

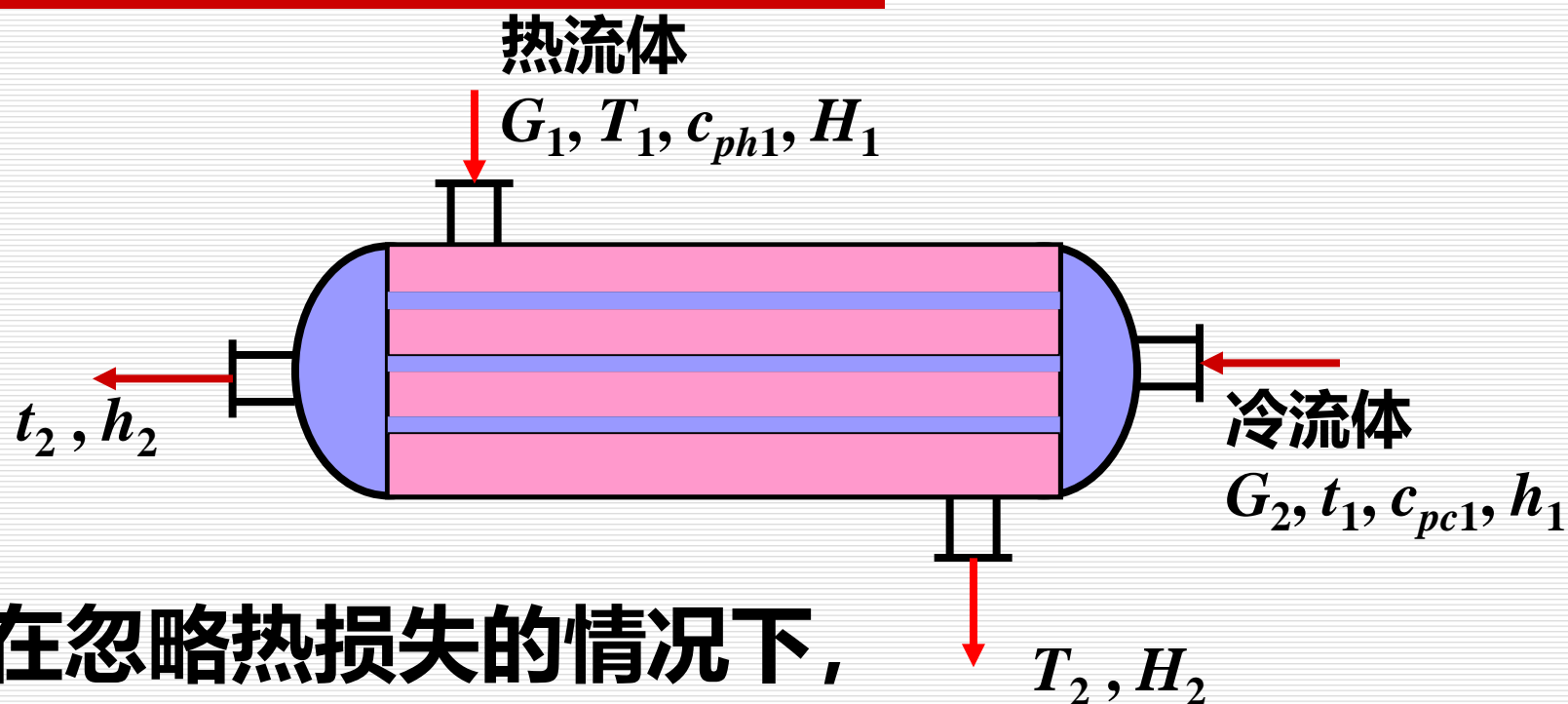
第二章 热量传递

- 2.1 概 述
 - 2.2 热传导
 - 2.3 对流传热
 - 2.4 传热系数经验关联式
 - 2.5 传热过程的计算
 - 2.6 换热器
-

2.5 热交换过程的传热计算

- 2.5.1 热量衡算
 - 2.5.2 热交换过程分析
 - 2.5.3 热交换传热速率方程
 - 2.5.4 传热平均温度差
 - 2.5.5 壁温的计算
 - 2.5.6 换热器传热计算举例
-

2.5.1 热量衡算



在忽略热损失的情况下,

热流体放出的热量 = 冷流体吸收的热量

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}}$$

2.5.2 热量衡算

无相变时热量衡算

$$Q = q_{m,h} c_{p,h} (T_1 - T_2) = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1)$$

$c_{p,c}, c_{p,h}$: 冷、热流体的定压比热容 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$q_{m,c}, q_{m,h}$: 冷、热流体质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

t_1, t_2, T_1, T_2 : 冷、热流体起始 / 终了温度

2.5.1 热量衡算

有相变时要考虑潜热

$$Q = q'_{m,h} r = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1)$$

如蒸汽冷凝后继续冷却，潜热、显热都要考虑

$$Q = q'_{m,h} [r + c_{p,h} (T_s - T_2)]$$

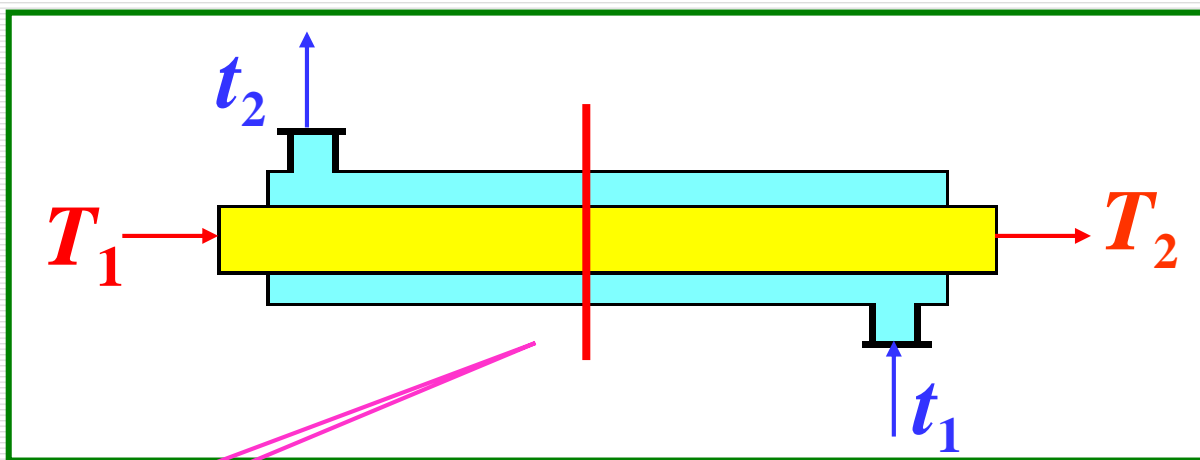
$$= q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1)$$

r : 冷凝潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

T_s : 一定压力下饱和蒸汽冷凝温度, K

2.5.2 热交换过程分析

1.热流体对管壁的给热； 2.管壁内部的导热； 3.管壁对冷流体的给热。



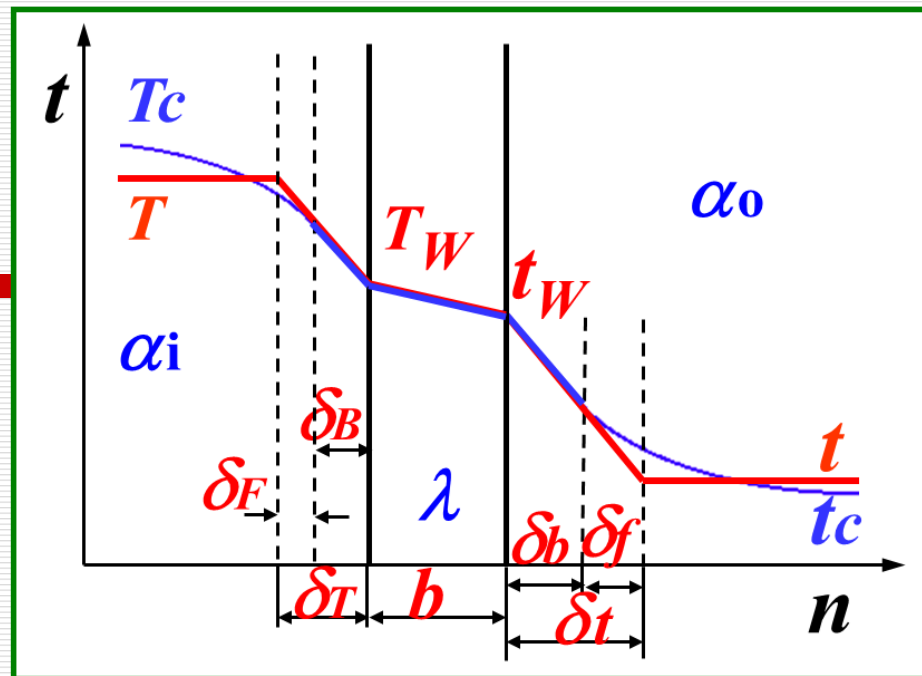
冷、热流体的温度差，沿轴向变化，但对任一管截面，冷热流体的温度差不随时间而变，所以仍然是稳定传热过程。

热交换过程分析:

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



推动力

$$T - T_W$$

$$T_W - t_W$$

$$t_W - t$$

热阻

$$\frac{1}{\alpha_i dS_i}$$

$$\frac{b}{\lambda dS_m}$$

$$\frac{1}{\alpha_o dS_o}$$

热流体对管壁的给热速率：

$$dQ_1 = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_i dS_i}}$$

管壁间的导热速率：

$$dQ_2 = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda dS_m}}$$

管壁对冷流体的给热速率：

$$dQ_3 = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_o dS_o}}$$

稳定传热： $dQ_1 = dQ_2 = dQ_3 = dQ$

$$dQ = \frac{(T - T_w) + (T_w - t_w) + (t_w - t)}{\frac{1}{\alpha_i dS_i} + \frac{b}{\lambda dS_m} + \frac{1}{\alpha_o dS_o}}$$

$$dQ = \frac{(T - T_w) + (T_w - t_w) + (t_w - t)}{\frac{1}{\alpha_i dS_i} + \frac{b}{\lambda dS_m} + \frac{1}{\alpha_o dS_o}}$$

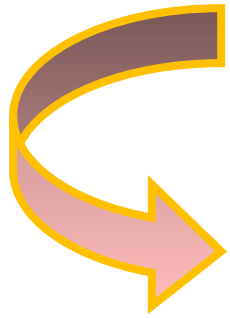
$$= \frac{T - t}{\frac{1}{\alpha_i dS_i} + \frac{b}{\lambda dS_m} + \frac{1}{\alpha_o dS_o}} = \frac{\Delta t}{R}$$

令 $\frac{1}{K_o dS_o} = \frac{1}{\alpha_i dS_i} + \frac{b}{\lambda dS_m} + \frac{1}{\alpha_o dS_o}$ $\Rightarrow dQ = \frac{T - t}{\frac{1}{K_o dS_o}} = \frac{\Delta t}{R}$

$dQ = K_o (T - t) dS_o$ 微元管段的传热速率方程

K_o 称基于管外表面的总传热系数。可作常数。

$$R = \frac{1}{K_o dS_o} = \frac{1}{\alpha_i dS_i} + \frac{b}{\lambda dS_m} + \frac{1}{\alpha_o dS_o}$$



$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{dS_o}{dS_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{dS_o}{dS_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$\because dS_o = \pi d_o (dL), dS_i = \pi d_i (dL), dS_m = \pi d_m (dL)$$

$$\therefore \frac{dS_o}{dS_m} = \frac{d_o}{d_m}, \frac{dS_o}{dS_i} = \frac{d_o}{d_i}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

总传热系数 K 的计算

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

1. 平壁

2. 薄圆筒壁

平壁或薄圆筒壁
且忽略管壁热阻

忽略管壁热阻

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}$$

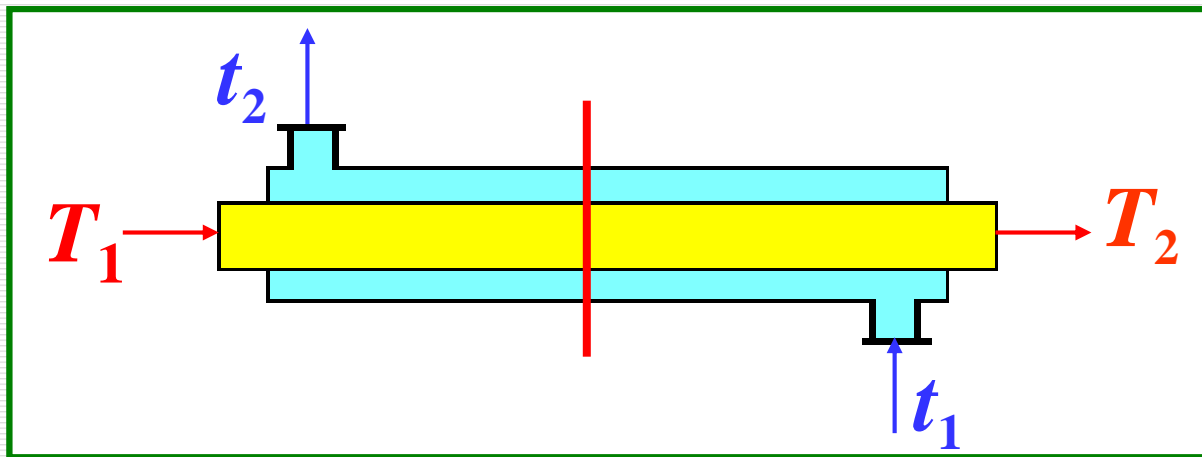
$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

热交换器由无数微元管段组成。通过对微元管段作热量衡算并在下面积分限积分，可得整个热交换器的传热速率方程。

$$\text{当 } S_o = 0 \text{ 时, } T - t = T_1 - t_2$$

$$S_o = S_o \text{ 时, } T - t = T_2 - t_1$$



微元管段热量衡算： $dQ = -q_{m,h}c_{p,h}dT = q_{m,c}c_{p,c}dt$

$$\frac{dQ}{dT} = -q_{m,h}c_{p,h} \quad \frac{dQ}{dt} = q_{m,c}c_{p,c} \quad \text{常量}$$

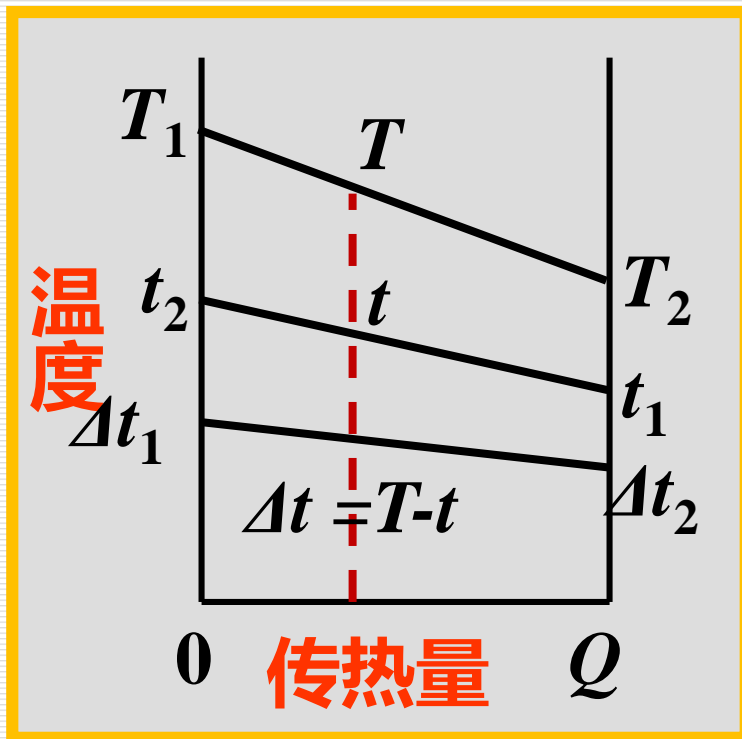
Q 与 T 和 t 是直线关系。

$$\left. \begin{array}{l} T = AQ + k \\ t = A'Q + k' \end{array} \right\} \longrightarrow \Delta t = T - t = (A - A')Q + (k - k')$$

Δt 与 Q 也是直线关系。

斜率

$$\frac{d(\Delta t)}{dQ} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q - 0} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q}$$



$$dQ = K_o (T - t) dS_o$$

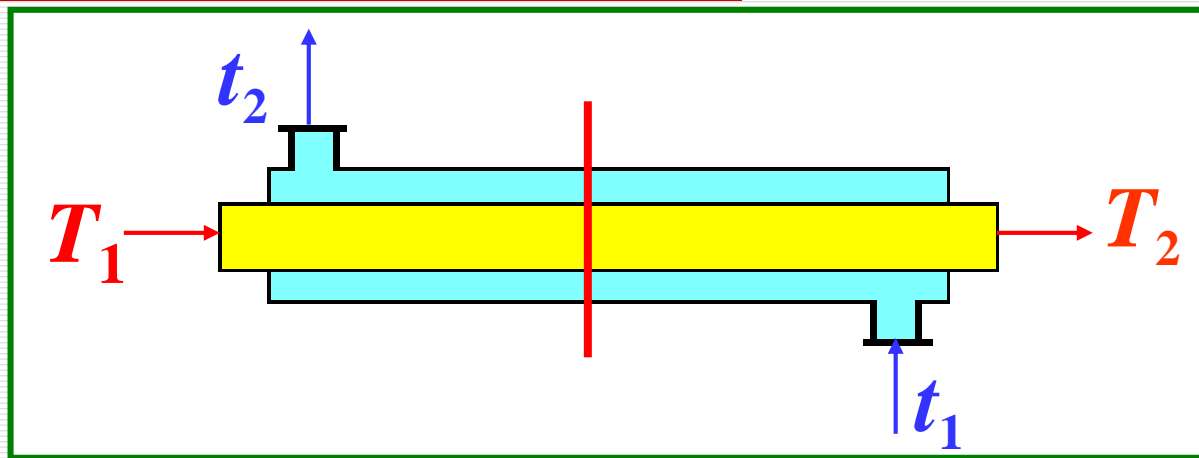
$$= K_o \Delta t dS_o$$

$$\frac{d(\Delta t)}{K_o \Delta t dS_o} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q}$$

$$\frac{1}{K_o} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q} dS_o$$

当 $S_o = 0$ 时, $\Delta t_1 = T - t = T_1 - t_2$

$S_o = S_o$ 时, $\Delta t_2 = T - t = T_2 - t_1$



$$\frac{1}{K_o} \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_2} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q} \int_0^{S_o} dS_o$$

$$\frac{1}{K_o} \ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{Q} S_o$$

$$\Delta t_m$$

$$\text{得 } Q = K_o S_o \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = K_o S_o \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\text{得 } Q = K_o S_o \Delta t_m = \frac{\Delta t_m}{\frac{1}{K_o S_o}} = \frac{\Delta t}{R}$$

称为基于管子外表面的**总传热速率方程**。

同理存在：

基于传热管内表面的总传热速率方程

$$Q = K_i S_i \Delta t_m$$

基于传热管管壁中心的总传热速率方程

$$Q = K_m S_m \Delta t_m$$

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_o} \frac{d_i}{d_o} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{d_i}{d_m} + \frac{1}{\alpha_i}$$

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{\alpha_o} \frac{d_m}{d_o} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_m}{d_i}$$

K_i 和 K_m 称为基于管子内表面和管壁中心表面的总传热系数。可作常数

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， $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

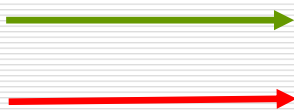
2.5.4. 传热平均温度差

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



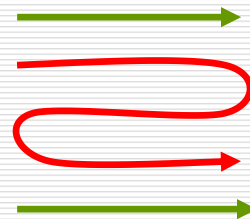
逆流



并流

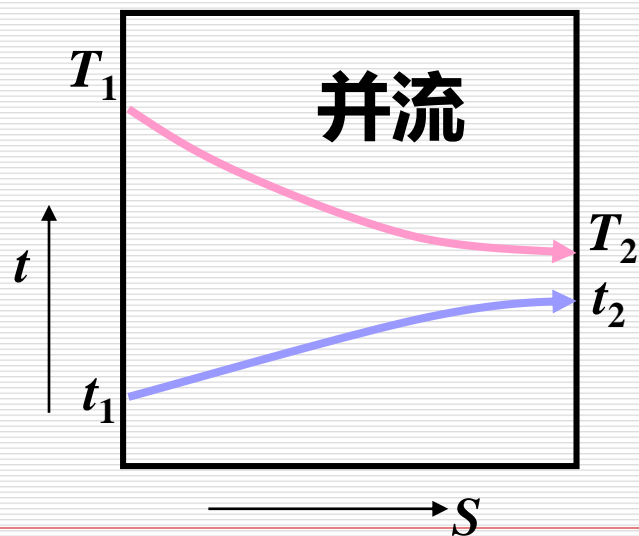
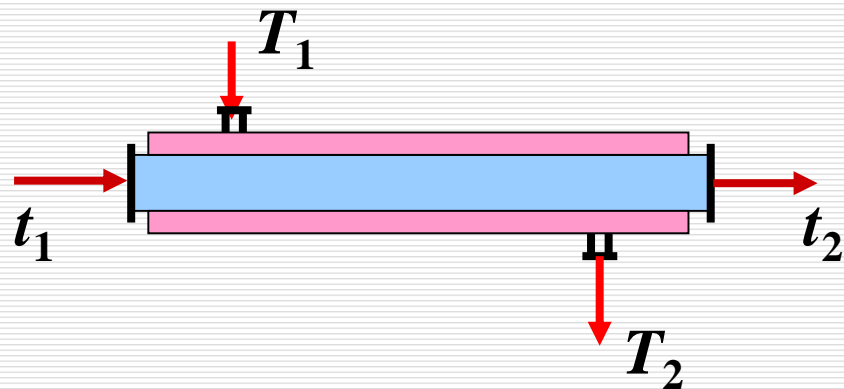
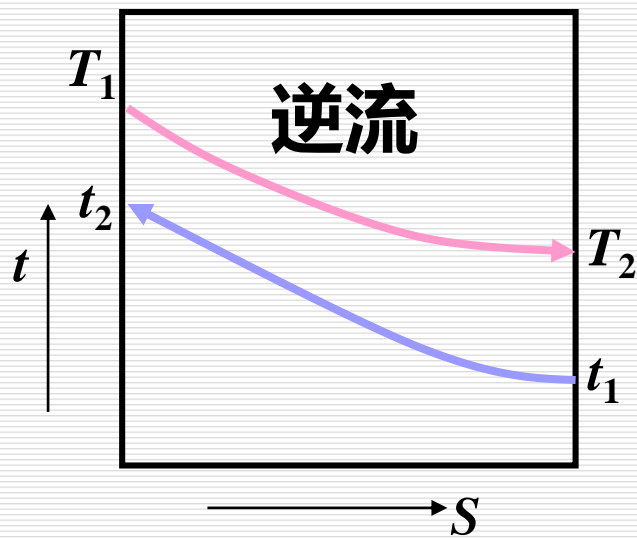
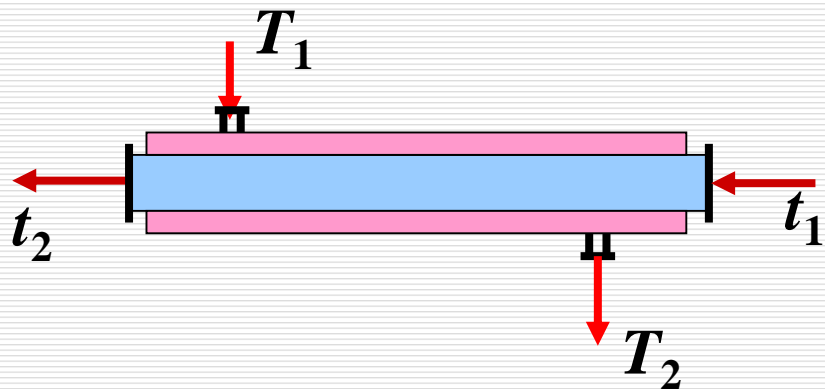


错流



折流

1、逆流和并流时的 Δt_m



以逆流为例推导

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

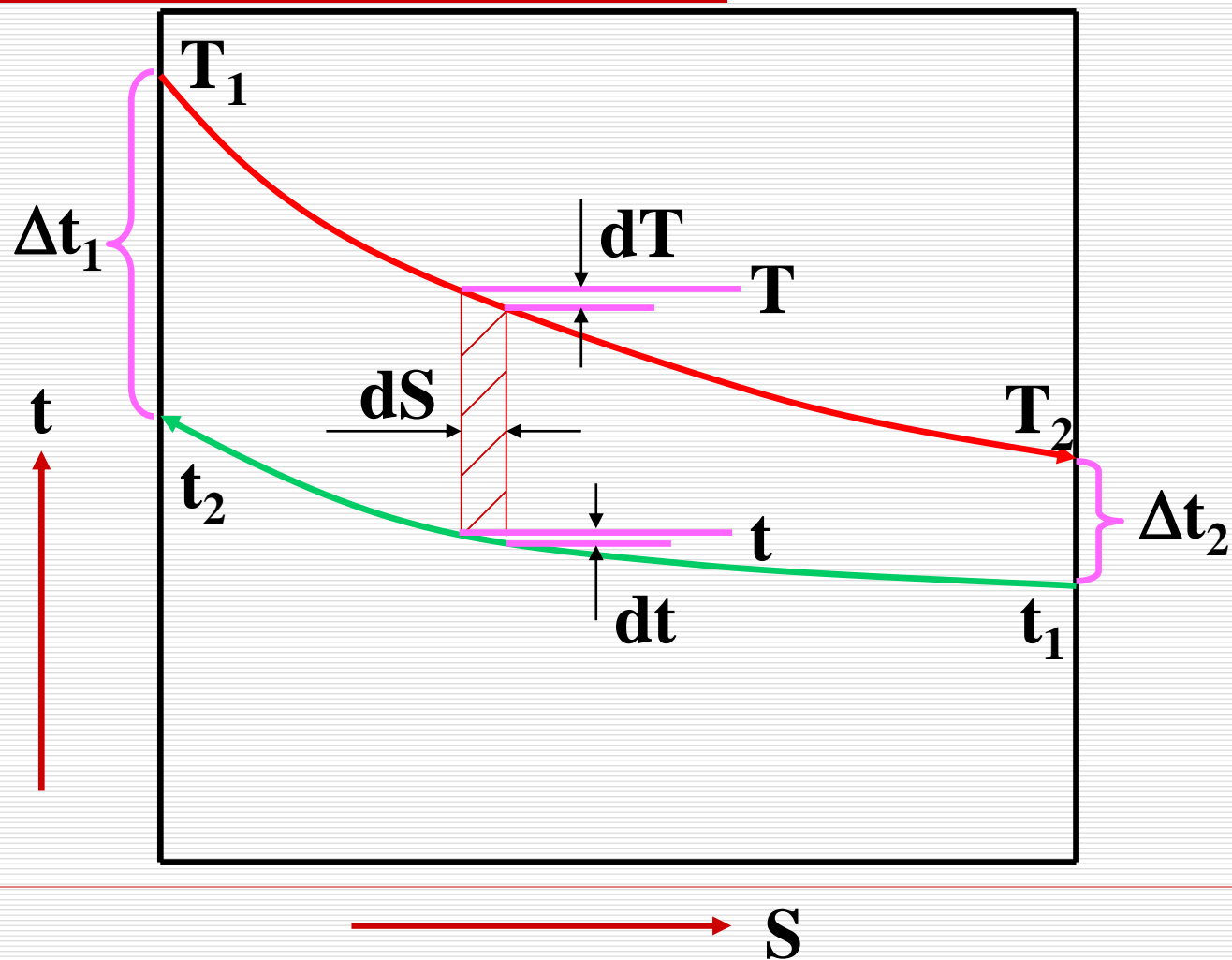
- 假设：
- 1) 定态传热、定态流动， q_1 、 q_2 一定
 - 2) c_{p1} 、 c_{p2} 为常数，为进出口平均温度下的
 - 3) K 沿管长不变化。
 - 4) 热损失忽略不计。

边界条件：

$S=0$ 时， $\Delta t_1 = T_1 - t_2$ ；

$S=S$ 时， $\Delta t_2 = T_2 - t_1$

逆流



$$\text{取 } dS, \Delta t = T-t \quad (1) \quad dQ = KdS(T-t) \quad (2)$$

$$\text{热流: } dQ = -q_h c_{p,h} dT \quad \text{变形: } dT = -dQ / (q_h c_{p,h}) \quad (3)$$

$$\text{冷流: } dQ = q_c c_{p,c} dt \quad \text{变形: } dt = dQ / (q_c c_{p,c}) \quad (4)$$

(3) - (4) 并将 (1) 代入得

$$d\Delta t = (1/(q_c c_{p,c}) - 1/(q_h c_{p,h})) dQ \quad (5)$$

$$d\Delta t = (1/(q_c c_{p,c}) - 1/(q_h c_{p,h})) KdS\Delta t$$

$$d\Delta t / \Delta t = (1/(q_c c_{p,c}) - 1/(q_h c_{p,h})) KdS \quad (6)$$

(6) 式积分: 边界条件 $S = 0, \Delta t = \Delta t_1$; $S = S, \Delta t = \Delta t_2$

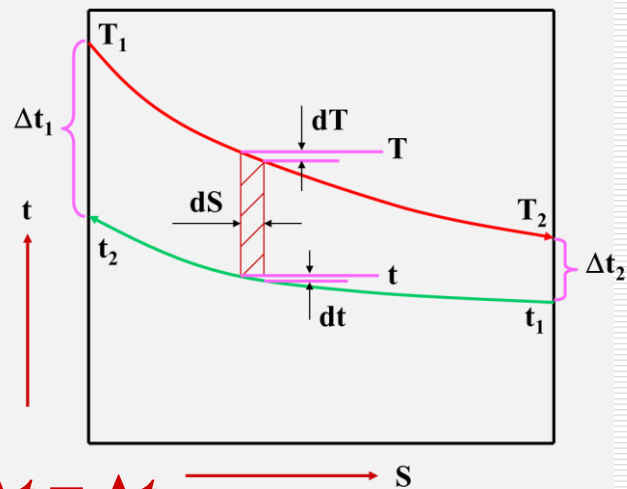
$$\ln(\Delta t_2 / \Delta t_1) = (1/(q_c c_{p,c}) - 1/(q_h c_{p,h})) KS \quad (7)$$

整理 (5) 积分得: $Q = (\Delta t_2 - \Delta t_1) / (1/(q_c c_{p,c}) - 1/(q_h c_{p,h}))$

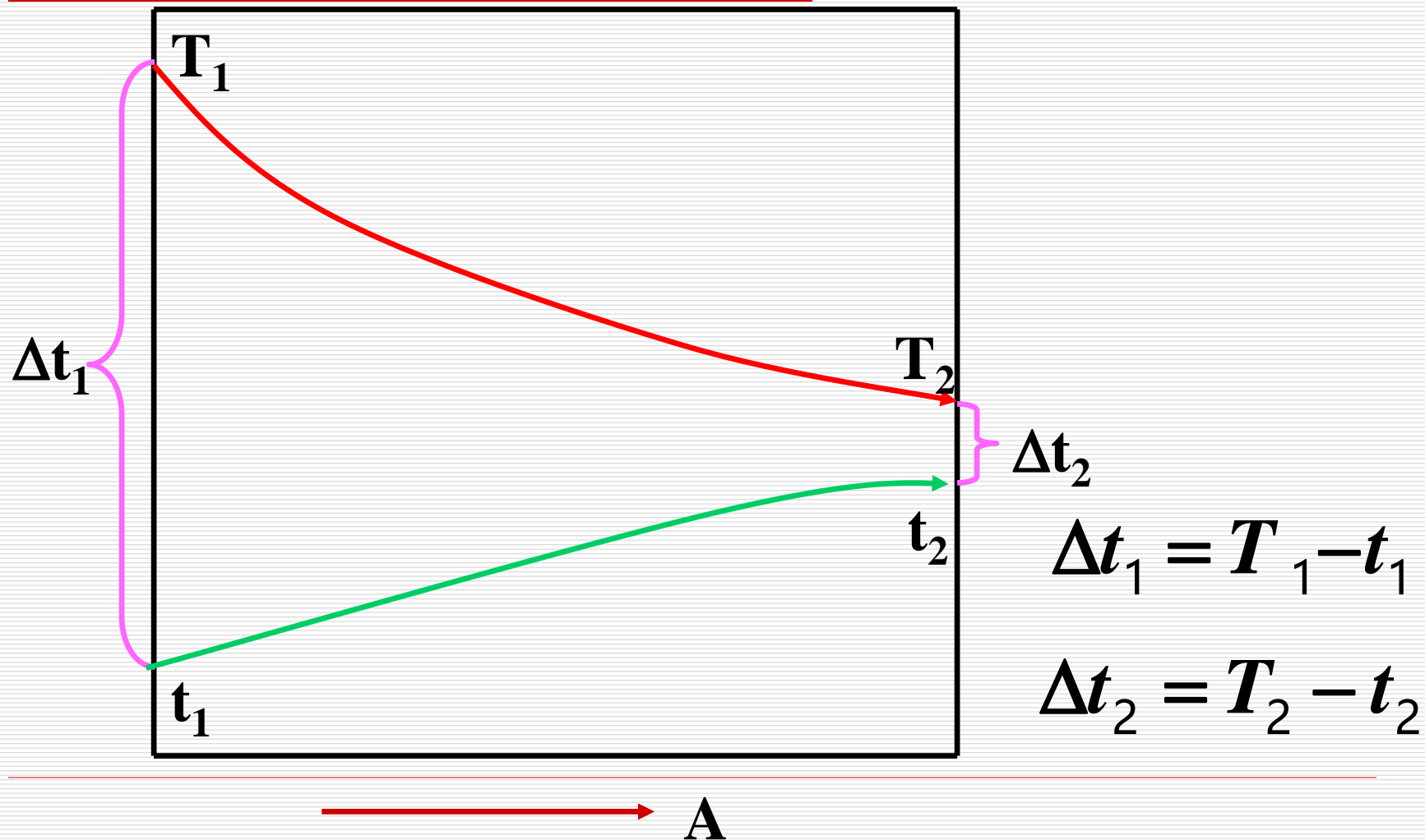
将 (7) 代入上式得:

$$Q = KS(\Delta t_2 - \Delta t_1) / \ln(\Delta t_2 / \Delta t_1) = KS\Delta t_m$$

$$\text{故 } \Delta t_m = (\Delta t_2 - \Delta t_1) / \ln(\Delta t_2 / \Delta t_1)$$



并流推导



讨论:

- 1) 也适用于并流
- 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 $\Delta t_1 = \Delta t_2$ $\Delta t_m = \Delta t_1 = \Delta t_2$

- 5) 在冷热流体的初、终温度相同的条件下,
逆流的平均温差较并流的大。
-

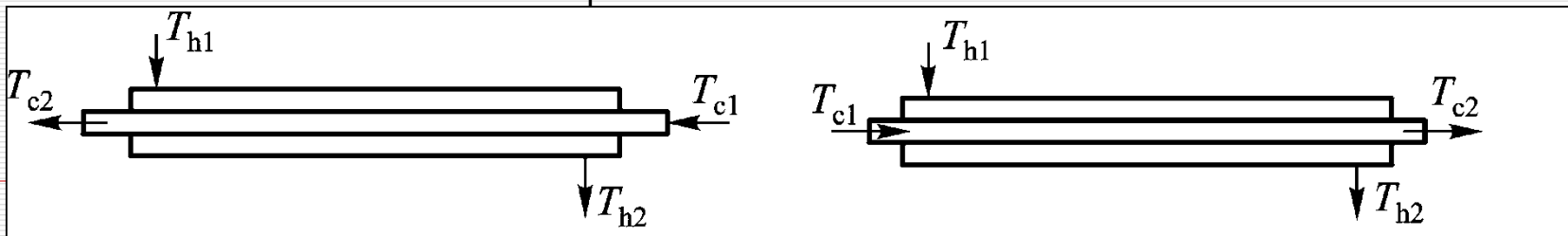
【例题】在套管换热器中用冷水将 100°C 的热水冷却到 60°C ，冷水温度从 20°C 升至 30°C 。试求在这种温度条件下，逆流和并流时的平均温差。

解：逆流时 $\Delta T_1 = 60 - 20 = 40^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_2 = 100 - 30 = 70^{\circ}\text{C}$

$$\Delta T_{m,\text{逆}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{70 - 40}{\ln \frac{70}{40}} = 53.6^{\circ}\text{C}$$

并流时 $\Delta T_1 = 60 - 30 = 30^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_2 = 100 - 20 = 80^{\circ}\text{C}$

$$\Delta T_{m,\text{并}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{80 - 30}{\ln \frac{80}{30}} = 51.0^{\circ}\text{C}$$



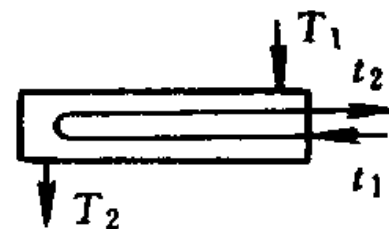
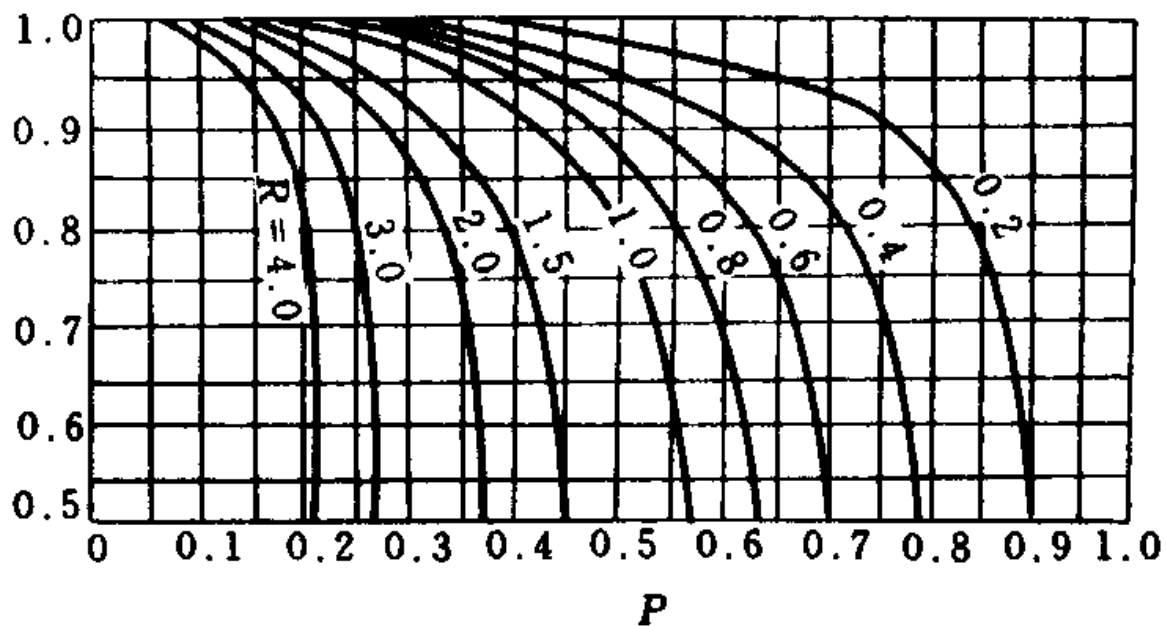
2、错流、折流时的 Δt_m

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

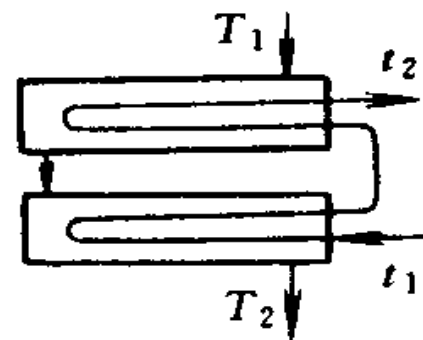
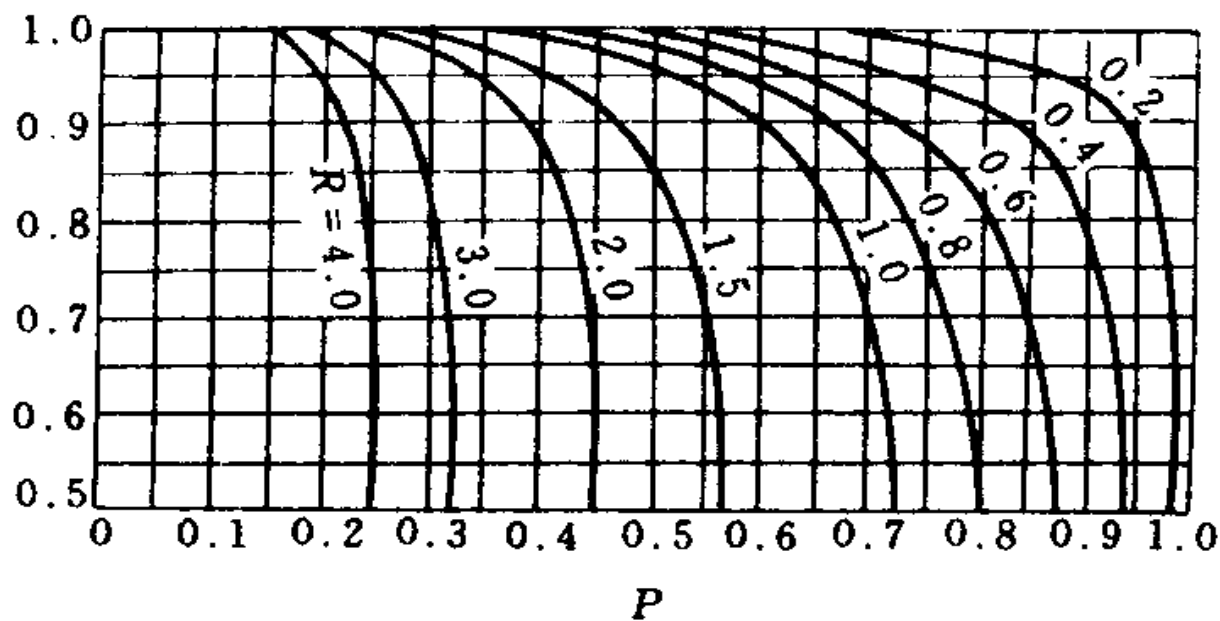
$$\varphi = f(P, R, \text{流型})$$

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

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

ϕ 

单壳程

 ϕ 

双壳程

热交换器折流的校正系数

【例题】

在一传热面为 30m^2 的列管式换热器中，用 120°C 的饱和水蒸汽将气体从 30°C 加热到 80°C ，气体走管内，流量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ (密度为 $1\text{kg}/\text{m}^3$,均按入口状态计)，质量定压热容为 $c_{p,c}=1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，估算换热器的传热系数 K 。

解： 120°C 120°C
 80°C 30°C

$$\Delta t_m = ((120 - 30) - (120 - 80))/\ln(90/40) = 61.66^\circ\text{C}$$

$$Q = q_c c_{p,c} (t_2 - t_1) = (5000/3600) \times 1000 \times (80 - 30) = 69.4 \text{ kW 或 kJ/s}$$

$$K = Q/(S \Delta t_m) = 69.4 \times 1000 / (30 \times 61.66) = 37.5 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

2.5.5 壁温的计算

稳态传热 $Q = KS \Delta t_m = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_1 S_1}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}} = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_2 S_2}}$

$$t_w = T_w - \frac{bQ}{\lambda S_m} \quad T_w = T - \frac{Q}{\alpha_1 S_1} \quad t_w = t + \frac{Q}{\alpha_2 S_2}$$

1. λ 大, 即 $b/\lambda S_m$ 小, 热阻小, $t_w = T_w$

2.5.5 壁温的计算

2. 当 $t_w = T_w$, 得
$$\frac{T - T_w}{T_w - t} = \frac{1 / \alpha_1 S_1}{1 / \alpha_2 S_2} = \frac{\alpha_2 S_2}{\alpha_1 S_1}$$

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

T_w 接近于 T , 即 T_w 接近于 α 大、热阻小侧流体的温度。

3. 两侧有污垢

$$Q = KS \Delta t_m = \frac{T - T_w}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + R_1\right) \frac{1}{S_1}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}} = \frac{t_w - t}{\left(\frac{1}{\alpha_2} + R_2\right) \frac{1}{S_2}}$$

2.5.6 换热器传热计算举例

[例1] 在内管为 $\phi 105 \times 2.5 \text{ mm}$ 的套管换热器中, 每小时 500 kg 的盐水从 293 K 被加热到 333 K, 采用常压蒸汽在管外加热, 蒸汽温度为 373 K, 内管的导热系数为 $170 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。25%盐水的给热系数为 $1500 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。管外蒸汽给热系数为 $4000 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。问加热套管的长度应为多少米? 盐水的 $C_{p,c} = 2.1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

解题思路: 要求 $L \leftarrow S_o = \pi d_o L$

$$S_o = \frac{Q}{K_o \Delta t_m} \leftarrow \begin{cases} Q = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1) \\ \frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o} \\ \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \end{cases}$$

解：

$$Q = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1) = 500 \times 2.1 \times (333 - 293)$$
$$= 42000 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\Delta t_m = \frac{(373 - 293) - (373 - 333)}{\ln \frac{373 - 293}{373 - 333}} = 57.7 \text{ K}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$
$$= \frac{0.105}{1500 \times 0.10} + \frac{0.0025}{170} \times \frac{0.105}{0.1025} + \frac{1}{4000} = 9.65 \times 10^{-4}$$

$$\therefore K_o = 1036 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\begin{aligned} S_o &= \frac{Q}{K_o \cdot \Delta t_m} \\ &= \frac{42000 \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}}{1036 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \times 57.7 \text{K}} = 0.703 \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$L = \frac{S_o}{\pi d_o} = \frac{0.703}{3.14 \times 0.105} = 2.13 \text{m}$$

[例2] 某工业酒精精馏塔顶的全凝器，塔顶为工业酒精的饱和蒸汽，温度为 78°C 。汽化潜热为 $\Delta H = 850 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，蒸汽流率为 $3340 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。全凝器用 $\phi 30 \times 2.5 \text{ mm}$ 钢管，管内通以冷却水。现测得冷却水的进出口温度分别为 20°C 和 40°C 。已知水的给热系数 $\alpha = 2500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，酒精蒸汽对管壁的冷凝给热系数 $\alpha = 2268 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，钢管的导热系数 $\lambda = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

求该换热器的传热面积及冷却水消耗量。

解题思路:

要求 S_o 和 $q_{m,c}$

$$S_o = \frac{Q}{K_o \Delta t_m}$$

$$Q = q'_{m,h} r = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1)$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + \frac{\delta}{\lambda d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

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

解：

$$Q = \frac{3340}{3600} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \times 850 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$
$$= 788.6 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} = 7.886 \times 10^5 \text{ W}$$

$$\Delta t_m = \frac{(78 - 20) - (78 - 40)}{\ln \frac{78 - 20}{78 - 40}} = \frac{20}{0.423} = 47.3 \text{ K}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$K_o = \frac{1}{\frac{1 \times 0.030}{2500 \times 0.025} + \frac{0.0025 \times 0.030}{45 \times 0.0275} + \frac{1}{2268}}$$

$$= 1020 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$S_o = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m} = \frac{788600}{1020 \times 47.3} = 16.34 \text{ m}^2$$

$$Q = q_{m,c} c_{p,c} (t_2 - t_1)$$

$$q_{m,c} = \frac{Q}{c_{p,c} (t_2 - t_1)} = \frac{788600}{4174 \times (40 - 20)} = 9.45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.6 换热器

- 2.6.1 换热器的分类
 - 2.6.2 间壁式换热器的类型
 - 2.6.3 换热器的选用
 - 2.6.4 换热器传热过程的强化
-

2.6.1 换热器的分类

•按用途分类：

加热器、冷却器、冷凝器、蒸发器和再沸器

•按冷热流体热量交换方式分类：

混合式、蓄热式和**间壁式**

间壁式

管式： 蛇管、套管、列管
板式： 夹套、螺旋板式
翅片式
热管

换热器

炯炯有神董大帅 bilibili



https://www.bilibili.com/video/BV1uF411379E?spm_id_from=333.337.search-card.all.click

东方3D仿真拆解【换热器类】（U形管式、浮头式、固定管板式、空冷器、蒸发釜式再沸器）

网络视频

https://www.bilibili.com/video/BV1KZ4y1M7yF?spm_id_from=333.337.search-card.all.click



温馨提示：此视频框在点击“上传手机课件”时会进行转换，用手机进行观看时则会变为可点击的视频。此视频框可被拖动移位和修改大小

2.6.2 间壁式换热器的类型

一、管式换热器

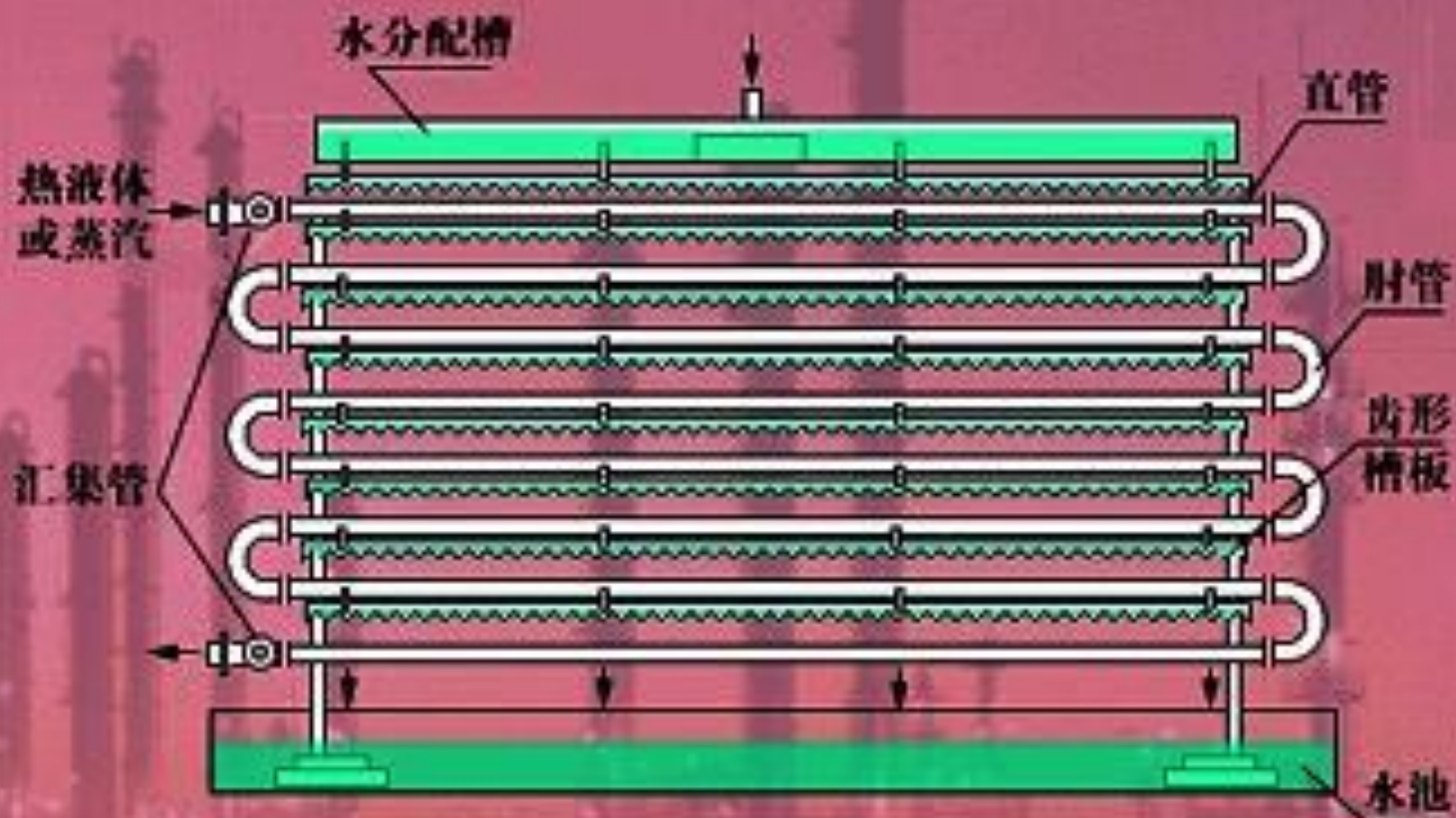
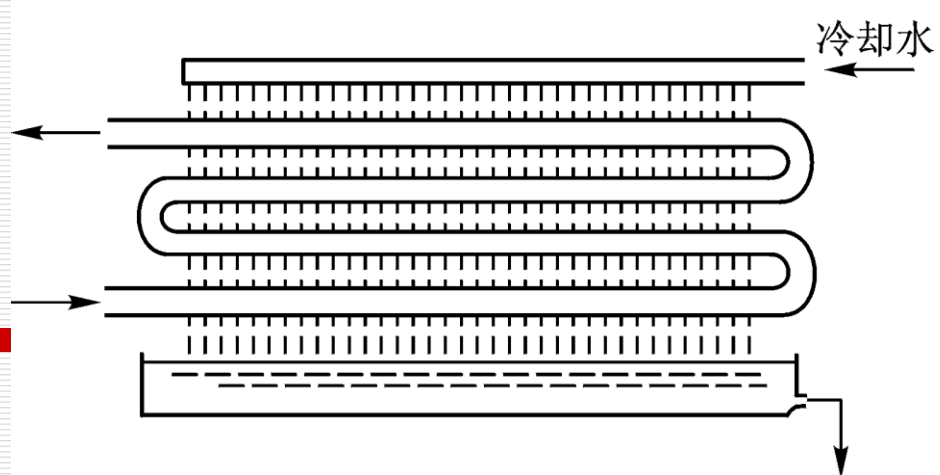
1. 蛇管式换热器

沉浸式



强化措施：可减少管外空间；容器内加搅拌器。

喷淋式

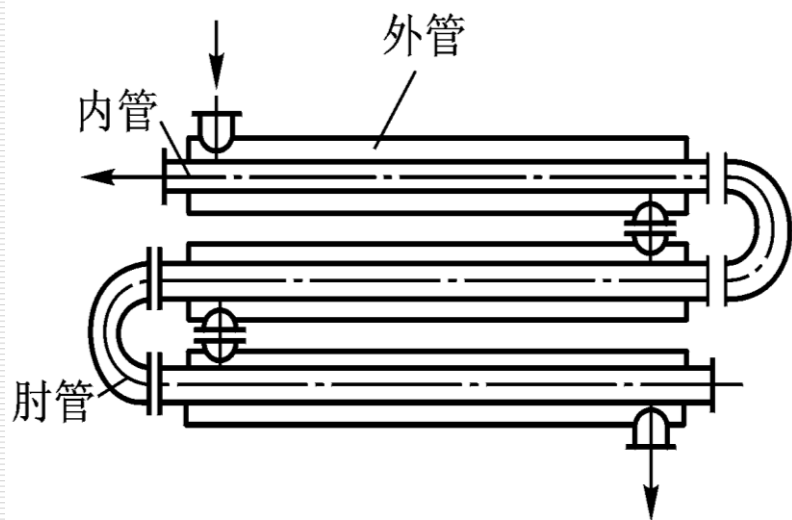


喷淋式

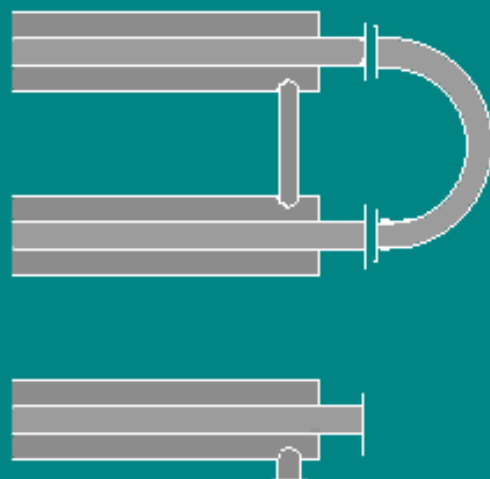
优点：结构简单；便于耐腐蚀；管内能耐高压；管外 α 比沉浸式大。

缺点：冷却水喷淋不均匀影响传热效果；只能安装在室外，占地面积大。

2、套管式换热器



套管式换热器



套管式换热器主要应用于流体的加热、冷却或两流体间的热交换。

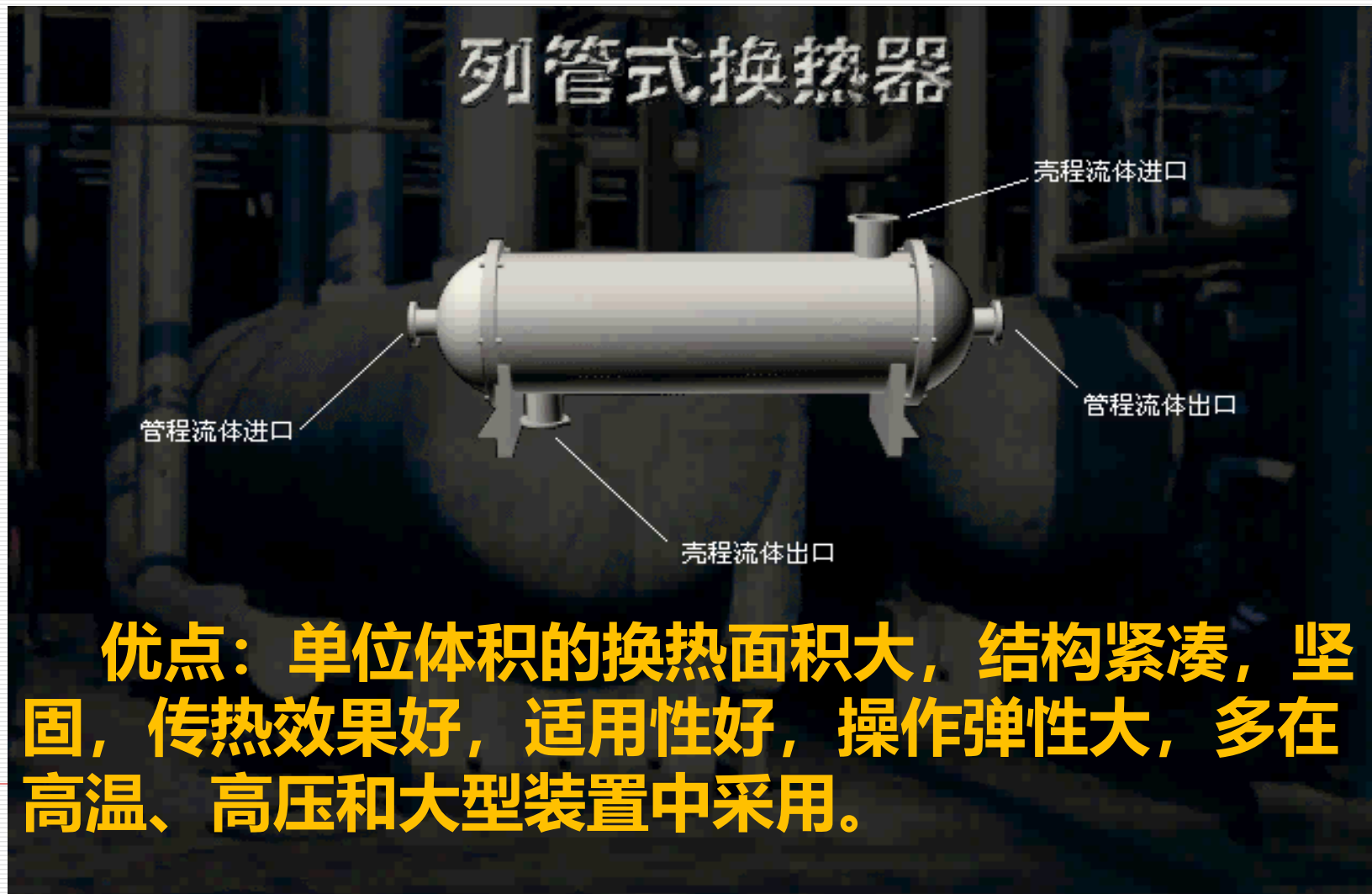
套管式

优点：结构简单；能耐高压；传热面积可根据需要通过增加段数来实现，应用方便。

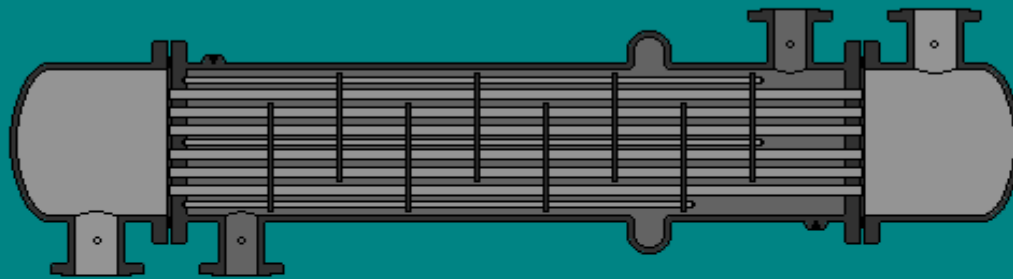
缺点：管间接头多，易泄漏；占地面积大；单位传热面积消耗的金属量大。

适用于：流量不大，所需传热面积不多，压强较高的场合。

3. 列管换热器（又称管壳式，应用广泛）



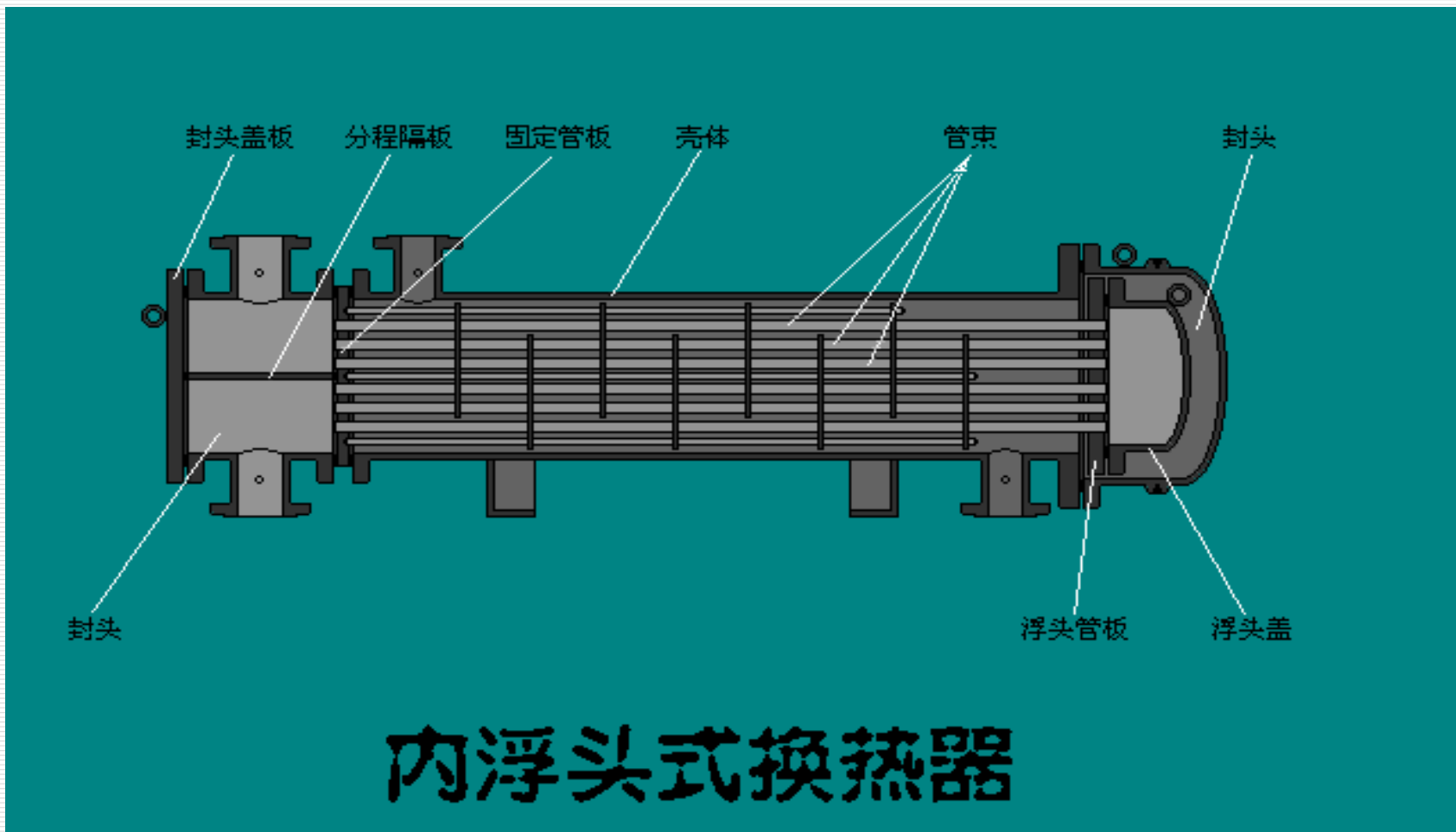
A. 固定管板式



固定管板式（有膨胀节）换热器

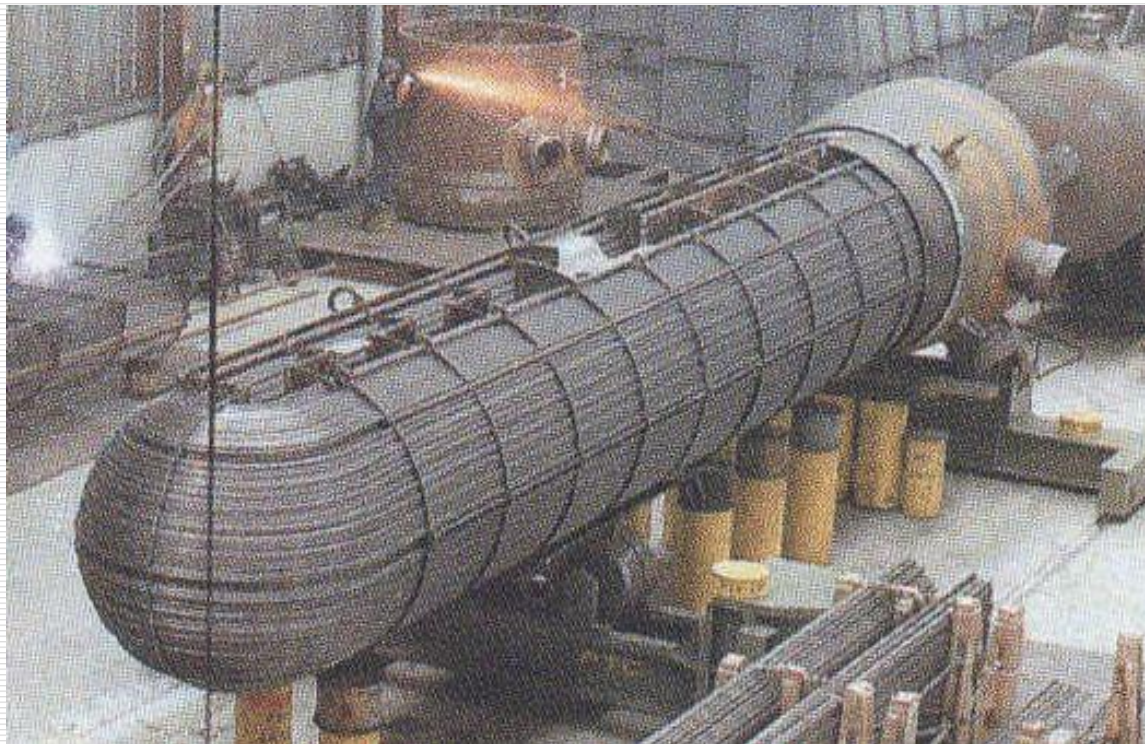
特点：结构简单；但壳程检修和清洗困难。

B. 浮头式



特点：可完全消除热应力，便于清洗和检修，结构复杂

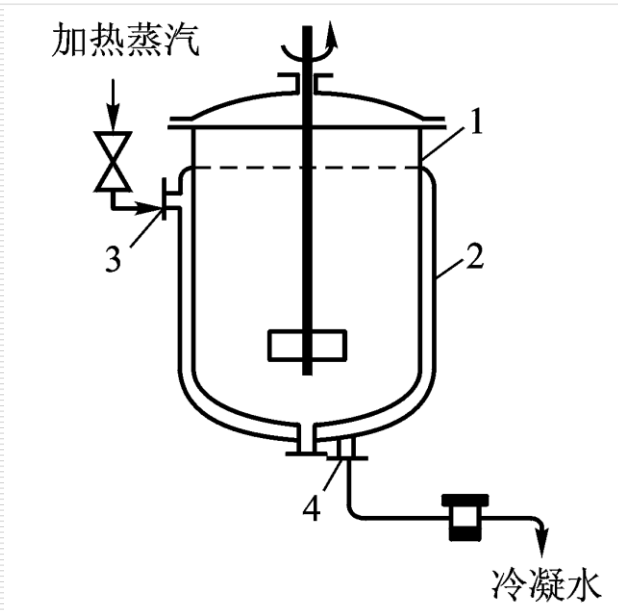
C. U型管式



特点：结构较浮头简单；但管程不易清洗。

二、板式换热器

夹套式换热器



优点：结构简单。

缺点：传热面积受容器壁限制；传热系数不高。

夹套式换热器



夹套式换热器常用于
釜式设备的加热或冷却

2.6.3 换热器的选用

1. 根据工艺任务，计算热负荷

2. 计算 Δt_m

先按单壳程多管程的计算，如果 $\phi < 0.8$ ，应增加壳程数；

3. 依据经验选取K，估算S

4. 确定冷热流体流经管程或壳程，选定u

由u和V估算单管程的管子根数，由管子根数和估算的S，估算管子长度，再由系列标准选适当型号的换热器。

2.6.3 换热器的选用

5. 核算K

分别计算管程和壳程的 α ，确定垢阻，求出K，并与估算的K进行比较。如果相差较多，应重新估算。

6. 计算S

根据计算的K和 Δt_m ，计算S，并与选定的换热器S相比，应有10%~25%的裕量。

2.6.4 换热器传热过程的强化

强化传热：对给定的热交换器，设法**提高**
其传热速率 Q ；

对给定的传热量 Q ，使其在**面积最小**的热交换器内完成。

$$Q = K S \Delta t_m$$

1.提高总传热系数 K ：

总传热系数 K 的计算

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

1. 平壁

2. 薄圆筒壁

平壁或薄圆筒壁
且忽略管壁热阻

忽略管壁热阻

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_o}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{\alpha_i + \alpha_o}{\alpha_o \alpha_i}} = \frac{\alpha_i \alpha_o}{\alpha_i + \alpha_o}$$

$$K \approx \frac{\alpha_o \alpha_i}{\alpha_o} = \alpha_i$$

$$K \approx \frac{\alpha_i \alpha_o}{\alpha_i} = \alpha_o$$

提高 α_i \longrightarrow 提高 K

提高 α_o \longrightarrow 提高 K

提高较小的给热系数提高 K

扩展的总传热系数 K

$$\frac{1}{KS_o} = \frac{1}{\alpha_i S_i} + \frac{\delta_{si}}{\lambda_{si} S_i} + \frac{b}{\lambda S_m} + \frac{\delta_{so}}{\lambda_{so} S_o} + \frac{1}{\alpha_o S_o}$$
$$\frac{1}{K} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + R_{si} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b d_o}{\lambda d_m} + R_{so} + \frac{1}{\alpha_o}$$

污垢的导热系数很小，使 K 值大大降低。

清理污垢 → 提高 K

提高 K 的措施:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

- ✓ 尽可能利用有相变的热载体 (α 大)
- ✓ 用 λ 大的热载体, 如液体金属Na等
- ✓ 减小金属壁、污垢及两侧流体热阻中较大者的热阻

提高 α 的方法(无相变):

- ✓ 增大流速、外加脉动或超声波、
- ✓ 加入固体颗粒
- ✓ 管内加扰流元件
- ✓ 改变传热面形状和增加粗糙度

(2) 增加传热面积 S :

虽设备费提高, 但换热器内部结构的改革, 如采用翅片管, 螺纹管, 亦是强化传热的途径。

(3) 增大传热温差 Δt_m :

- a. 采用合理的流体流向, 以逆流时最大
 - b. 选择合理的加热剂或冷却剂
-