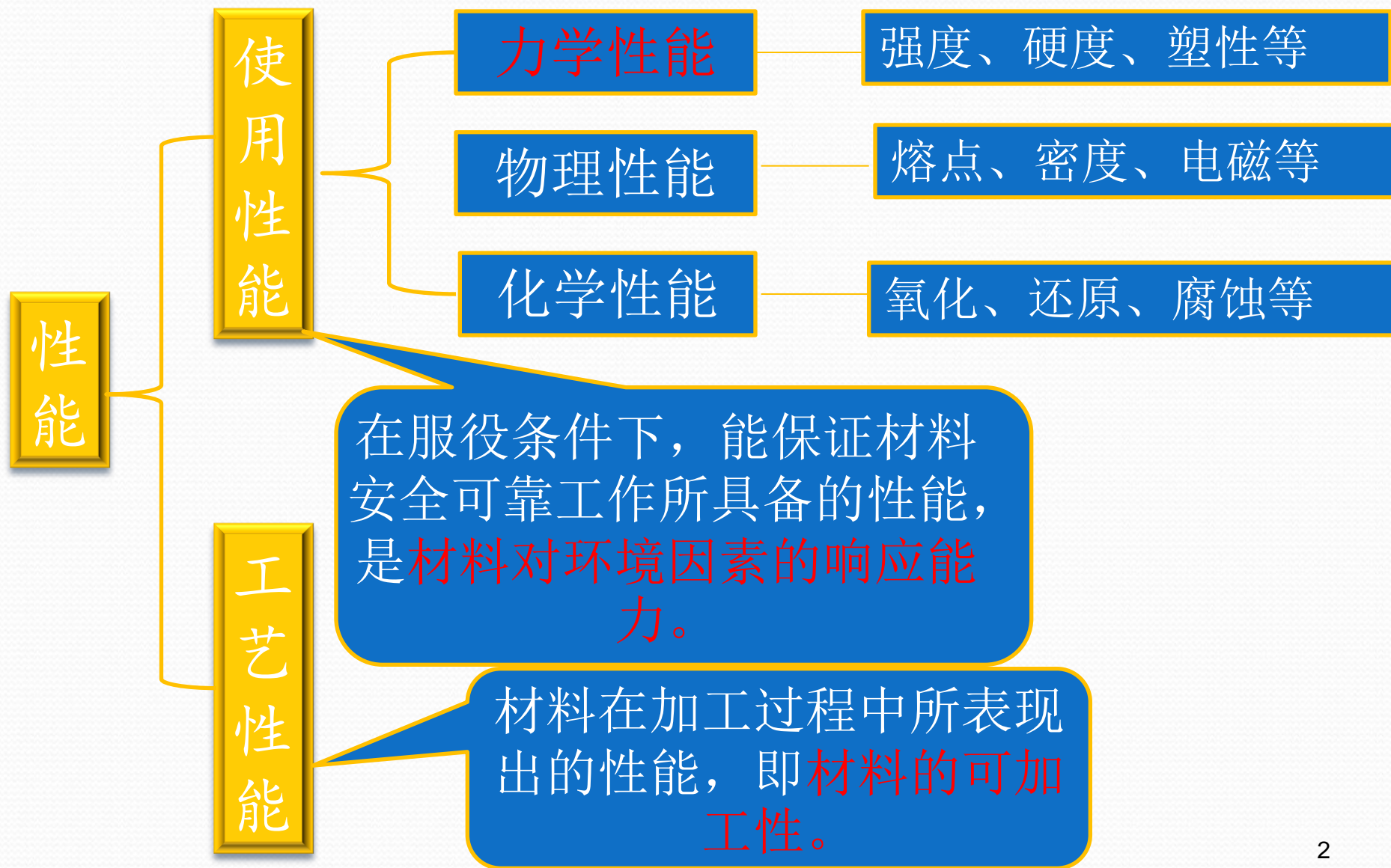
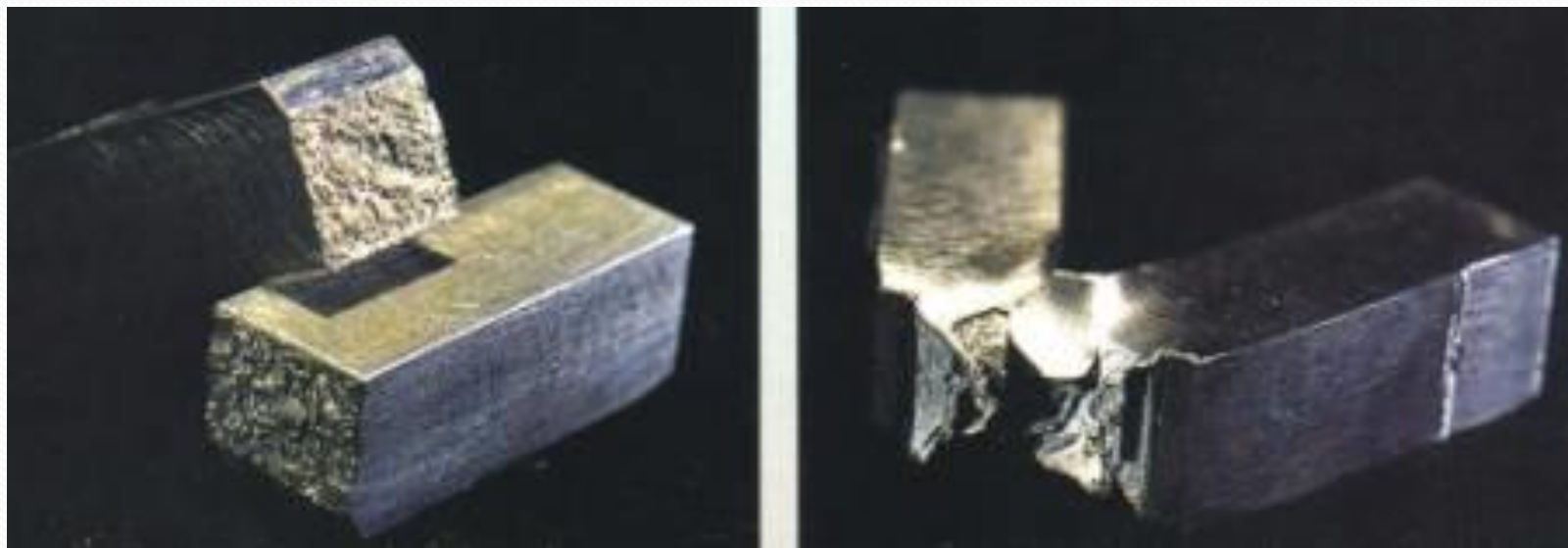


# 第一章 金属材料的力学性能

- ◆ 第一节 强度、刚度、弹性及塑性
- ◆ 第二节 硬度
- ◆ 第三节 冲击韧性
- ◆ 第四节 断裂韧性
- ◆ 第五节 疲劳



1912年4月号称永不沉没的泰坦尼克号（Titanic）首航沉没于冰海，成了20世纪令人难以忘怀的悲惨海难。20世纪80年代后，材料科学家通过对打捞上来的泰坦尼克号船板进行研究，回答了80年的未解之谜。由于Titanic号采用了含硫高的钢板，韧性很差，特别是在低温呈脆性。所以，当船在冰水中撞击冰山时，脆性船板使船体产生很长的裂纹，海水大量涌入使船迅速沉没。下图中左面的试样取自海底的Titanic号，冲击试样是典型的脆性断口，右面的是近代船用钢板的冲击试样。





## 定义

是指材料在不同环境因素（温度、介质）下，承受外载荷（拉、压、弯、剪、扭）作用时所表现的行为（变形、断裂等）。也可以理解为金属抵抗外载荷引起的变形和断裂能力。

## 意义

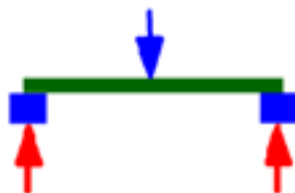
材料设计、材料选用、工艺评定、材料检验和失效分析的重要依据。



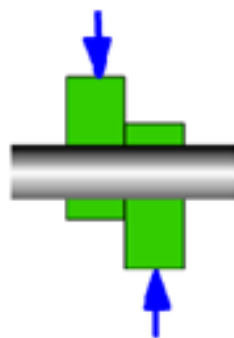
拉伸载荷



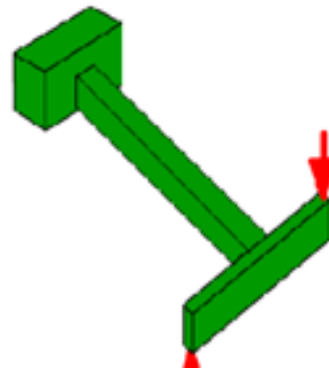
压缩载荷



弯曲载荷



剪切载荷

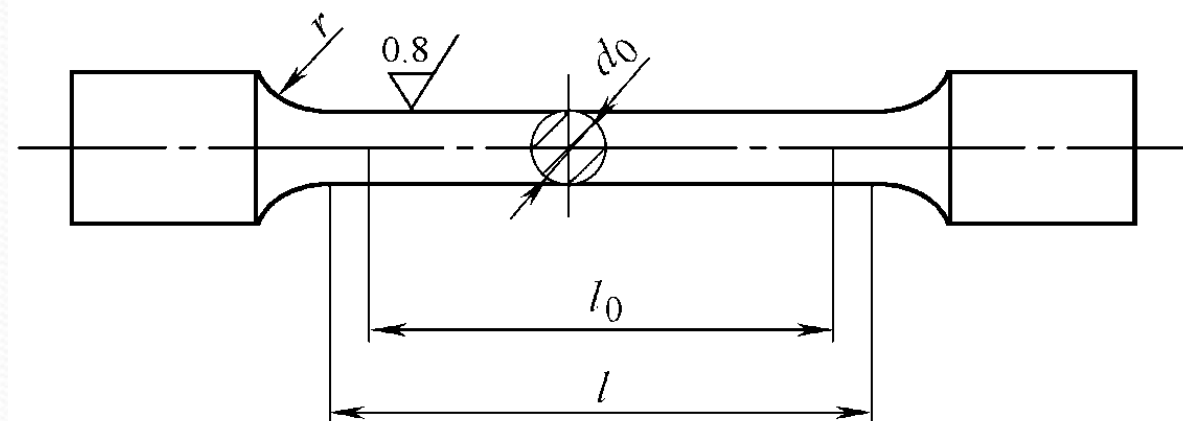


扭转载荷

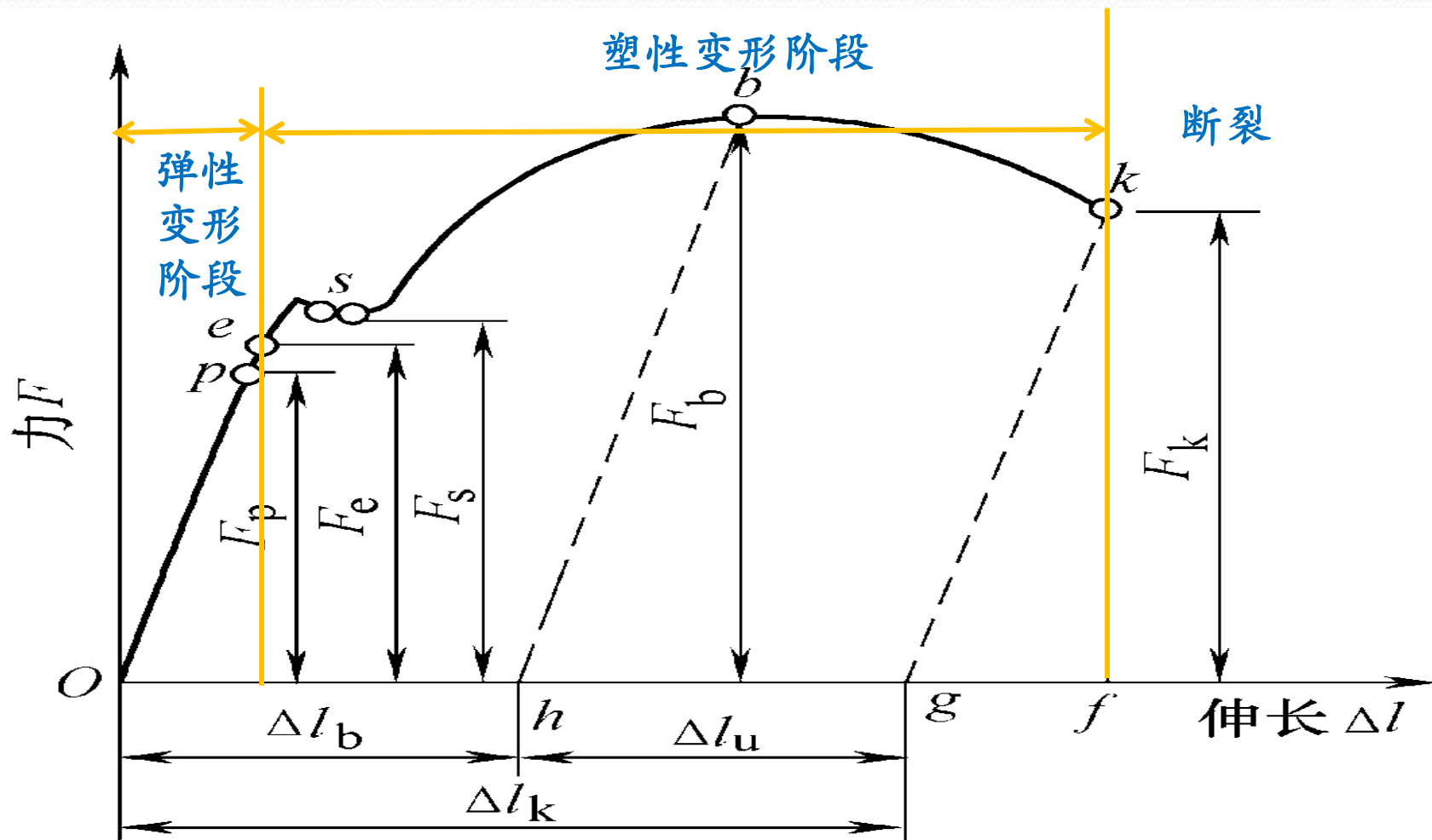
**拉伸试验：**它是按GB/T228-2002规定，把一定尺寸和形状的金属试样装夹在试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸载荷，直至把试样拉断为止。

**拉伸曲线：**根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系，所测出的成曲线。

**意义：**根据拉伸曲线可得出金属的强度、刚度、弹性和塑性。

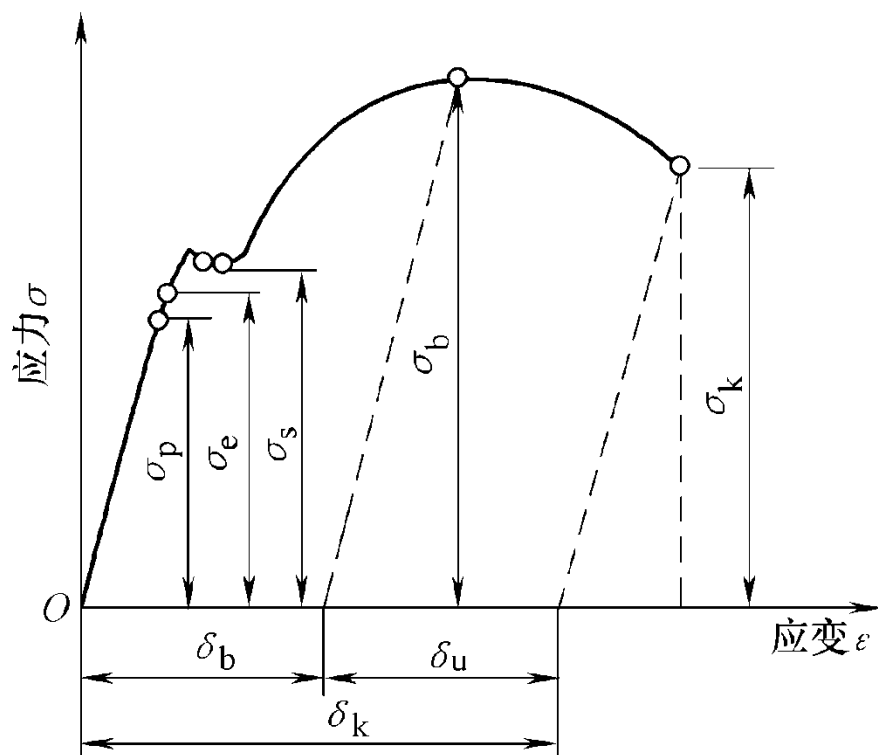


## 拉伸曲线（载荷位移曲线）





**应力-应变曲线：**以 $\sigma$  和 $\varepsilon$  为坐标，绘出应力-应变的关系曲线

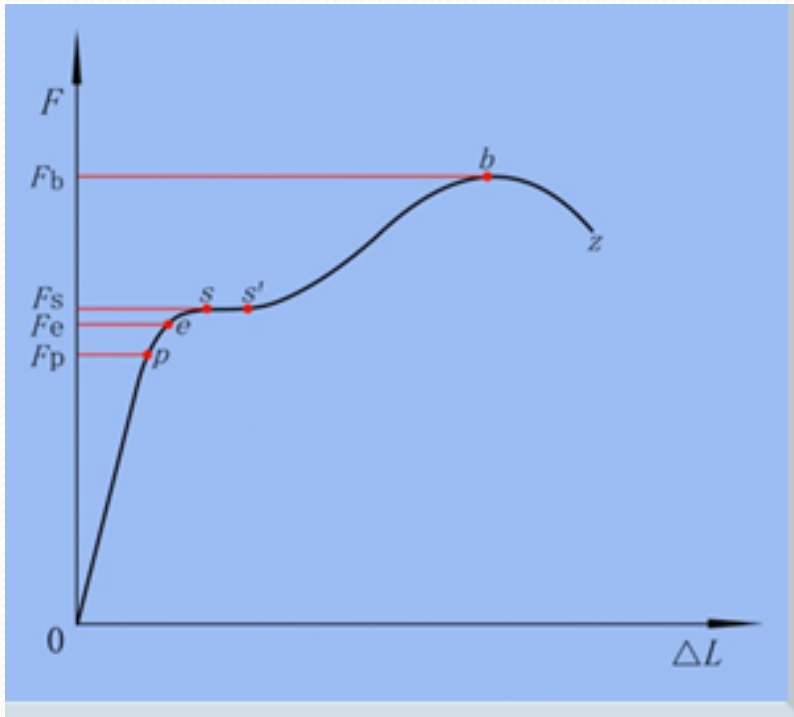


$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

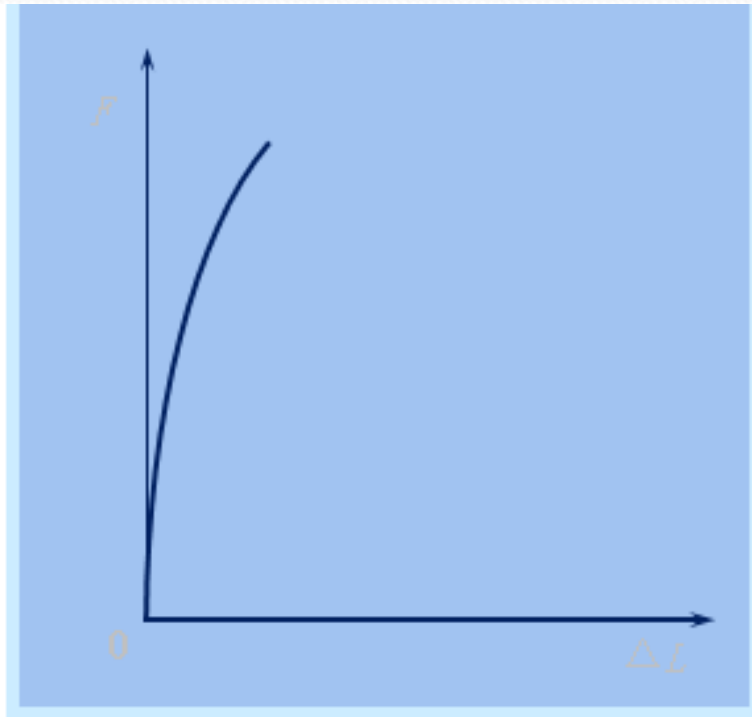
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

不受试样尺寸的影响，可以反应材料本身的力学性能。  
**注意区分：均匀变形与缩颈段**

# 拉伸曲线



低碳钢



铸铁

脆性材料在断裂前没有明显的屈服现象。



# 应力—应变曲线

弹性变形阶段

弹性模量

刚度

弹性极限

弹性比功

弹性和刚度

塑性变形阶段

屈服强度

抗拉强度

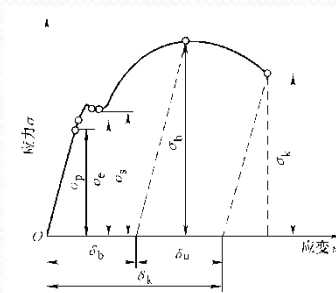
强度

断裂

伸长率

断面收缩率

塑性



# 弹性变形阶段

弹性

材料在外力作用下产生变形，外力去除后变形完全消失，材料恢复原状，这种可逆的变形称为弹性变形。

刚度

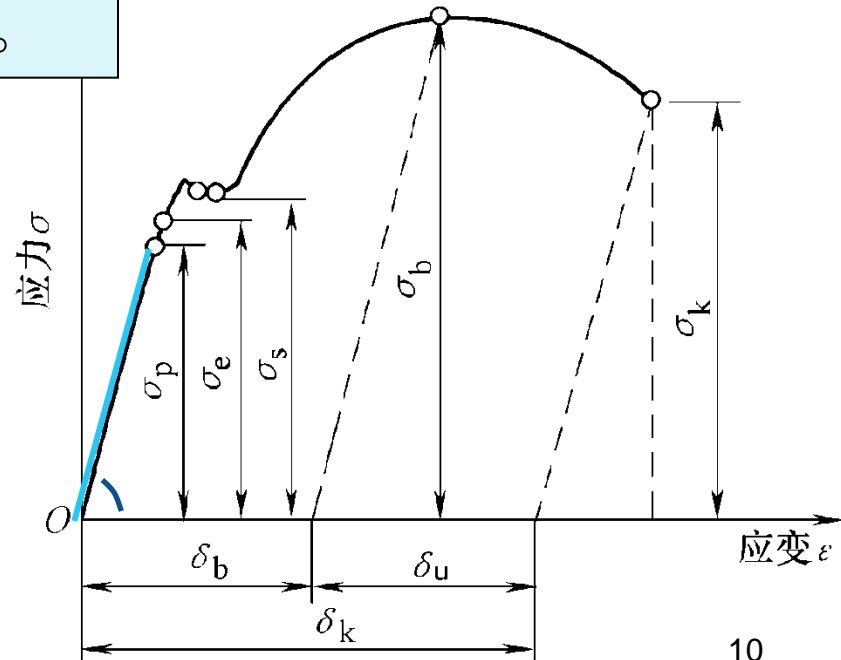
材料抵抗弹性变形的能力称为刚度。

弹性模量

金属材料在弹性状态下的应力与应变的比值。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

弹性模量就是试样在弹性变形阶段应力-应变线段的斜率，即引起单位弹性变形所需的应力。



# 塑性变形阶段

## 强度

金属材料在静力作用下，抵抗永久变形和断裂的能力。

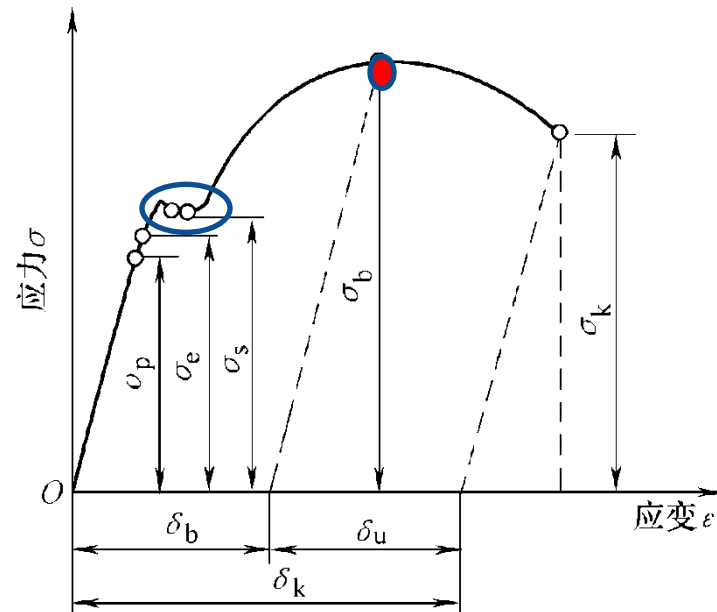
## 抗拉强度

材料在破断前所承受的最大应力值  $\sigma_b$ 。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

## 屈服强度

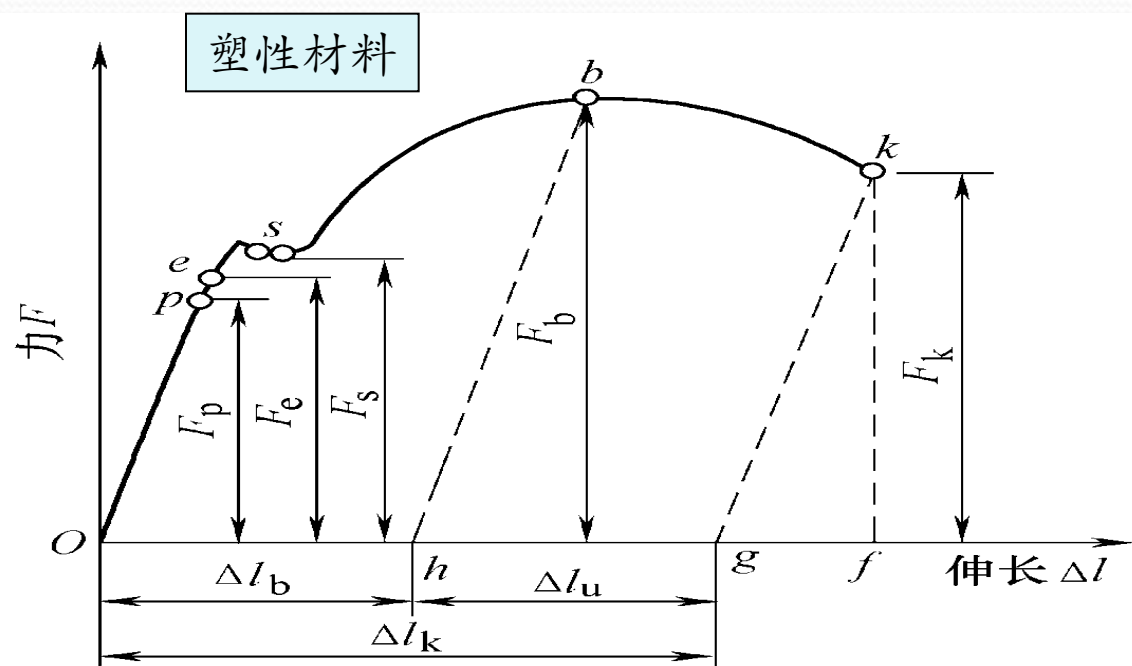
材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值  $\sigma_s$ 。



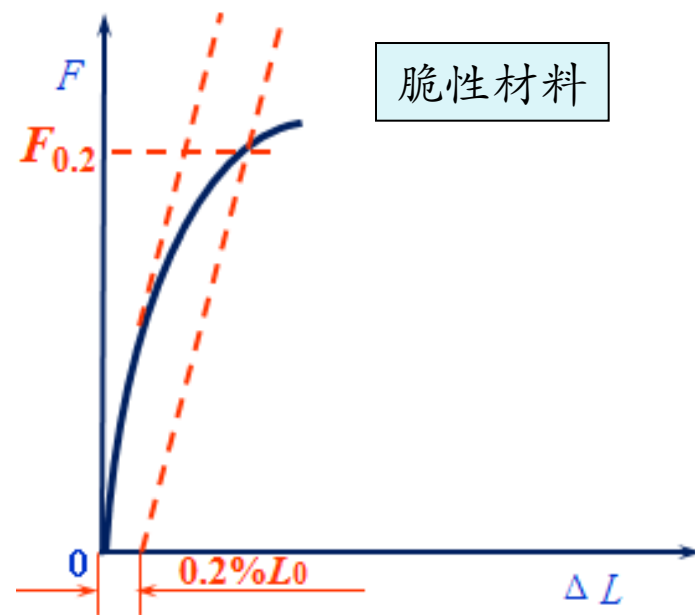


# 屈服强度

屈服强度  $\sigma_s$  是材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值



$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$



$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0}$$

## 强度的意义

- 强度是指金属材料抵抗塑性变形和断裂的能力，一般钢材的屈服强度在200~1000MPa 之间。
- 强度越高，表明材料在工作时越可以承受较高的载荷。当载荷一定时，选用高强度的材料，可以减小构件或零件的尺寸，从而减小其自重。
- 因此，提高材料的强度是材料科学中的重要课题，称之为材料的强化。

# 断裂

## 塑性

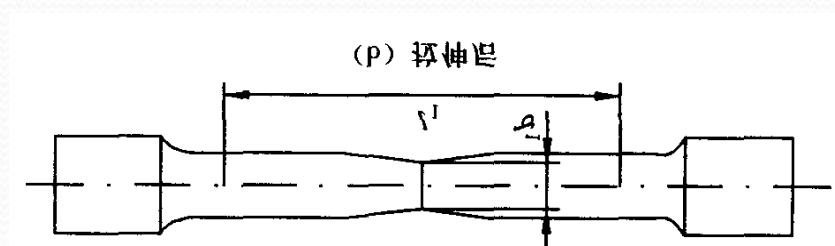
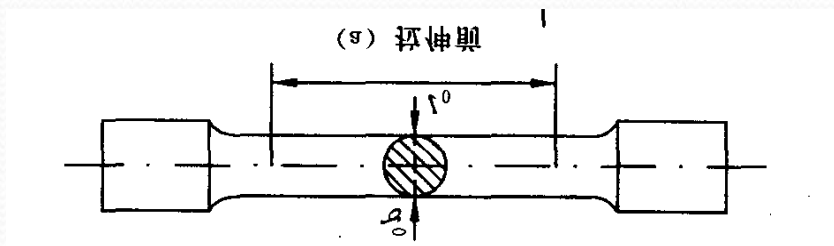
金属材料在静力作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。

## 伸长率 $\delta$

试样拉断后，标距增长量与原始标距之比。

## 断面收缩率 $\psi$

试样拉断处的横截面积收缩量与原始横截面积之比。



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

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$



## 塑性的意义

- 断后伸长率 $\delta$ 和断面收缩率 $\psi$ 越大，说明材料在断裂前发生的塑性变形量越大，也就是材料的塑性越好。
- 意义：
  - a) 安全，防止产生突然破坏；
  - b) 缓和应力集中；
  - c) 轧制、挤压等冷热加工变形。

## 强度和塑性的关系

- 强度与塑性是一对**相互矛盾**的性能指标。在金属材料的应用中，要提高强度，就要牺牲一部分塑性。反之，要改善塑性，就必须牺牲一部分强度。
- 正所谓“鱼和熊掌二者不能兼得”。但通过**细化**金属材料的显微组织，可以同时提高材料的强度和塑性。



# 超塑性

通常情况下金属的伸长率不超过90%，而有些金属及其合金在某些特定的条件下，最大伸长率可高达1000%~2000%，个别的可达6000%，这种现象称为超塑性。由于超塑性状态具有异常高的塑性，极小的流动应力，极大的活性及扩散能力，在压力加工、热处理、焊接、铸造、甚至切削加工等很多领域被中应用。



## 定义

衡量材料软硬程度的标准。  
材料抵抗另一硬物体压入其内的能力叫硬度，  
受压时抵抗局部塑性变形的能力。

## 测量方法:

静载压入法

## 特点

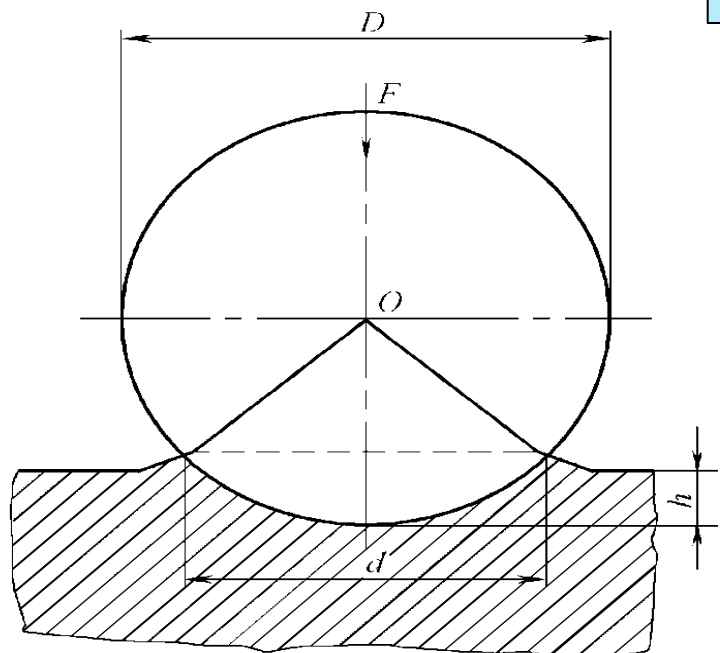
设备简单、操作迅速方便。

和强度的  
关系:

都是抵抗塑性变形的能力，局部或整体。  
一般金属材料抗拉强度值（MPa）为其布氏硬度值的3.2-3.6倍。

# (1) 布氏硬度

**试验方法：**在F的作用下把直径为D的钢球压入被测材料，硬度值就是载荷P除以压痕（球冠）的面积。



布氏硬度试验原理示意图

$$HBW = \text{常数} \times \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

**表示方法：** 500HBW5/750/10  
500HBW (5mm/750kgf/10s)

**单位：** kgf/mm<sup>2</sup>

**应用范围：** 测量较软的材料，各种退火状态下钢材、铸件、有色金属等或调质处理后的机械零件。

**优缺点：** 压痕大，测量准确，但不能测量成品件，不能测薄片金属。

**试验方法：** 用一个压头在规定试验力作用下压入被测试金属表面，由压头在金属表面所形成的压痕深度来确定其硬度值。

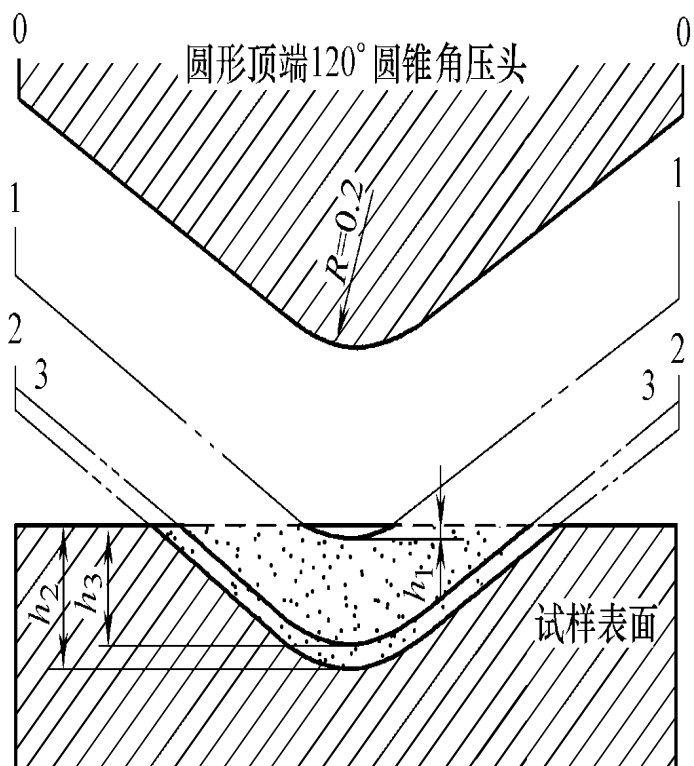
$$HR = N - \frac{h}{s} \quad h = h_3 - h_1$$

**表示方法：** 50HRC/50HRB/50HRA

**单位：** 无

**优点：** 操作简便、迅速，效率高，可直接测量成品件及高硬度的材料。

**缺点：** 压痕小，测量不准确，需多次测量。





使用范围：  
(常用)

标准符号	压头	总载荷 /KG	常用硬度示值范围	应用场合
HRA	120° 金刚石圆锥	60	20~85HRA	碳化物、表面硬化工件等
HRB	Φ1.588mm 钢球	100	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRC	120° 金刚石圆锥	150	20~67HRC	淬火钢、调质钢等

还有Φ3.175mm钢球压头



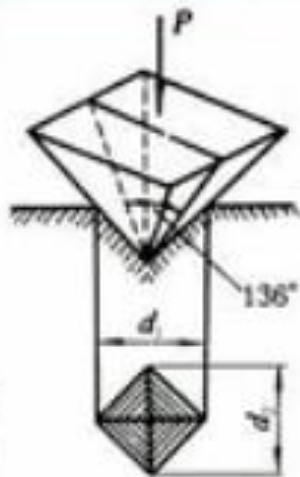
试验方法：压头为夹角为 $136^\circ$ 的金刚石正四棱锥体压头，测量压痕投影的两对角线长度，以此计算出压痕的表面积 $S$ ，最后求出压痕表面积上平均压力（ $F/S$ ）。

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad d = 0.5 (d_1 + d_2)$$

表示方法：640HV30/20  
640HV (30kgf/20s)

使用范围：用于测量金属镀层薄片材料和化学热处理后的表面硬度。

优缺点：试验力小，压入较浅，硬度范围广，但测量麻烦，工作效率低。





## 冲击载荷

- 在很短时间内作用物体上的载荷称为冲击载荷。
- 加载时间短，加载速率高；
- 载荷作用效果大，所以必须考虑材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力，即冲击韧性。
- 有时利用，有时尽量避免或减小。



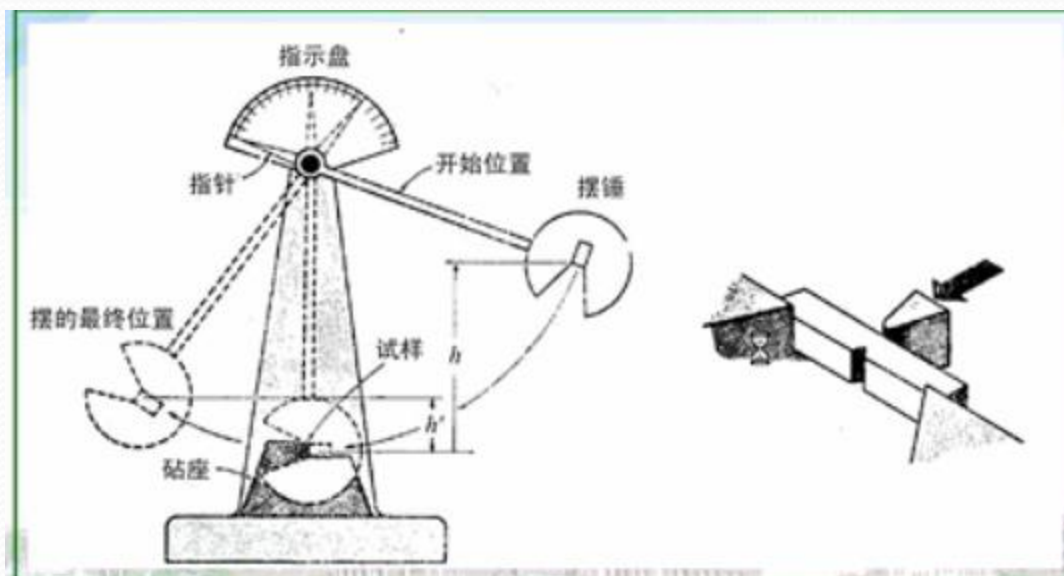


## 定义

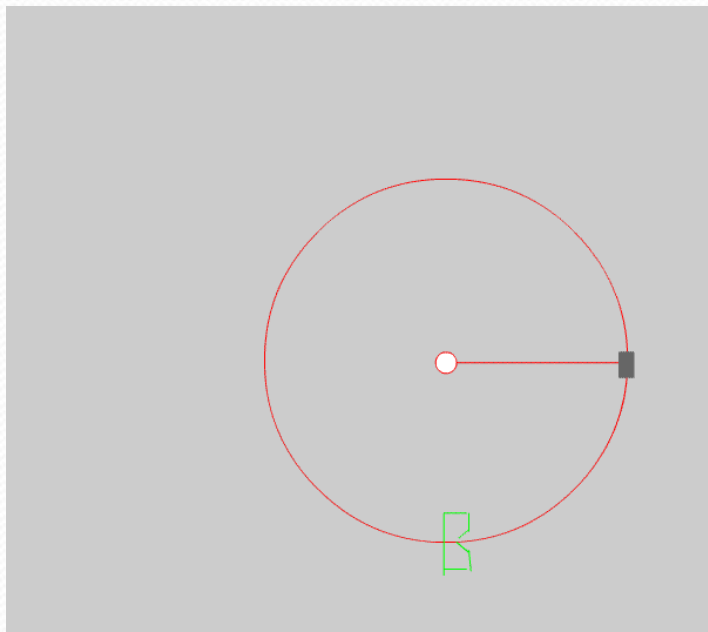
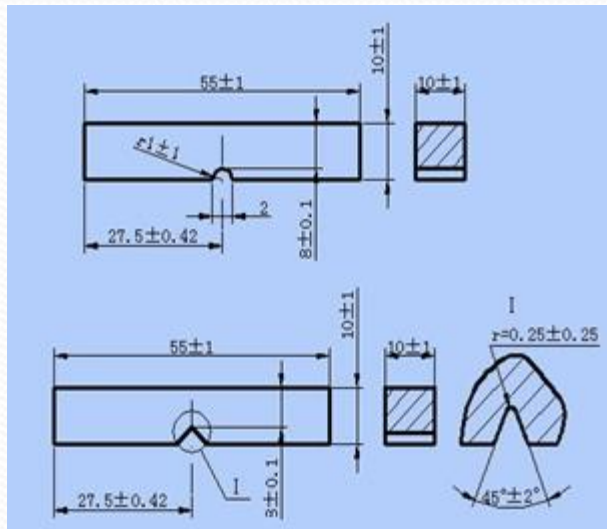
金属材料在冲击力作用下，抵抗破坏的能力。  
冲击载荷的特点：加载时间短、加载速率高、应力集中。

## 测量方法：

一次冲击试验



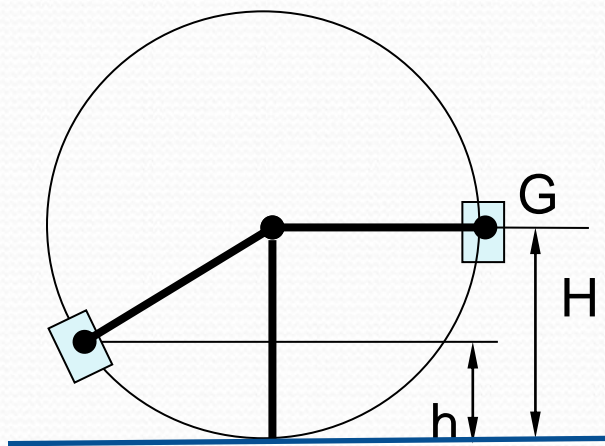
GB/T 229-2007



## 测量及计算方法:

摆锤冲断试样失去的位能为  $GHg - Ghg$ , 这就是试样变形和断裂所消耗的功, 称为冲击吸收功  $A_k$ , 冲击吸收功除以试样缺口处截面积  $S_0$  得材料冲击韧度  $a_k$ 。

$$A_k = Gg(H - h)$$



$$a_k = \frac{A_k}{S_0}$$



传统力学强度理论

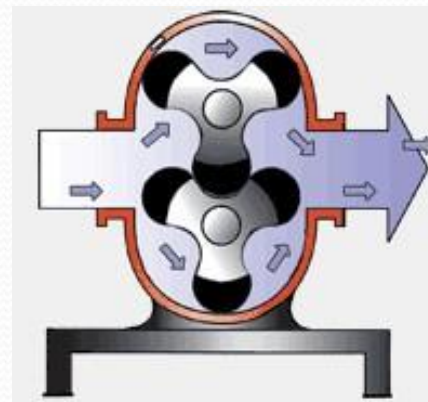
$$\sigma \leq \frac{\sigma_{0.2}}{n}$$

考虑结构特点  环境温度 $\delta$ 、 $\psi$  $A_{KU}$ 、 $A_{KV}$ 、 $t_k$ 

NSR

实际情况

中低强度钢的大型、重型机件，常在屈服应力以下发生低应力脆性断裂（由宏观裂纹引起的）。





随时间作周期性变化的应力

## 疲劳

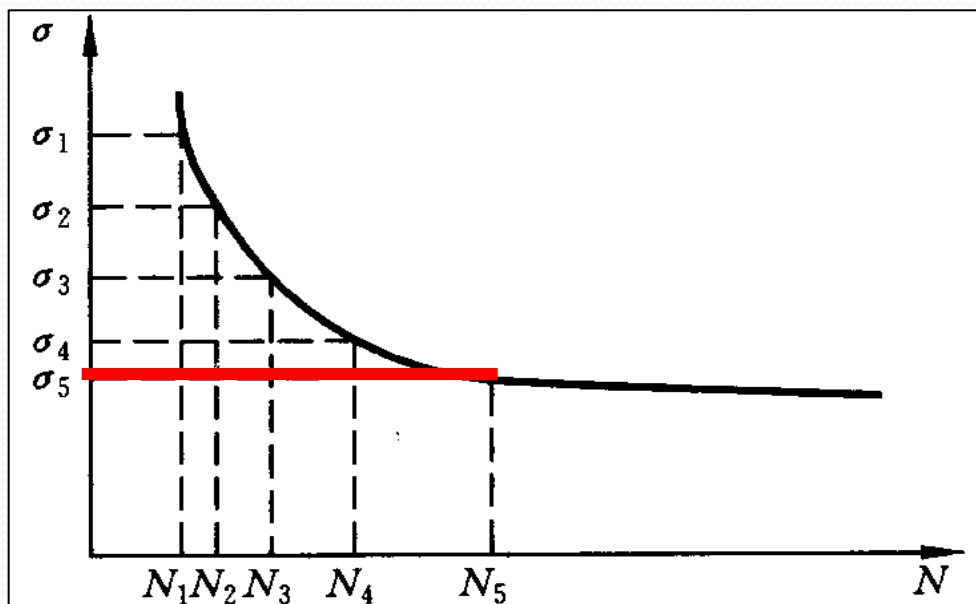
在交变应力作用下，虽然材料所承受的应力低于屈服点，但经较长时间的工作而产生裂纹或突然断裂的过程。

## 疲劳曲线

表示材料承受的交变应力 ( $\sigma$ ) 与材料断裂前承受交变应力的次数 ( $N$ ) 之间的关系曲线。：

## 疲劳极限

当应力低于一定值时，试样可以经受无限周期循环而不破坏，此应力值叫疲劳极限或疲劳强度。



(a) 疲劳曲线

## 疲劳断裂特点:

断裂前没有明显的塑性变形，具有很大的突然性。

## 影响因素:

工作条件、表面状态、材质、残余应力等。

## 提高措施:

结构上避免应力集中，提高表面加工质量，表面强化处理等。

## 失效过程:

疲劳裂纹产生、疲劳裂纹扩展、瞬时断裂



# 本章重点掌握内容

1、名词：

力学性能、强度、塑性

2、布、洛、维硬度的差别