

4. 传热过程分析与换热器设计计算

10.1 传热过程的分析和计算

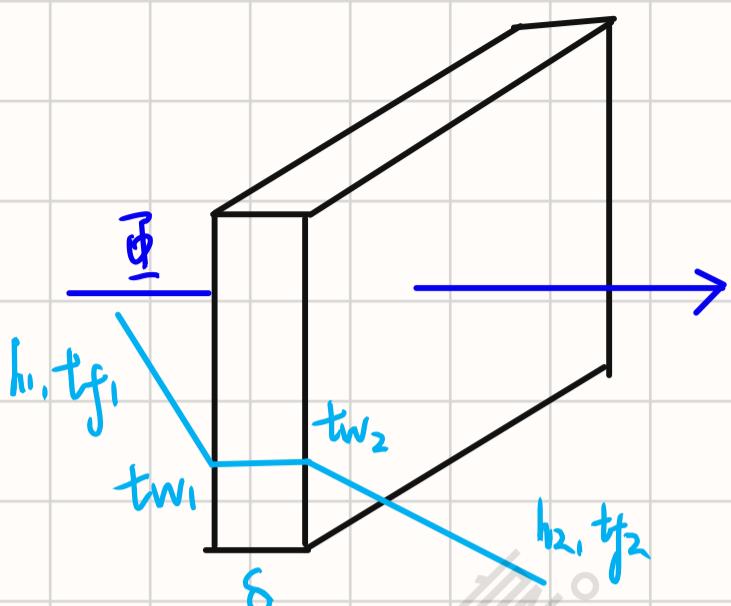
通过平壁的传热：

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

特点：① 壁面两侧传热面积相等

② h_1, h_2 可以是包括辐射与对流传热

作用在内侧的复合换热表面传热系数
(等效传热系数)



通过圆筒壁的传热：

$$\text{管内对流: } \bar{\Phi} = h_i \pi d_i l (t_{fi} - t_{wi})$$

$$\text{管壁导热: } \bar{\Phi} = \frac{(t_{wi} - t_{f,i})}{\ln(d_o/d_i)} \quad \text{管壁热阻 } R = \frac{d_o}{2\pi l \lambda}$$

$$\text{管外对流: } \bar{\Phi} = h_o \pi d_o l (t_{wo} - t_{fo})$$

$$R_{hi} = \frac{1}{\pi h_i l d_i}$$

$$R_\lambda = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi l \lambda}$$

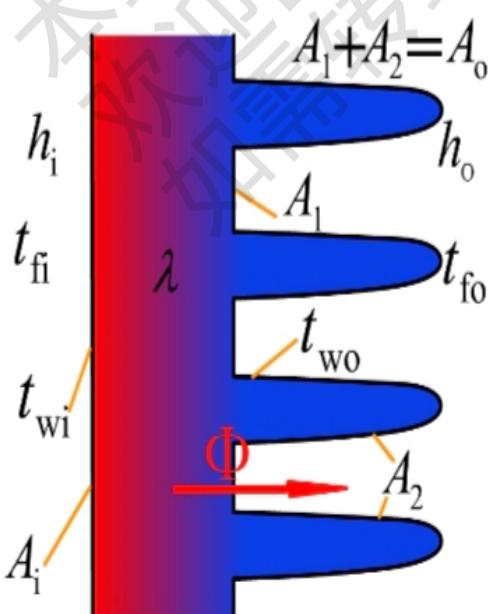
$$R_{ho} = \frac{1}{\pi h_o l d_o}$$

$$\bar{\Phi} = k A_o (t_{fi} - t_{fo}) = k \pi d_o l (t_{fi} - t_{fo}) \quad \text{工程计算以管外侧面积为基准}$$

$$\Rightarrow k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}} \Leftrightarrow \frac{1}{k A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{2\lambda l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o} \quad \text{单位换算} \\ \frac{1}{k} = \frac{1}{h_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o} \quad \text{单位换算}$$

通过肋壁的传热过程



$$\text{内侧: } \bar{\Phi} = h_i A_i (t_{fi} - t_{wi}) \quad \text{管壁的单位热阻}$$

$$\text{平壁: } \bar{\Phi} = \frac{2A_i}{\delta} (t_{wi} - t_{wo})$$

$$\text{外壁: } \bar{\Phi} = h_o A_1 (t_{wo} - t_{wi}) + h_o \eta_f A_2 (t_{wo} - t_{fo})$$

$$= h_o (t_{wo} - t_{fo}) [(A_1 + A_2 \eta_f) / A_o] A_o$$

$$= h_o A_o (t_{wo} - t_{fo}) \eta_o$$

$$\eta_o = \frac{A_1 + A_2 \eta_f}{A_o} \quad \text{肋面总效率}$$

$$\bar{\Phi} = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{\frac{1}{hi A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_i} + \frac{1}{h_o A_o \eta_o}} = \frac{A_o L (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{hi} \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{h_o \eta_o}} = \frac{A_i (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{hi} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o \eta_o} \frac{A_i}{A_o}}$$

定义助热系数 $\beta = A_o / A_i$

加入助热后，使热阻由 $1/h_o \rightarrow 1/(h_o \eta_o \beta)$

临界热绝缘管直径： $\bar{\Phi} = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{hi d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}}$

$$\text{对上式求导 } \frac{dd\bar{\Phi}}{dd_o} = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo}) \left(\frac{1}{2\lambda d_o} - \frac{1}{h_o d_o^2} \right)}{\left(\frac{1}{hi d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o} \right)^2} = 0$$

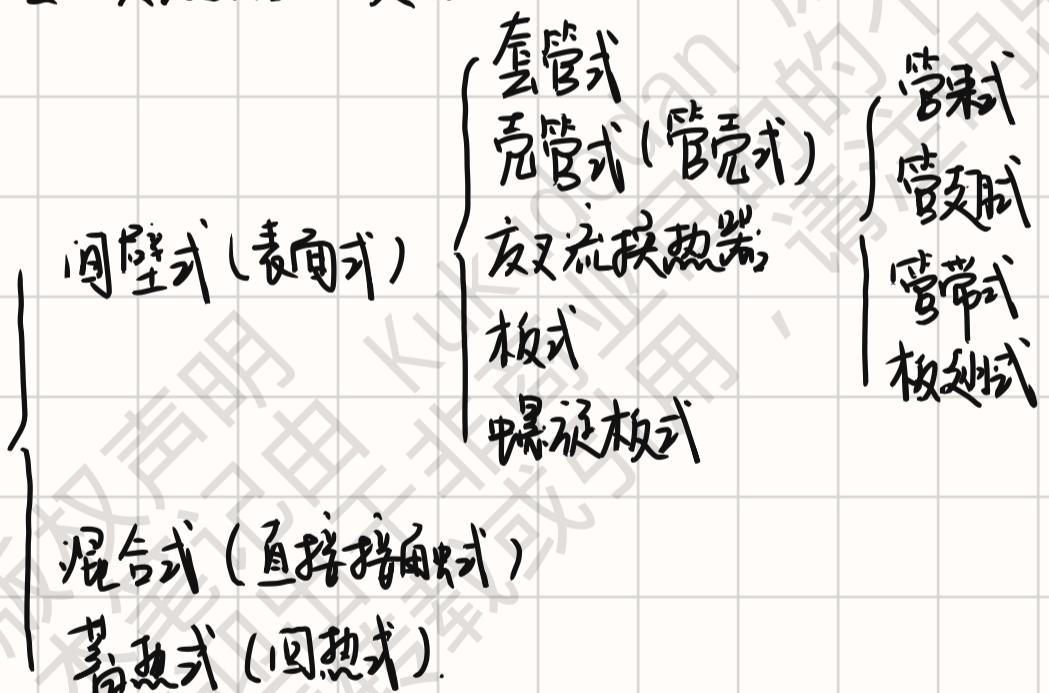
将散热量最大的条件为： $d_o = \frac{2\lambda}{h_o} \Leftrightarrow \frac{h_o d_o}{\lambda} = B_i = 2$

传热过程分析：①增加传热的突破口：热阻大的一侧

②一般情况下，导热热阻占传热热阻的5%左右

③如果两边热阻相当，则需两侧强化

10.2 换热器的类型



主要部件

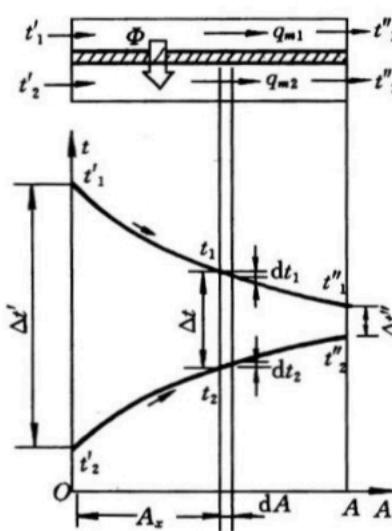
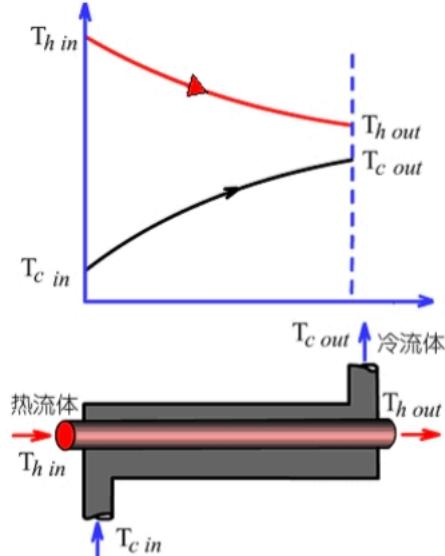
10.3 换热器平均温差计算

传热方程的一般形式： $\bar{\Phi} = k A \Delta t_m$

Δt_m 不仅与冷、热流体的进出口温度有关，还与流动方向的布置有关。

流动方向的布置 { 顺流
逆流

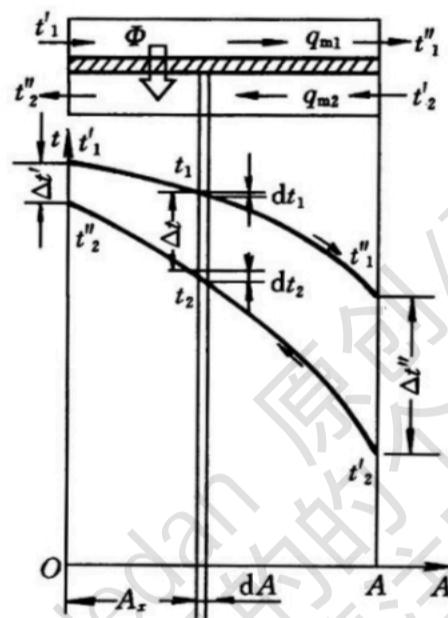
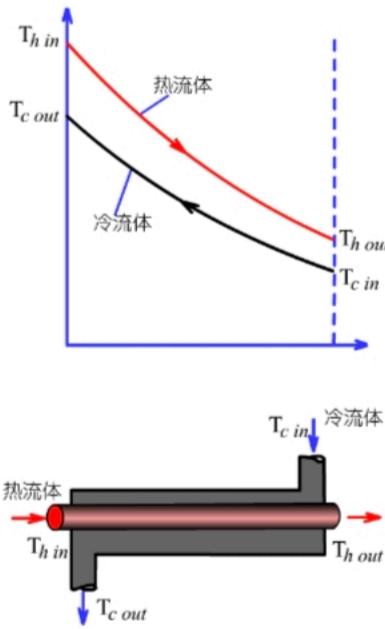
顺流：



模型简化：

- ① 以顺流为例，冷热流体的流量、流量 q_{m1}, q_{m2} 以及比热容 C_1, C_2 都是常数
- ② 传热系数 K 在整个换热器中是常数（若 K 不是常数，将换热器分为几段，每一段内假设为常数）
- ③ 换热器无散热损失
- ④ 换热器沿流动方向的导热可以不计
- ⑤ 同种流体不能既有相变换热，又有单相对流传热。

逆流：



分析方法：

$$① \text{从传热学角度: } d\bar{\Phi}_x = K \Delta t_x dA_x$$

$$\bar{\Phi} = \int_A d\bar{\Phi}_x = \int_0^A K \Delta t_x dA_x$$

$$\bar{\Phi} = K A \Delta t_m \Rightarrow \Delta t_m = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t_x dA_x$$

$$② \text{从热平衡角度: } \begin{cases} d\bar{\Phi}_x = -q_{m1} C_1 dt_1 \Rightarrow dt_1 = -\frac{1}{q_{m1} C_1} d\bar{\Phi} \\ d\bar{\Phi}_x = q_{m2} C_2 dt_2 \Rightarrow dt_2 = \frac{1}{q_{m2} C_2} d\bar{\Phi} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{热流体流过 } dx \text{ 后温度下降} \\ \text{冷流体流过 } dx \text{ 后温度上升} \end{array}$$

$$d\Delta t_x = dt_1 - dt_2 = -\left(\frac{1}{q_{m1} C_1} + \frac{1}{q_{m2} C_2}\right) d\bar{\Phi}_x = -\mu d\bar{\Phi}_x = -\mu K \Delta t_x dA_x$$

$$\text{其中 } \mu = \frac{1}{q_{m1} C_1} + \frac{1}{q_{m2} C_2}.$$

分离变量后积分

$$d\Delta t_x = -\mu k \Delta t_x dA_x$$

$$\int_{\Delta t_1}^{\Delta t_x} \frac{d\Delta t_x}{\Delta t_x} = -\mu k \int_0^{A_x} dA_x \Rightarrow \ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t_1} = -\mu k A_x$$

$$\Rightarrow \Delta t_x = \Delta t_1 \exp(-\mu k A_x)$$

$$\Delta t_m = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t_x dA_x$$

$$= \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t_1 \exp(-\mu k A_x) dA_x$$

$$\Rightarrow \Delta t_m = -\frac{\Delta t_1}{\mu k A} (\exp(-\mu k A) - 1)$$

$$\ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t_1} = -\mu k A \xrightarrow{A_x=A} \ln \frac{\Delta t''}{\Delta t_1} = -\mu k A.$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}} \downarrow$$

对数平均温差 (仅针对纯顺流 / 纯逆流的情况)

其它复杂布置的换热器平均温差的计算

ψ 是小于1的修正系数，表示特定流动型在给定工况下的接近逆流的程度，取决于两个无量纲参数P, R

此处 Δt_m 是错流布置时的 Δt_m

$$\Delta t_m = \psi(\Delta t_m) c_{tf}$$

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}, R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}, \text{ 其中 ' 表示进口, '' 表示出口}$$

R 的物理意义：两种流体的热容量之比 $R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{q_{m2}c_2}{q_{m1}c_1}$

R 大于 1, 小于 1, 或等于 1

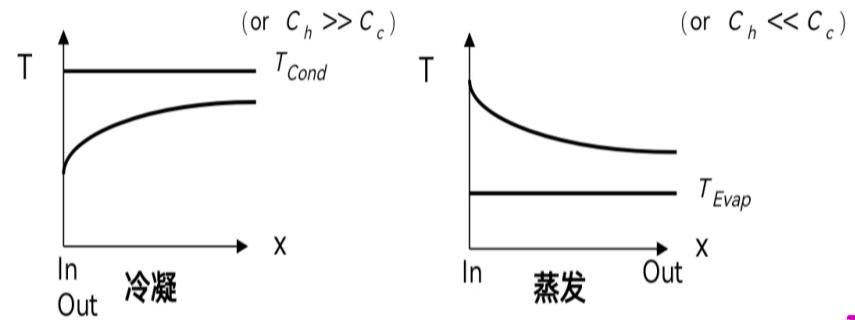
P 的物理意义：冷流体的实际温升与理论最大温升之比

P 大于 1

10.4 间壁式换热器的热设计

设计计算 → 确定换热面积
用图 { 核核计算 → 确定期量

基本方程式：传热方程式： $Q = kA \Delta t_m$



有相变的换热器在发生相变时
保持饱和温度不变，不考虑顺逆
流动问题

$$\text{算术平均温差: } \Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2}$$

$$k = \frac{\Phi}{\Delta t_m A}$$

$$\text{热平衡方程式: } \dot{Q} = q_{m1} C_1 (t_1' - t_1'')$$

$$\dot{Q} = q_{m2} C_2 (t_2'' - t_2') .$$

设计计算需要确定 A, W, D, k
校核计算需确定 Ψ

两类方法

① 平均温差法 (LMTD's method)

特别适用于设计计算

具体步骤:

1. 选择两种流体与表面接触的形状以及两种流体流动布置方式
2. 利用热平衡关系, 求出第4个温度
3. 计算 Δt_m 注意保持修正系数 Ψ 具有合适的数值, Ψ 不能小于0.8, 除非出于必须降低壁温的目的
4. 根据选择的流量, 计算 k
5. 由传热方程式计算所需的换热面积 A
6. 计算两侧流动阻力, 校核是否在允许范围内, 如果阻力过大, 则需改变方案重新设计(压缩机中冷器, 为提高压缩效率, 中间冷却, 所以压损不能太大)

② 估热单元数法 (NTU approach)

特别适用于校核计算

具体步骤:

1. 先假设一个流体的出口温度 t_h''
2. 按热平衡式计算另一个出口温度, 计算 Δt_m
3. 根据换热器的结构, 算出相应工作条件下的总传热系数 k

如何验证假设温度是否合理?

4. 计算 $\Phi_{ht} = kA\Delta t_m$
5. 计算热平衡热量 $\Phi_{hb} = q_{mh}C_h(t_h' - t_h'') = q_{mc}C_c(t_c'' - t_c')$
6. 如果两热量不相等, 或超过工程允许误差, 重新假设出口温度

效能—传热单元数法

换热器的效能: $\epsilon = \frac{|t_1' - t_1''|_{max}}{t_1' - t_1'}$

$$\overline{Q} = (q_m c)_{\min} |t' - t'|_{\max}$$

↓ 和 ϵ 和 η .

$$\overline{\Phi} = (q_m c)_{\min} \epsilon (t' - t'_1)$$

$$\epsilon = f(NTU, \frac{(q_m c)_{\min}}{(q_m c)_{\max}}, \text{mode}). \quad NTU = \frac{RA}{(q_m c)_{\min}}$$

$$\text{顺流: } \epsilon = \frac{1 - e^{-2NTU}}{2}$$

$$\text{逆流: } \epsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{设计计算: } \epsilon \rightarrow NTU \\ \text{校核计算: } NTU \rightarrow \epsilon \end{array} \right.$$

10.4 污垢热阻

$$k = \frac{1}{(\frac{1}{h_0} + R_{f,0}) \frac{1}{\eta_0} + R_w + R_{f,i} \left(\frac{A_0}{A_i} \right) + \frac{1}{h_1} \left(\frac{A_0}{A_i} \right)}$$

污垢热阻的确定

$$R_f = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0}$$

↓ 结垢热阻
↓ 未结垢热阻