



4.4 传热过程的计算

4.4.1 总传热系数和总传热速率

4.4.2 热量衡算和传热速率方程间的关系

4.4.3 传热平均温度差

4.4.4 壁温的计算

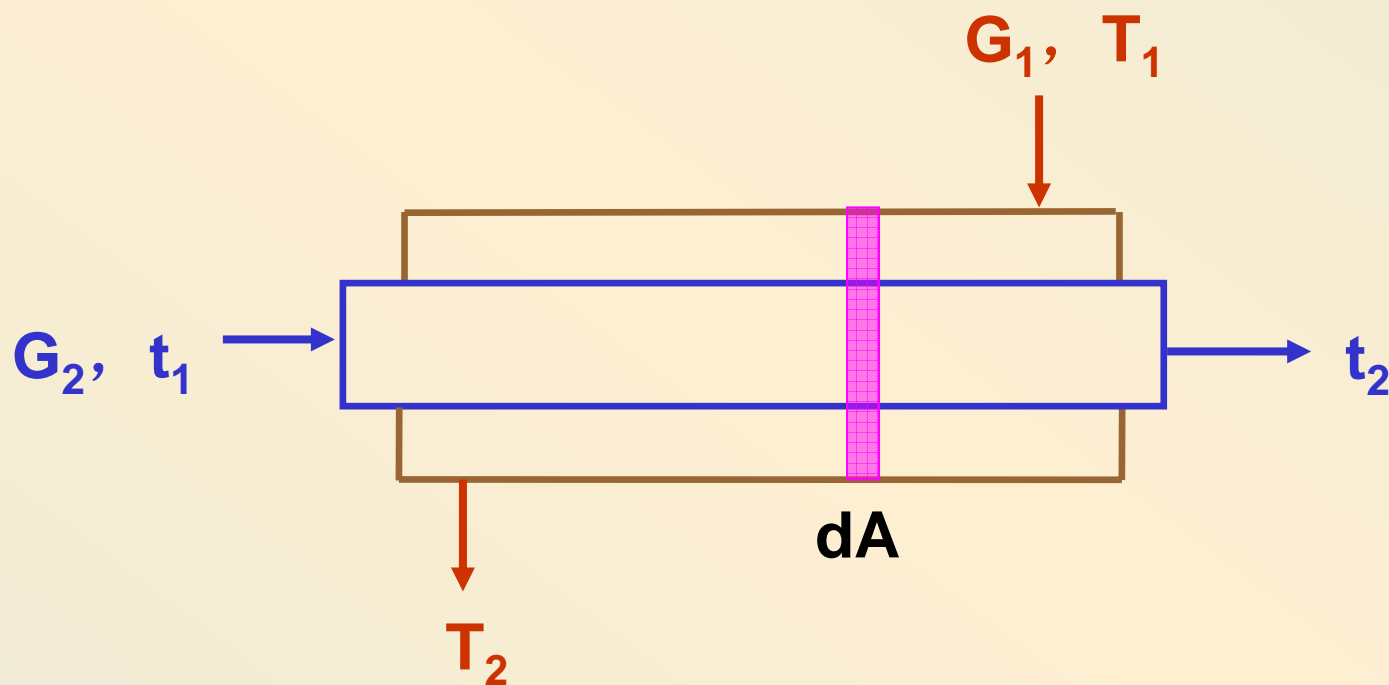
4.4.5 传热效率~传热单元数法

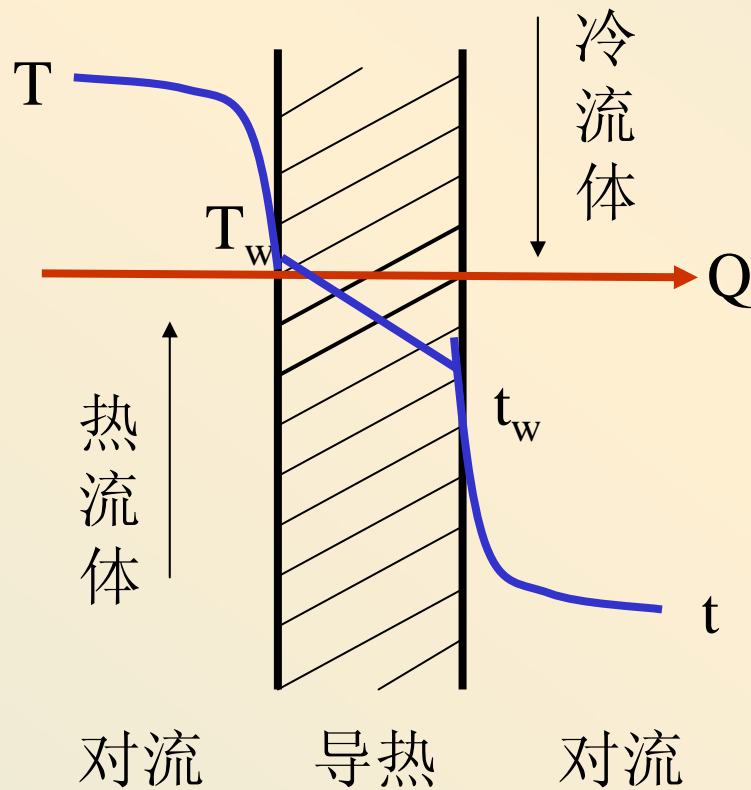
4.4.6 传热计算示例





4.4.1 总传热系数和总传热速率方程





- 热流体 $\frac{Q_1}{\text{对流}}$ 固体壁面一侧
- 固体壁面一侧 $\frac{Q_2}{\text{热传导}}$ 另一侧
- 固体壁面另一侧 $\frac{Q_3}{\text{对流}}$ 冷流体

$$dQ = KdA(T - t)$$





(1) 管外对流

$$dQ_1 = \alpha_1 dA_1 (T - T_w)$$

(2) 管壁热传导

$$dQ_2 = \frac{\lambda}{b} dA_m (T_w - t_w)$$

(3) 管内对流

$$dQ_3 = \alpha_2 dA_2 (t_w - t)$$

对于稳定传热 $dQ = dQ_1 = dQ_2 = dQ_3$





$$\therefore dQ = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_1 dA_1}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda dA_m}} = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_2 dA_2}} = \frac{T - t}{\frac{1}{\alpha_1 dA_1} + \frac{b}{\lambda dA_m} + \frac{1}{\alpha_2 dA_2}}$$

$$dQ = \frac{T - t}{\frac{1}{KdA}} = \frac{1}{KdA} = \frac{1}{\alpha_1 dA_1} + \frac{b}{\lambda dA_m} + \frac{1}{\alpha_2 dA_2}$$

式中 K——总传热系数，W/(m²·K)。





讨论:

1. 当传热面为平面时, $dA=dA_1=dA_2=dA_m$

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

2. 以外表面为基准 ($dA=dA_1$):

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{dA_1}{dA_m} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{dA_1}{dA_2}$$

$$A = \pi dl \quad \frac{1}{K_1} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_1}{d_m} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_1}{d_2}$$





式中 K_1 ——以换热管的外表面为基准的总传热系数；

d_m ——换热管的对数平均直径。
 $d_m = \frac{d_1 - d_2}{\ln \frac{d_1}{d_2}}$

以内表面为基准：
$$\frac{1}{K_2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_2}{d_m} + \frac{1}{\alpha_2}$$

以壁表面为基准：
$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{d_m}{d_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_m}{d_2}$$

$\frac{d_1}{d_2} < 2$ 近似用平壁计算





3. 1/K值的物理意义

$$dQ = KdA(T - t) = \frac{(T - t)}{\frac{1}{KdA}} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_1}{d_m} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_1}{d_2}$$

总热阻 外侧的热阻 壁阻 内侧的热阻





二、总传热速率方程

$$dQ = KdA(T - t) \quad \int_0^Q dQ = \int_0^A K\Delta t_m dA$$

$$Q = KA\Delta t_m \quad \text{——总传热速率方程}$$

式中 K ——平均总传热系数；

Δt_m ——平均温度差。

- (1) 求 K 平均值。
- (2) 热量衡算式与传热速率方程间的关系。
- (3) Δt_m 的求解。





三、污垢热阻

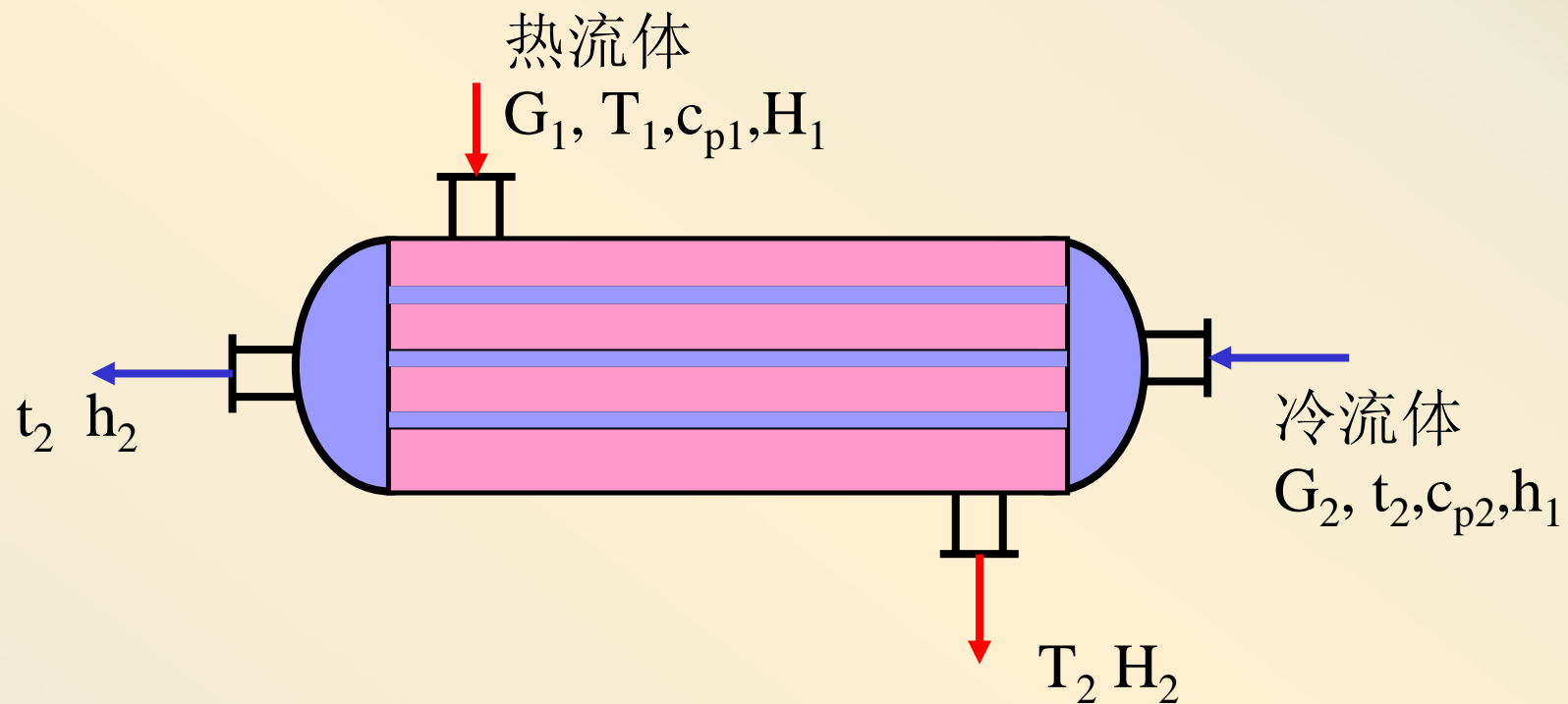
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + R_1 + \frac{b}{\lambda} \frac{d_1}{d_m} + R_2 \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{d_1}{d_2}$$

式中 R_1 、 R_2 ——传热面两侧的污垢热阻， $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。





4.4.2 热量衡算和传热速率方程间的关系



无热损
失:

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}}$$





无相变时

热量衡
算：

$$Q = G_1 c_{p1} (T_1 - T_2) = G_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$$

$$Q = G_1 (H_1 - H_2) = G_2 (h_2 - h_1)$$

式中 Q ——热冷流体放出或吸收的热量， J/s；

G_1, G_2 ——热冷流体的质量流量， kg/s；

c_{p1}, c_{p2} ——热冷流体的比热容， J/(s·°C)；

h_1, h_2 ——冷流体的进出口焓， J/kg；

H_1, H_2 ——热流体的进出口焓， J/kg。





相变时

热量衡算： $Q = G_1 r = G_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$

$$Q = G_1 \left[r + c_{p1} (T_s - T_2) \right] = G_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$$

式中 r —— 热流体的汽化潜热，kJ/kg；

T_s —— 热流体的饱和温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

传热计算的出发点和核心：

$$Q = KA\Delta t_m = G_1 c_{p1} (T_1 - T_2) = G_2 c_{p2} (t_2 - t_1)$$





4.4.3. 传热平均温度差

一、恒温传热

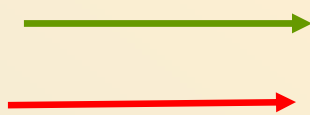
$$\Delta t = T - t = \Delta t_m$$

二、变温传热

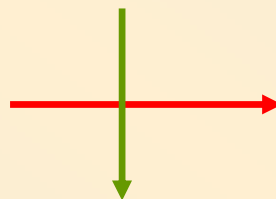
Δt_m 与流体流向有关



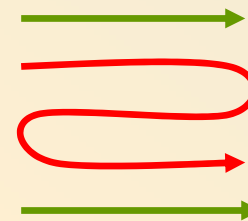
逆流



并流



错流

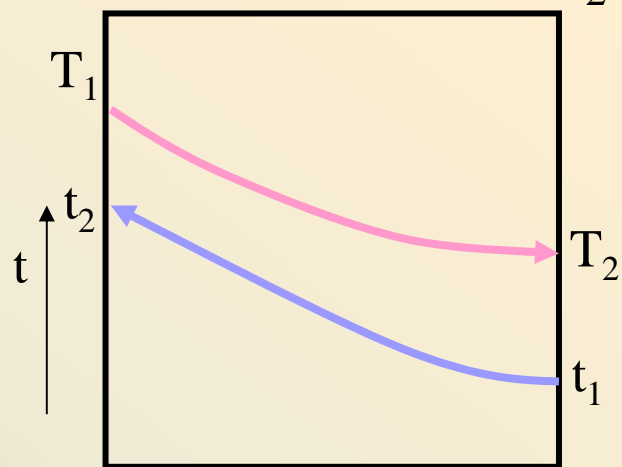
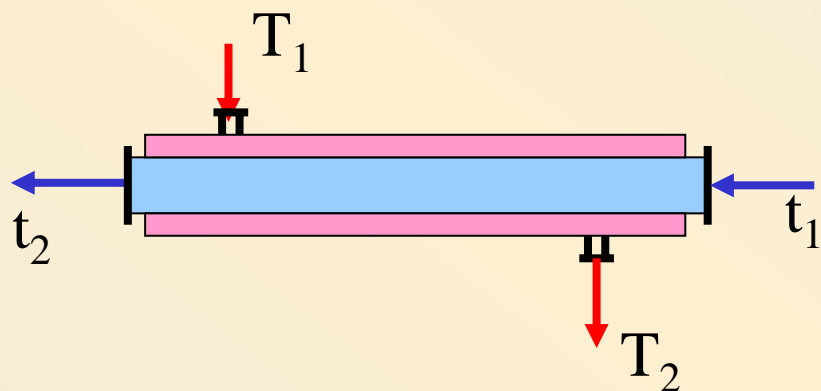


折流

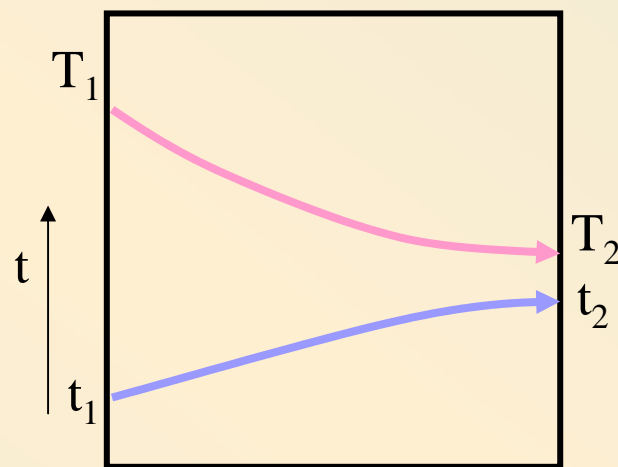
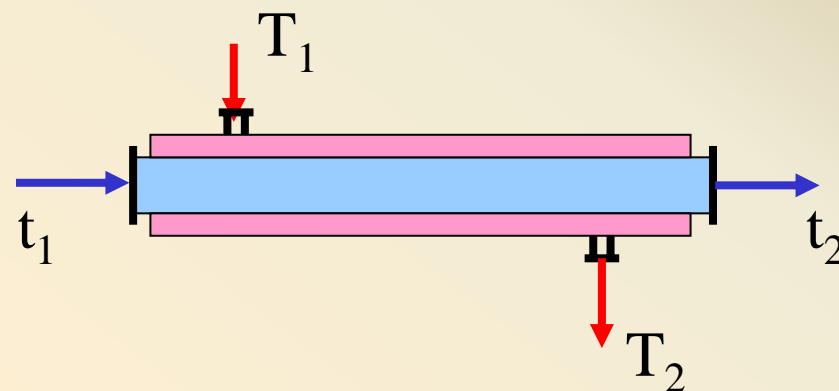




1、逆流和并流时的 Δt_m



逆流



并流





以逆流为例推导 Δt_m

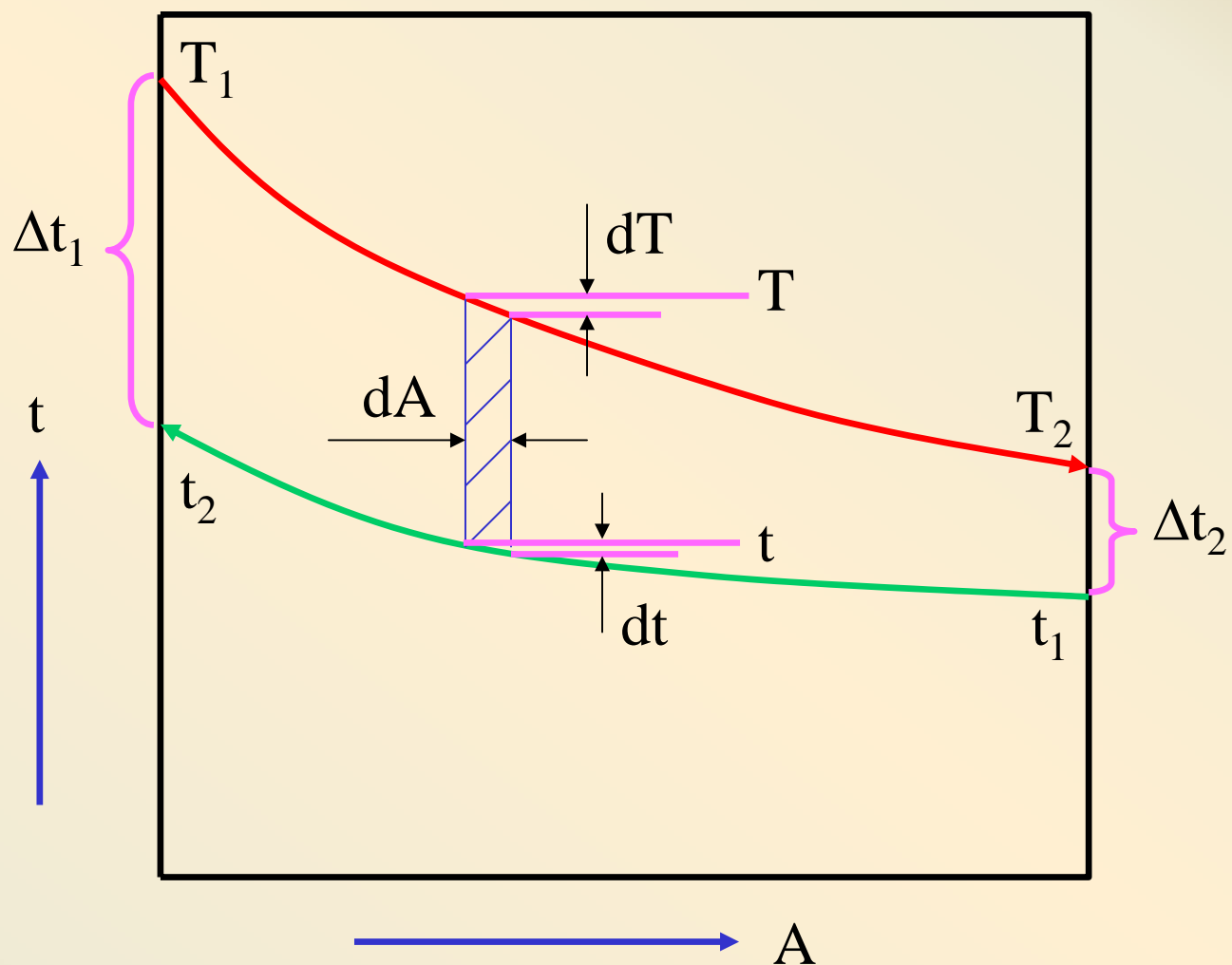
- 假设：1) 定态传热、定态流动， G_1 、 G_2 一定
- 2) c_{p1} 、 c_{p2} 为常数，为进出口平均温度下的
- 3) K 沿管长不变化。
- 4) 热损失忽略不计。

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

$$\Delta t_1 = T_1 - t_2$$

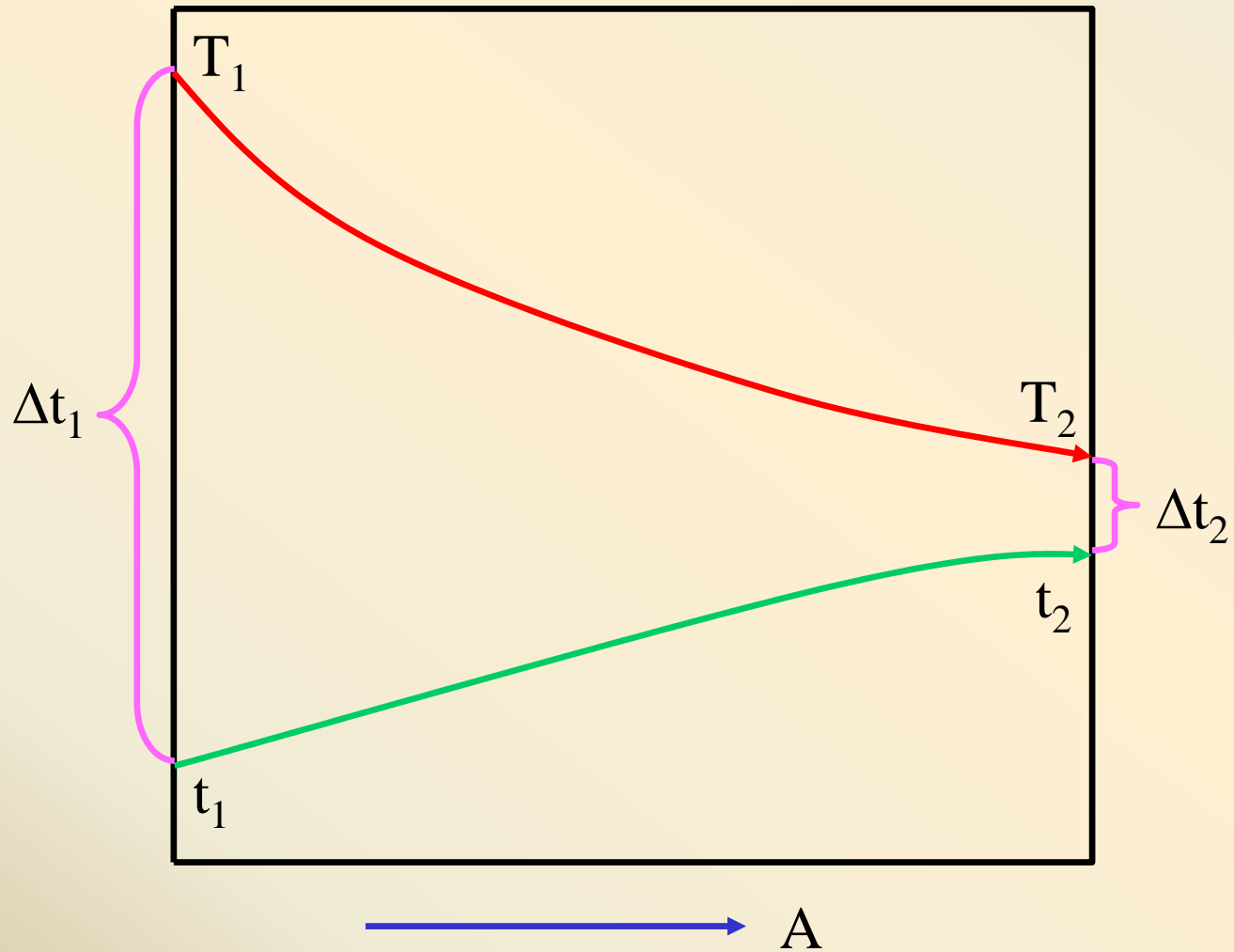
$$\Delta t_2 = T_2 - t_1$$







1) 也适用于并流



$$\Delta t_1 = T_1 - t_1$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_2$$





2) 较大温差记为 Δt_1 ，较小温差记为 Δt_2 ;

3) 当 $\Delta t_1/\Delta t_2 < 2$ ，则可用算术平均值代替

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2$$

4) 当 $\Delta t_1 = \Delta t_2$

$$\Delta t_m = \Delta t_1 = \Delta t_2$$





2、错流、折流时的 Δt_m

$$\Delta t_m = \varphi \Delta t'_m \quad \Delta t'_m : \text{逆流时的平均温度差}$$

$$\varphi = f(P, R, \text{流型})$$

$$R = \frac{\text{热流体温降}}{\text{冷流体温升}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

$$P = \frac{\text{冷流体温升}}{\text{两流体初温差}} = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$





4.4.4 壁温的计算

$$\text{稳态传热 } Q = KA\Delta t_m = \frac{T - T_W}{\frac{1}{\alpha_1 A_1}} = \frac{T_w - t_W}{\frac{b}{\lambda A_m}} = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_2 A_2}}$$

$$t_W = T_W - \frac{bQ}{\lambda A_m} \quad T_W = T - \frac{Q}{\alpha_1 A_1} \quad t_W = t + \frac{Q}{\alpha_2 A_2}$$

1. λ 大, 即 $b/\lambda A_m$ 小, 热阻小, $t_W = T_W$





2. 当 $t_w = T_w$, 得
$$\frac{T - T_w}{T_w - t} = \frac{1/\alpha_1 A_1}{1/\alpha_2 A_2}$$

$$\alpha_1 \gg \alpha_2 \quad (T - T_w) \ll (T_w - t)$$

T_w 接近于 T , 即 α 大热阻小侧流体的温度。

3. 两侧有污垢

$$Q = KA\Delta t_m = \frac{T - T_w}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + R_1\right) \frac{1}{A_1}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda A_m}} = \frac{t_w - t}{\left(\frac{1}{\alpha_2} + R_2\right) \frac{1}{A_2}}$$





4.4.5 传热效率~传热单元数法

一、传热效率

$$\text{传热效率 } \varepsilon = \frac{\text{实际传热速率 } Q}{\text{最大可能传热速率 } Q_{\max}}$$

最大可能传热速率：换热器中可能发生最大温差变化的传热速率。

理论上最大的温差： $T_1 - t_1$





热容流量： $m_s c_p$

最小值流体：热容流量最小的流体为最小值流体。

$$Q = m_{s1} c_{p1} (T_1 - T_2) = m_{s2} c_{p2} (t_2 - t_1)$$

由热量衡算得最小值流体可获得较大的温度变化

$$\therefore \text{当 } m_{s1} c_{p1} = (m_s c_p)_{\min}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{m_{s1} c_{p1} (T_1 - T_2)}{m_{s1} c_{p1} (T_1 - t_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$$





$$\text{当 } m_{s2}c_{p2} = (m_s c_p)_{\min}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{m_{s2}c_{p2}(t_2 - t_1)}{m_{s2}c_{p2}(T_1 - t_1)} = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

二、传热单元数

$$dQ = -m_{s1}c_{p1}dT = m_{s2}c_{p2}dt = K(T - t)dA$$





$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T-t} = \int_0^A \frac{KdA}{m_{s1}c_{p1}}$$

传热单元数：
$$NTU_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t_m} = \frac{KA}{m_{s1}c_{p1}}$$

传热单元数的意义：热流体温度的变化相当于平均温度差的倍数。

同理：
$$NTU_2 = \frac{t_2 - t_1}{\Delta t_m} = \frac{KA}{m_{s2}c_{p2}}$$





三、传热效率与传热单元数的关系

根据热量衡算和传热速率方程导出：

$$m_{s1}c_{p1} = (m_s c_p)_{\min} \quad C_{R1} = \frac{m_{s1}c_{p1}}{m_{s2}c_{p2}}$$

$$NTU_1 = \frac{KA}{m_{s1}c_{p1}} \quad \varepsilon_1 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$$

逆流： $\varepsilon_1 = \frac{1 - \exp[NTU_1(1 - C_{R1})]}{C_{R1} - \exp[NTU_1(1 - C_{R1})]}$

并流： $\varepsilon_1 = \frac{1 - \exp[-NTU_1(1 + C_{R1})]}{1 + C_{R1}}$





$$m_{s2}c_{p2} = (m_s c_p)_{\min} \quad C_{R2} = \frac{m_{s2}c_{p2}}{m_{s1}c_{p1}}$$

$$NTU_2 = \frac{KA}{m_{s2}c_{p2}} \quad \varepsilon_2 = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

逆流:
$$\varepsilon_2 = \frac{1 - \exp[NTU_2(1 - C_{R2})]}{C_{R2} - \exp[NTU_2(1 - C_{R2})]}$$

并流:
$$\varepsilon_2 = \frac{1 - \exp[-NTU_2(1 + C_{R2})]}{1 + C_{R2}}$$

$$\varepsilon_i = f(NTU_i, C_{Ri}) \Rightarrow \text{绘图}$$





4.4.6 传热计算示例

例题：用120°C的饱和水蒸汽将流量为36m³/h的某稀溶液在双管程列管换热器中从温度为80°C上升到95°C，每程有直径为Φ25×2.5mm管子30根，且以管外表面积为基准K=2800 W/m².°C，蒸汽侧污垢热阻和管壁热阻可忽略不计。求：

- (1) 换热器所需的管长；
- (2) 操作一年后，由于污垢积累，溶液侧的污垢系数增加了0.00009m².°C/W，若维持溶液原流量及进口温度，其出口温度为多少？若又保证溶液原出口温度，可采取什么措施？（定性说明）

溶液的 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ； $c_p=4.2\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 。

