

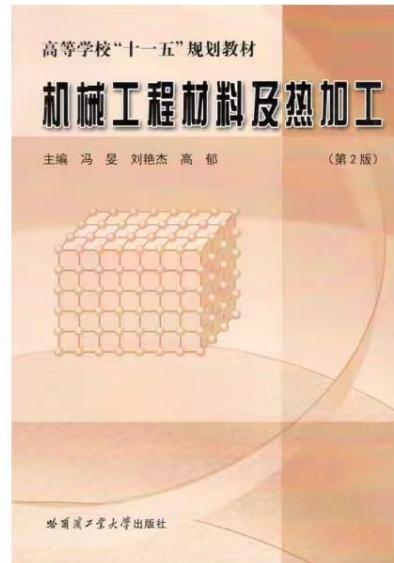


# 机械工程材料及热加工工艺

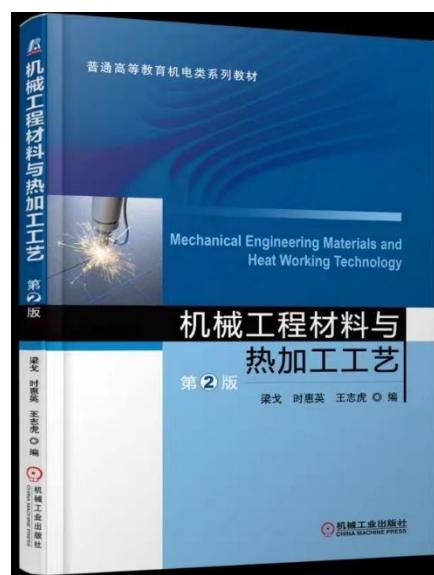
安玉民

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn



教材：



参考教材：

## 绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

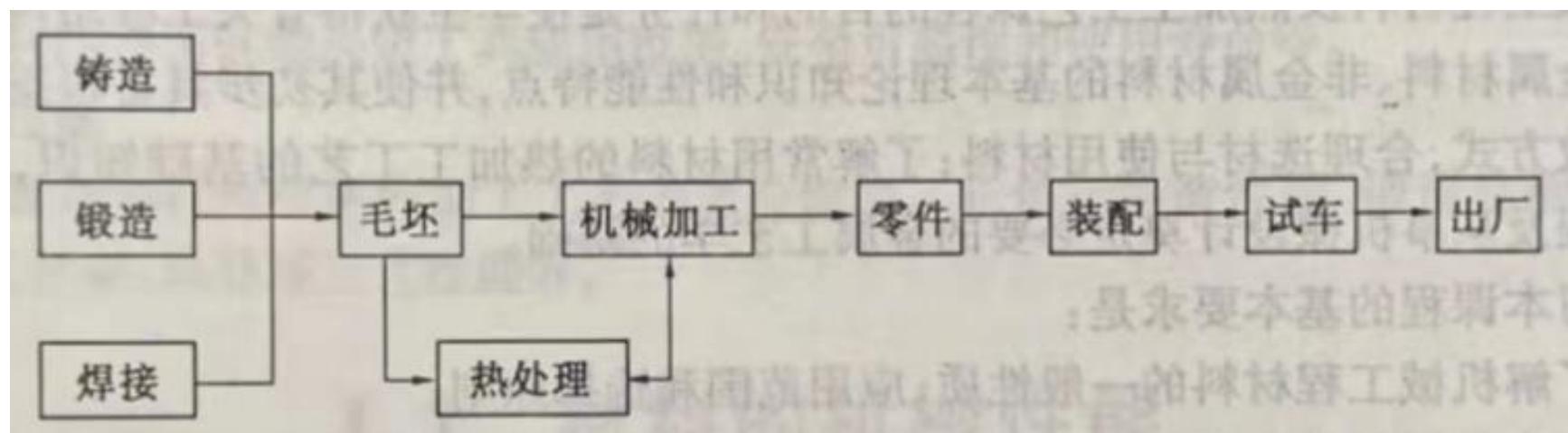
第13章 非金属材料成形

第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验

汽车可以说是由不同几何形状和尺寸的零件按照一定的方式装配而成。

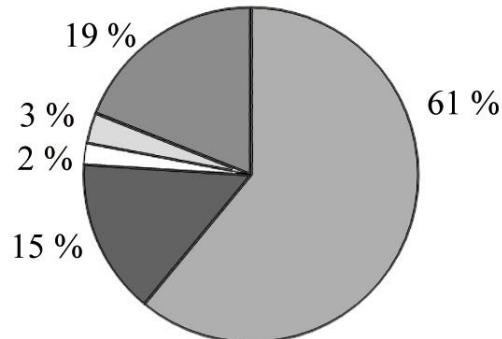
各种汽车零件需选用不同的材料制造，并具有不同的精度和表面质量。因此加工出汽车零件应采用不同的加工方法。

成形工艺方法：铸造、锻压、焊接、切削加工和特种加工等。

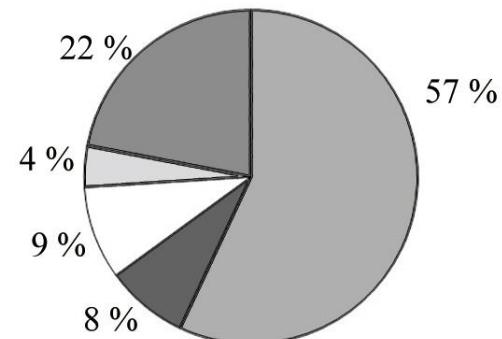


机械制造生产过程

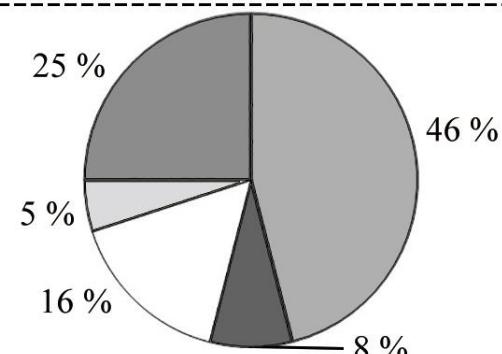
1975



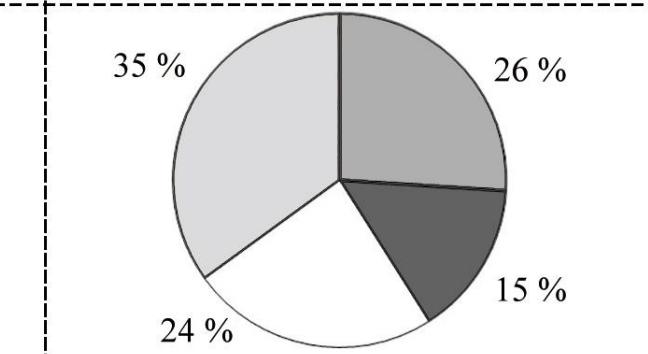
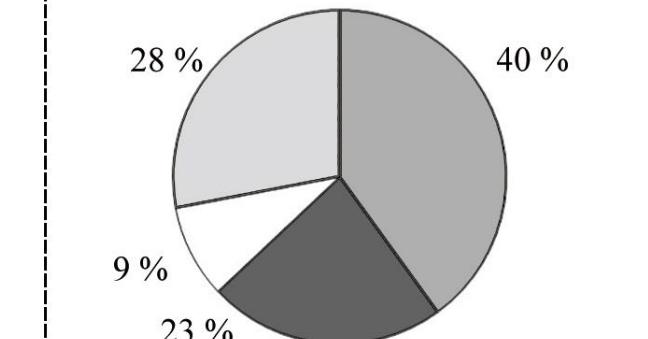
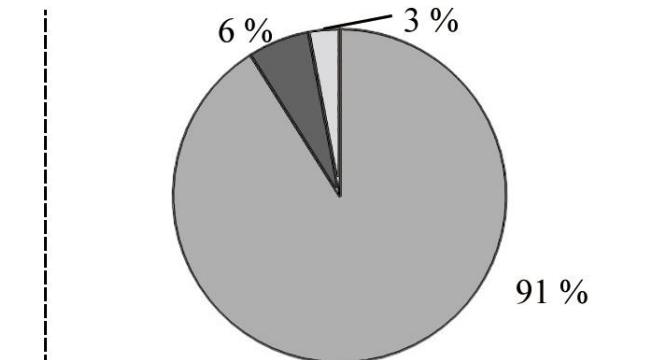
2012



2025



□ 钢 ■ 铸铁 □ 铝 □ 其他金属 □ 塑料等



□ 低强度钢 ■ 一般HSS □ AHSS □ 其他钢

## 目的和任务：

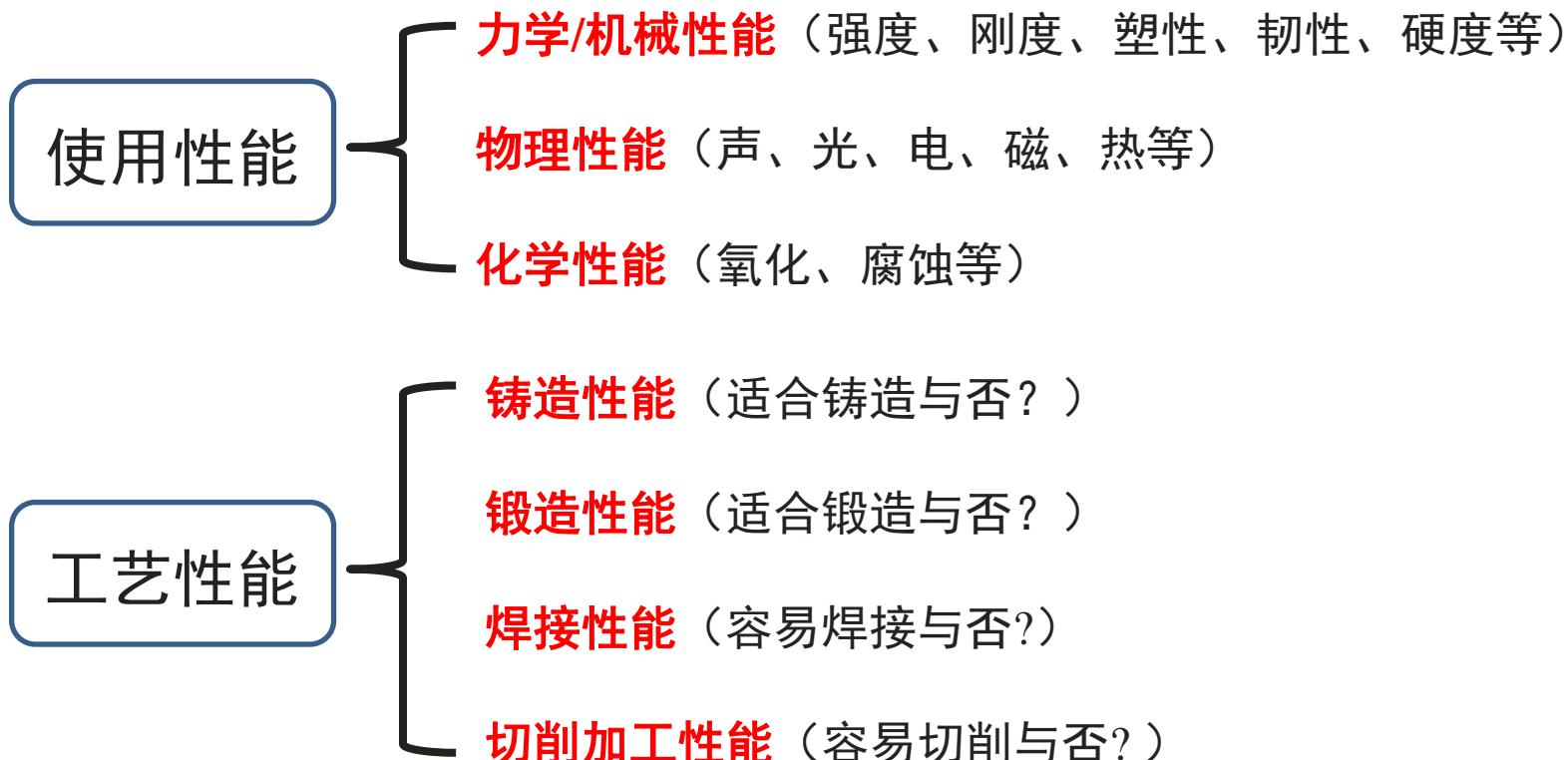
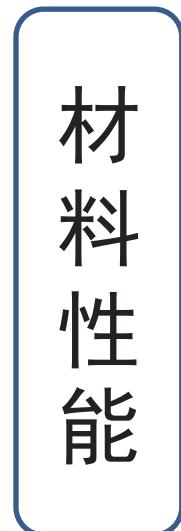
获得有关工程结构和机器、汽车零件常用的金属材料、非金属材料的基本理论知识和性能特点，并初步具备根据零件工作条件和失效方式，合理选材与使用材料，了解常用材料的热加工工艺的基础知识，为后续相关课程奠定必要的金属工艺学基础。

## 基本要求：

1. 了解机械工程材料的一般性质、应用范围和选择原则；
2. 初步掌握各种主要加工方法的实质、工作特点和基本原理，具有选择毛坯和零件加工方法的基础知识；
3. 初步掌握零件的结构工艺性和常用材料的工艺性。



材料的性能一般可分为使用性能和工艺性能两大类



**力学/机械性能：**材料在各种不同工作情况（高温、低温、室温等条件下，在拉、压、弯、扭、冲击等），从开始受力变形至破坏的全过程所表现出的力学特征。

材料的力学性能，不仅是设计零（构）件、选择材料的重要依据，而且是验收、鉴定材料性能的重要依据之一。

**载荷：**材料在加工及使用过程中所受的外力。分为静载荷、冲击载荷、交变载荷等。

静载荷



冲击载荷



交变载荷



# 1.1材料的机械性能—1.1.1静载荷下的机械性能



强度：材料抵抗外力产生塑性变形或断裂的能力，一般通过拉伸实验测定。

拉伸试验：在承受轴向拉伸载荷下测定材料特性的试验方法。

拉伸试验可测定材料的一系列强度指标和塑性指标，是评价材料力学性能最简单和最有效的方法。



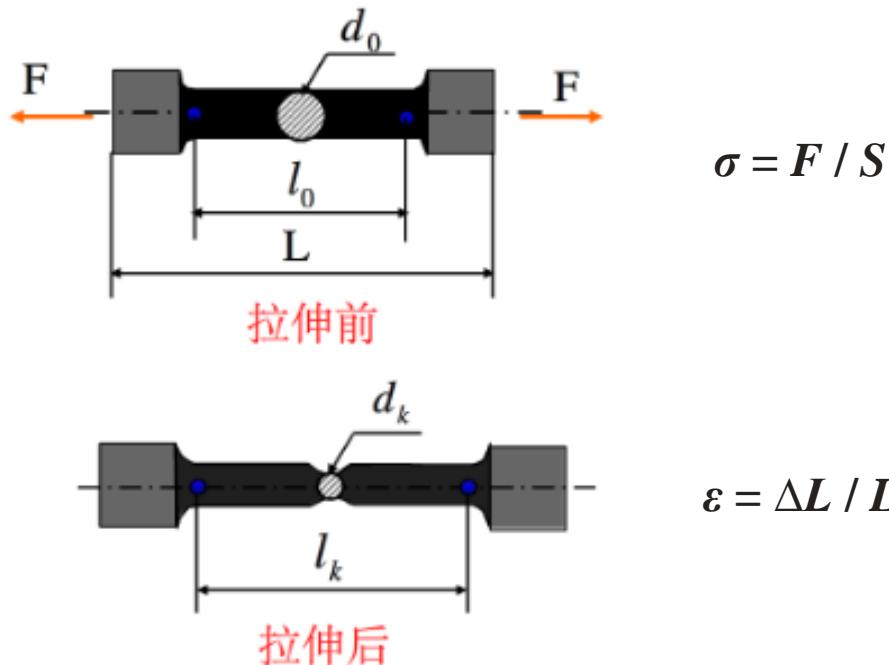
$$l=10d \text{ 或 } l=5d$$



## 低碳钢应力-应变曲线

拉伸试验是将圆形或板形的试样装在试验机上，沿试样轴向慢慢施加载荷，使其发生拉伸变形直至断裂。

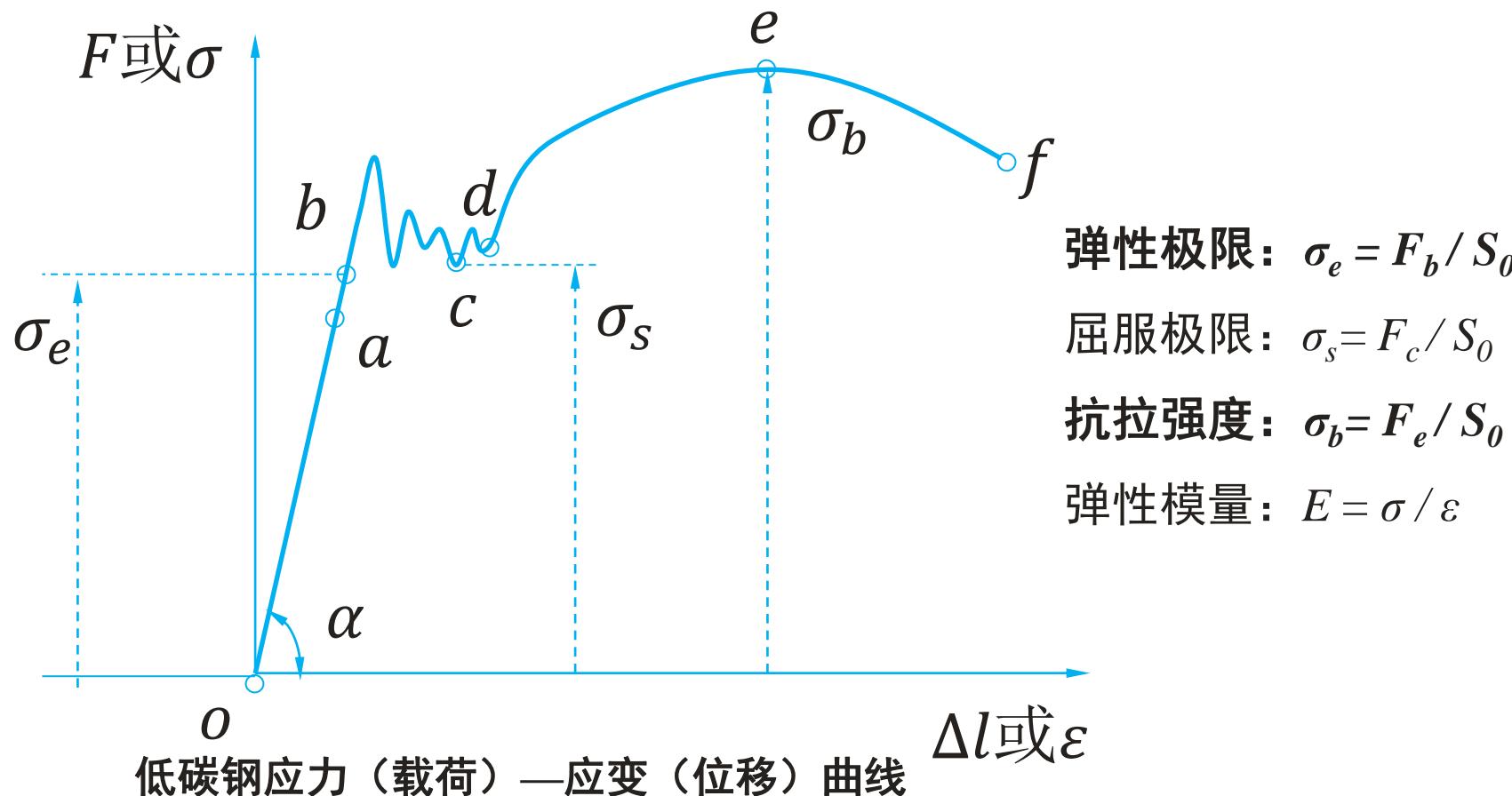
拉伸前后试验如图所示：



利用拉伸试验机可以绘制出拉伸过程中载荷与试样伸长之间的关系曲线，将载荷坐标值和伸长坐标值分别除以试样原截面积和标距，可得到低碳钢拉伸的应力-应变曲线。



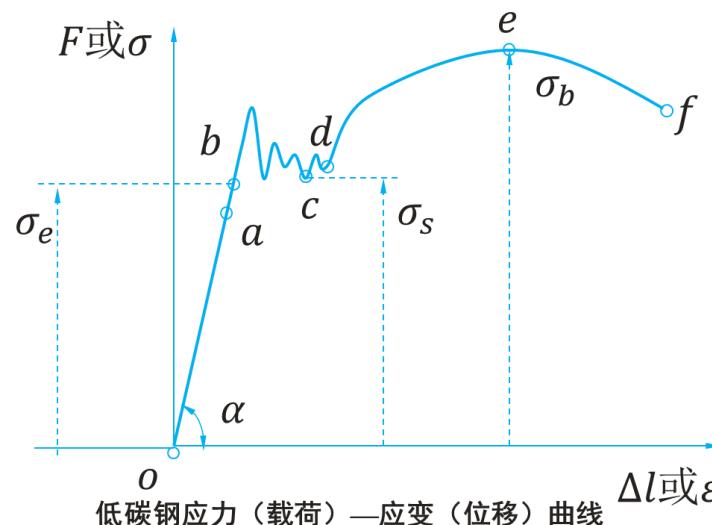
研究表明，低碳钢在外加载荷作用下的变形过程一般可分为：弹性阶段（ob）、屈服阶段（bd）、均匀塑性阶段（de）和颈缩阶段（ef）。





## 1. 弹性与刚度

- **弹性变形**: 材料在外力作用下产生变形, 当外力去除后可以恢复其原来的形状, 这种随外力消失而消失的变形称为弹性变形。
- **弹性**: 指不产生永久变形的能力。
- 图中  $b$  点对应的应力为不产生永久变形的最大应力  $\sigma_e = F_b / S_0$ , 称为**弹性极限**。
- 从图中可以看出,  $oa$  段为一条直线, 意味着这部分应力和应变始终成比例, 所以将  $a$  点对应的应力  $\sigma_p$  称为**比例极限**。
- 弹性用**弹性模量  $E$**  来衡量, 即材料在弹性范围内应力与应变的比值  $\sigma/\varepsilon$ , 单位为 MPa,  $E = \sigma/\varepsilon$ 。





## 1. 弹性与刚度

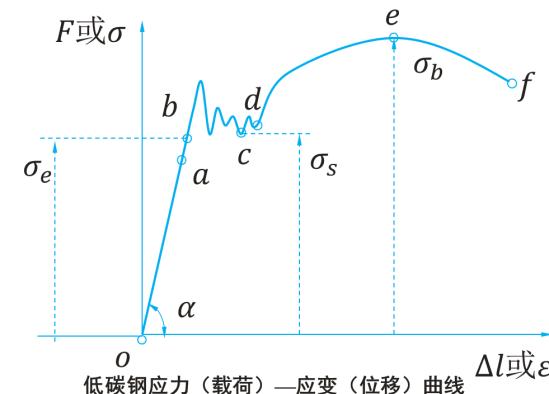
- 弹性模量 $E$ 的大小标志着材料在外力作用下抵抗弹性变形的能力，即材料的刚度。
- **$E$ 越大，即刚度愈大，材料越不易发生弹性变形。**亦即在一定应力作用下，发生弹性变形越小。
- 弹性模量又称杨氏模量，是工程材料重要的性能参数。
- 虽然因合金成分不同、热处理状态不同、冷塑性变形不同等，金属材料的杨氏模量值会有5%或者更大的波动。但是总体来说，金属材料的弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标，合金化、热处理（纤维组织）、冷塑性变形、温度等对弹性模量的影响较小，所以一般工程应用中都把弹性模量作为常数。  
**值得注意的是，材料的刚度并不等于机件的刚度。**所谓机件刚度是指机件抵抗弹性变形的能力。

**机件刚度是材料 $E$ 和机件形状与截面尺寸的函数。提高机件刚度的办法是增加横截面积或改变截面形状。**

# 1.1 材料的机械性能—1.1.1 静载荷下的机械性能

## 2. 强度与塑性

- **强度**: 材料在外力作用下抵抗塑性变形和破坏的能力;
- **塑性变形**: 外力去除后不能够恢复的变形。
- **在拉伸曲线上可以得到材料的屈服强度和抗拉强度**
- **屈服**: 应力不增加, 但应变增加的现象
- 由拉伸曲线可以看出, 当  $\sigma$  超过  $a$  点后, 试样除了弹性变形外, 还产生塑性变形。在  $bc$  段, 表现出应力几乎不增加而应变却保持继续增加的现象, 即屈服现象。
- 试件屈服时承受的最小应力  $\sigma_s$ , 即  $c$  点对应的应力称为屈服强度; 基本上所有的机械零件都不允许塑性变形, 所以强度计算常用屈服极限  $\sigma_s = F_c / S_0$ 。

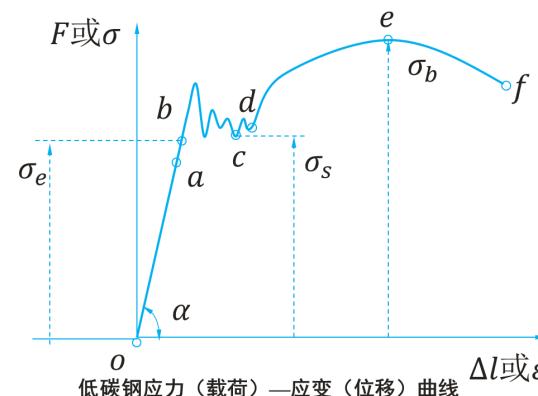
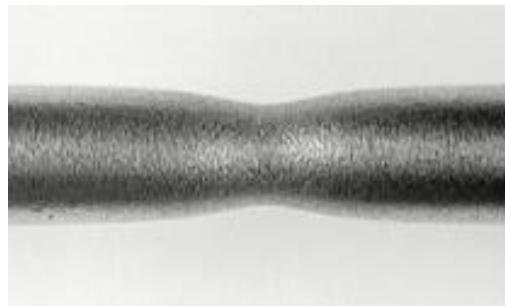


实际上, 不少材料并没有明显的屈服现象, 为此, 国家标准规定: 把试件产生的**残余塑性变形**为标距长度的0.2%时所对应的应力值定为材料的屈服强度, 用  $\sigma_{0.2}$  表示。

大多数情况下, 在工程结构上或机器工作时是**不允许材料发生塑性变形**的, 因此**屈服强度 ( $\sigma_s$ )** 是工程设计和选材的重要依据之一

## 2. 强度与塑性

**抗拉强度：**由拉伸曲线可以看出，材料发生屈服后，其应力与应变的变化如图中  $de$  段所示， $e$  点对应的应力达最大值  $\sigma_b = F_e / S_0$ ；在  $e$  点以前，材料的塑性变形是均匀的； $e$  点之后，试件产生缩颈，并迅速伸长，变形集中在试样的局部，应力明显下降；到  $f$  点试件断裂。



将  $\sigma_b$  称为抗拉强度或强度极限，即试件在拉伸条件下发生断裂前所承受的最大应力。

抗拉强度反映材料抵抗断裂破坏的能力，其值越大，说明材料抵抗断裂的能力越强。

对于变形要求不高的机件，无需靠  $\sigma_s$  来控制产品的变形量，常将  $\sigma_b$  作为设计和选材依据。

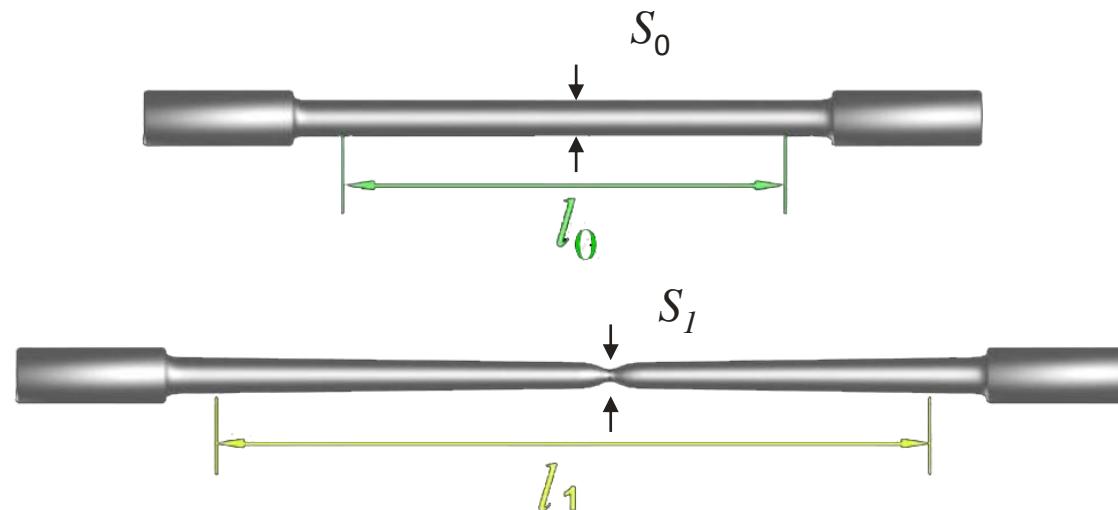
**塑性**: 材料发生断裂前承受最大塑性变形的能力，通常用伸长率和断面收缩率作为衡量塑性的指标。良好的塑性是金属材料进行加工的必要条件，同时，材料有了一定的塑性还可提高机件使用的可靠性，防止突然断裂。

**伸长率**:  $\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$ ， $L_1$ 为原长， $L_0$ 为断裂后长度。

**断面收缩率**:  $\varphi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$ ，式中 $S_0$ 为试件原始截面积， $S_1$ 为断口处的截面积；

$\delta$  和  $\varphi$  愈大，材料的塑性愈好，两者相比，用  $\varphi$  表示塑性更接近真实应变。

断面收缩率  $\varphi$  与试样长短无关。





### 3. 硬度

- 定义：材料抵抗局部塑性变形的能力，是衡量材料软硬程度的指标；多用压入法测定，早在1822年，德国矿物学家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
- 硬度试验是机械性能试验中最简单易行的一种试验方法。
- 试验钢铁硬度的最普通方法是用锉刀在工件边缘上锉擦，由其表面所呈现的擦痕深浅以判定其硬度的高低。这种方法称为锉试法，这种方法不太科学。

硬度试验根据其测试方法的不同可分为静压法（如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等）、划痕法（如莫氏硬度）、回跳法（如肖氏硬度）及显微硬度、高温硬度等多种方法。

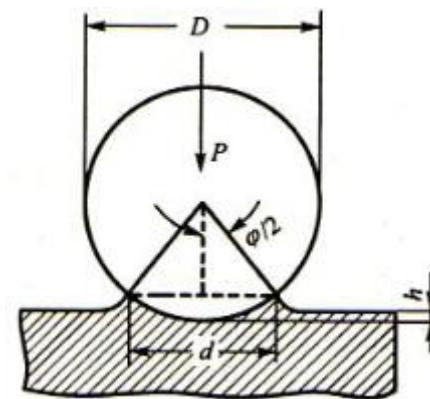
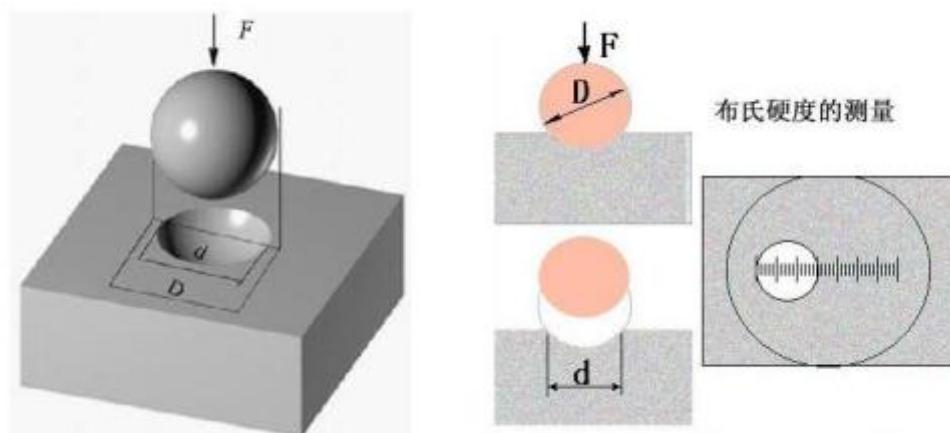


### 3. 硬度—布氏硬度 (HB)

Brinell Hardness, 布氏硬度是由瑞典工程师布列涅尔 (J.B. Brinell) 于1900年提出的。

布氏硬度的测定原理：用一定大小的试验力  $F$  (N)，把直径为  $D$  (mm) 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面，保持规定时间后卸除试验力，测出压痕平均直径  $d$  (mm)，然后按公式求出布氏硬度 HB 值，或者根据  $d$  从布氏硬度表中查出 HB 值。

单位为公斤力/mm<sup>2</sup> (N/mm<sup>2</sup>)，用 HB 表示



布氏硬度值的计算公式为：

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{(D^2 - d^2)})}$$

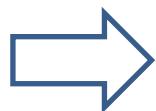
$P$  = 负荷 (千克力)

$D$  = 压头直径 (毫米)

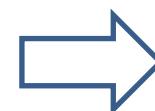
$d$  = 压痕直径 (毫米)

## 3. 硬度—布氏硬度 (HB)

试验用压头为  
一淬火钢球



过硬材料会使钢  
球变形甚至破坏

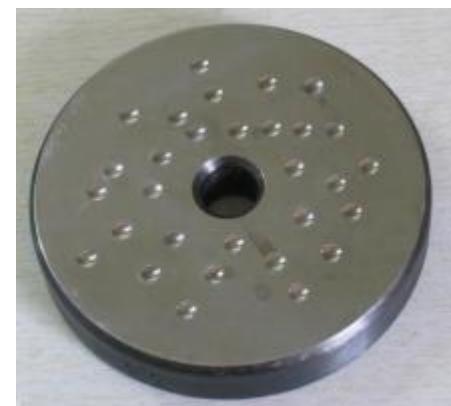


使用范围不能  
超过HB450

对金属来讲，只适用于测定退火、正火、调质钢、铸铁及有色金属的硬度。

优点：测量误差小，数据稳定；

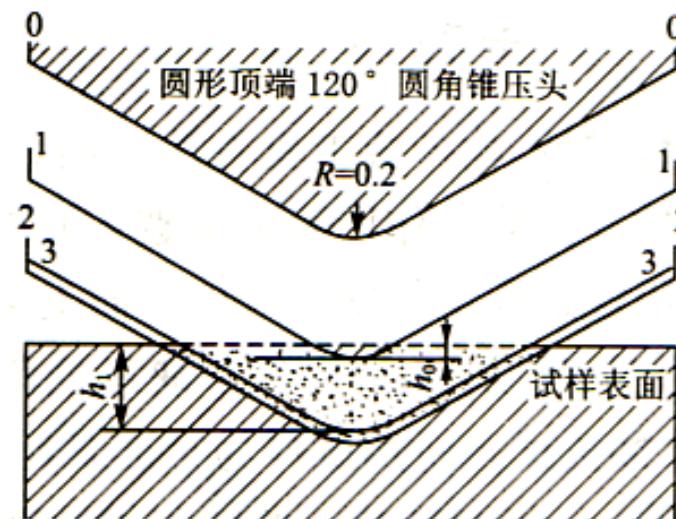
缺点：压痕大，不能用于太薄件或成品件。



### 3. 硬度—洛氏硬度 (HR)

洛氏硬度检测法最初是由美国人洛克威尔 (S.P. Rockwell 和 H.M. Rockwell) 在1914年提出。试验方法是用一个顶角为120度的金刚石圆锥体或直径为1.59mm/3.18mm的钢球，在一定载荷下压入被测材料表面，由压痕深度求出材料的硬度，洛氏硬度无单位，用

$$HR = \frac{K-h}{0.002}, \quad h=h_1-h_0$$





### 3. 硬度—洛氏硬度 (HR)

初始载荷  $F_1 = 98N$

主载荷  $F_2 = 490N$ , 总实验力  $F = F_1 + F_2 = 588N$ , HRA

$F_2 = 883N$ , 总实验力  $F = F_1 + F_2 = 981N$ , HRB

$F_2 = 1373N$ , 总实验力  $F = F_1 + F_2 = 1471N$ , HRC

表 1.2 常用的三种洛氏硬度的试验条件及应用范围

硬度符号	压头类型	总试验力 $F/kN$	硬度值有效范围	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥体	0.588 4	70 ~ 85 HRA	硬质合金, 表面淬硬层, 渗碳层
HRB	Φ1.588 mm 钢球	0.980 7	25 ~ 100 HRB	非铁金属, 退火、正火钢等
HRC	120°金刚石圆锥体	1.471 1	20 ~ 67 HRC	淬火钢, 调制钢等

### 3. 硬度—洛氏硬度 (HR)

根据压头的材料及压头所加的负荷, HR: HRA、HRB、HRC。

**HRA** (120° 金刚石圆锥体, 总实验力588.4N) : 适用于测量硬质合金、表面淬火层或渗碳层; 有效范围: 70~85 HRA。

**HRB** (Φ1.588mm钢球, 总实验力980.7N) : 适用于测量有色金属和退火、正火钢等; 有效范围: 20~100 HRB。

**HRC** (120° 金刚石圆锥体, 总实验力1471.1N) : 适用于调质钢、淬火钢等; 有效范围: 20~67 HRC。

优点 {  
操作简便、迅速  
硬度值可直接从表盘上读出  
压痕小, 可测量成品件

注: 因压痕小, 受材料组织不均匀因素很大, 所以对同一测试件, 应在不同部位测取三点后取平均值

### 3. 硬度—维氏硬度 (HV)

维氏硬度试验方法是英国R.L. Smith和C.E. Sandland于1925年提出的。英国的维克斯—阿姆斯特朗（Vickers-Armstrong）公司试制了第一台以此方法进行试验的硬度计。

测量原理：将方锥形金刚石以一定的压力压入被测材料表面，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。

维氏硬度单位为 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ，用HV表示

优点：

- 维氏硬度值比布氏、洛氏精确；
- 深度浅；
- 改变负荷可测定从极软到极硬的各种材料的硬度。

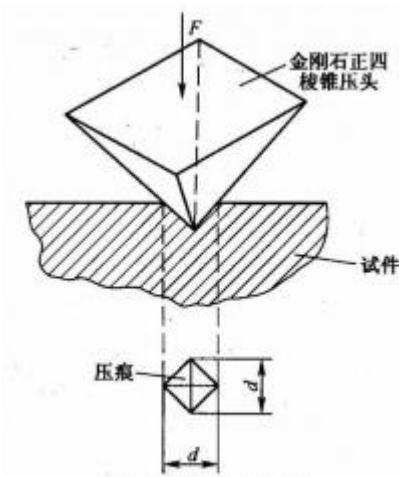
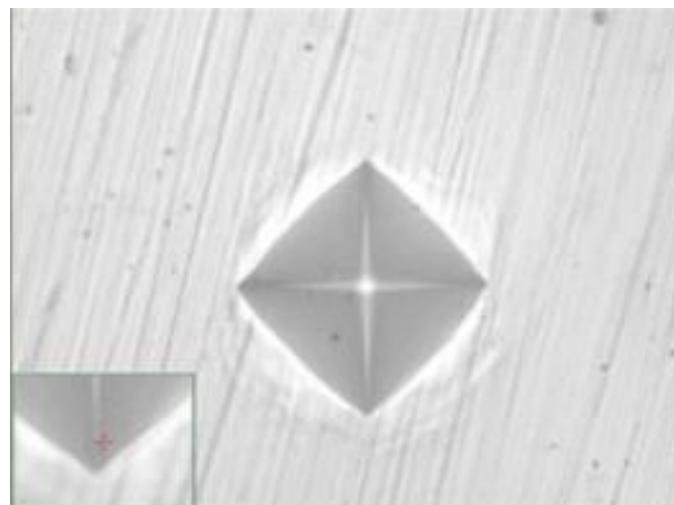


图 1-5 维氏硬度试验原理

### 3. 硬度—维氏硬度 (HV)

- 广泛应用于测定微小、薄形试件、表面渗镀层等试件的显微硬度和测定玻璃、陶瓷、玛瑙、人造宝石等较脆而又硬的材料的显微硬度，是科研机构、工厂及质监部门进行材料研究和检测的理想硬度测试仪器。
- 适用范围：热处理、碳化、淬火硬化层，表面覆层，钢，有色金属和微小及薄形零件等



### 3. 硬度

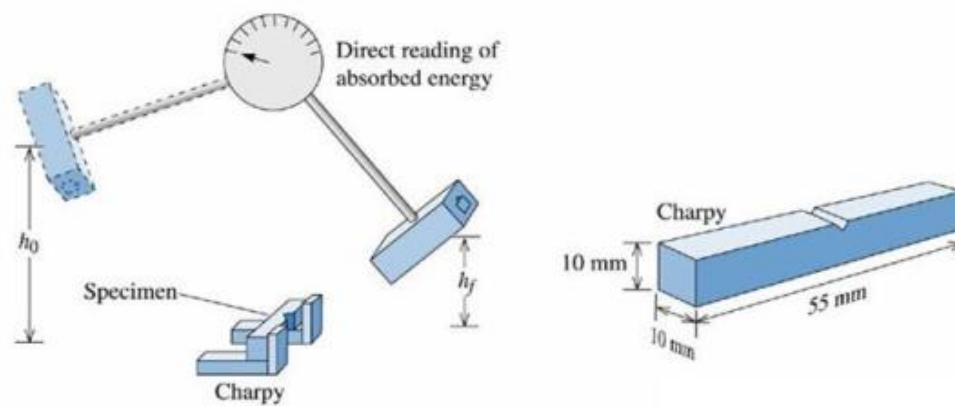
- 硬度是衡量金属材料软硬程度的一项重要的性能指标，硬度不是一个简单的物理概念，而是材料弹性、塑性、强度和韧性等力学性能的综合指标。
- 实践证明，金属材料的各种硬度值之间，硬度值与强度值之间具有近似的相应关系。因为硬度值是由起始塑性变形抗力和继续塑性变形抗力决定的，材料的强度越高，塑性变形抗力越高，硬度值也就越高。

注：各硬度值相互之间不能直接比较，只能通过硬度对照表换算

工程上的零部件绝大多数是**承受动载荷**的作用。因此，研究材料的动载力学性能才能更接近实际情况，以便为解决实际工程问题提供更适合的评价方法。

## 1. 冲击韧性

- 定义：材料在冲击载荷作用下，抵抗冲击力的作用而不被破坏的能力。
- 不少机件在工作中常常受到高速作用的载荷冲击，如冲床的冲头、汽车的齿轮、飞机的起落架等等。由瞬时冲击所引起的应力和应变要比静载荷引起的应力和应变大得多，因而在这种构件选材时必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。
- 工程上常用**一次摆锤冲击弯曲试验**来测定材料抵抗冲击载荷的能力。



- 用字母 $\alpha_k$ 来表示材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力，单位J/cm<sup>2</sup>。是指在一次试验中，单位截面积上所消耗的冲击功， $\alpha_k = A_k / S_N = mg(H_1 - H_2) / S_N$
- 特点： $\alpha_k$ 值愈大，材料韧性愈好； $\alpha_k$ 值低的材料称为脆性材料。

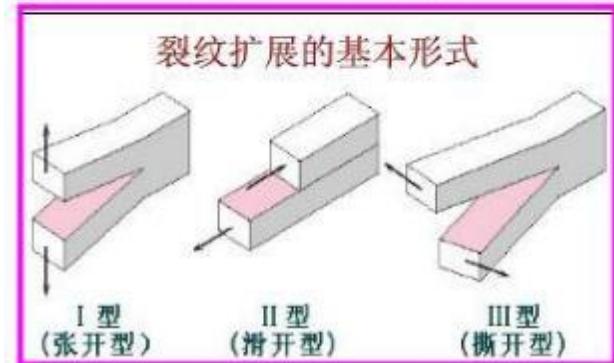
### 冷脆现象：

- 材料的冲击韧性随试验的温度的降低而减小，且在某一温度范围内，韧性值发生急剧降低，材料从韧性状态转变为脆性状态，这种现象称为冷脆现象。
- 由于材料的冷脆转变，因此对于在寒冷地区的桥梁、车辆等机件的选材上，必须做低温（一般为-40°C）冲击弯曲试验，防止低温脆性转变。



## 2. 断裂韧性

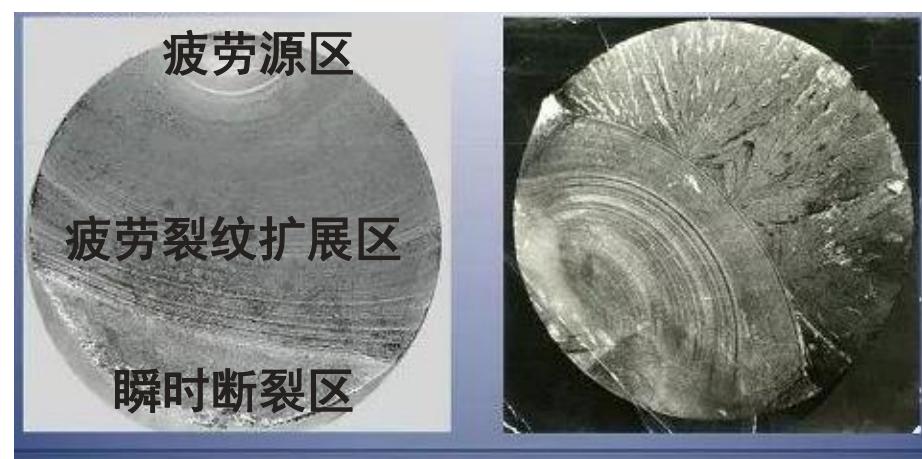
- 工程上有时会出现材料在远低于抗拉强度的情况下发生断裂的现象。
- 材料中总是存在缺陷，常见的缺陷是裂纹。在应力作用下，裂纹发生扩展，一旦扩展失稳，就会发生低应力脆性断裂。
- **材料抵抗内部裂纹失稳扩展的能力称为断裂韧性。**
- 断裂韧性是材料的固有的力学性能指标，反映了有裂纹存在时材料抵抗脆性断裂的能力，是强度和韧性的综合体现。材料的断裂韧度是工程设计中防止低应力断裂的重要力学依据。



### 3. 疲劳强度

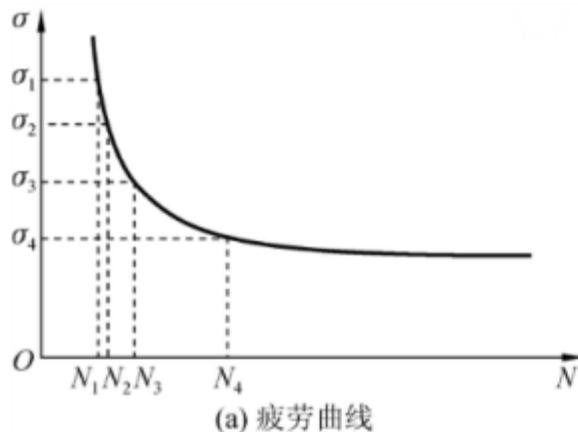
- 定义：材料在交变载荷的作用下，在远低于其屈服强度的应力下发生断裂，而且没有塑性变形征兆的现象。
- 所谓交变载荷指的是大小或方向随时间而变化的载荷
- 工程上有一些长时间承受交变载荷的零件如发动机的曲轴、汽车的齿轮及滚动轴承等等，往往都是在工作应力低于材料的屈服强度时发生断裂。

疲劳断口的特征：疲劳源区、疲劳裂纹扩展区、瞬时断裂区。

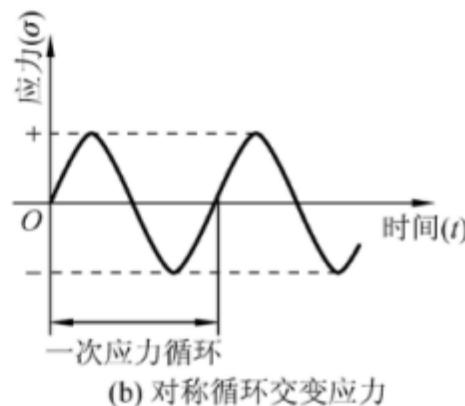


这种在低于  $\sigma_s$  的重复交变应力作用下发生断裂的现象称为疲劳断裂。

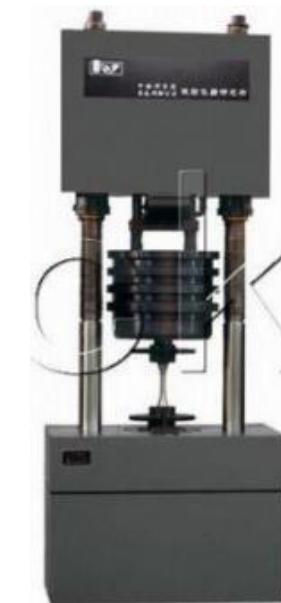
**疲劳极限：**材料在规定次数（钢材为  $10^7$  次，有色金属及合金取  $10^8$  次）交变应力作用下而不引起疲劳断裂的最大应力，用  $\sigma_r$  表示。金属材料的疲劳极限较高，所以抗疲劳的机件几乎都选用金属材料制造。



(a) 疲劳曲线



(b) 对称循环交变应力



**特点：**疲劳破坏具有突发性，没有先兆。

为了提高零件的抗疲劳能力，防止疲劳断裂的发生，在进行零件设计时，应选择合理的结构形状并降低零件表面粗糙度，避免应力集中。材料表面强化处理（如喷丸、滚压、表面淬火、渗碳等）是提高零件的疲劳极限的有效工艺方法。

**物理性能**: 密度、熔点、导热性、热膨胀性、电性能、磁性能等;

**化学性能**: 耐腐蚀性和抗氧化性，在本节中将有关的概念作简要的说明

## 1. 物理性能—密度

密度: 同一温度下单位体积物质的质量，单位  $\text{g}/\text{cm}^3$  或  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

轻金属: 相对密度小于  $4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ , Al ( $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 、 Mg ( $1.74 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 及其合金；

重金属: 相对密度大于  $4.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ , Cu ( $8.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 、 Fe ( $7.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 、 Pb、Zn、Sn 等。

## 1. 物理性能—熔点

熔点: 材料的熔化温度。

陶瓷的熔点一般都显著高于金属及合金的熔点；

高分子材料一般不是完全晶体，所以没有固定的熔点。

## 1. 物理性能—热膨胀

热膨胀性: 材料受热后的体积膨胀，通常用线膨胀系数表示对精密仪器或机器的零件，热膨胀系数是一个非常重要的性能指标；

在异种金属焊接中，常因材料的热膨胀性相差过大而使焊件变形或破坏。一般，陶瓷的热膨胀系数最低，金属次之，高分子材料最高。



# 1.2 材料的物理、化学和工艺性能

## 1. 物理性能—导热性

导热性：材料热传导的能力；用其导热系数来表示制件材料的导热性愈差，零件在加热或冷却时，由于表面和内部产生温差，膨胀不同，便会产生破裂。

金属及合金的导热系数远高于非金属材料。在金属中，以银为最好，铜和铝次之。

## 1. 物理性能—导电性

- 导电性：材料的导电性一般用电阻率表示。
- 金属的电阻率随温度升高而增加，而非金属材料则与此相反。
- 金属及其合金一般具有良好的导电性，银的导电性最好，铜、铝次之。



## 1. 物理性能—磁性

- 磁性：材料能导磁的性能
- 许多金属如铁、镍、钴等均具有较高的磁性。但也有许多金属（如铝、铜、铅等）是无磁性的。



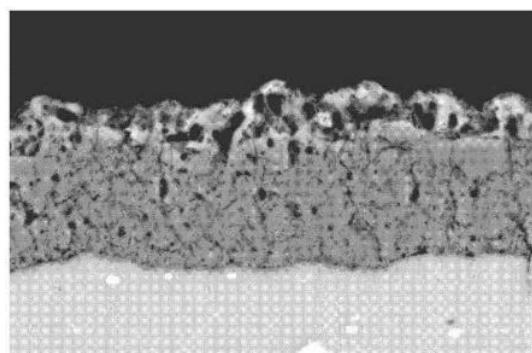
## 2. 化学性能—耐腐蚀性

- 耐腐蚀性：材料抵抗各种介质侵蚀的能力。
- 非金属材料的耐蚀性能总的来说远远高于金属材料。



## 2. 化学性能—抗氧化性

- 抗氧化性：材料抵抗高温氧化的能力。
- 抗氧化的材料常在表面形成一层致密的保护膜，来阻碍氧的进一步扩散。

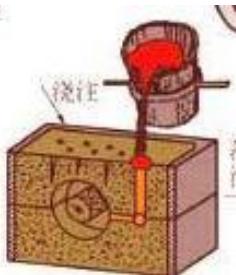


## 1.2 材料的物理、化学和工艺性能

材料工艺性能是其力学性能、物理性能、化学性能的综合。工艺性能的好坏，影响制造零件的工艺方法和质量以及制造成本

### 3. 工艺性能—铸造性

- 指浇注铸件时，液体金属能充满比较复杂的铸型并获得优质铸件的性能；
- 流动性好、缩率小、偏析倾向小是铸造性好的衡量指标；



### 3. 工艺性能—可锻造性

- 锻造性是指材料是否易于进行压力加工（包括锻造、压延、拉拔、轧制等）的性能。
- 锻造性的好坏主要以材料的塑性变形能力及变形抗力来衡量。一般来说，钢的锻造性良好，而铸铁不能进行任何压力加工。



## 1.2 材料的物理、化学和工艺性能

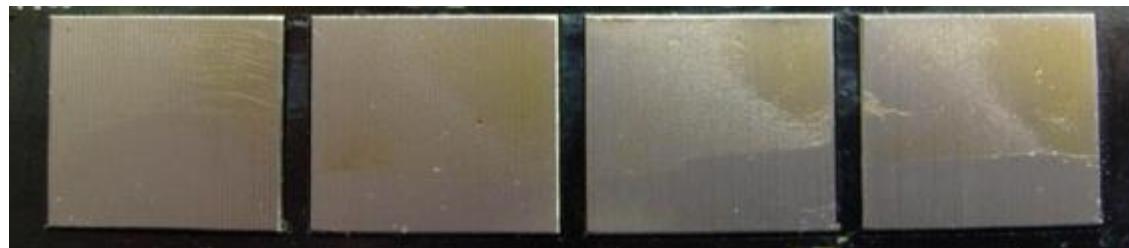
### 3. 工艺性能—可焊性

- 材料是否易于焊接在一起并能保证焊缝质量的性能，用焊接处出现各种缺陷向来衡量；
- 低碳钢具有优良的可焊性，而铸铁和铝合金的可焊性就很差。



### 3. 工艺性能—切削加工性

- 材料容易被切削加工成形并得到精确的形状和高的表面粗糙度的能力；
- 切削加工性与材料种类、成分、硬度、韧性、导热性，组织状态等许多因素有关；
- 有利切削的硬度为HB160~230。



课后作业：1, 2, 5



感谢同学们的聆听！



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠