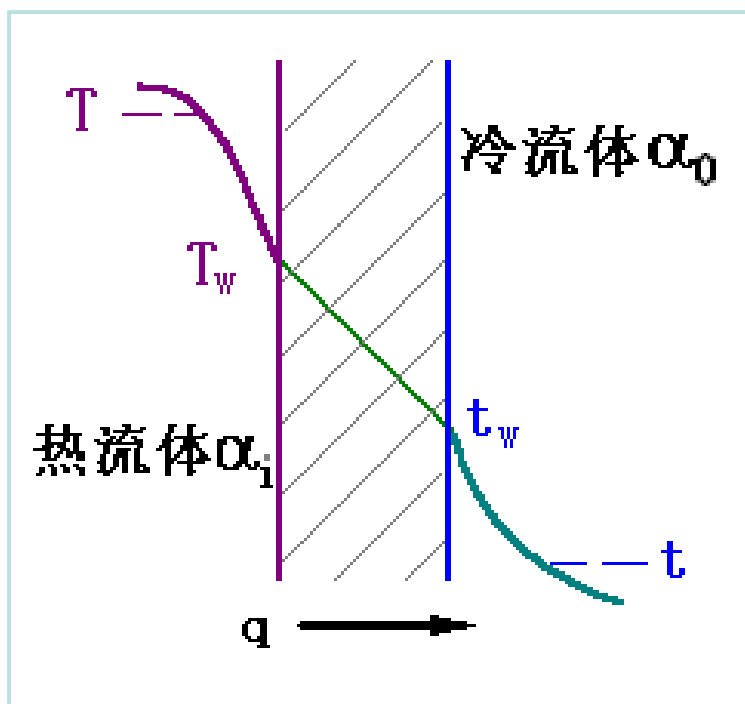
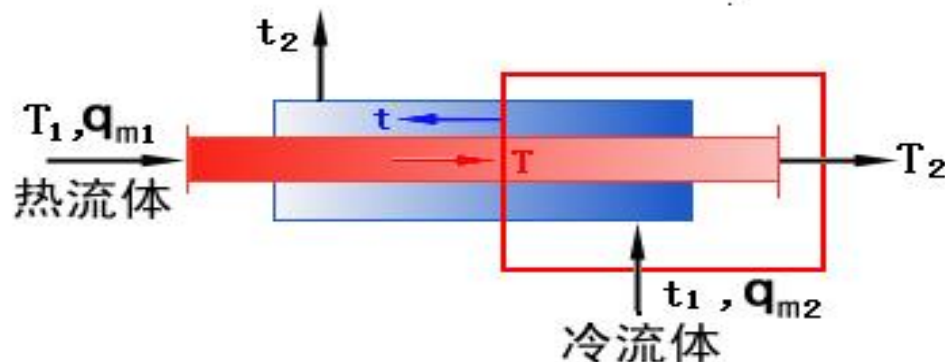


6.6 传热过程的计算

6.6.1 传热速率和传热系数



$$dQ = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_i dA_i}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{\delta}{\lambda dA_m}} = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_0 dA_0}}$$

$$\frac{T - t}{\frac{1}{KdA}} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总阻力}}$$

若以外壁面为基准：

$$\frac{1}{K_0 dA_0} = \frac{1}{\alpha_i dA_i} + \frac{\delta}{\lambda dA_m} + \frac{1}{\alpha_0 dA_0}$$

$$\therefore \frac{1}{K_0} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{dA_0}{dA_i} + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{dA_0}{dA_m} + \frac{1}{\alpha_0}$$

若为平壁

$$dA_i = dA_m = dA_0$$

$$\therefore \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_0}$$

注意：（1） K 与 A 必须对应

一般情况管壁比较薄， $A_i = A_m = A_0$

(2) 考虑污垢:
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + R_i + \frac{\delta}{\lambda} + R_0 + \frac{1}{\alpha_0}$$

对新管子, 经过清洗去垢后管子, $R_i=R_0=0$,
又通常 $\lambda_{\text{金属}}$ 大, 壁 δ 薄, 故 $\delta/\lambda \approx 0$, 忽略壁
阻及垢阻: 则
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_0}$$

(a) 当 $\alpha_0 > \alpha_i$, 则 K 比 α_i 还小

(b) 当 $\alpha_0 \gg \alpha_i$, 则 $K \approx \alpha_i$,

p209, 例6—9

指出了强化传热途径从 α 小入手

α 值工程概念:

无相变	$\alpha_{\text{液}}$	几百至几千	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
	$\alpha_{\text{气}}$	几十至几百	
有相变		几千至几万	

因此当管外用饱和蒸汽加热管内气体时,

$$\because \alpha_{\text{蒸汽}} \gg \alpha_{\text{空气}}$$

$$\therefore K \approx \alpha_{\text{空气}}$$

壁温计算:

$$\because \delta \text{ 很小}, \therefore T_w = t_w$$

$$q = \alpha_i (T - T_w) = \alpha_0 (t_w - t)$$

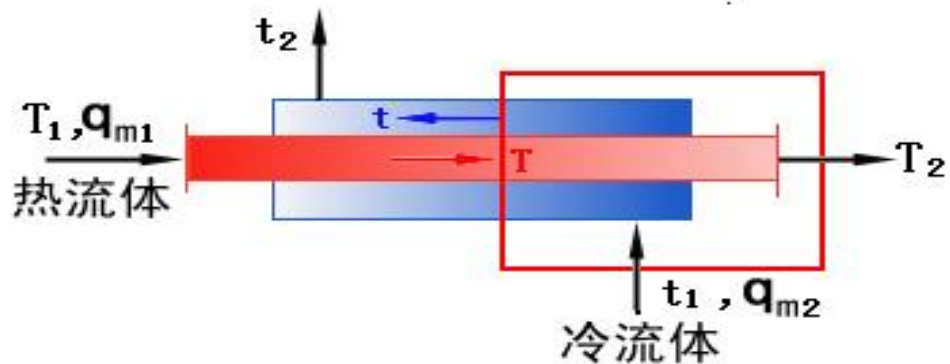
若 α_i 大, 则 $(T - T_w)$ 小 即 $T_w \xrightarrow{\text{blue}} T$

结论: 壁温总是趋于 α 值大一边温度。

壁温讨论意义重大!

例管式炉中炉管为什么在烈火中不融化, 因为里面有液体, $\alpha_{\text{液}}$ 大, 所以 $t_w \approx t_{\text{液}}$

6.6.2 平均温差和传热基本方程式



以逆流，无相变流体推导：

前提： 1、定态，无热损失

2、 K 为常数

3、物性数据不变

热量衡算：

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

$$\frac{q_{m2}c_{p2}}{q_{m1}c_{p1}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{T_1 - T}{t_2 - t} = \frac{T - T_2}{t - t_1}$$

$$\frac{q_{m2}c_{p2}}{q_{m1}c_{p1}}$$

是传热操作线斜率

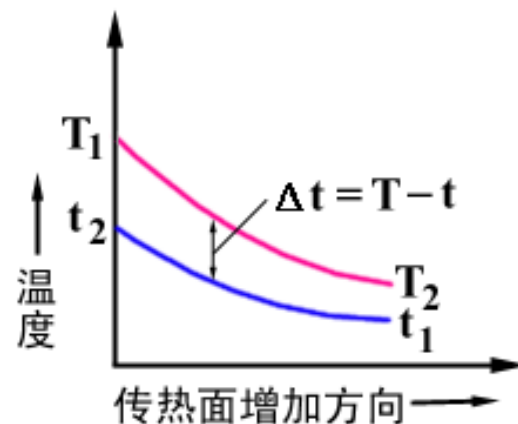
dA 面上传热速率式

$$-q_{m1}c_{p1}dT = K(T - t)dA$$

或 $q_{m2}c_{p2}dt = K(T - t)dA$

沿管长 l 作积分可得传热基本方程：

$$Q = KA\Delta t_m$$



注意： 1、公式中 K 与 A 要对应 $K_i A_i = K_o A_o$

$$2、 \quad \Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

逆流时, $\Delta t_2 = T_1 - t_2$, $\Delta t_1 = T_2 - t_1$

当 $\Delta t_2 < 2 \Delta t_1$ 时可取算术平均值

$$\Delta t_m = \frac{1}{2} (\Delta t_1 + \Delta t_2)$$

6.6.3 换热器的设计型计算

1、设计型命题

设计条件： T_1 ， T_2 ， $q_{m1}c_{p1}$

计算目的： A （传热面积）

2、提供的传热方程

热量恒算式：
$$Q = q_{m1}c_{p1}(T_1 - T_2) = q_{m2}c_{p2}(t_2 - t_1)$$

传热系数K：
$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{A_0}{A_i} + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{A_0}{A_m} + \frac{1}{\alpha_0}$$

传热基本方程式：
$$Q = KA\Delta t_m$$

可供选择条件：

- (1) 流向（逆流、并流等）
- (2) 冷流体 t_2 , 或 q_{m2}
- (3) 冷流体 t_1
- (4) 流速

3、设计条件选择依据

- (1) 流向——逆流优于并流

理由之一：在换热器四个端值 T_1 , T_2 , t_1 , t_2 相同情况下， $\Delta t_{m逆} > \Delta t_{m并}$

\therefore 完成同样 $Q (KA \Delta t_m)$ $A_{逆} < A_{并}$

例： 6-12 $T_1=80^{\circ}\text{C}$ $T_2=50^{\circ}\text{C}$ $t_1=10^{\circ}\text{C}$ $t_2=30^{\circ}\text{C}$

$$\frac{q_{m2}c_{p2}}{q_{m1}c_{p1}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{80 - 50}{30 - 10} = 1.5$$

$$\Delta t_{\text{m逆}}=44.8^{\circ}\text{C} \quad \Delta t_{\text{m并}}=39.9^{\circ}\text{C}$$

理由之二：逆流操作可以在更宽的范围内完成传热任务。

设 $A=\infty$ (讨论问题方便) 则 $\Delta t_{\text{m}}=0$,

$$q_{m1}=2000\text{kg/h} \quad q_{m2}=3000\text{kg/h}$$

$$T_1=80^{\circ}\text{C} \quad t_1=10^{\circ}\text{C}$$

并流时，冷水可达 $t_{2\text{max}}=T_{2\text{min}}$

由操作线斜率 $\frac{q_{m2}c_{p2}}{q_{m1}c_{p1}} = \frac{T_1 - T_{2\min}}{t_{2\max} - t_1} = 1.5$

即 $\frac{80 - T_{2\min}}{t_{2\max} - 10} = 1.5$

$$t_{2\max} = 38^\circ\text{C}$$

而逆流 $\frac{q_{m2}c_{p2}}{q_{m1}c_{p1}} = \frac{T_1 - T_{2\min}}{t_{2\max} - t_1} = 1.5$

则 $\frac{80 - 10}{t_{2\max} - 10} = 1.5$

$$t_{2\max} = 56.7^\circ\text{C}$$

(2) t_2 或 q_{m2} 选择

t_1 确定后, t_2 或 q_{m2} 只须选一个, 受热量衡算限制。

$$(q_m c_p)_1(T_1 - T_2) = (q_m c_p)_2(t_2 - t_1)$$

$t_{2\text{选}} \uparrow, q_{m2} \downarrow, \Delta t_m \downarrow$, Q 一定时, $A \uparrow$

极限情况: $t_{2\text{max}}, q_{m2\text{min}}$ 时, $\Delta t_m = 0$, $A = \infty$

受热量恒算限制, 要权衡操作费与设备费。

t_2 过高, 工业用水中所含盐类析出, 易结垢。

(1) Δt_m 不易小于 10°C

(2) t_2 不高于 45°C

(3) 冷流体入口 t_1 选择

夏季与冬季水温 t 不同，应该按夏天计算为安全可靠。

(4) 流速选择

从 $\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_0}$ 入手

尽量避免层流

若 $\alpha_0 \gg \alpha_i$ ，则 $K \approx \alpha_i$ ，
而 $\alpha_i = B \frac{G^{0.8}}{d^{0.2}} = B \frac{(q_m / A)^{0.8}}{d^{0.2}}$

兼顾传热系数与压降

6.7.2 列管式换热器的设计和选用

1. 设计应考虑的问题

(1) 流体通道的选择

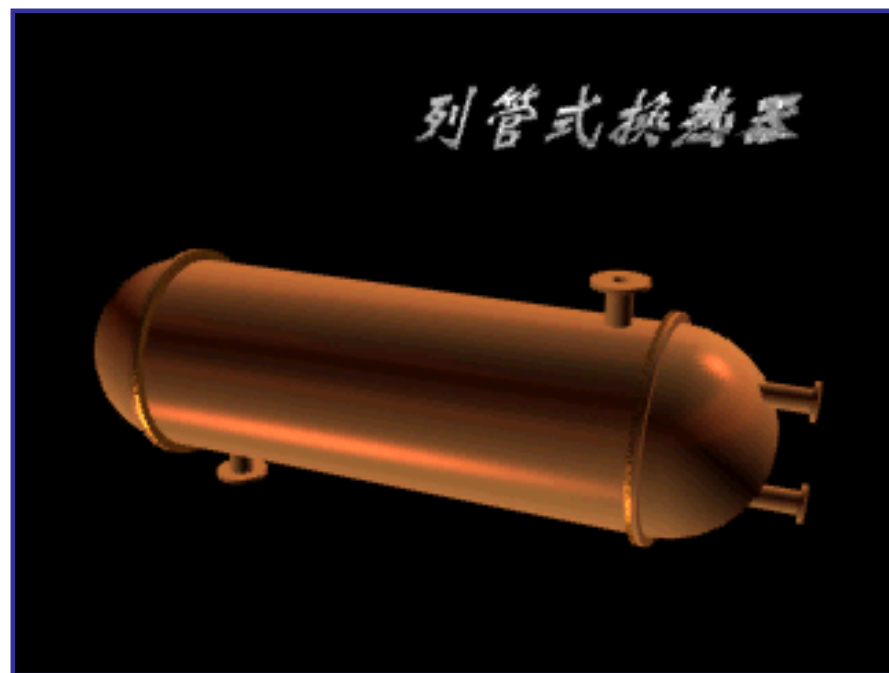
走管程：

高压，有腐蚀，

不洁净易结垢

走壳程：

饱和蒸汽，要求散热



动画

(2) 管径，管长，管子排列

管径两种规格：

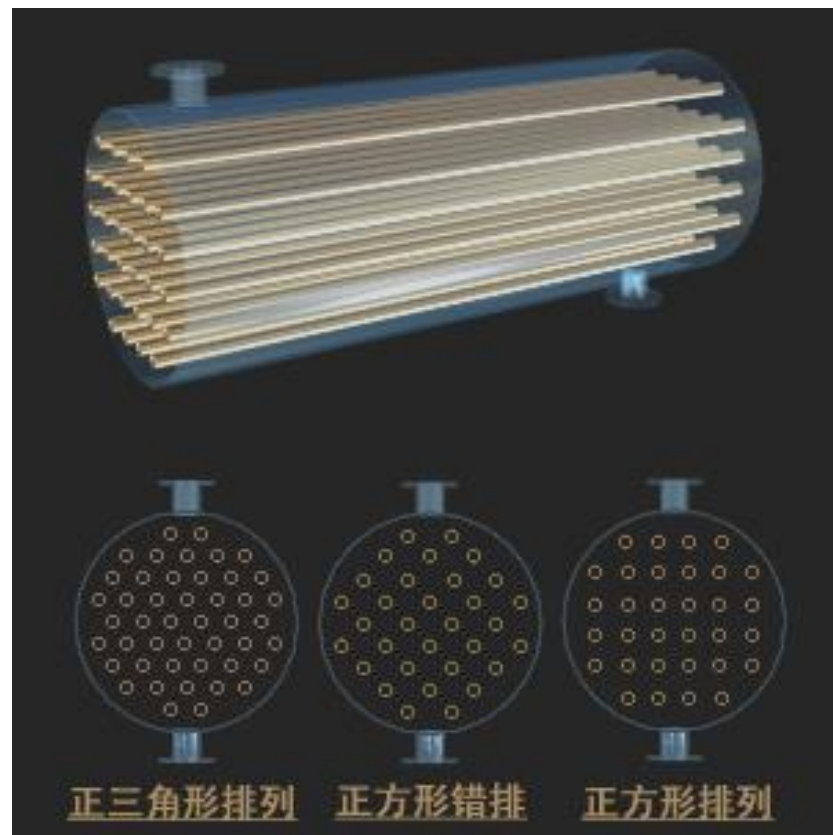
$\phi 25 \times 2.5\text{mm}$ ， $\phi 19 \times 2\text{mm}$

管长四种规格：

1.5，2，3，6 (m)

排列方式选择考虑：

湍动与清洗便利



(3) 折流挡板选择:

挡板的间距取壳体直径

0.2-1.0倍

类型: 圆缺形、圆盘形

作用:

增加管外 α_0

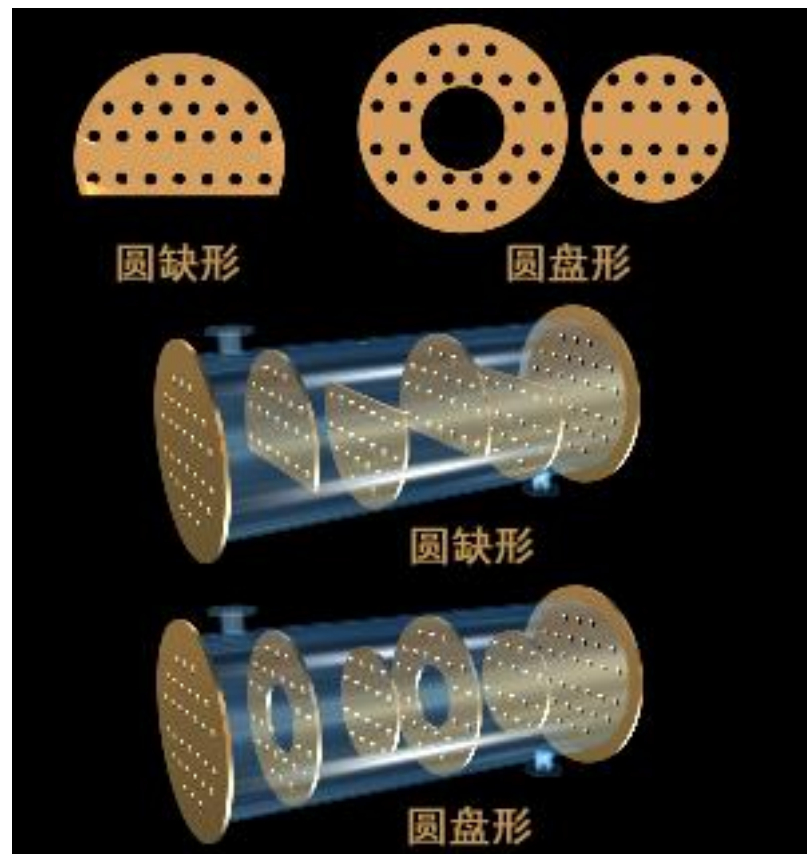
支撑管束的作用

标准:

G: 150, 300, 600(mm)

F: 150, 200, 300,

480, 600 (mm)



2、列管式换热器给热系数

(1) 管程（管内） α_i

$$\alpha_i = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^b$$

$$b = \begin{cases} 0.4 & \text{被加热} \\ 0.3 & \text{被冷却} \end{cases}$$

(2) 壳程（管外、管隙） α_0

有折流板时，用寇恩**Kern**公式：

$$\alpha_0 = 0.36 \frac{\lambda}{d_e} \text{Re}^{0.55} \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

使用寇恩公式应注意：

- (a) 适用范围：圆缺形折流板，**Re > 2000**;
- (b) 定性温度；
- (c) 定性尺寸

3、换热器压降计算

判别换热器性能标准：

K 大， Δp 小

(1) 管程压降 Δp_t

$\Delta \mathcal{P}$ = 直管阻力 + 局部阻力

$$= (\lambda \frac{L}{d} + 3)f_t N_p \frac{\rho u_i^2}{2}$$

f_t ：管程结垢校正系数

当流量一定时， $u_i = \frac{q_{vi}}{\frac{\pi}{4} d_i^2 n / N_p}$

而 $\Delta \mathcal{P} \propto N_p^3$ $\alpha_i \propto N_p^{0.8}$

兼顾传热与压降

习题:

16,17,19,22,23,25

学号个位数	$t_1(^{\circ}\text{C})$	学号十位数	流量(kg/s)
0	16	0	13
1	17	1	14
2	18	2	15
3	19	3	16
4	20	4	17
5	21	5	18
6	22	6	19
7	23	7	20
8	24	8	21
9	25	9	22