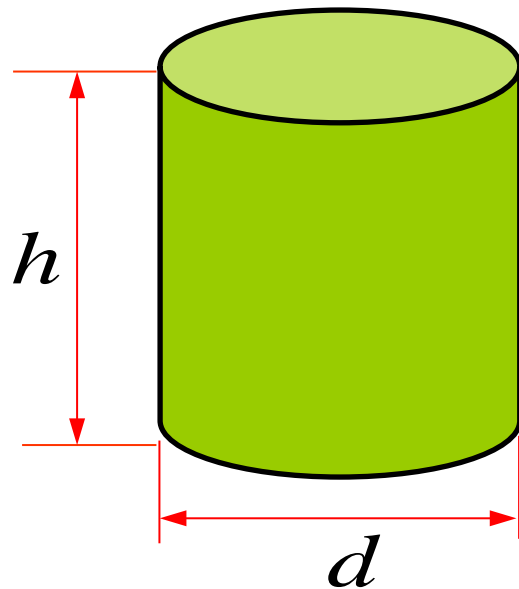
通常取 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线的割线代替曲线的开始部分，并以割线的斜率作为弹性模量，称为割线弹性模量。



## § 2.6 材料压缩时的力学性能

一般金属材料的压缩试件  
都做成圆柱形状

通常采用  $h/d = 1.5 \sim 3.5$



ICS 77.040.10  
H 22

**GB**

**中华人民共和国国家标准**

GB/T 7314—2017  
代替 GB/T 7314—2005

---

**金属材料 室温压缩试验方法**

Metallic materials—Compression test method at room temperature

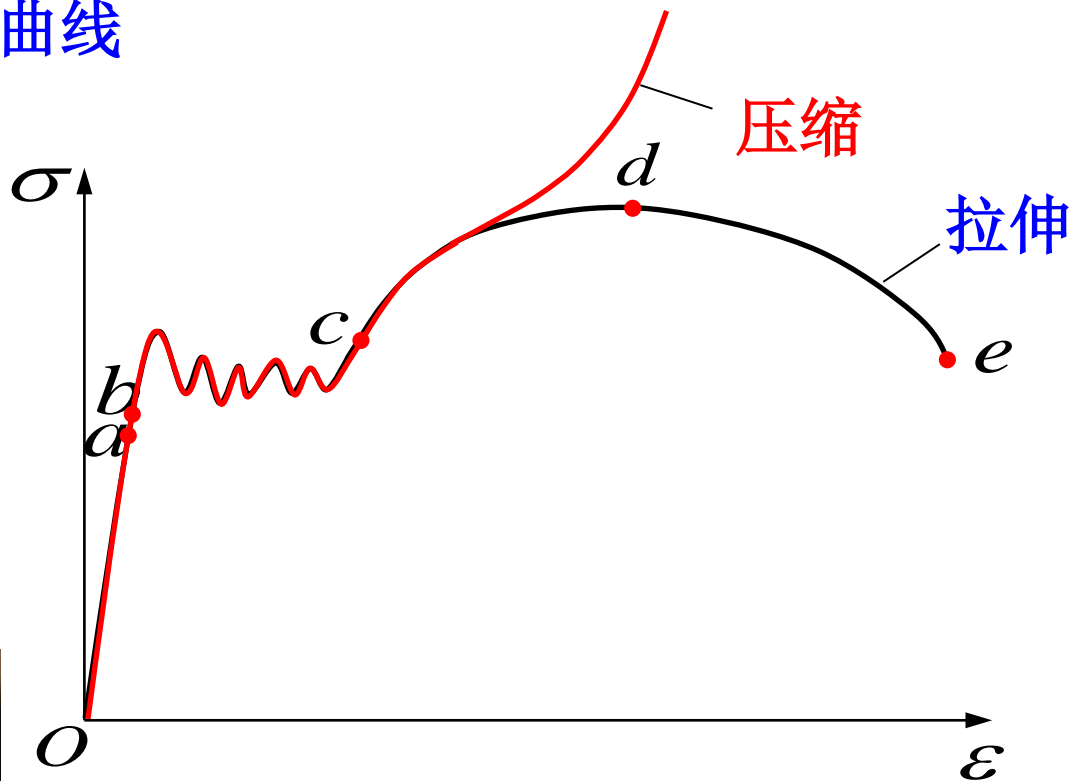
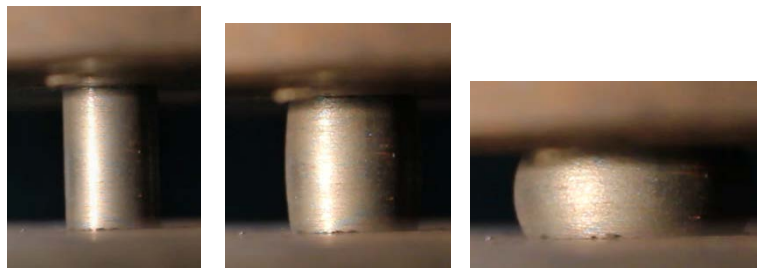
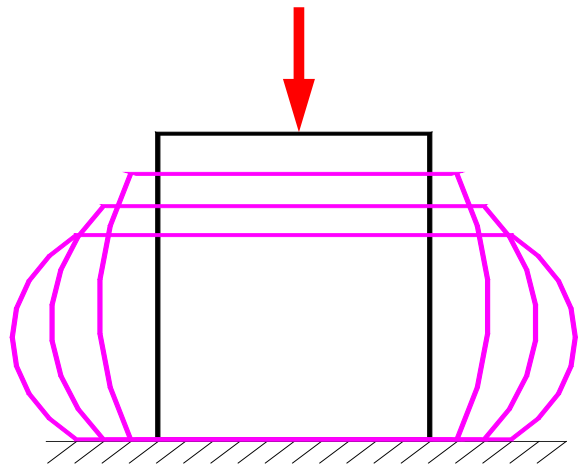
---

2017-02-28 发布 2017-11-01 实施

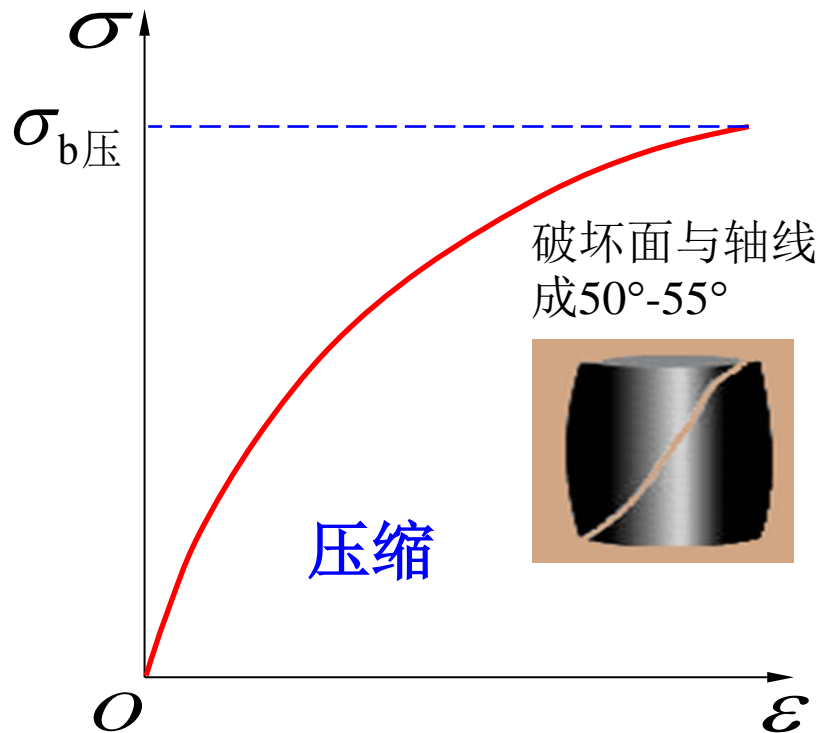
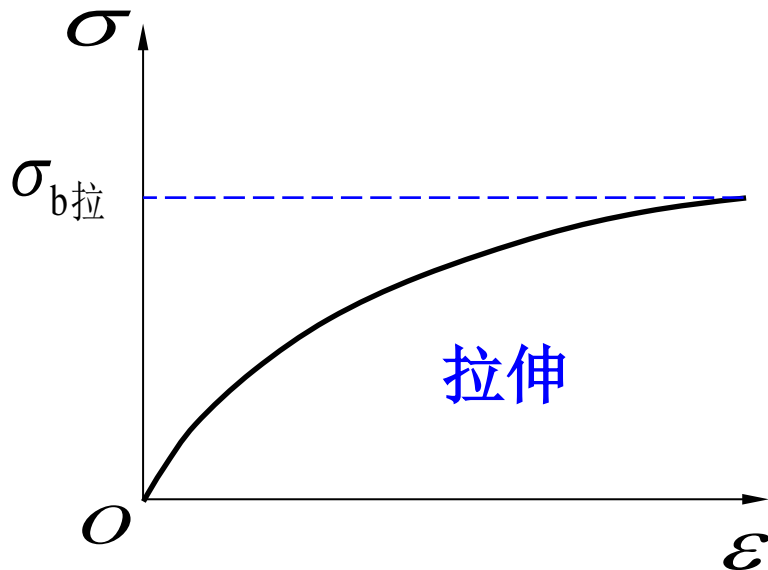
---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

# 一、低碳钢压缩时的 $\sigma$ - $\epsilon$ 曲线



## 二、铸铁压缩时的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线



铸铁的抗压强度比它的抗拉强度高4~5倍！

# 表1 几种常用材料的主要力学性能

材料名称	牌 号	$\sigma_s$ 或 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%
普通碳素钢	Q235	215~235	370~500	25~27
	Q275	255~275	410~540	19~21
优质碳素结构钢	40	335	570	19
	45	355	600	16
普通低合金结构钢	Q345	275~345	470~630	19~21
	Q390	330~390	490~650	17~19
合金结构钢	20Cr	540	835	10
	40Cr	785	980	9
碳素铸钢	ZG270-500	270	500	18
可锻铸铁	KTZ450-06	270	450	6( $\delta_3$ )
球墨铸铁	QT450-10	310	450	10
灰铸铁	HT150		150~250	

注：表中  $\delta_5$  是指  $l_0 = 5d_0$  的比例试样的断后伸长率；

$\delta_3$  是指  $l_0 = 3d_0$  的非比例试样的断后伸长率。

## § 2.7 失效、安全因数和强度计算

由脆性材料制成的构件，在拉力作用下，当变形很小时就会突然**断裂**。塑性材料制成的构件，在拉断之前已出现**塑性变形**，由于不能保持原有的形状和尺寸，已不能正常工作。把断裂和出现塑性变形统称为**失效**。

**构件失效并不都是强度问题**。例如，若机床主轴变形过大，即使未出现塑性变形，但因不能保证加工精度，这也是失效，是由于**刚度不足**造成的。受压的细长杆被压弯，则是**稳定性不足**引起的失效。

强度计算中，用极限应力除以大于1 的因数，并将所得结果称为**许用应力**，用  $[\sigma]$ 表示。

$$\text{对于塑性材料 } [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s}; \quad \text{对于脆性材料 } [\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b}$$

大于1 的因数 $n_s$ 或 $n_b$ 称为**安全因数**。

确定安全因数应考虑的因素， 一般有以下几点：

1. 材料的性质，包括材料的均匀程度，质地好坏，是塑性的还是脆性的等。
2. 载荷情况，包括对载荷的估计是否准确，是静载荷还是动载荷等。
3. 实际构件简化过程和计算方法的精确程度。



4. 零件在设备中的重要性，工作条件，损坏后造成后果的严重程度，制造和修配的难易程度等。
5. 对减轻设备自重和提高设备机动性的要求。
6. 给构件以必要的安全储备。

### 安全因数的取值：

选用大的安全因数，会增加材料，造成浪费，不经济。

选用小的安全因数，不利于安全。

应合理地权衡安全与经济两方面的要求。

安全因数的数值在一些规范中可以查到：

通常在静荷载下： $n_s$ 一般取1.2~2.5； $n_b$ 一般取2.0~3.5，有时可大到3~9。



2008年1月，50年来最严重冻雨  
湖南受灾严重，输电塔倒塌

电线除冰技术

杆件轴向拉伸或压缩时的强度条件：

把许用应力  $[\sigma]$  作为构件工作应力的最高限度，即要求工作应力  $\sigma$  不超过许用应力  $[\sigma]$ 。于是得构件轴向拉伸或压缩时的强度条件为

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

根据以上强度条件，便可进行强度校核、截面设计和确定许可载荷等强度计算。

根据强度条件，可以进行三种类型的强度计算：

## 一、校核杆的强度

已知 $F_{N,\max}$ 、 $A$ 、 $[\sigma]$ ，校核构件是否满足强度条件。
$$\frac{F_{N,\max}}{A} \leq [\sigma]$$

## 二、设计截面

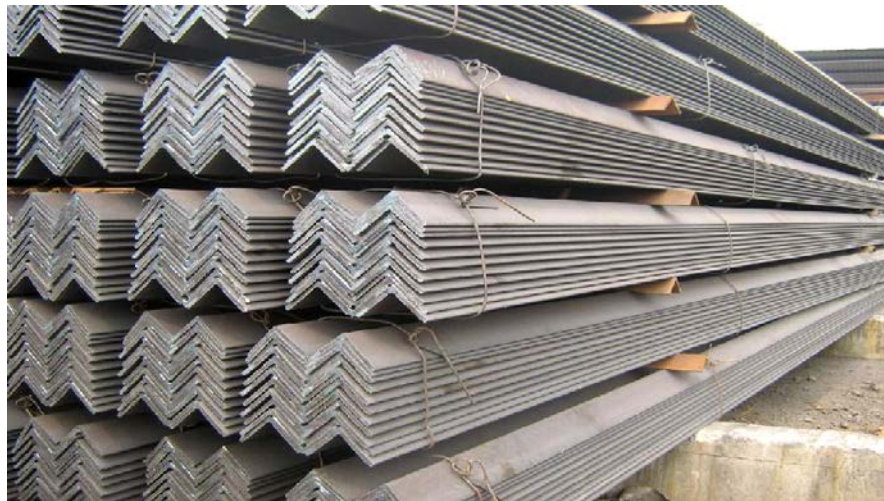
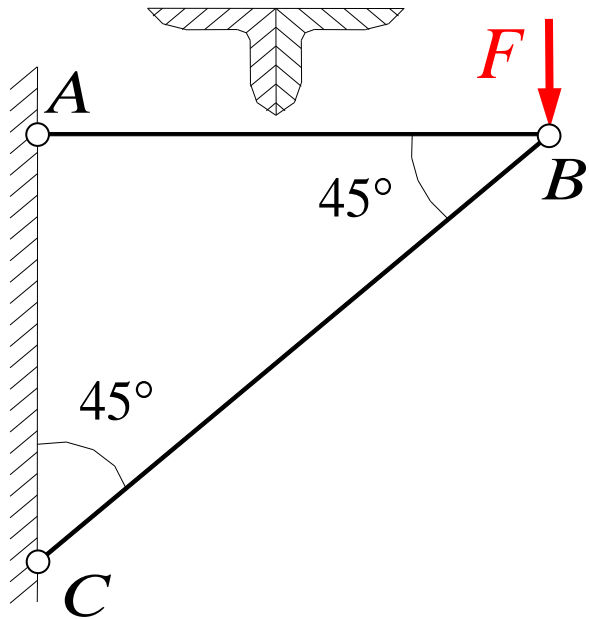
已知 $F_{N,\max}$ 、 $[\sigma]$ ，根据强度条件，求 $A$ 。
$$A \geq \frac{F_{N,\max}}{[\sigma]}$$

注：当选用型钢等标准截面时，可能为满足强度条件而将采用过大的截面。为经济起见，可考虑采用小一号的截面，但由此而引起的最大工作应力超过许用应力的百分数，在设计规范上有具体规定，一般限制在5%以内。

## 三、确定许可载荷

已知 $A$ 、 $[\sigma]$ ，根据强度条件，求 $F_{N,\max}$ 。
$$F_{N,\max} \leq [\sigma]A$$

**例1** 图示三角形托架，其杆 $AB$ 是由两根等边角钢组成。已知  $F=75\text{kN}$ ,  $[\sigma]=160\text{MPa}$ , 试选择等边角钢的型号。



$$F=75\text{kN}, [\sigma]=160\text{MPa}$$

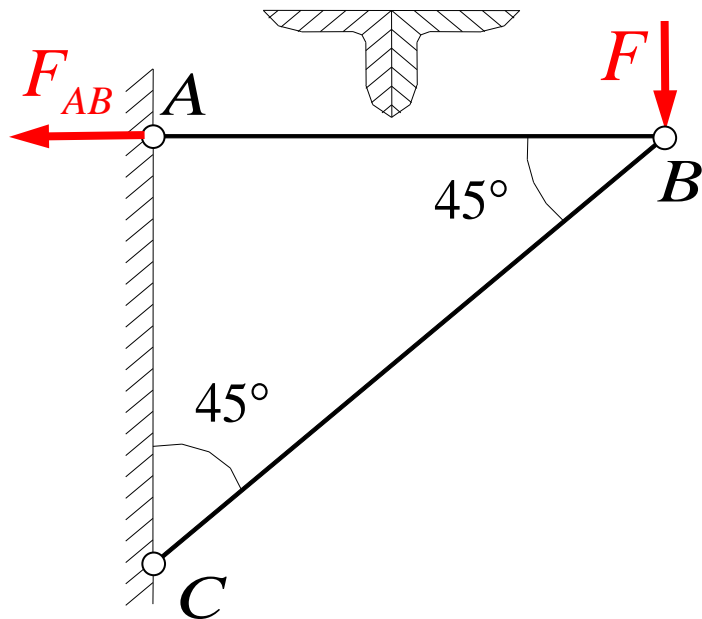
解：由  $\Sigma M_C = 0$ ,  $F_{AB} \times AC = F \times AB$

$$\text{得： } F_{AB} = F = 75\text{kN}$$

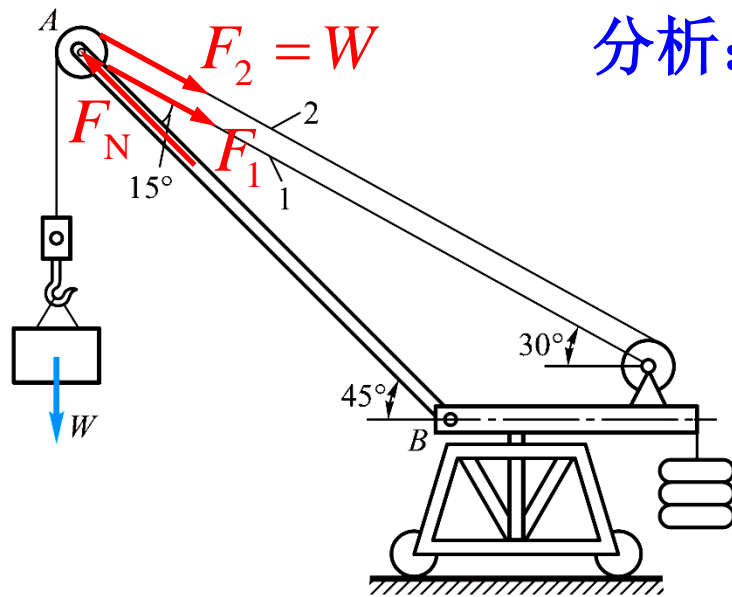
$$\begin{aligned} A &\geq \frac{F_{AB}}{[\sigma]} = \frac{75 \times 10^3}{160 \times 10^6} \\ &= 4.687 \times 10^{-4} \text{m}^2 \\ &= 4.687 \text{cm}^2 \end{aligned}$$

单根横截面面积： $\frac{A}{2} \geq 2.344 \text{cm}^2$

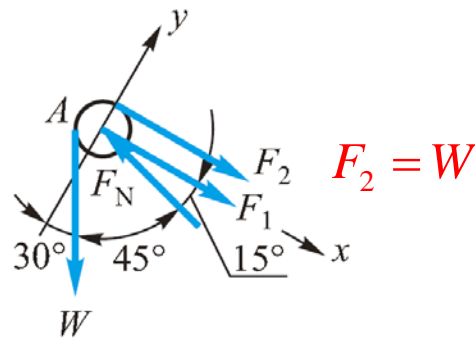
查表 p. 374 选边宽度为40mm、边厚度为3mm的4号等边角钢  
( $A=2.359 \text{cm}^2$ )，简记为  $\angle 40 \times 3$



**例2** 某工地自制悬臂起重机如图所示。撑杆 $AB$ 为空心钢管，外径为105mm，内径为95mm。钢索1和2互相平行，且设钢索可作为相当于直径 $d=25\text{mm}$ 的圆杆计算。材料的许用应力同为 $[\sigma]=60\text{MPa}$ ，滑轮摩擦力不计。试确定起重机的许可吊重。



分析:



解：列出平衡方程

$$\text{由 } \Sigma F_x = 0, \quad F_1 + F_2 + W \sin 30^\circ - F_N \cos 15^\circ = 0$$

$$\text{由 } \Sigma F_y = 0, \quad W \cos 30^\circ - F_N \sin 15^\circ = 0$$

不计滑轮摩擦力：  $F_2 = W$

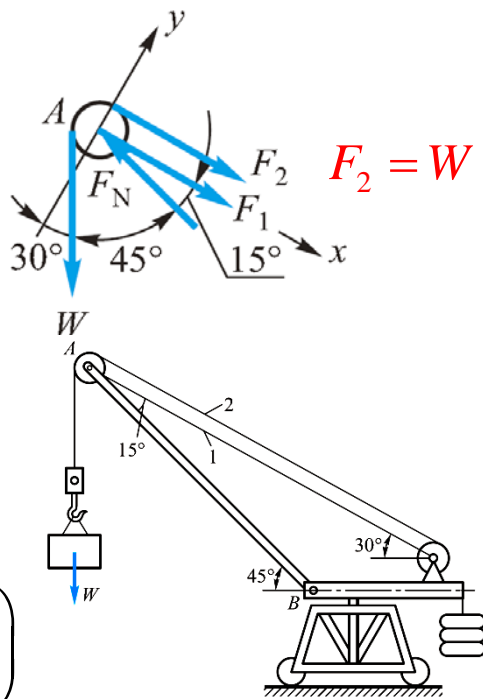
$$F_N = W \frac{\cos 30^\circ}{\sin 15^\circ} = \frac{\sqrt{6} + 3\sqrt{2}}{2} W = 3.346W$$

$$F_1 = F_N \cos 15^\circ - W \sin 30^\circ - W = W \left( \frac{\cos 30^\circ}{\sin 15^\circ} \cos 15^\circ - \frac{3}{2} \right)$$

(1) 由撑杆AB的强度条件  $= \sqrt{3}W = 1.732W$

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \leq [\sigma] \Rightarrow F_N \leq [\sigma] A = 60 \times 10^6 \times \frac{\pi}{4} (105^2 - 95^2) \times 10^{-6}$$

$$= 94248 \text{ N} = 94.248 \text{ kN}$$



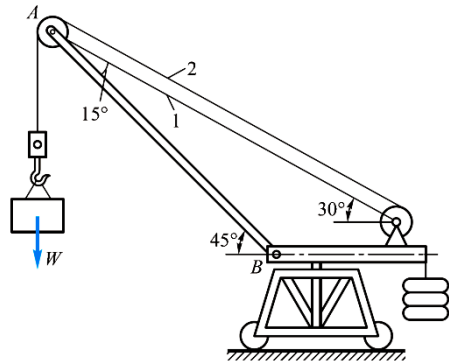
(1) 由撑杆AB的强度条件  $F_N \leq 94.248 \text{ kN}$

$$F_N = 3.346W \Rightarrow W = \frac{F_N}{3.346} \leq \frac{94.248}{3.346} = 28.17 \text{ kN}$$

(2) 由钢索1的强度条件

$$\sigma = \frac{F_1}{A_1} \leq [\sigma] \Rightarrow F_1 \leq [\sigma]A_1 = 60 \times 10^6 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \times 10^{-6} \\ = 29452 \text{ N} = 29.452 \text{ kN}$$

$$F_1 = 1.732W \Rightarrow W = \frac{F_1}{1.732} \leq \frac{29.452}{1.732} = 17.0 \text{ kN}$$



综合 (1) 和 (2) 知, 起重机的许可吊重应为17.0 kN。



谢谢各位！

作业 P62-63: 2-12、2-14、2-15

下次课讲 杆件的变形、应变能