# 化工原理

## 流体流动

### 流体静力学

#### 流体的压力

$$
p_{绝} = p_{大气} + p_{表}
$$
$$
p_{绝} = p_{大气} - p_{真}
$$

#### 流体的密度

$$
\rho = \frac{m}{V}
$$
$$
\rho : kg/m^3
$$

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（$T^{\ominus} = 273.15K, p^{\ominus} = 101.325$）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

$$
v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}
$$
$$
v : m^3/kg
$$

#### 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

在连续稳定的不可压缩流体的流动中

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

若流体不可压缩，$\rho = C$

$$Au = C$$

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

## 实际流体机械能衡算式

### 压头损失

实际流体在管路内流动时,由于流体的内摩擦作用,不可避免要消耗一部分机械能。因此必须在机械能量衡算时加入压头损失项

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{u_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{u_2^2}{2g}+\sum H_f$$
$$\sum H_f\text{：压头损失，}m$$

### 外加压头

化工生产中,常常需要将流体从总压头较小的地方输送到较大的地方,这一过程是不能自动进行的,需要从外界向流体输入机械压头$H$,以补偿管路两截面处的总压头之差以及流体流动时的压头损失$\sum H_f$

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{u_1^2}{2g}+H=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{u_2^2}{2g}+\sum H_f$$
$$H\text{为外加压头，}m$$

$$z_1g+\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}+W=z_2g+\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}+\sum h_f$$
$$\sum h_f=g\sum H_f:\text{单位质量流体的机械能损失}，J/kg$$
$$W=gH:\text{单位质量流体的外加机械能}，J/kg$$

# 管内流体流动现象

## 流体的黏度

牛顿黏度定律：

$$\tau=\mu\frac{du}{dy}$$
$$v=\frac{\mu}{\rho}$$
$$\mu:\text{黏度系数}\backslash\text{动力黏度}\backslash\text{黏度},Pa\cdot s$$
$$v:\text{运动黏度}，m^2/s$$

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

$$Re=\frac{du\rho}{\mu}=\frac{du}{v}$$
$$d:\text{管径}$$
$$u:\text{流体的流速}$$
$$\rho:\text{流体密度}$$
$$\mu:\text{流体的黏度}$$

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$h_f$:

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

对于水平等直径管路

$$h_f=\frac{p_1-p_2}{\rho}=\frac{\Delta p}{\rho}$$

### 层流的摩擦阻力损失

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$
$$\lambda = \frac{64}{\frac{dup}{\mu}} = \frac{64}{Re}$$
$$\lambda : \text{摩擦系数或摩擦因子}$$

该流体摩擦阻力损失计算式对流体湍流时也适用，只是摩擦系数的计算式不同

### 湍流的摩擦阻力损失

#### 管壁糙度

绝对粗糙度：$\epsilon$（$mm$）

相对粗糙度：$\epsilon/d$

在一定的$Re$条件下，管壁粗糙度越大，则流体的摩擦阻力损失就越大

#### 量纲分析法

量纲分析法的基础是量纲的一致性,即每一个物理方程式的两边不仅数值相等,而且量纲也必须相等。

#### 湍流时的摩擦系数

$\lambda$与$Re$及$\frac{\epsilon}{d}$的关联式

**Blasius**关联式

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

适用于$2.5 \times 10^3 < Re < 10^5$的光滑管

### 非圆形管的当量直径

水力半径：$r_H = \frac{\text{流通截面积}A}{\text{润湿周边长度}\prod}$

圆形管的水力半径：$r_H = \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = \frac{d}{4} \longrightarrow d = 4r_H$

推广到非圆形管

$$d_e = 4r_H = \frac{4A}{\prod}$$

对于矩形管

$$d_e = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

### 管内流体流动的总摩擦阻力计算

#### 局部阻力系数

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2}$$

$\zeta$：局部阻力系数，由实验测定

#### 当量长度

$$h_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2}$$

#### 总摩擦力损失计算式

$$\sum h_f = h_{f直管} + h_{f局部} = \left[\lambda\left(\frac{l+\sum l_e}{d}\right) + \sum \zeta\right]\frac{u^2}{2}$$

## 管路计算

管路计算是连续性方程式、伯努利方程式、摩擦阻力损失计算式、摩擦系数计算式及$Re$表达式的具体应用

## 流量的测定

- 皮托测速管

  $$u_{max} = \sqrt{\frac{2gR(\rho_0-\rho)}{\rho}}$$

  对于气体，$\rho_0 >> \rho$

  $$u_{max} = \sqrt{\frac{2gR\rho_0}{\rho}}$$

  计算$Re_{max} = \frac{du_{max}\rho}{\mu}$，利用关系图（P54）求出平均流速

- 孔板流量计

  $$q_m = \alpha A_0 \sqrt{2\rho \Delta p}$$

# 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$1°C/m$,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

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

$\Delta t$ :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

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

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

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

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

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

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

## 对流传热

### 对流传热方程

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

$$\Delta t = \frac{Q}{\alpha A}$$

### 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

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

**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

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

## 两流体间传热过程的计算

### 热量衡算

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

### 传热平均温度差

#### 变温传热平均温度差

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{t_1}{t_2}}$$
$$if \ \ \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} < 2, \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$$

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

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

总辐射传热系数：

一物体被另一物体包围

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

# 吸收

## 气液相平衡

### 亨利定律

$$p_A$$