

# 化工原理

---

## 化工原理

### 流体流动

#### 流体静力学

流体的压力

流体的密度

流体的比体积

静力学基本方程式

#### 管内流体流动的基本方程式

流量与流速

连续性方程与伯努利方程式

连续性方程

伯努利方程式

#### 管内流体流动现象

流体的黏度

雷诺数与流体流动类型

#### 管内流体流动的摩擦阻力损失

直管中流体摩擦阻力损失的测定

层流的摩擦阻力损失

湍流的摩擦阻力损失

管壁粗糙度

量纲分析法

湍流时的摩擦系数

非圆形管的当量直径

局部摩擦阻力损失

管内流体流动的总摩擦阻力

#### 管路计算

#### 流量的测定

## 传热

### 热传导

傅里叶定律

热导率

平壁的稳态热传导

单层平壁的稳态热传导

多层平壁的稳态热传导

圆筒壁的稳态热传导

单层圆筒壁的稳态热传导

多层圆筒壁的稳态热传导

### 对流传热

对流传热方程

影响对流传热系数的因素

对流传热的特征数关系式

流体无相变时对流传热系数的经验关系式

流体在管内强制对流传热

圆形直管强制湍流时的对流传热系数

圆形直管内过渡区时的对流传热系数

圆形直管内强制层流时的对流传热系数

在非圆形管内强制对流传热系数

流体在管外强制对流传热

- 大空间自然对流传热
- 流体有相变时的对流传热
  - 蒸汽在水平管外膜状冷凝时的对流传热系数
- 两流体间传热过程的计算
  - 热量衡算
  - 传热平均温度差
    - 变温传热平均温度差
  - 总传热系数
- 热辐射
  - 两固体间的辐射传热
    - 辐射传热速率的计算

## 流体流动

## 流体静力学

## 流体的压力

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} + p_{\text{表}}$$

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{真}}$$

## 流体的密度

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho : kg/m^3$$

气体密度：

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM_m}{RT}$$

$p$  : 绝对压力,  $kPa$

$M_m$  : 摩尔质量,  $kg/kmol$

$n$  : 气体的物质的量,  $kmol$

$R$  : 8.314

## 流体的比体积

单位质量流体的体积

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

$$v : m^3/kg$$

静力学基本方程式

$$p = p_0 + \rho gh$$
$$h = \frac{p - p_0}{\rho g}$$

管内流体流动的基本方程式

流量与流速

$$q_V = Au, u = \frac{q_V}{A}, A = \frac{\pi d^2}{4}, d = \sqrt{\frac{q_V}{0.785u}}$$
$$q_m = \rho q_V = \rho Au$$
$$\omega = \frac{q_m}{A} = \frac{\rho Au}{A} = \rho u, \omega - kg/(m^2 \cdot s)$$

连续性方程与伯努利方程式

连续性方程

$$\rho Au = C$$
$$\frac{u_1}{u_2} = (\frac{d_2}{d_1})^2$$

伯努利方程式

$$gz + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = C$$
$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = C$$

管内流体流动现象

流体的黏度

牛顿黏度定律:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$
$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$ : 黏度系数\动力黏度\黏度,  $Pa \cdot s$

$v$ : 运动黏度,  $m^2/s$

剪应力 $\tau$ :通过公式 $F = \tau A$ 可求出粘滞力

# 雷诺数与流体流动类型

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{du}{\nu}$$

$d$  : 管径

$u$  : 流体的流速

$\rho$  : 流体密度

$\mu$  : 流体的黏度

流体流动类型的判断:

$$Re = \begin{cases} 0 - 2000 : \text{层流} \\ 2000 - 4000 : \text{过渡区} \\ > 4000 : \text{湍流} \end{cases}$$

## 管内流体流动的摩擦阻力损失

### 直管中流体摩擦阻力损失的测定

对于等直径的直管，动能没有改变，由伯努利方程得摩擦阻力损失 $h_f$ :

$$h_f = (z_1g + \frac{p_1}{\rho}) - (z_2g + \frac{p_2}{\rho})$$

### 层流的摩擦阻力损失

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$
$$\lambda = \frac{64}{\frac{du\rho}{\mu}}$$

### 湍流的摩擦阻力损失

#### 管壁糙度

绝对粗糙度:  $\epsilon$

相对粗糙度:  $\epsilon/d$

#### 量纲分析法

#### 湍流时的摩擦系数

#### 非圆形管的当量直径

局部摩擦阻力损失

管内流体流动的总摩擦阻力

管路计算

流量的测定

传热

热传导

傅里叶定律

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

$Q$  (W) : 导热速率  
 $A$  ( $m^2$ ):  
 $\lambda$  ( $W/m \cdot K$ ):  
 $\frac{dt}{dx}$  ( $K/m$ ):

热导率

$$\lambda = -\frac{Q}{A \frac{dt}{dx}}$$

热导率：数值上等于温度梯度为 $1^\circ C/m$ ,单位时间通过单位传热面积的热量

平壁的稳态热传导

单层平壁的稳态热传导

传热速率方程式

$$Q = \frac{\lambda}{b} A (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{传热推动力}}{\text{热阻}}$$

$\Delta t$  :传热推动力

$R = \frac{b}{\lambda A}$  :热阻

单位面积的传热速率 ( $W/m^2$ )

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{\lambda}{b}(t_1 - t_2)$$

多层平壁的稳态热传导

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{b_1}{\lambda_1 A} + \frac{b_2}{\lambda_2 A} + \frac{b_3}{\lambda_3 A}} = \frac{\Delta t}{\sum_{i=0}^m R_i} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

多层平壁稳态热传导的总推动力等于各层推动力之和,总热阻等于各层热阻之和。

并且,因各层的传热速率相等,所以各层的传热推动力与其热阻之比值都相等,也等于总推动力与总热阻之比值。

在多层平壁中,热阻大的壁层,其温度差也大。

圆筒壁的稳态热传导

单层圆筒壁的稳态热传导

$$Q = 2\pi l \lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\Delta t}{R}$$

单层平壁类似形式计算式

$$Q = \frac{\lambda}{b} A_m (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda A_m}}$$

$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}} \quad A_m = 2\pi r_m l \quad r_m = \frac{r_2 - r_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

近似计算

$$\text{if } A_2/A_1 < 2, A_m = \frac{A_2 + A_1}{2};$$

$$\text{if } r_2/r_1 < 2, r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

热流密度

$$q_l = \frac{Q}{l} = 2\pi \lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

多层圆筒壁的稳态热传导

$$Q = 2\pi l \frac{t_1 - t_4}{\frac{b_1}{\lambda_1 A_{m1}} + \frac{b_2}{\lambda_2 A_{m2}} + \frac{b_3}{\lambda_3 A_{m3}}} \quad (\text{三层})$$

对流传热

## 对流传热方程

$$Q = \alpha A \Delta t = \Delta t / \left( \frac{1}{\alpha A} \right)$$
$$\Delta t = \frac{Q}{\alpha A}$$

## 影响对流传热系数的因素

## 对流传热的特征数关系式

## 流体无相变时对流传热系数的经验关系式

### 流体在管内强制对流传热

#### 圆形直管强制湍流时的对流传热系数

$$Re > 10^4$$

#### 对低黏度流体

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^n$$
$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$
$$Pr = \frac{c_p \mu}{\rho}$$

#### 圆形直管内过渡区时的对流传热系数

$$Re = 2300 - 10000, \text{ 流体流动处于过渡区}$$

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^n f$$
$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$
$$Pr = \frac{c_p \mu}{\rho}$$
$$\text{校正系数 } f = 1 - \frac{6 \times 10^5}{Re^{1.8}}$$

#### 圆形直管内强制层流时的对流传热系数

$$Re < 2300, RePr \frac{d}{l} > 10, \text{ 流体流动处于强制层流}$$

$$\alpha = 1.86 \frac{\lambda}{d} \left( RePr \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

当  $Gr > 2.5 \times 10^4$  时，需乘以校正系数

$$f = 0.8(1 + 0.015Gr^{1/3})$$
$$Gr = \frac{\beta g \Delta t d^3 \rho^2}{\mu^2}$$

在非圆形管内强制对流传热系数

特征尺寸改为当量直径 $d_e$

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流体流动截面积}}{\text{润湿周边}}$$

流体在管外强制对流传热

大空间自然对流传热

流体有相变时的对流传热

蒸汽在水平管外膜状冷凝时的对流传热系数

$$\alpha = 0.725 \left( \frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{n^{2/3} \mu d_0 \Delta t} \right)$$

两流体间传热过程的计算

热量衡算

$$\begin{aligned} Q &= q_{m1}(H_1 - H_2) = q_{m2}(h_1 - h_2) \\ Q &= q_{m1}c_{p1}(T_1 - T_2) = q_{m2}c_{p2}(t_1 - t_2) \end{aligned}$$

传热平均温度差

变温传热平均温度差

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{t_1}{t_2}} \\ \text{if } \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} < 2, \Delta t_m &= \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \end{aligned}$$

传热面积

$$A = \frac{Q}{K \Delta t_m}$$

总传热系数

平壁与薄壁管的总传热系数计算

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + R_{d1} + \frac{b}{\lambda} + R_{d2} + \frac{1}{\alpha_2}$$

忽略热阻



$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$K = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

热辐射

## 两固体间的辐射传热

辐射传热速率的计算

$$Q_{1-2} = C_{1-2} \varphi A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

总辐射传热系数：

一物体被另一物体包围

$$C_{1-2} = \frac{C_b}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$