



流体流动

*

传热

基本方式

热传导，热对流，热辐射

· 间壁式传热（由对流、导热、对流三部分串联）

$$Q = KA\Delta t_m = \frac{\Delta t_m}{\frac{1}{KA}} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$

Q是传热速率/热流量，单位时间内通过传热面传递的热量，单位 W

K是总传热系数，单位 $W/(m^2 * K)$

A是传热面积，单位 m^2

Δt_m 是平均温度差，单位 K

热传导

傅里叶定律

$$Q = -\lambda A \frac{d_t}{d_x}$$

λ 是导热率/导热系数，单位 $W/(m * K)$ ，是物性参数

负号代表温度传递的方向，即温度降低的方向。

· 单层平壁的稳态热传导

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

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

· 多层平壁的稳态热传导(传热速率相同)

$$\text{即 } Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$Q = \frac{\Delta t_1}{\frac{b_1}{\lambda_1 A}} = \frac{\Delta t_2}{\frac{b_2}{\lambda_2 A}} = \frac{\Delta t_3}{\frac{b_3}{\lambda_3 A}} = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^3 R_i} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

· 单层圆筒壁的稳态热传导

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\Delta t}{R}$$

r_1 是内半径, t_1 是内壁温度, r_2 是外半径, t_2 是外壁温度, 温度传递方向从内到外, 温度差

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

A_m 为对数平均面积, $A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$, 当 $\frac{A_2}{A_1} < 2$ 时, 可以用算术平均值 $A_m = \frac{A_1 + A_2}{2}$ 近似计算

同时为了方便计算, 按单位圆筒壁长度计算传热速率

即

$$q_1 = \frac{Q}{l} = 2\pi\lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

当 $\frac{r_2}{r_1}$ 一定时, Q 和 q_1 与坐标 r 无关

· 多层圆筒壁的稳态热传导 (各层传热速率相同)

$$Q = \frac{2\pi l(t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

对流传热

对流传热速率方程

$$Q = \alpha A \Delta t$$

α 是对流传热系数/膜系数

$\Delta t = T - T_w$ (对热流体) / $\Delta t = t_w - t$ (对冷流体) 温度高的减温度低的
 T_w 、 t_w 指的是壁温

- 低粘度流体

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu^n}{\lambda} \right)$$

当被加热时, $n=0.4$, 当被冷却时, $n=0.3$

该公式适用条件为 $Re > 10^4$

且 c_p 的单位是 $J/(kg \cdot K)$, 不是 $KJ/(kg \cdot K)$

- 对于短管, 当 $l/d < 60$ 时, α 的值应该乘以管入口效应修正系数 $\epsilon_1 = 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0.7}$
- 对于弯管, 对应的 α 值应该乘以弯管效应修正系数 $\epsilon_R = 1 + 1.77 \frac{d}{R}$

滴状冷凝的冷凝系数大于膜状冷凝的冷凝系数, 但是在工程中一般采用膜状冷凝, 因为实现滴状冷凝的要求较高, 且难以持久。

• 两流体间传热过程的计算

• 热量衡算

$$Q = q_{m1}(H_1 - H_2) = q_{m2}(h_2 - h_1)$$

Q 是换热器的热负荷, 单位 W

q_{m1} 、 q_{m2} 为热、冷流体的质量流量, 单位 kg/s

H_1 、 H_2 为热流体进、出口比焓, J/kg

h_1 、 h_2 为冷流体进、出口比焓, J/kg

- 若换热器内无相变变化, 且比热容 c_p 不随温度变化, 即

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

c_p 是比热容，单位 $J/(kg \cdot ^\circ C)$

- 若换热器中只有一侧有相变化，如热流体为饱和蒸汽冷凝，而冷流体无相变化

$$Q = q_{m1}r = q_{m2}c_{p2}(t_2 - t_1)$$

(仅冷凝，温度不变)

r 为饱和蒸汽的比汽化热， J/kg

若冷凝液出口温度小于饱和温度，则

$$Q = q_{m1}[r + c_{p1}(T_s - T_2)] = q_{m2}c_{p2}(t_2 - t_1)$$

• 传热平均温度差

Δt_m 的本质就是平均温度差

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

对数平均温度差，

当 $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} < 2$ 时，可用算术平均值代替对数平均值

- 在相同的进出口温度下，平均温度差 $\Delta t_{m逆} > \Delta t_{m并}$ ，故传热面积 $A_{逆} < A_{并}$
- 并流操作时，热流体出口温度 T_2 始终大于冷流体出口温度 t_2 ，但逆流操作时， T_2
- 当存在相变时， $\Delta t_{逆} = \Delta t_{并}$
- 工程上多采用逆流操作，但是并流操作可以控制换热器的液体出口温度

• 总传热系数

(一) 圆筒壁

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1}{\alpha_2 d_2}$$

以传热面 A_1 为基准的总传热系数

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_1 d_1}$$

以传热面 A_2 为基准的总传热系数

$$\frac{1}{K} = \frac{d_m}{\alpha_1 d_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{d_m}{\alpha_2 d_2}$$

以传热面 A_m 为基准的总传热系数

下标为1的是热流体，下标为2的是冷流体

(二) 污垢热阻

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + R_{d1} + \frac{d_1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + R_{d2} \frac{d_1}{d_2} + \frac{d_1}{\alpha_2 d_2}$$

以传热面 A_1 为基准的总传热系数

(三) 平壁与薄壁管的总传热系数

$A_1 \approx A_2 \approx A_m$ ，则以 A_1 为基准的总传热系数 K 为

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

当热阻和污垢热阻都可以忽略不计时

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

即 K 趋近于 α_1 与 α_2 中较小的值