

# 第3章 水工艺设备理论基础

## 主要内容

- 1、容器应力理论
- 2、机械传动理论
- 3、机械制造工艺
- 4、热量传递与交换理论

## § 3.1 容器应力理论

### § 3.1.1 容器概述

#### 一、容器概念

容器：是设备外部壳体的总称。

薄壁容器：容器壁厚 $t$ 与曲率半径 $R$ 之比一般小于 $1/10$ 。即  $(t/R)_{\max} \leq 1/10$

#### 二、容器的分类

##### (1) 按容器形状分为

① 方形或矩形容器——由平板焊成

特点：制造简单，便于布置和分格，但承压能力差。

② 球形容器——由数块球瓣板拼焊而成(类似篮球)

特点：承压能力好且相同表面积时容器容积最大，但制作麻烦且不便于安置内部构件

③ 圆筒形容器——由圆柱形筒体和各种形状的封头组成

特点：制造较为容易，便于安装各种内部构件，且承压性能较好。

## (2) 按容器承压情况分为

①常压容器：容器仅承受容器内介质的静压力，一般为开口容器。

②内压容器：容器内部介质压力大于外界压力的容器。

按介质工作压力 $P_w$ 的大小，内压容器可分为低压（0.1~1.6MPa）、中压（10~100MPa）和高压容器（>100MPa）。

③外压容器：容器内介质压力小于外界压力的容器。

## (3) 按容器组成材料分为

①金属容器

②非金属容器

## (4) 按容器内有无填料分为

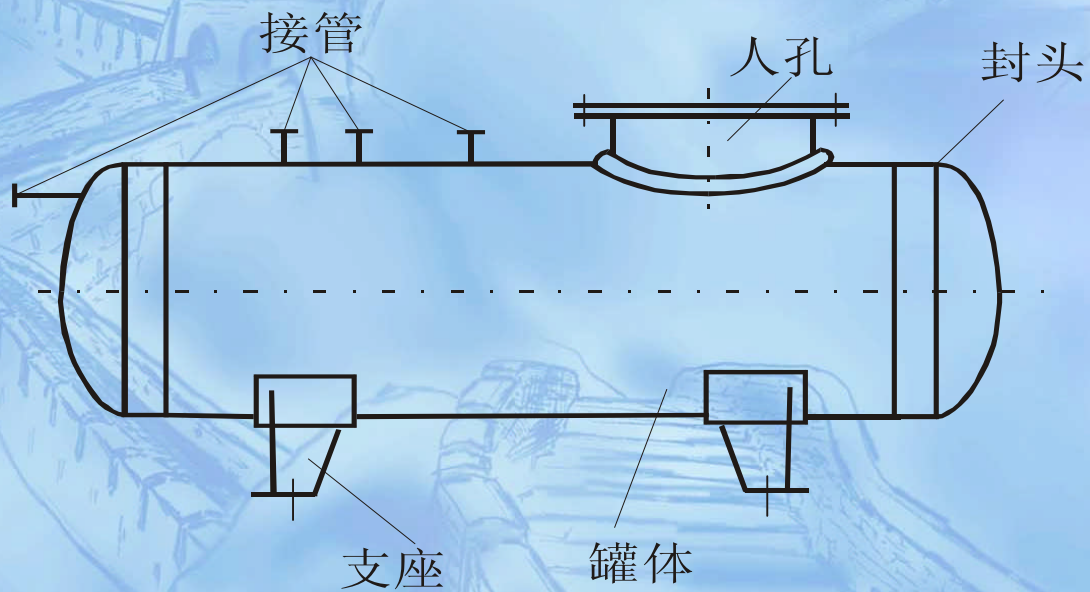
①无填料容器

②填料容器

(本章中仅讨论水工艺中使用最多的钢制内压容器。)

### 三、容器结构(以圆筒形容器为例)

容器一般由筒体（又称筒身）、封头（又称端盖）、法兰、支座、进出管及人孔（或手孔）视镜等组成（如图所示）。



圆筒形容器结构

## 四、容器设计的基本要求

### (1) 工艺要求

容器的总体尺寸、接口管的数目与位置、介质的工作压力 $P_w$ 、填料的种类、规格、厚度等一般是根据工艺生产的要求通过工艺设计计算及生产经验决定。

### (2) 机械设计的要求

- ①强度：是容器抵抗外力而不破坏的能力。
- ②刚度：是容器抵抗外力使其不发生不允许变形的能力。
- ③稳定性：是容器或容器构件在外力作用下维持其原有形状的能力。
- ④严密性：容器必须具有足够的严密性，特别是承压容器和贮存、处理有毒介质的容器应具有良好严密性。
- ⑤抗腐蚀性和抗冲刷性：容器的材料及其构件和填充的填料要能有效的抵抗介质的腐蚀和水流的冲刷，以保持容器具有较长的使用年限。
- ⑥经济方面的要求：在保证容器和工艺要求和机械设计的要求的基础上，应选择较为便宜的材料以降低制作成本。
- ⑦制作、安装、运输及维修均应方便。

### § 3.1.2 回转曲面与回转薄壳

1、回转曲面：以一条直线或平面曲线作母线，绕其同平面的轴线（即回转轴）旋转一周就形成了回转曲面。

2、回转薄壳：以回转曲面作为中间面的壳体称作回转壳体。内外表面之间的法向距离称为壳体厚度。对于薄壳，常用中间面来代替壳体的几何特性。

3、经线：在曲面上取一点C，过C点和回转轴OO' 作一平面，该平面与回转曲面的交线OB称作曲面的经线

4、纬线：过C点作与OO' 轴垂直的平面，该平面与回转曲面的交线为一个圆，称为回转曲面的平行圆，平行圆就是回转曲面的纬线。平行圆的圆心K<sub>3</sub>必在轴OO' 上，平行圆的半径CK<sub>3</sub>用r表示。

5、第一曲率半径：过C点作经线的法线CN，CN线上必有C点的曲率中心K<sub>1</sub>点，CK<sub>1</sub>是经线上C点的曲率半径，用ρ<sub>1</sub>表示，称C点的第一曲率半径。

6、第二曲率半径：过C点再作一个与经线OB在C点的切线相垂直的平面，该平面与回转曲面的交线为一条平面曲线，可以证明该曲线在C点的曲率中心K<sub>2</sub>必定在OO' 轴上，CK<sub>2</sub>称作点的第二曲率半径，用ρ<sub>2</sub>表示。

### § 3.1.3 回转薄壳的薄膜应力

#### (1) 经向薄膜应力-- (壳体平衡方程)

用一个与回转壳体中间面正交的圆锥面切割一承受内压的壳体，取截面以下的分离体进行研究。经推导得：

$$\sigma_m = \frac{p\rho_2}{2\delta}$$

式中： $p$ --介质内压力，MPa；

$\rho_2$ --壳体中间面在计算点处的第二曲率半径，mm；

$\delta$ --壳体壁厚，mm。

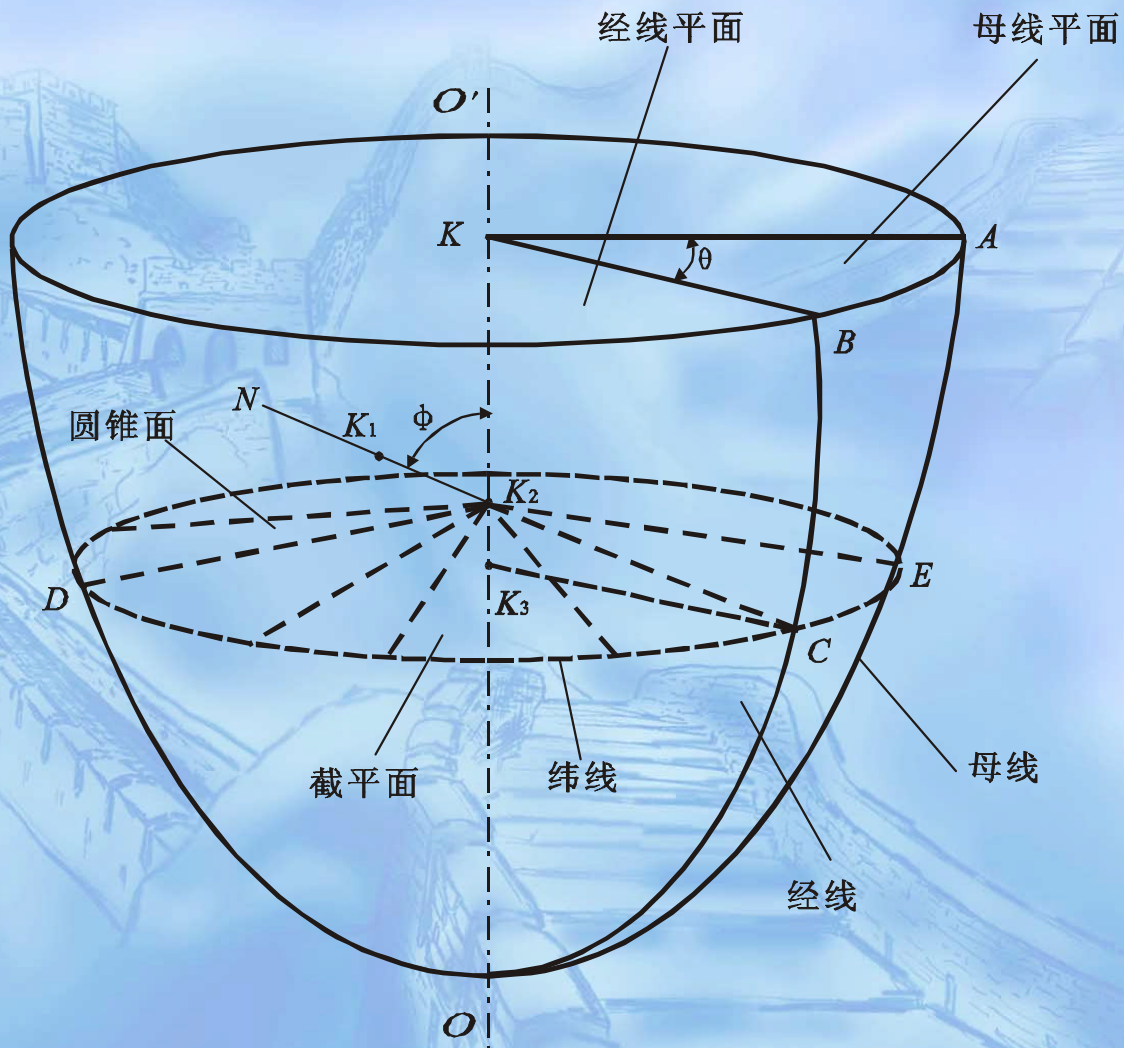
此式称作壳体平衡方程。

#### (2) 环向薄膜应力——(微体平衡方程又称拉普拉斯方程)

在壳体上用两对截面和壳体的内外表面截取一小单元体进行研究，如图示。经推导得：

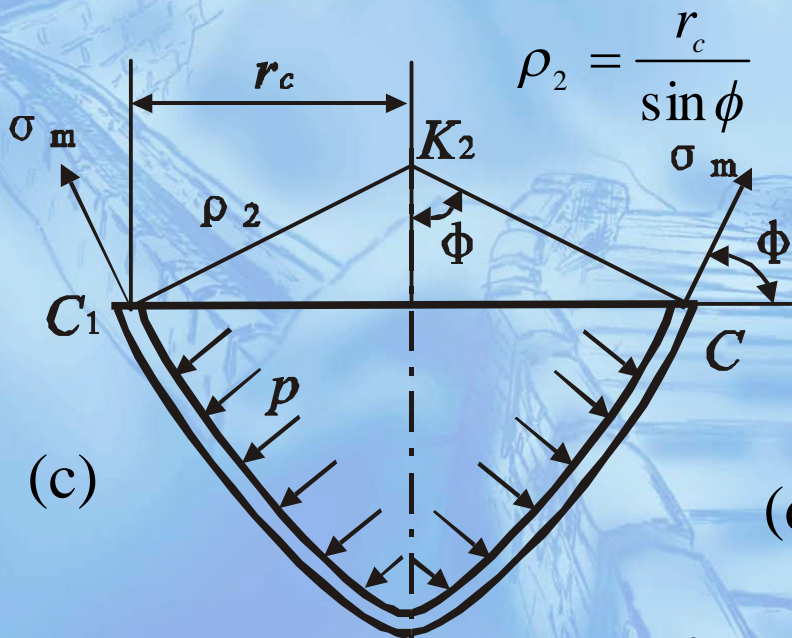
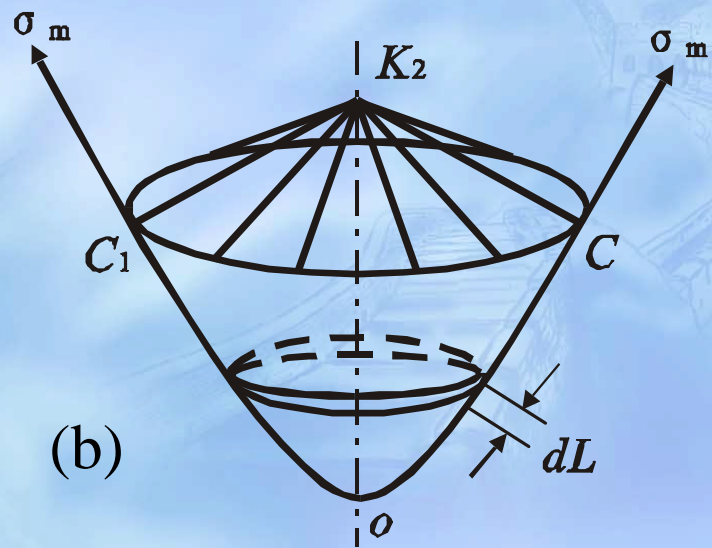
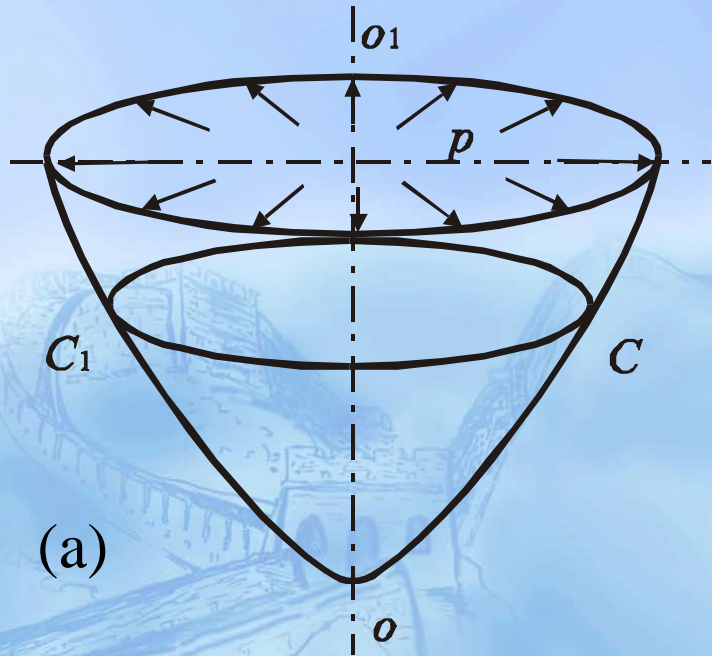
$$\frac{p}{\delta} = \frac{\sigma_m}{\rho_1} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_2}$$

这个公式称作微体平衡方程（又称拉普拉斯方程）。



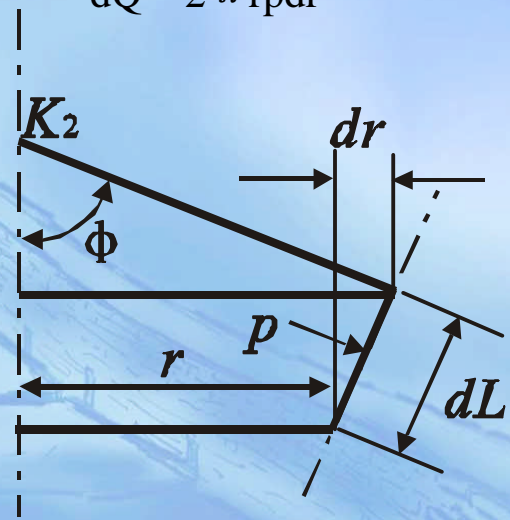
回转曲面





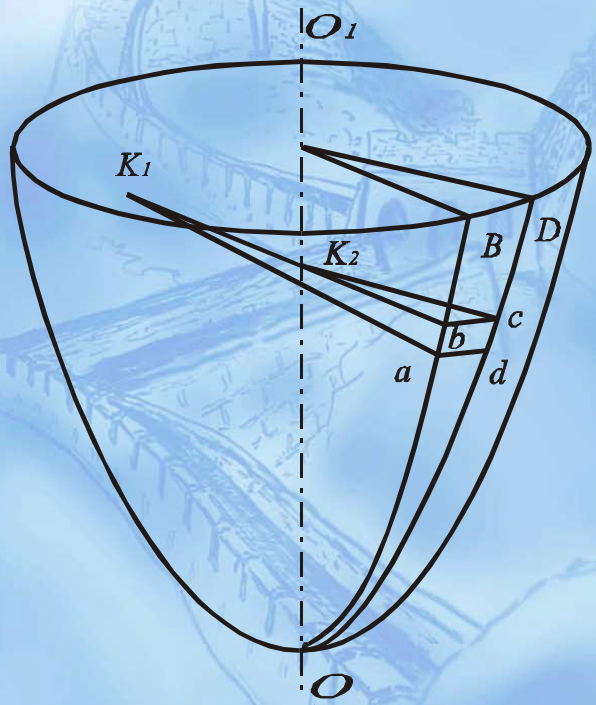
$$dQ = 2 \pi r p dL \cos \phi$$

$$dQ = 2 \pi r p dr$$

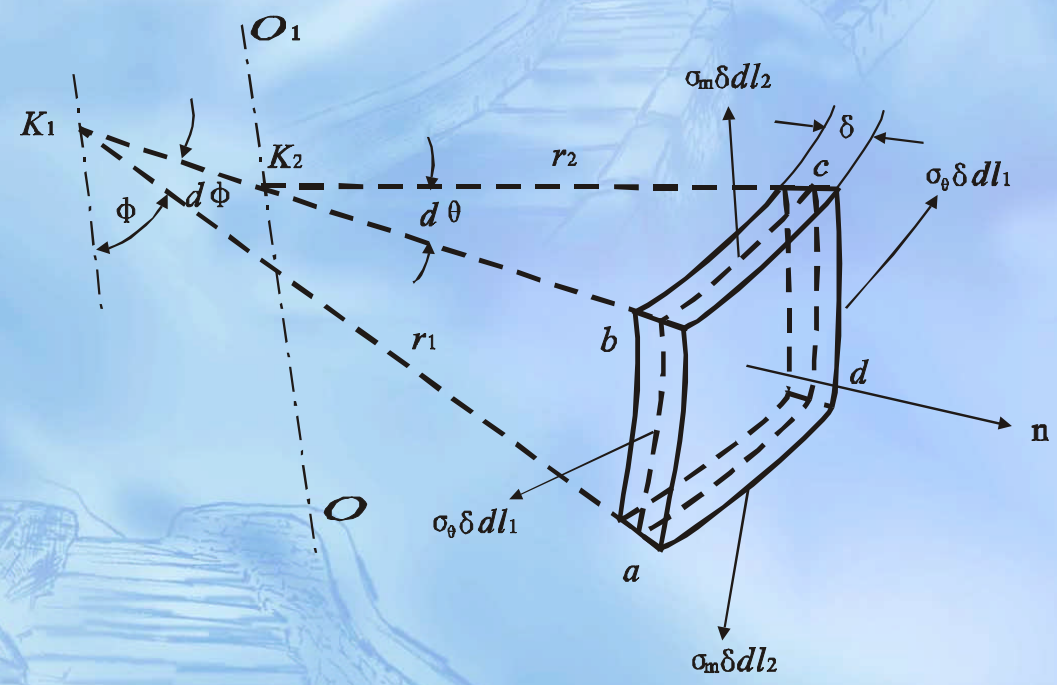


$$Q' = 2 \pi r_c \delta \sigma_m \sin \phi = \pi r_c^2 p$$

$$Q = 2 \pi p \int_0^{r_c} r dr = \pi r_c^2 p$$

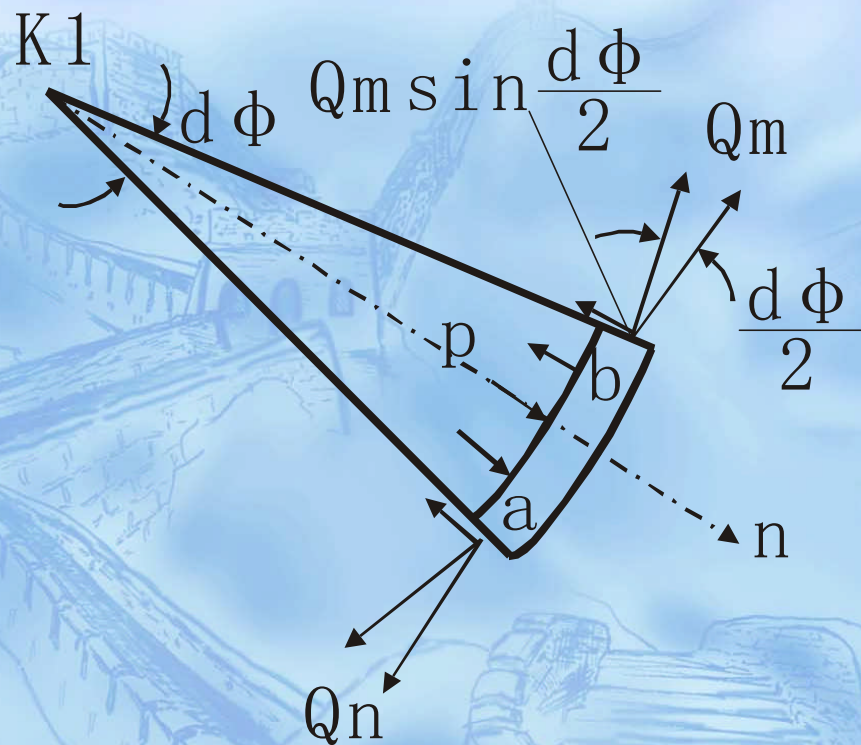


(a)

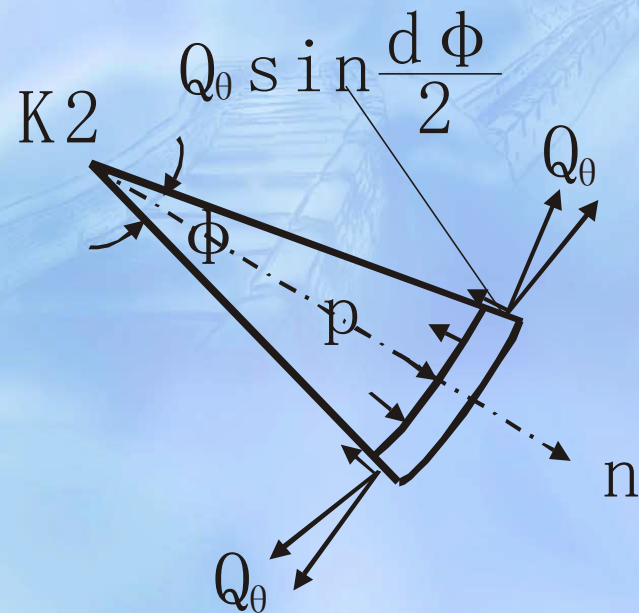


(b)

单元体截取及各截面上的应力



(a) 正视



(b) 俯视

$$p \, dl_1 \, dl_2 = 2 Q_m \sin \frac{d\varphi}{2} + 2 Q_\theta \sin \frac{d\theta}{2}$$

$\sigma_m$  和  $\sigma_\theta$  在法线上的分量

### § 3.1.4 内压薄壁容器的应力

#### 一、圆柱壳

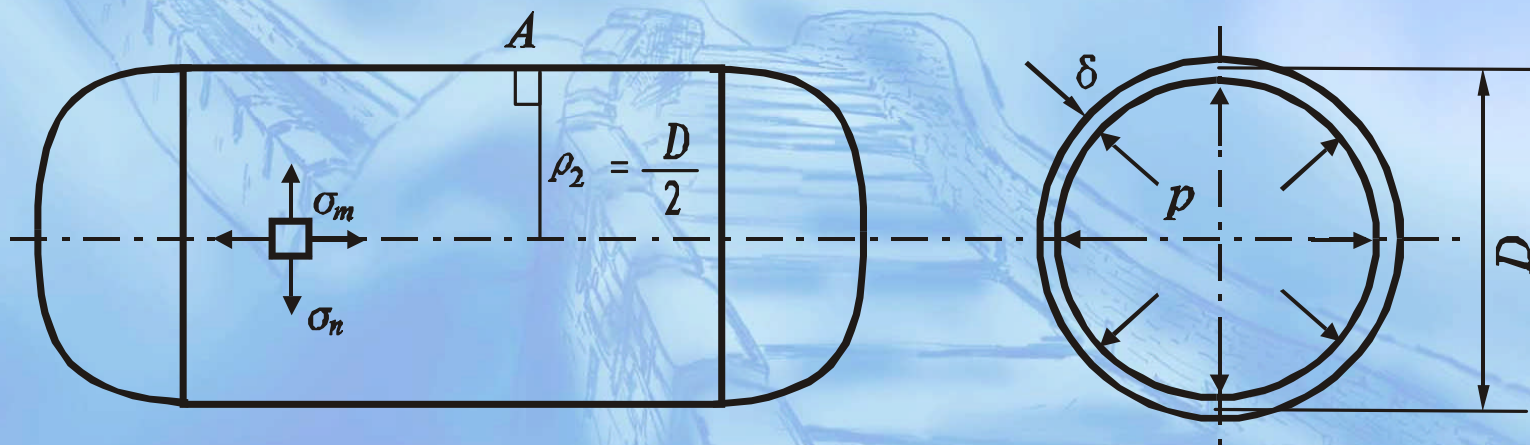
对于圆柱壳体，壳体上各点的  $\rho_1 = \infty$ 、 $\rho_2 = D/2$  (见P92页。)

可得

$$\sigma_m = \frac{pD}{4\delta} \quad \sigma_\theta = \frac{pD}{2\delta}$$

结论:(1)圆柱壳上的环向应力比经向应力大一倍。

(2)决定圆柱壳承压能力大小是中径与壳体壁厚之比，而不是壁厚的绝对数值。



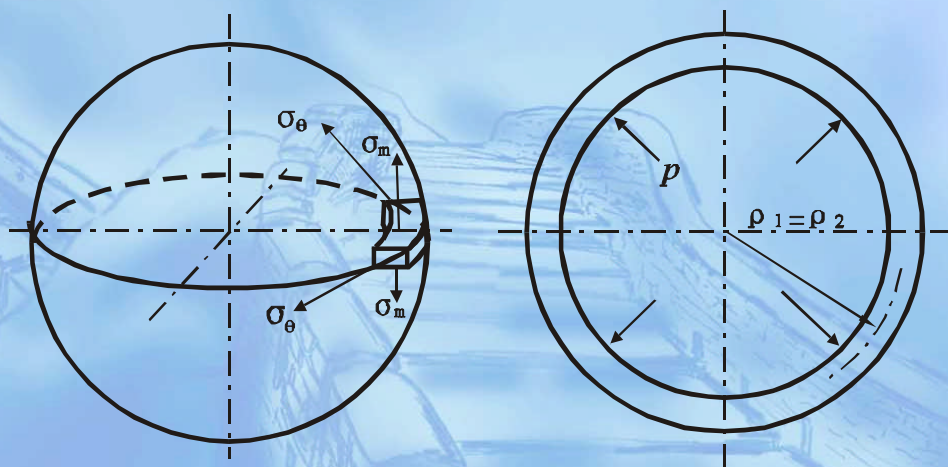
## 二、球壳的薄膜应力

球壳中面上的任一点的  $\rho_1$  和  $\rho_2$  均等于球壳的中面半径，可得

$$\sigma_m = \frac{pD}{4\delta} \quad \sigma_\theta = \frac{pD}{4\delta}$$

结论:(1)球壳上各点的应力相等，而且  $\sigma_m$  和  $\sigma_\theta$  也相等。

(2)球壳上的薄膜应力只有同直径同壁厚圆柱壳的环向应力的一半或者说等于经向应力



薄膜应力理论在球壳上的应用

### 三、椭圆壳（简述）

由四分之一椭圆曲线绕回转轴Oy旋转而形成的，见图示。

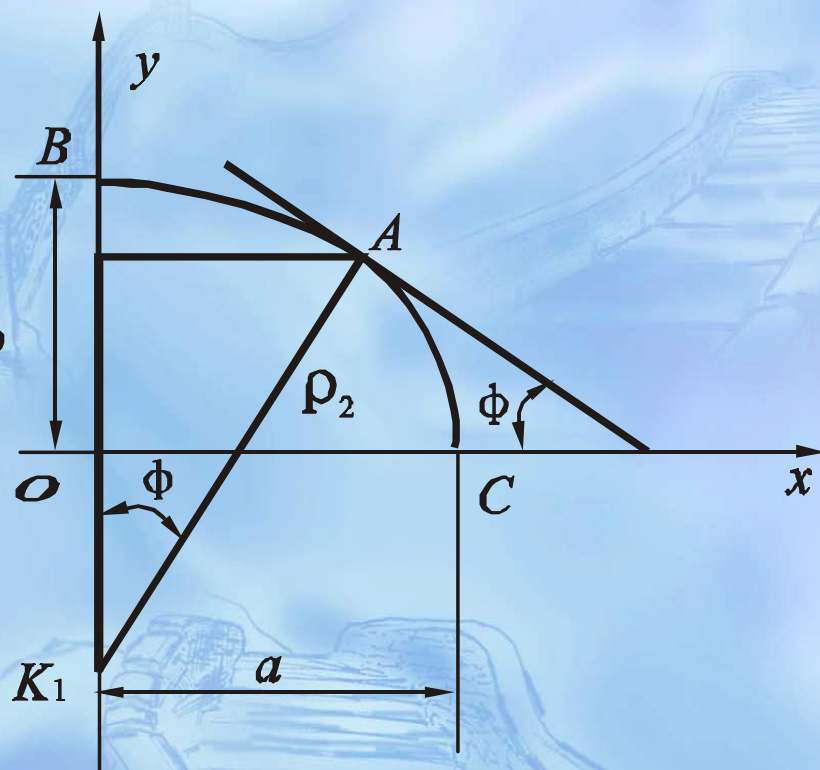
半椭球壳上各点的 $\sigma_m$ 和 $\sigma_\theta$ 可按下式分别计算。

$$\sigma_m = \frac{p}{2\delta} \frac{\sqrt{a^2 y^2 + b^4 x^2}}{b^2} \quad \sigma_\theta = \frac{p}{\delta} \frac{\sqrt{a^4 y^2 + b^4 x^2}}{b^2} \left[ 1 - \frac{a^4 b^2}{2(a^4 y^2 + b^4 x^2)} \right]$$

式中：**a**--半椭球壳长轴的一半；**b**--半椭球壳短轴的一半； $\delta$ --半椭球壳的壁厚；**x**，**y**--半椭球壳壳体上各点的横坐标和纵坐标；**p**--容器承受的内压力。

结论：

- (1) 椭球壳上各点的应力是不等的，它与各点的坐标（**x**，**y**）有关。
- (2) 椭球壳上应力的大小及其分布情况与椭球的长轴与短轴之比**a/b**有关，**a/b**值增大时，椭球壳上的最大应力将增大，椭球封头的**a/b**不应超过2。
- (3) 当**a/b**<2时，半椭球封头的最大膜应力产生于半椭球的顶点，即**x=0**，**y= b**处。



半椭球母线

#### 四、锥形壳

如图所示，锥形壳的薄膜应力表达式如下：

$$\sigma_m = \frac{pr}{2\delta} \times \frac{1}{\cos\alpha} \quad \sigma_\theta = \frac{pr}{\delta} \times \frac{1}{\cos\alpha}$$

式中：p--介质的内压力，MPa；

$\alpha$  --锥壳的半顶角；

$\delta$  --锥壳的壁厚；

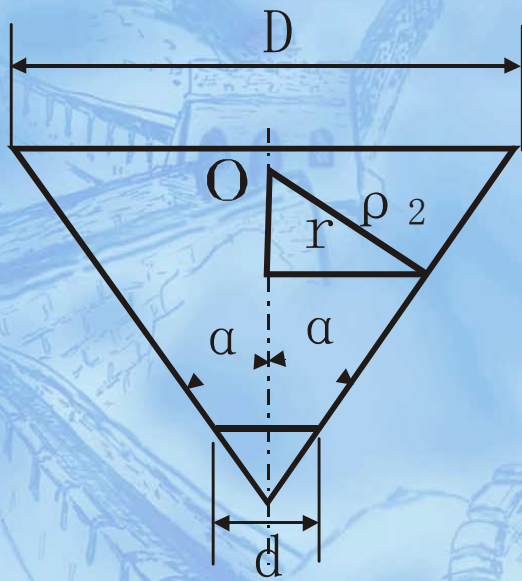
r--计算点所在平行圆的半径，即该点距回转轴的距离；

从上述二式中可以看出随着半锥角的增大壳体的应力将变大，所以在承压容器中太大的锥角是不宜采用的。同时也可以看出，锥形壳中最大应力产生于大端，其值分别为

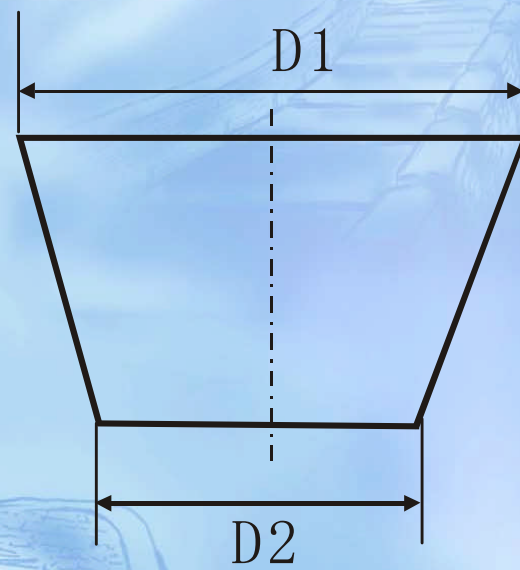
$$\sigma_m = \frac{pD}{4\delta} \times \frac{1}{\cos\alpha} \quad \sigma_\theta = \frac{pD}{2\delta} \times \frac{1}{\cos\alpha}$$

式中：D--容器的中径。





(a) 作封头



(b) 作变径段

锥形壳

## § 3.1.5 压力容器的强度计算

### 一、压力容器与常压容器

压力容器必须同时满足以下三个条件：

1. 最高工作压力 $p_w \geq 0.1\text{MPa}$ （不含液体静压力）。
2. 容器内径 $D_1 \geq 150\text{mm}$ ，且容积 $V \geq 25\text{L}$ 。
3. 介质为气体、液化气体或最高工作温度高于等于标准沸点的液体。

常压容器的壁厚一般按刚度及制造要求来确定。

### 二、内压圆筒壁厚的确定

（1）理论计算壁厚（以圆筒体为例）

若钢板在设计温度下的许用应力为 $[\sigma]$ ，按薄膜应力条件：

$$[\sigma] \geq \sigma_{\theta} = \frac{pD}{2\delta}$$

考虑焊缝系数 $\phi$ ，有：

$$\frac{pD}{2\delta} \leq [\sigma] \phi$$

另外，一般由工艺条件确定的是圆筒的内直径 $D_1$ ，故在上式中代入 $D = D_1 + \delta$ ，得

$$\frac{p(D_1 + \delta)}{2\delta} \leq [\sigma] \phi$$

解出 $\delta$ ，去掉不等号便得到  $\delta = \frac{pD_1}{2[\sigma]\phi - p}$

式中： $\delta$  --圆筒的计算厚度，mm；

$p$ --设计内压；MPa；

$D_1$ --圆筒的内直径，亦称压力容器的公称直径，mm；

$[\sigma]$ --钢板在设计温度下的许用应力；MPa；

$\phi$  --焊缝系数。

## (2) 设计厚度（考虑腐蚀裕量）

若容器的设计使用寿命为 $n$ 年，介质对容器壁的年腐蚀量为 $\lambda$  mm/年，器壁因腐蚀而减薄的总量称作腐蚀裕量，其值为 $C_1 = n \lambda$ 。计算厚度与腐蚀裕量之和称作设计厚度，用 $\delta_d$ 表示。

$$\delta_d = \delta + C_1$$

### (3) 圆筒壁的名义厚度

考虑钢板的生产标准中规定了一定量的允许正、负偏差值，故在容器壁的厚度应加上钢板的负偏差 $C_2$ 。（保险起见）

考虑钢板的生产规格，需将计算厚度向上调整使其符合钢板的规格厚度（如钢板系列：5，10，20mm等），此调整值称为圆整值 $\Delta$ 。

将钢板的设计厚度加上钢板的负偏差并向上圆整至钢板的规格厚度得出容器壁的名义厚度，用 $\delta_n$ 表示，即

$$\delta_n = \delta_d + C_2 + \Delta = \delta + C_1 + C_2 + \Delta$$

式中： $\delta_n$ --圆筒的名义厚度，mm； $\delta_d$ --圆筒的设计厚度，mm； $C_1$ --腐蚀裕量，mm； $C_2$ --钢板负偏差，mm； $\Delta$ --圆整值，mm。

### (4) 圆筒的有效厚度

$$\delta_e = \delta + \Delta$$

### (5) 容器壁的最小厚度 $\delta_{\min}$

为了使容器强度满足制造、运输和安装等方面的要求，因此对圆筒的最小壁厚作了规定，用 $\delta_{\min}$ 表示。

### § 3.1.6 平板的弯曲应力

(1) 环形截面的变形及环向弯曲应力  $M \sigma_{\theta}$

(2) 径向变形和径向弯曲应力  $M \sigma_r$

(3) 最大弯曲应力  $M \sigma_{\max}$

\*周边简支、承受均布载荷的圆平钢板，最大弯曲应力产生于圆板中心处的上下表面处，其值为：

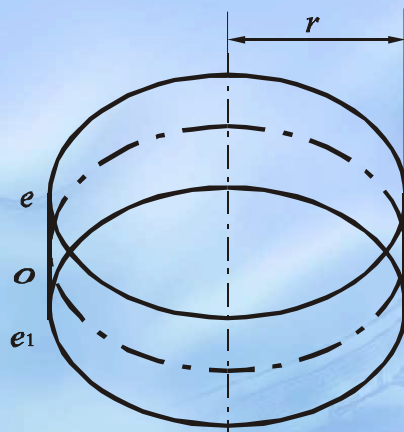
$$M \sigma_{\max} = \mp 0.31 \times \frac{pD^2}{\delta^2}$$

$M \sigma_{\max}$  -- 周边简支、均布载荷时圆形钢板的最大弯曲应力，MPa；  
 $p$  -- 均布载荷，MPa； $D$  -- 圆形平板的直径，mm； $\delta$  -- 圆形平板的厚度，mm；“ $-$ ” -- 圆板上表面的应力，表示受压缩；“ $+$ ” -- 圆板下表面的应力，表示受拉伸。

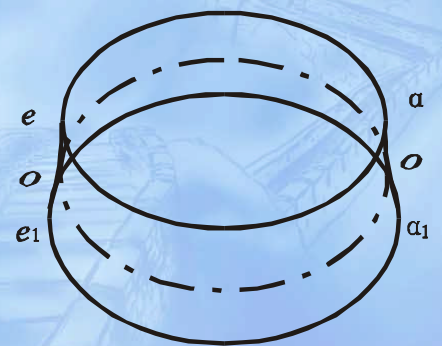
\*周边固定，承受均布载荷时圆平板的最大弯曲应力出现在板的四周的上下表面处，对于钢板其值为：

$$M \sigma_{\max} = (M \sigma_{\theta})_r = R = (M \sigma_r)_r = R = \pm 0.188 \times \frac{pD^2}{\delta^2}$$

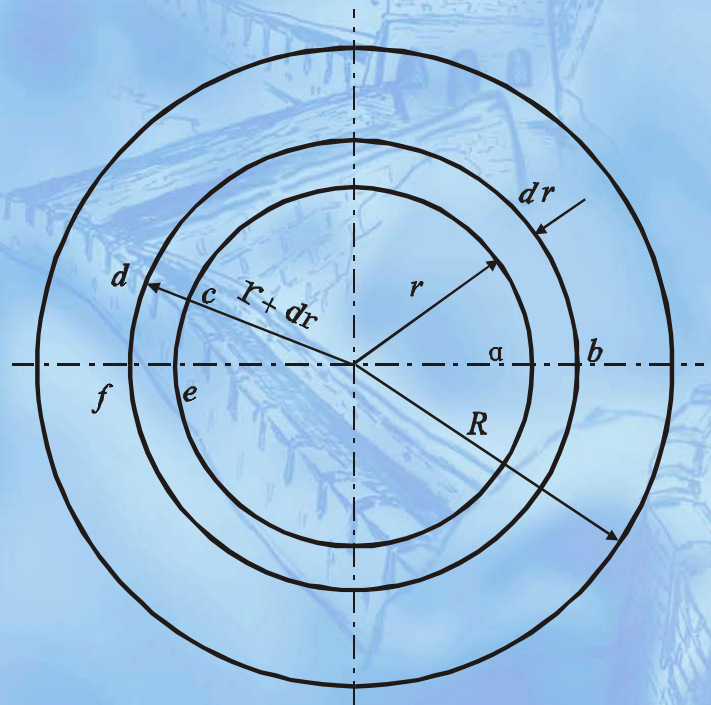
$M \sigma_{\max}$  -- 周边固定均布载荷时的圆形钢板的最大弯曲应力，MPa。



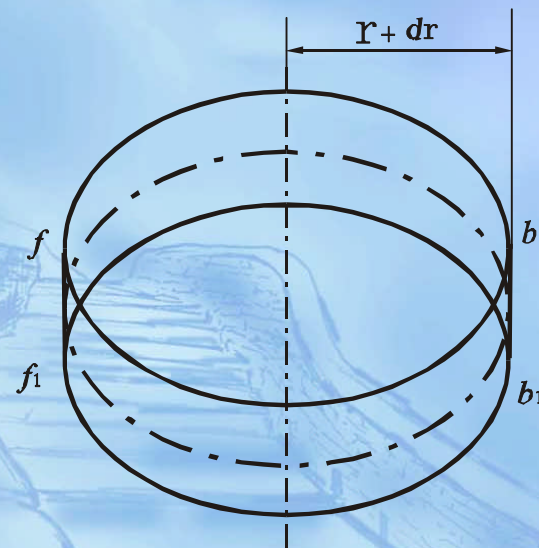
(b)



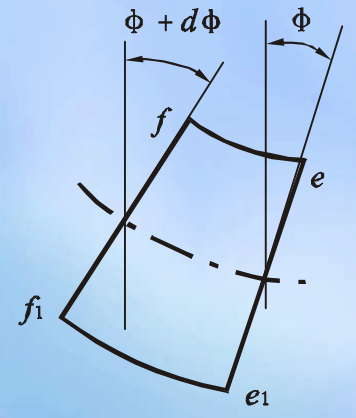
(c)



(a)



(d)



(e)

#### (4) 弯曲应力与薄膜应力的比较

$$\text{最大弯曲应力可写作 } M_{\sigma \max} = k \frac{pD^2}{\delta^2}$$

周边简支平板 $k=0.31$ ；周边固定平板 $k=0.188$ 。

$$M_{\sigma \max} = k \frac{2D}{\delta} \times \frac{pD}{2\delta} = 2k \frac{D}{\delta} \sigma_0$$

•**结论：**承受均布载荷 $p$ 的圆形平板的最大弯曲应力 $M_{\sigma \max}$ 是同直径、同厚度的圆柱形壳体承受同样大的压力时所产生的薄膜应力的 $2k \frac{D}{\delta}$ 倍。由于容器的直径与厚度的比值一般大于50，所以，同等条件下，平板内产生的最大弯曲应力至少是圆筒壁的薄膜应力的20~30倍。所以容器的封头应尽量避免使用平板形，而且也应尽量避免使用矩形的压力容器。

### § 3.1.7 压力容器的二次应力

在外力作用下，每个零件均有发生变形的趋势，但这个变形的趋势要受到相邻零部件的限制。我们把由于相互连接的零部件各自欲发生变形而受到对方限制引起的应力称作二次应力。

**(1) 平板封头：**圆柱形筒身和平板封头连接处的横截面内产生的最大二次弯曲应力可按下式计算

$$M \sigma_{m\pm} = 1.54 \frac{pD}{2\delta}$$

从该式可以看出，**边界应力比由内压引起的环向薄膜应力还要大54%**。

**(2) 半球形封头：**球形封头与筒体的连接处不需要考虑强度问题。球壳的环向薄膜应力、经向薄膜应力与等直径圆筒的经向薄膜应力，是圆筒的二次环向薄膜应力的一半。



## § 3.1.8 内压封头设计

### 一、封头分类

- (1) 凸形封头，包括半球形封头、半椭球封头、带折边球形封头和无折边球形封头四种。
- (2) 锥形封头，包括无折边锥形封头与带折边锥形封头两种。
- (3) 平板形封头。

对于凸形封头和锥形封头，它们的强度计算均以薄膜应力理论为基础，而对于平板形封头的强度计算则应以平板弯曲理论为依据。

### 二、半球形封头

半球形封头是由半个球壳构成。对于半球形封头可以不考虑边界应力。可以仅仅根据薄膜应力理论来进行半球形封头的强度计算。

$$[\sigma] \phi \geq \sigma_{\theta} = \sigma_m = \frac{pD}{4\delta}$$

将  $D=D_1 + \delta$  代入，去掉不等号并解出封头的理论计算厚度  $\delta = \frac{pD_1}{4[\sigma]\phi - p}$   
根据  $\delta$  求出封头的设计厚度  $\delta_d$  和名义厚度  $\delta_n$  即可。



锥形封头



碟形封头



球形封头



平板封头



折边平板封头



椭圆封头

### 三、半椭球形封头

根据前面讨论结果，当椭球壳的长短轴之比小于2时，最大薄膜应力产生于半椭球的顶点，其值为

$$\sigma_{\theta} = \sigma \frac{pa}{m\delta} \times \frac{a}{b}$$

令  $a/b=m$ ，并将  $a=D/2$  代入得  $\sigma_{\theta} = \sigma_m = \frac{mpD}{4\delta}$

若钢板的许用应力为  $[\sigma]$ ，焊缝系数为  $\phi$ ，并代入  $D=D_1 + \delta$ ，则半椭球形封头的计算厚度  $\delta$  应为

$$\delta = \frac{mpD_1}{4[\sigma]\phi - mp} = \frac{pD_1}{2[\sigma]\phi - 0.5mp} \times \frac{m}{2}$$

#### 四、碟形封头

碟形封头承受内压时，其球面一次薄膜应力可按球壳的应力公式计算，其值为

$$\sigma_{sp} = \frac{pR}{2\delta}$$

式中： $\sigma_{sp}$ --球面内的膜应力，MPa；

R--球面中面半径，mm；

r--封头壁厚，mm。

折边部分除存在薄膜应力外还存在较大的弯曲应力。其总应力将高于球面内的应力，其值可按下式计算

$$\sigma_{折} = M \cdot \sigma_{sp} = M \frac{pR}{2\delta}$$

M--折边应力增大系数，亦称作碟形封头的形状系数

## 五、无折边球形封头

无折边球形封头与圆柱形筒体的连接处存在着较大的边界应力，按薄膜应力条件确定的封头厚度将不能满足边界应力的要求。解决的办法是在以薄膜应力条件确定的封头厚度上乘以一个大于1的系数 $Q_0$ 。同时需要注意的是边界应力不仅作用于封头，而且也作用于与封头连接处附近的筒壁，故这部分筒壁的厚度应加厚至封头的厚度，筒壁加厚的高度应不小于  $2\sqrt{0.5D_1\delta}$

## 六、锥形封头

其强度计算和设计可参阅有关设计手册，不作介绍。

## 七、平板形封头

圆形平板作为容器的封头而承受介质的压力时，将处于受弯的不利状态，它的壁厚将比筒体壁厚大很多。同时平板形封头还会对筒体造成较大的边界应力。因此，承压设备一般不采用平板封头，仅在压力容器的人孔、手孔处等才采用平板。

平板封头厚度可用下式计算：

$$\delta_h = D_c \sqrt{\frac{kp}{[\sigma]\phi}}$$

## § 3.2 机械传动理论

### 一、机械传动概述

机械是机器和机构的总称。

#### 1、机构

由多种实物（如齿轮、螺丝、连杆、叶片等机械零件）组合而成，各实物间具有确定的相对运动。组成机构的各相对运动的部分称为构件。

#### 2、机器

机器是根据某种使用要求而设计制造的一种能执行某种机械运动的装置。机器中普遍使用的机构称为常用机构，如齿轮机构、连杆机构、凸轮机构等。

#### 3、机械应满足的基本要求

- (1) 必须达到预定的使用功能，工作可靠，机构精简。
- (2) 经济合理、安全可靠、生产率高、管理和维修费用低。
- (3) 操作方便、低噪音、防止有毒、有害介质渗漏等。
- (4) 对不同用途和不同使用环境的适应性要强。

## 4、机械传动的概念

利用构件和机构把运动和动力从机器的一部分传递到另一部分的中间环节称为机械传动。

### 二、机械传动的主要方式

#### 1、齿轮传动

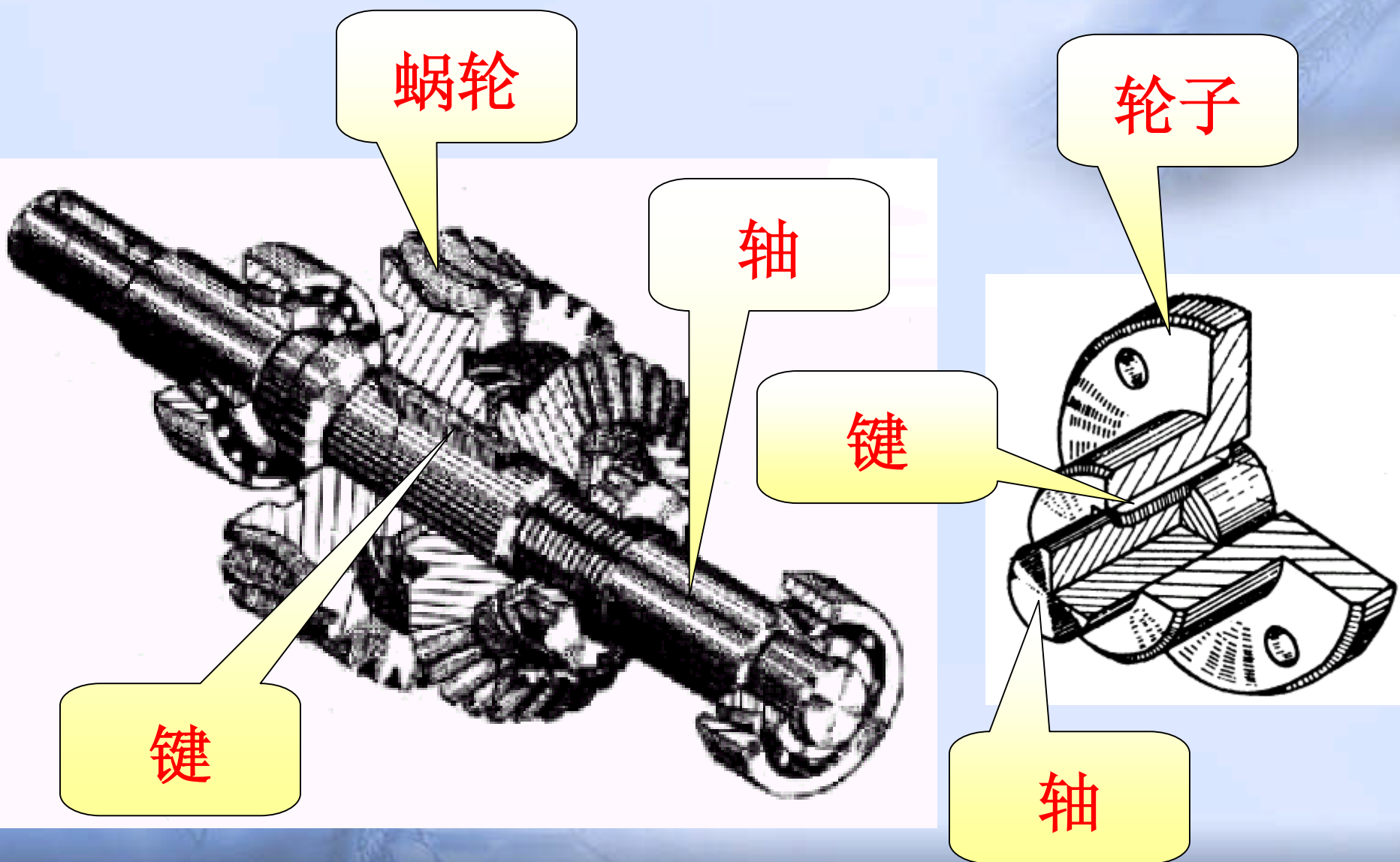
##### (1) 齿轮传动概述

用来传递空间任意两轴之间的运动和动力。

特点：

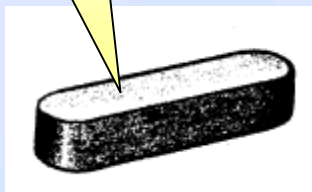
- 功率范围大
- 传动效率高
- 传动比准确
- 使用寿命长
- 工作安全可靠

# 齿轮介绍





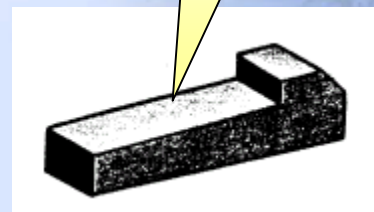
平键



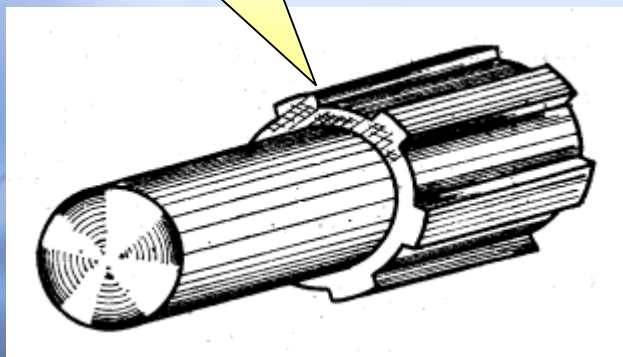
半圆键



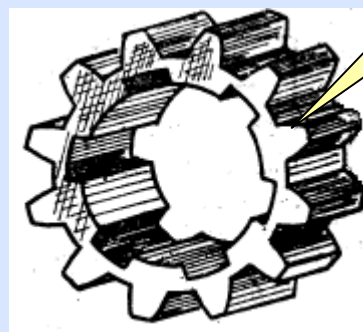
钩头楔键



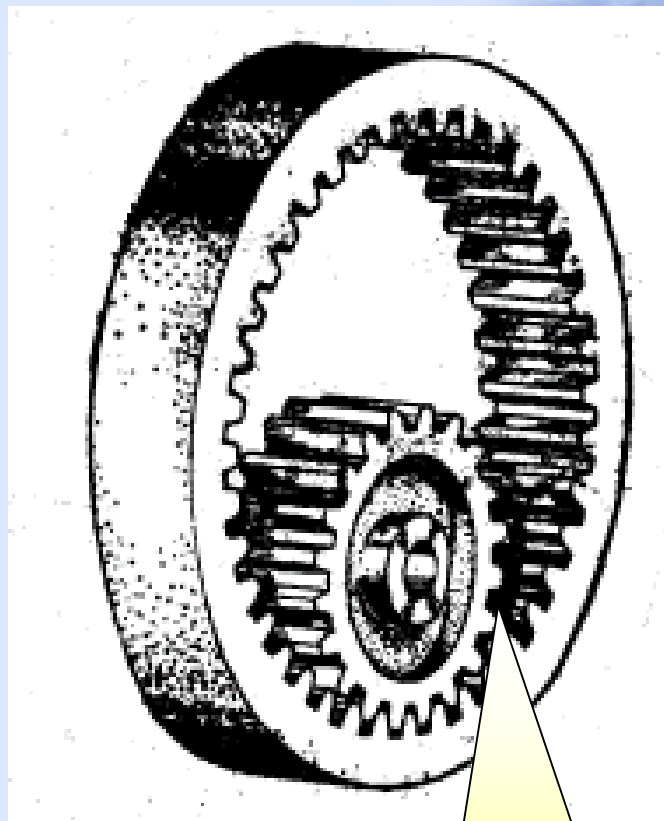
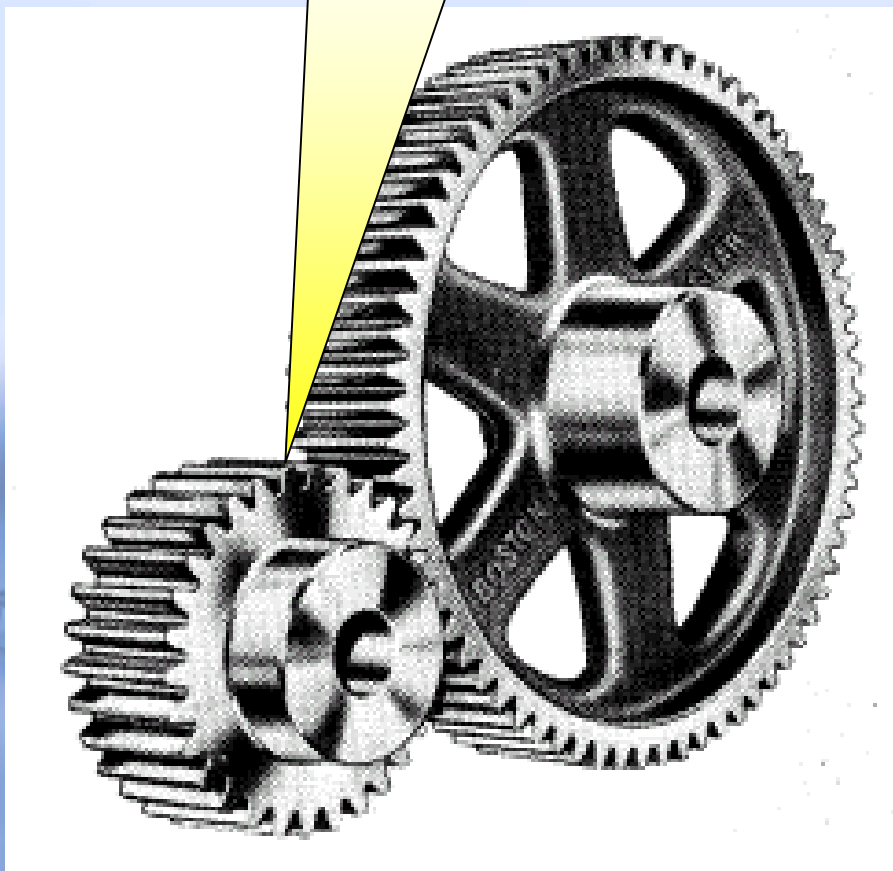
花键



齿轮

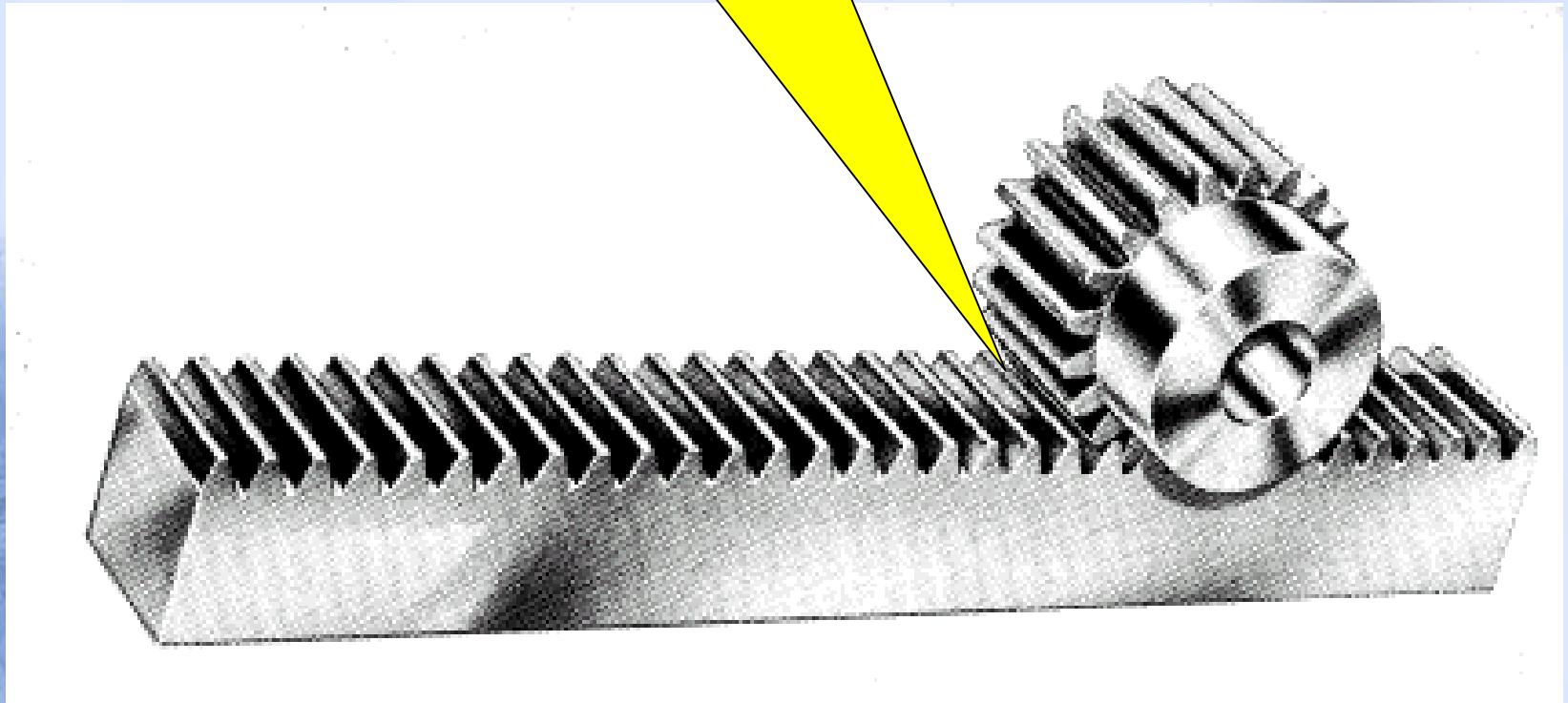


外啮合齿轮机构

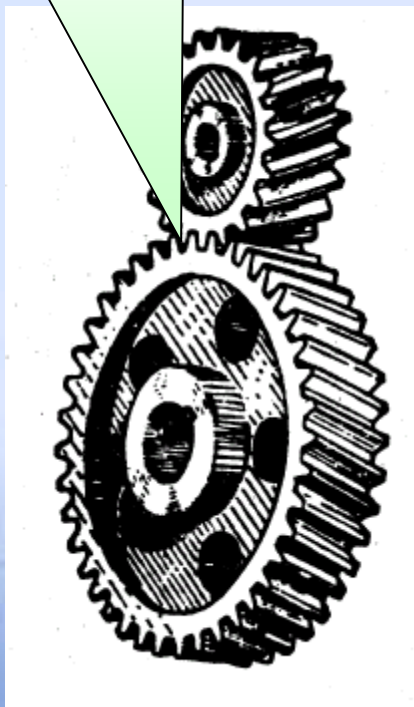


内啮合齿轮机构

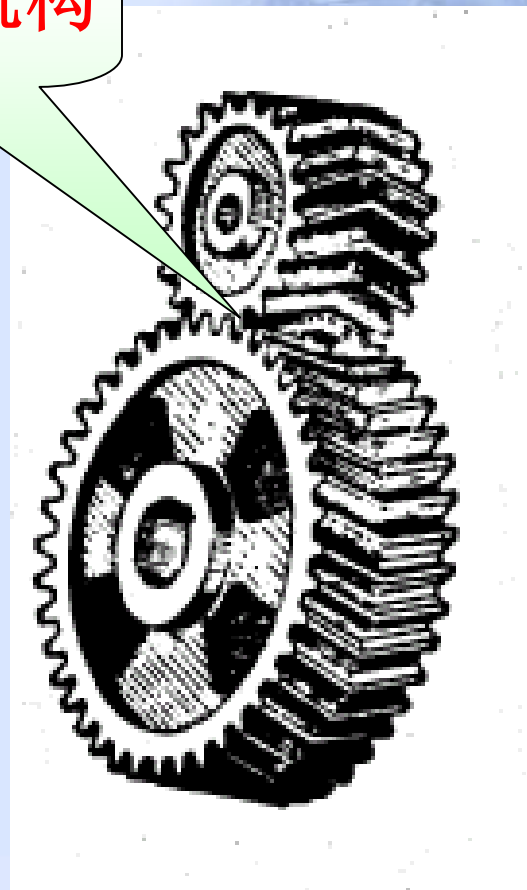
# 齿轮齿条啮合机构



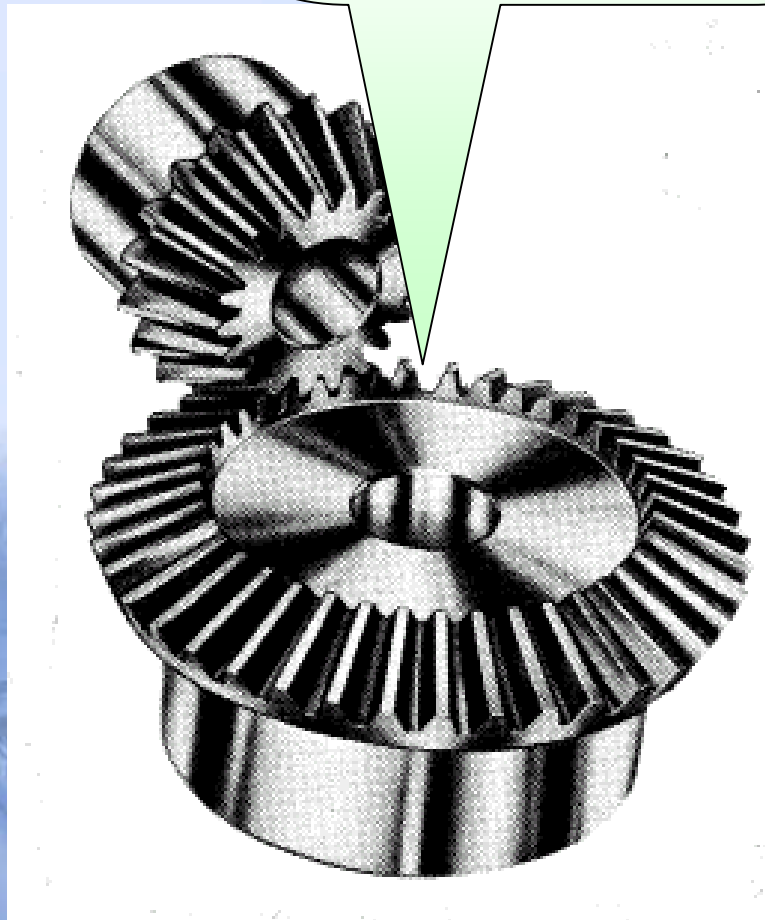
平行轴斜齿轮机构



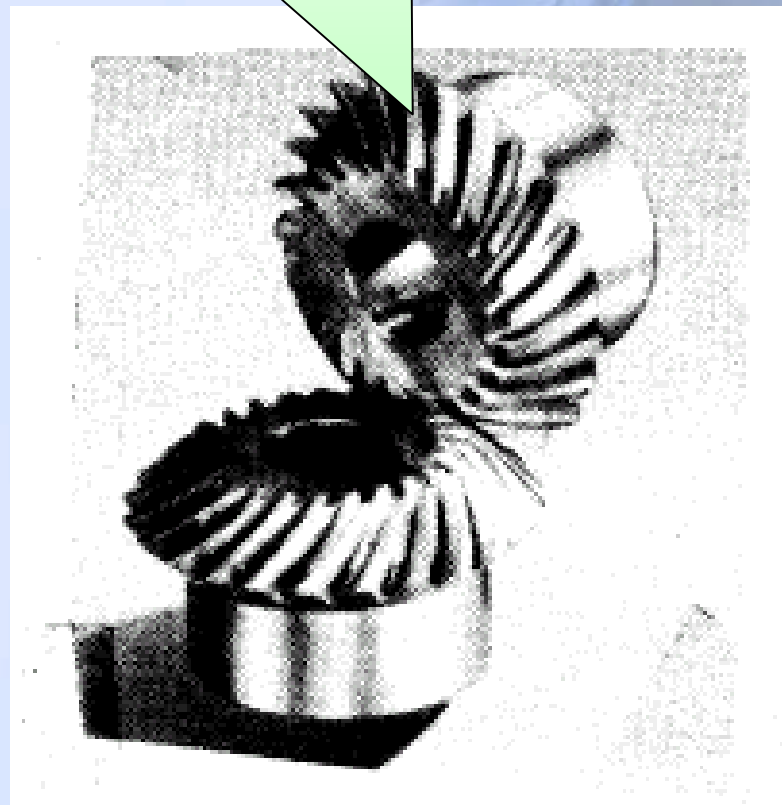
人字齿轮机构



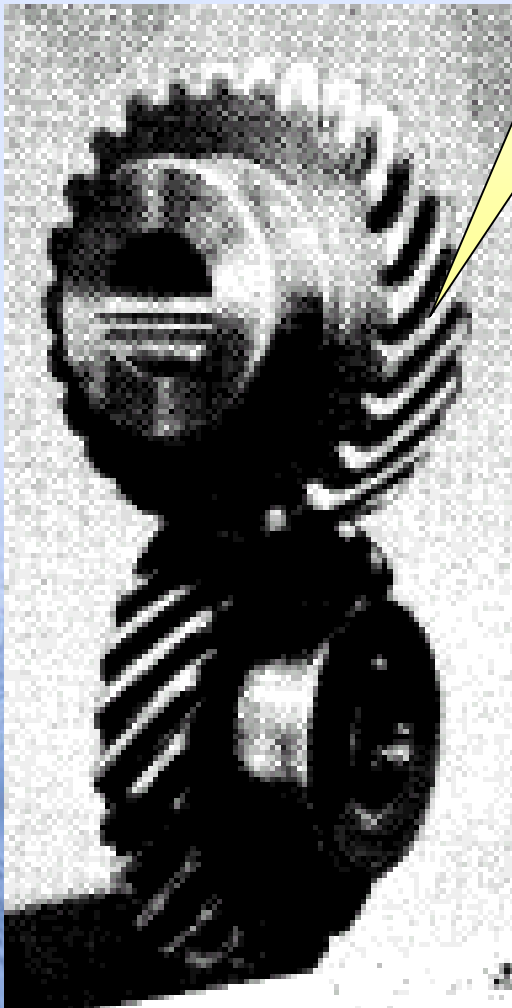
直齿锥斜齿轮机构



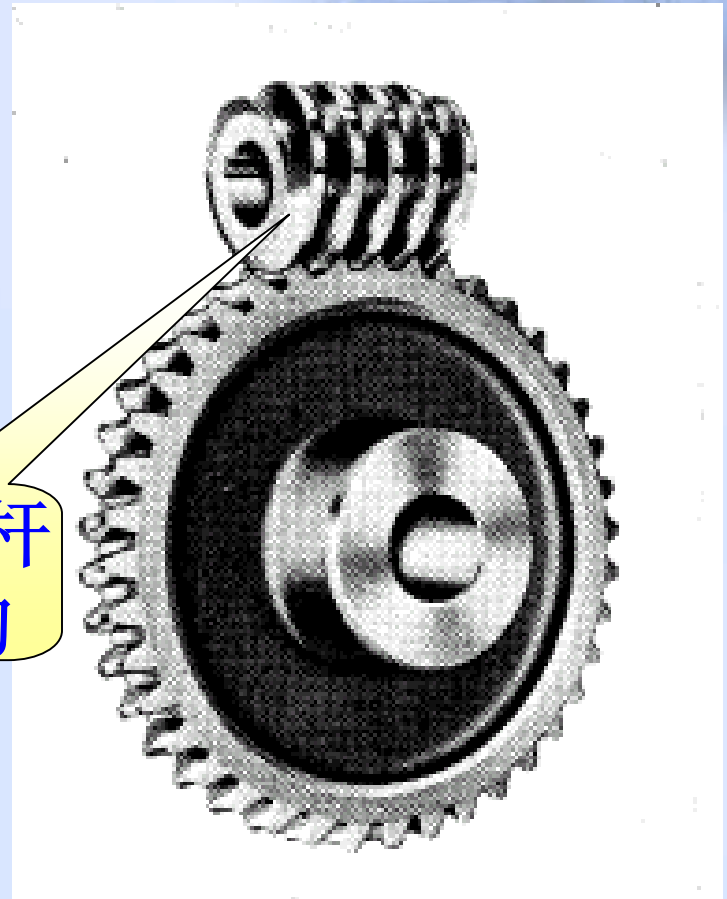
曲线齿锥齿轮机构



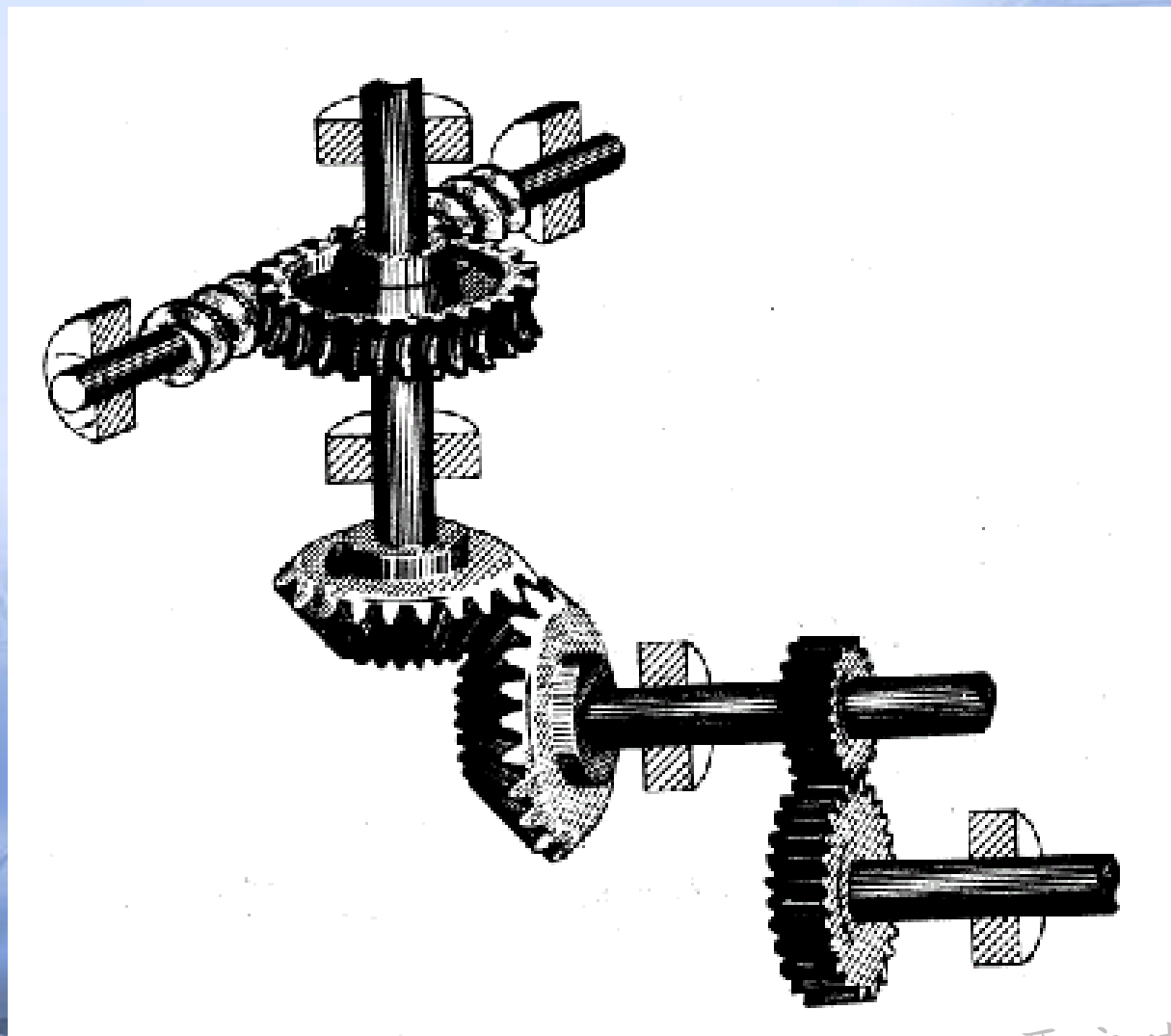
交错轴斜  
齿轮机构



蜗轮蜗杆  
轮机构

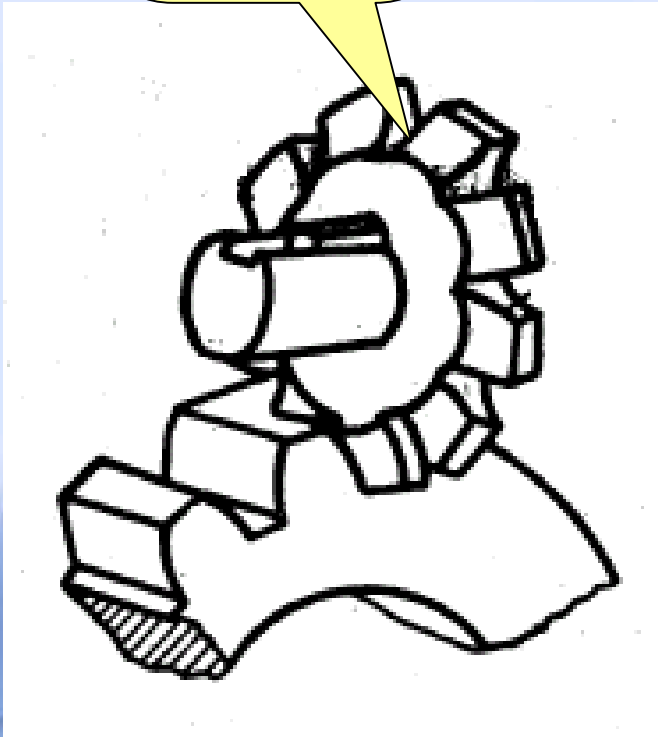


# 轮系



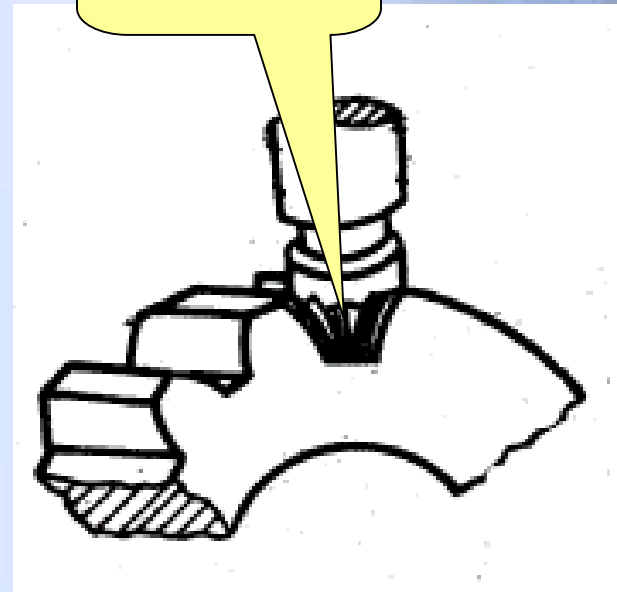
## 齿廓的切削加工

圆盘铣刀



用圆盘铣刀切齿

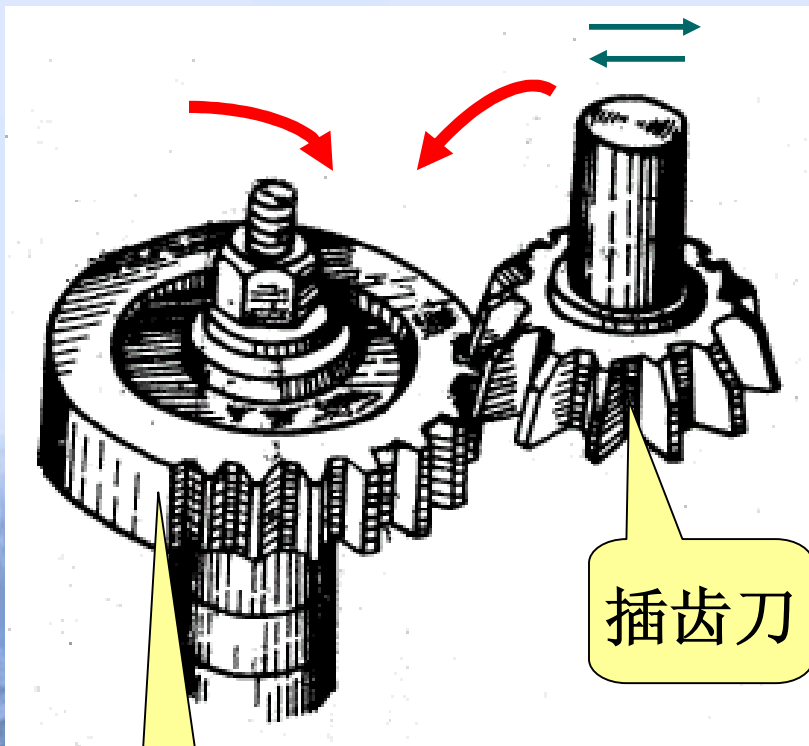
指状铣刀



用指状铣刀切齿

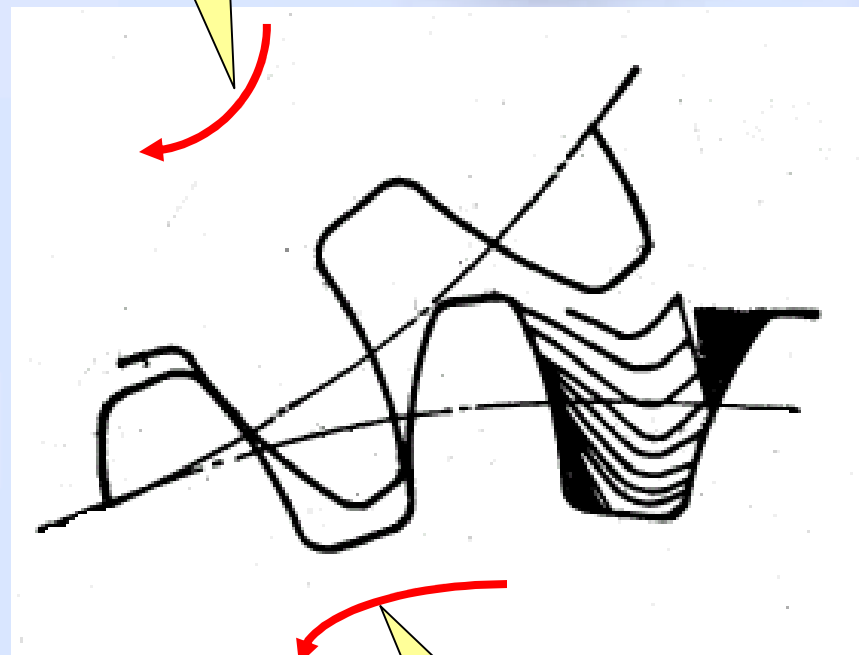


插齿刀转向



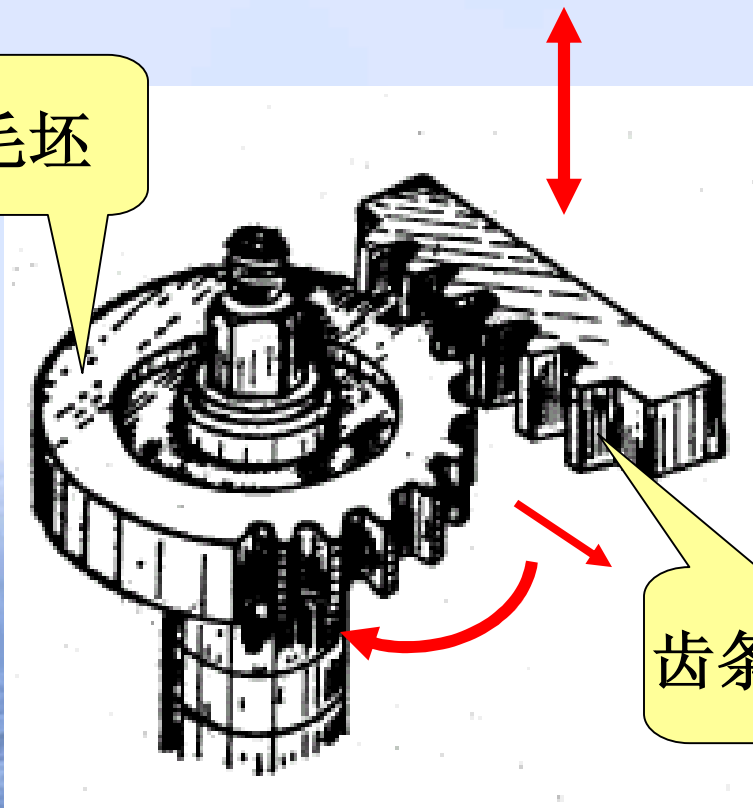
毛坯

插齿刀



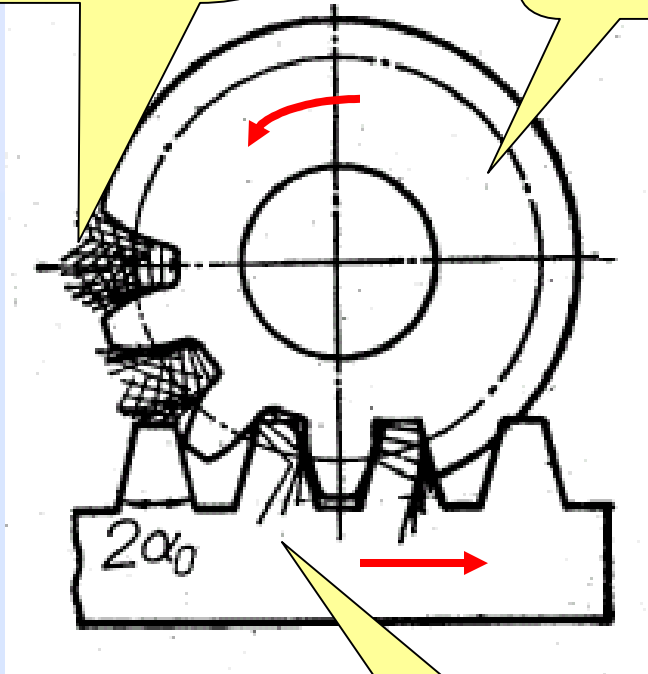
被切削齿轮的转向

毛坯



齿型形成过程

毛坯



齿条插刀

齿条插刀

齿条插刀切齿

几个概念:

■ 传动比: 一对齿轮在啮合过程中, 其传动比定义为相互啮合齿轮的角速度之比

$$(i_{12} = \omega_1 / \omega_2)$$

■ 定传动比 (即  $i_{12} = \text{常数}$ )。

■ 变传动比 (即  $i_{12}$  按一定的规律变化)

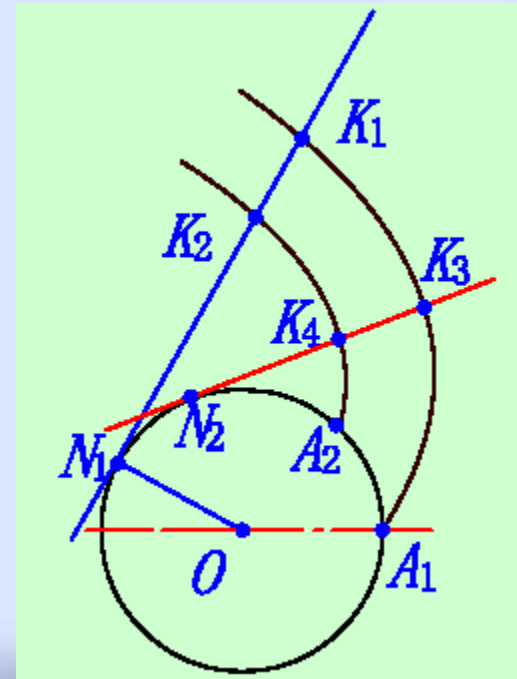
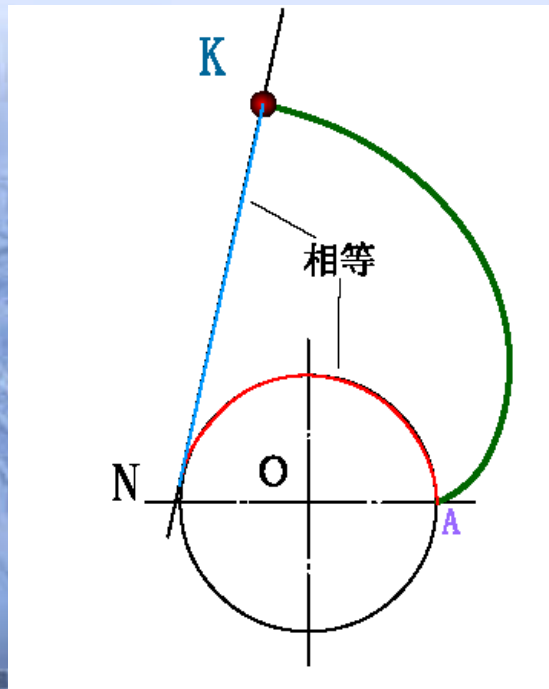
## (2) 渐开线标准齿轮

齿廓线是渐开线的齿轮称渐开线齿轮。

渐开线概念：

当一直线沿一个圆的圆周作纯滚动时，直线上任一点K的轨迹)

AK——渐开线



## 各部分名称和尺寸:

- ① 齿顶圆:以齿轮的轴心为圆心,通过齿轮各轮齿顶端所作的圆称为齿顶圆。其直径和半径分别以 $d_a$ 和 $r_a$ 表示。
- ② 齿根圆:以齿轮的轴心为圆心,通过齿轮各齿槽底部所作的圆称为齿根圆。其直径和半径分别以 $d_f$ 和 $r_f$ 表示。
- ③ 齿厚:沿任意圆周所量得的轮齿上的弧线厚度称为该圆周上的齿厚,以 $s_k$ 表示。
- ④ 齿槽宽:相邻两轮齿之间的齿槽沿任意圆周所量的弧线宽度,称为该圆周上的齿槽宽,以 $e_k$ 表示。
- ⑤ 齿距:沿任意圆周所量得的相邻两齿上同侧齿廓之间的弧长称为该圆上的齿距,以 $p_k$ 表示,  $p_k = s_k + e_k$ 。
- ⑥ 分度圆:在齿轮上作为计算基准的一个圆,其上的齿厚与齿槽宽相等,称该圆为齿轮的分度圆。其直径、半径、齿厚、齿槽宽和齿距分别以 $d$ 、 $r$ 、 $s$ 、 $e$ 和 $p$ 表示,即 $e = s$ ,且 $p = s + e$ 。



⑦齿顶高:介于分度圆与齿顶圆之间的轮齿部分称为齿顶,其径向高度称为齿顶高,以 $h_a$ 表示。

⑧齿根高:介于分度圆与齿根圆之间的轮齿部分称为齿根,其径向高度称为齿根高,以 $h_f$ 表示。

⑨齿全高:齿顶圆与齿根圆之间的径向距离,即齿顶高与齿根高之和称为齿全高,以 $h$ 表示,则 $h=h_a+h_f$ 。

### (3) 渐开线标准齿轮的基本参数

①齿数:在齿轮整个圆周上轮齿的总数称为齿数,用 $Z$ 表示。

②模数:为了便于计算、制造和检验,人为规定 $p/\pi$ 的值叫做模数,以 $m$ 表示,即令 $m=p/\pi$ ,其单位为 $mm$ ,于是得 $d=zm$ 。模数 $m$ 是决定齿轮尺寸的一个基本参数。

③传动比:相互啮合两齿轮的角速度之比,用 $i_{12}$ 来表示。

$$i_{12} = \omega_1 / \omega_2 = z_2 / z_1。$$

# 渐开线标准齿轮的基本参数和几何尺寸

## 名称和符号(外齿轮)

齿数  $Z$

$$p = s + e$$

$$d = \frac{p}{\pi} z$$

令

$$\frac{p}{\pi} = m$$

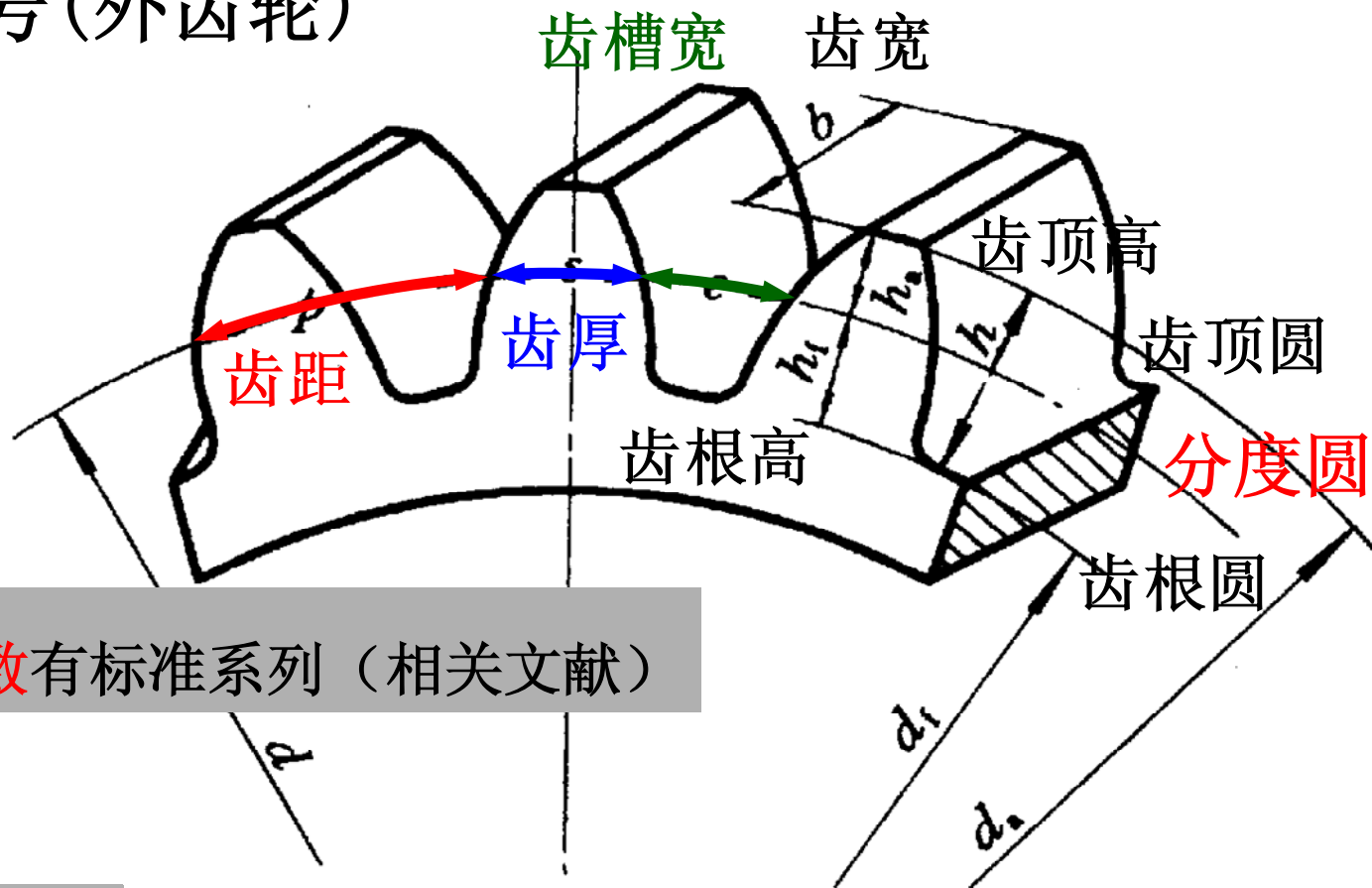
模数有标准系列 (相关文献)



$$d = mz$$

$$p = \pi m$$

分度圆上模数和压力角均为标准值。



注：分度圆直径  $d$ 、半径  $r$ 、齿槽宽  $e$ 、齿厚  $s$ 、齿距  $p$

#### (4) 齿轮传动的主要失效形式

齿轮的失效形式主要有以下5种：

①轮齿折断：轮齿折断一般发生在齿根部分，因为轮齿受力时齿根弯曲应力最大，而且应力集中。

\*疲劳折断

\*过载折断

②齿面点蚀：轮齿在啮合中，齿轮工作表面啮合点处的接触应力是脉动循环变化的。

③齿面胶合：在高速重载传动中，常因齿面啮合区温度升高而引起润滑失效，致使两齿面金属直接接触而熔粘在一起，当两齿面相对运动时，较软的齿面沿滑动方向被撕下而形成沟纹，这种现象称为胶合

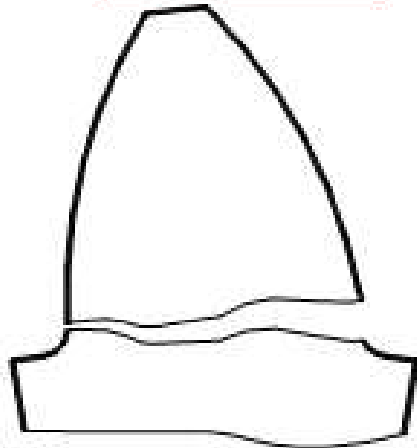
④齿面磨损：齿轮传动时，两渐开线齿廓之间有相对滑动，在载荷作用下会引起齿面磨损。一种情况是由于灰尘、硬屑粒等进入齿面间而引起的磨粒性磨损；另一种是因齿面不可避免的互相摩擦而产生的磨合性磨损。

⑤齿面塑性变形：在重载作用下，较软的齿面上可能产生局部的塑性变形，使齿面失去正确齿形。这种损坏常在低速和过载、起动频繁的传动中遇到。

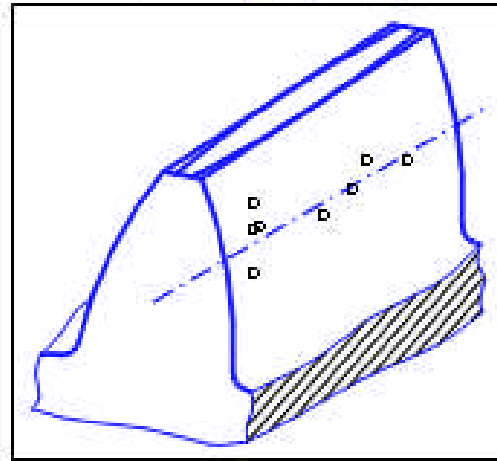


# 齿轮的失效形式

弯曲折断

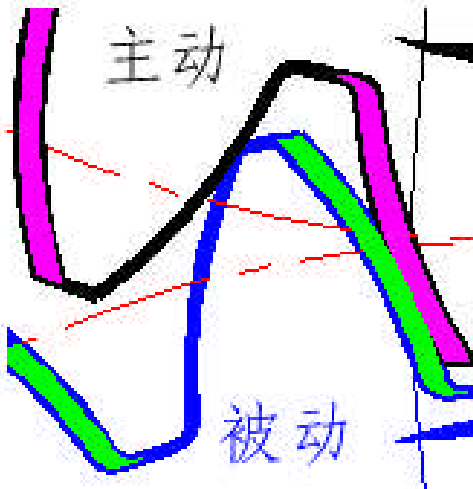


点蚀

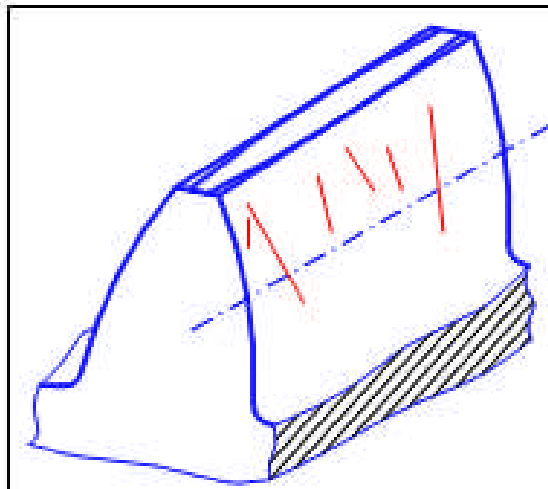


上面两个是  
齿轮传动中的  
主要失效  
形式

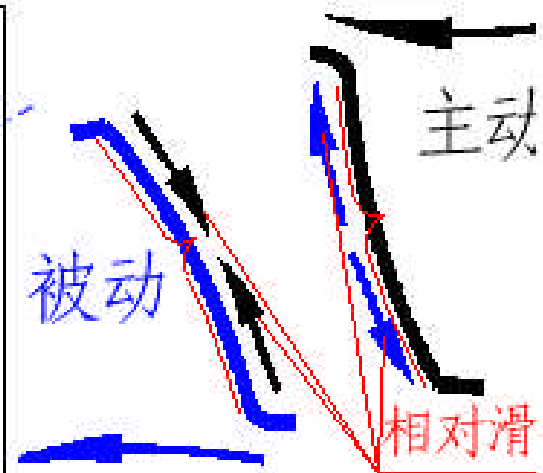
磨损



胶合



塑性变形

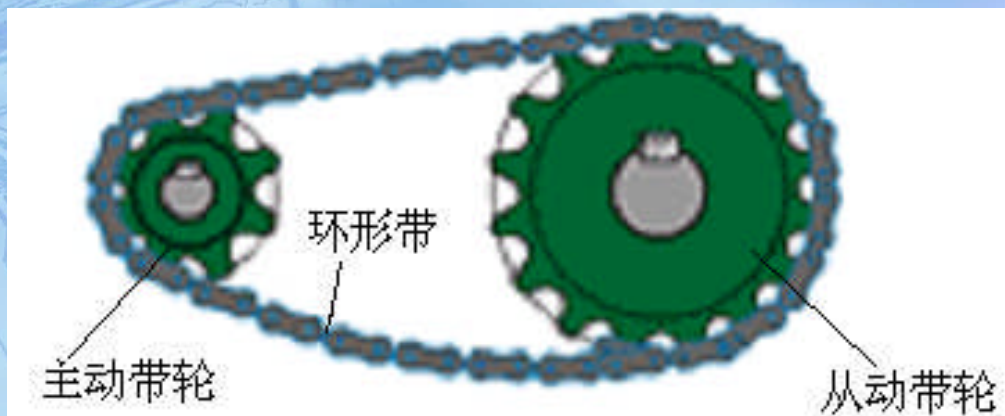


## 2、带传动

### (1) 带传动概述

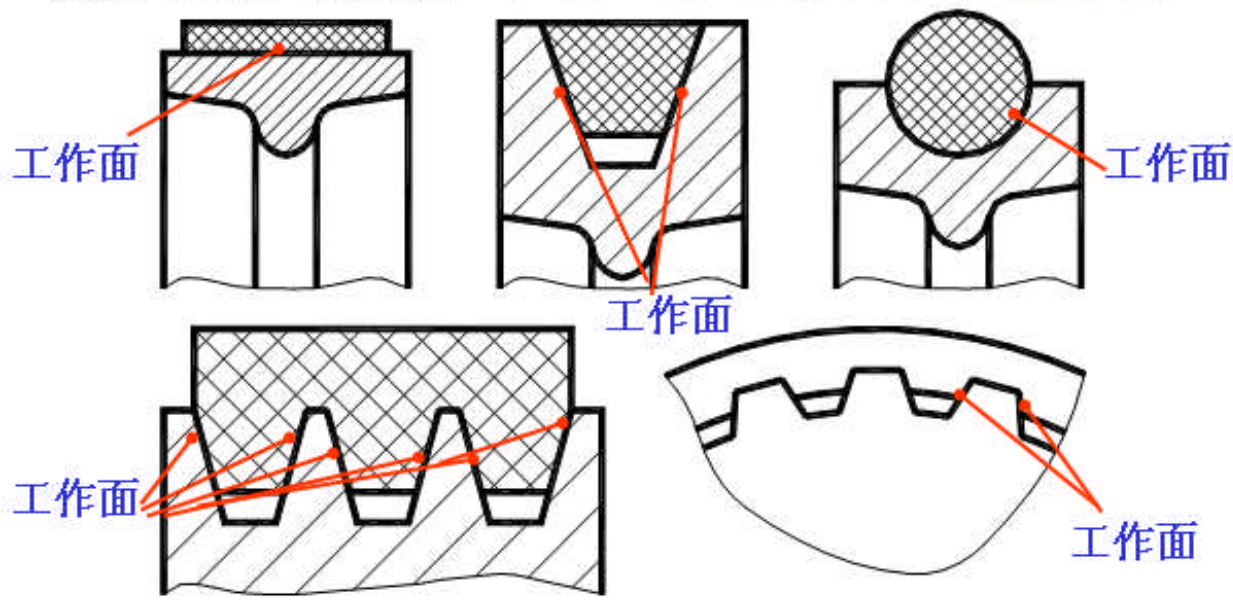
#### 1) 带传动的组成

带传动是由主动带轮、从动带轮和环形带组成



## 2) 分类

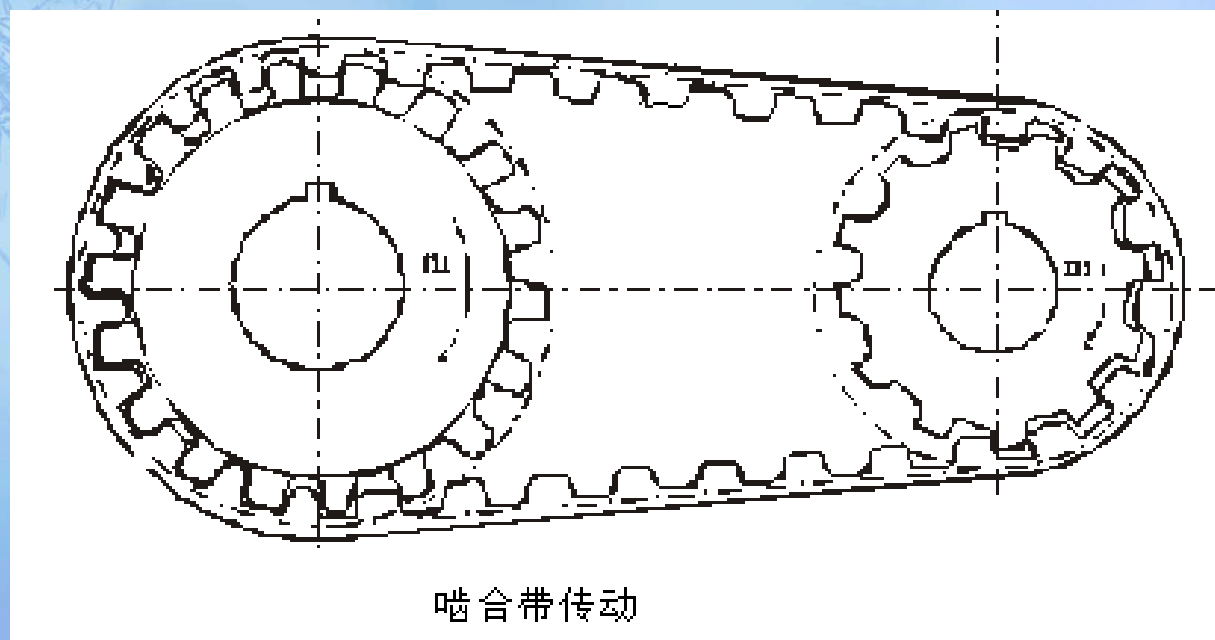
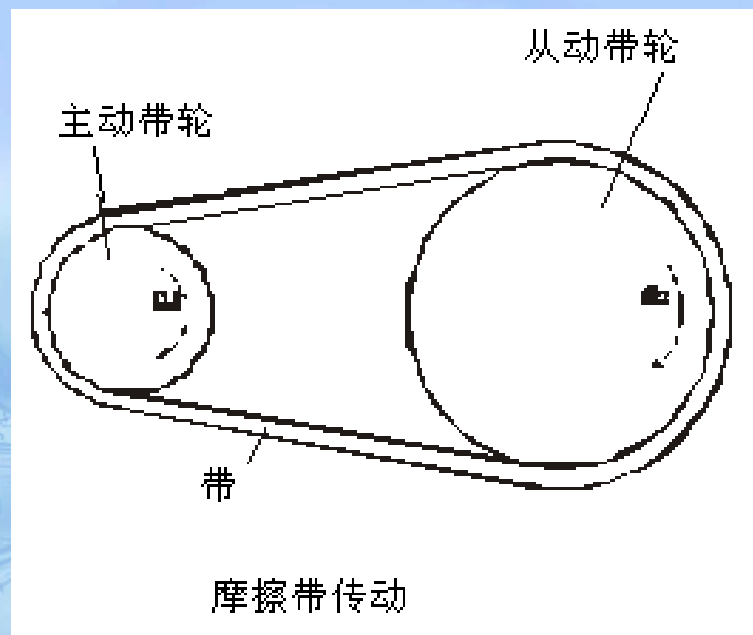
按照带的形状分类：**平带**；**V带**；**多楔带**；**同步带**；**圆带**。



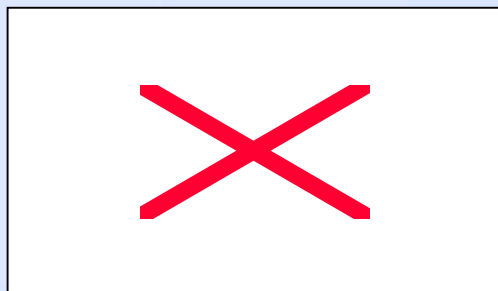
## 3) 工作原理

\*啮合带传动依靠带内面的凸齿与带轮表面相应的齿槽相啮合来传递动力和运动，这种传动既能减轻对轴及轴承的压力，又能使主动轮节圆上与从动轮节圆上的速度同步，保证准确可靠的传动比，是一种较理想的传动方式。

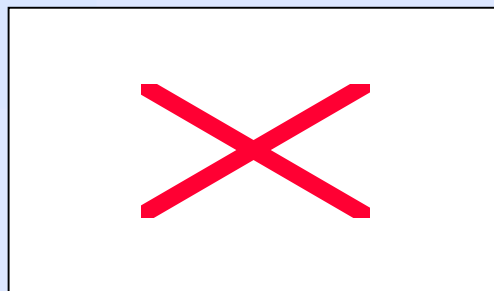
\*摩擦带传动依靠带和带轮接触面上的摩擦力将主动轮上的运动和动力传递给从动轮。



## 4) 常用传动带



圆弧齿同步带

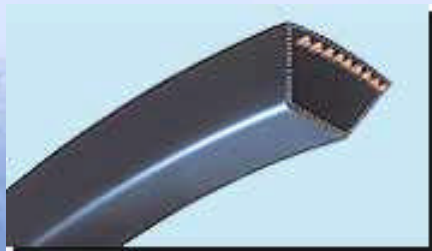


梯型齿同步带



双面齿同步带

### 啮合带



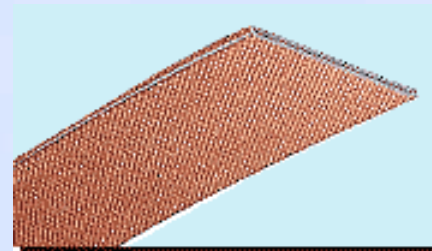
普通V带



窄V带



联组V带



普通平带



橡胶型多楔带



圆形

### 摩擦带



弹性六角带

## (2) 带传动的特点

- 1) 带传动的优点: 带有良好的弹性, 可缓冲吸振; 过载时带在带轮上打滑, 可保护其它零件; 结构简单、制造方便、成本低廉。
- 2) 带传动的缺点: 传动的外廓尺寸较大; 由于带的弹性滑动不能保证准确的传动比; 带的寿命短; 传动效率较低。

## (3) 带传动的应力分析及失效形式

① 拉应力: 紧边的拉应力  $\sigma_1 = \frac{F_1}{A}$  (MPa)

松边的拉应力  $\sigma_2 = \frac{F_2}{A}$  (MPa)

式中:  $F_1, F_2$ --分别为紧边和松边的拉力, N;  $A$ --带的横截面面积 $\text{mm}^2$ 。

② 离心应力  $\sigma_c = \frac{qv^2}{A}$  (MPa)

式中:  $q$ --带的单位长度质量,  $\text{kg/m}$ ;  $A$ --带的横截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $v$ --带速,  $\text{m/s}$ 。

③弯曲应力:带绕在带轮上时,因弯曲而产生弯曲应力。由材料力学公式得弯曲应力  $\sigma_b$

$$\sigma_b = \frac{2Ey}{d_d} \quad (\text{MPa})$$

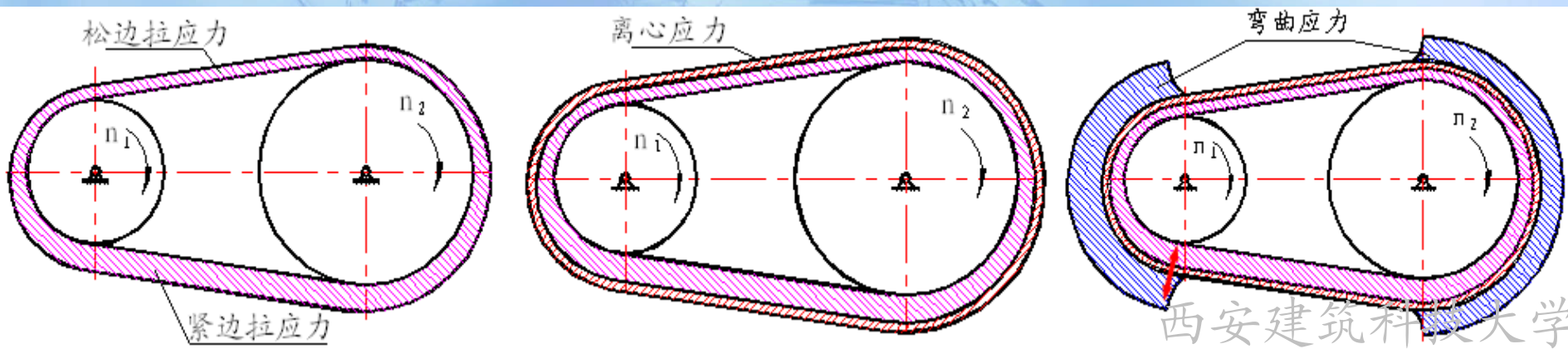
式中:  $y$ --由中性面到最外层的垂直距离, mm;

$E$ --带材料的弹性模量, MPa;

$d_d$ --带轮的基准直径, mm。

由上式可见,  $d_d$ 越小时, 带的弯曲应力  $\sigma_b$ 就越大, 带在变应力下工作, 最大应力发生在带绕到小带轮上, 其值为  $\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_{b1} + \sigma_c$

带每绕两带轮转过一圈时, 应力变化四次。当应力循环达到一定值后, 将使带产生疲劳破坏。



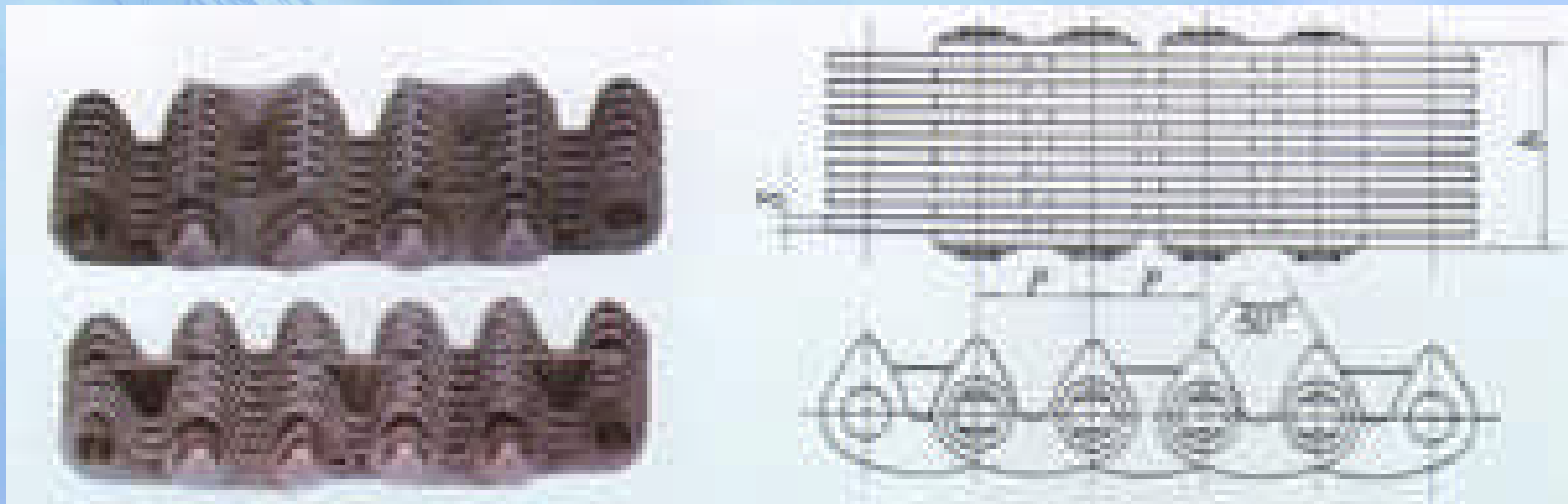
### 3. 链传动

#### (1) 链传动组成及工作原理

它是由装在平行轴上的主链轮、从动链轮和绕在链轮上的环形链条组成。链轮上制有特殊齿形的齿，靠链与链轮轮齿的啮合来传递运动和动力。

#### 1) 传动链和链轮

① 齿形链：齿形链因工作时冲击和噪声较小，故又称无声链。它是由一组带有两个齿的链板并列左右交错用铰链连接而成。





②滚子链:由内链板、外链板、销轴、套筒和滚子组成。其中内链板与套筒之间,外链板与销轴之间分别用过盈配合相固联,分别称为内链节、外链节。而套筒和销轴之间是间隙配合,这样内外链节就构成了一个铰链。滚子和套筒之间也是间隙配合,滚子可以自由转动。滚子链可制成单排链、双排链或三排链。



单排链条



双排链条



三排链条

③滚子链链轮:链轮的轴面齿形两侧呈圆弧状,便于链节进入和退出啮合。在链轮工作图上,其轴面齿形需绘出,并应注明链节距 $p$ 、齿数 $z$ 、分度圆直径 $d$ 、齿顶圆直径 $d_a$ 、齿根圆直径 $d_f$ 等。

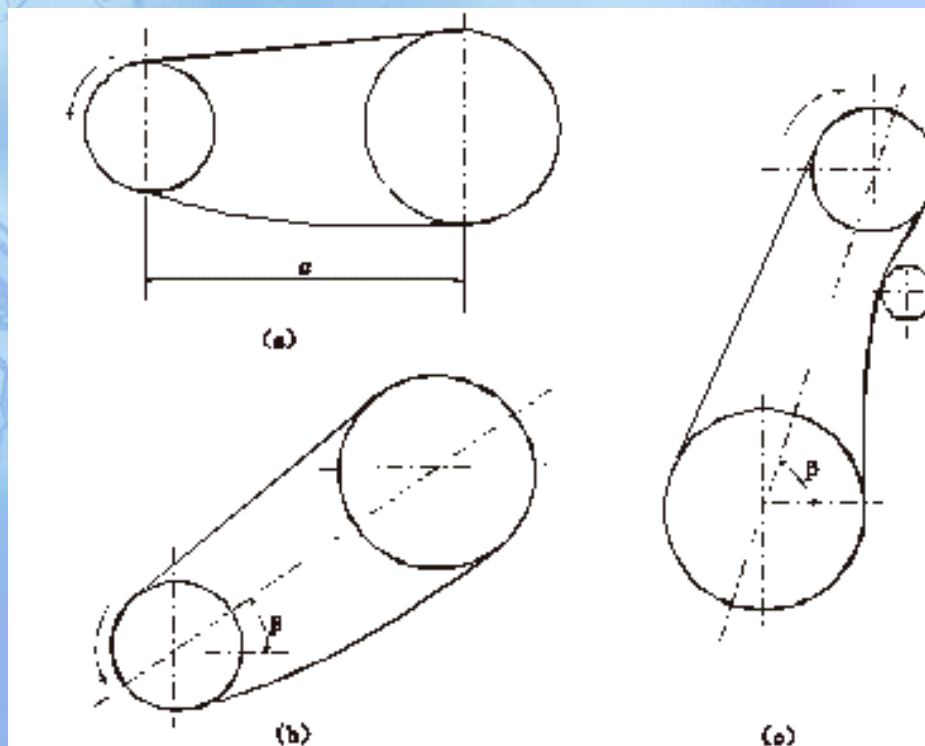
## (2) 链传动的失效形式

- ① 链条的疲劳破坏: 链条不断地由松边到紧边周而复始地运动着, 在紧边拉力和松边拉力反复作用下, 经过一定的循环次数后, 链板首先开始出现疲劳断裂。
- ② 链条铰链磨损失效: 在工作条件恶劣、润滑不良的开式链传动中, 由于铰链中销轴与套筒间的压力较大, 彼此又相对转动, 因而使铰链磨损、链的实际节距变长, 导致传动更不平稳, 容易引起跳齿或脱链。
- ③ 链条铰链的胶合失效: 链轮转速过高而又润滑不良时, 销轴和套筒间润滑膜破坏, 使其两者在很高温度下直接接触, 从而导致胶合。
- ④ 过载拉断失效: 在低速 ( $v < 6\text{m/s}$ ) 重载或短期过载情况下, 链条所受的拉力超过了链条的静强度时, 链条将被拉断。
- ⑤ 滚子和套筒的多冲疲劳破坏: 由于链节与链轮轮齿在啮合时, 滚子与链轮间产生冲击。在高速时, 由于冲击载荷较大, 使套筒与滚子表面发生冲击疲劳破坏。

### (3) 链传动的布置

合理布置原则：

- ① 保证正确啮合，两链轮应位于同一垂直面内，并保持两轴相互平行。
- ② 两轮中心线最好水平布置或中心线与水平线夹角 $\beta$ 不大于 $45^\circ$ 。当 $\beta > 60^\circ$ 时，应设张紧轮。
- ③ 链传动的紧边布置在上，松边布置在下。



#### (4) 链传动的润滑

对于闭式链传动，润滑方式主要有：

- ①人工定期润滑：定期在链条松边内、外链板间隙中注油。
- ②滴油润滑：用油杯向链条松边内、外链板间隙中滴油。
- ③油浴润滑：链条从油池中通过，链条浸油深度约为6~12mm。
- ④压力喷油润滑：用油泵循环供油，油压约0.05MPa即可。

对于开式链传动，只能用人工定期润滑。当链传动不易按上述方式润滑时，可以定期拆卸，进行清洗、润滑和再安装。

#### (5) 链传动的特点

与带传动相比，其主要特点是：

- ①链传动无弹性滑动和打滑，能保证准确的平均传动比，传动效率高；
- ②需要的张紧力小，作用在轴上的压力也小，可减少轴承的摩擦损失；
- ③同样使用条件下，链传动轮廓尺寸小，结构紧凑；
- ④能在灰尘、泥沙及高温等工作条件较恶劣的地方工作。

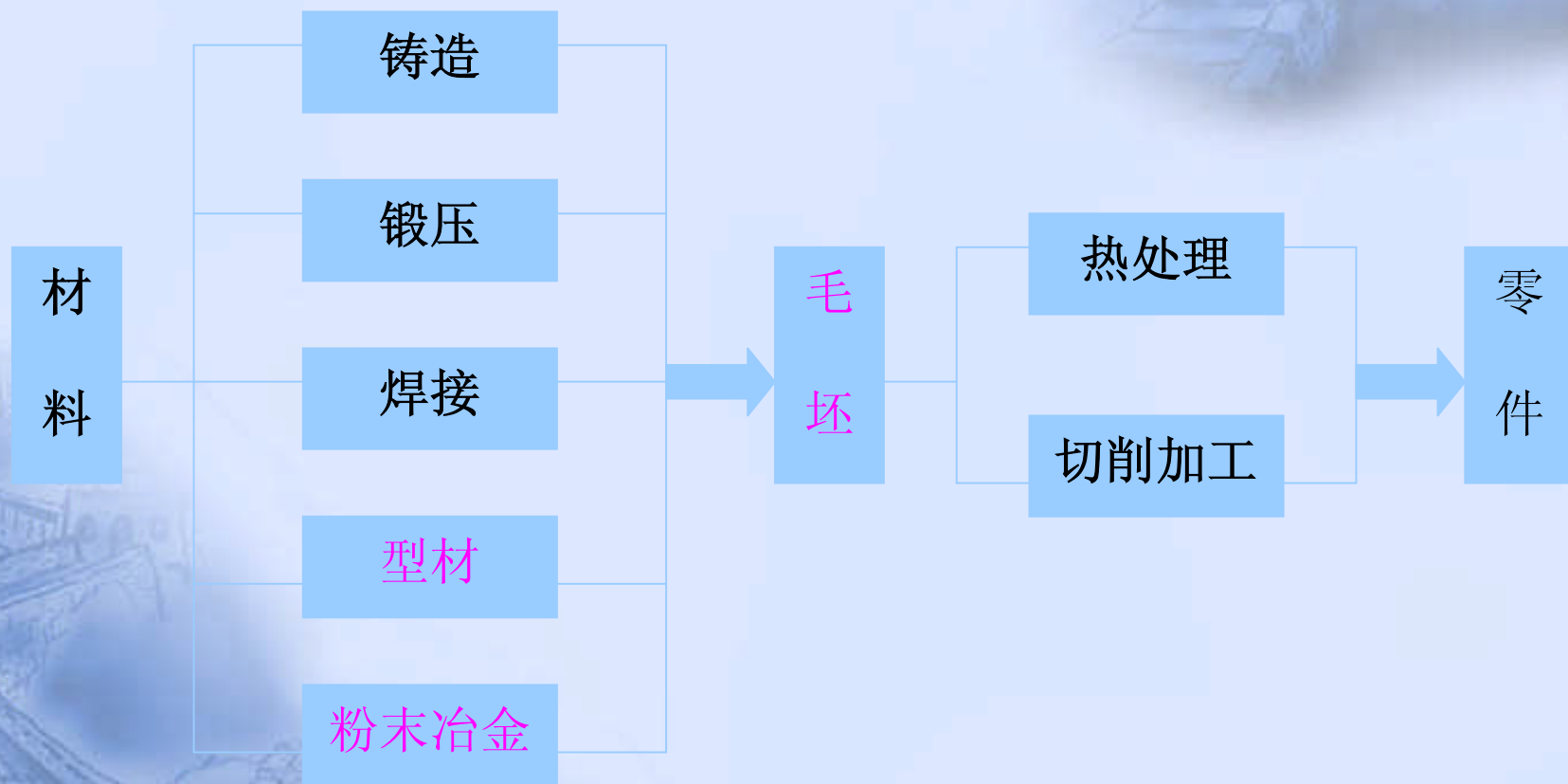
与齿轮传动相比，其主要特点是：链传动的制造和安装精度要求较低，成本低；在远距离传动时，其结构要比齿轮传动轻便得多。

链传动的主要缺点是：

- ①瞬时链速和瞬时传动比是变化的，传动不平稳；
- ②工作时引起噪声；
- ③不宜在载荷变化很大和急速反向的传动中应用；
- ④在两根平行轴间只能用于同向回转的传动。

链传动主要用于两轴中心距较大，要求平均传动比准确，工作条件恶劣，不宜采用带传动和齿轮传动的场合。通常传递的功率  $P \leq 100\text{kW}$ ，传动比  $i \leq 8$ ，链速  $v = 15\text{m/s}$ ，效率约为  $0.95 \sim 0.98$ 。目前链传动广泛应用于冶金、矿山、石油、化工、农机、交通、起重运输和机器制造等部门所使用的机械中。

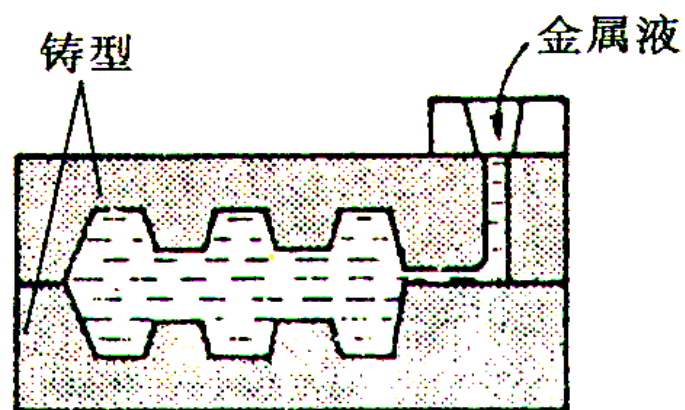
## § 3.2 机械零件加工工艺



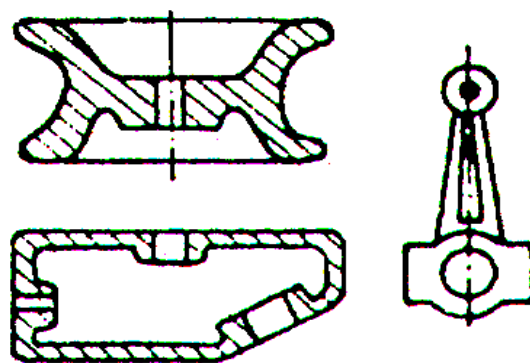
# 一、铸造

## 1、铸造概述

铸造：把熔化的金属液浇注到具有和零件形状相适应的铸型空腔中，待其凝固、冷却后，获得毛坯（或零件）的方法称为铸造。

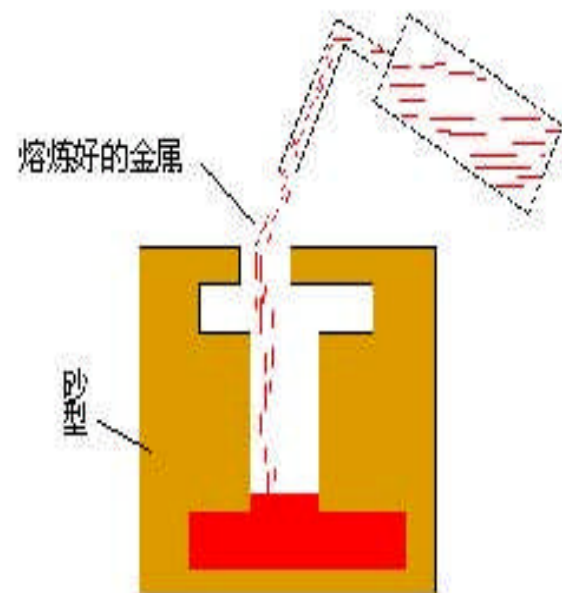


a) 成形原理



b) 铸件举例

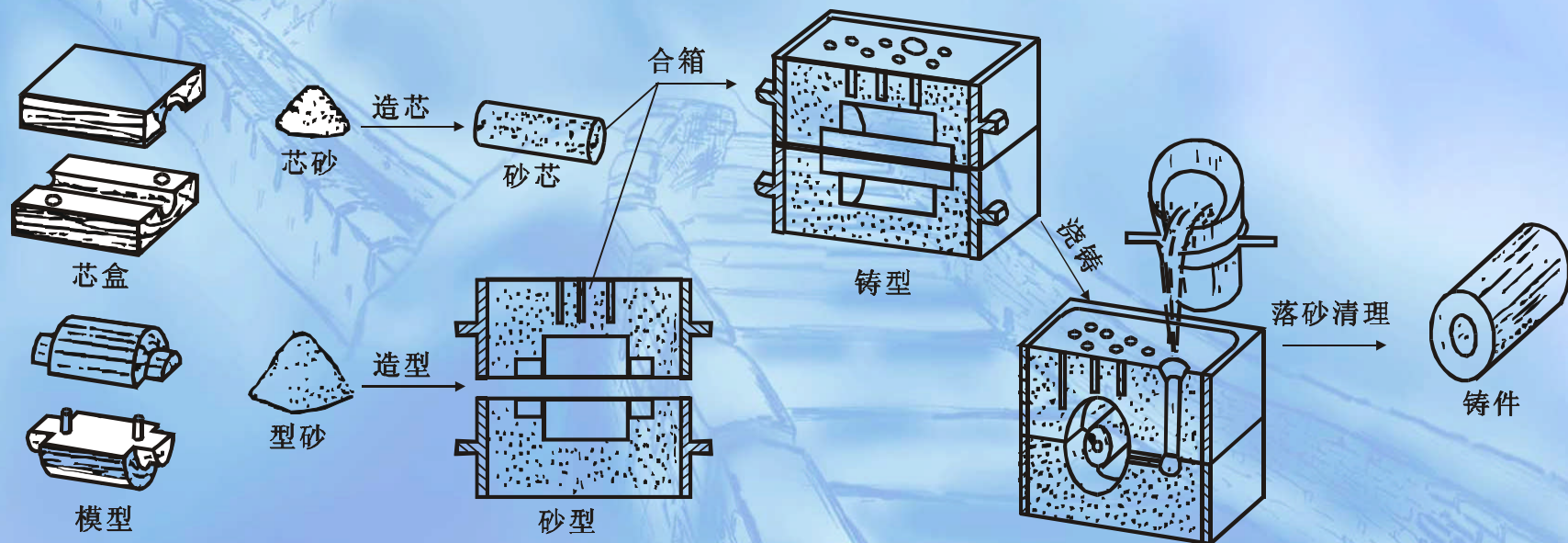
图 2-1 铸造



铸型是根据所设计的零件形状用造型材料制成的。铸型可以用砂型，也可用金属型。如，砂型铸造生产主要的工序为模型加工、配砂、造型、造芯、合箱、熔化、浇注、落砂、清理和检验。

## 2、铸造生产主要特点：

- (1) 可获得形状复杂的金属制件。
- (2) 适应性广。
- (3) 铸件成本低。
- (4) 铸件余量小，节省材料。





# 感受铸造

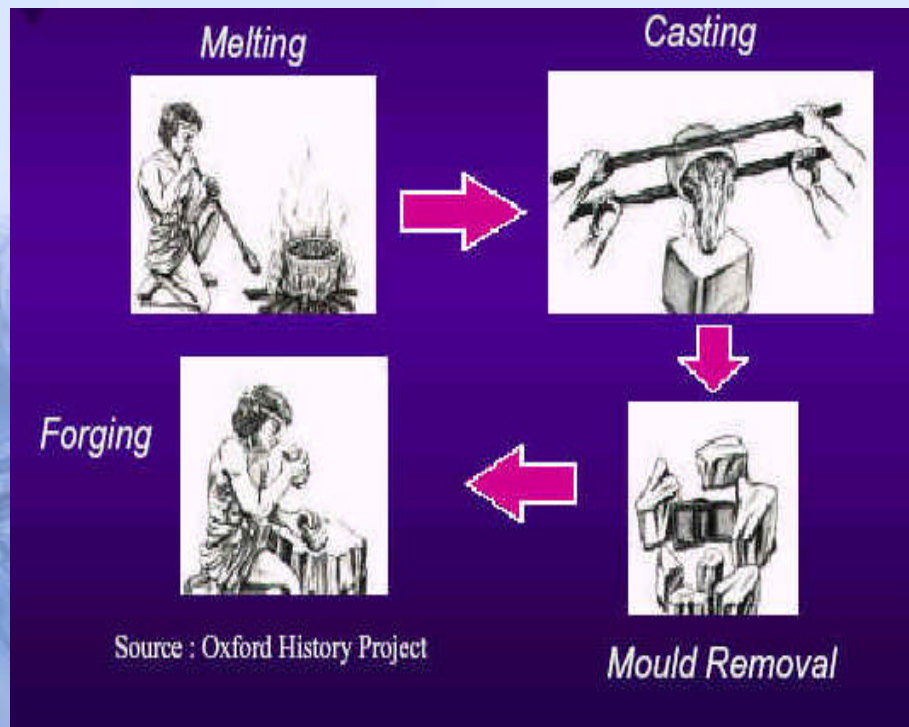
- 在我国古代金属加工工藝中，铸造占着突出的地位，具有广泛的社会影响，像“模范”、“陶冶”、“熔铸”、“就范”等习语，就是沿用了铸造业的术语。劳动人民通过世代相传的长期生产实践，创造了具有我国民族特色的传统铸造工艺。其中特别是泥范、铁范和熔模铸造最重要，称古代三大铸造技术。

泥范铸造：我国自新石器晚期，就进入铜石并用时代。河北唐山等地出土的早期铜器，有锻打成形的，也有熔铸成形的。

熔模铸造：传统的熔模铸造一般称失蜡、出蜡或捏蜡、拔蜡。现代的熔模铸造是从传统的熔模铸造发展而来的。
- 金属型铸造：铸型材料从石和泥、砂改用金属，从一次型经多次型又改进成为耐用性更高的所谓“永久”型（金属型），在铸造技术的历史发展上具有重要的意义。1953年河北兴隆铁范的发现，证明我国早在战国时期已经用白口铁的金属型浇注生铁铸件。近年来，在河南南阳、郑州、镇平和河北满城、山东莱芜等地又陆续出土汉代铁范许多件，品种比战国时期显著增多，型式却基本相同。河南泥池汉魏铁器窖藏中还有铸造成形铁板和矢镞的铁范以及长达半米的大型铁犁范。

# 4,500 BC——1,000 BC 青铜时代 (Bronze Age)

- 从矿石中提炼铜——冶金业的黎明



这张埃及古墓壁画是人类冶金业的最早纪录之一

# 青铜：第一种合金

- 青铜，古称金或吉金，是红铜与其它化学元素（锡、镍、铅、磷等）的合金。
- 史学上所称的“青铜时代”是指大量使用青铜工具及青铜礼器的时期。保守的估计，这一时期主要从夏商周直至秦汉，时间跨度约为两千年左右，这也是青铜器从发展、成熟乃至鼎盛的辉煌期。
- 到春秋战国时期，齐国工匠总结科技经验写成的《考工记》一书中，提出了「金有六齐」，这是世界科技史上最早的冶铜经验总结。



夏钺



戈

# 青铜文化

## 商代青铜bronze 文化

仰韶文化的后期，即大约在公元前3500年以后的一个时期，我们的祖先已经知道了铜，并且已会制造简单的小件铜器。现已知道的最早的青铜器物，是1975年在甘肃东乡县林家的甘肃仰韶文化马家窑类型遗址中出土的一件公元前3000年左右青铜刀。

到了商代，青铜器冶铸工艺高度发展，商代晚期即殷墟时期，已经出现特别巨大或精细的器物，技术水平和艺术水平都很高。西周晚期，事实上是青铜器走向衰落的时期。

# 青铜文化



四羊方尊

虎食人卣



# 青铜文化



二里冈出土饕餮乳钉纹方鼎

# 青铜文化



饕餮纹鼎



司母辛方鼎

西安建筑科技大学

# 青铜文化

## 商代青铜文化

司母戊鼎，1939年安阳武官村出土，高133厘米，重833千克，是中国目前发现最重的青铜器。据估计，铸造这样大型青铜器，需300多人同时工作。



司母戊鼎



# 青铜文化



豕尊

司母辛觥





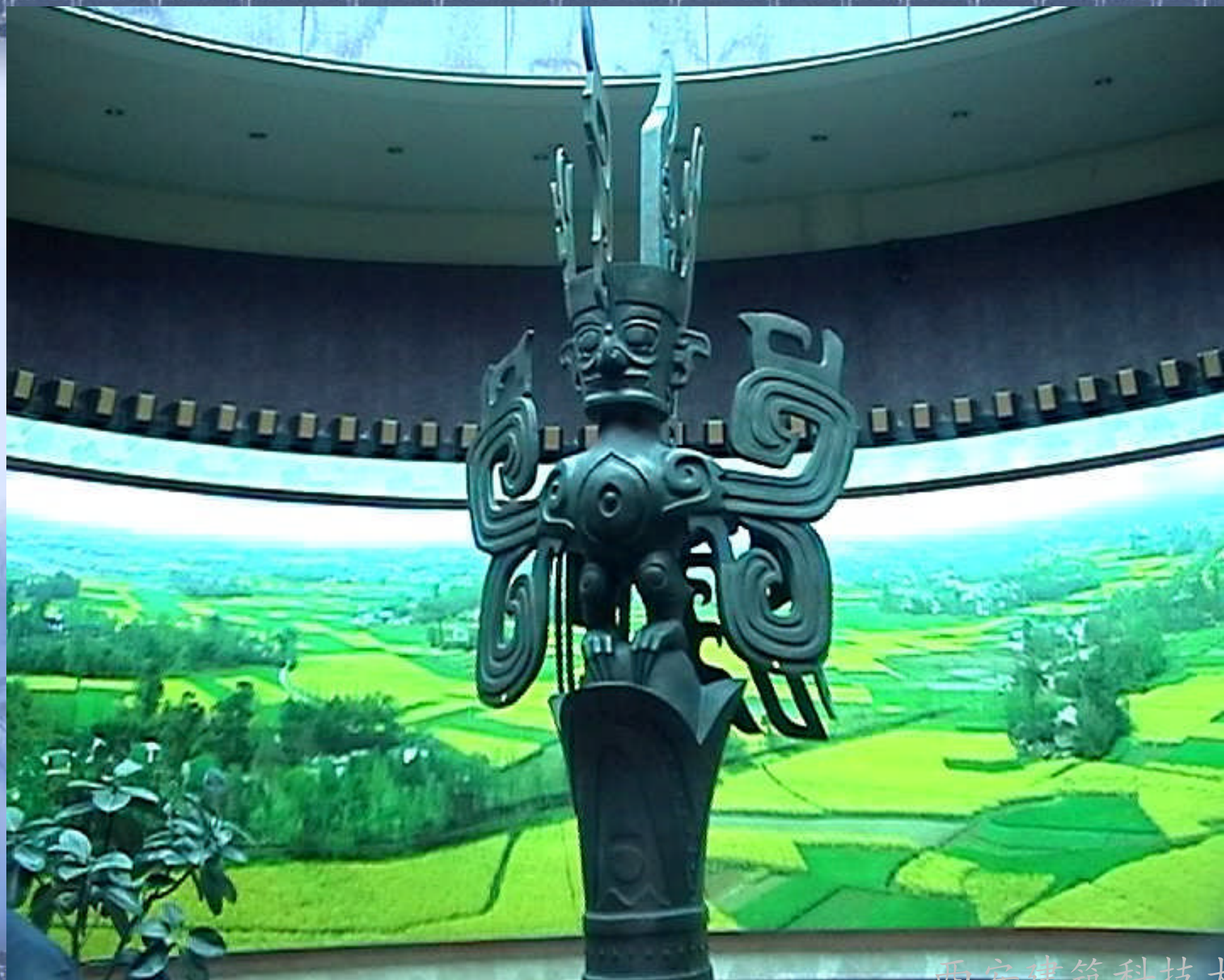
越王勾踐劍

湖北江陵楚墓出土越王勾踐寶劍

## 三星堆

- 立人像铸于商代晚期，人像高172厘米，底座高90厘米，通高262厘米，是世界上最大的青铜立人像，被尊称为“世界铜像之王”。
- 突目面具铸于商代晚期，原件高64.5厘米，宽138厘米，眼球柱状外突长达13.5厘米，其造型在世界上亦属首见。







# 永乐大钟

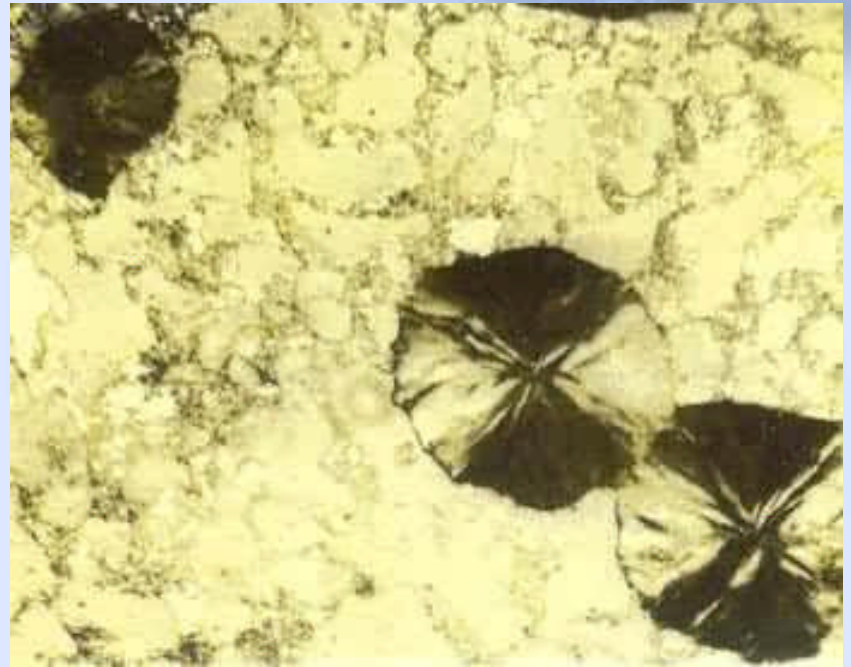
- 铜钟通高6.75米，钟壁厚度不等，最厚处185毫米，最薄处94毫米，重约46吨。钟体内外遍铸经文，共22.7万字。铜钟合金成分为：铜80.54%、锡16.40%、铝1.12%，为泥范铸造。



# 铁器时代 (Iron Age)



湖南长沙砂子塘战国凹形铁锄



中国古代铁器中带有球状石墨的金相组织

# 现代铸造

- 我国已成功地生产出了世界上最大的轧钢机机架铸钢件（重**410t**）和长江三峡电站巨型水轮机的特大型铸件





感受铸造

西安建筑科技大学





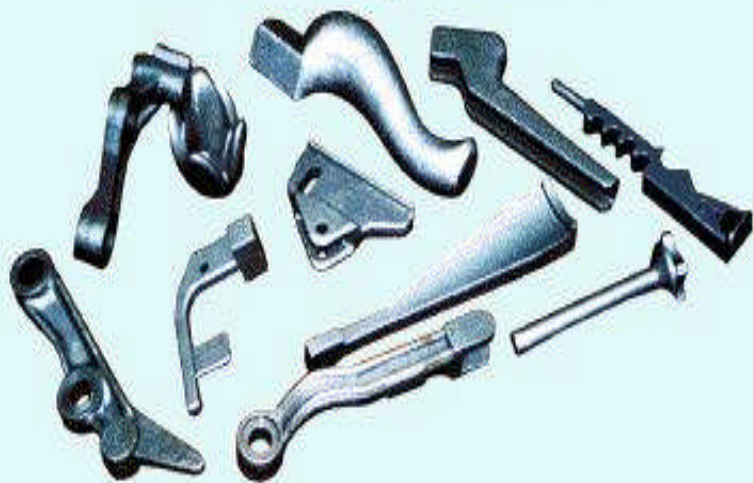




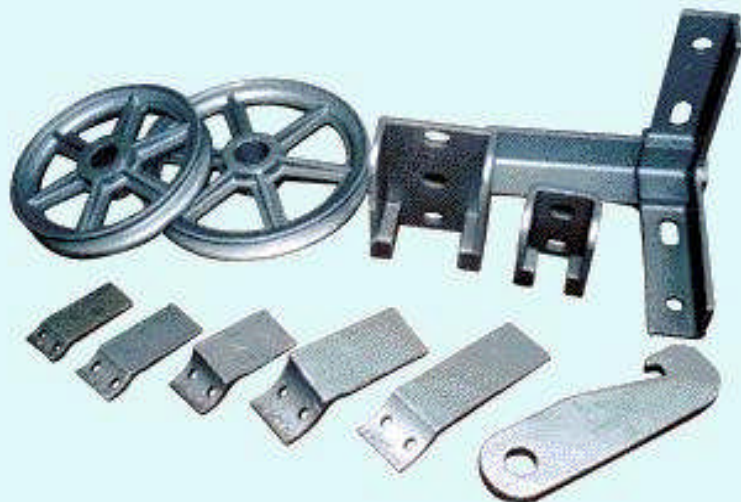
油田产品系列  
Oil field parts series



车辆配件系列  
Vehicle parts series



摩配系列  
Motor parts series



设备系列  
Equipment parts series

## 二、压力加工

### 1、概述

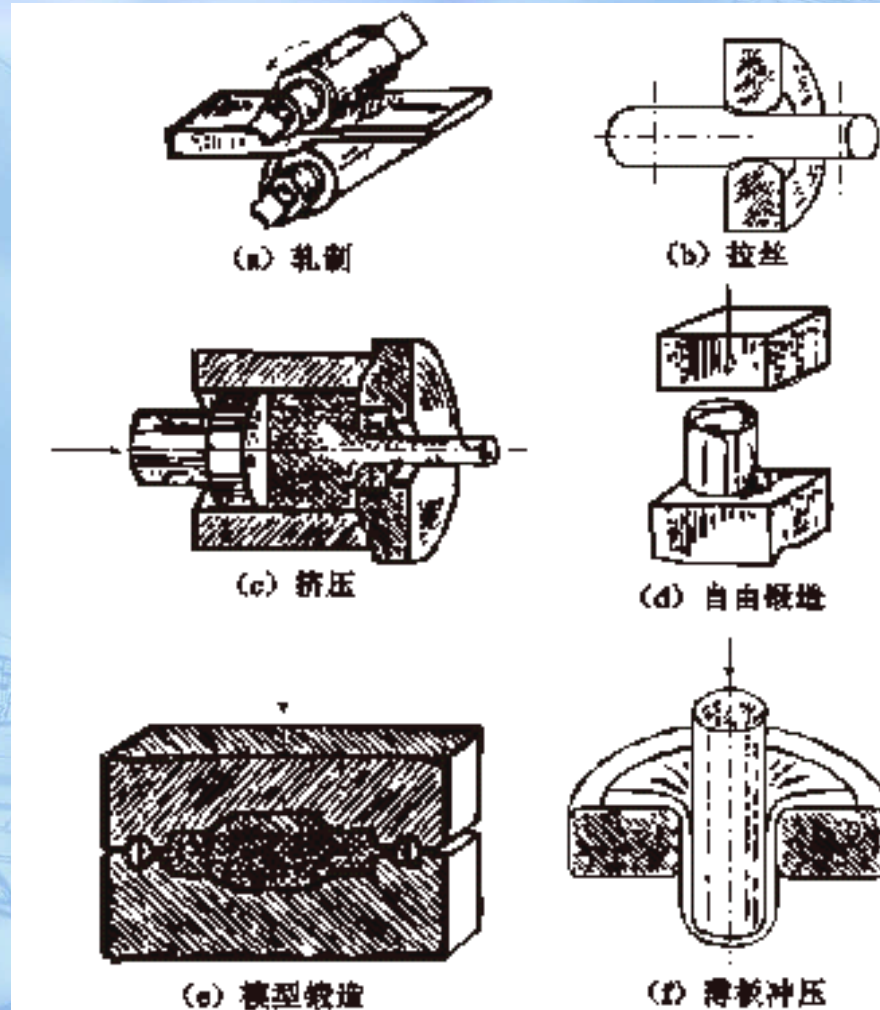
使金属坯料在外力作用下发生塑性变形，以获得所需形状、尺寸及机械性能的毛坯或零件的方法。

金属压力加工的方式有：

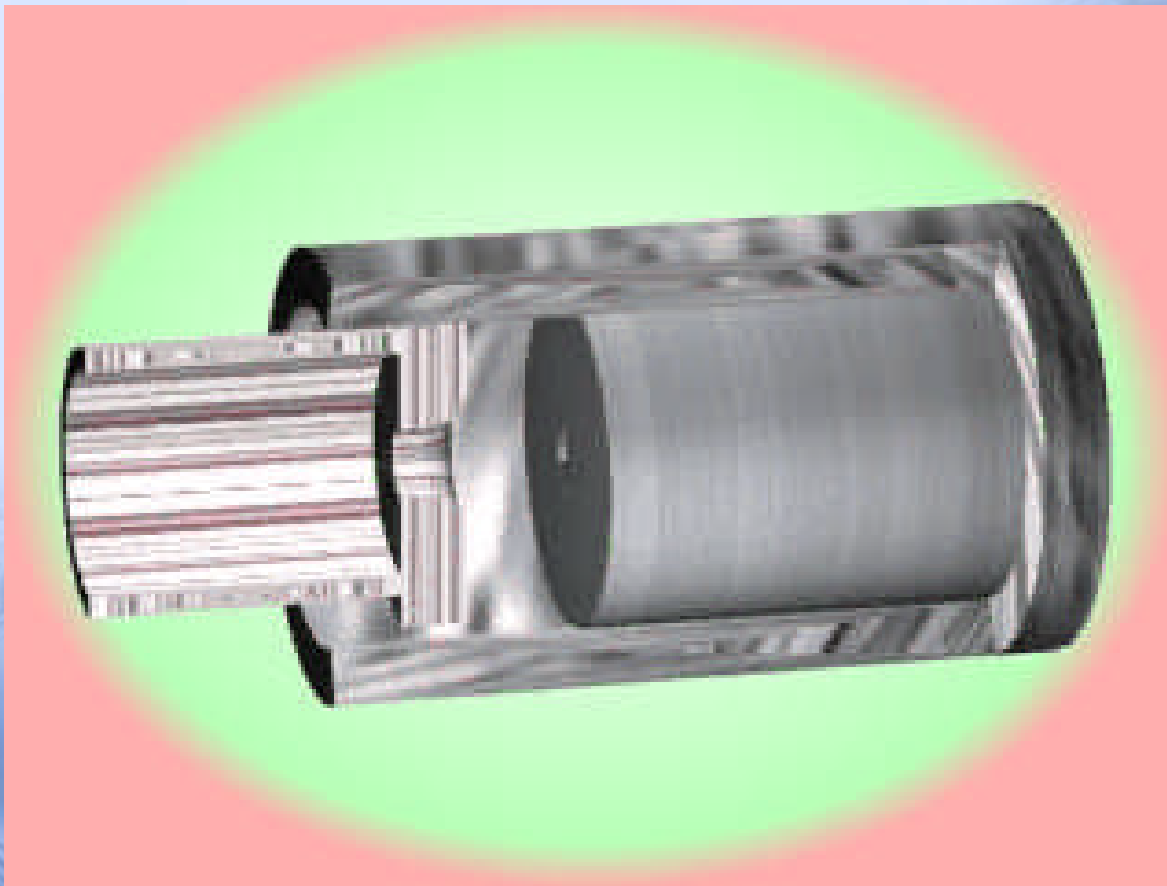
轧制、拉丝、挤压、自由锻造、模型锻造、薄板冲压等。

### 2、压力加工的特点

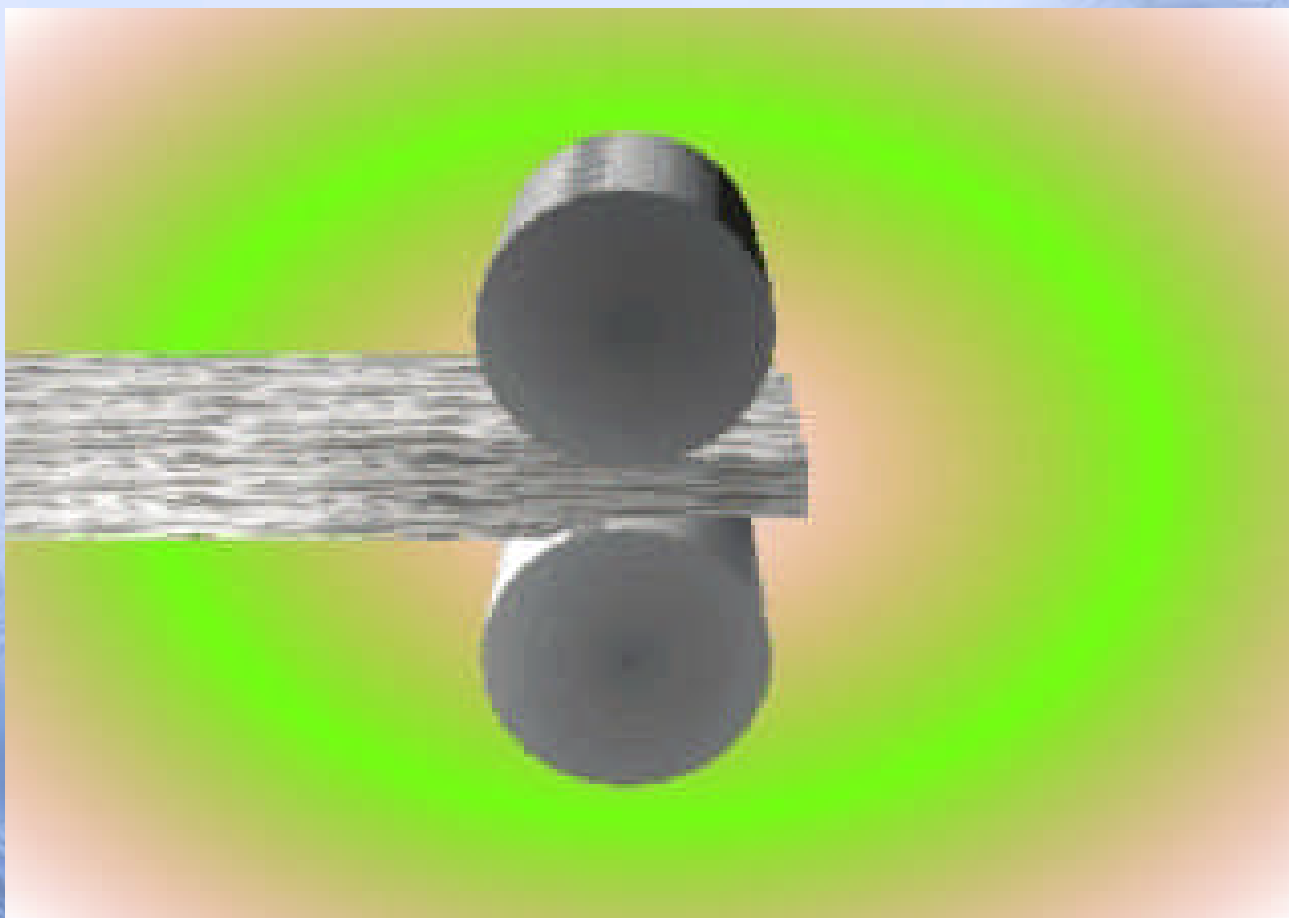
能够提高制件的机械性能并具有较高的生产效率（自由锻造除外）。



## 挤压过程



## 板材轧制原理

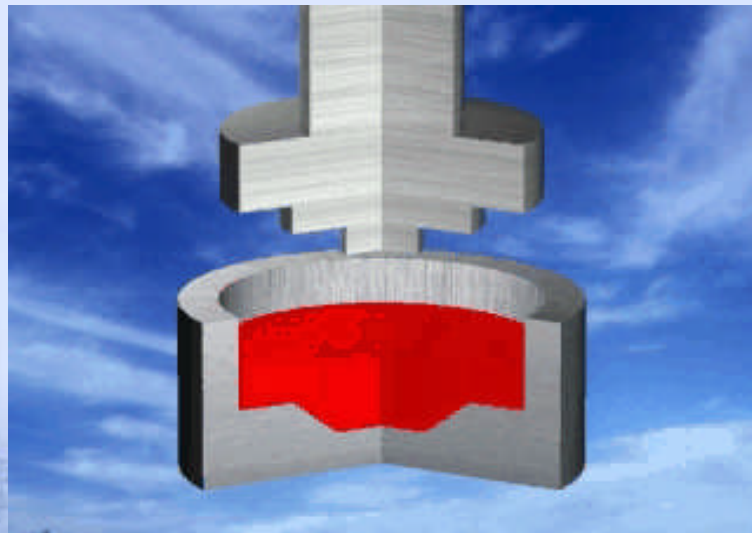




# 液态模锻

## 液态模锻的工艺流程：

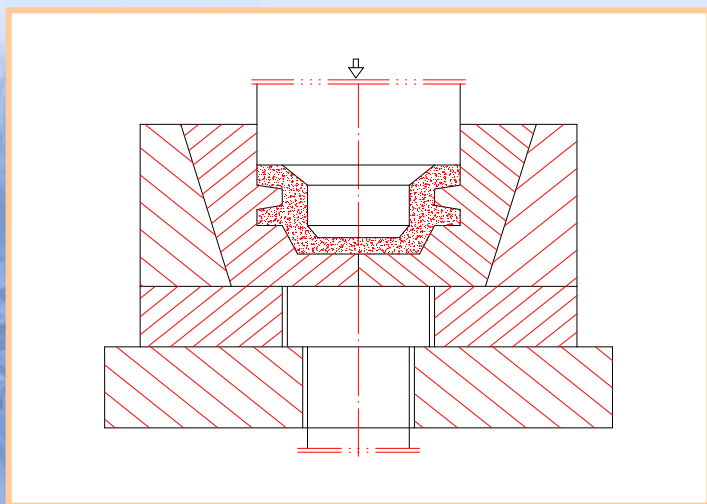
原材料配制→熔炼→浇注→加压成型→脱模→冷却→热处理→检验→入库。



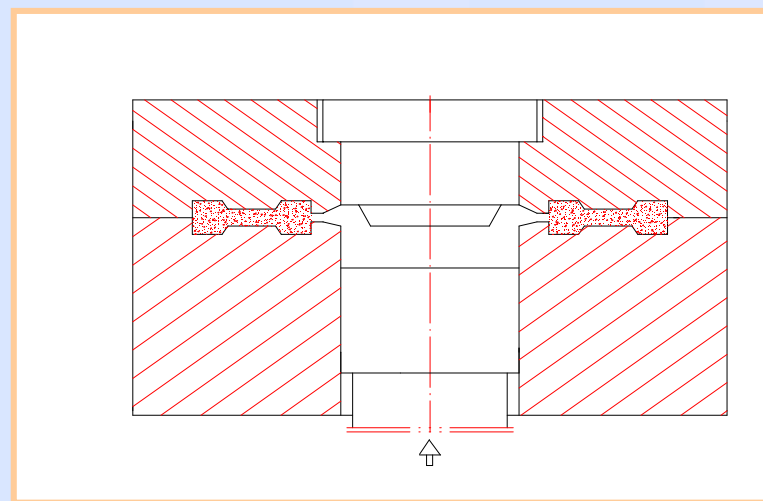
液态模锻原理仿真

**直接式液态模锻：**压头（成型凸模）直接作用在液态金属上，在压力下充型、凝固、并伴有微量的塑性变性组织。适合于生产形状简单、性能要求较高的零件。

**间接式液态模锻：**同全立式压铸相似。



直接式液态模锻



间接式液态模锻

### 三、焊接

#### 1、焊接概述

对两块分离的金属材料，进行局部加热或者加压，依靠它们之间的原子结合力，而把两块金属连接成为一个整体的方法。

#### 2、焊接的特点

(1) 省材料与工时。与其它连接方式相比，所需配件少，工序短。

(2) 能化大为小，拼小成大。

(3) 由于接头金属的原子组成了新的结晶，连接质量好。

#### 3、焊接的方法

熔化焊：它的特点是两块金属的接头处，必须加热至熔化状态，冷凝后彼此焊接起来。电弧焊、氧-乙炔气焊等都是熔化焊。

压力焊：它的特点是两块金属的接头处，不论是加热或不加热，都要加压并在压力作用下，彼此焊接起来的。电阻焊就是压力焊中的一种焊接方法。

钎焊：它的特点是将两块金属加热而不熔化，只有填充在接头间的钎料熔化（因其熔点比被焊金属低），待钎料凝固后，即把两块金属彼此连接起来。

# 手工电弧焊的焊接过程

## 一、手工电弧焊的特点

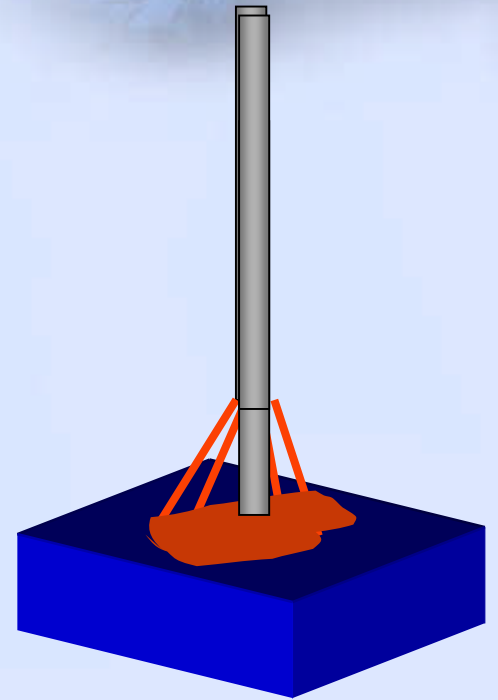
1. 设备简单、应用灵活方便。
2. 劳动条件差、生产率低、质量不稳定。

## 二、手工电弧焊焊接过程

①引弧 → ② 形成熔池 → ③形成焊缝

## 三、焊接电弧

### 1. 焊接电弧的概念



在焊条末端和工件两极之间的气体介质中，产生强烈而持久的放电现象。

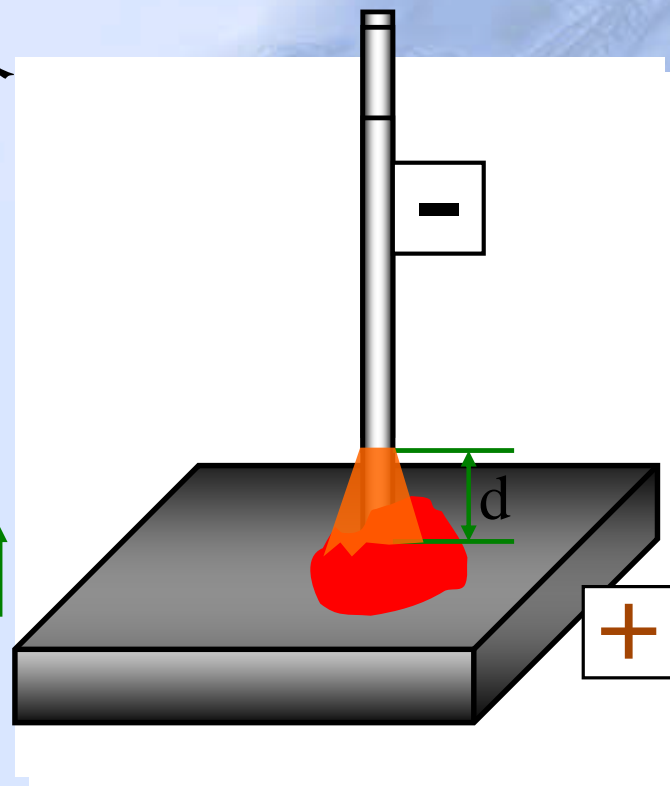
具备两个条件 { 使气体电离  
阴极发射电子

接触电阻：  $R \uparrow \uparrow$  } 电阻热：  $Q = I^2 R t \uparrow \uparrow$   
短路电流：  $I \uparrow \uparrow$

$d \downarrow \downarrow$        $E = V/d \uparrow \uparrow$

热电离      碰撞电离

焊接电弧的稳定燃烧 — 就是带点粒子产生、运动、复合、产生的动态平衡过程。



## 2. 电弧的构造及热量分布

- 阴极区：2400k 36%
- 阳极区：2600k 42%
- 弧柱区：5000~8000k 21%

## 3. 电弧的极性

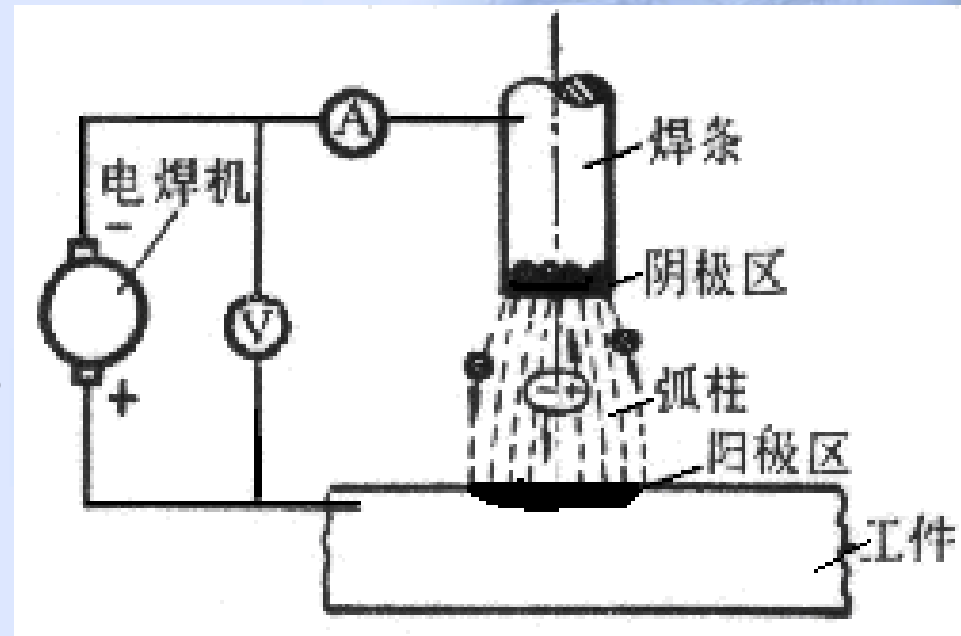
直流电源正接极：

工件—正极（阳极）；焊条—负极（阴极）。

直流电源反接极：

工件—负极（阴极）；焊条—正极（阳极）。

用于薄板金属的焊接



# 埋弧自动焊

## 1. 埋弧自动焊设备及焊接过程

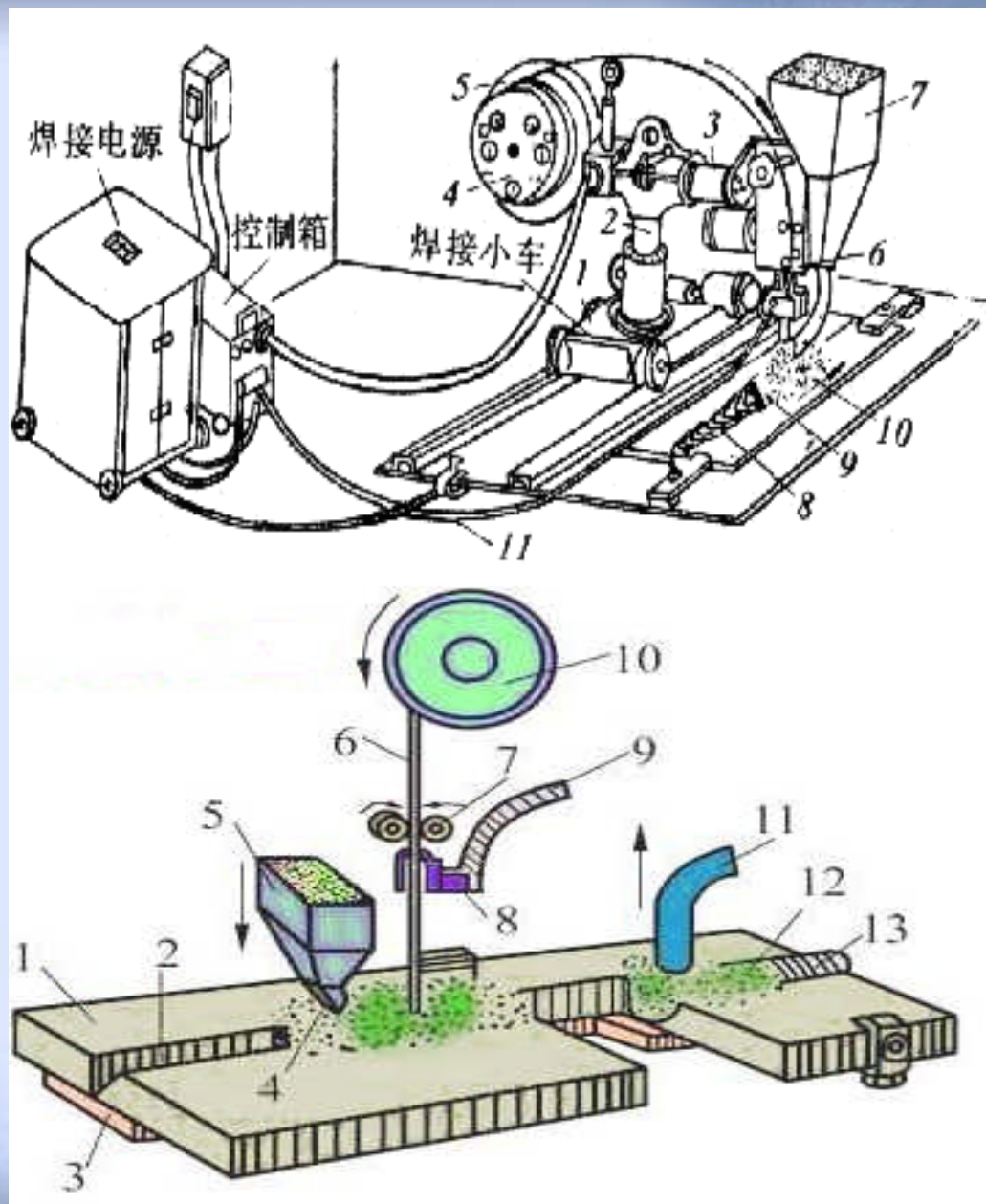
焊接电源

控制箱

焊接小车

焊接热源：电弧热

溶池保护：焊剂（气、渣）



## 2. 埋弧自动焊工艺特点

- 1) 生产率高（手弧焊的5~10倍）
- 2) 焊接质量高且稳定。
- 3) 节约金属材料、生产成本低。
- 4) 劳动条件好。
- 5) 只能在水平位置焊接。

应用：主要用于较厚钢板的长直焊缝和较大直径的环形焊缝焊接。

如压力容器的环焊缝和直焊缝、锅炉冷却壁的长直焊缝、船舶和潜艇壳体、起重机械、冶金机械（高炉炉身）等的焊接。



# 气体保护焊

## 1. 氩弧焊

利用氩气作为保护性介质的电弧焊方法。

焊接热源：电弧热      保护介质：Ar

- Ar {
- ①不与金属发生化学反应—不产生夹渣缺陷
  - ②不溶解于液体金属中—不产生气孔缺陷
  - ③比重大于空气 (25%)

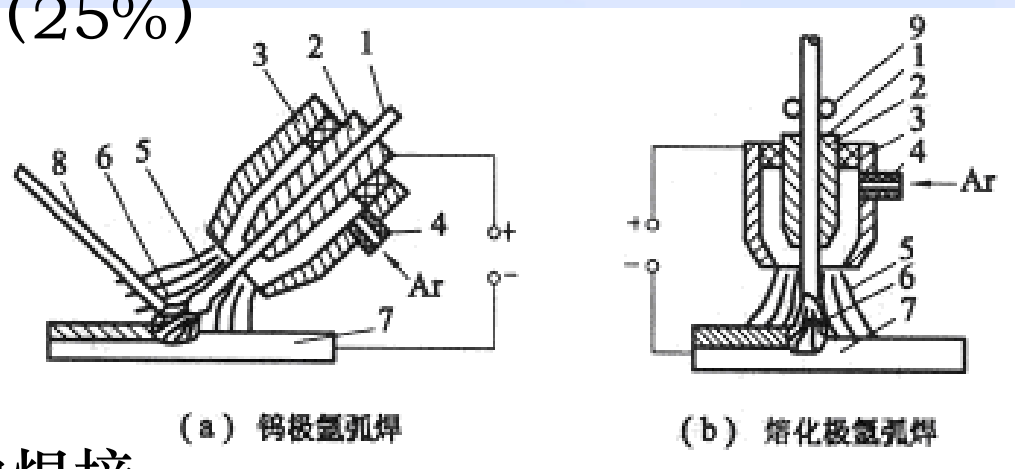
“阴极破碎”作用

### 1) 熔化极氩弧焊

25mm以下的工件

### 2) 非熔化极氩弧焊

适于6mm以下工件的焊接



### 3) 氩弧焊的特点及应用

- ① 机械保护效果好，焊缝金属纯净，焊缝成形美观，焊接质量优良。
- ② 电弧燃烧稳定，飞溅小。
- ③ 焊接热影响区和变形小。
- ④ 可进行全位置焊接。
- ⑤ 氩气昂贵，设备造价高。

应用： 适用所有金属材料的焊接。

适用于易氧化的有色金属及合金钢材料的焊接。

如：铝、镁、钛及其合金和耐热钢、不锈钢等。

## 2. CO<sub>2</sub>气体保护焊

以CO<sub>2</sub>气体作为保护性介质的电弧焊方法。

焊接热源：电弧热      保护介质：CO<sub>2</sub>

- CO<sub>2</sub> {
- ① 与金属发生化学反应—产生夹渣缺陷
  - ② 溶解于液体金属中—产生 CO 气孔缺陷
  - ③ 比重大于空气 (25%)

### 1) 存在问题

- ① 氧化严重；
- ② 气孔倾向大 (CO) ；
- ③ 飞溅严重。

## 2) CO<sub>2</sub>气体保护焊的特点及应用

- ① 生产率高（是手弧焊的1~3倍）。
- ② 成本低（是手弧焊的40%）。
- ③ 焊接热影响区和变形小。
- ④ 可进行全位置焊接。
- ⑤ 飞溅严重，焊缝成形差。

### 应用:

适用于低碳钢和强度级别不高的低合金结构钢的焊接。

目前广泛用于造船、机车车辆、汽车制造、农业机械等。

# 压力焊

通过加压、或同时加热加压，使焊件产生塑性变形，并经再结晶和扩散作用，使两部分金属达到原子间的结合，实现连接的焊接方法。

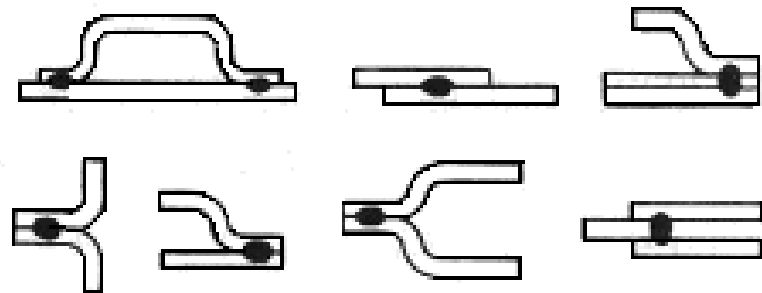
## 一、电阻焊

### 1. 点焊

对组合焊件经电极加压，利用电流通过焊接接头的接触面及邻近区域产生的电阻热，实现焊接。

工艺参数 { 电极压力  
焊接电流 适中  
通电时间

焊点距离 { 太近—分流现象严重  
太远—强度不够



应用：4mm以下的薄板搭接。

## 2. 缝焊

应用：3mm以下的薄板搭接。

如：密封的容器（油箱、水箱等）、管道等。

## 3. 对焊

主要用于棒料的对接。

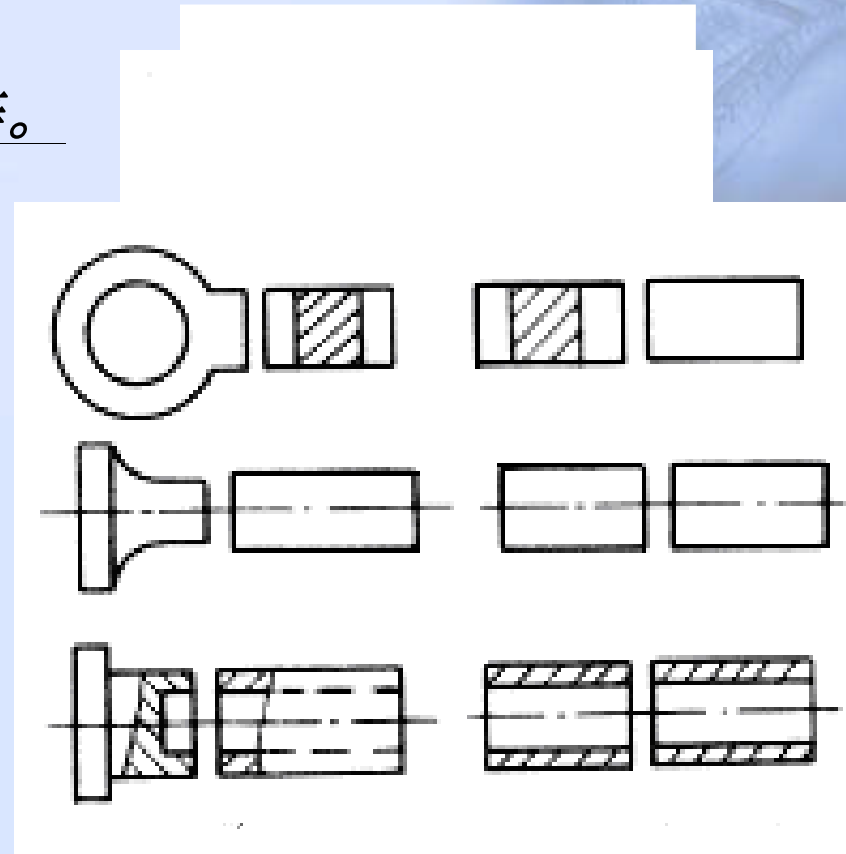
### 1) 电阻对焊

应用：用于断面简单，直径（或边长）小于20mm或强度要求不太高的工件。

### 2) 闪光对焊

应用：用于重要工件的焊接。可焊相同金属，也可焊异种金属（铝—钢、铝—铜等）。

工件直径—0.01mm~200mm。



# 钎焊

是将钎料熔化，利用液态钎料湿润母材，填充接头间隙并与母材相互扩散，冷凝后实现连接的焊接方法。

## 一、钎焊的种类

### 1. 软钎焊

钎料的熔点在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

接头强度低，一般为 $60\sim 190\text{MPa}$ ，工作温度低于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2. 硬钎焊

钎料的熔点在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

接头强度高，在 $200\text{MPa}$ 以上，工作温度较高。

## 二、钎料和溶剂

### 1. 钎料

钎料的作用 { ① 连接  
② 填充

钎料的种类 { ① 软钎料：锡铝合金（焊锡）  
② 硬钎料：铝基、铜基、银基、镍基合金等。

### 2. 溶剂

溶剂的作用 { ① 清理作用 去除表面氧化皮  
② 降低表面张力 改善液态钎料对焊件的湿润性，增强毛细管作用。  
③ 保护作用



### 三、钎焊的特点及应用

1. 加热温度低，接头组织、性能变化小；焊接变形小，工件尺寸精确。
2. 可焊同种、异种金属和厚薄悬殊的工件。
3. 生产率高。易于实现自动化。
4. 设备简单，生产投资费用少。

应用：主要焊接精密、微型、复杂、多焊缝异种金属的焊接。

目前：软钎焊广泛用于电子、电器、仪表等行业；硬钎焊用于硬质合金刀具、钻探钻头、换热器的焊接。

## 四、金属切削加工

金属切削加工是利用刀具和工件的相对运动，从毛坯上切去多余的金属层，从而获得几何形状、尺寸精度和表面粗糙度都符合要求的机器零件的加工方法。

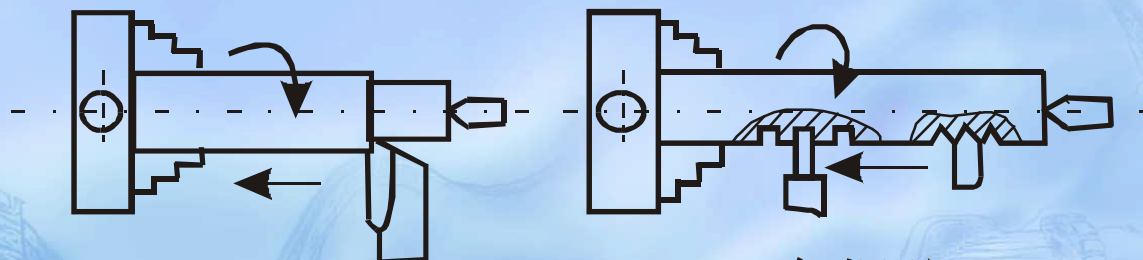
■钳工是工人手持工具进行切削加工。由于钳工操作灵活方便，所以在装配、修理以及新产品研制中广泛应用。

■机械加工则是工人操作机床来完成切削加工的，主要方式有车削、钻削、刨削、铣(xi)削和磨削等。

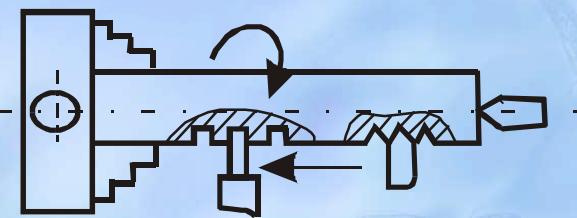
### 1、车削加工

车削时，工件的转动是主运动，刀具的移动是进给运动。车床能广泛地加工出各种旋转表面，如内外圆柱面、圆锥面、成形面以及各种螺纹等。

车削加工



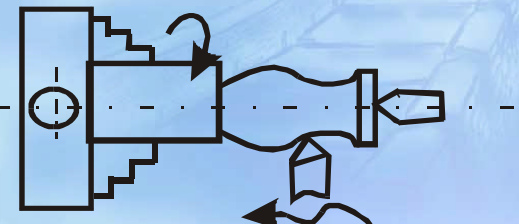
(a) 车外圆



(b) 车螺纹



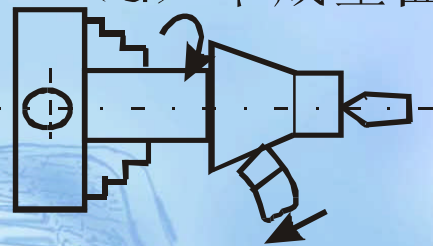
(c) 车端面



(d) 车成型面



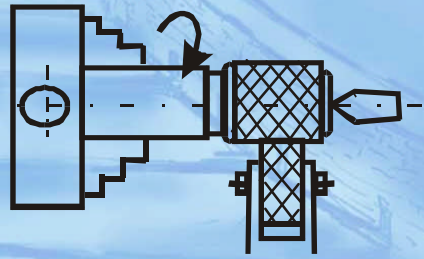
(e) 车槽



(f) 车锥面



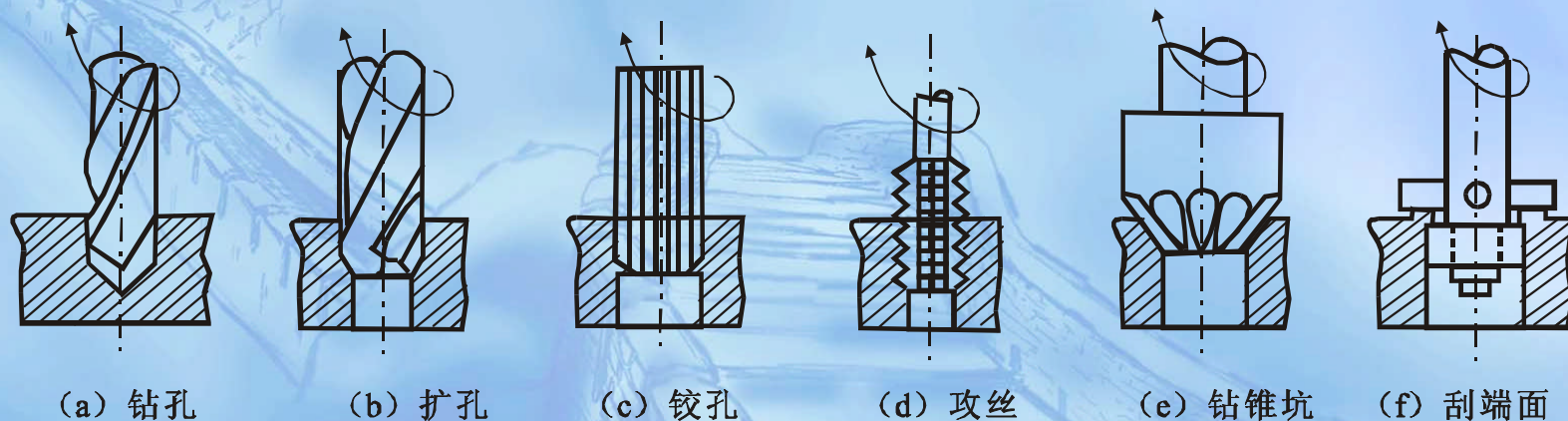
(g) 钻镗孔



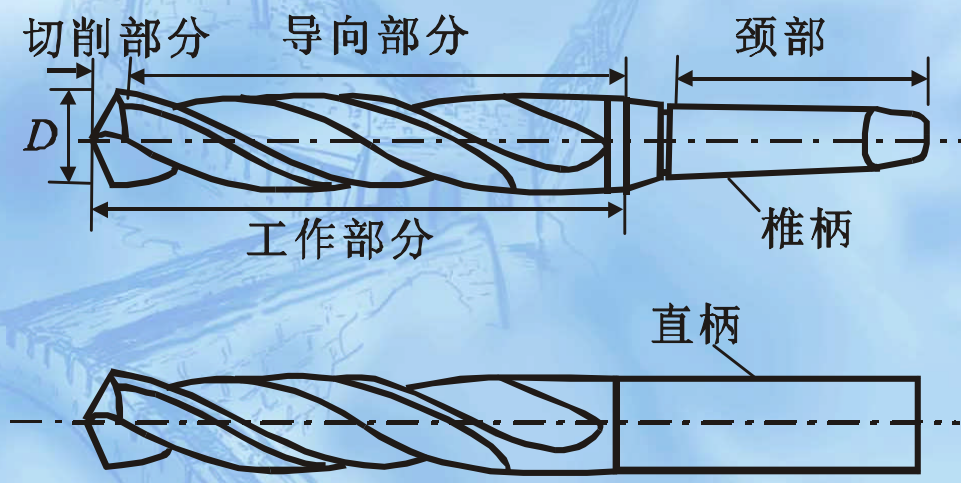
(h) 滚花

## 2、钻削加工

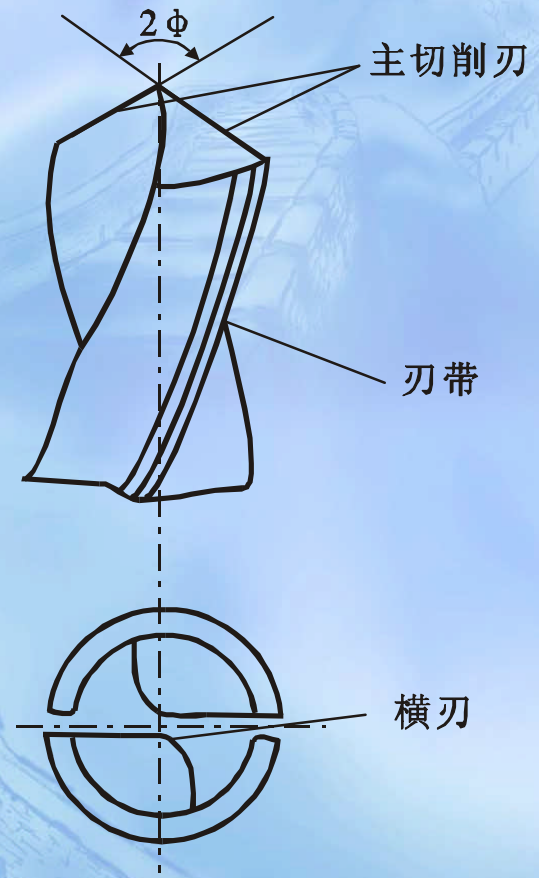
在钻床上可以进行钻孔、扩孔、铰孔、攻丝、钻锥坑以及修刮端面等等。钻削时，刀具的旋转运动是主运动，刀具沿本身轴线的移动为进给运动。钻孔用的刀具主要是麻花钻头。麻花钻的前端为切削部分，有两个对称的主切削刃，两刃间的夹角通常为 $2\phi = 116^\circ \sim 118^\circ$ ，称为顶角。钻头顶部有横刃，即两后面的交线，它的存在使钻削时的轴向力增加。导向部分上有两条刃带和螺旋槽，刃带的作用是引导钻头，螺旋槽的作用是向孔外排屑。



钻削加工



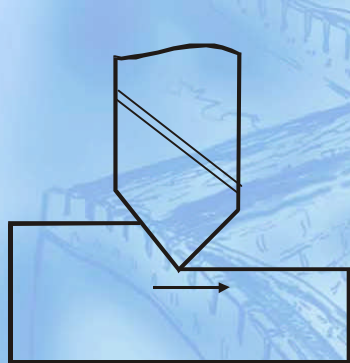
麻花钻



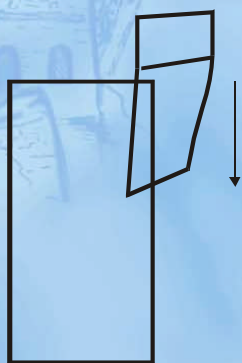
麻花钻的切削部分

### 3、刨削加工

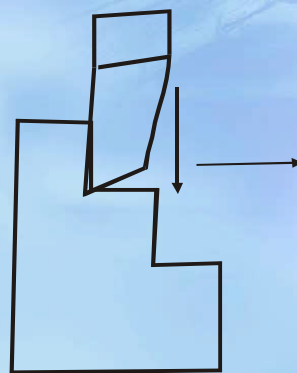
在刨床上用刨刀加工工件叫做刨削。刨床主要用来加工平面（水平面、垂直面、斜面）、槽（直槽、T型槽、V型槽、燕尾槽）及一些成形面。



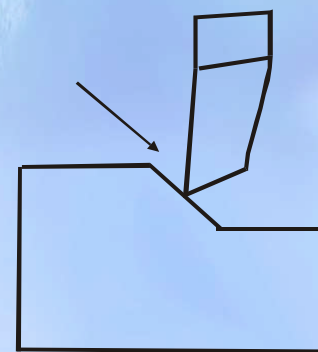
(a) 刨平面



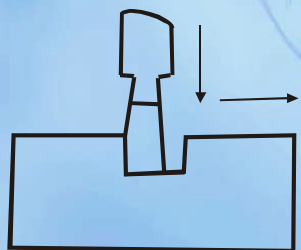
(b) 刨垂直面



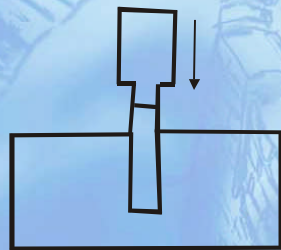
(c) 刨台阶面



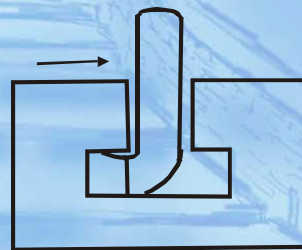
(d) 刨斜面



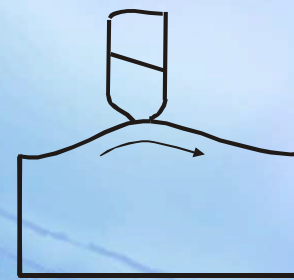
(e) 刨直槽



(f) 切断



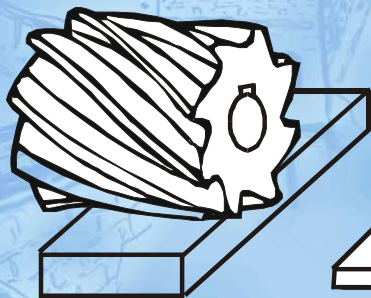
(g) 刨T形槽



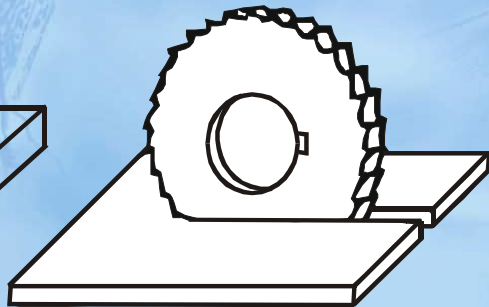
(h) 刨成形面

#### 4、铣削加工

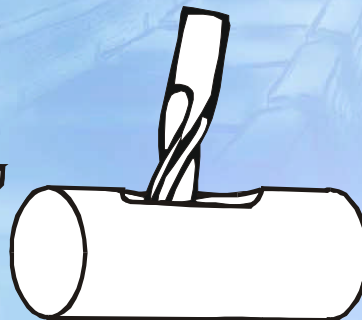
铣削是一种高生产率的平面加工方法。铣削时，刀具的旋转是主运动，工件作直线进给运动。



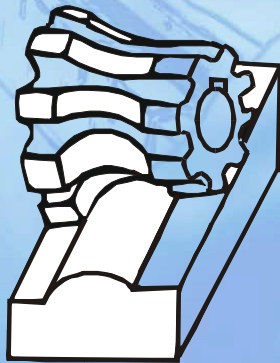
(a) 铣平面



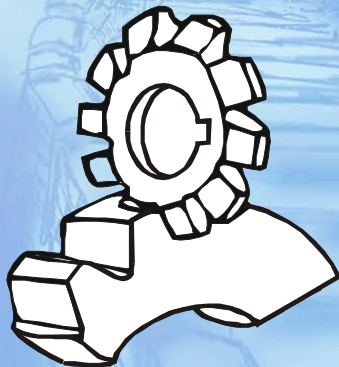
(b) 切断



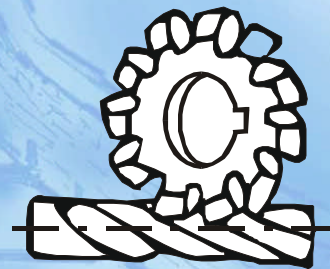
(c) 铣键槽



(d) 铣成型面



(e) 铣齿轮

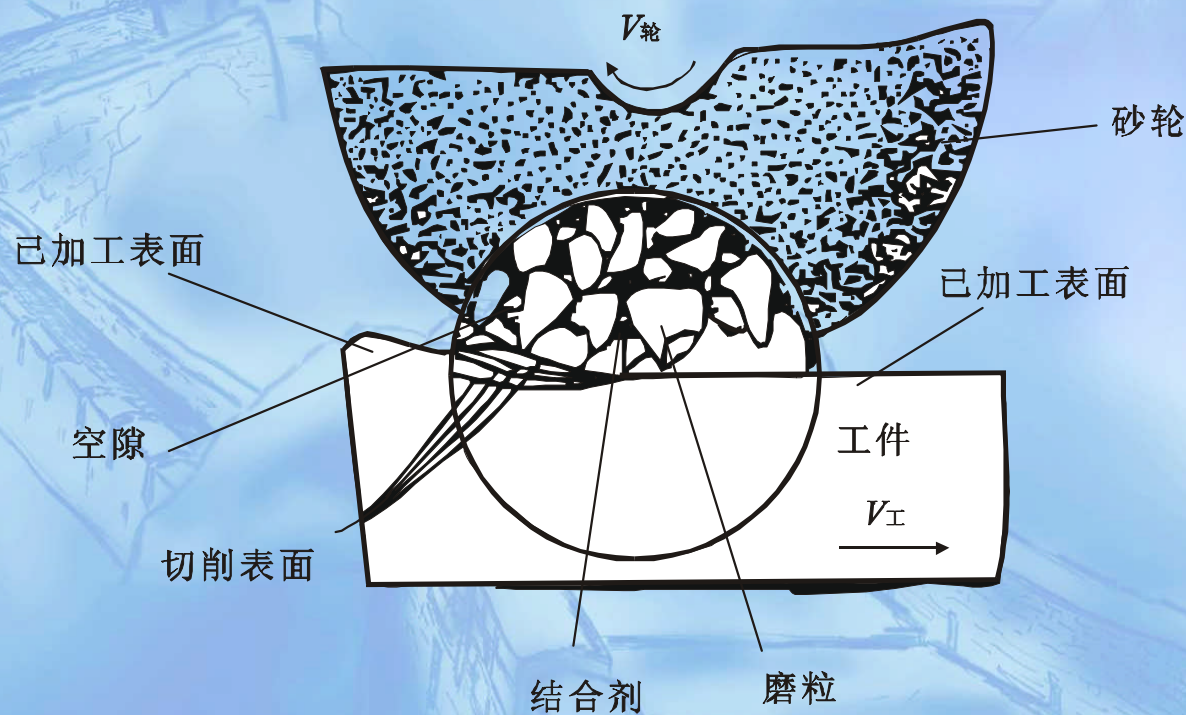


(f) 铣螺旋形槽

## 5、磨削加工

用砂轮对工件表面进行切削加工，是机器零件精密加工的主要方法之一。

磨削用的砂轮是由许多细小而且极硬的磨粒用结合剂粘接而成的。在砂轮的高速旋转下，切入工件表面。所以磨削的实质是一种多刀多刃的超高速切削过程。



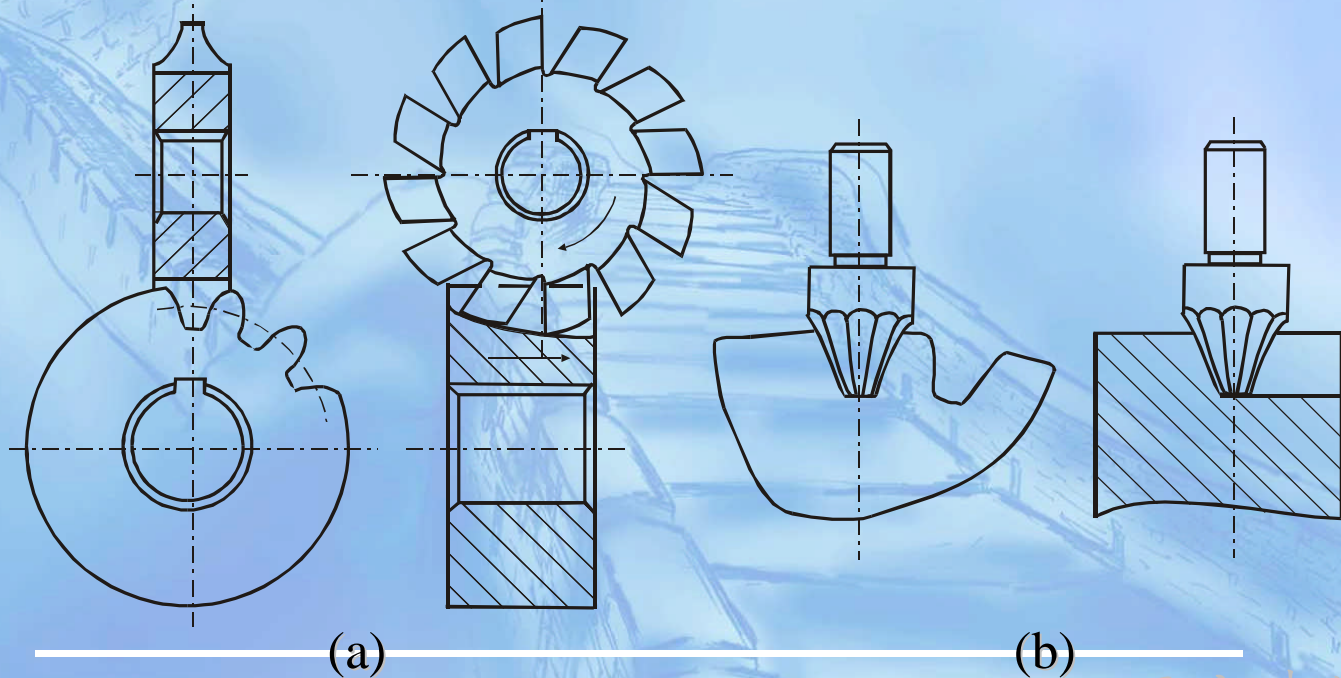


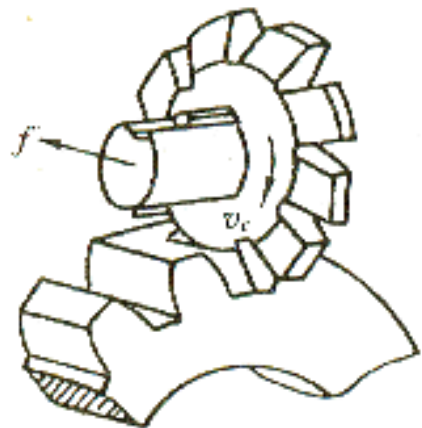
## 6、齿轮齿形加工

■成形法（也称仿形法）：用与被切齿轮齿间形状相符的成形刀具，直接切出齿形的加工方法，如铣齿、成形法磨齿等。铣削时，铣刀做旋转主运动，工件随工作台作纵向进给运动。

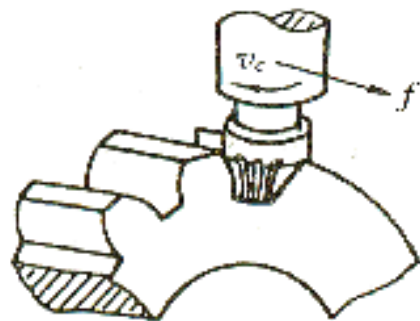
■展成法（也称范成法或包络法）：利用齿轮刀具与被切齿轮的啮合运动（或称展成运动）切出齿形的加工方法，如插齿、滚齿、剃齿和展成法磨齿等。

(1) 铣齿：利用成形齿轮铣刀，在万能铣床上加工齿轮齿形的方法。



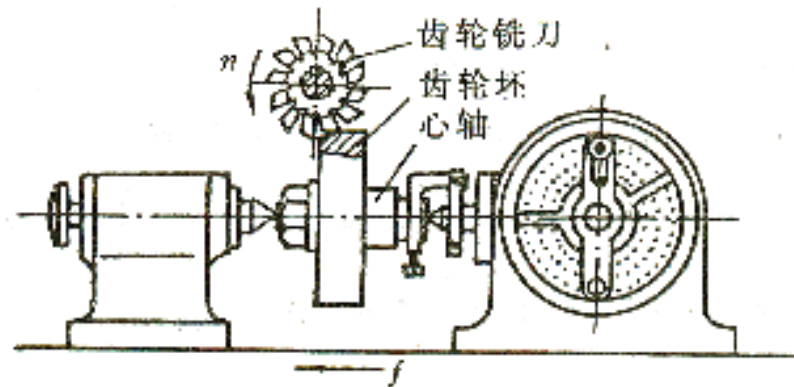


(a) 盘形齿轮铣刀铣齿



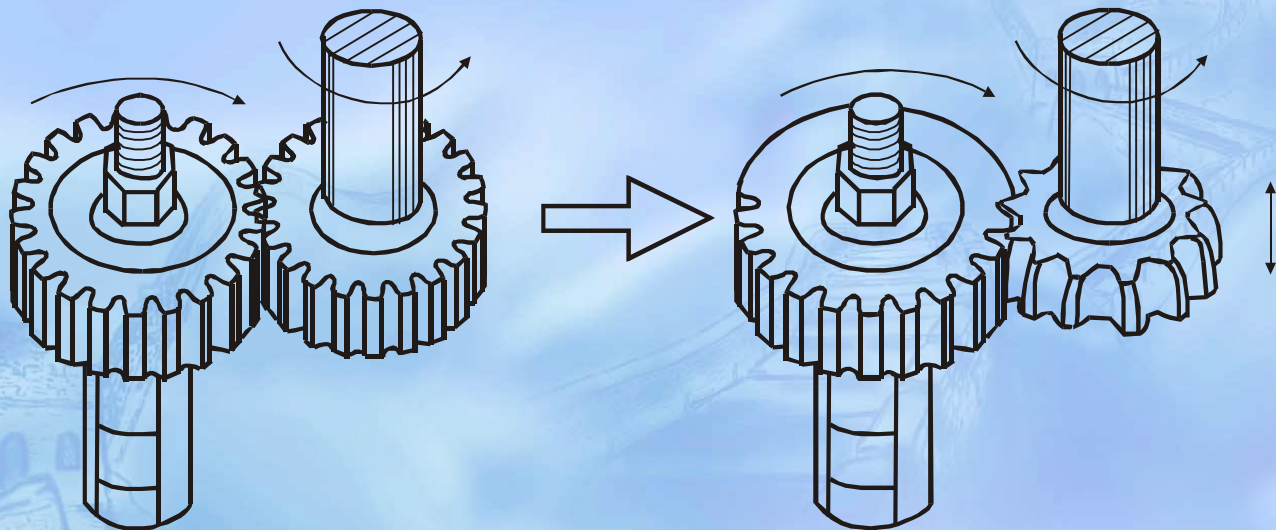
(b) 指状齿轮铣刀铣齿

铣齿轮

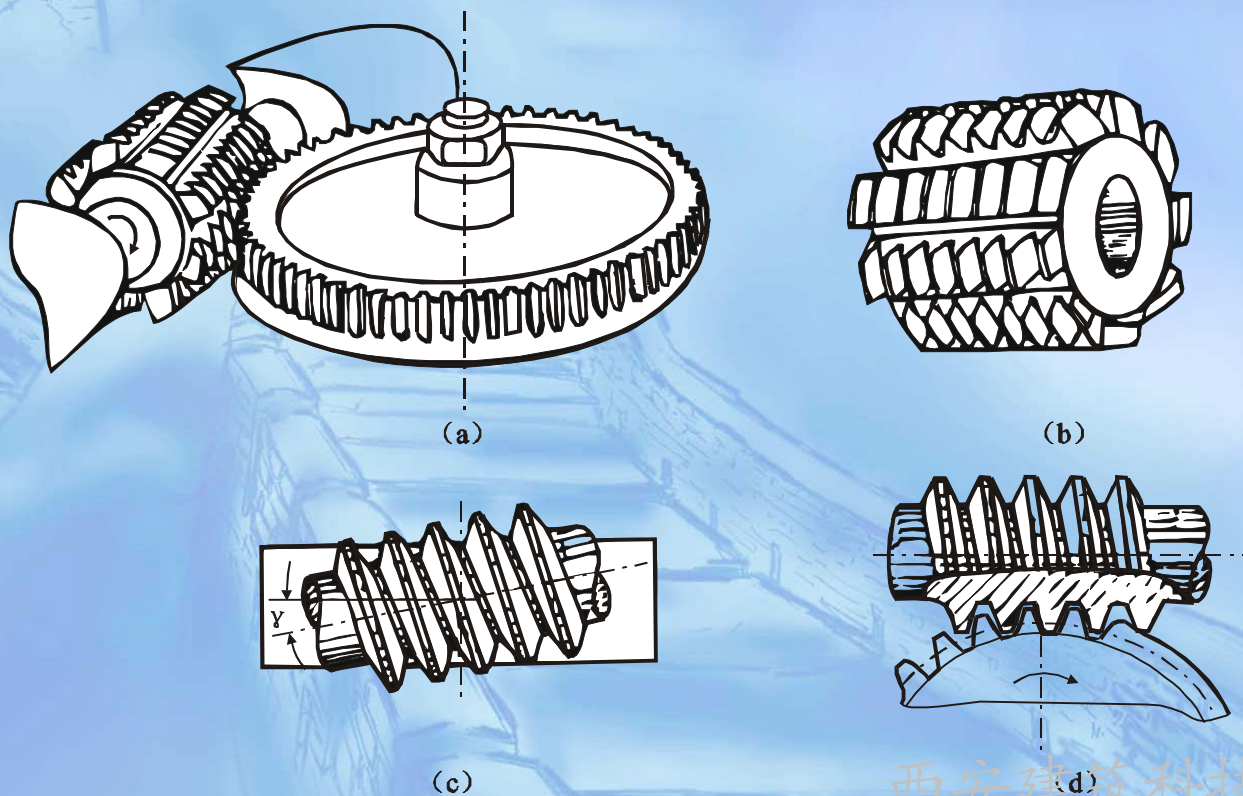


(c) 铣削时工件的安装

(2) 插齿：插齿就是用插齿刀在插齿机上加工齿轮的轮齿，它是按一对圆柱齿轮相啮合的原理进行加工的



(3) 滚齿：滚齿加工的实质是利用一对轴线交叉的螺旋齿轮啮合原理进行加工的。



## § 3.4 热量传递与交换理论

热量是因温度差别而转移的能量,它是过程量而不是状态量。热量传递有三种形式:热传导、热对流和热辐射。

### § 3.4.1 热传导

#### 一、概述

热传导(简称导热):指温度不同的物体各部分无相对位移,或温度不同的两物体之间直接接触时,依靠分子、原子、自由电子等的移动、转动即自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象。的运动有密切的关系。因此,物质的导热本质或机理就必然与组成物质的微观粒子的运动密切相关。

热量传递和交换理论是从宏观角度进行分析研究的,并不关心物质的微观结构,而把物质看作是连续介质。水工艺设备中热量交换介质的几何尺寸远大于分子的直径和分子间的距离,因此,研究对象热媒和被加热水可以认为是连续的介质

## 二、导热基本概念

### (1) 温度场

在物体中，热量传递与物体内部温度的分布情况密切相关。某一时间，物体中任何一点都有一个温度的数值，某一时刻空间所有各点温度分布的总合称为温度场。

$$T = f(x, y, z, t)$$

式中： $T$ ——温度；

$x, y, z$ ——空间坐标；

$t$ ——时间。

- **三维非稳态温度场**：物体的温度在 $x, y, z$ 三个方向和在时间上都发生变化的温度场。
- **非稳态导热**：非稳态温度场的导热过程叫做非稳态导热。
- **稳态温度场**：温度场不随时间而变化，称为稳态温度场，即

$$T = f(x, y, z)$$

- **一维稳态温度场**：如果稳态温度场仅和一个坐标有关，则称为一维稳态温度场，即

$$T = f(x)$$

- **稳态导热**：稳态温度场的导热过程叫做稳态导热。

## (2) 等温面与等温线

**等温面：**同一时刻，温度场中所有同温度的点连接所构成的面。

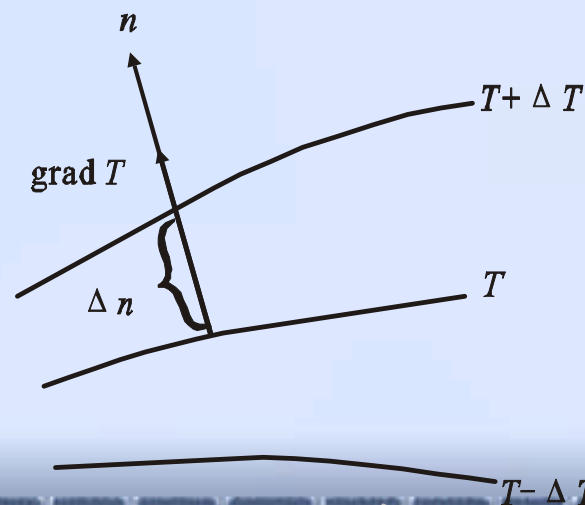
**等温线：**相同的等温面与同一平面相交，则在此平面上构成一簇曲线。

## (3) 温度梯度

**温度梯度：**沿法线方向温度变化率的向量。温度增加的方向规定为正。在等温面上，因不存在温度差异，所以不可能有热量的传递。热量传递只发生在不同的等温面之间。从某一等温面上的某点出发，沿不同方向到达另一等温面时，因距离不同，则单位距离的温度变化（即温度的变化率）也不同。其中，以该点法线方向的温度变化率为最大。温度增加的方向规定为正，温度梯度的表达式为：

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n} n$$

式中： $\frac{\partial T}{\partial n}$  表示沿法向方向温度的方向导数  
 $n$  为法线方向的单位向量。



温度梯度在直角坐标系中的三个分量等于其相应的方向导数，即

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k}$$

式中  $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别表示三个坐标轴方向的单位向量。温度梯度的负值叫温度降度，它是与温度梯度数值相等而方向相反的向量。

#### (4) 热流向量 $q$

**热流密度 (热流通量)：**单位时间单位面积上所传递的热量。

**热流向量：**以通过等温面上某点最大热流通量的方向为方向，数值上也正好等于沿该方向热流通量的向量称为热流通量向量，简称热流向量。热量传递不能沿等温面进行，必须穿过等温面。在不同方向上，热流密度的大小是不同的。热流向量方向最大，其他方向的热流通量都是热流向量在该方向的分量。

#### (5) 傅立叶定律

法国数学物理学家傅里叶 (J. Fourier) 通过研究导热过程发现，热流向量与温度梯度的大小成正比的关系，即：

$$q = - \lambda \text{grad } T$$

式中的比例系数 $\lambda$ 恒为正数，称为导热系数。热流向量和温度梯度位于等温面的同一法线上，但指向温度降低的方向，式中的负号就是表示热流向量的方向与温度梯度的方向相反，永远沿着温度降低的方向。

傅里叶定律确定了热流向量和温度梯度的关系。因此要确定热流向量的大小，就必须知道温度梯度，亦即知道物体内的温度场。



## (6) 导热系数 $\lambda$ :

温度梯度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时, 单位时间内通过单位面积的导热量。

不同物质构造上的差别和固、液、气三相不同的导热机理, 导致了不同物质间导热系数的差异。工程计算中, 导热系数常取使用温度范围内的算术平均值, 并把它作为常数看待。

- ① 气体: 气体的导热系数不随压力发生变化; 当气体的温度升高时, 气体的分子运动平均速度和定容比热都增大, 所以, 气体的导热系数随温度的升高而增大。
- ② 液体: 液体的导热系数与液体的定压比热, 液体的密度, 液体的分子量以及一个与晶格振动在液体中的传播速度成正比的系数有关, 这个系数与温度有关, 而与液体的性质无关。对水来说, 水的导热系数随温度和压力的升高而增大。
- ③ 金属固体: 大多数纯金属的导热系数随着温度的升高而减小, 而大部分合金的导热系数是随着温度的升高而增大的。
- ④ 非金属固体: 导热系数都随温度的升高而增大。与水工艺设备有关的非金属固体主要是隔热保温材料。隔热保温材料也叫热绝缘材料

## 二、导热基本定律

### 1、导热微分方程式

假定：

- (1) 所研究的物体是连续均匀和各向同性的介质；
- (2) 导热系数 $\lambda$ 、比热 $C$ 和密度 $\rho$ 均已知
- (3) 假定物体内具有内热源 $q_v$  ( $W/m^3$ ) 表示内热源的强度(单位体积单位时间内所发出的热量)。

从进行导热过程的物体中分割出一个微元体 $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ ，设：在 $dt$ 时间内，导入与导出微元体的净热量为 $dQ_1$ ，内热源的发热量为 $dQ_2$ ，微元体内能的增加为 $dQ_3$ ，根据能量守恒与转化定律

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ_3$$

$$\text{其中： } dQ_1 = \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$dQ_2 = q_v \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

$$dQ_3 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

将 $dQ_1$ 、 $dQ_2$ 、 $dQ_3$ 代入，去掉 $dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt$ 得导热微分方程式：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v$$

- 导热微分方程式把物体中各点的温度联系起来，表达了物体的温度随空间和时间变化关系。其实质是导热过程的能量方程。
- 当导热物体的导热系数 $\lambda$ 、比热 $C$ 和密度 $\rho$ 都为常数时，导热微分方程式可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c}$$

或写成

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \Delta^2 T + \frac{q_v}{\rho c}$$

式中： $\Delta^2 T$ ——温度 $T$ 的拉普拉斯运算符，

$$\Delta^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$\alpha$ ——导温系数，或称热扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

- ①当导热物体的导热系数 $\lambda$ 、比热 $C$ 和密度 $\rho$ 都为常数且无内热源时，可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \Delta^2 T$$

②当物体的温度不随时间发生变化时，即

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$$

式能量方程简化为

$$\Delta^2 T + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$

③当物体的温度不随时间发生变化且无内热源时，可进一步简化为

$$\Delta^2 T = 0$$

因为水工艺设备中常用的圆柱或圆筒形设备和材料，如换热器、热水罐、热水管道等是轴对称物体，可以用圆柱坐标系。通过坐标变换，导热微分方程式为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \lambda \gamma \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) + \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v$$

## 2、导热过程的单值性条件

单值性条件又是求解特定导热微分方程，获得唯一解的必要条件。一个特定导热过程的完整的数学描述应由导热微分方程式和它的单值性条件两部分组成。

特定导热过程的单值性条件一般有四个：

### (1) 几何条件

说明参与导热过程物体的几何特征，如形状、尺寸。

### (2) 物理条件

说明参与导热过程物体的物理特征。如参与导热过程物体的物理性能参数 $\lambda$ 、 $\rho$ 和 $C$ 等的数值大小及随温度变化的规律；内热源的数量、大小和分布情况。

### (3) 时间条件

说明参与导热过程物体的温度随时间变化的特征。对于非稳态导热过程，应该说明过程开始时刻物体内的温度分布，所以，时间条件又称初始条件。

#### (4) 边界条件

参与导热过程的物体不能绝对独立，总是和周围环境相互联系。说明物体边界上导热过程进行特点的条件称为边界条件。常见的边界条件有三类：

第一类边界条件：已知任何时刻物体边界面 $s$ 的温度值 $T_w$ 。

$$T \Big|_s = T_w$$

对于稳态导热过程， $T_w$ 不随时间发生变化；对于非稳态导热过程，若边界面上温度随时间而变化，还应给出边界面的温度值 $T_w$ 的函数关系式 $=f(t)$ 。

第二类边界条件：已知任何时刻物体边界面 $s$ 上的热流通量值 $q_w$ 。

即已知边界面上温度变化率的值，并不是已知物体的温度分布。第二类边界条件可以表示为

$$q \Big|_s = q_w$$

对于稳定导热过程，物体边界面上的热流通量值 $q_w$ 为常数，不随时间发生变化；对于非稳态导热过程，若边界面上热流通量是随时间变化的，还应给出边界面上热流通量值的函数关系 $q_w = f(t)$ 。

第三类边界条件：已知边界面 $s$ 周围流体温度 $T_f$ 和边界面 $s$ 与流体之间的对流换热系数 $\alpha$ 。

根据牛顿冷却定律，物体边界面 $s$ 与流体间的对流换热量可以写为

$$q = \alpha (T \Big|_s - T_f)$$

对于稳态导热过程， $\alpha$ 和 $T_f$ 不随时间而变化；对于非稳态导热过程， $\alpha$ 和 $T_f$ 可以是时间的函数，还要求给出它们和时间的具体函数关系。

### 3、稳态导热

#### (1) 平壁稳态导热

设一厚度为  $\delta$  (m) 的单层平壁，如下图所示，无内热源，材料的导热系数  $\lambda$  为常数。当平壁的长度与宽度远大于其厚度时（长度和宽度是厚度的10倍以上），可以认为沿长度与宽度两个方向温度变化很小，而仅沿厚度方向发生变化，近似地认为是一维稳态导热。这种单层平壁称为无限大平壁。

#### 一维无内热源时

$$\Delta^2 T = \frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

积分求解

$$\frac{dT}{dx} = c_1$$

$$T = c_1 x + c_2$$

将两个界面的第一类边界条件  $T_1$  和  $T_2$  代入上式，求出单层平壁的温度分布式

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x$$



根据傅立叶定律，一维稳态导热时，热流密度 $q$ 为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{\delta}$$

将

代入上式后整理得

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta}{\lambda}}$$

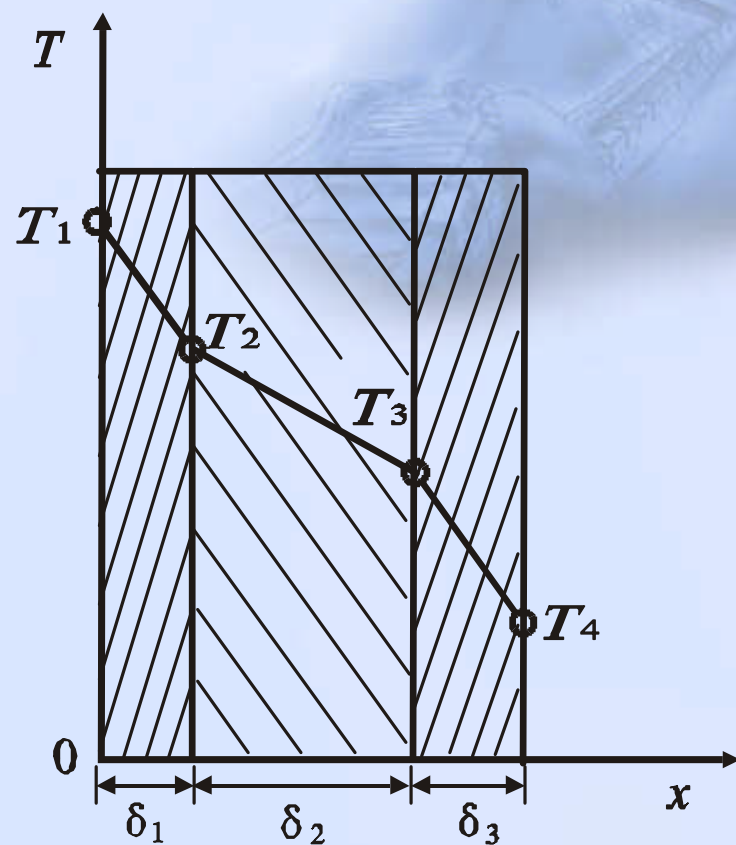
式中  $\delta / \lambda$  称单位面积平壁的导热热阻，用符号 $R$ 表示，则上式为

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

若平壁面积为 $F$ ，则通过平壁的热量为

$$Q = qF = \frac{F(T_1 - T_2)}{R}$$

在工程计算中，常遇到多层平壁，如带保温层的热水箱。如右图是由彼此紧贴的三层不同材料组成的无限大平壁。各自的厚度分别为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$ ，导热系数分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ ，且都为常数。已知多层平壁两侧表面分别维持均匀稳定的温度  $T_1$  和  $T_4$ ，彼此接触的两表面具有相同的温度，分别为  $T_2$  和  $T_3$ 。在稳态情况下，通过各层的热流量是相等的，对于三层平壁的每一层可以分别写出各层热流密度的计算式，如下：



$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_1} \quad q = \frac{(T_2 - T_3)}{R_2} \quad q = \frac{(T_3 - T_4)}{R_3}$$

移项，得各层温度差

$$T_1 - T_2 = qR_1, \quad T_2 - T_3 = qR_2, \quad T_3 - T_4 = qR_3$$

多层平壁导热时，各层内部的温度分布都是直线，整个多层壁的温度分布形成一条折线。多层平壁两端面的总温度差  $\Delta T = T_1 - T_4$ ，总热阻为各层热阻之和，则多层平壁的热流密度的计算公式为

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3}$$

## (2) 圆筒壁稳态导热

水工艺设备中有许多圆筒状的设备部件或材料，要换热或防止散热。这些圆筒状物体的长度远大于壁厚，沿轴向的温度变化可以忽略不计。下图表示一内半径为 $r_1$ ，外半径为 $r_2$ ，长度为 $l$ 的圆筒壁，无内热源，圆筒壁材料的导热系数 $\lambda$ 为常数。圆筒壁内、外两表面的温度均匀稳定，温度分别为 $T_1$ 和 $T_2$ ，而且 $T_1 > T_2$ 。

因温度场是轴对称的。所以采用圆柱坐标系更为方便，圆壁内的温度仅沿坐标 $r$ 方向发生变化，属一维稳态温度场。其导热微分方程式简化为

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

积分求解得

$$T = c_1 \ln r + c_2$$

代入第一类边界条件： $r = r_1$ 时， $T = T_1$ ； $r = r_2$ 时， $T = T_2$ 。可得圆筒壁内温度分布式

$$T = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

根据傅立叶定律，可有圆筒壁热流量计算公式： $Q = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r l$

注： $dT/dr$ 不是常数，而是半径 $r$ 的函数，不同半径 $r$ 处的热流密度不是常数，但在稳态情况下通过长度为 $l$ 的圆筒壁的热流量是恒定的。

对圆筒壁内温度分布式求导

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \frac{1}{r}$$

代入上式整理得圆筒壁热流量计算公式

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

或

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

则单位长度圆筒壁热流量计算公式为

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_l}$$

与多层平壁一样，由不同材料构成的多层圆筒壁的热流量也按总温差和总热阻来计算， $n$ 层圆筒壁单位长度热流量计算公式为

$$q_l = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_{li}} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$$

### (3) 关于接触热阻

对于多层平壁和多层圆筒壁，其表面一般不是完全平整光滑的，两固体直接接触时，其界面不是完全与平整的面接触，而是点接触。当导热过程在这两个点接触的固体之间进行时，就会有一个额外的热阻，这种热阻称为接触热阻。接触热阻使实际的温度分布与分析结果差别很大，实际的导热量小于计算值。特别是当界面空隙中充满导热系数远小于固体的气体时，接触热阻更为明显。因为有接触热阻，在接触界面上就会有温差 ( $T_{2a} - T_{2b}$ )。按照热阻的定义，界面的接触热阻可以表示为

$$R_c = \frac{T_{2a} - T_{2b}}{Q} = \frac{\Delta T_c}{Q}$$

### § 3.4.2 对流换热

热对流是传热的另一种基本方式，工程中的实际传热问题都是流体与固体壁直接接触时的换热，所以把流体与固体壁间的换热称为对流换热（也称放热）。对流换热的基本计算式是牛顿于1701年提出的，即

$$q = \alpha (T_w - T_f) = \alpha \Delta T \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

或 
$$Q = \alpha F (T_w - T) = \alpha F \Delta T \quad (\text{W})$$

或

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha}} = \frac{\Delta T}{R_i}$$

式中： $T_w$ ——固体壁表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_f$ ——流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$F$ ——固体壁表面积， $\text{m}^2$ ；

$\Delta T$ ——流体与固体壁之间的温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\alpha$ ——换热系数，是指流体与固体壁之间为温差 $1^{\circ}\text{C}$ 时，单位面积上单位时间内所传递的热量，单位是 $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ；

$R_i$ ——单位固体壁表面积上的对流换热热阻， $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

## 一、影响对流换热的因素

### (1) 流体流动的原因

流体以某一流速在壁面上流动的原因有两种，自然对流和受迫对流。受迫对流的换热系数较高，所以，水工艺设备中主要应用受迫对流换热方式。

### (2) 流体的流动状态

流体在壁面上流动又有层流和紊流两种流态。紊流时换热比层流要强。

### (3) 流体的物理性质

影响对流换热的物理性质主要是比热 $C_p$ 、容积膨胀系数 $\beta$ 、导热系数 $\lambda$ 、密度 $\rho$ 和粘度 $\mu$ ，流体的这些物理性质因种类、温度、压力而变化。导热系数影响流体与固体表面间的导热作用。流体的比热与密度大，携带的热量多，对流作用时传递热量的能力也高。流体的粘度主要影响流体的流动状态，粘性大的流体的流速小，不利于热对流。



流体的物理性质受温度影响较大。在换热过程中，流场内各处流体的物理性质随该处的温度变化。因此要选择某一特征温度来确定物理性质参数，这个特征温度称定性温度，定性温度主要有三种：流体平均温度 $T_f$ ，固体壁表面温度 $T_w$ ，流体与固体壁的算术平均温度 $T_m = (T_f + T_w) / 2$ 。

#### (4) 流体的相变

流体在换热过程中有冷凝、沸腾等相变参与的换热称相变换热。流体相变，不仅改变了流体的物理性质，而且流体的流动状态和换热机理也都发生了变化，对对流换热过程影响较大。凝结换热方式应用于蒸汽为热媒的热交换设备中。

#### (5) 换热表面状况

固体壁面的形状、尺寸（用 $l$ 表示）及与流体的相对位置（用 $\phi$ 表示）直接影响流体在壁面上的流态、速度分布、温度分布，进而影响对流换热作用。综合上述分析可以看出，放热过程是个很复杂的过程，换热系数是许多因素的函数，可以表示为

$$\alpha = f(u, T_f, T_w, \lambda, C_p, \rho, \beta, \mu, l, \phi)$$

## 二、对流换热过程微分方程式

粘性流体在壁面上流动，由于粘性的作用，在靠近固体壁处，流体的速度随着离固体壁距离的缩短而逐渐降低，在贴壁处流速为零，这时热量只能以导热方式通过这一极薄的贴壁流体层。设固体壁 $x$ 处壁温为 $T_{w,x}$ ，远离固体壁的地方流体温度为 $T_{f,x}$ ，局部热流密度为 $q$ 以导热和对流换热方式通过贴壁流体层时，按傅立叶导热定律和牛顿冷却公式，可分别表示为：

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{wx}$$

$$q = \alpha_x (T_w - T_f)_x = \alpha_x \Delta T_x$$

式中  $\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{wx}$   $x$ 点贴壁处流体的温度梯度， $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ；

$\lambda$ ——流体导热系数， $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

$\alpha_x$ ——固体壁 $x$ 处局部对流换热系数。

故

$$\alpha_x = -\frac{\lambda}{\Delta T_x} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{w,x}$$

寻求具体情况下换热系数 $\alpha$ 计算公式的方法有理论方法和实验方法两类。主要采用相似理论指导的实验方法。

(1) 相似准则:依据某一换热问题的数学模型或影响过程的所有物理量的因次进行分析,把众多的变量组合成几个无因次的“量群”,这种无因次量群叫做相似准则。每一个相似准则反映了某几个物理量对过程某一方面的综合影响。

对换热系数函数式进行因次分析,或对其换热过程的数学模型进行过程分析,可以求得影响对流换热过程的四个相似准则:

① 雷诺准则——它反映流体运动时惯性力与粘性力的相对大小,其表达式为

$$Re = \frac{ul}{\nu}$$

② 格拉晓夫准则——反映流体自然对流时浮升力与粘性力的相对大小,表达式为

$$Gr = \frac{g\beta\Delta Tl^3}{\nu^2}$$

③普朗特准则——反映边界层内流体动量传递和热量传递特性的相对比较。表达式为

$$Pr = \frac{\rho C_p v}{\lambda} = \frac{v}{a}$$

其中  $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  称为导温系数。

④努谢尔特准则——反映对流换热强弱程度的准则。表达式为

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

前三个相似准则都是由确定一个具体换热问题所必须给定的一些物理量组成的，不包含待求量 $\alpha$ ，称为已定准则（或称定型准则），最后一个相似准则含有待求量 $\alpha$ ，称为待定准则。由四个准则的表达式可以看出待定准则是定型准则的函数，即

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

上式称为对流换热问题的准则关联式。

受迫紊流换热时，自然对流的影响可以忽略不计（不考虑格拉晓夫准则数），上式简化为

$$Nu = f(Re, Pr)$$

自然对流换热时，流动状态由Gr来体现（不考虑受迫流动状态对换热的影响），简化为

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

## (2) 受迫紊流换热

流体受迫流动时换热系数较大，换热面的布置也容易适应换热和生产技术的要求，所以，在各种换热器内部的换热过程中得到广泛的应用。根据换热表面的形状和流体的流向，受迫流动放热有许多类型，其中，管内受迫紊流换热和外掠圆管流动换热在水工艺设备中最常用。

- ①管内受迫紊流换热（受迫紊流流动时，不考虑自然对流的影响）  
换热准则关联式为

$$Nu = C Re^n Pr^m$$

式中 $C$ 、 $n$ 、 $m$ 是由实验研究确定的常数。对于管长与管径之比 $L/d > 10$ 的光滑直管内的紊流换热，

在 $t_f$ 与 $t_w$ 相差不大的情况下，按下式计算

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

当 $t_f$ 与 $t_w$ 相差较大时，可按下式计算

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^n$$

式中， $\mu_f$ 和 $\mu_w$ 分别为流体温度 $t_f$ 和固体壁温 $t_w$ 下的流体动力粘度。 $n$ 为系数，加热时， $n=0.11$ ；冷却时， $n=0.25$ 。

根据不同的定型尺寸等条件可以利用上式求出 $a$ 。

## ②外掠圆管流动换热

流体的压强和主流速度沿程发生变化，在管的前半部压强逐渐减小，主流速度逐渐增加；过了最高点后，压强逐渐回升，而主流速度逐渐减小。当流体横向掠过管束时，流体的流动将受到各排管子的连续干扰，除第一排管子保持了外掠单管的特征外，从第二排起，流体的流动将被前几排管子引起的涡旋所干扰，流动状况比较复杂。紊流状态下 ( $Re > 2 \times 10^5$ ) 流体外掠光滑管束的换热准则关系式为

$$Nu = 0.022 Re^{0.84} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \varepsilon_z$$

式中： $\varepsilon_z$ ——管束排列方式和数量的校正系数。

### § 3.4.3 凝结换热

#### 一、概念

工质在饱和温度下由气态转变为液态的过程称为凝结或冷凝，当蒸汽与低于它的饱和温度的固体壁面接触时，就会放出汽化潜热而凝结下来，称为凝结换热。

#### 二、凝结形式

- 1、膜状凝结：凝结液能很好地润湿壁面，就会在壁面上形成一层完整的液膜，这种方式称为“膜状凝结”。
- 2、珠状凝结：凝结液不能润湿壁面（如壁面涂有油脂），就会在壁面形成一颗颗的液珠，这种方式称为“珠状凝结”。

在工业设备里遇到的多是膜状凝结。

#### 三、影响膜状凝结的因素

- (1) 蒸气流速：流速增大，凝结增强，换热被强化。
- (2) 蒸气纯度：蒸气中微量导热性能差的物质会严重影响凝结换热。
- (3) 粗糙度：当凝结雷诺数较低时，凝结液容易积存在粗糙的壁上，使液膜增厚，换热系数降低；但当雷诺数较大时，换热系数又可高于光滑壁。

## 四、两种常用凝结换热系数表达式

### (1) 管外壁凝结换热

$$\alpha = 0.725 \left[ \frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{\mu d (T_s - T_w)} \right]^{0.25}$$

式中： $d$ ——水平管外径，m；

$T_s$ ——蒸汽饱和温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_w$ ——冷壁面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$r$ ——饱和温度 $t_s$ 下的汽化潜热，J/kg；

$\mu$ ——凝结液动力粘度，kg/m·s；

$\lambda$ ——凝结液导热系数W/m· $^{\circ}\text{C}$ ；

$\rho$ ——凝结液密度kg/m<sup>3</sup>。

### (2) 水平管内凝结换热

$$\alpha = 0.555 \left[ \frac{g \rho (\rho - \rho_v) \lambda^3 r'}{\mu d (T_s - T_w)} \right]^{0.25}$$



式中： $\rho_v$ ——蒸气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$r'$ ——潜热修正值， $\text{J}/\text{kg}$ ， $r' = r + 0.68 C_p (T_s - T_w)$ ；

$C_p$ ——凝结液比热， $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ 。

## 五、增强凝结换热的措施

增强凝结换热主要是减薄液结液膜层的厚度，加速液结液的排泄，促成珠状凝结形成等。可以采取下列措施：

- (1) 改变表面几何特征
- (2) 排除不凝气体 设备应正压运行。
- (3) 加速液结液的排除。
- (4) 造成珠状凝结的条件。

### § 3.4.4 辐射换热

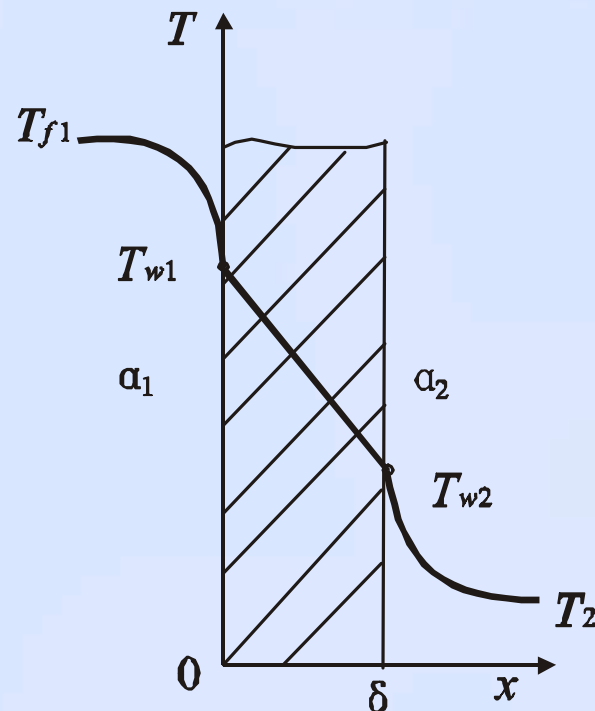
该部分自学

## § 3.4.5 传热过程

### 一、平壁传热

设单层平壁厚度为  $\delta$  的,  $q_v=0$ ,  $\lambda$  为常数,  $x=0$  处界面一侧流体的温度为  $T_{f1}$ , 对流换热系数为  $\alpha_1$ ,  $x=\delta$  处界面另一侧流体的温度为  $T_{f2}$ , 对流换热系数  $\alpha_2$ 。热流体、单层平壁和冷流体的热流密度分别为:

$$\begin{cases} q = \alpha_1 (T_{f1} - T_{w1}) \\ q = \frac{\lambda}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}) \\ q = \alpha_2 (T_{w2} - T_{f2}) \end{cases}$$



在稳态传热过程中，热流体、单层平壁和冷流体的热流密度相同，消去 $T_{w1}$ 和 $T_{w2}$ ，得热流体通过平壁传热给冷流体的热流密度为

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

或写成

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R} = K(T_{f1} - T_{f2})$$

式中 $K$ 是传热系数。 $R$ 为第三类边界条件下传热过程的总热阻，等于热流体、冷流体与壁面之间对流换热的热阻与平壁导热热阻之和。

对于由几层不同材料组成的多层平壁，因为多层平壁的总热阻等于各层热阻之和，所以，热流体经多层平壁传热给冷流体的传热过程的热流密度计算公式为

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

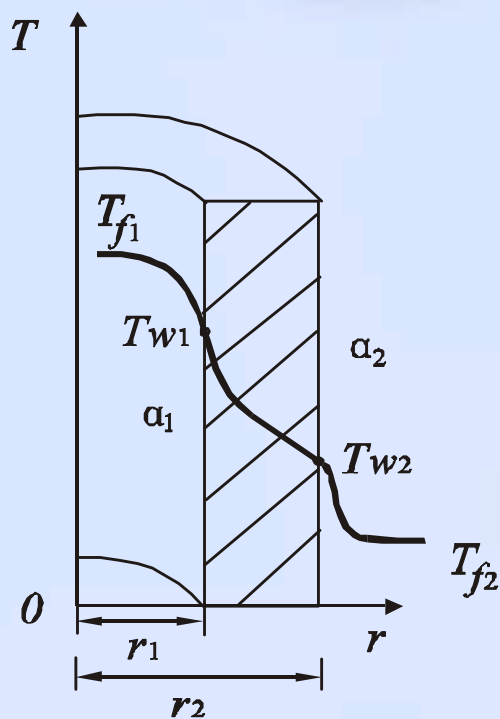
## 二、圆筒壁传热

设单层圆筒壁内、外半径分别为 $r_1$ 和 $r_2$ ， $q_v=0$ ， $\lambda$ 为常数。 $r=r_1$ 一侧流体的温度为 $T_{f1}$ ，对流换热系数为 $a_1$ ， $r=r_2$ 一侧流体的温度为 $T_{f2}$ ，对流换热系数为 $a_2$ 。热流体、单层圆筒壁和冷流体的热流密度分别为

$$q_{l1} = a_1 2\pi r_1 (T_{f1} - T_{w1})$$

$$q_{l2} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$q_{l3} = a_2 2\pi r_2 (T_{w2} - T_{f2})$$



由于 $q_{r1} = q_{r2} = q_{r3}$ 。消去 $T_{w1}$ 和 $T_{w2}$ ，得热流体通过圆筒壁传热给冷流体的热流密度为

$$q_l = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{a_1 2\pi r_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{a_2 2\pi r_2}}$$

或

$$q_l = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{a_1 \pi d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{a_2 \pi d_2}}$$

或

$$q_l = K_l (T_{f1} - T_{f2})$$

式中 $K_l$ 为传热系数，表示热、冷流体之间温度相差 $1^\circ\text{C}$ 时，单位时间通过单位长度圆筒壁的传热量，单位是 $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 。其倒数 $1/K_l = R_l$ 是通过单位长度圆筒壁传热过程的热阻。

对于由 $n$ 层不同材料组成的多层圆筒壁，因为多层圆筒壁的总热阻等于各层热阻之和，热流量计算公式为

$$q_l = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{a_1 \pi d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{a_2 \pi d_2}}$$

### 三、通过肋壁传热

如下图，设肋和壁为同一种材料，壁厚  $\delta$ ，导热系数  $\lambda$ ，无肋的光壁表面面积为  $F_1$ ，光壁面温度  $T_{w1}$ ，光壁侧流体1的温度  $T_{f1}$ ，换热系数为  $\alpha_1$ ；肋壁表面积  $F_2$  由肋片表面积和肋与肋之间的壁表面积两部分组成，（ $F_2 = F_2' + F_2''$ ）。肋基壁面温度  $T_{w2}$ ，肋片的平均温度为  $T_{w3}$ 。肋壁侧流体2的温度为  $T_{f2}$ ，换热系数  $\alpha_2$ 。设  $T_{f1} > T_{f2}$ ，则在稳态传热情况下，通过肋壁的传热量可写成下式：

光壁换热

$$Q = \alpha_1 F_1 (T_{f1} - T_{w1})$$

壁的导热

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F_1 (T_{w1} - T_{w2})$$

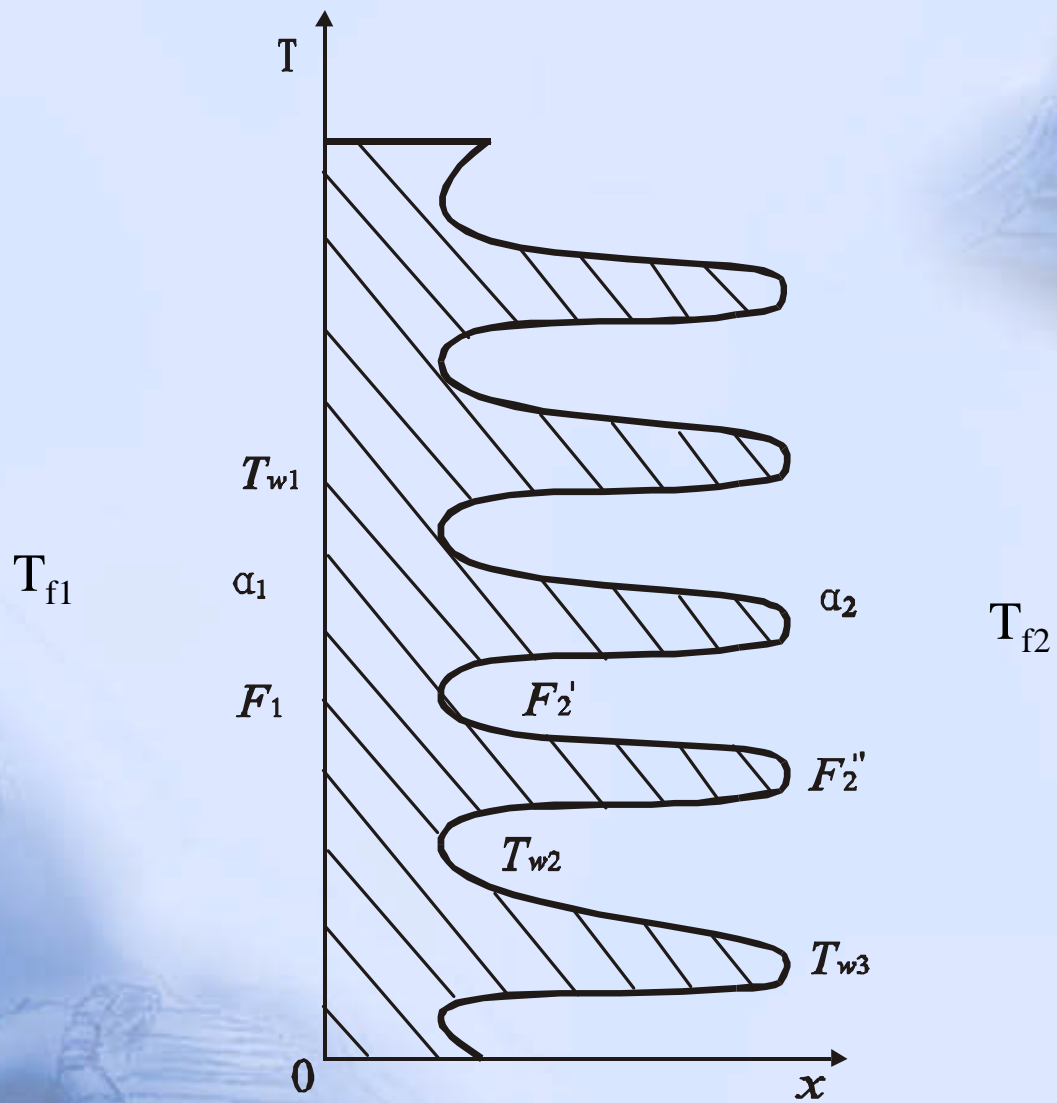
肋壁换热

$$Q = Q_1 + Q_2$$

式中： $Q_1$ ——肋与肋之间壁表面积换热量， $Q_1 = \alpha_2 F_2' (T_{w2} - T_{f2})$

$Q_2$ ——肋表面实际换热量， $Q_2 = \alpha_2 F_2'' (T_{w3} - T_{f2})$





肋表面理想换热量 (即  $T_{w3} = T_{w2}$ , 一般  $T_{w3} < T_{w2}$ )

$$Q_3 = \alpha_2 F_2'' (T_{w3} - T_{f2})$$

则肋片的效率为

$$\eta_f = \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_{w3} - T_{f2}}{T_{w2} - T_{f2}}$$

故肋壁换热为

$$Q = \alpha_2 (F_2' + F_2'' \eta_f) (T_{w2} - T_{f2})$$

设肋壁的总效率为

$$\eta = \frac{F_2' + \eta_f F_2''}{F_2}$$

代入上式得肋壁换热为  $Q = \alpha_2 F_2 \eta (T_{w2} - T_{f2})$

将  $Q = \alpha_1 F_1 (T_{f1} - T_{w1})$

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F_1 (T_{w1} - T_{w2})$$

$$Q = \alpha_2 F_2 \eta (T_{w2} - T_{f2})$$

联立得

$$Q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{F_1}{\alpha_2 F_2 \eta}} F_1$$

对照平壁

令  $\beta = \frac{F_2}{F_1}$   $K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \beta \eta}}$

有  $Q = K_1 F_1 (T_{f1} - T_{f2})$

其中，称  $\beta$  为肋化系数， $K_1$  为以光壁面面积为基准的传热系数。

## 四、复合换热

传热过程中，固体壁面上除对流换热外，还同时存在辐射换热时，称为复合换热。如热交换器、热水罐表面的散热损失，既有与空气之间的对流换热，也有与周围物体间的辐射换热。一般来说，参与传热的流体为气体时，就要考虑表面的辐射换热。设固体壁温为 $t_w$ ，气体介质温度为 $t_f$ ，固体壁周围环境物体温度为 $t_{am}$ ，散热面积为 $F$ ，与对流换热一样，复合换热换热量按下式计算

$$Q = \alpha f (T_w - T_f)$$

式中 $\alpha$ 为复合换热系数，复合换热系数由两部分组成

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r$$

式中： $\alpha_c$ ——对流换热系数， $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ；

$\alpha_r$ ——辐射换热系数， $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ，

设备和管道保温，减少热量损失时，可以用导热系数小的材料包裹设备和管道，如岩棉、微孔硅酸钙等；也可以用发射率低的材料对设备和管道的表面进行处理，如刷白油漆、包裹铝皮等。

## § 3.4.6 传热过程的增强与削弱

### 一、传热过程的增强

增强传热的积极措施是设法提高传热系数，降低传热过程的热阻：

- 1、增大换热面积
- 2、增大对流换热系数小的一侧固体壁面的面积 ( )。
- 3、增加流体 (热媒和 $\frac{F_2}{F_1}$ 被加热水) 的流速
- 4、改变流体的流动状态
- 5、对固体壁面进行处理
- 6、传热面或流体产生振动，强化对流换热
- 7、选用热阻小的管材，减薄管壁

## 二、传热过程的削弱

与增强传热相反，削弱传热则要求降低传热系数：

- 1、工程中最常用的削弱传热的方法是在设备和管道外侧覆盖热绝缘层或称隔热保温层，目前常用的材料有：超细玻璃棉毡、岩棉、聚氨酯泡沫塑料、聚苯乙烯泡沫塑料、微孔硅酸钙、硅藻土制品、膨胀珍珠岩等。
- 2、除了在设备和管道外侧覆盖热绝缘层或称隔热保温层外，还可以采取下列方法减少热损失：
  - (1) 真空热绝缘层
  - (2) 设备外表面涂镀氧化铜、镍黑等材料，改变表面的辐射特性，削弱本身对环境的辐射换热损失。
  - (3) 加装抑制空气对流的元件，减少设备的对流热损失和对外辐射热损失。