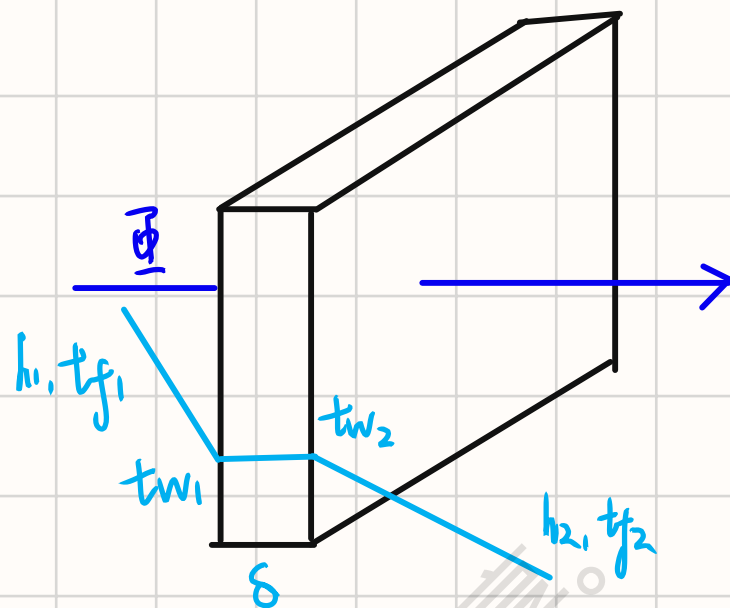


# 传热过程分析与换热器热计算

## 10.1 传热过程分析和计算

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:

$$\begin{cases} \text{管内对流: } \Phi = h_i \pi d_i l (t_{f1} - t_{w1}) \\ \text{管壁导热: } \Phi = \frac{(t_{w1} - t_{w2})}{\frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi l \lambda}} \\ \text{管外对流: } \Phi = h_o \pi d_o l (t_{w2} - t_{f2}) \end{cases}$$

管壁热阻  $r = \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i}$

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

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

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

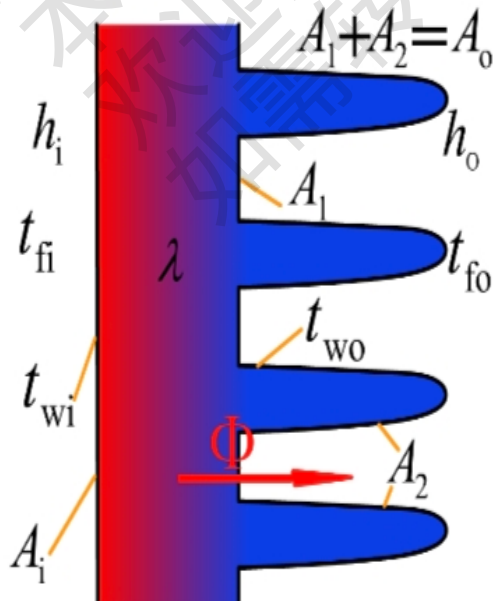
$\Phi = k A_o (t_{f1} - t_{f2}) = k \pi d_o l (t_{f1} - t_{f2})$  工程计算以管外面积为基准

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

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

总热阻  $\frac{1}{k} = \frac{1}{h_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}$  同乘  $A_o$  单位热阻

通过肋壁传热过程



内侧:  $\Phi = h_i A_i (t_{f1} - t_{w1})$  管壁的单位热阻

平壁:  $\Phi = \frac{\lambda A_i}{\delta} (t_{w1} - t_{w2})$

外壁:  $\Phi = h_o A_i (t_{w2} - t_{w1}) + h_o \eta_f A_2 (t_{w2} - t_{f2})$   
 $= h_o (t_{w2} - t_{f2}) [(A_1 + A_2 \eta_f) / A_o] A_o$   
 $= h_o A_o (t_{w2} - t_{f2}) \eta_o$

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

$$\bar{I} = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_i} + \frac{1}{h_o A_o}} = \frac{A_o (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i} \cdot \frac{A_o}{A_i} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{h_o}} = \frac{A_i (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o} \frac{A_i}{A_o}}$$

定义强化系数  $\beta = A_o/A_i$

加肋后, 使热阻由  $1/h_o \rightarrow 1/(h_o \beta)$

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

对上式求导 
$$\frac{d\bar{I}}{dd_o} = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo}) (\frac{1}{2\lambda d_o} - \frac{1}{h_o d_o^2})}{(\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o})^2} = 0$$

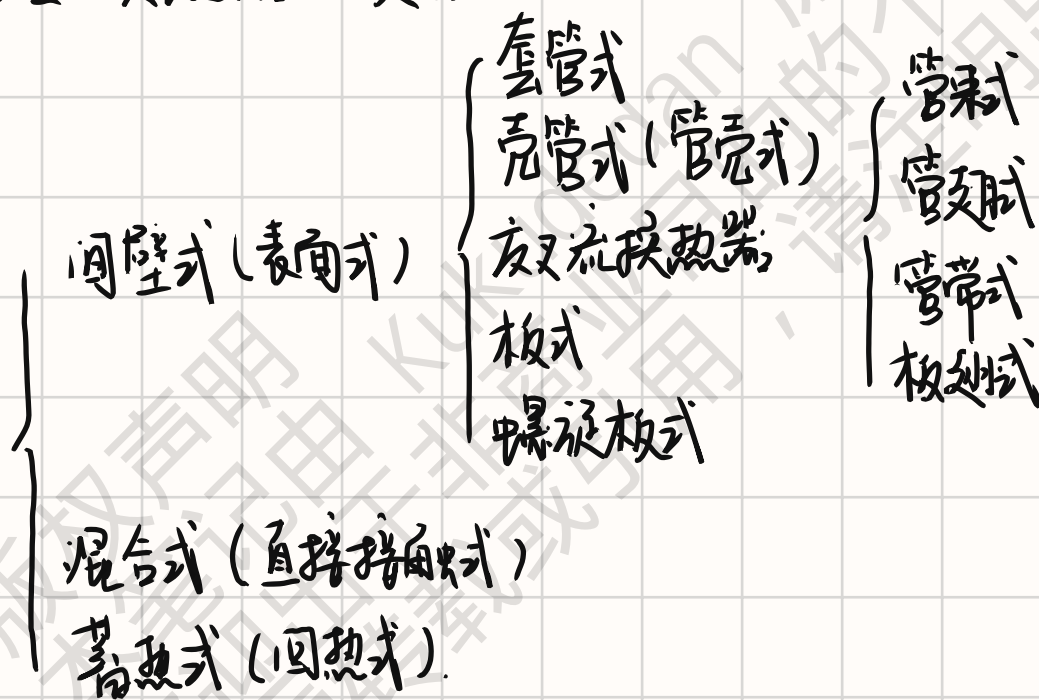
得散热量最大的条件为:  $d_o = \frac{2\lambda}{h_o} \Leftrightarrow \frac{h_o d_o}{\lambda} = Bi = 2$

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



主要看书

## 10.3 换热器平均温差计算

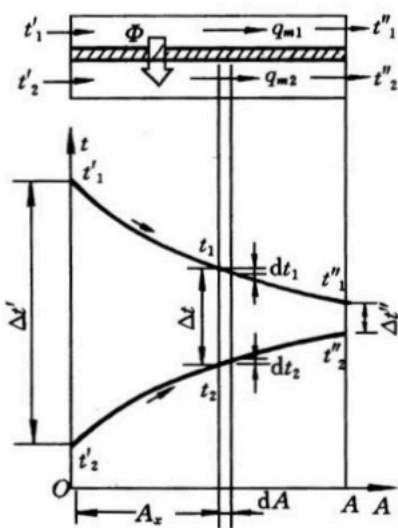
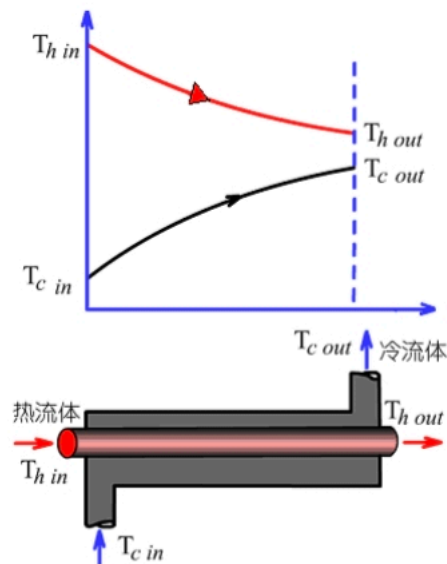
传热方程的一般形式:  $\bar{I} = k A \Delta t_m$

$\Delta t_m$  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

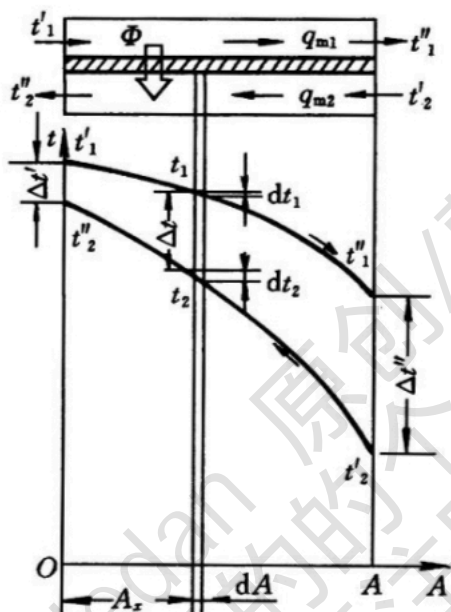
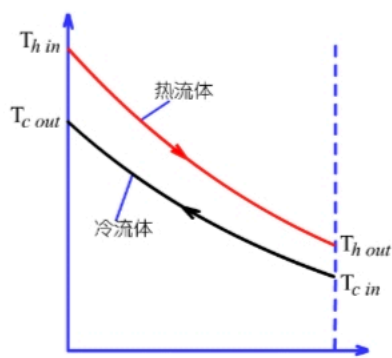
顺流:



模型的简化:

- ① 以顺流为例, 冷热流体的质量流量  $q_{m1}$ ,  $q_{m2}$  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速度可以忽略不计
- ⑤ 同种流体不能既有相变换热, 又有单相对流换热.

逆流:



分析方法:

① 从传热学角度:  $d\Phi_x = k\Delta t_x dA_x$

$$\Phi = \int_A d\Phi_x = \int_0^A k\Delta t_x dA_x$$

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

② 从热平衡角度:  $\begin{cases} d\Phi_x = -q_{m1}C_1 dt_1 \Rightarrow dt_1 = -\frac{1}{q_{m1}C_1} d\Phi_x & \text{热流体流过 } dA \text{ 后温度下降} \\ d\Phi_x = q_{m2}C_2 dt_2 \Rightarrow dt_2 = \frac{1}{q_{m2}C_2} d\Phi_x & \text{冷流体流过 } dA \text{ 后温度上升} \end{cases}$

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

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

分离变量后积分

$$d\Delta t_x = -uk\Delta t_x dA_x$$

$$\int_{\Delta t'}^{\Delta t_x} \frac{d\Delta t_x}{\Delta t_x} = -uk \int_0^{A_x} dA_x \Rightarrow \ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t'} = -ukA_x$$

$$\Rightarrow \Delta t_x = \Delta t' \exp(-ukA_x)$$

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

$$= \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t' \exp(-ukA_x) dA_x$$

$$\Rightarrow \Delta t_m = - \frac{\Delta t'}{ukA} (\exp(-ukA) - 1)$$

$$\ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t'} = -ukA \xrightarrow{A_x=A} \ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = -ukA$$

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

对数平均温差 (仅针对纯顺流/纯逆流的情况)

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

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

其它复杂布置时换热器平均温差的计算

$\psi$  是小于 1 的修正系数, 表示特定流动型在给定的  $\Delta t_m$  下的接近逆流的程度, 取决于两个无量纲参数  $P, R$

此外  $\Delta t_m$  是逆流布置时的  $\Delta t_m$

$$\Delta t_m = \psi (\Delta t_m)_{\text{cf}}$$

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

$$R \text{ 的物理意义: 两种流体的热容量之比 } R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{q_{m2} C_2}{q_{m1} C_1}$$

$R$  可大于、小于、或等于 1

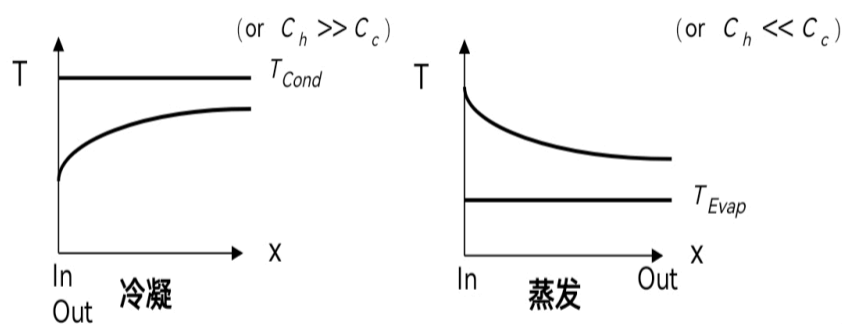
$P$  的物理意义: 冷流体的实际温升与理论最大温升之比

$P$  只能小于 1

#### 10.4 间壁式换热器的热设计

目的 { 设计计算  $\rightarrow$  确定换热面积  
校核计算  $\rightarrow$  确定热量

基本方程式: 传热方程式:  $\Phi = kA\Delta t_m$



有相变的换热器在发生相变侧保持饱和温度不变, 不存在顺逆流问题



热平衡方程式:  $\dot{Q} = q_{m1} C_p (t_1' - t_1'')$   
 $\dot{Q} = q_{m2} C_p (t_2' - t_2'')$

设计计算需要确定  $A$  以及  $k$

校核计算需要确定  $\dot{Q}$

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  $\Delta t_m$  注意保持修正系数  $\Psi$  具有合适的数值,  $\Psi$  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 传热单元数法 (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  $\Delta t_m$
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  $\Phi_{ht} = k A \Delta t_m$
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:  $\epsilon = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'}$

$$\bar{Q} = (q_{mc})_{\min} |t' - t''|_{\max}$$

↓ 已知  $\varepsilon$  求  $\bar{Q}$ .

$$\bar{Q} = (q_{mc})_{\min} \varepsilon (t'_1 - t'_2)$$

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{(q_{mc})_{\min}}{(q_{mc})_{\max}}, \text{mode}\right). \quad NTU = \frac{kA}{(q_{mc})_{\min}}$$

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

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

设计计算:  $\varepsilon \rightarrow NTU$   
校核计算:  $NTU \rightarrow \varepsilon$

#### 10.4 污垢热阻

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_o} + R_{f,o}\right) \frac{1}{q_o} + R_w + R_{f,i} \left(\frac{A_o}{A_i}\right) + \frac{1}{h_i} \left(\frac{A_o}{A_i}\right)}$$

污垢热阻的确定

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

↓  
结垢热阻

↓  
未结垢热阻