

《材料加工》课程工艺部分

# 金属塑性加工 Metal Forming Processes

清华大学机械工程系

材料加工工程及自动化研究所  
Institute of Material Processing & Automation (MPA)

材料加工技术研究所  
Institute of Material Processing Technology (MPT)

# 课程内容

---

- 金属塑性成型的基本知识 (Basic Concept)
- 锻造工艺 (Forging)
- 冲压工艺 (Stamping)
- 模具设计 (Die design)



# 考核方式

---

- 期末考试 ( 70% )
- 上课和作业 ( 30% )



# 传统课程内容

- 冲压工艺学
- 锻造工艺学
- 加热炉
- 锻压测试技术
- 液压传动原理
- 液压机
- 曲柄压力机
- 锻锤

金属学（材料学）

力学（弹塑性力学）

机械结构分析

热力学

自动控制技术

计算力学（数值模拟）



# 本节内容

---

- 1.1 塑性加工的历史发展
- 1.2 锻压工艺的应用
- 1.3 锻压工艺的分类、特点
- 1.4 塑性加工的基本原理
  - 1.4.1 金属学
  - 1.4.2 塑性加工力学
- 1.5 金属的塑性及其影响因素
- 1.6 塑性变形量的表达



# 1.1 塑性加工的历史发展



# History of Metal Forming Technology

Egypt: ~3100B.C. to ~300B.C.

Greece: ~1100B.C. to 146B.C.

Roman empire: ~500B.C. to ~476A.D.

Middle Ages: ~476 to 1492

Renaissance: 14<sup>th</sup> to 16<sup>th</sup> centuries

- ❖ Before 4000 B.C. Hammering
- ❖ 4000~3000B.C. Stamping, jewelry
- ❖ 3000~2000B.C. Wire by cutting sheet and drawing; gold leaf
- ❖ 1000~ B.C. Stamping of coins
- ❖ 1~1000 A.D. Armor, coining, forging, steel swords
- ❖ 1000~1500 Wire drawing, fold and silver smithwork
- ❖ 1500~1600 Water power for metalworking  
rolling mill for coinage strips



# History of Metal Forming Technology

Industrial revolution: ~1750 to 1850.

- ❖ 1600~1700      Rolling(lead, gold, silver), shape rolling (lead)
- ❖ 1700~1800      Extrusion (lead pipe), deep drawing, rolling (iron bars and rods)
- ❖ 1800~1900      Steam hammer, steel rolling, seamless tube piercing, steel rail rolling, continuous rolling





# History of Metal Forming Technology

1st world war

2nd world war (1900~1920)

- |           |  |
|-----------|--|
| 1900~1920 | Tube rolling, hot extrusion  |
| 1920~1940 | Tungsten wire from powder  |
| 1940~1950 | Extrusion (steel), swaging,<br>power metals for engineering parts        |
| 1950~1960 | Cold extrusion (steel), explosive forming,<br>thermomechanical treatment |



# History of Metal Forming Technology

## Space age

- ❖ 1960~1970 Hydrostatic extrusion: electroforming
- ❖ 1970~2000 Precision forging
  - isothermal forging
  - superplastic forming
  - dies made by computer-aided design
  - CAD, CAE and CAM for manufacturing
  - rapid prototyping
  - net shape forming
  - HydroForming



# 1.2 锻压工艺的应用

机械  
航空  
航天  
船舶  
军工  
仪器仪表  
电器  
日用五金



# 1.3 金属塑性成形的分类、特点

## 锻压 (Metal forging and stamping)

### 1. 体积成形 (Bulk Metal Forming):

#### 1.1 锻造 (Forging)

1.1.1 自由锻造

1.1.2 模锻

#### 1.2 挤压 (Extrusion)

#### 1.3 拉拔 (Drawing)

### 2. 板料成形 (Sheet Metal Forming)

#### 2.1 冲裁 (blanking)

#### 2.2 弯曲 (Bending)

#### 2.3 拉深 (Deep drawing)

#### 2.4 翻边 (flanging)

#### 2.5 胀形 (Bulging)

## 轧制 (Rolling)

板材轧制

型材轧制

横轧

纵轧



辊锻, 楔横  
轧, 辊环, 辊  
弯



# 汽车曲轴锻造（体积成形）



# 阶梯轴类零件的楔横轧



# 高温合金涡轮盘锤锻（体积成形）

---



# 汽车中的锻件





# 体积成形

体积成形主要是指那些利用锻压设备和工、模具，对金属坯料（块料）进行**体积重新分配**的塑性变形，得到所需形状、尺寸及性能的制件。

主要包括**锻造（Forging）**和**挤压（Extrusion）**两大类。前者在成形过程中，变形区的形状随变形的进行而发生改变，属于**非稳定塑性变形**；后者在变形的大部分阶段变形区的形状不随变形的进行而改变，属于**稳定塑性变形**。



# 汽车覆盖件成形（板料成形）

---



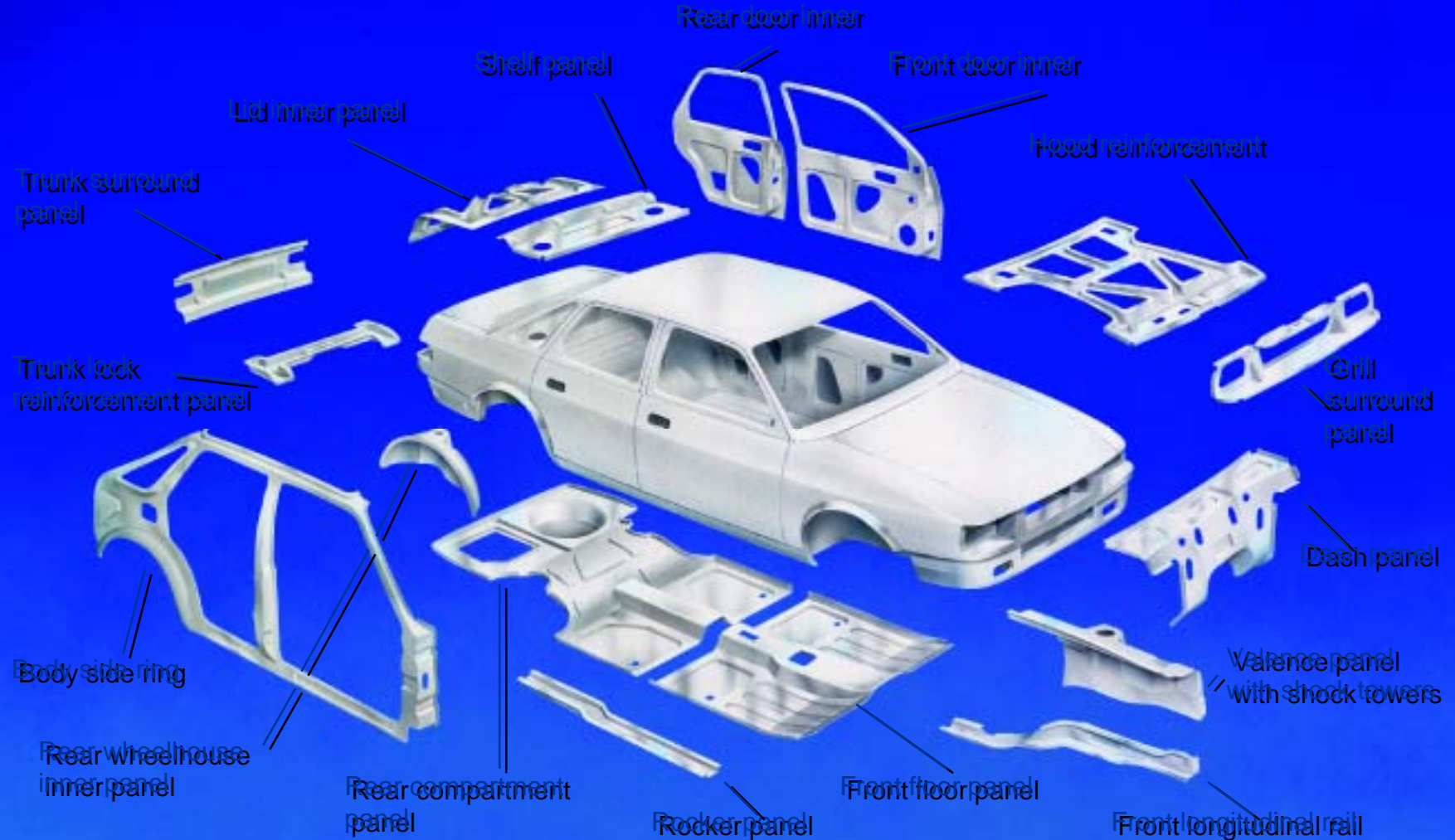
# 汽车前翼子板成形（板料成形）



# 圆筒的拉深成形（板料成形）



# 汽车中的冲压件（钣金）



# 板料成形

- 板料成形又称为冲压，这种成形方法通常都是在常温下进行，所以也称为**冷冲压**。按照金属的变形性质又可以分为分离工序和成形工序。
- **分离工序**主要是利用冲模在压力机外力的作用下，使板料分离出一定的形状和尺寸工件的冲压工序。它包括落料、冲孔、切断、切边、剖切等工序。
- **成形工序**是利用冲模在压力机外力的作用下，使板料产生塑性变形而得到相应工件的冲压工序。主要包括弯曲、拉深、翻边、胀形、扩口、缩口、旋压等。



# 锻压工艺的特点

☺材料利用率高

☺成形件力学性能好

☺尺寸精度高（相对）

☺生产效率高

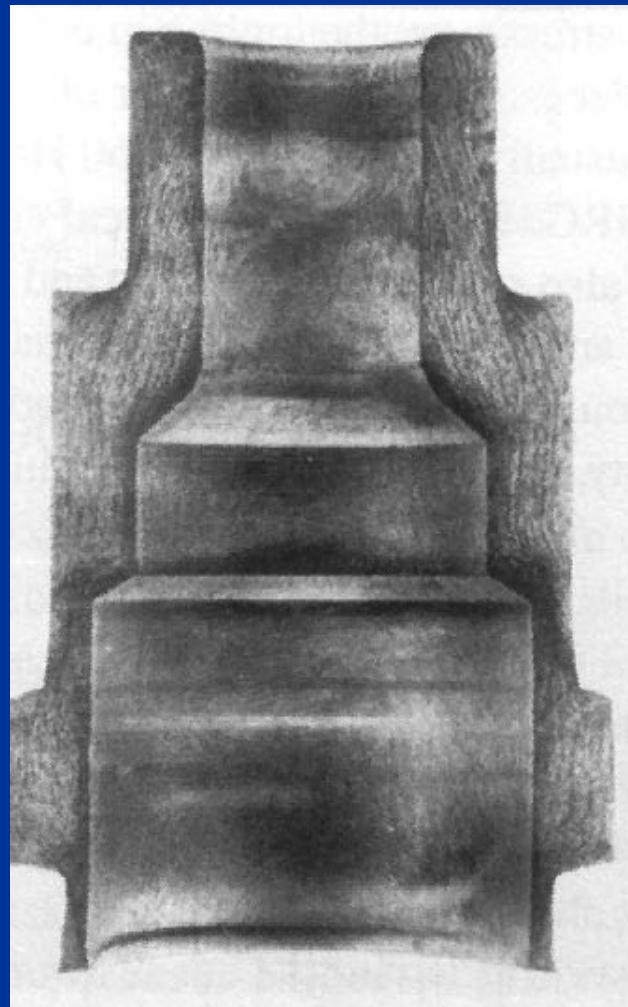
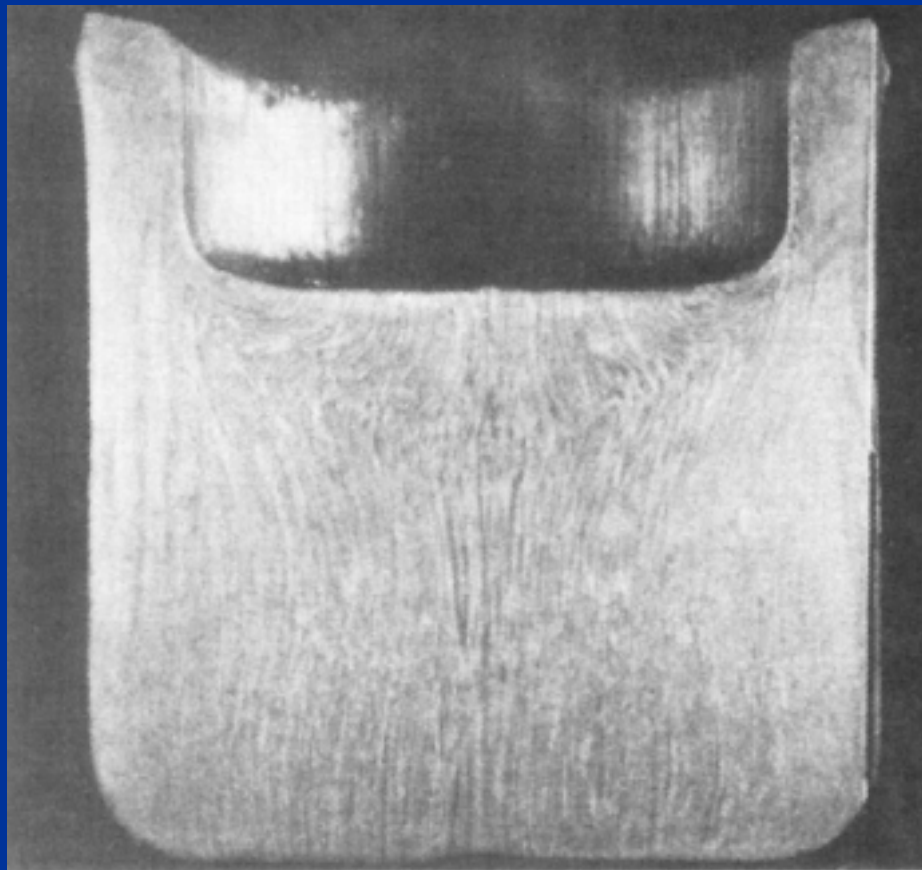
☹劳动条件差、强度高

☹易污染

☹投资成本高、产品附加值低



# 连续的金属纤维有利于提高制件的强度





# 1.4 金属塑性成形原理

---

- 1.4.1 滑移和孪晶
- 1.4.2 变形量的表达（应变）
- 1.4.3 金属的塑性
- 1.4.4 屈服强度、流动应力
- 1.4.5 塑性变形区的分析



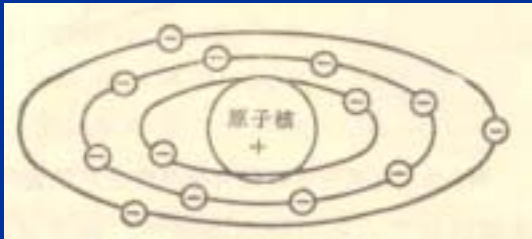
# 1.4.1 滑移和孪晶

---

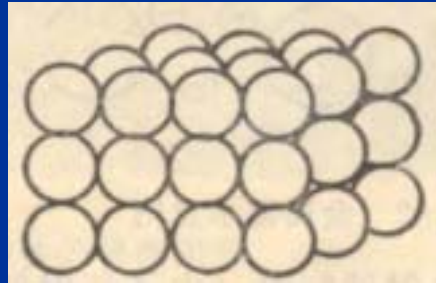
- 金属——显微组织——晶体——原子
- 典型晶格结构: 体心立方 ( Body-Centered Cube **BCC** )  
面心立方 ( Face-Centered Cube **FCC** )  
密排立方 ( Close-Package Hexagonal **CPH** )
- 金属变形 : 晶粒内部变形 + 晶界变形
- 晶内变形 : 滑移 ( slipping ) 和孪晶 ( twin crystal )



# 金属结构



原子结构



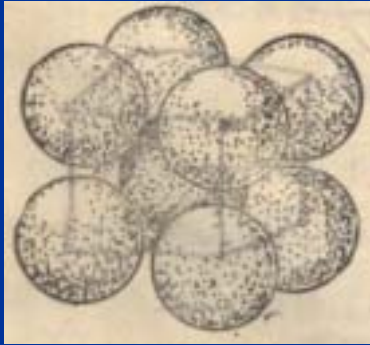
晶体结构



显微结构



# 典型金属晶体结构



体心立方

( Body Centered Cube )

( $\alpha$ - Fe、 Cr、 W、 V、 Mo)



面心立方

( Face Centered Cube )

(Al、 Cu、  $\gamma$ -Fe、 Ni)



密排立方

( Close-package Hexagonal )

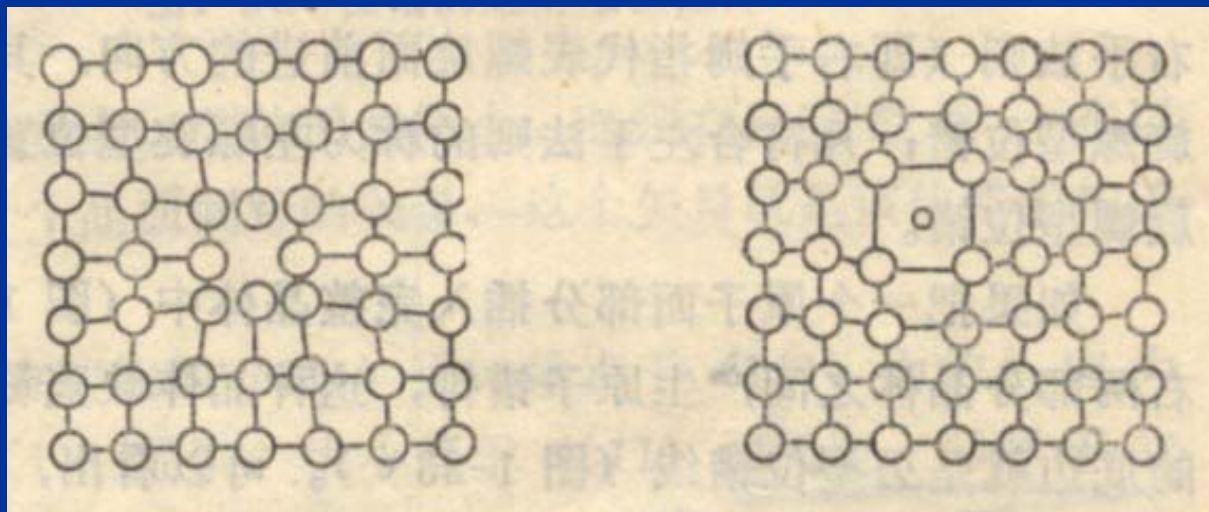
(Mg、 Zn、 Cd、  $\alpha$ -Ti)



# 金属晶体缺陷

- 点缺陷
- 线缺陷
- 面缺陷

## 点缺陷



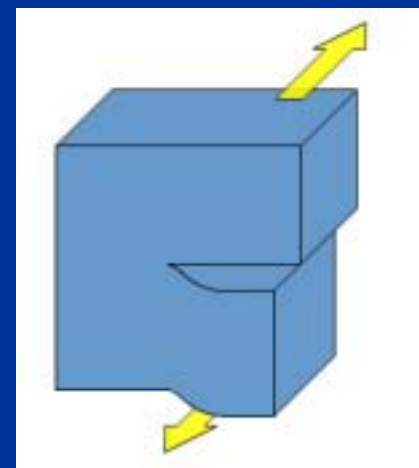
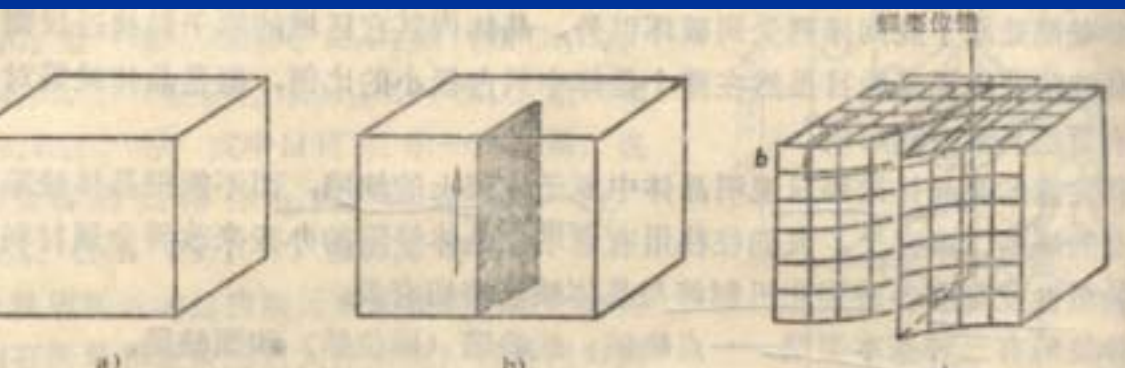
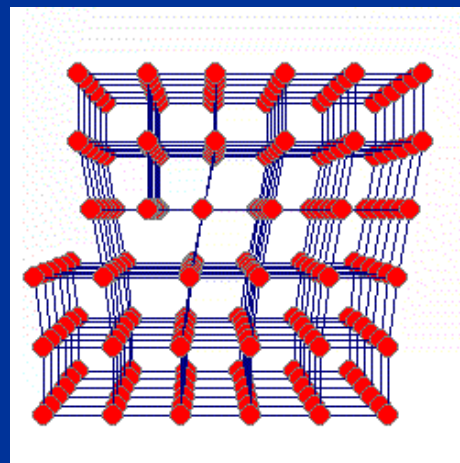
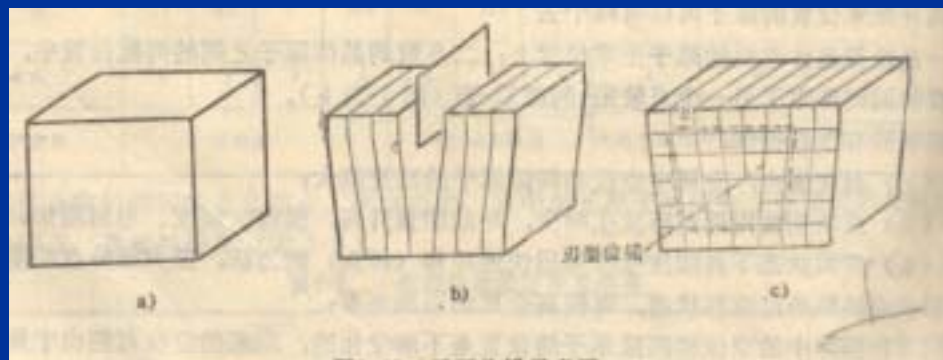
空位

间隙原子



# 位错种类

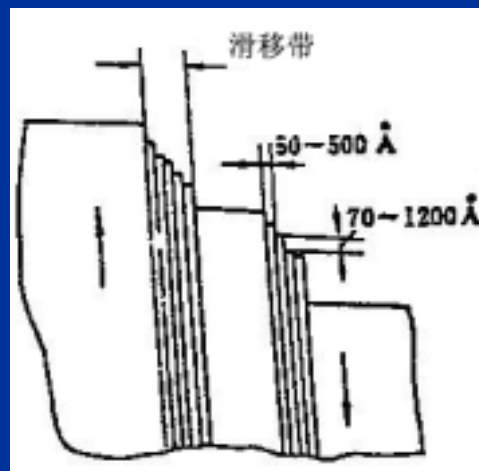
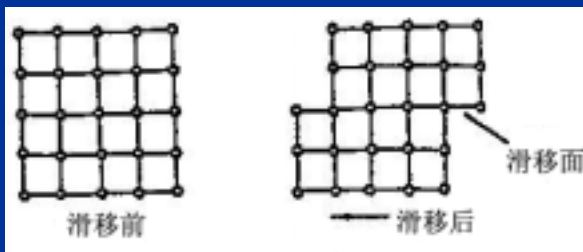
- 刃型位错
- 螺型位错



# 滑移

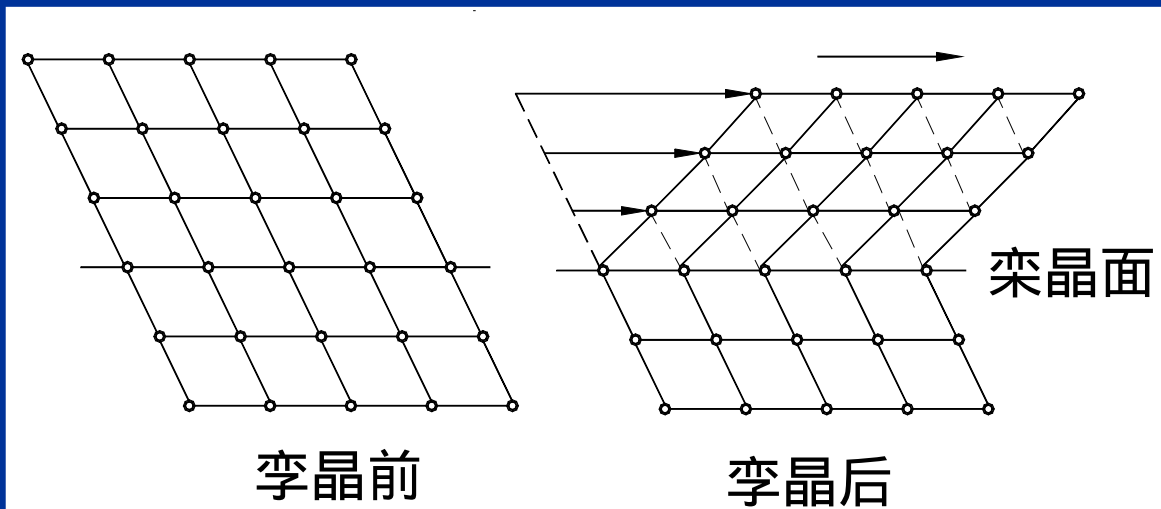


滑移带 500倍



# 孪晶

## ■ 对称排列

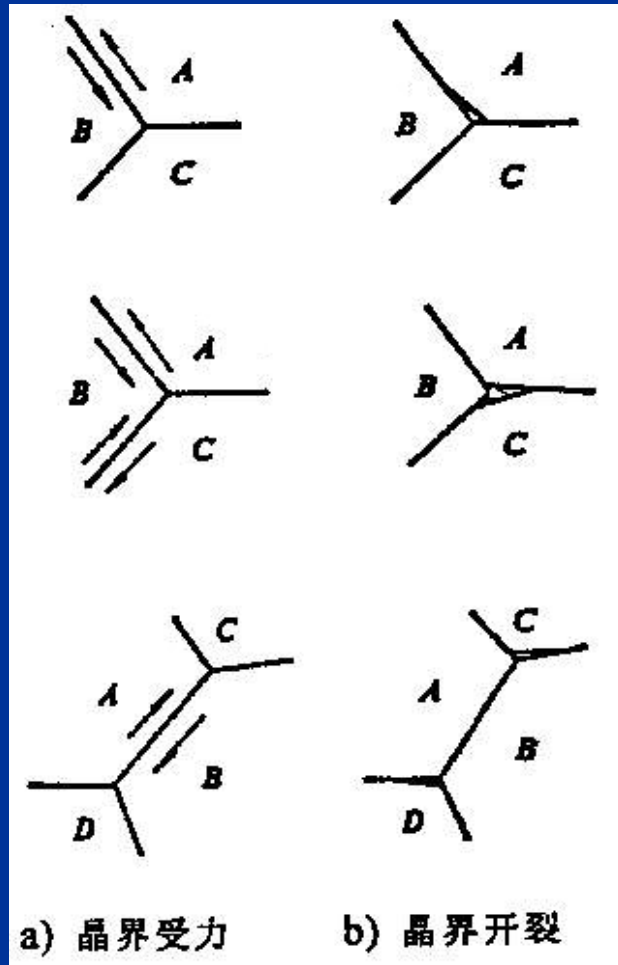


工业纯铁 孪晶 100倍





# 晶界变形



# 1.5 金属（钢）的塑性及其影响因素

---

- ❖ 化学成分的影响
- ❖ 组织状态的影响
- ❖ 相态和组织结构的影响
- ❖ 温度的影响
- ❖ 变形速度的影响
- ❖ 应力状态的影响
- ❖ 如何提高塑性



## 1.5.1 化学成分对塑性的影响

---

- **碳** 少量有利 过量有害 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
- **磷** 有害, “冷脆”
- **硫** 有害, “热脆”
- **氮** 有害, “时效脆性”
- **氢** “氢脆” “白点”
- **氧** 与其它杂质结合 有害
- **合金** 总体上使钢的脆性降低



## 1.5.2 组织状态对塑性的影响

---

### ■ 单相与多相

单向组织塑性优于多相组织

### ■ 晶粒细化程度

细晶粒组织有利于提高塑性

### ■ 铸造组织

粗大柱状晶粒及铸造缺陷



## 1.5.3 成形温度对塑性的影响

---

- 随着温度升高，塑性增加
- 在加热过程的某些温度区间，过剩相析出和相变的原因，会产生脆性
- 碳钢
  - 蓝脆: 200-350°C 渗碳体析出
  - 热脆: 800-950°C Pearlite → Austenite
  - 高温脆区: 1300°C 过热、过烧



## 1.5.4 成形速度对塑性的影响

---

- 热效应和温度效应
- 增加成形速度使金属晶体的临界剪应力升高，断裂强度过早达到。塑性降低
- 增加成形速度，温度效应显著，塑性升高
- 增加成形速度，来不及回复和再结晶，塑性降低。
- 综合因素分析 材料性质、工件形状、温度成形速度范围等



## 1.5.5 应力状态对塑性的影响

---

- 压缩优于拉伸
- 静水压应力越大，塑性越高



## 1.5.6 提高塑性的措施

---

- 提高材料的成分和组织均匀性
- 合理选择成形温度和成形速度
- 选择三向受压较强的变形方式
- 减少变形的不均匀性





## 1.6 塑性变形的表达

---

工程应变：改变量/初始尺寸

$$\delta L/L_0$$

对数应变（真实应变）： $\ln(\text{变形后尺寸}/\text{初始尺寸})$

$$\ln(L_1/L_0)$$



# 工程应变

- 设坯料原来的高度 $H_0$ ，压缩后高度为 $H_1$ ，高度差 $\Delta H = H_1 - H_0$ ，工程应变为

$$e = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 (\%)$$



# 对数应变

- 真实应变（对数应变）：在变形过程中，如原始尺寸 $L_0$ 经过无穷多个中间数值逐渐变到 $L_1$ ，则由 $L_0$ 变到 $L_1$ 终了的应变程度可以看作是各阶段相对应变的总和，这个总和称为对数应变或真实应变。
- $\varepsilon = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l}{l_i}$  表达成积分形式  $\varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl_x}{l_x} = \ln l_x \Big|_{l_0}^{l_1} = \ln \frac{l_1}{l_0}$
- 例如高100mm的坯料被压缩到高为40mm时，对数应变  $\varepsilon = -0.9163$ 。



## 对数应变具有下列作用：

- 1 一般大变形情况下，工程应变不能确切地反映工件真实的应变程度；在小变形情况下，两者相差不多，例如，工程应变为10%时，对数应变为0.095。

- 2 . 工程应变和对数应变的关系

$$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \left( \frac{l_0 + (l_1 - l_0)}{l_0} \right) = \ln(1 + e)$$

- 3 . 在分次成形时，对数变形指标能够相加。  
例如：毛坯到工件的长度的变化 $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$

$$\varepsilon = \ln \frac{L_3}{L_1} \quad \varepsilon' = \ln \frac{L_2}{L_1} \quad \varepsilon'' = \ln \frac{L_3}{L_2}$$

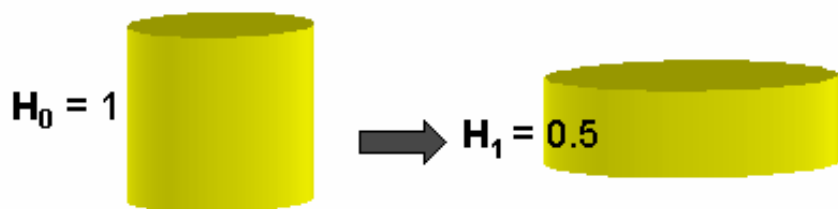
$$\varepsilon' + \varepsilon'' = \ln \frac{L_2}{L_1} + \ln \frac{L_3}{L_2} = \ln \frac{L_3}{L_1} = \varepsilon$$



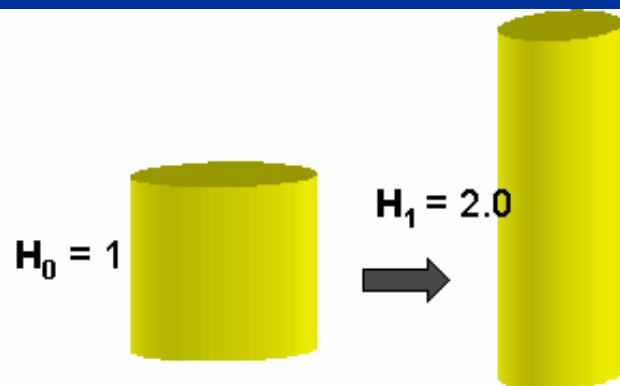
- 
- 4. 对数应变是可以比较的应变。
  - 例如有两个试件，其中试件1长度为 $L$ ，被拉伸成长度为 $2L$ ；试件2长度为 $2L$ ，被压缩成长度为 $L$ 。
  - 用工程应变来衡量，试件1的工程应变为 $e_1=100\%$ ，试件2的工程应变为 $e_2=-50\%$
  - 可以看出，对于这样实际上变形程度一样的情况，用工程应变来衡量两者相差却很多；
  - 用对数应变来衡量，试件1的对数应变为 $\varepsilon_1=\ln 2=0.6931$ ，试件2的对数应变为 $\varepsilon_2=\ln 0.5=-0.6931$ ，
  - 显然对数应变能够准确地表达大变形的变形程度。



# 两种应变的比较



**Engineering Strain = 0.5**  
**True Strain = -0.69**

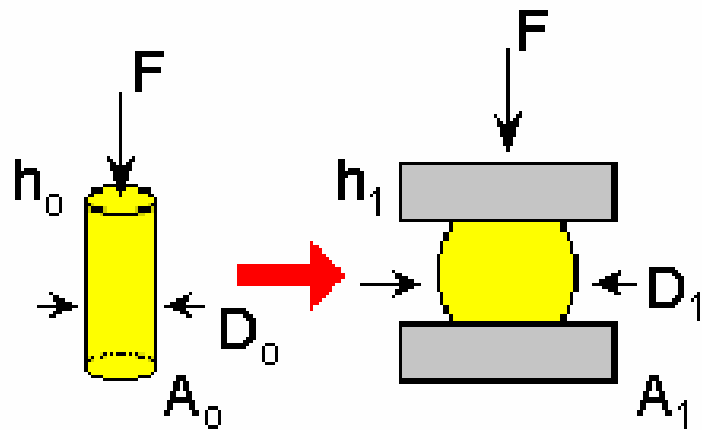


**Engineering Strain = 1**  
**True Strain = 0.69**



# 压缩中的工程应变

## Compression test



Engineering  
Stress

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0}$$

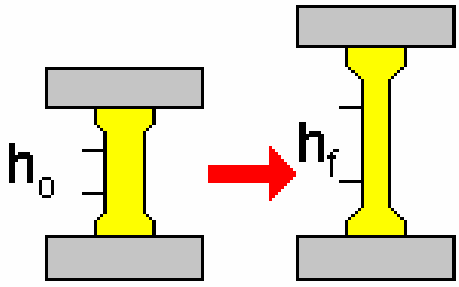
Engineering  
Strain

$$\epsilon_{eng} = \frac{\Delta h}{h_0}$$



# 拉伸中真实应变

Tension test



The diagram illustrates a tension test. On the left, a yellow specimen is shown in its initial state, held between two gray grips. A vertical dimension line indicates its initial height as  $h_0$ . A red arrow points to the right, where the specimen is shown in its final state, stretched between the same grips. A vertical dimension line indicates its final height as  $h_f$ .

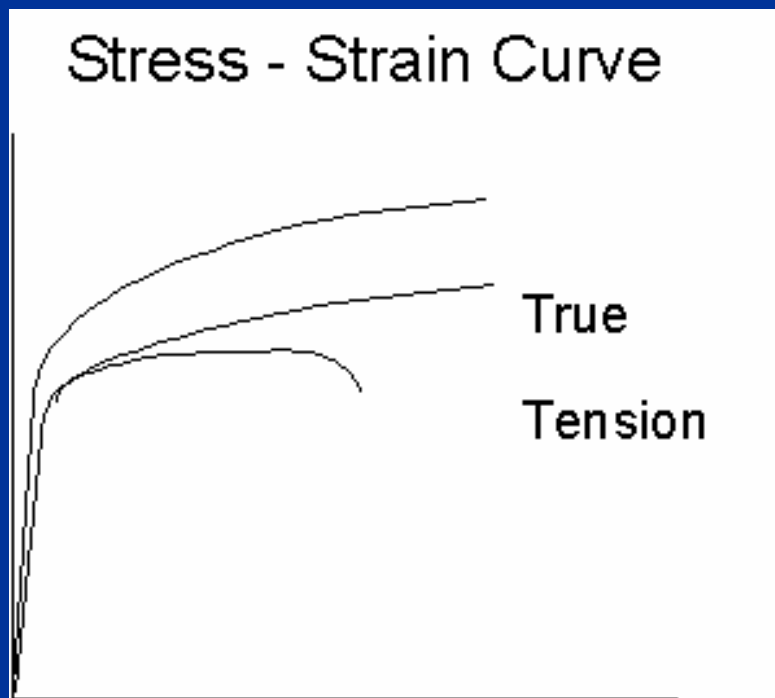
True Stress  $\sigma_T = \sigma_{eng} (1 + e)$

True Strain  $\epsilon_T = \ln \left( \frac{h_f}{h_0} \right)$





# 应力应变曲线



# 其他塑性变形量的表达

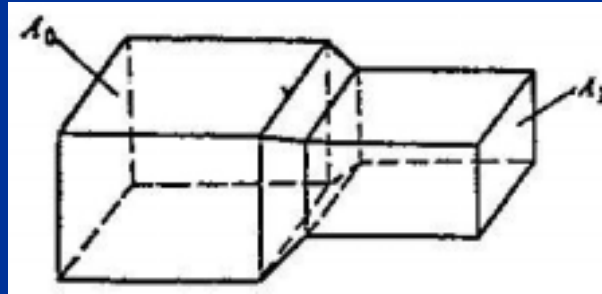
---

- 锻比
- 断面收缩率
- 体积不变规则



# 锻比（挤压比）

变形前后的截面积比值



$$K = \frac{A_0}{A_1}$$



# 断面收缩率

---

$$\psi(R) = \frac{A_0 - A_1}{A_0}$$



# 体积不变规则

$$\varepsilon_L + \varepsilon_B + \varepsilon_H = 0$$

在金属塑性成形中，三个相互垂直方向的均匀变形量不能同时都是伸长，或同时都是压缩。三个相互垂直的方形满足下列关系：

- 1 一个方向压缩，另外两个方向都伸长，如镦粗
- 2 两个方向压缩，第三个方向伸长，如挤压或拔长
- 3 一个方向长度不变，其余两个方向一为伸长、另一个为压缩，如平面变形

