

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

流量

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

伯努利方程式的物理意义

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

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

$$\rho : \text{kg/m}^3$$

气体密度（压力不太高，温度不太低）：

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

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

p : 绝对压力, kPa

M_m : 摩尔质量, kg/kmol

n : 气体的物质的量, kmol

$$R : 8.314$$

理想气体标况下（ $T^{\ominus} = 273.15\text{K}$, $p^{\ominus} = 101.325$ ）的摩尔体积为 $\rho^{\ominus} = \frac{M}{22.4}$

流体的比体积

单位质量流体的体积

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

$$v : \text{m}^3/\text{kg}$$

静力学基本方程式

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

- 适用于气体和液体
- 液体密度可视为常数，而气体密度随容器高低变化甚微，也可视为常数

管内流体流动的基本方程式

流量与流速

流量

体积流量 q_V :单位时间内流体流经管路任一截面的体积称为体积流量，单位： m^3/s

质量流量 q_m :单位时间内流体流经管路任一截面的质量称为质量流量，单位： kg/s

$$q_m = \rho q_V$$

流速

平均流速 u :单位时间内流体质点在流动方向上所流经的距离，简称流速，m/s。

$$u = \frac{q_V}{A}, q_V = Au, A = \frac{\pi d^2}{4}, d = \sqrt{\frac{q_V}{0.785u}}$$
$$q_m = \rho q_V = \rho Au$$

质量流速 w :单位时间内流体经管路截面的质量，单位为 $kg/(m^2 \cdot s)$

$$\omega = \frac{q_m}{A} = \frac{\rho Au}{A} = \rho u$$

连续性方程与伯努利方程式

连续性方程

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

伯努利方程式

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

伯努利方程式的物理意义

- gz 为**单位质量(1kg)流体所具有的位能**。因为质量为 m 的流体,其与水平基准面的距离为 z 时,则其位能为 mgz ,所以单位质量流体的位能为 gz ,其单位为

$$\frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

- $\frac{p}{\rho}$ 为 **单位质量流体所具有的静压能**。流动流体中的流体压力通常称为静压。因用测压管可测出它能使流体提升一定高度 ($h = p/\rho g$), 这一高度的液柱相对流动的液体来说是静止状态, 其单位为

$$\frac{N/m^2}{kg/m^3} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

- $\frac{u^2}{2}$ 为 **单位质量流体所具有的动能**。因质量为 m 、速度为 u 的流体所具有的动能为 $mu^2/2$, 故 $u^2/2$ 为 **单位质量流体的动能**, 其单位为

$$\frac{kg \cdot \frac{m^2}{s^2}}{kg} = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

- **位能、静压能及动能均属于机械能, 三者之和称为总机械能或总能量**

伯努利方程式表明, 这3种形式的能量可以相互转换, 但总能量不会有所增减, 即三项之和为一常数

所以, 伯努利方程式是 **单位质量流体能量守恒方程式**

将伯努利方程式各项除以重力加速度 g , 则得

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

- 式中各项单位为 $\frac{J/kg}{m/s^2} = \frac{\frac{N \cdot m}{kg}}{\frac{m}{s^2}} = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{kg} = m$, 可以写成 $\frac{N \cdot m}{N} = \frac{J}{N}$, 即单位重量 (1N) 流体所具有的能量, 该式是 **单位重量流体能量守恒方程式**

- 由于各项的量纲都是长度, 所以各种单位重量流体的能量都可以用流体的液柱高度表示

在流体力学中常把单位重量流体的能量称为压头, z 称为位压头, $\frac{p}{\rho g}$ 为静压头, $\frac{u^2}{2g}$ 为动压头或速度压头, $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$ 为总压头

管内流体流动现象

流体的黏度

牛顿黏度定律:

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

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

μ : 黏度系数 \ 动力黏度 \ 黏度, $Pa \cdot s$

v : 运动黏度, m^2/s

剪应力 τ : 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

ρ : 流体密度

μ : 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 :

$$h_f = (z_1 g + \frac{p_1}{\rho}) - (z_2 g + \frac{p_2}{\rho})$$

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: ϵ

相对粗糙度: ϵ/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):
 λ (W/m · 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

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

Δt :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

$Re = 2300 - 10000$ ，流体流动处于过渡区

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \\ K &= \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \end{aligned}$$

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

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