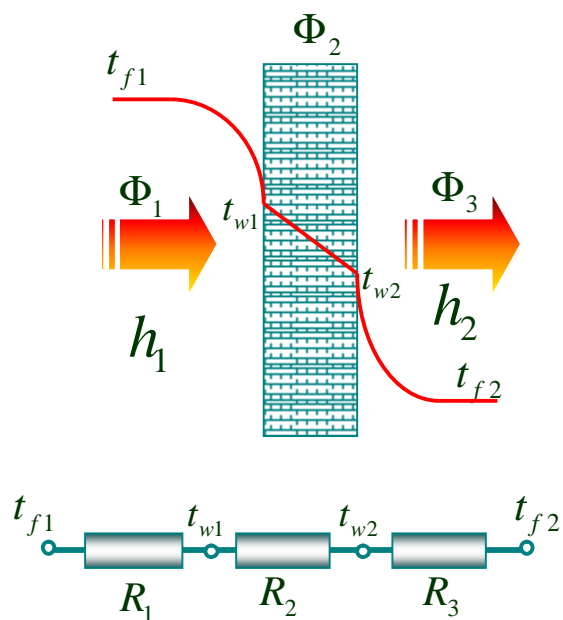


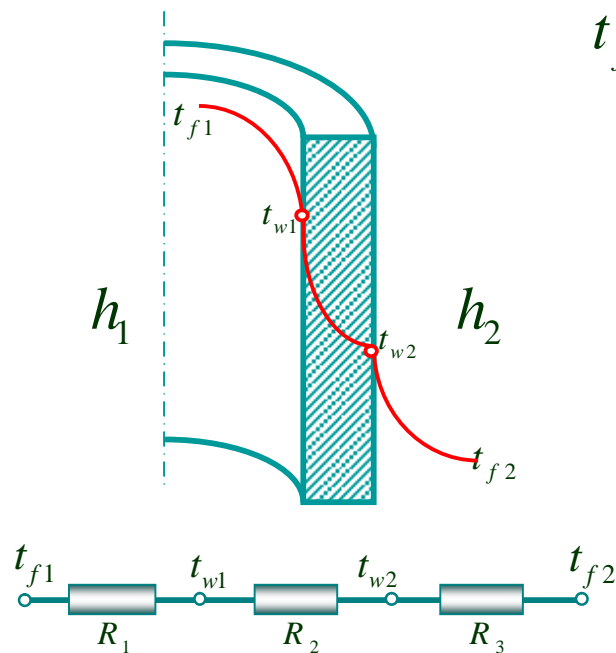
第九章 传热过程和换热器

——传热学理论的典型应用

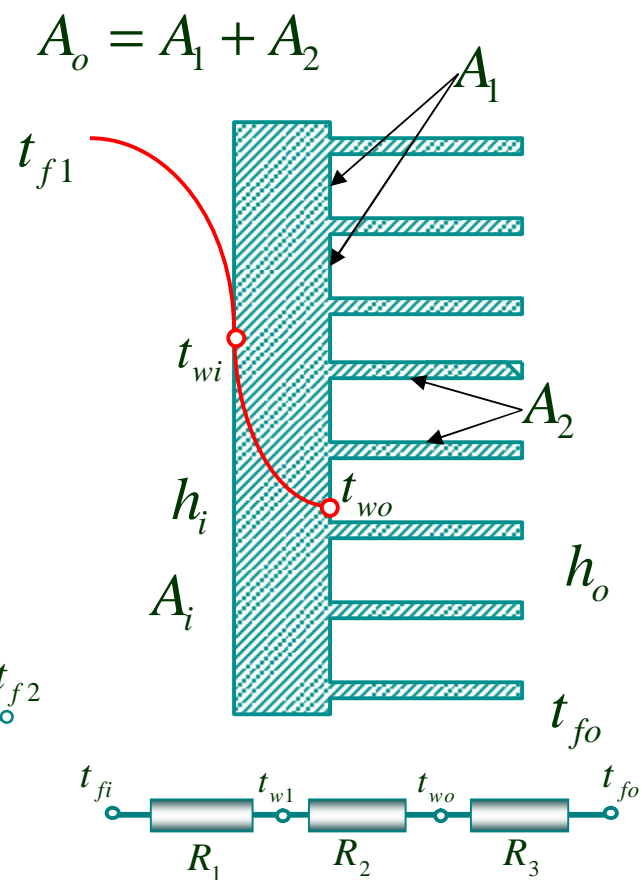
9.1 传热过程的分析与计算



平壁



圆筒壁



肋壁

通过平壁的传热过程



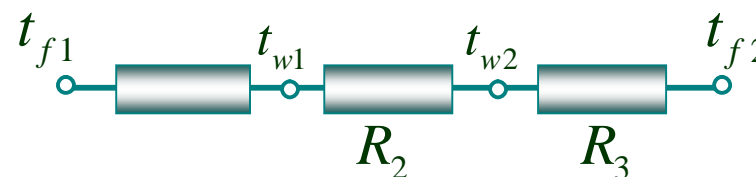
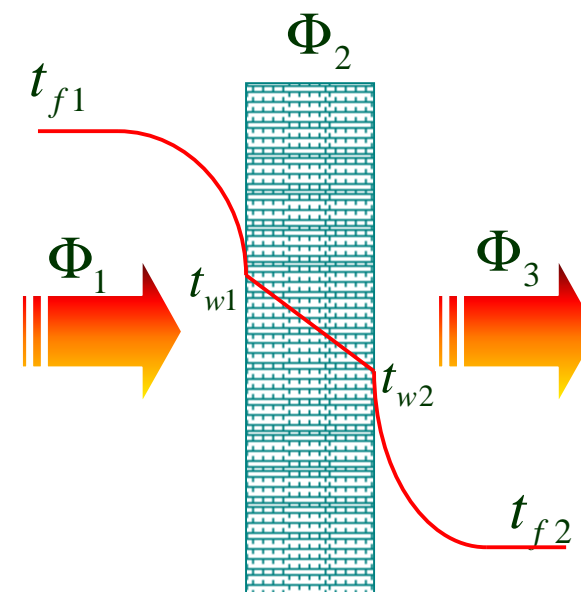
热 流 量

$$\Phi_1 = h_1 A (t_{f1} - t_{w1})$$

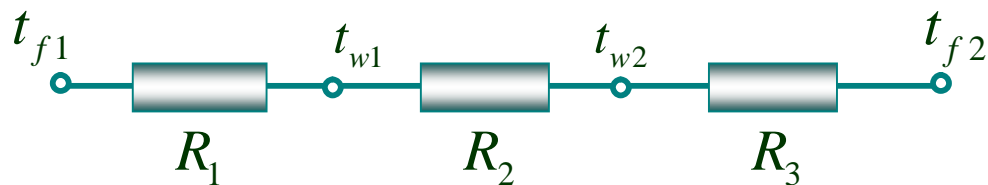
$$\Phi_2 = \frac{l A}{d} (t_{w1} - t_{w2})$$

$$\Phi_3 = h_2 A (t_{w2} - t_{f2})$$

稳态传热时 $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$



通过平壁的传热过程



热流量

温差

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{w1}}{1/h_1 A} = \frac{t_{f1} - t_{w1}}{R_1} \rightarrow \rightarrow$$

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{\Phi}{h_1 A}$$

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{d/l A} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_2} \rightarrow \rightarrow$$

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{d\Phi}{l A}$$

$$\Phi_3 = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{1/h_2 A} = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{R_3} \rightarrow \rightarrow$$

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{\Phi}{h_2 A}$$

上式中消去两个未知的壁面温度，可以得到热流量为

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{d}{l A} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_t} = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{h_2}}$$

通过平壁的传热过程

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{d}{l A} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{h_2}}$$

或写成 $\Phi = KA(t_{f1} - t_{f2}) = KA\Delta t$

平壁传热的传热系数 $K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{AR_t}$

多层平壁的传热系数 $K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{l_i} + \frac{1}{h_2}}$

通过圆筒壁的传热过程

单层圆筒壁传热过程的总热阻

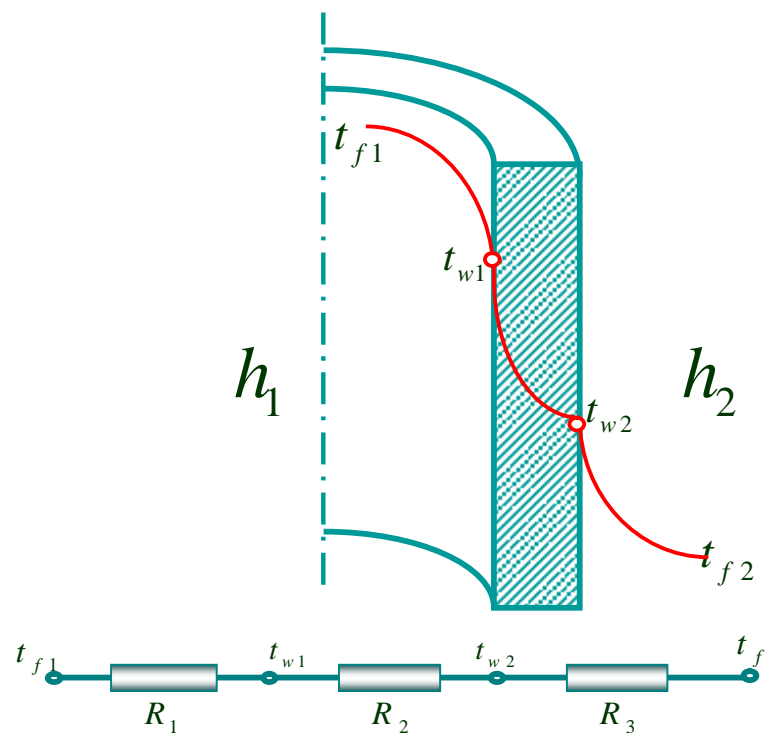
$$R_t = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{A_o h_o}$$

单层圆筒壁的传热量

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{A_o h_o}}$$

内、外表面 A_i 、 A_o 均可作为传热面积

$$\Phi = K_o A_o \Delta t = K_i A_i \Delta t = \frac{\Delta t}{R_t}$$



通过圆筒壁的传热过程

$$\Phi = K_o A_o \Delta t = K_i A_i \Delta t = \frac{\Delta t}{R_t}$$

以外表面面积为基准的传热系数为

$$K_o = \frac{1}{A_o R_t} = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o}{2\pi l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{A_o}{A_o h_o}} = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o}{2l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}}$$

以内表面面积为基准的传热系数为

$$K_{oi} = \frac{1}{A_i R_t} = \frac{1}{\frac{A_i}{A_i h_i} + \frac{A_i}{2\pi l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{A_i}{A_o h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_i}{2l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_i}{d_o h_o}}$$

例题 一内外直径分别为 180mm、220mm 的蒸汽管道，管外包裹一层120mm的保温层。蒸汽管的热导率 $40\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 保温层的热导率 $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；管道内蒸汽温度 $t_{f1} = 300^\circ\text{C}$ ，周围空气的温度 $t_{f2} = 25^\circ\text{C}$ ，两侧的传热系数 $h_1 = 100\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ， $h_2 = 8.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

试求单位管长的传热量和保温层外表面温度。

解 先确定单位管长的传热系数

总热阻
$$R_t = \frac{1}{h_1 p d_1} + \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{h_2 p d_3}$$

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$

传热过程的分析 and 计算

内部传热热阻 $R_1 = \frac{1}{h_1 p d_1} = \frac{1}{100 \times 3.14 \times 0.18} = 0.01768 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$

管道导热热阻 $R_2 = \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{\ln \frac{0.22}{0.18}}{2 \times 3.14 \times 40} = 0.0008 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$

保温层导热热阻 $R_3 = \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.1} \ln \frac{0.46}{0.22} = 1.174 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$

外部传热热阻 $R_4 = \frac{1}{h_2 p d_3} = \frac{1}{8.5 \times 3.14 \times 0.46} = 0.08141 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$

总传热热阻 $R_t = 0.01768 + 0.0008 + 1.174 + 0.08141$
 $= 1.274 (\text{m} \cdot \text{K}) / \text{W}$

所以单位管长的传热系数为

$$k_l = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1.274} = 0.7850 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

单位管长的传热量为

$$q_l = k_l(t_{f1} - t_{f2}) = 0.7850 \times (300 - 25) = 215.9 \text{ W/m}$$

保温层外表面的温度为℃

$$t_{w2} = t_{f1} + \frac{q}{a_2 p d_3} = 25 + \frac{215.9}{8.5 \times 3.14 \times 0.46} = 42.58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

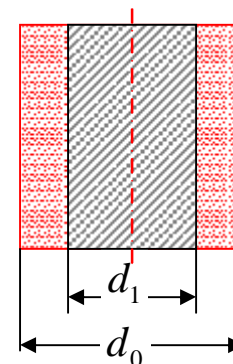
各热阻占总热阻的份额

分热阻 (m.K)/W	内部传热热阻 $R_1=0.01768$	金属管道导热热阻 $R_2=0.0008$	保温材料导热热阻 $R_3=1.174$	外部传热热阻 $R_4=0.08141$
$R_i / R_t \%$	1.39	0.063	92.15	6.34

例一 铝电线的外径 $d_1 = 5.1\text{mm}$ ，外包热导率 $\lambda = 0.15\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的聚氯乙烯作为绝缘层。环境温度为 40°C ，铝线表面温度限制在 70°C 以下，绝缘层表面与环境间的表面传热系数为 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。求绝缘层厚度不同时每米电线的散热量。

解 每米电线的散热量可按式

$$\frac{\Phi}{l} = \frac{t_{w1} - t_f}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{1}{h\pi d_0}} = \frac{(t_{w1} - t_f)p}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{1}{hd_0}}$$



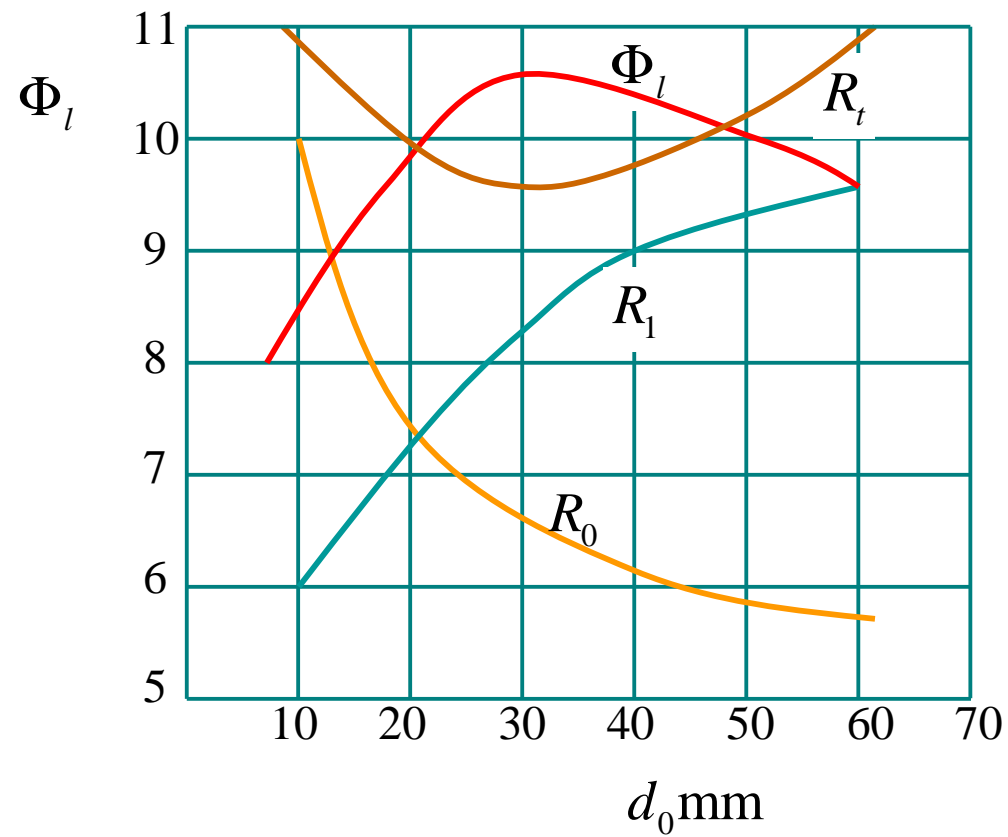
此题中 $t_{w1} = 70^\circ\text{C}$ ， $t_f = 40^\circ\text{C}$ ， $d_1 = 0.0051\text{m}$ ， $\lambda = 0.15\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$$h = 10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), \quad d_0 = d_1 + 2d = 0.0051 + 2d \quad \text{m}$$

$$\frac{\Phi}{l} = \frac{(70 - 40)p}{\frac{1}{2 \times 0.15} \ln \frac{d_0}{0.0051} + \frac{1}{10 \times d_0}}$$

传热过程的分析和计算

$$\frac{\Phi}{l} = \Phi_l = \frac{30p}{\frac{1}{0.30} \ln \frac{d_0}{0.0051} + \frac{1}{10d_0}} = \frac{30p}{R_1 + R_0} = \frac{30p}{R_t}$$



传热过程的分析 and 计算

$$\Phi_l = \frac{t_{w1} - t_f}{\frac{1}{2pl} \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{1}{hp d_0}}$$

令 $\frac{d\Phi_l}{dd_0} = 0$

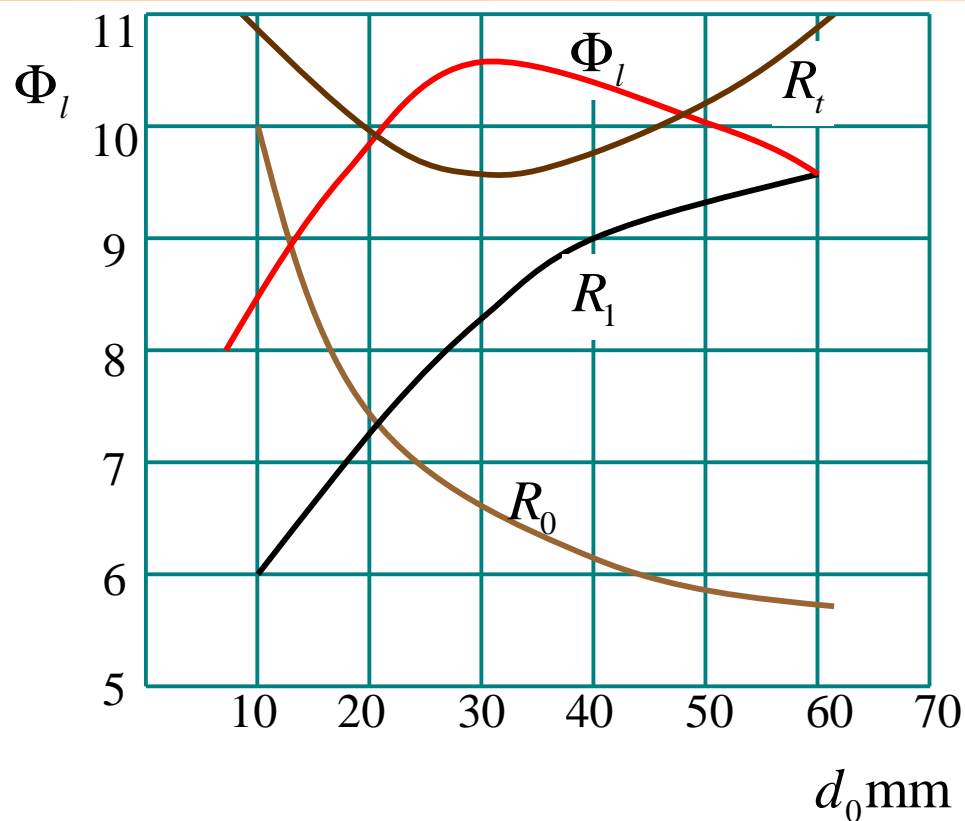
得临界热绝缘直径

$$d_{cr} = d_0 = \frac{2l}{h} \text{ m}$$

表明当 $d_0 = \frac{2l}{h}$ 时总热阻最小单位长度的传热量最大。

从曲线可以看出，若管道外径等于20mm，包5mm的保温层如何？
最少包多厚才能起到保温的作用？

若管道外径大于或等于30mm，包5mm的保温层如何？



$$d_{cr} = d_0 = \frac{2l}{h} \text{ m}$$

对于一般的工程管道，是否要考虑临界热绝缘直径问题？

取有代表性的数值分析：

$$l = 0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), \quad h = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$d_{cr} = \frac{2l}{h} = \frac{2 \times 0.12}{9} = 0.026 \text{ m} = 26 \text{ mm}$$

工程管道直径远大于此，故不必考虑临界热绝缘直径问题。

两侧为不同流体时的传热系数

传热情况	传热系数k W/(m ² . K)
从水到压缩空气	55—170
从水到汽油	340—510
从水到水	850—1560
从水到冷凝酒精	255—680
从水蒸气到空气	28—285
从蒸汽到水	2270—3400
从水蒸气到轻柴油	170—340
从水蒸气到重柴油	55—170
从水蒸气到汽油	285—1140

通过肋壁的传热过程

热流量

$$\Phi = h_1 A_1 (t_{f1} - t_{w1})$$

$$\Phi = \frac{l A_i}{d} (t_{wi} - t_{wo})$$

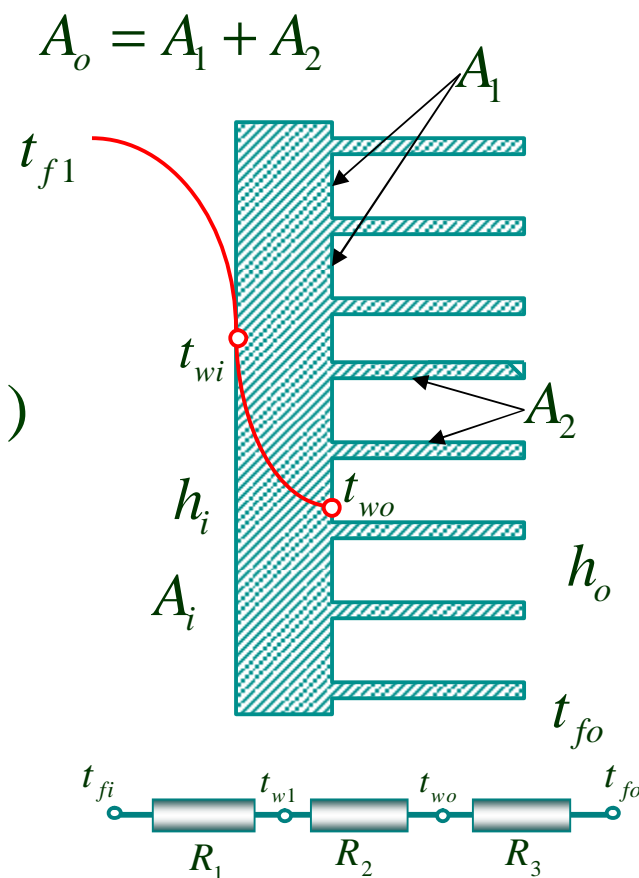
$$\Phi = h_o A_1 (t_{wo} - t_{fo}) + h_o A_2 h_f (t_{wo} - t_{fo})$$

$$= h_o (A_1 + A_2 h_f) (t_{wo} - t_{fo})$$

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

h_f —肋效率; h_o -肋壁效率.

$$h_o = \frac{A_1 + A_2 h_f}{A_1 + A_2} = \frac{A_1 + A_2 h_f}{A_o}$$



肋壁

通过肋壁的传热过程

$$\Phi = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{d}{l A_i} + \frac{1}{h_o h_o A_o}}$$

按照传热系数的定义

$$\Phi = K_o A_o (t_{fi} - t_{fo}) = K_i A_i (t_{fi} - t_{fo})$$

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} b + \frac{d}{l} b + \frac{1}{h_o h_o}}, \quad b = \frac{A_o}{A_i}$$

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{l} + \frac{1}{h_o b h_o}}$$

肋片的作用???

污垢热阻

污垢系数（热阻） $r_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_0}$

K_0 — 传热面干净无垢时的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

K_f — 传热面结垢后流体流速不变时的传热系数,
 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

传热量的计算	{	传热温差不变	{	无垢时	$\Phi_0 = AK_0\Delta t$
				结垢后	$\Phi_f = AK_f\Delta t$
	{	传热量不变	{	无垢时	$\Phi = AK_0\Delta t$
					结垢后

9.2 换热器的分类

换热器是实现温度不同的流体进行热交换的设备。

一、换热器的分类

1. 按工作原理分

间壁式换热器、混合式换热器、回热式换热器

2. 按结构分

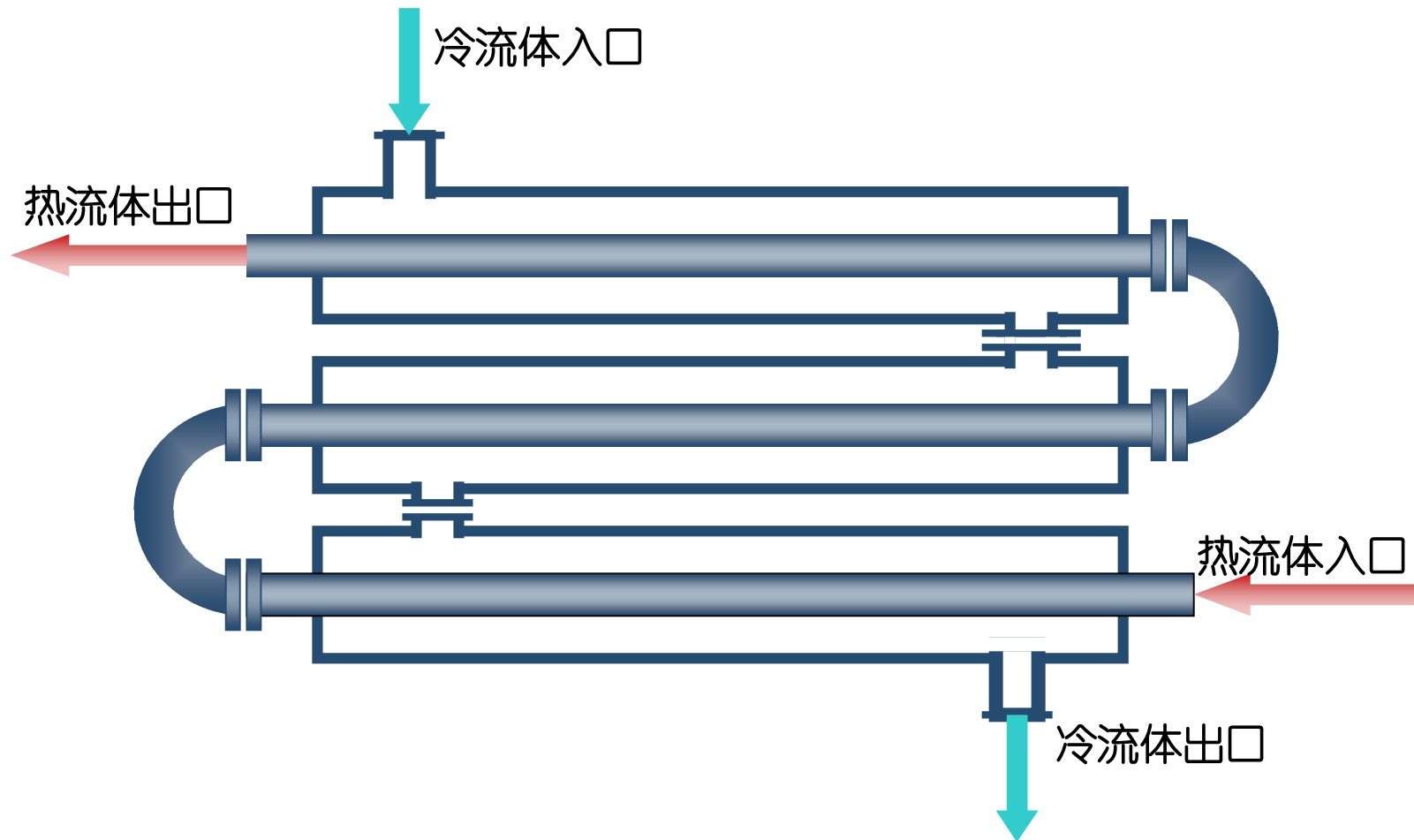
壳管式换热器、套管式换热器、肋管式换热器、
板式换热器。

3. 按流动形式分

顺流式换热器、逆流式换热器、复杂流换热器。

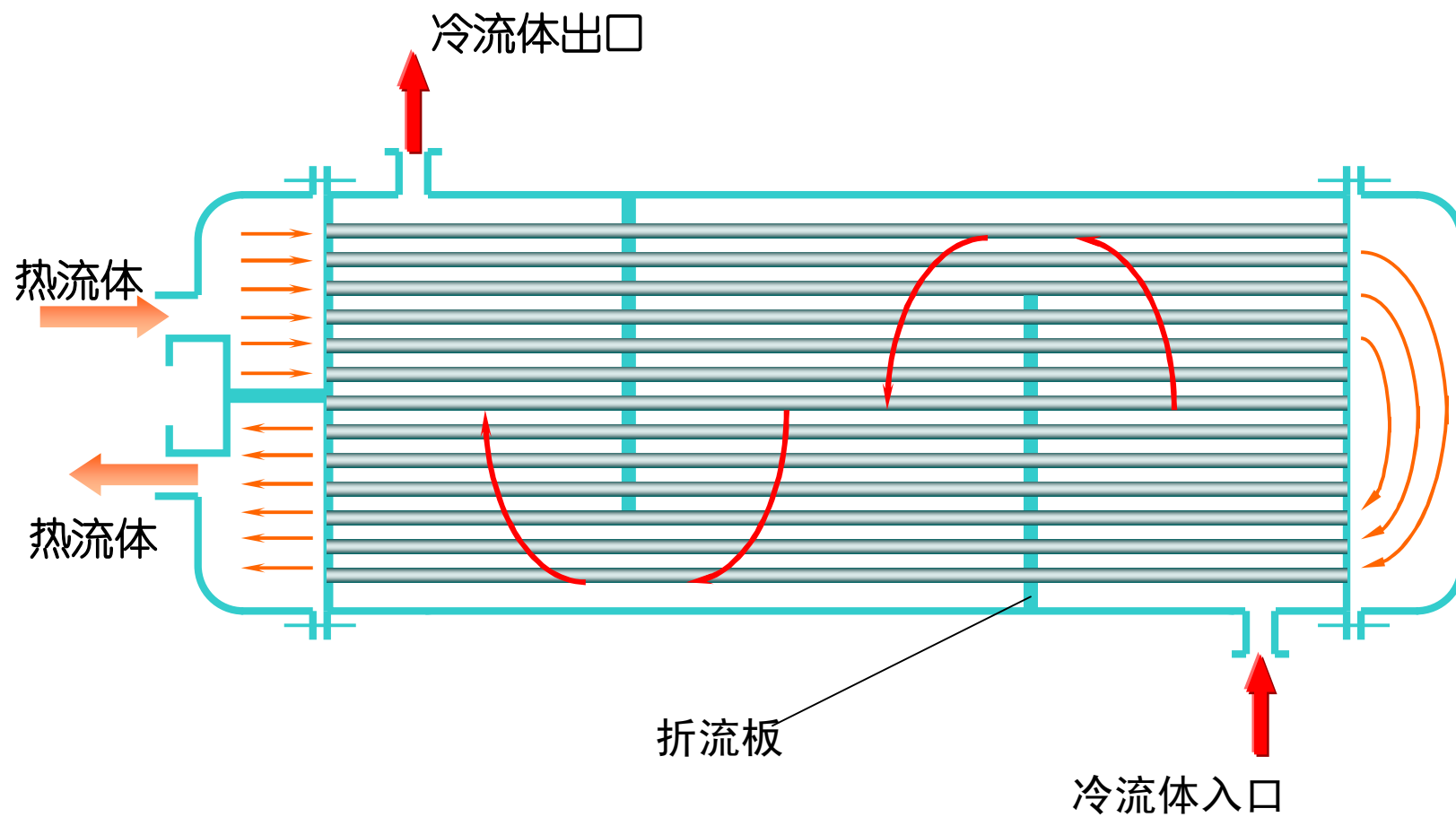
9.2 换热器的分类

套管式（逆流式）换热器示意图



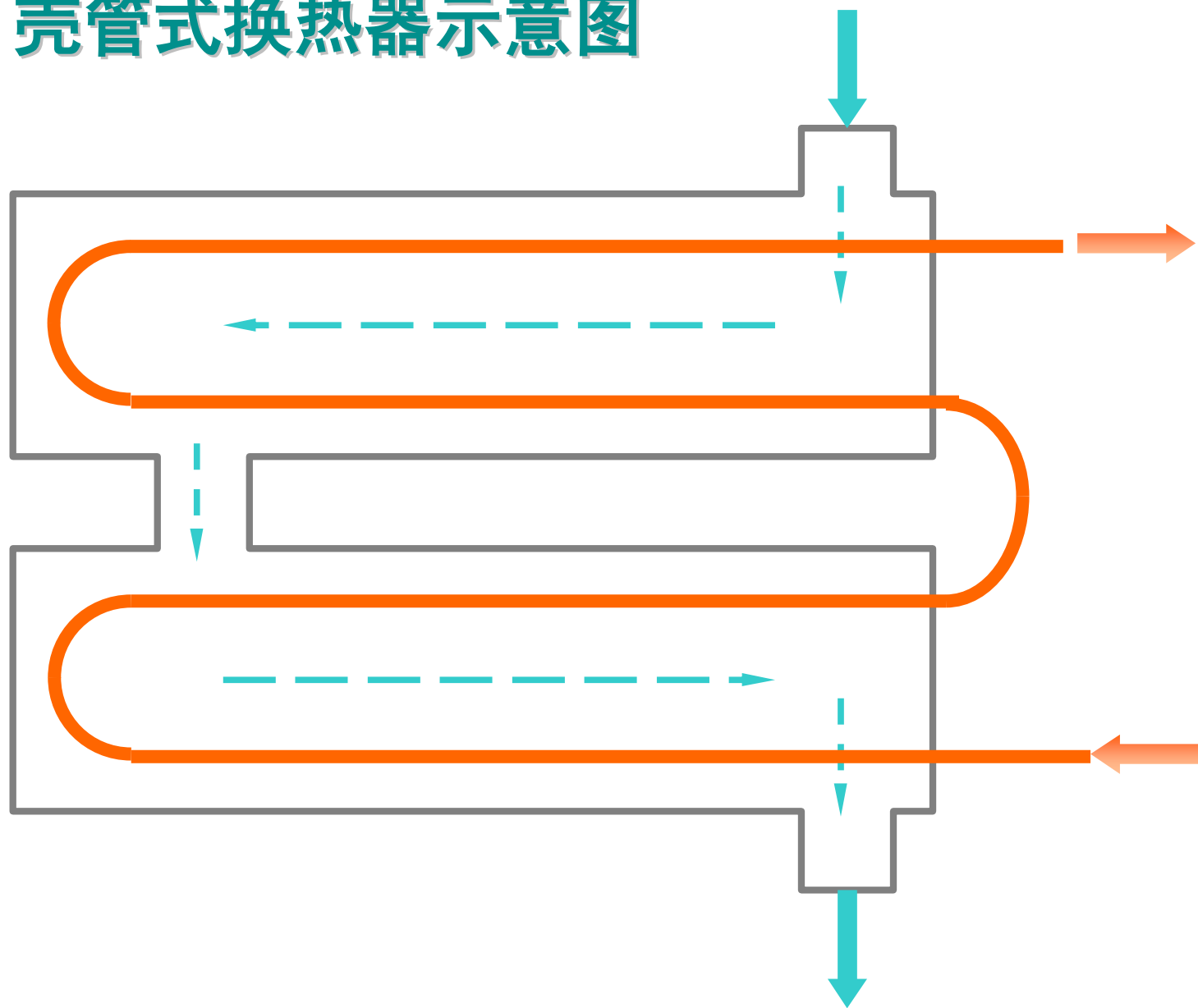
9.2 换热器的分类

壳管式换热器示意图



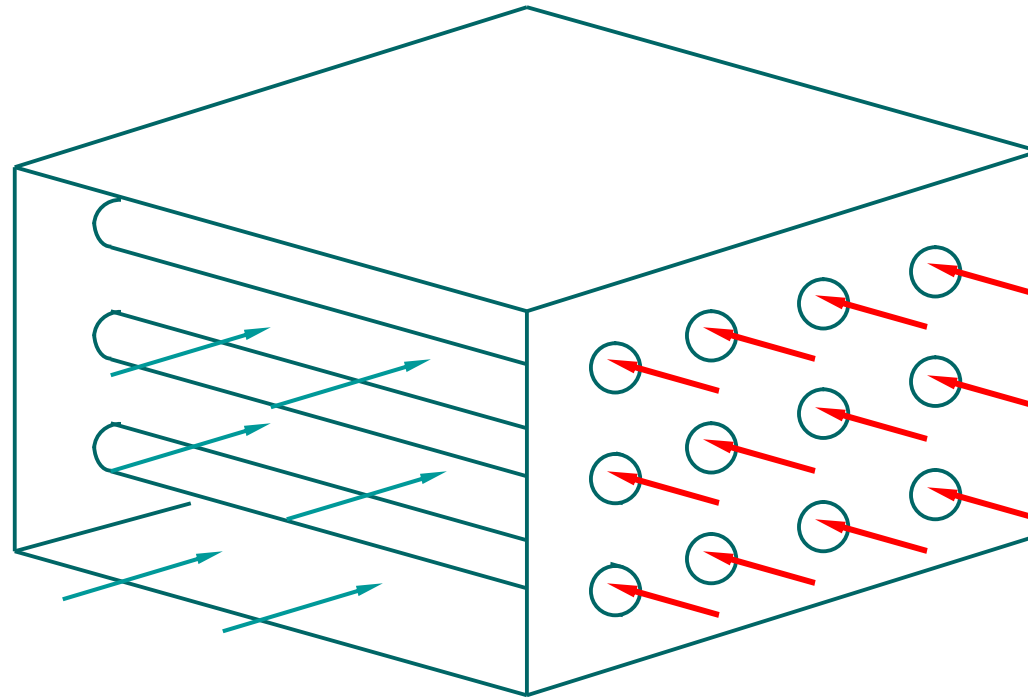
9.2 换热器的分类

壳管式换热器示意图



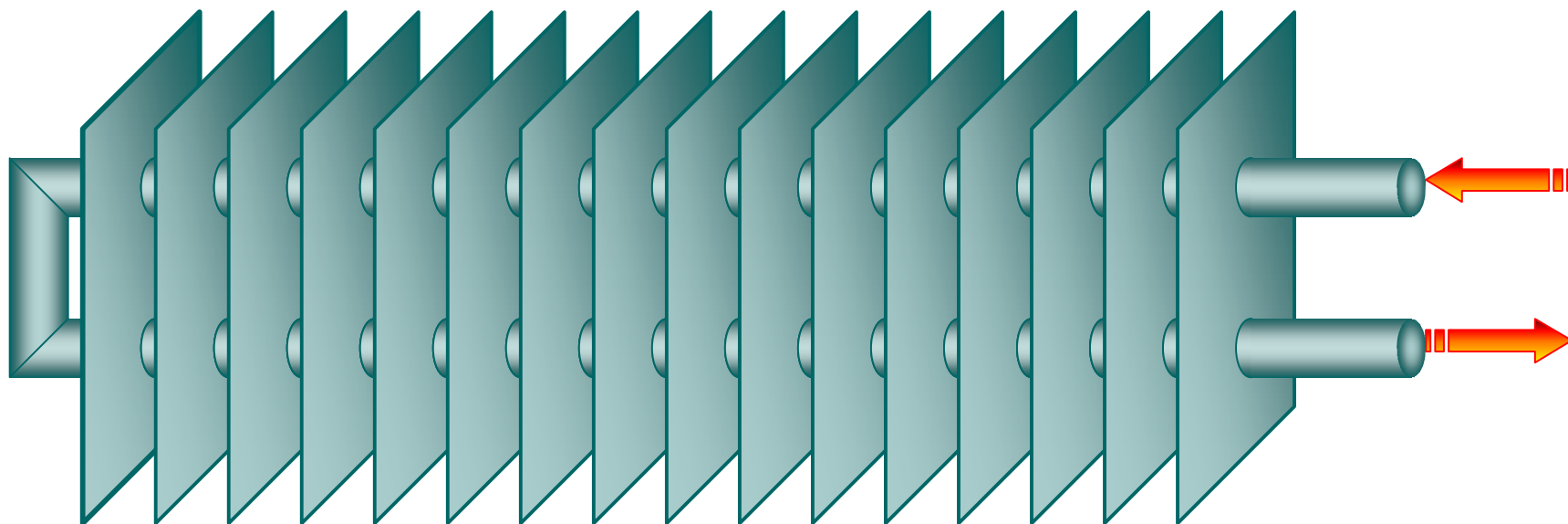
9.2 换热器的分类

管束式（间壁式、壳管式）交叉流换热器



9.2 换热器的分类

肋管式换热器



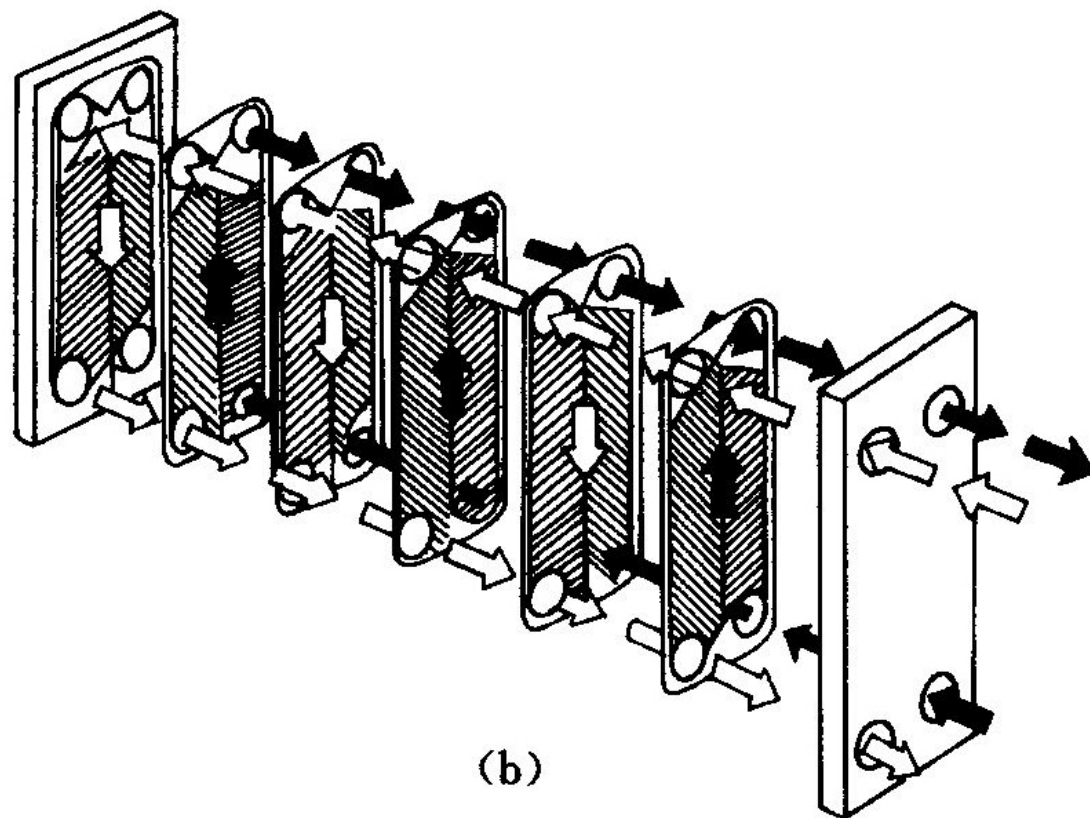
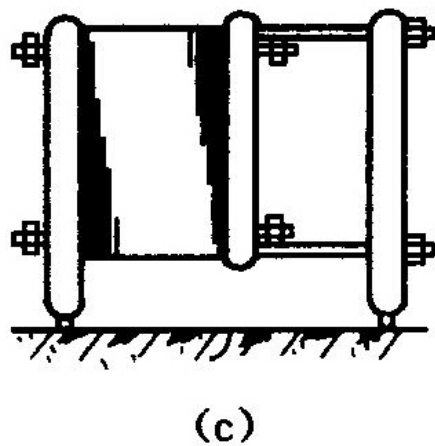
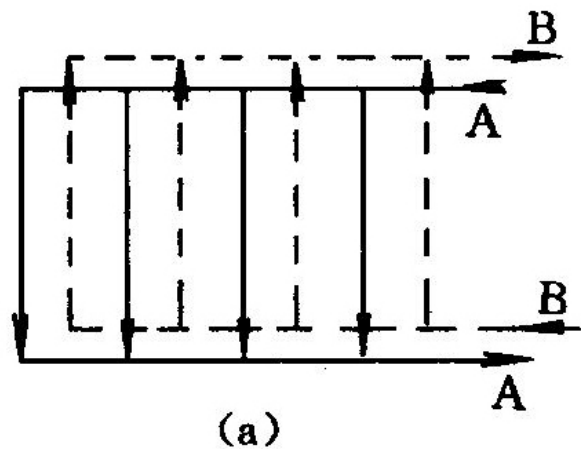
9.2 换热器的分类

板式换热器



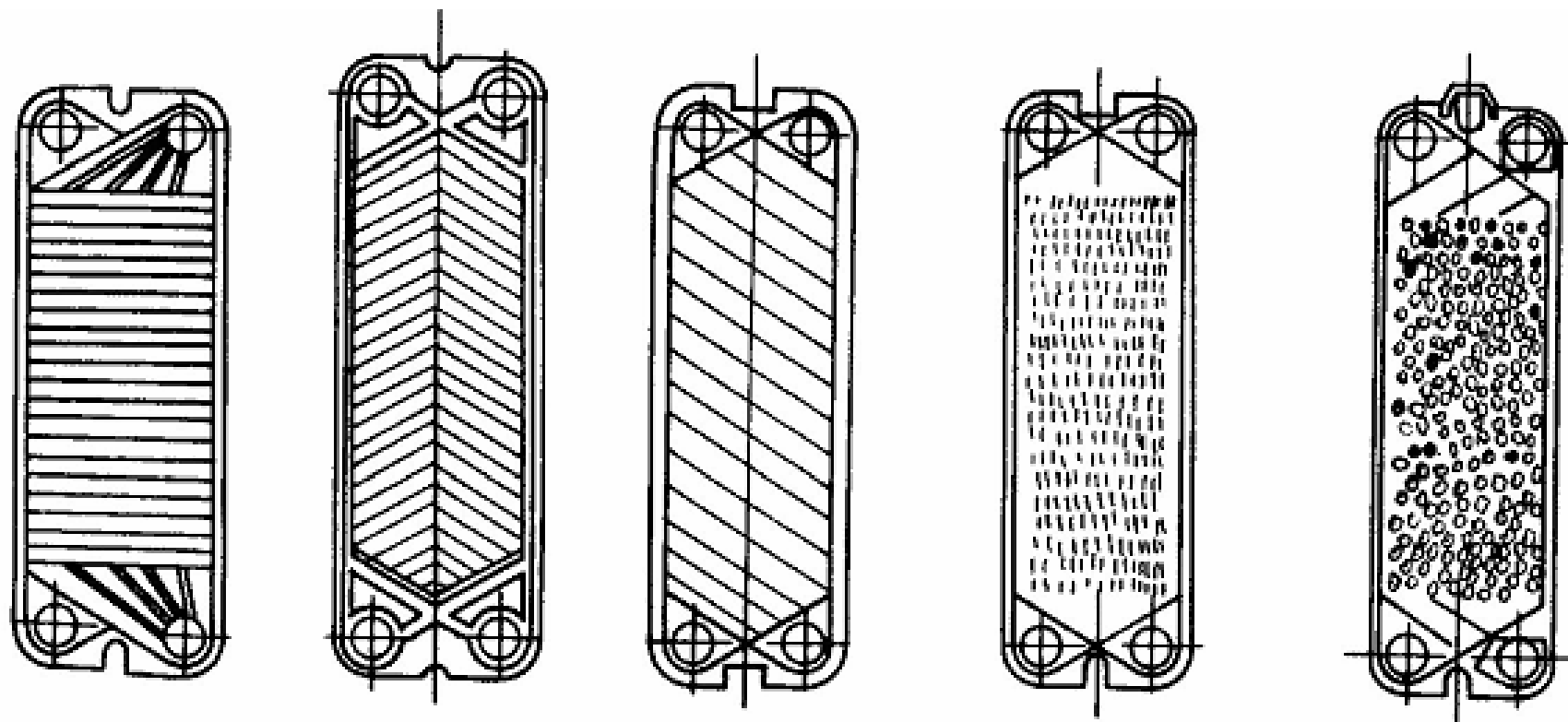
9.2 换热器的分类

板式换热器的工作原理



9.2 换热器的分类

板式换热器的板片



(a) 水平平直波纹板 (b) 人字形波纹板 (c) 倾斜波纹板 (d) 锯齿形波纹板 (e) 瘤形凹凸板

图 9-9 几种典型的传热板片

9.2 换热器的分类



螺旋板换热器

9.2 换热器的分类

螺旋板式换热器的工作原理

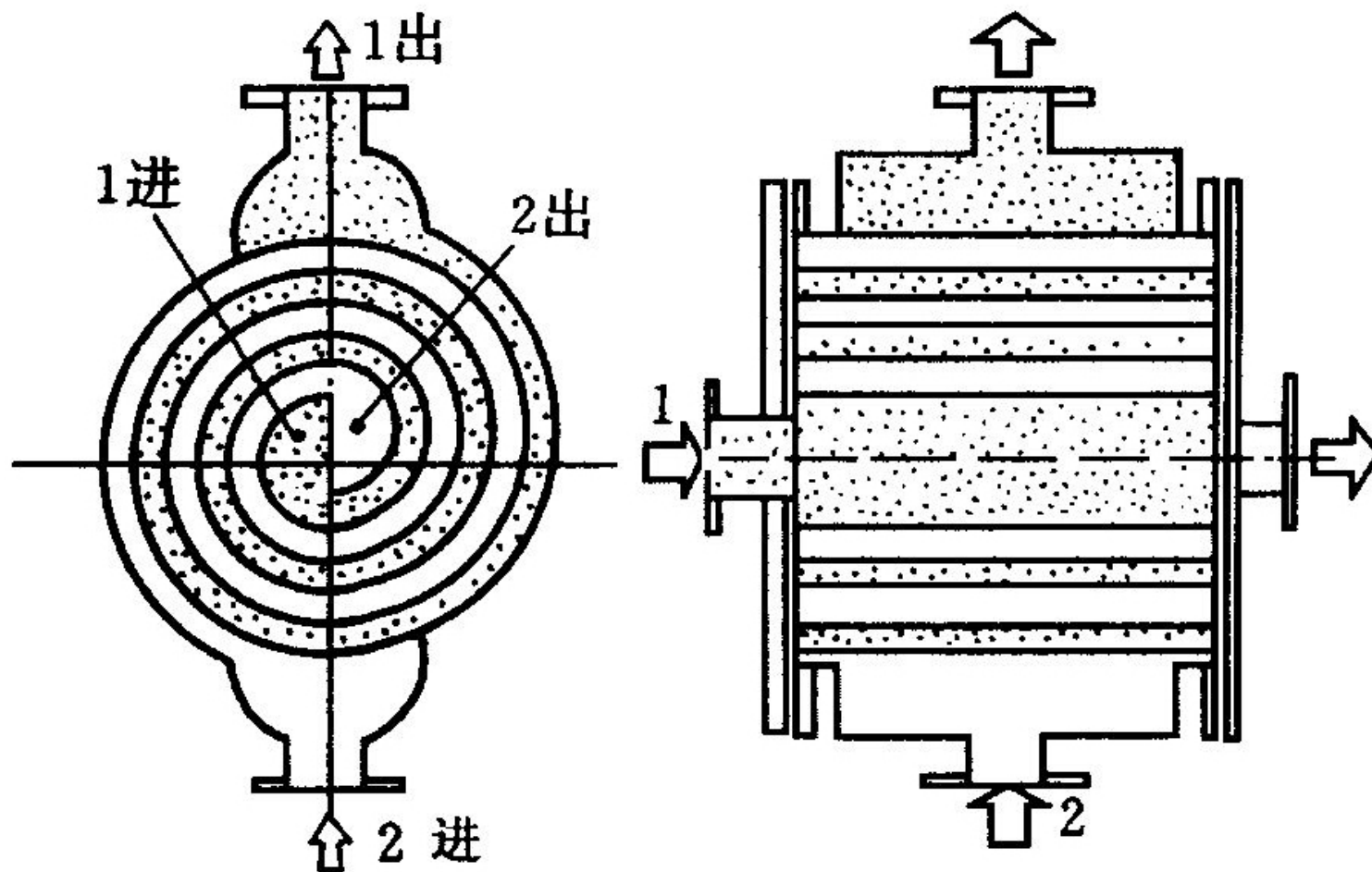


图 9-11 螺旋板式换热器

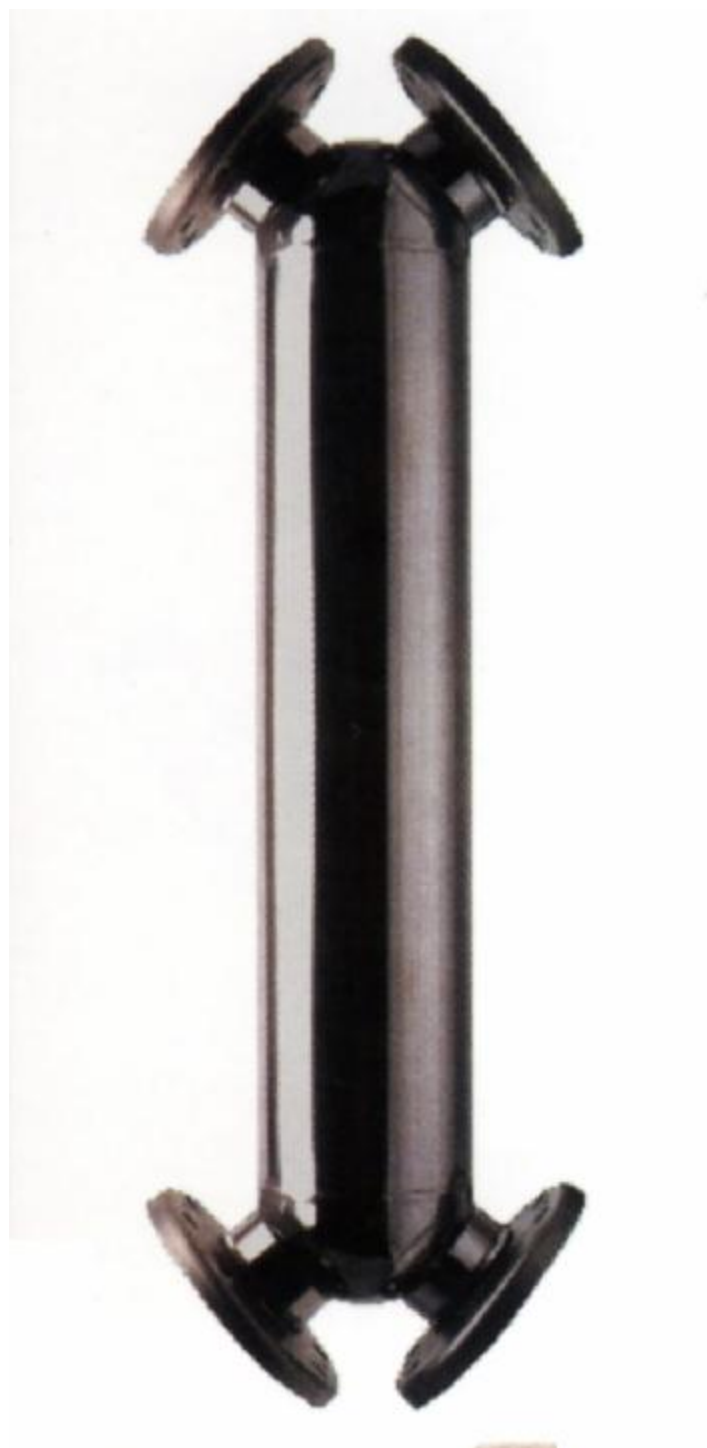
9.2 换热器的分类



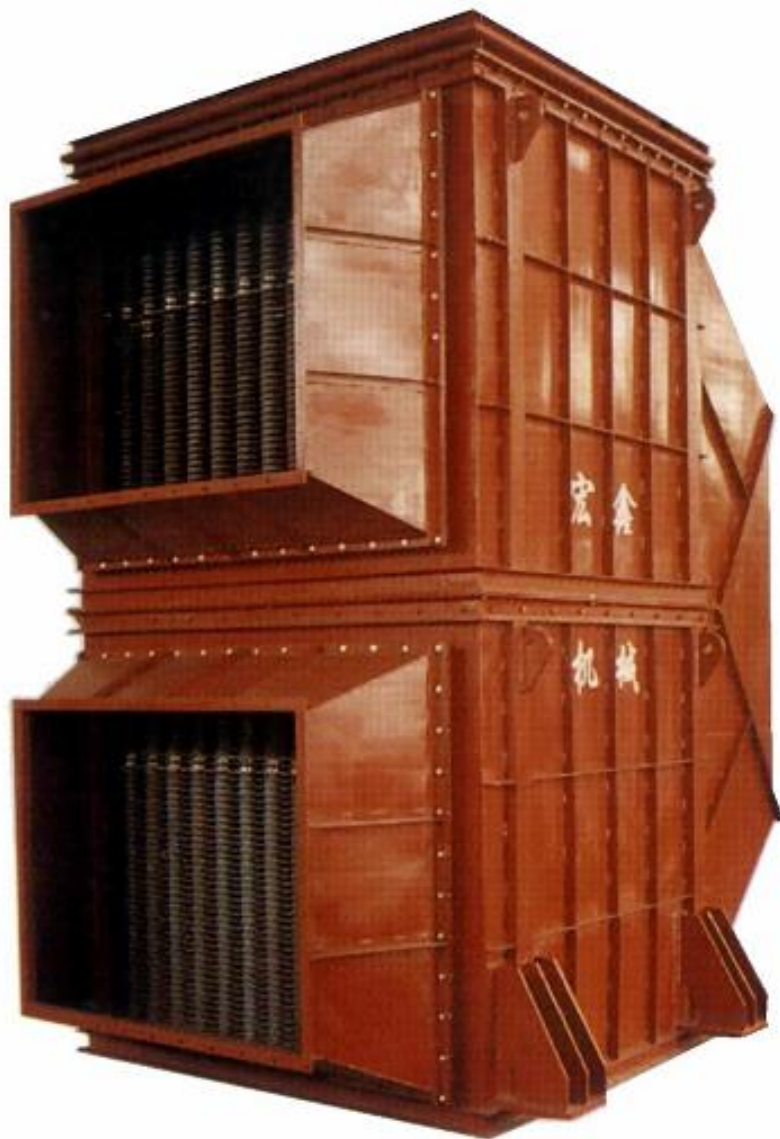
塞斯波螺旋螺纹管换热器

SECESPOL Series Helically Corrugated Tubes Heat Exchangers





9.2 换热器的分类

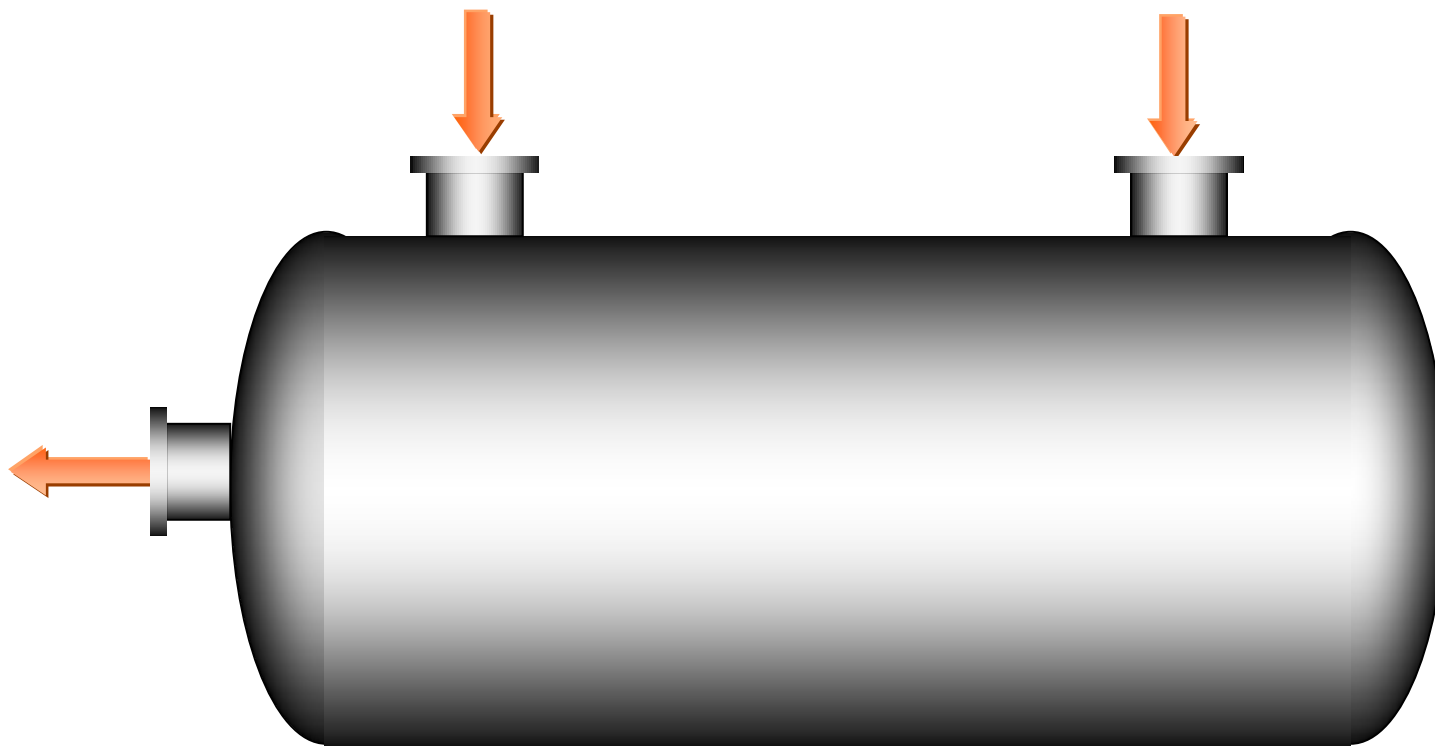


2—110t/h

翅片铸铁空气预热器
单、双回程系列内螺纹

9.2 换热器的分类

混合式换热器



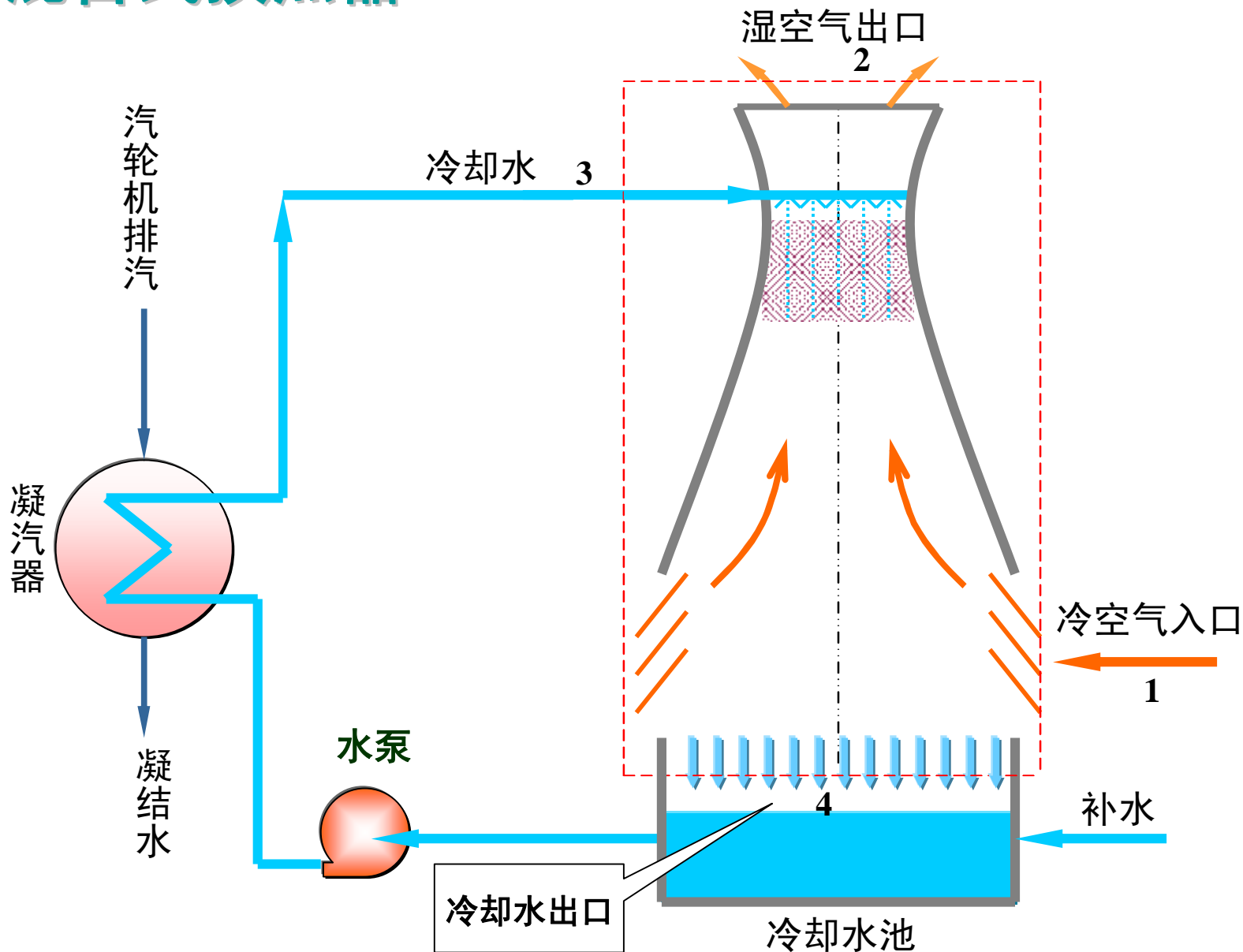


RS 圓塔系列





混合式换热器



A photograph of a cozy interior space. A large, red, vertical radiator is mounted on a light-colored wall, following the curve of a bay window. The window has white horizontal blinds and a white sill. On the sill, there are several decorative items: a small potted plant with green leaves, a set of three white candlesticks with lit candles, and a vase with dried flowers. To the left of the radiator, a wicker chair with a light-colored cushion is partially visible. In the foreground, a round, light-colored wicker table holds a white cup and saucer, a small cake on a plate, and a book. To the right, a large potted plant with broad, dark green leaves stands next to the radiator. The floor is made of light-colored tiles.

散热器

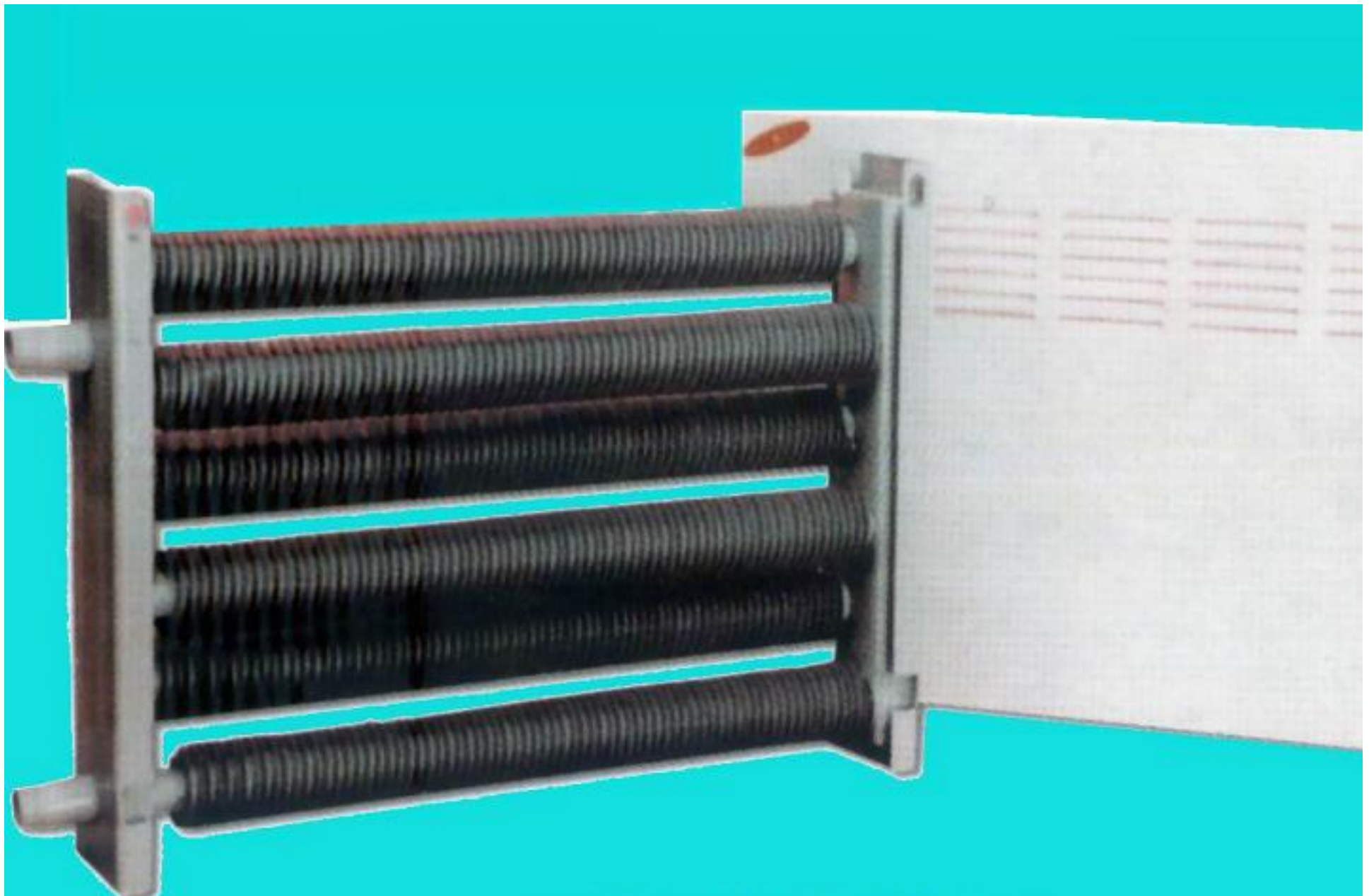


散热器

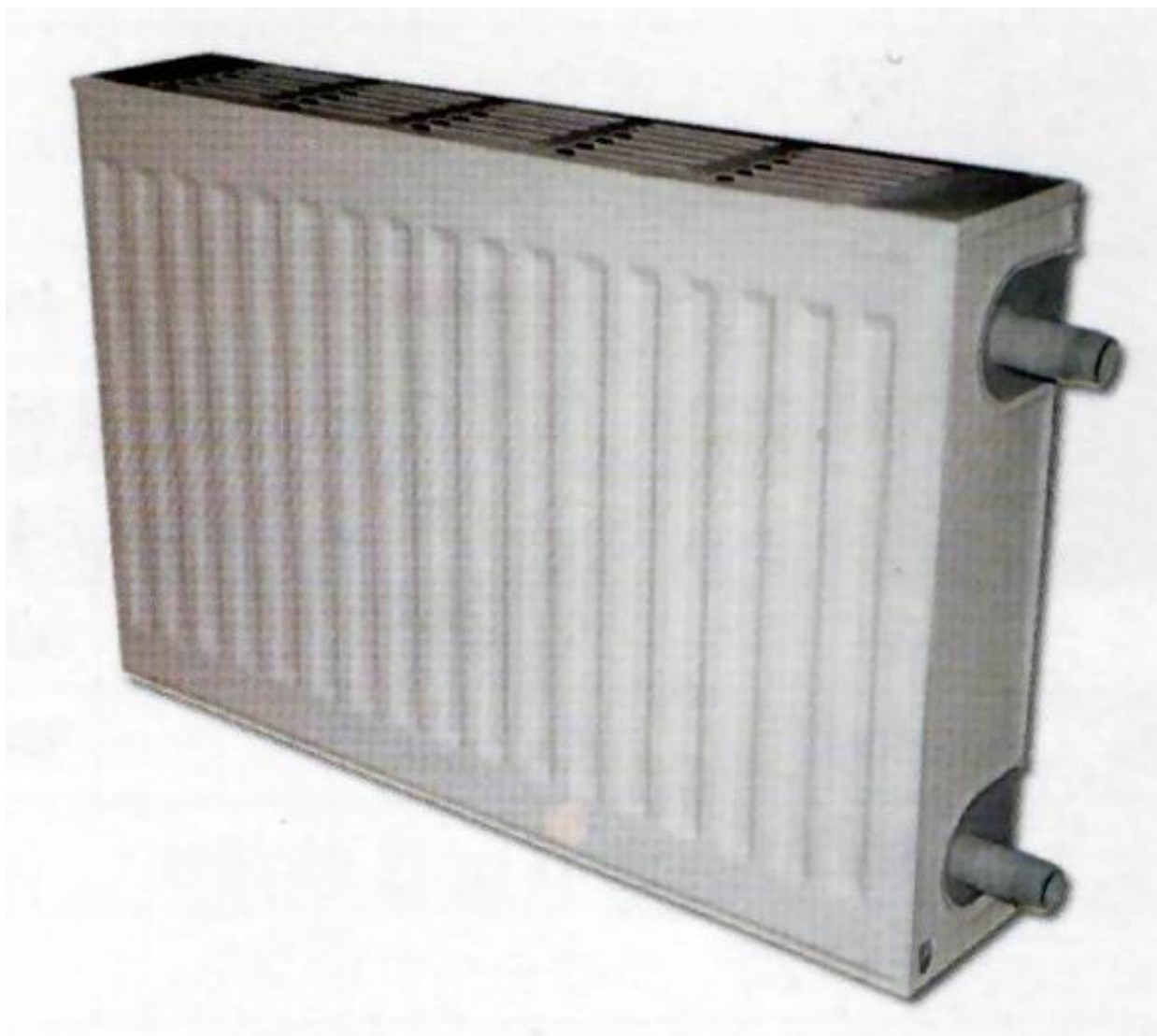
散热器



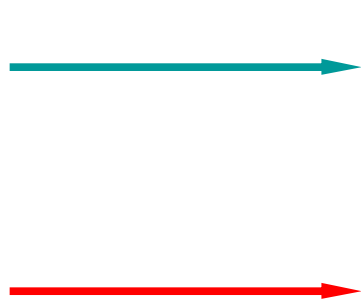
钢制U型翅片管散热器



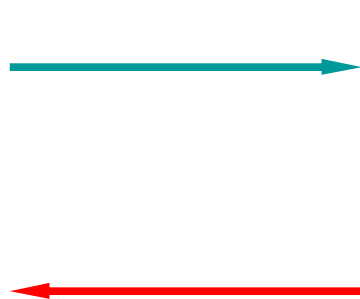
钢制高频焊翅片管散热器



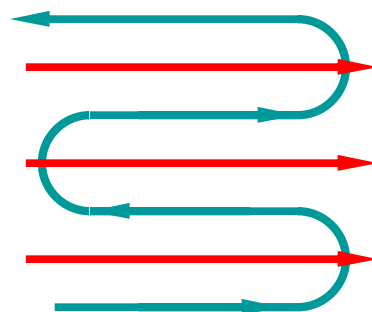
流体在换热器中的流动方式



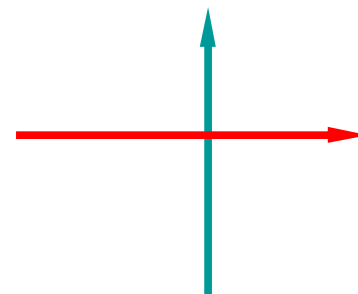
顺流



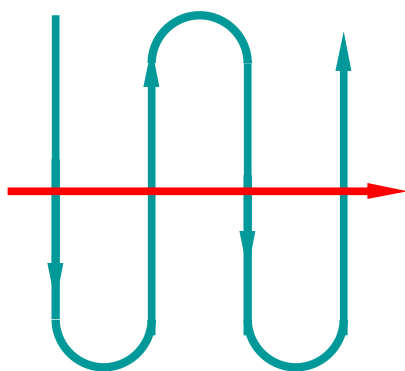
逆流



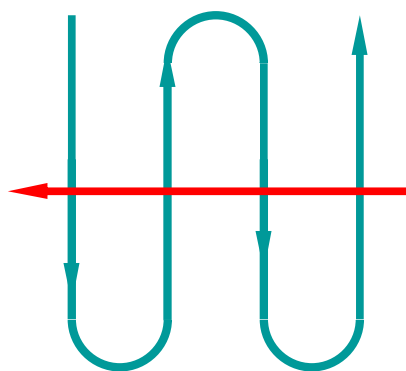
平行混合流



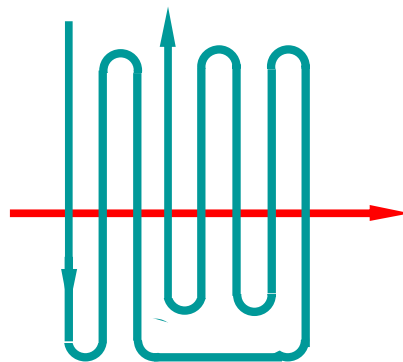
一次交叉流



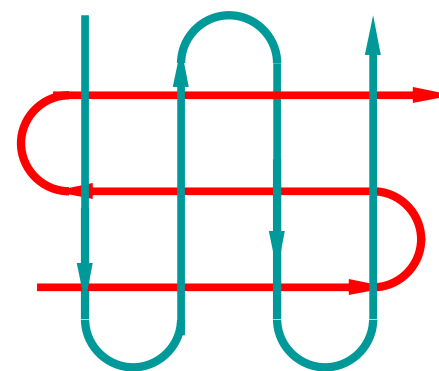
顺流式交叉流



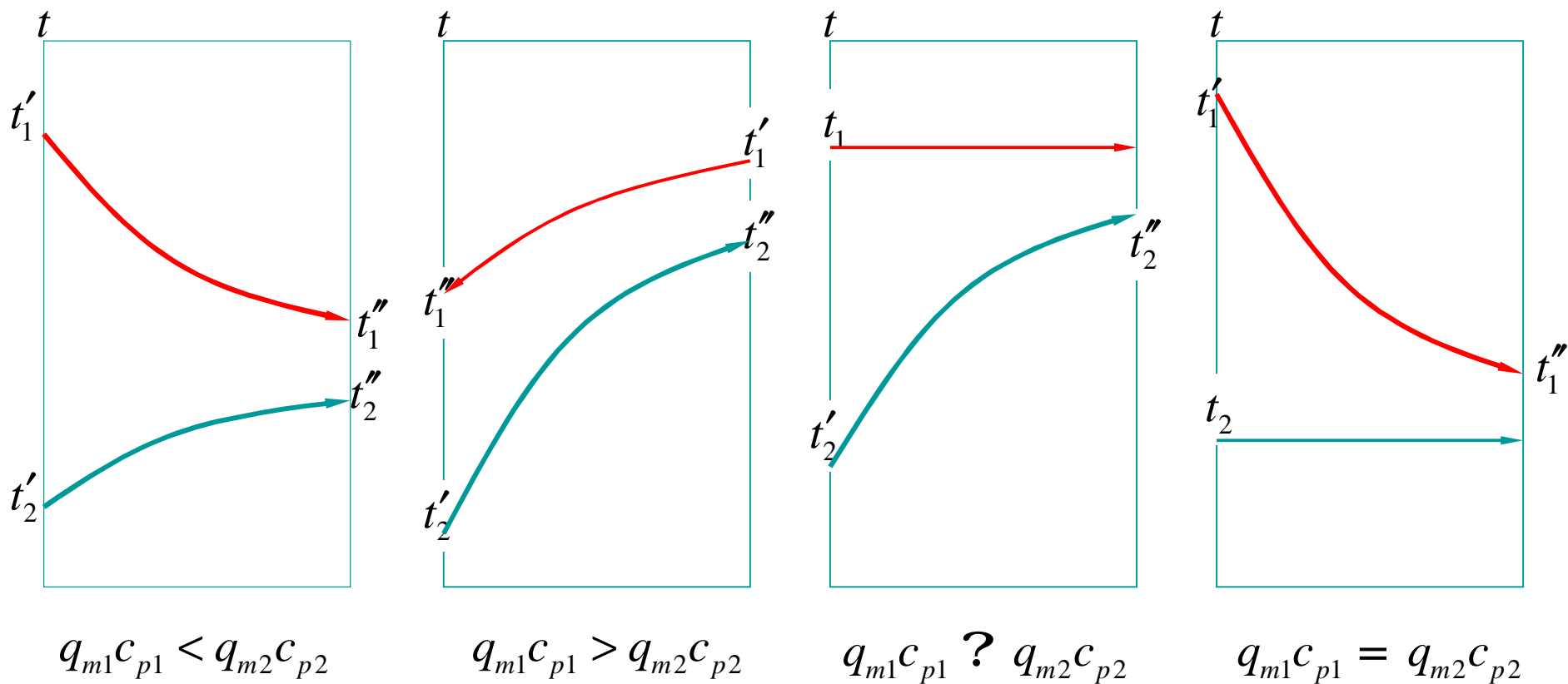
逆流式交叉流



混合式交叉流

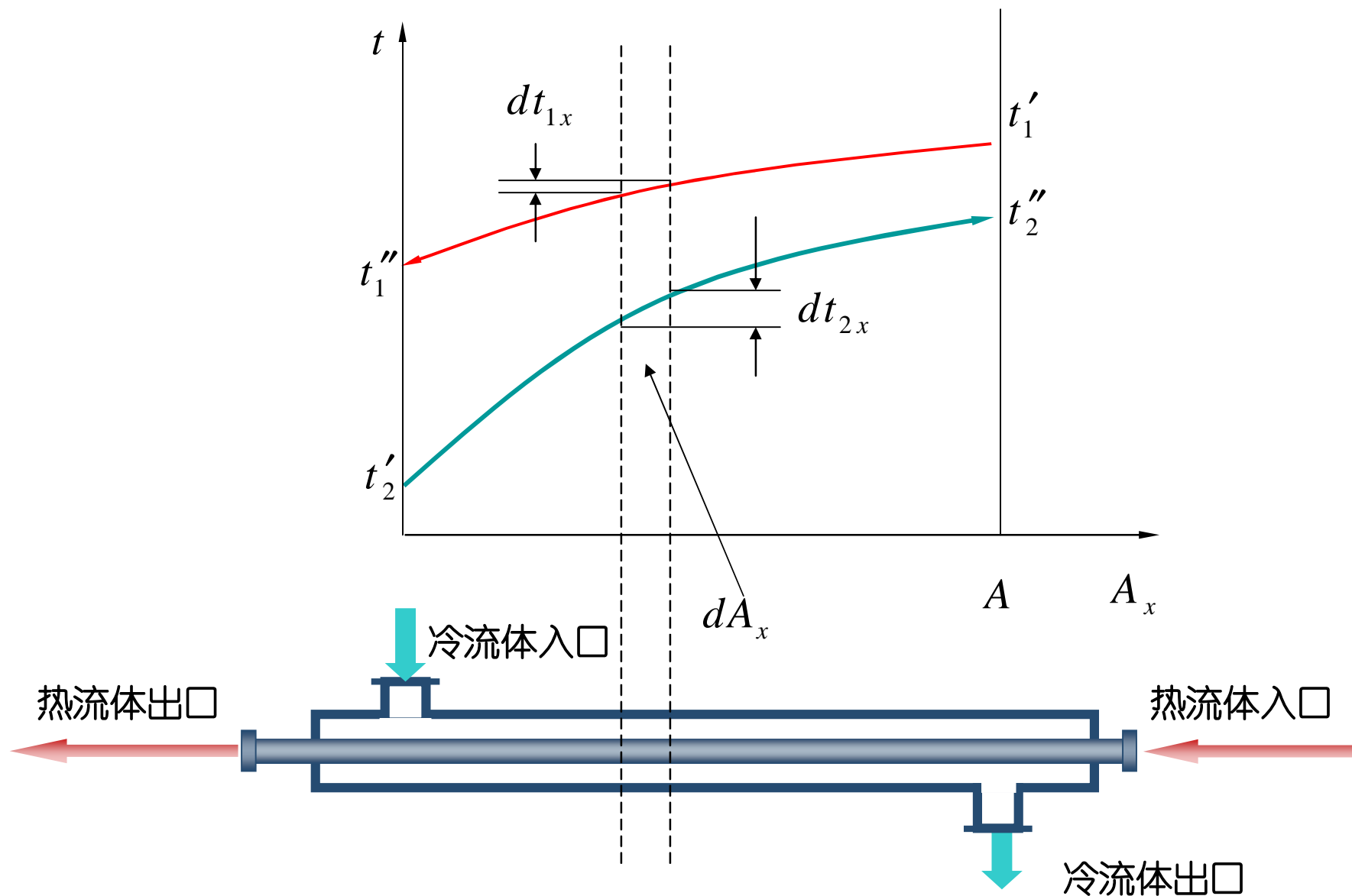


顺流和逆流时流体温度的沿程变化



注: $q_m c_p$ 是热容量, 单位 J/K。

9.3 简单换热器传热量的计算



$$d\Phi_{1x} = q_{m1}c_{p1}dt_{1x}$$

$$d\Phi_{2x} = q_{m2}c_{p2}dt_{2x}$$

$$d\Phi_x = K(\Delta t_x)dA_x = K(t_{1x} - t_{2x})dA_x$$

$$d\Phi_{1x} = d\Phi_{2x} = d\Phi_x$$

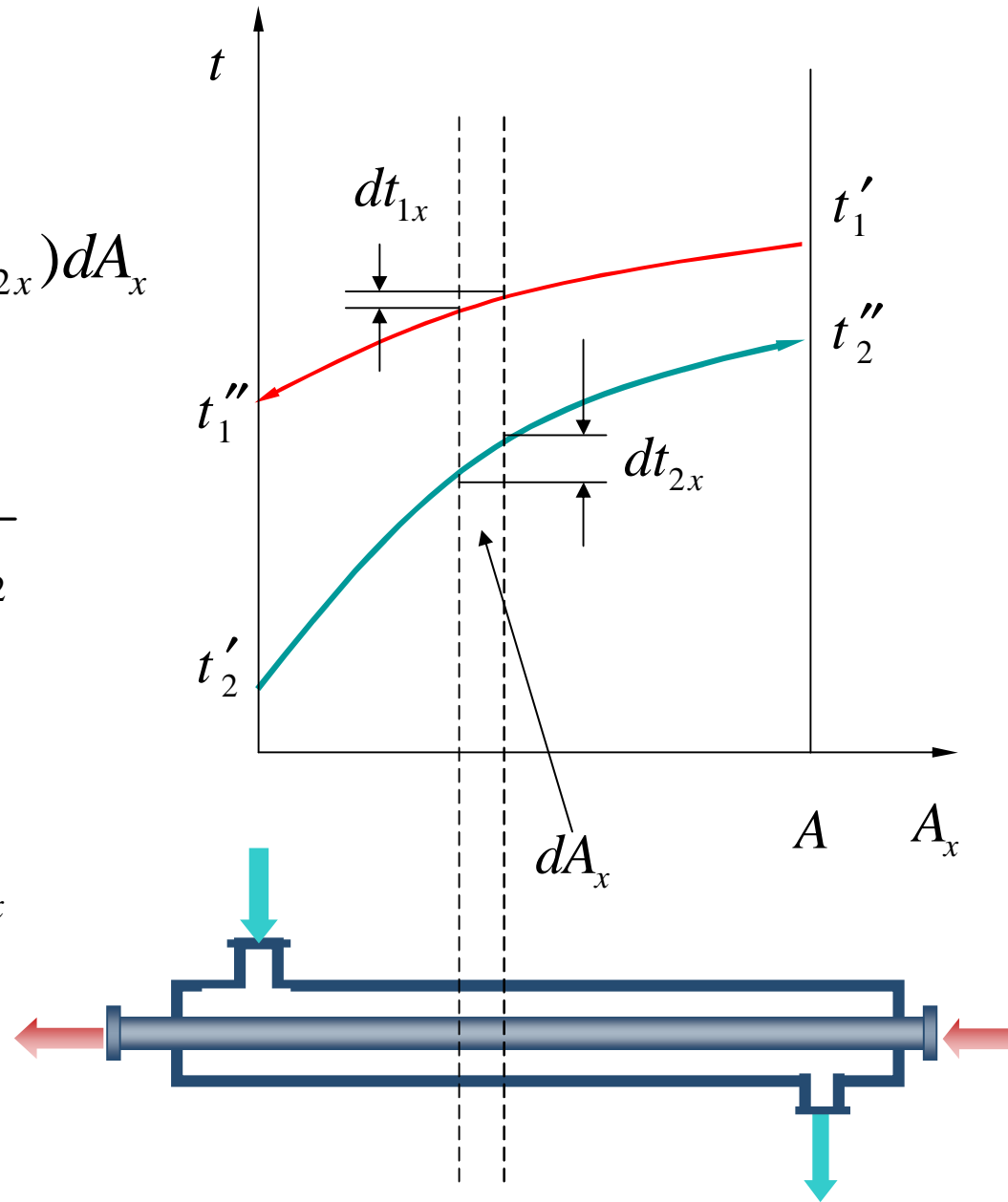
$$dt_{1x} = \frac{d\Phi_x}{q_{m1}c_{p1}}, \quad dt_{2x} = \frac{d\Phi_x}{q_{m2}c_{p2}}$$

$$dt_{1x} - dt_{2x} = d(t_{1x} - t_{2x})$$

$$= \left(\frac{1}{q_{m1}c_{p1}} - \frac{1}{q_{m2}c_{p2}} \right) d\Phi_x$$

$$= m d\Phi_x$$

$$m = \frac{1}{q_{m1}c_{p1}} - \frac{1}{q_{m2}c_{p2}}$$



简单换热器传热量的计算

$$d(t_{1x} - t_{2x}) = mK(t_{1x} - t_{2x})dA_x$$

$$\frac{d(t_{1x} - t_{2x})}{(t_{1x} - t_{2x})} = mKdA_x$$

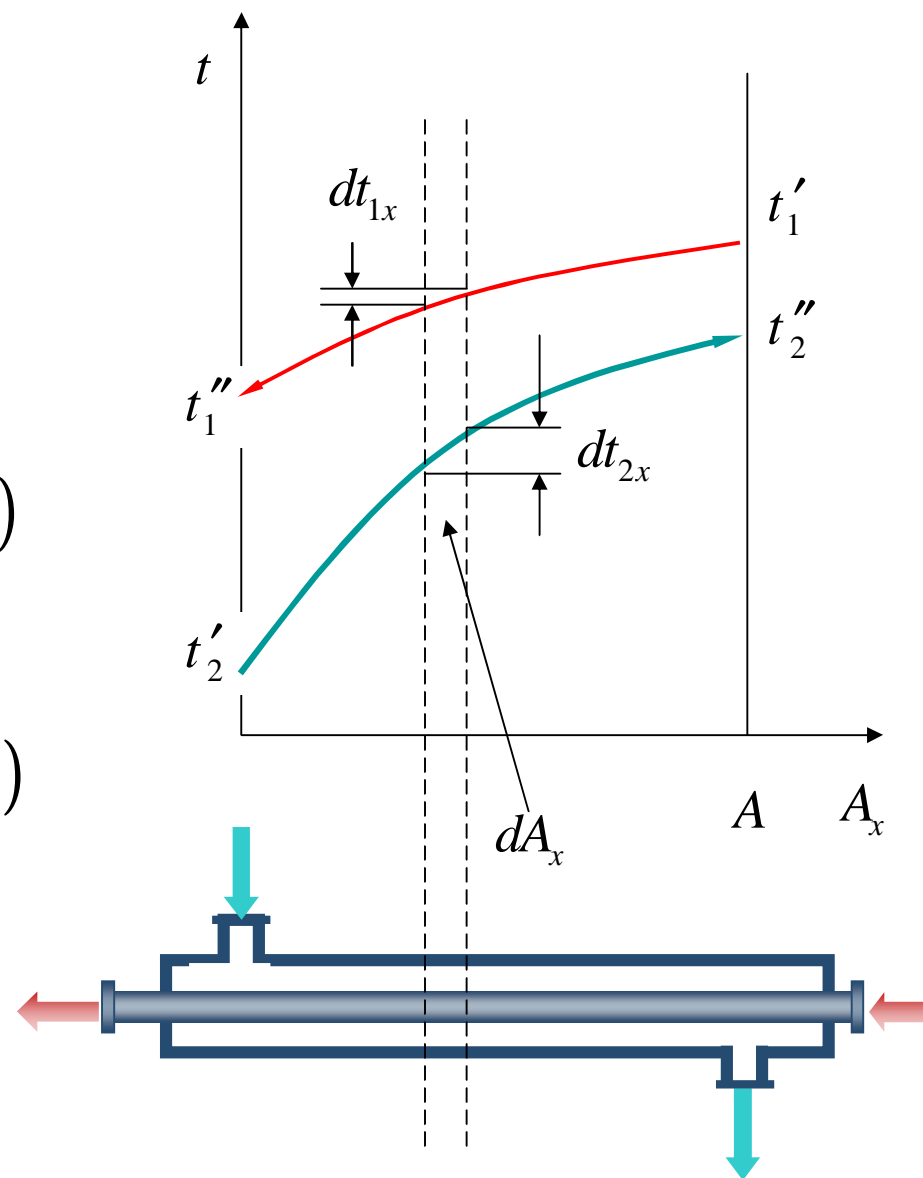
$$\ln \frac{(t_{1x} - t_{2x})}{(t_1'' - t_2')} = mKA_x$$

$$(t_{1x} - t_{2x}) = (t_1'' - t_2') \exp(mKA_x)$$

$$(t_1' - t_2'') = (t_1'' - t_2') \exp(mKA)$$

$$(t_1'' - t_2') = (t_1' - t_2'') \exp(-mKA)$$

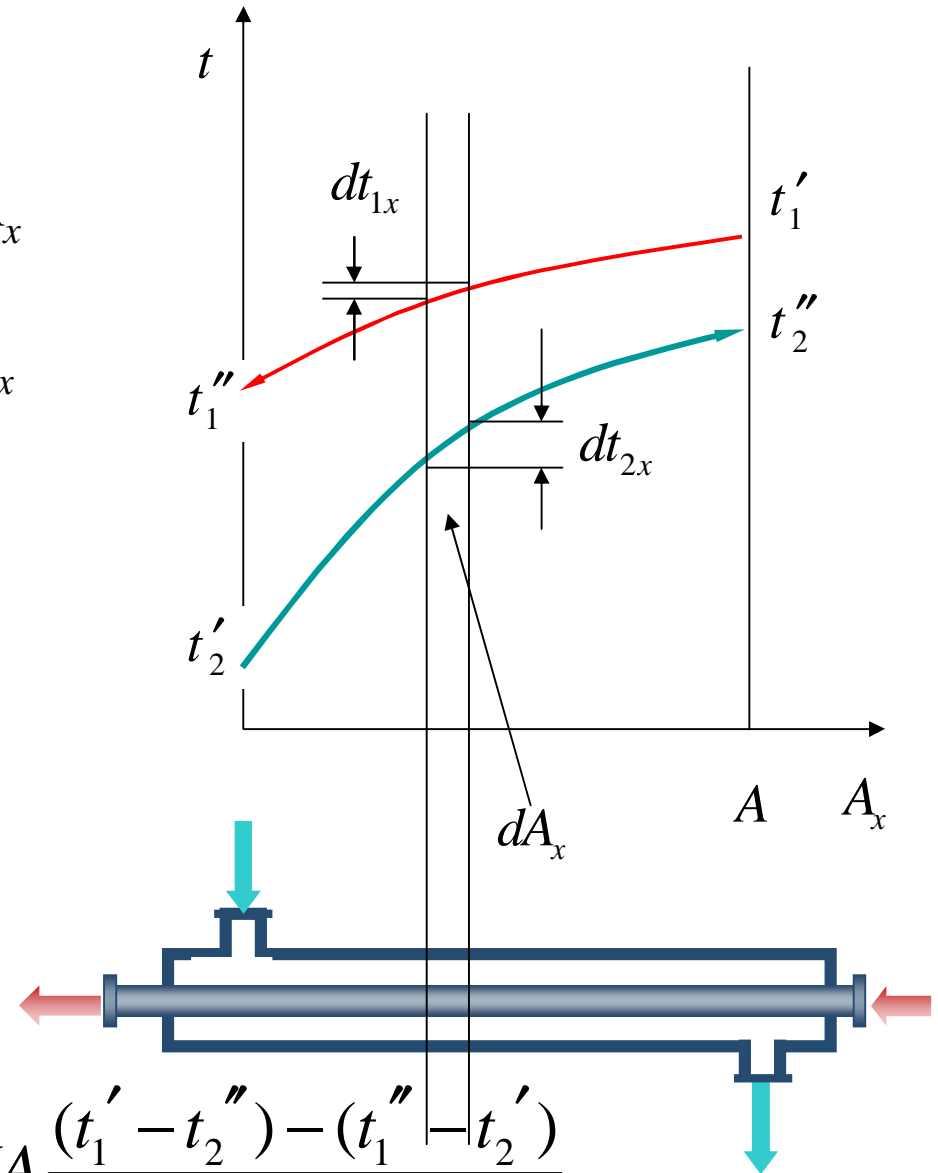
$$\ln \frac{(t_1'' - t_2')}{(t_1' - t_2'')} = -mKA$$



$$\begin{aligned}
\Phi &= \int_0^A K(t_{1x} - t_{2x}) dA_x \\
&= \int_0^A K(t_1'' - t_2') \exp(mKA_x) dA_x \\
&= K(t_1'' - t_2') \int_0^A \exp(mKA_x) dA_x \\
&= \frac{1}{m} (t_1'' - t_2') [\exp(mKA) - 1] \\
&= \frac{1}{m} (t_1'' - t_2') [\exp(mKA) - 1]
\end{aligned}$$

$$\ln \frac{(t_1'' - t_2')}{(t_1' - t_2'')} = -mKA$$

$$\Phi = \frac{1}{m} \left[(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2') \right] = KA \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}$$



简单换热器传热量的计算

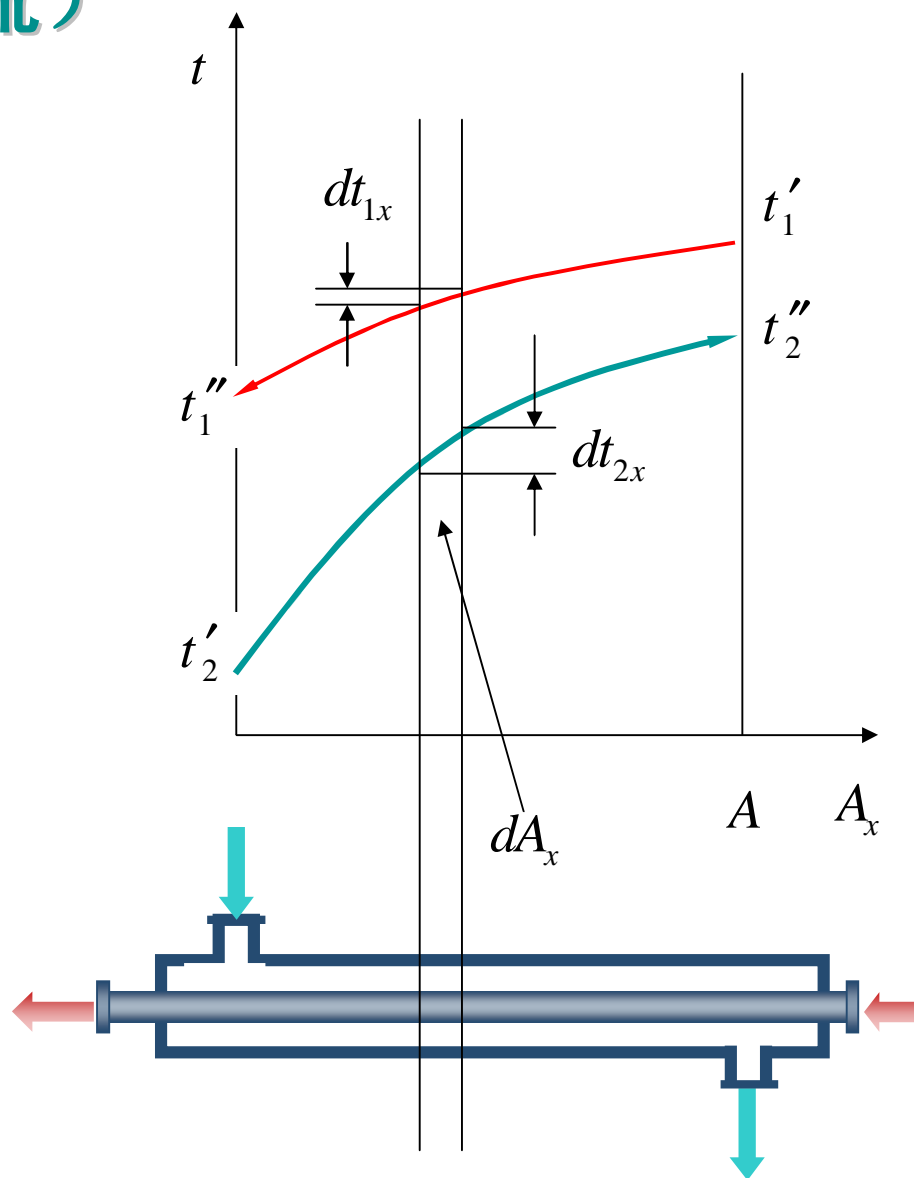
对数平均温差（逆流）

$$\Phi = \frac{1}{m} \left[(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2') \right]$$

$$= KA \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}}$$

$$\Phi = KA \overline{\Delta t}$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}}$$



$$d\Phi_{1x} = -q_{m1}c_{p1}dt_{1x}$$

$$d\Phi_{2x} = q_{m2}c_{p2}dt_{2x}$$

$$d\Phi_x = K(\Delta t_x)dA_x = K(t_{1x} - t_{2x})dA_x$$

$$d\Phi_{1x} = d\Phi_{2x} = d\Phi_x$$

$$dt_{1x} = -\frac{d\Phi_x}{q_{m1}c_{p1}}, \quad dt_{2x} = \frac{d\Phi_x}{q_{m2}c_{p2}}$$

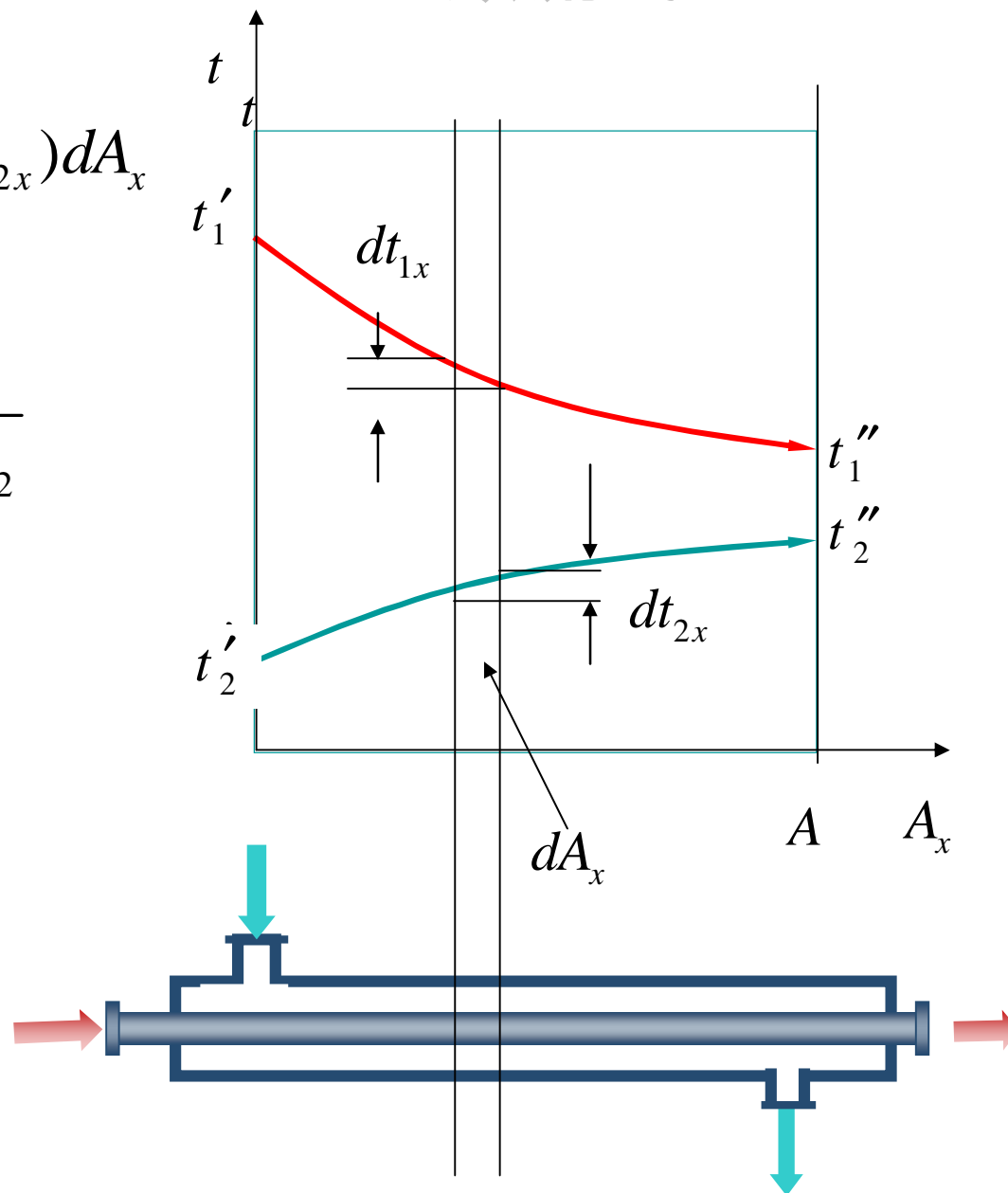
$$dt_{1x} - dt_{2x} = d(t_{1x} - t_{2x})$$

$$= -\left(\frac{1}{q_{m1}c_{p1}} + \frac{1}{q_{m2}c_{p2}}\right)d\Phi_x$$

$$= -md\Phi_x$$

$$m = \frac{1}{q_{m1}c_{p1}} + \frac{1}{q_{m2}c_{p2}}$$

顺流式



简单换热器传热量的计算

$$d(t_{1x} - t_{2x}) = -mK(t_{1x} - t_{2x})dA_x$$

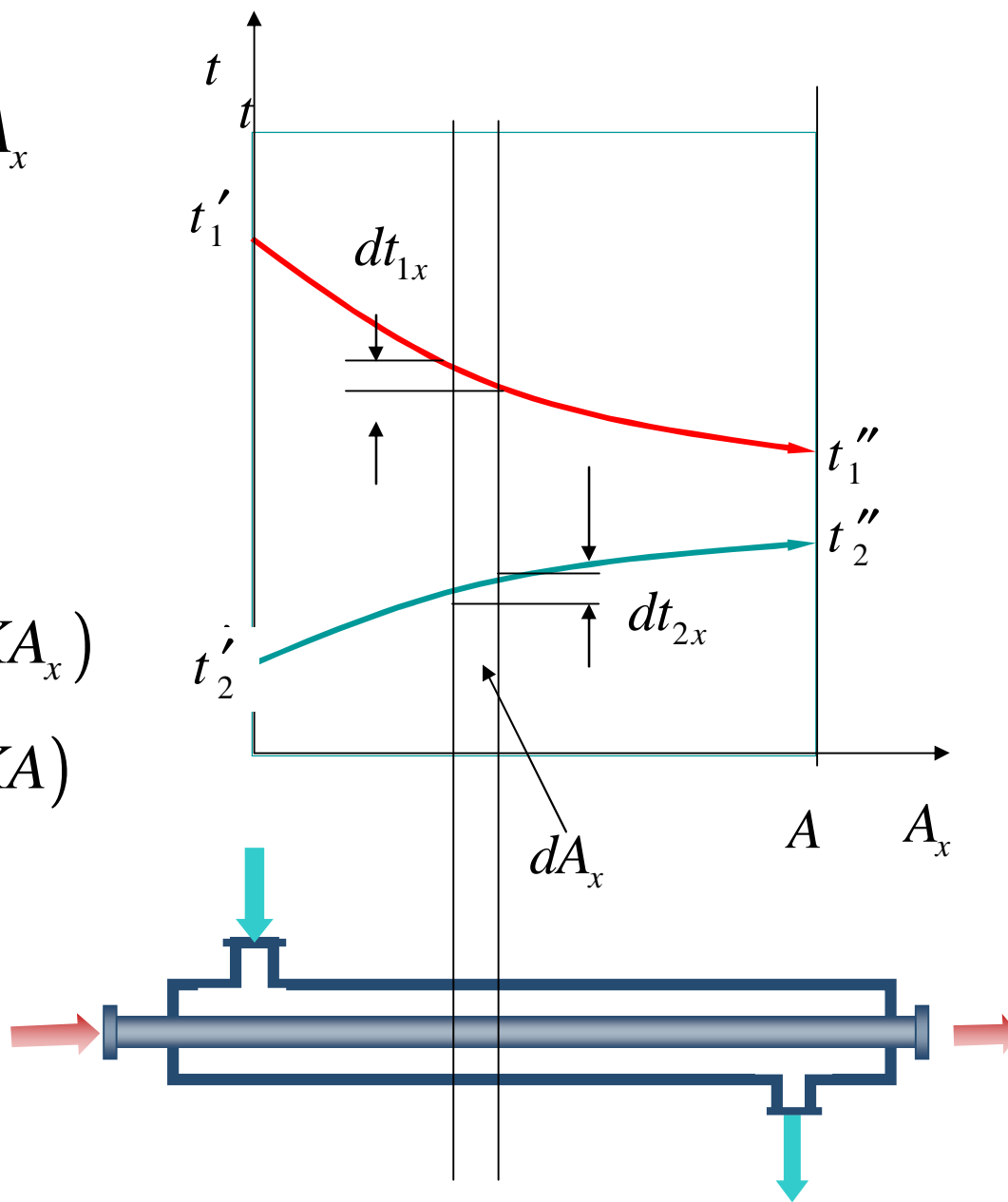
$$\frac{d(t_{1x} - t_{2x})}{(t_{1x} - t_{2x})} = -mKdA_x$$

$$\ln \frac{(t_{1x} - t_{2x})}{(t_1' - t_2')} = -mKA_x$$

$$(t_{1x} - t_{2x}) = (t_1' - t_2') \exp(-mKA_x)$$

$$(t_1'' - t_2'') = (t_1' - t_2') \exp(-mKA)$$

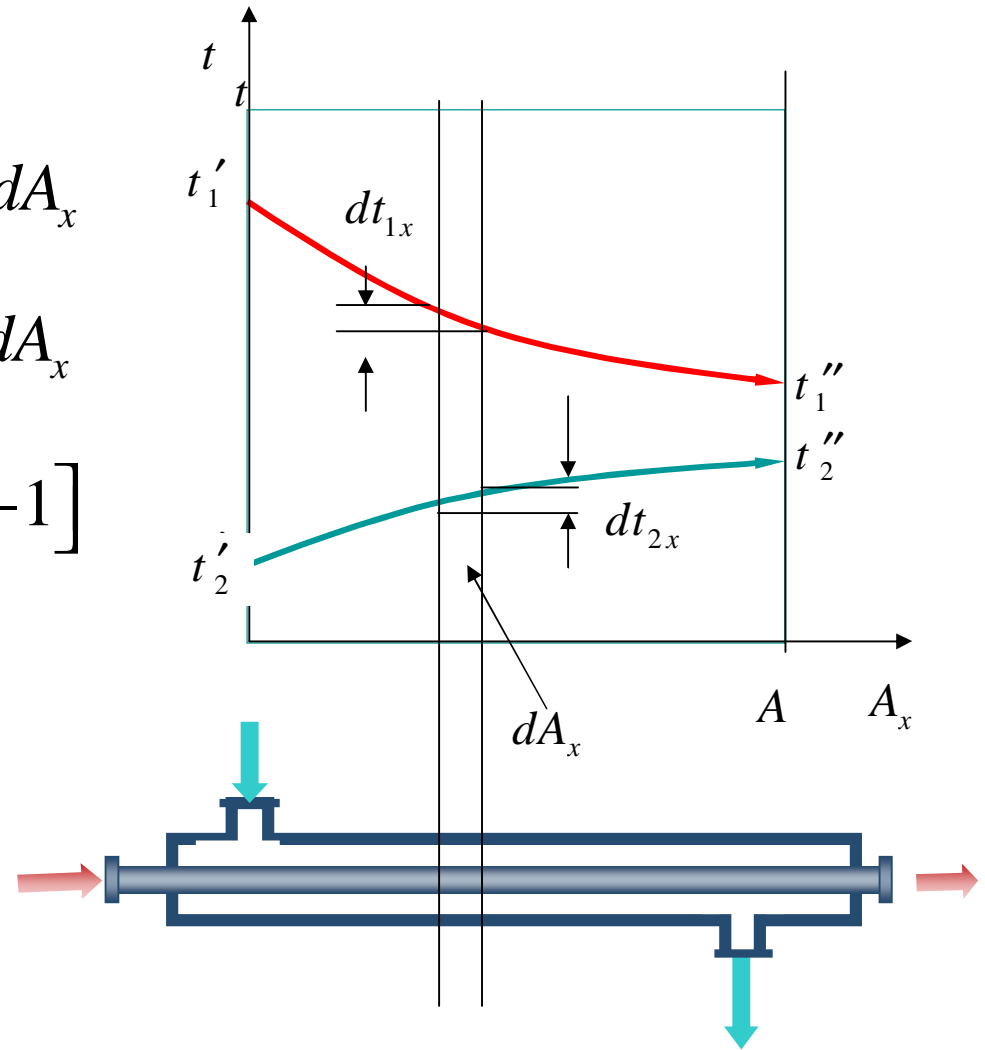
$$\ln \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')} = -mKA$$



$$\begin{aligned}
\Phi &= \int_0^A K(t_{1x} - t_{2x}) dA_x \\
&= \int_0^A K(t_1' - t_2') \exp(-mKA_x) dA_x \\
&= K(t_1' - t_2') \int_0^A \exp(-mKA_x) dA_x \\
&= -\frac{1}{m}(t_1' - t_2') [\exp(-mKA) - 1] \\
&= -\frac{1}{m}[(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2')]
\end{aligned}$$

$$\ln \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')} = -mKA$$

$$\Phi = -\frac{1}{m}[(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2')] = KA \frac{(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2')}{\ln \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')}}$$



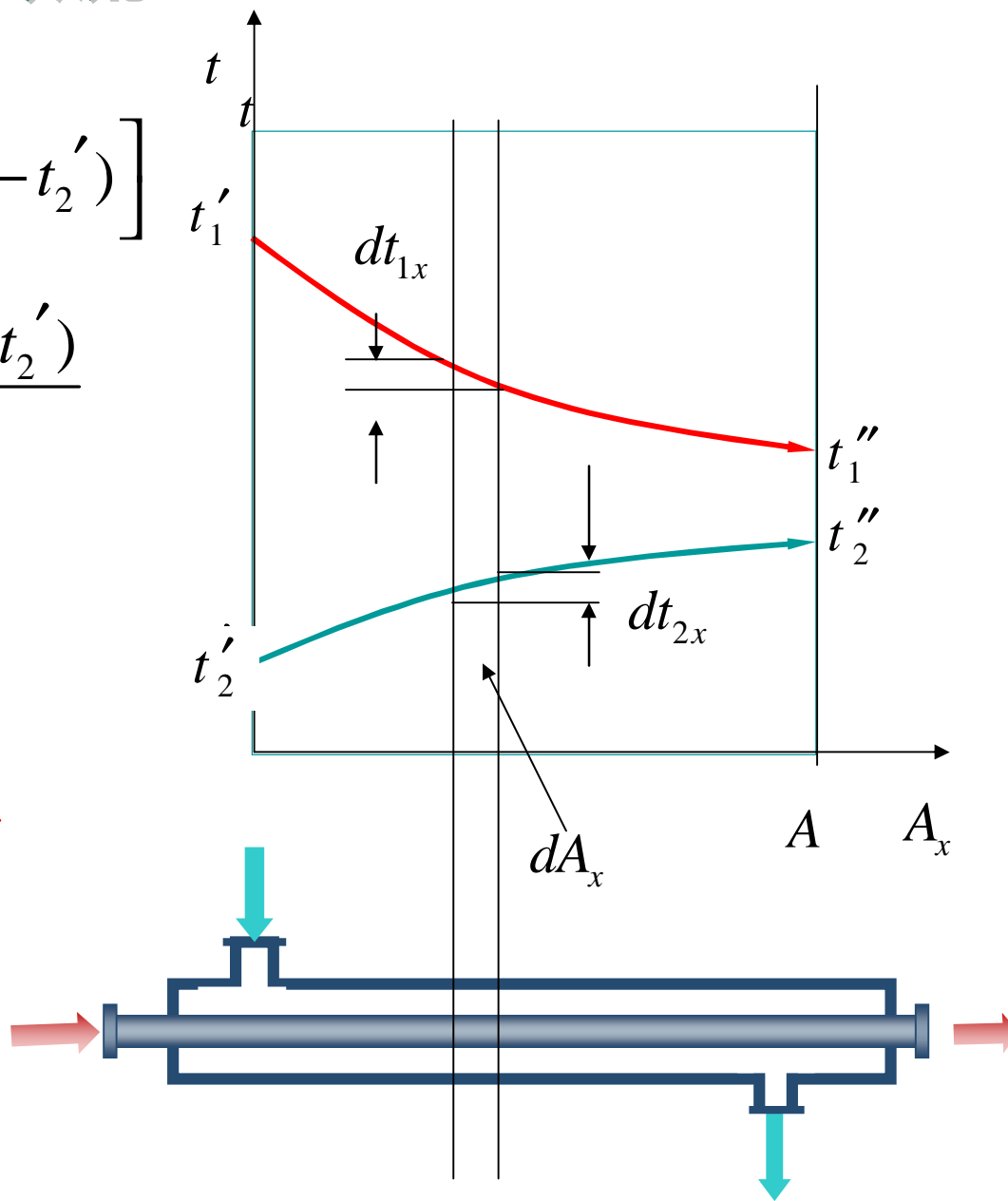
对数平均温差（顺流）

$$\Phi = -\frac{1}{m} \left[(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2') \right]$$

$$= KA \frac{(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2')}{\ln \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')}} \quad \text{--- (1)}$$

$$\Phi = KA \overline{\Delta t}$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1'' - t_2'') - (t_1' - t_2')}{\ln \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')}} \quad \text{--- (2)}$$



复杂流的平均传热温差

$$\overline{\Delta t} = y \overline{\Delta t}_c$$

$y = y(P, R)$ —— 温差修正系数

$$\overline{\Delta t}_c = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}}$$

$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')}, \quad R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')}$$

$$P = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_1' - t_2')}, \quad R = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_1'')}$$

典型换热器的温差修正系数

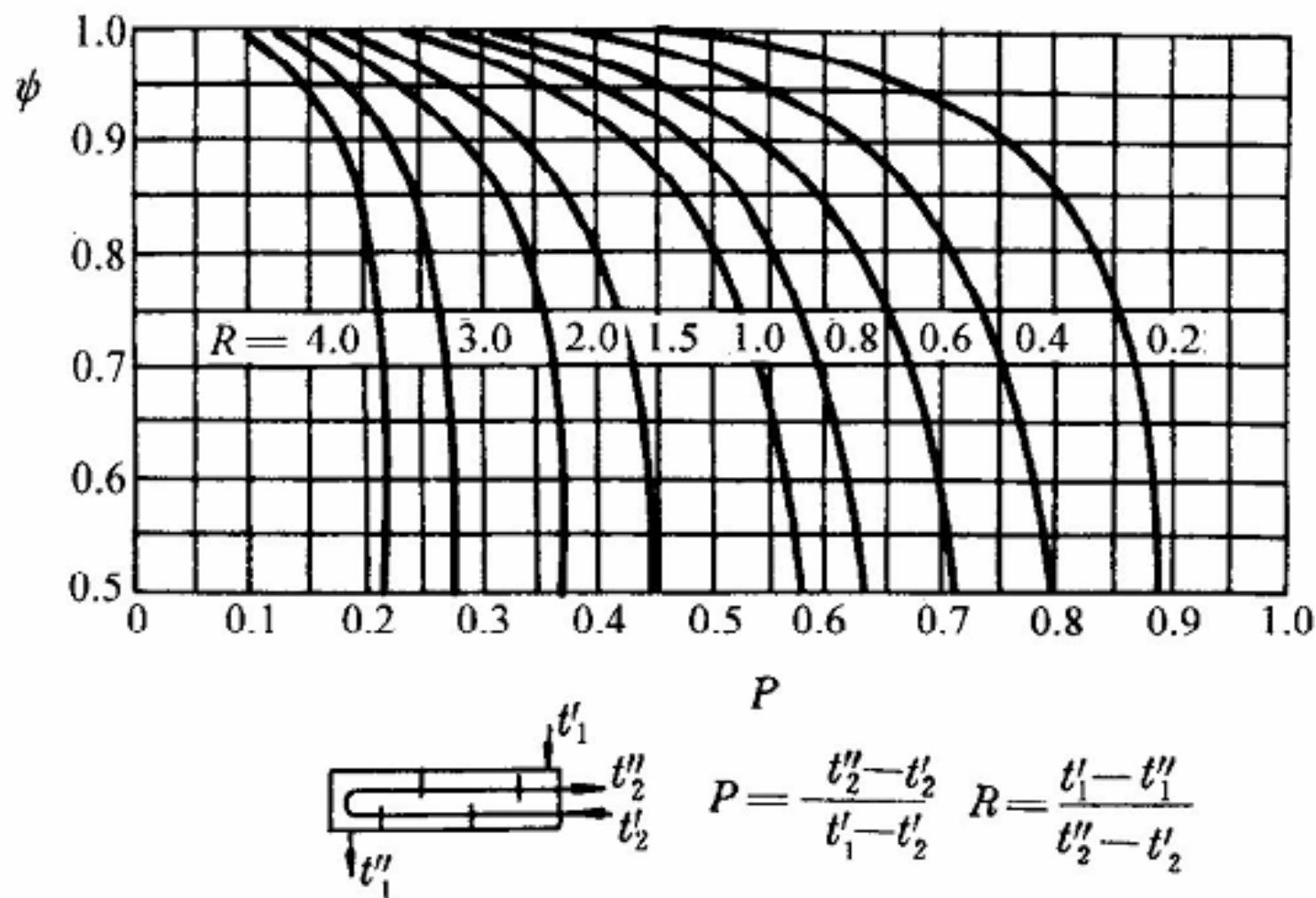


图 9-13 壳侧 1 程, 管侧 2, 4, 6, 8, ... 程的 ϕ 值^[1]

典型换热器的温差修正系数

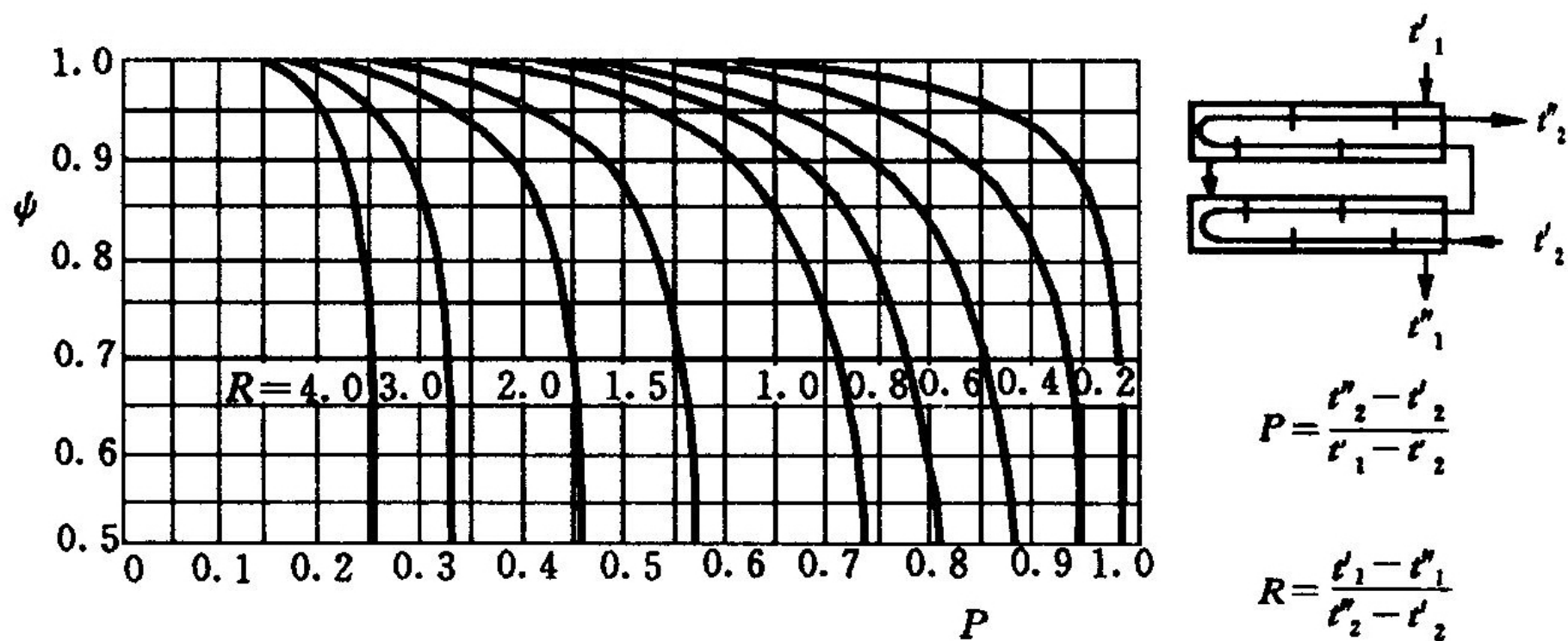


图 9-16 壳侧 2 程, 管侧 4、8、12、16...程的 ψ 值

典型换热器的温差修正系数

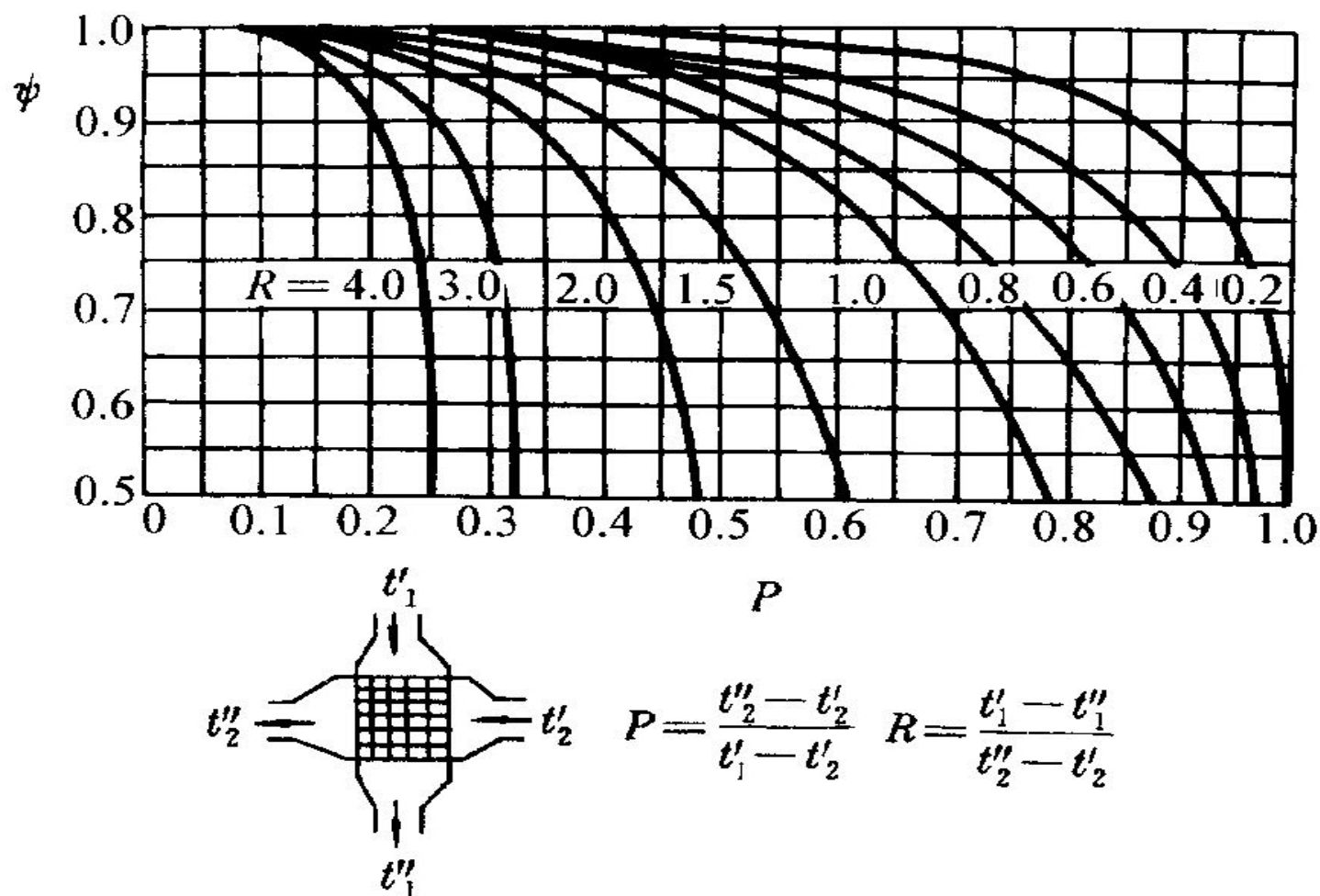


图 9-15 一次交叉流、两种流体各自都不混合时的 ψ 值^[1]①

典型换热器的温差修正系数

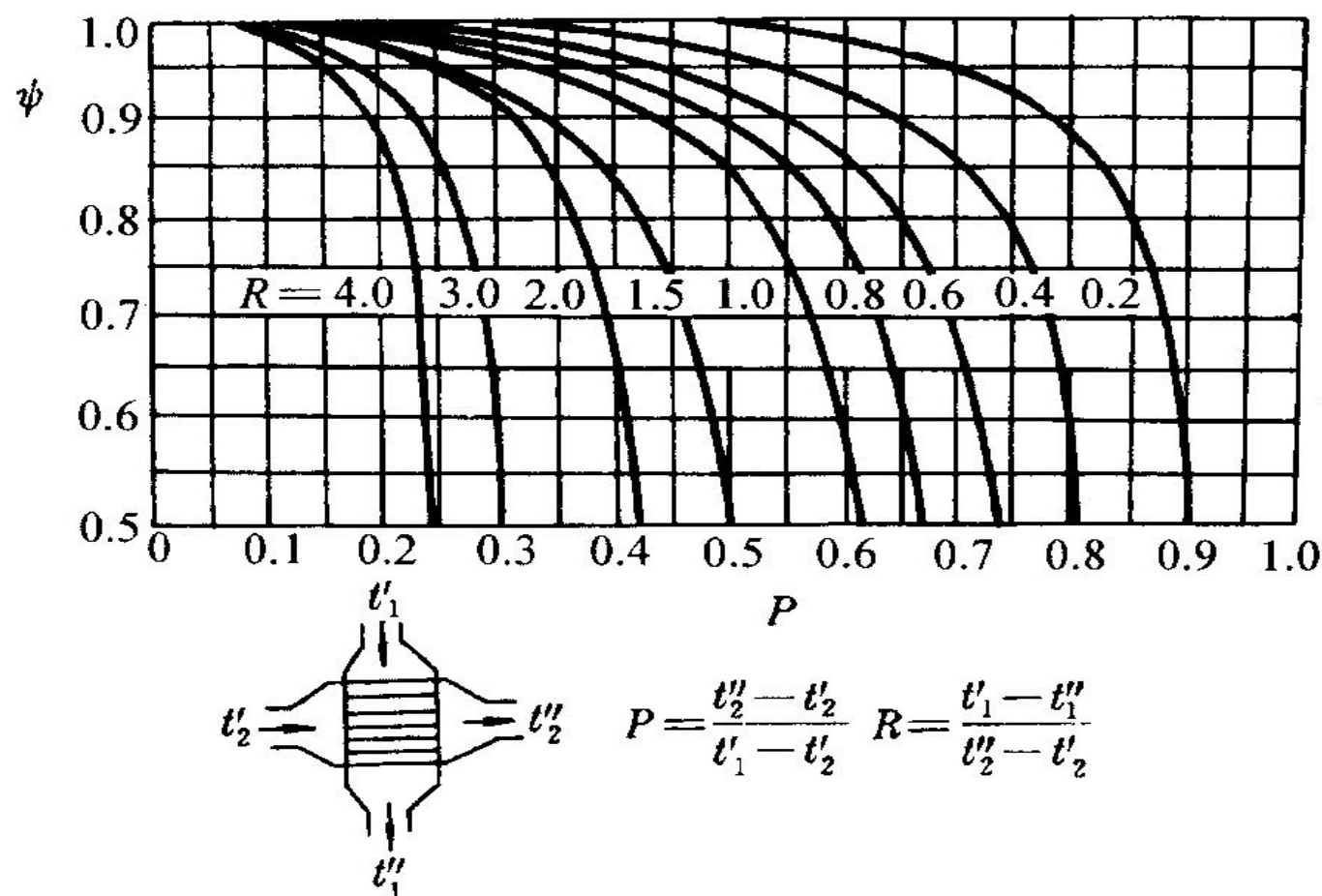


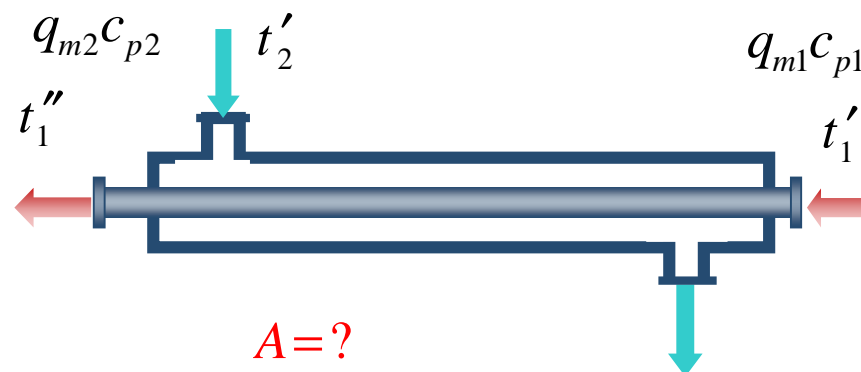
图 9-16 一次交叉流, 一种流体混合、另一种流体不混合时的 ψ 值^[1]

计算换热器的平均温差法

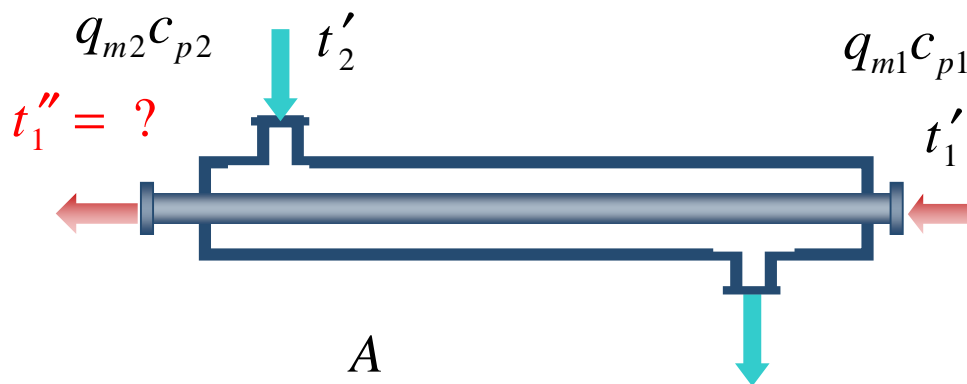
换热器计算的类型:

1. 设计计算，即在换热器工艺参数确定的情况下，确定换热器的类型和换热器的面积；
2. 校核计算，即对于给定的换热器能否达到工艺的要求。

$$t_2'' = t_2' + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}}(t_1' - t_1'')$$



设计计算



校核计算

设计计算步骤

1. 计算换热量 $\Phi = q_{m1} c_{p1} (t_1' - t_1'')$

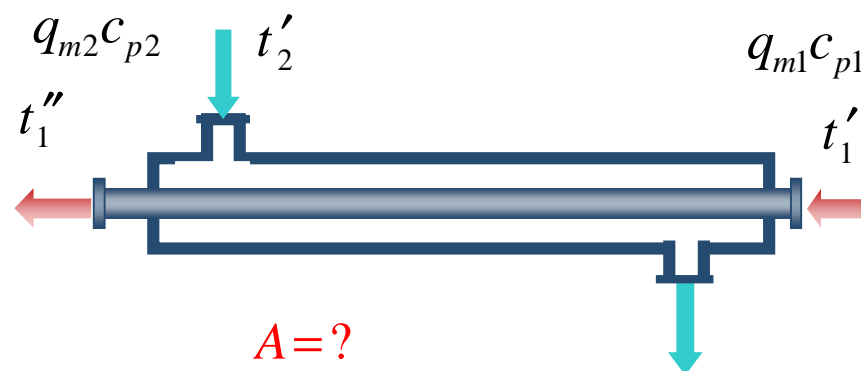
2. 依据能量平衡关系计算知的出口温度

$$t_2'' = t_2' + \frac{\Phi}{q_{m2} c_{p2}}$$

3. 计算逆流时的对数平均温差

$$\overline{\Delta t_c} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}}}$$

4. 计算温差修正系数和平均温差



$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')}, \quad R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')}$$

$$y = y(P, R); \quad \overline{\Delta t} = y \overline{\Delta t_c}$$

设计计算步骤

5. 布置传热面，计算传热系数 K

$$K_o = \frac{1}{A_o R_t} = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o}{2\pi l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{A_o}{A_o h_o}}$$

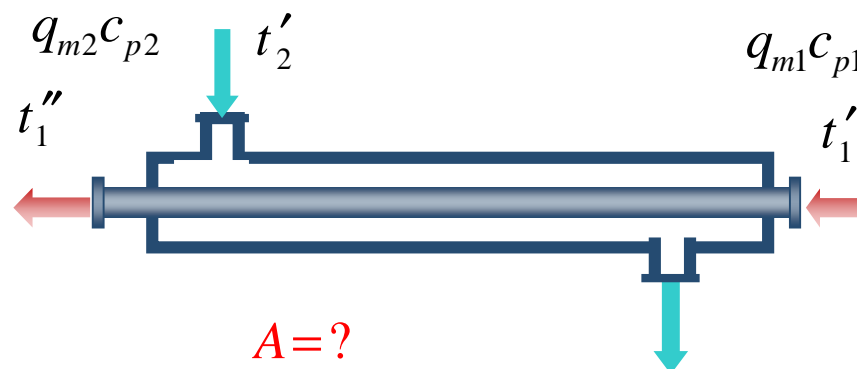
6. 计算传热面积 A

$$A = \frac{\Phi}{K \Delta t}$$

7. 计算流动阻力 Δp

换热器设计中应注意——综合考虑各方面的因素，
例如换热面积和能耗之间的关系。

设计计算



校核计算步骤

1 假设出口温度，计算换热量 $\Phi^{(1)} = q_{m1}c_{p1}(t_1' - t_1''^{(1)})$

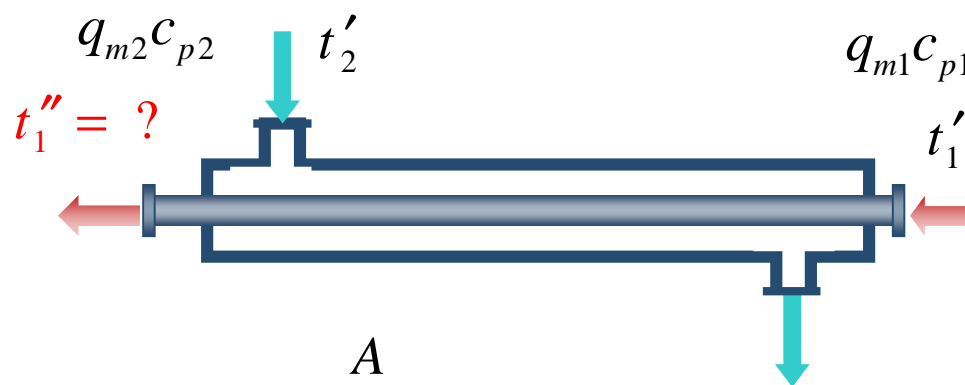
2 依据能量平衡关系计算未知的出口温度

$$t_2'' = t_2' + \frac{\Phi^{(1)}}{q_{m2}c_{p2}}$$

3 计算逆流时的对数平均温差

$$\overline{\Delta t_c} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1''^{(1)} - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1''^{(1)} - t_2')}}}$$

4 计算温差修正系数和平均温差



$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')}, \quad R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')}$$

$$y = y(P, R)$$

$$\overline{\Delta t}^{(1)} = y \overline{\Delta t_c}$$

校核计算步骤

5. 计算传热系数 K

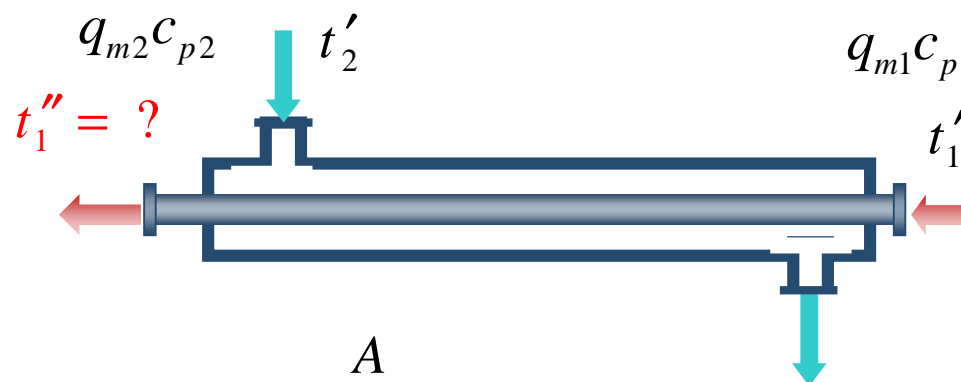
$$K_o^{(1)} = \frac{1}{A_o R_t} = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o}{2\pi l l} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{A_o}{A_o h_o}}$$

6. 计算传热量

$$\Phi^{(2)} = K^{(1)} A \Delta t^{(1)}$$

7. 比较计算出来的传热量

$$\Phi^{(2)}, \Phi^{(1)}$$



如果两者相差较小，比如小于2%，则认为假设的温度基本正确，计算结束。否则需要重新假设温度来进行试算。

设计计算实例

设计一个变压器油的冷却器，用水来冷却加热的油。按照工艺要求，油的入口温度为60℃，出口温度应不高于45℃，流量为36 t/h。可用的冷却水的入口温度为33℃，考虑到当地是缺水地区，为了防止水的蒸发损失，出口温度限制在37℃。

变压器油和水的主要物性参数

水质	l	r	c_p	n	Pr
水	0.635	992.2	4174	0.659 e-6	4.31
变压器油	0.127	886	1905	49e-6	648

设计计算过程

1. 计算换热量

$$\Phi = q_{m1} c_{p1} (t_1' - t_1'') = 36 \times 10^3 / 3600 \times 1905 \times (60 - 45) = 285.75 \times 10^3 \text{ W}$$

2. 冷流体的流量

$$q_{m2} = \frac{\Phi}{c_{p2} (t_2'' - t_2')} = \frac{285.75 \times 10^3}{4174 \times (37 - 33)} = 17.11 \text{ kg / s}$$

3. 逆流时对数平均温差

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} = \frac{(60 - 37) - (45 - 33)}{\ln \frac{60 - 37}{45 - 33}} = 16.9^\circ \text{C}$$

4. 温差修正系数和平均温差（壳管式换热器，单壳程、双管程）

$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')} = \frac{37 - 33}{60 - 33} = 0.15$$

$$R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')} = \frac{60 - 45}{37 - 33} = 3.75$$

$$y = y(P, R) = 0.95$$

$$\overline{\Delta t} = y \overline{\Delta t}_c = 0.95 \times 16.9 = 16.1^\circ \text{C}$$

设计计算过程

5. 布置传热面，计算传热系数 K
(过程略)

6. 计算传热面积 A

$$A = \frac{\Phi}{K \Delta t} = \frac{285.75 \times 10^3}{450 \times 16.1} = 39.44 m^2$$

7. 计算流动阻力 (略)

根据计算的换热面积，确定所用的换热管的长度和根数。

校核计算实例

要选用一个变压器油的冷却器，用水来冷却加热的油。按照工艺要求，油的入口温度为 60°C ，流量为 36t/h 。可用的冷却水的入口温度为 33°C ，流量为 18t/h 。这里现有的壳管式换热器为单壳程、双管程，换热面积为 40m^2 。试确定换热器的冷、热介质的出口温度。换热器管程采用直径 15mm 的铜管，具体的数目和尺寸已知。

变压器油和水的主要物性参数

介质	l	r	c_p	n	Pr
水	0.635	992.2	4174	0.659×10^{-6}	4.31
变压器油	0.127	886	1905	49×10^{-6}	648

校核计算过程

1. 假设冷却水的出口温度为48℃，计算换热量

$$\Phi^{(1)} = q_{m2} c_{p2} (t_2' - t_2'')^{(1)} = 18 \times 10^3 / 3600 \times 4174 \times (48 - 33) = 313.05 \times 10^3 \text{ W}$$

2. 热油的出口温度

$$t_1'' = t_1' - \frac{\Phi^{(1)}}{q_{m1} c_{p1}} = 60 - \frac{313.05 \times 10^3}{36 \times 10^3 / 3600 \times 1905} = 43.57^\circ\text{C}$$

3. 逆流时对数平均温差

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} = \frac{(60 - 48) - (43.57 - 33)}{\ln \frac{60 - 48}{43.57 - 33}} = 11.27^\circ\text{C}$$

4. 温差修正系数和平均温差（壳管式换热器，单壳程、双管程）

$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')} = \frac{48 - 33}{60 - 33} = 0.56$$

$$R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')} = \frac{60 - 43.57}{48 - 33} = 1.1$$

$$y = y(P, R) = 0.65$$

$$\overline{\Delta t} = y \overline{\Delta t}_c = 0.65 \times 11.27 = 7.32^\circ\text{C}$$

校核计算过程

5. 计算传热系数 K (过程略)

6. 计算传热量

$$\Phi^{(2)} = K \overline{\Delta t} A = 400 \times 7.32 \times 40 = 117.12 \text{ kW}$$

这个结果与原来假设得到的结果相差较多。因此需要重新假设出口温度来计算。例如采用两者的平均值估算冷流体的出口温度，得到

$$\Phi^{(1)} \Leftarrow (\Phi^{(1)} + \Phi^{(2)}) / 2 = 215 \times 10^3 \text{ W}$$

$$t_1''^{(1)} = t_1' - \frac{\Phi^{(1)}}{q_{m1} c_{p1}} = 60 - \frac{215 \times 10^3}{36 \times 10^3 / 3600 \times 1905} = 48.72$$

$$t_2'' = t_2' + \frac{\Phi^{(1)}}{q_{m2} c_{p2}} = 33 + \frac{215 \times 10^3}{18 \times 10^3 / 3600 \times 4174} = 43.30$$

校核计算过程

4. 温差修正系数和平均温差（壳管式换热器，单壳程、双管程）

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} = \frac{(60 - 43.30) - (48.72 - 33)}{\ln \frac{60 - 43.30}{48.72 - 33}} = 16.20^\circ\text{C}$$

$$P = \frac{(t_2'' - t_2')}{(t_1' - t_2')} = \frac{43.30 - 33}{60 - 33} = 0.38, \quad R = \frac{(t_1' - t_1'')}{(t_2'' - t_2')} = \frac{60 - 48.72}{43.30 - 33} = 1.1$$

$$\overline{\Delta t} = y \overline{\Delta t}_c = 0.92 \times 16.20 = 14.9^\circ\text{C}$$

$$\Phi^{(2)} = K \overline{\Delta t} A = 400 \times 14.92 \times 40 = 238.72 \text{ kW}$$

9.4 效能—传热单元数法 (ε -NTU)

效能--换热器中介质温度变化的最大值与换热器中冷热流体的进口温差之比为

$$e = \frac{(t' - t'')_{\max}}{t_1' - t_2'}$$

热容比-- $R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}, \quad C = q_m c_p$

传热单元数-- $NTU = \frac{KA}{C_{\min}}$

顺流条件下的效能计算 公式的推导

$$e = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'},$$

$$t_1' - t_1'' = e(t_1' - t_2')$$

$$t_2'' - t_2' = \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}}(t_1' - t_1'') = e \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}}(t_1' - t_2')$$

$$t_1' - t_1'' + t_2'' - t_2' = e \left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right) (t_1' - t_2')$$

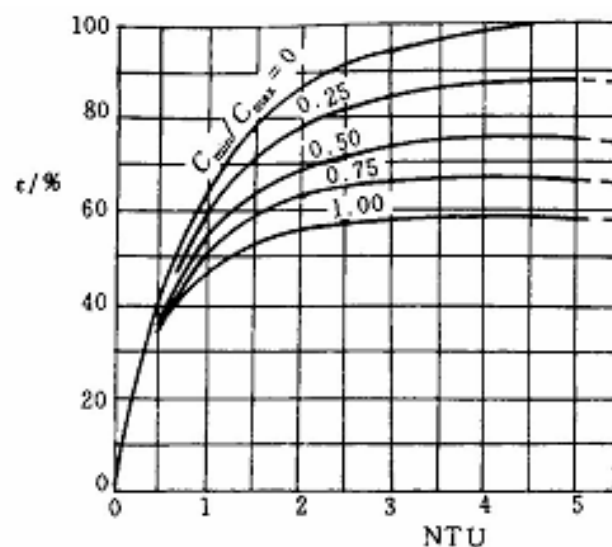
$$(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'') = e \left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right) (t_1' - t_2')$$

$$1 - \frac{(t_1'' - t_2'')}{(t_1' - t_2')} = e \left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right)$$

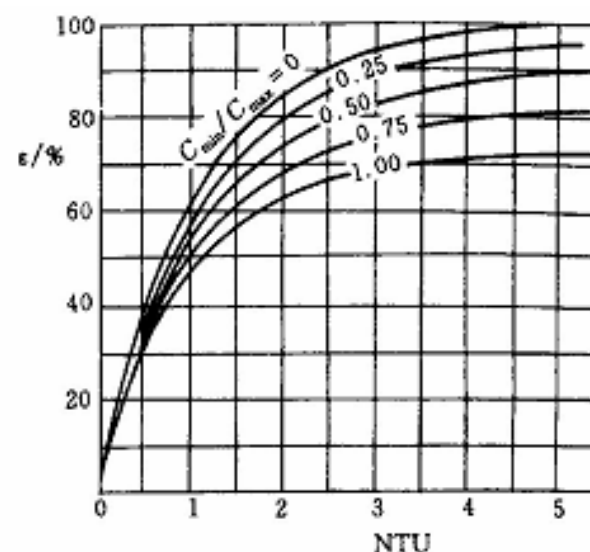
$$1 - \exp(-mKA) = e \left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right)$$

$$e = \frac{1 - \exp(-mKA)}{\left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right)} = \frac{1 - \exp \left[-\frac{KA}{q_{m1}c_{p1}} \left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right) \right]}{\left(1 + \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right)}$$

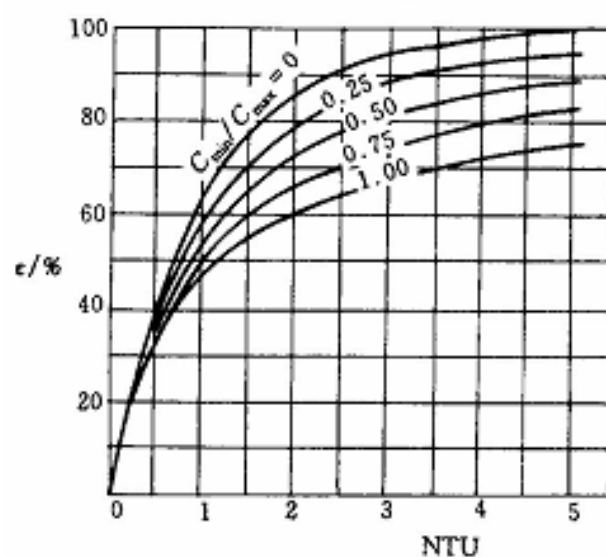
$$e = f \left(\frac{KA}{q_{m1}c_{p1}}, \frac{q_{m1}c_{p1}}{q_{m2}c_{p2}} \right) = f \left(NTU, \frac{(q_m c_p)_{\min}}{(q_m c_p)_{\max}} \right)$$



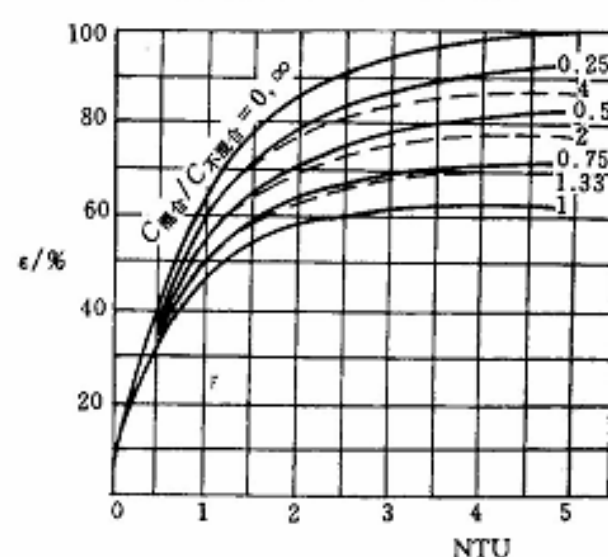
(a) 壳侧为单流程、管侧流程为 2 的倍数 (2、4、6 等) 的管壳式换热器



(b) 壳侧为双流程、管侧流程为 4 的倍数 (4、8、12 等) 的管壳式换热器



(c) 两种流体均不混合的一次交叉流换热器



(d) 一种流体混合、另一种流体不混合的一次交叉流换热器

图 9-18 复杂流换热器的效能曲线^[14,15]

(ε - NTU)法校核计算步骤

1. 假设已知传热换热系数 K

2. 计算热容比和NTU

$$R = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}, \quad C = q_m c_p \quad NTU = \frac{KA}{C_{\min}}$$

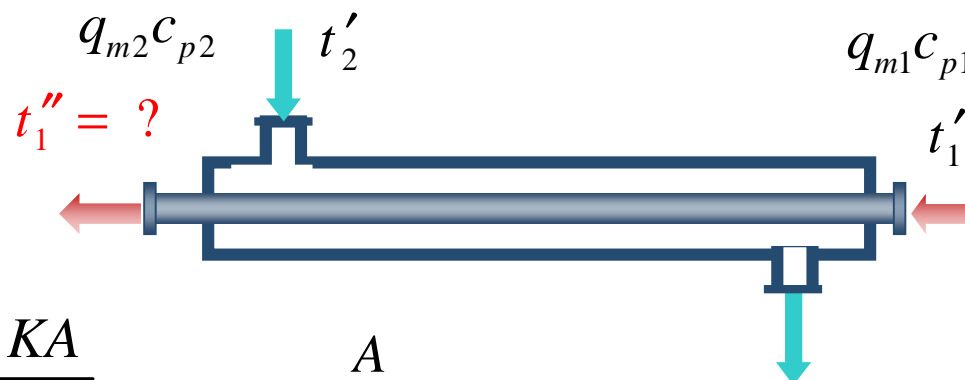
3. 计算效能 $e = \frac{(t'_1 - t''_1)_{\max}}{t'_1 - t'_2}$

4. 计算流体出口温度

$$t''_1 = t'_1 - e(t'_1 - t'_2)$$

5. 计算传热量和另一侧流体出口温度

$$\Phi = q_{m1} c_{p1} (t'_1 - t''_1) \quad t''_2 = t'_2 + \frac{\Phi}{q_{m2} c_{p2}}$$



校核计算实例

要选用一个变压器油的冷却器，用水来冷却加热的油。按照工艺要求，油的入口温度为 60°C ，流量为 36 t/h 。可用的冷却水的入口温度为 33°C ，流量为 18 t/h 。这里现有的壳管式换热器为单壳程、双管程，换热面积为 40 m^2 。试确定换热器的冷、热介质的出口温度。换热器管程采用直径 15 mm 的铜管，具体的数目和尺寸已知。

变压器油和水的主要物性参数

水质	l	r	c_p	n	Pr
水	0.635	992.2	4174	0.659×10^{-6}	4.31
变压器油	0.127	886	1905	49×10^{-6}	648

(ε -NTU)法校核计算步骤

1. 假设已知传热换热系数 K $K = 400\text{W/m}^2$

2. 计算热容比和NTU

$$NTU = \frac{KA}{(q_m c_p)_{\min}} = \frac{400 \times 40}{36 \times 10^3 / 3600 \times 1905} = 0.84$$

$$(q_m c_p)_{\min} / (q_m c_p)_{\max} = \frac{36 \times 10^3 / 3600 \times 1905}{18 \times 10^3 / 3600 \times 4174} = 0.91$$

3. 计算效能 $e = \frac{(t' - t'')_{\max}}{t'_1 - t'_2} \approx 0.5$

4. 计算流体出口温度、传热量和另一侧流体出口温度

$$t_1'' = t'_1 - e(t'_1 - t'_2) = 60 - 0.5 \times (60 - 33) = 46.5^\circ\text{C}$$

$$\Phi = q_{m1} c_{p1} (t'_1 - t_1'') = 36 \times 10^3 / 3600 \times 1905 \times (60 - 46.5) = 257.1 \times 10^3 \text{ W}$$

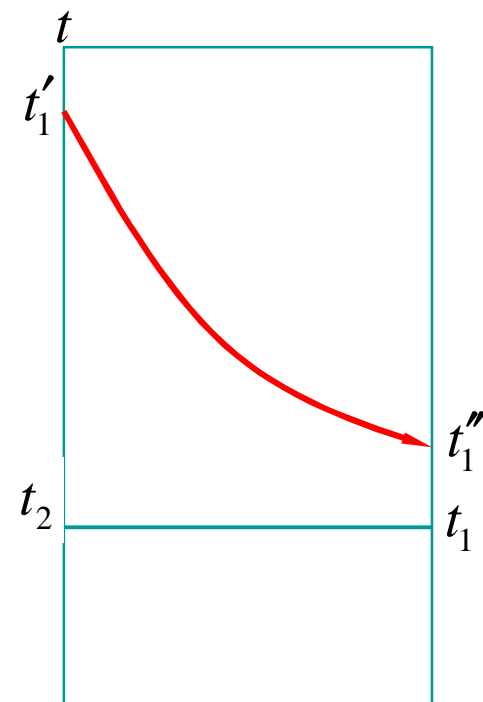
$$t_2'' = t'_2 + \frac{\Phi}{q_{m2} c_{p2}} = 33 + \frac{257.1 \times 10^3}{18 \times 10^3 / 3600 \times 4174} = 45.32^\circ\text{C}$$

例题一套管式水—水换热器，用于将流量是 2kg/s 的 75°C 的热水低到 50°C ，冷水的进口温度为 15°C ，冷水流量远大于热水流量。若水的比热容为 $4180\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。已知换热器的传热系数为 $200\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ，不计散热损失，问达到所需的冷却温度时，换热面积至少为多少？

解 因冷水流量远大于热水流量，
所以冷水可视为恒温。

端差 $\Delta t_{\max} = 75 - 15 = 60^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{\min} = 50 - 15 = 35^\circ\text{C}$$



$$q_{m1}c_{p1} = q_{m2}c_{p2}$$

传热温差

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{60 - 35}{\ln \frac{60}{35}} = 46.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

传热量

$$\Phi = q_m c_p (t_1 - t_2) = 2 \times 4180 \times (75 - 50) = 209000 \text{ W}$$

因

$$\Phi = q_m c_p (t_1 - t_2) = KA\Delta t$$

所以传热面积

$$A = \frac{\Phi}{K\Delta t} = \frac{209000}{200 \times 46.38} = 22.53 \text{ m}^2$$

例3 问对壳管式换热器来说，两种流体在下列情况下，何种走管内，何种走管外？

- 1) 清洁与不清洁的； 2) 腐蚀性大与腐蚀性小的；
- 3) 高温与低温的； 4) 压力大与压力小的；
- 5) 流量大与小的； 6) 粘度大与小的。

答：1) 不清洁流体应在管内，因为壳层清洗比较困难，而管内可以定期拆开端盖清洗；

2) 腐蚀性大的流体走管内，因为更换管束的代价比更换壳体要低，且如将腐蚀性强的流体置于壳侧，被腐蚀的不仅是壳体，还有管子；

- 3) 温度低的流体置于壳侧，这样可以减少换热器散热损失；
- 4) 压力大的流体置于管内，因为管侧耐高压，且低压流体置于壳侧时有利于减小阻力损失；
- 5) 流量大的流体置于管外，横向冲刷管束可使表面传热系数增加。
- 6) 粘度大的流体放在管外，可使管外侧表面传热系数增加。

传热的增强与削弱

无论是通过平壁的传热，还是通过圆筒壁的传热，传热量的计算式都可用

$$\Phi = KA\Delta t \quad \text{或写成} \quad \Phi = \frac{\Delta t}{R}$$

一、增强传热（P282）

1. 加大传热温差

2. 若传热温差不变时，应减小传热热阻R

对于单层平板面的传热问题的传热热阻为

$$R = \frac{1}{A_1 h_1} + \frac{d}{l A_m} + \frac{1}{A_2 h_2}$$

$$R=R_{h1}+R_l+R_{h2}=\frac{1}{A_1h_1}+\frac{d}{lA_m}+\frac{1}{A_2h_2}$$

- ① 减少导热热阻 选用热导率大的薄金属壁、减少表面的污垢。
- ② 减小对流传热热阻 减薄或破坏边界层（提高流速、采用短管、在对流传热热阻大的一侧加装肋片……）。
- ③ 减小辐射传热热阻 增大辐射系统间的发射率、增加物体间的角系数、提高辐射源的温度等。

注意： a. 减小最大的热阻
b. 考虑问题要全面

二、削弱传热（P285）

$$\Phi = KA\Delta t = \frac{\Delta t}{R}$$

● 可采取的措施

减小传热温差； 减小传热面积； 增大传热热阻R

工程上使用最广泛的方法是在管道和设备上覆盖保温隔热材料，使其导热热阻大大增加，总热阻增大，从而削弱传热。

● 保温隔热的目的

- ① 减少热损失； ② 保证流体温度； ③ 保证设备的正常运行；
- ④ 减少环境热污染； ⑤ 保证工作人员的安全。

● 对保温材料的要求（P286）

● 最佳厚度的确定； 保温结构； 保温隔热效果