

第十章 传热和换热器

- 传热过程

热量从壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程

- 传热方程式

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta t$$



关键

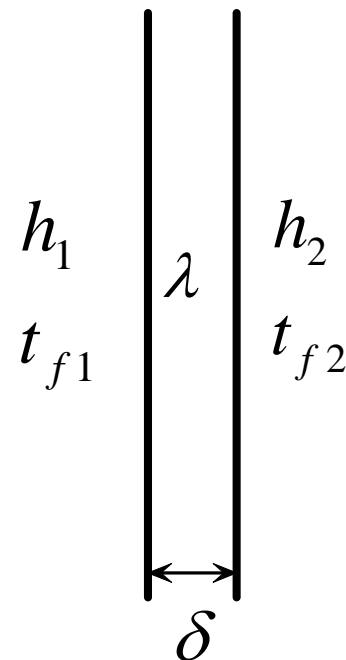


关键

光滑壁面的总传热系数

通过平壁的传热

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



说明：（1） h_1 和 h_2 为复合换热表面传热系数

（2）两侧面积相等

§ 10-1 通过肋壁的传热

肋侧总面积

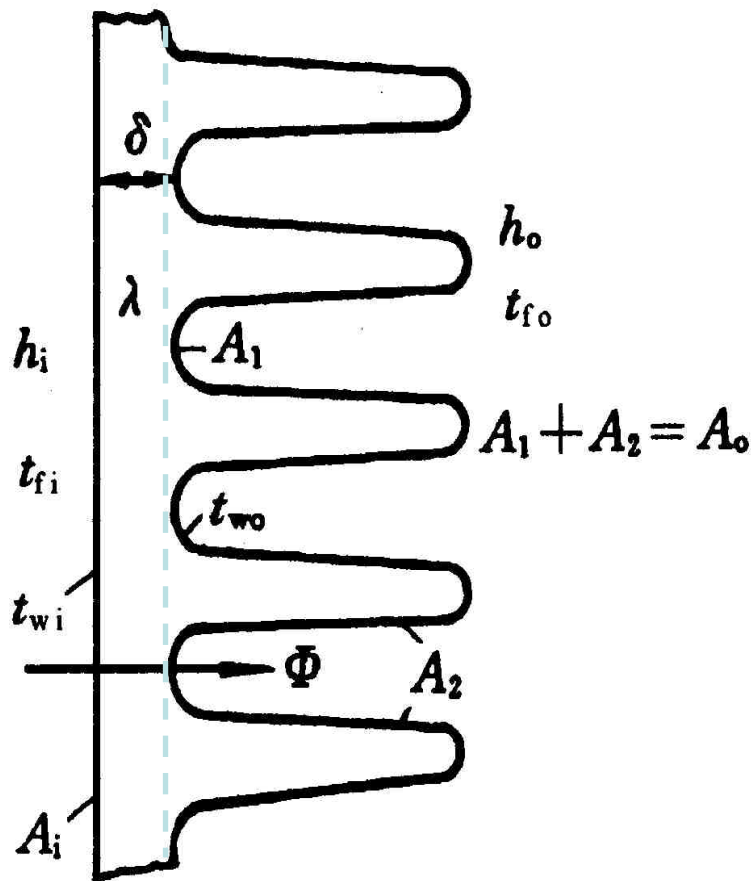
$$A_o = A_1 + A_2$$

$$\Phi = h_i A_i (t_{f1} - t_{wi})$$

$$\Phi = \lambda A_i \frac{t_{wi} - t_{wo}}{\delta}$$

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

$$+ h_o \eta_f A_2 (t_{wo} - t_{fo}) = h_o \eta_o A_o (t_{wo} - t_{fo})$$

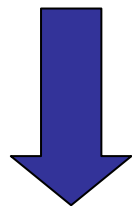


$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\delta}{\lambda A_i} + \frac{1}{h_o \eta_o A_o}} = \frac{A_i (t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{A_i}{h_o \eta_o A_o}}$$

定义肋化系数 $\beta = A_o / A_i$

则传热系数为 $k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o \eta_o \beta}}$

$$\frac{\Delta t_i}{R_i} = \text{Const.}$$



- 壁温靠近热阻最小的一侧流体的平均温度
纸杯烧开水
- 金属壁导热热阻小，温差小，所以可认为金属内外壁温度一致

强化传热的突破口

在一定的温差下，强化传热应从**热阻最大**的环节入手。

肋片要加装在表面传热系数较低的一侧，以降低加肋侧的热阻。

- 有一台采暖用的散热器，用管内的热水来加热管外的空气。为了提高散热器的散热效果，如何加装肋片？

第十章 传热和换热器

§ 10-3 传热的增强和削弱

一、传热学的目的

1、传热的强化

①设备尺寸减小 空调

②得到有效冷却 电子元器件

二、强化传热

1、原则

强化传热应从**热阻最大**的环节入手

2、途径

主要集中在对流换热

3、对流换热的强化

① 从换热过程的物理机制来分析

无相变： 减薄边界层、增加流体的扰动

有相变 { 凝结： 减薄液膜、形成珠状凝结
 { 沸腾： 增加汽化核心数

② 从对流换热的实验规律来分析

无相变:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n$$

$$\frac{hd}{\lambda} = 0.023 \left(\frac{\rho u d}{\eta} \right)^{0.8} \left(\frac{\eta c_p}{\lambda} \right)^n$$

$$h = 0.023 \frac{\lambda^{0.6} c_p^{0.4}}{\eta^{0.4}} \frac{(\rho u)^{0.8}}{d^{0.2}}$$

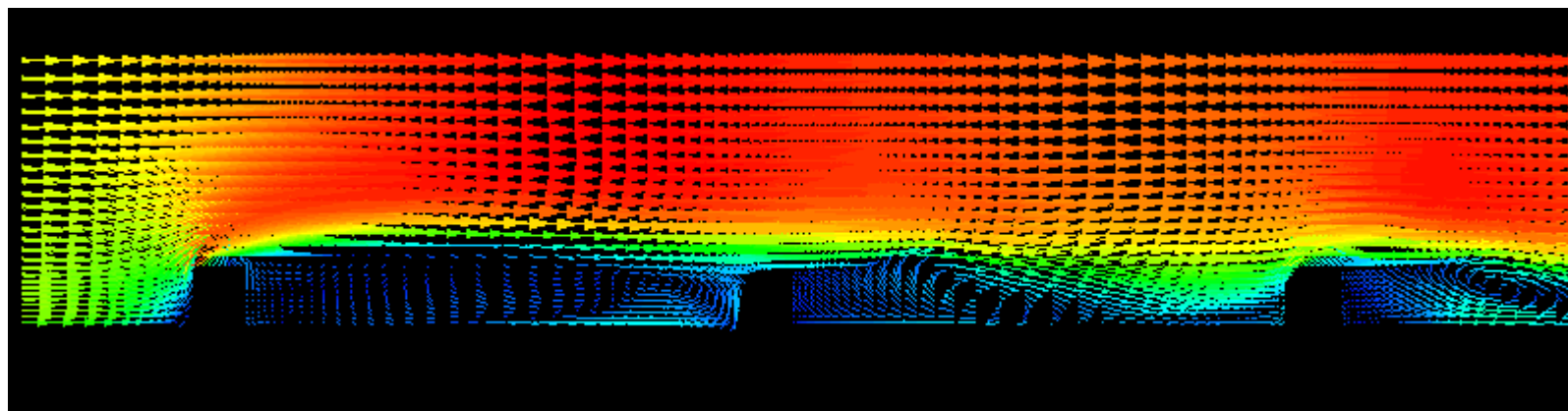
提高流速

减小管径

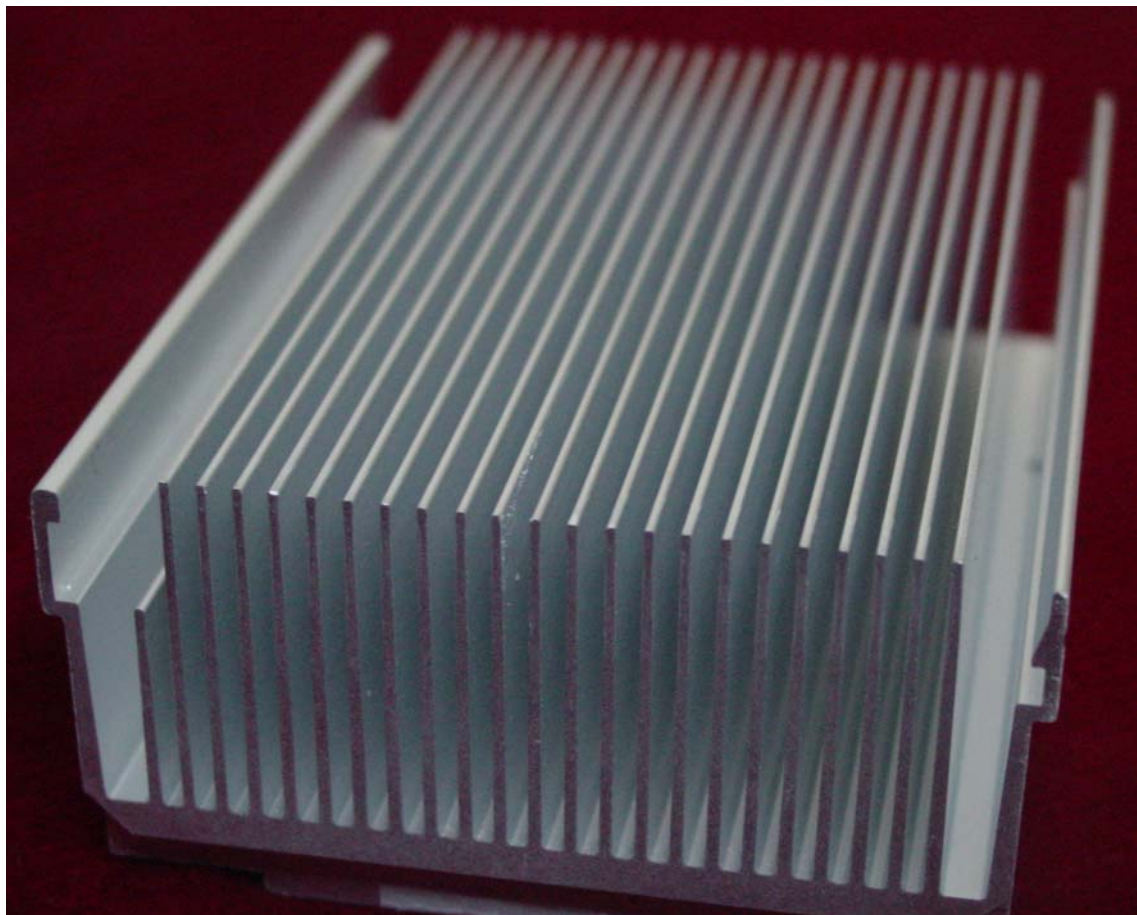
改变物性

这一分析适用于所有单相对流换热

③ 强化单相对流换热的技术手段



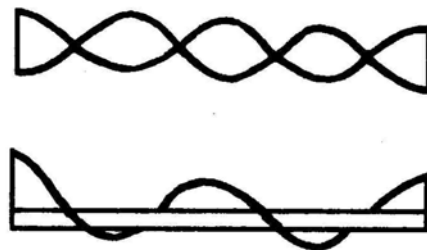
粗糙表面



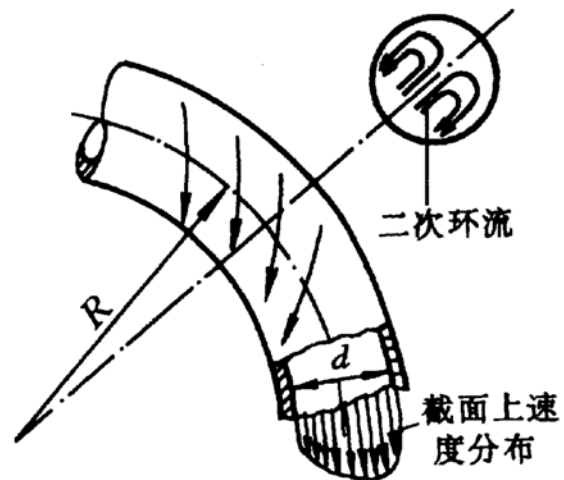
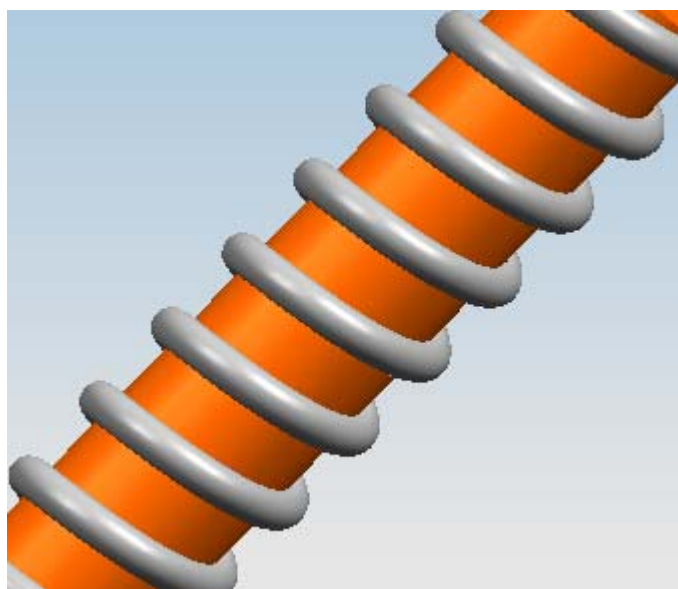
扩展表面



(a) 扰流元件



(b) 涡流发生器



螺旋管

椭圆管

- 无源技术(被动技术)
- 有源技术(主动技术)

其主要手段有:

- ① 对换热介质做机械搅拌;
- ② 使换热表面振动;
- ③ 使换热流体振动;
- ④ 将电磁场作用于流体

⑤ 除垢

在换热器运行过程

4、对流换热的强化一般都带来流动阻力的增加

三、隔热保温技术

1、工业应用

- 热力设备、工程管路
- 建筑节能
- 低温液化气体的储存和运输
- 航天器返回

2、分类

- 高于环境温度的热力设备
保温：防止热量散失
- 低于环境温度的工质和容器
隔热：防止热量传入

3、保温效率 η

$$\eta = \frac{\Phi_0 - \Phi_x}{\Phi_0}$$

一般 η 应大于90%

削弱传热的主要方法

覆盖热绝缘材料

材料 { 一般性的绝热材料
超细粉末颗粒热材料
多层真空绝热材料

改变表面状况和材料结构

热辐射: 对表面进行选择涂涂层

热传导: 利用空气夹层隔热

热对流: 蜂窝状结构

复习

1. 传热方程式
2. 通过平壁的传热系数
3. 通过肋壁的传热系数
4. 强化传热的原则及方法（写出五种）

复习

1. 传热方程式

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta t$$

2. 通过平壁的传热系数

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

3. 通过肋壁的传热系数

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o \eta_o \beta}}$$

4. 强化传热的原则及方法

强化传热应从**热阻最大**的环节入手

第十章 传热和换热器

§ 10-4 换热器的形式和基本构造

换热器的定义

用来使热量从热流体传递到冷流体，以满足规定的工艺要求的装置

换热器 (Heat Exchanger) 的主要形式

间壁式 (Unidirectional Heat Exchange): 冷热流体分别位于固体壁面两侧。

燃气加热器、冷凝器、蒸发器

混合式 (Direct-contact Heat Exchange): 冷热流体混合进行传热。

喷淋冷却塔、空调扇

蓄热式 (回热式) (regenerative heat exchanger): 由蓄热材料组成, 并分成两半, 冷热流体轮流通过它的一半通道, 交替式地吸收和放出热量。

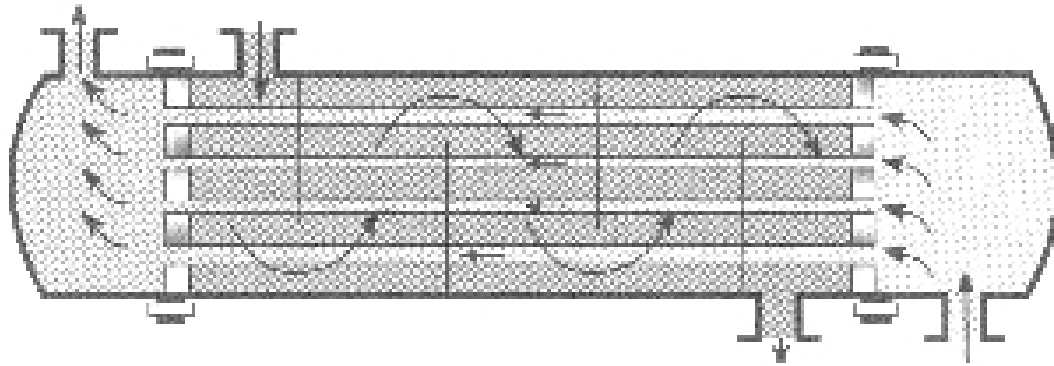
空气预热器、全热回收器

间壁式换热器有以下几种形式

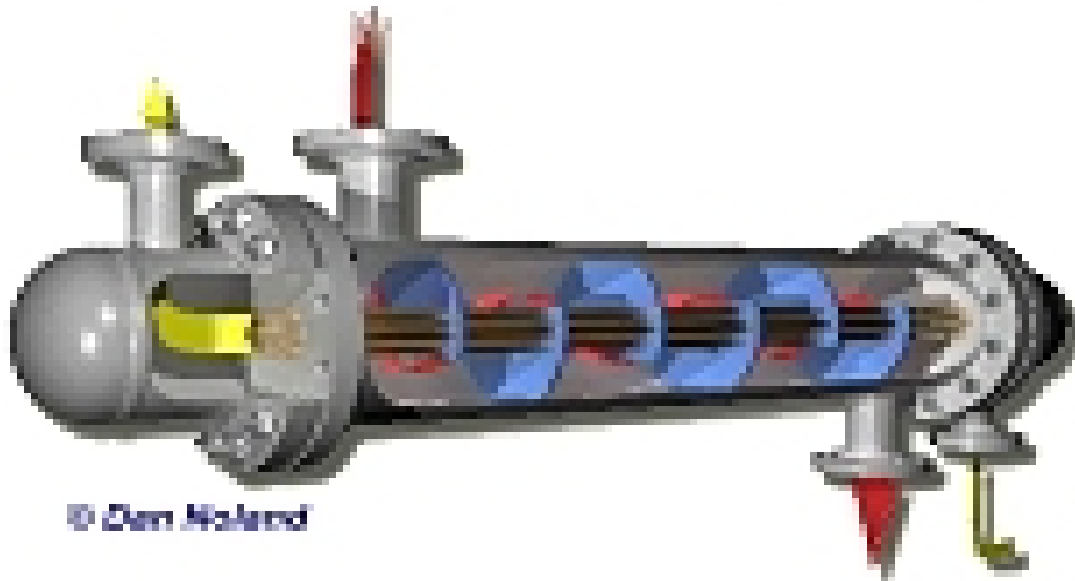
管壳式换热器

板式换热器

肋片管式换热器



管程
壳程



管壳式换热器

管程 (Tube Pass): 由管子组成的通道

壳程 (Shell Pass): 管外壳内通道

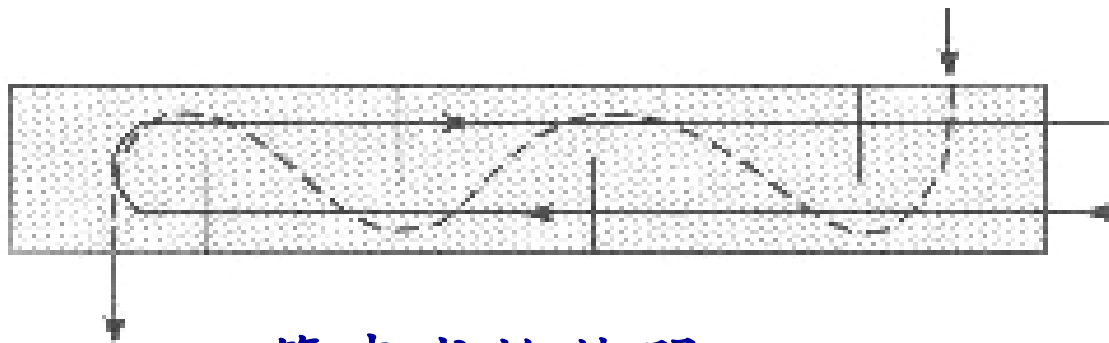
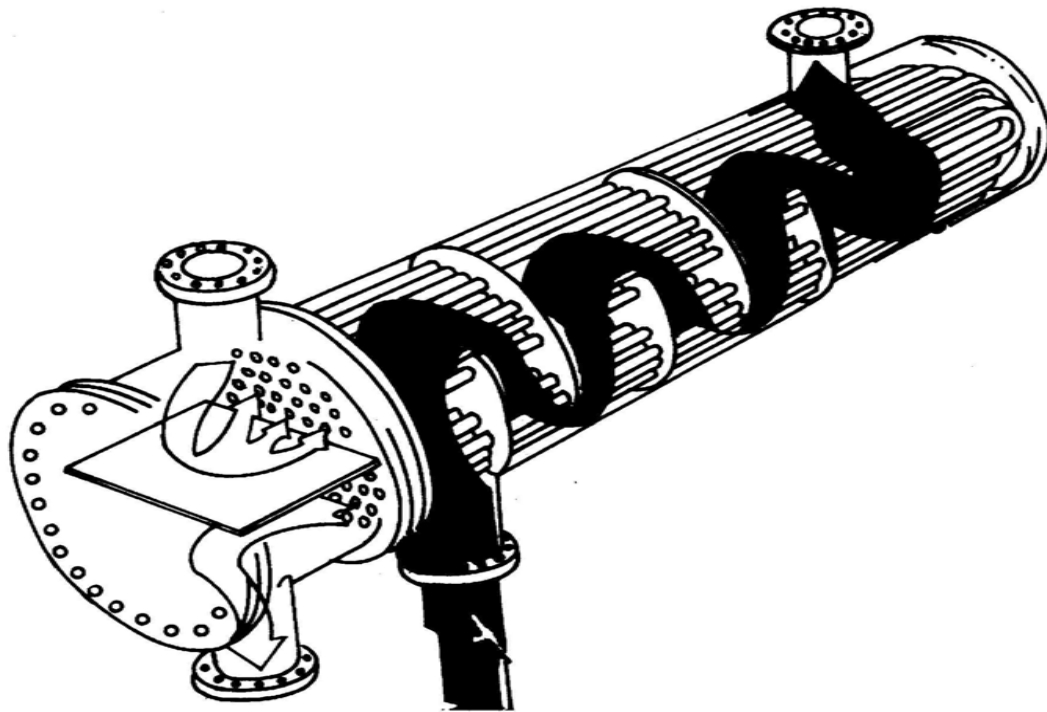
管程数: 流体在管内流动方向数

壳程数: 流体在壳内流动方向数

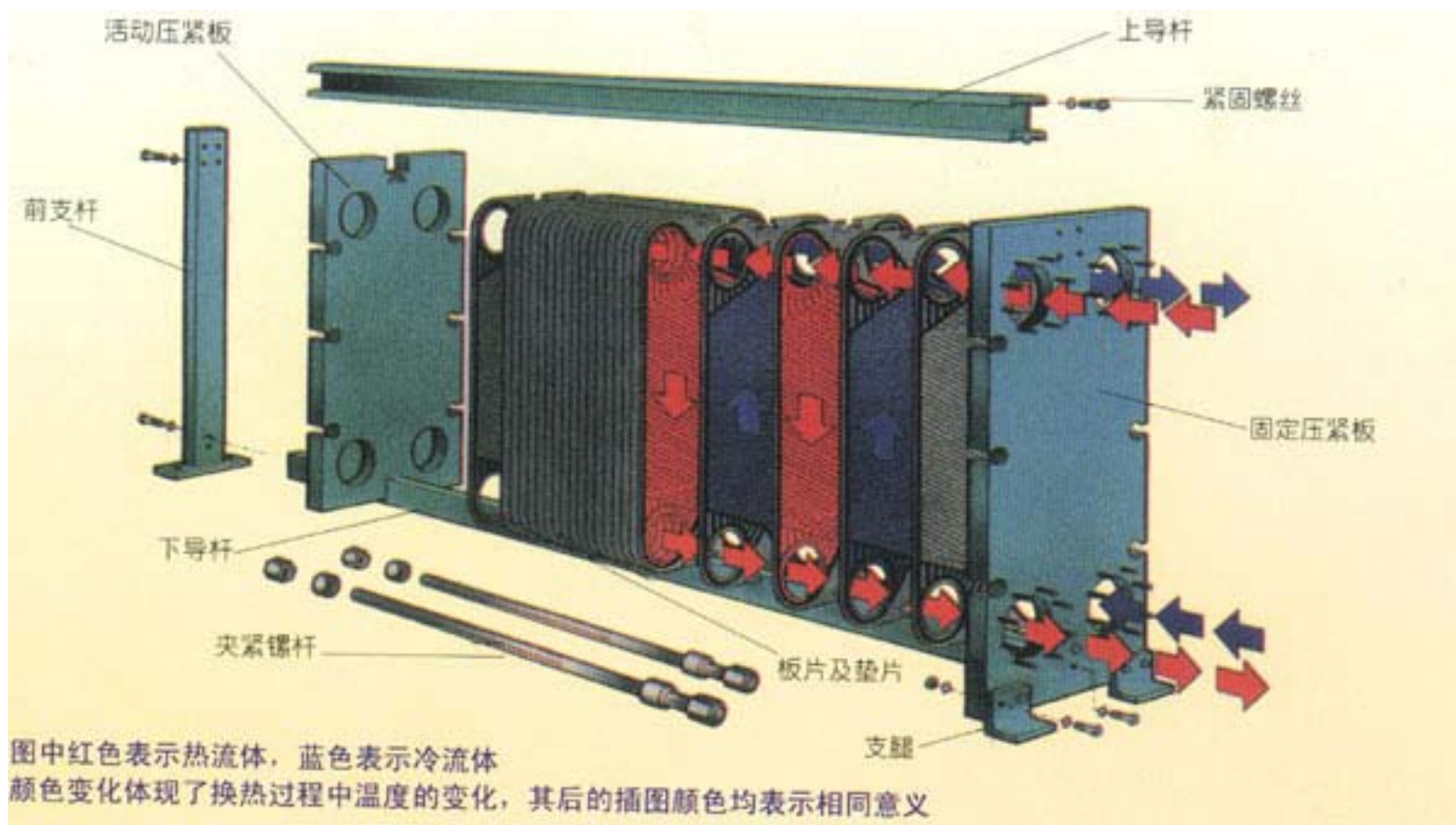
壳管式换热器的命名 壳程数-管程数

1-2型: 壳程为1, 管称为2;

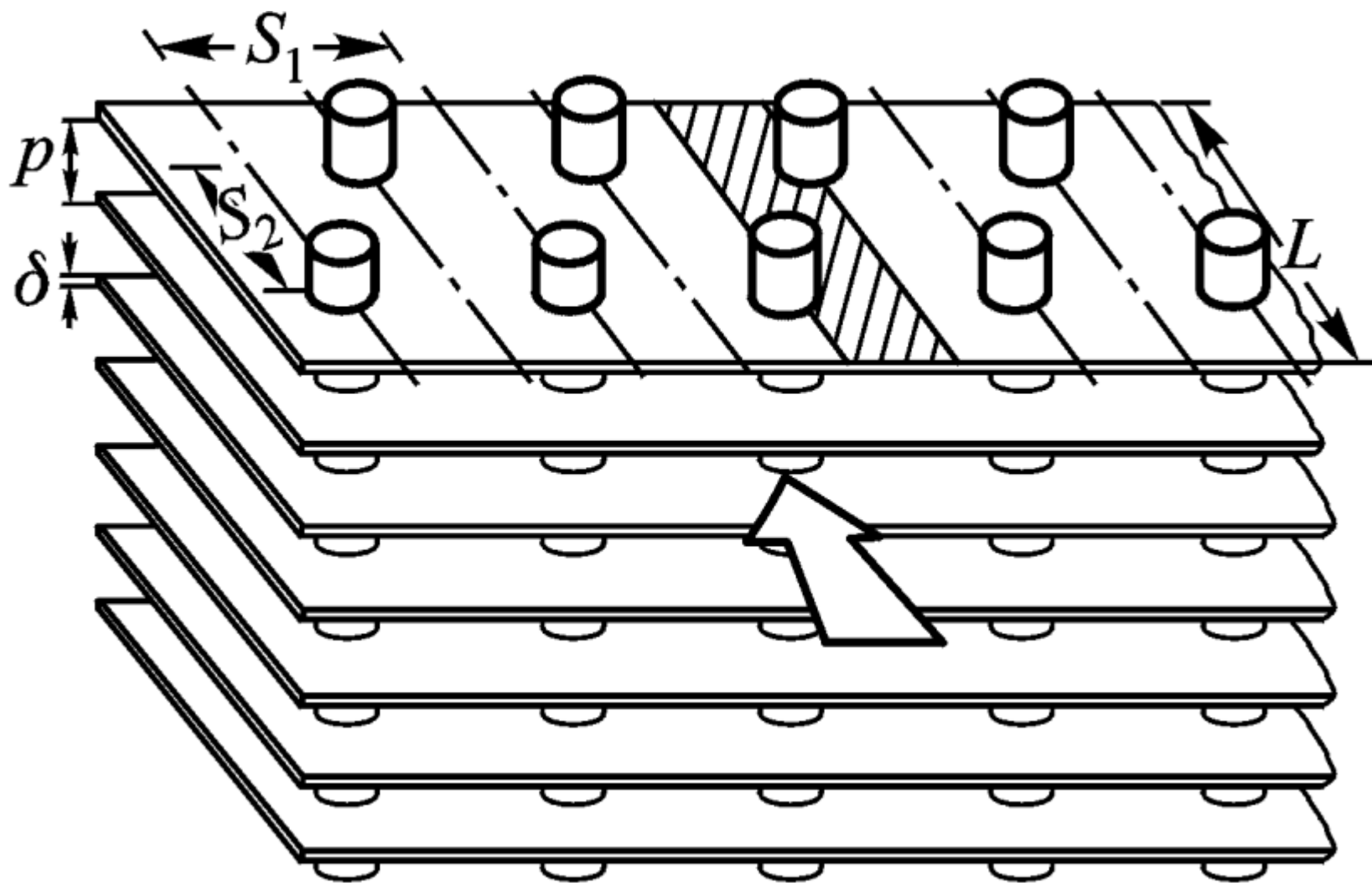
2-4型: 壳程为2, 管称为4。



管壳式换热器



板式换热器

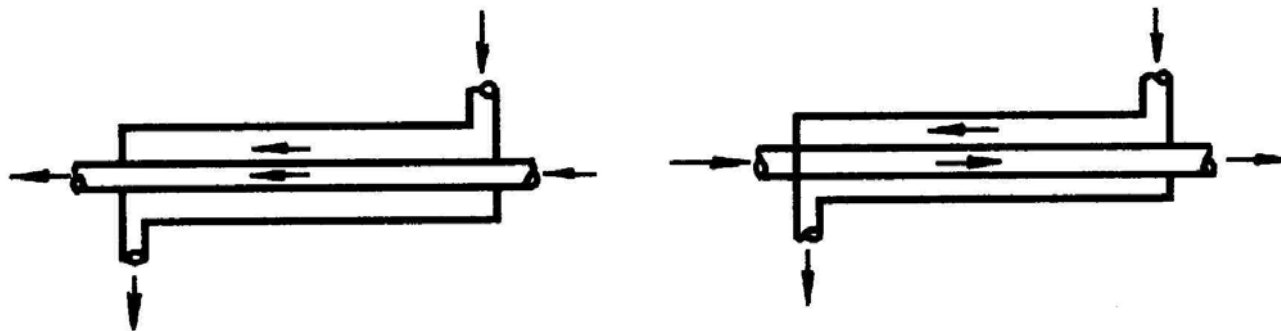


肋片管（翅片管）式换热器

第十章 传热和换热器

§ 10-5 平均温差

一、简单顺、逆流换热器平均温差的计算



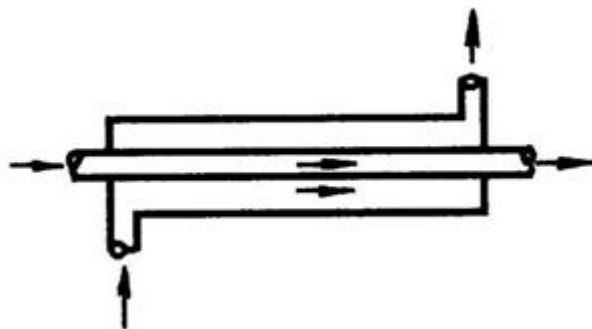
传热方程的一般形式

$$\Phi = kA \Delta t_{\dot{m}}$$

注意

1、简化模型

以顺流情况为例



假设:

- 冷热流体的质量流量 q_{m2} 、 q_{m1} 以及比热容 c_2 、 c_1 是常数;
- 传热系数是常数;
- 换热器无散热损失;
- 换热面沿流动方向的导热可以忽略不计。

2、分析方法

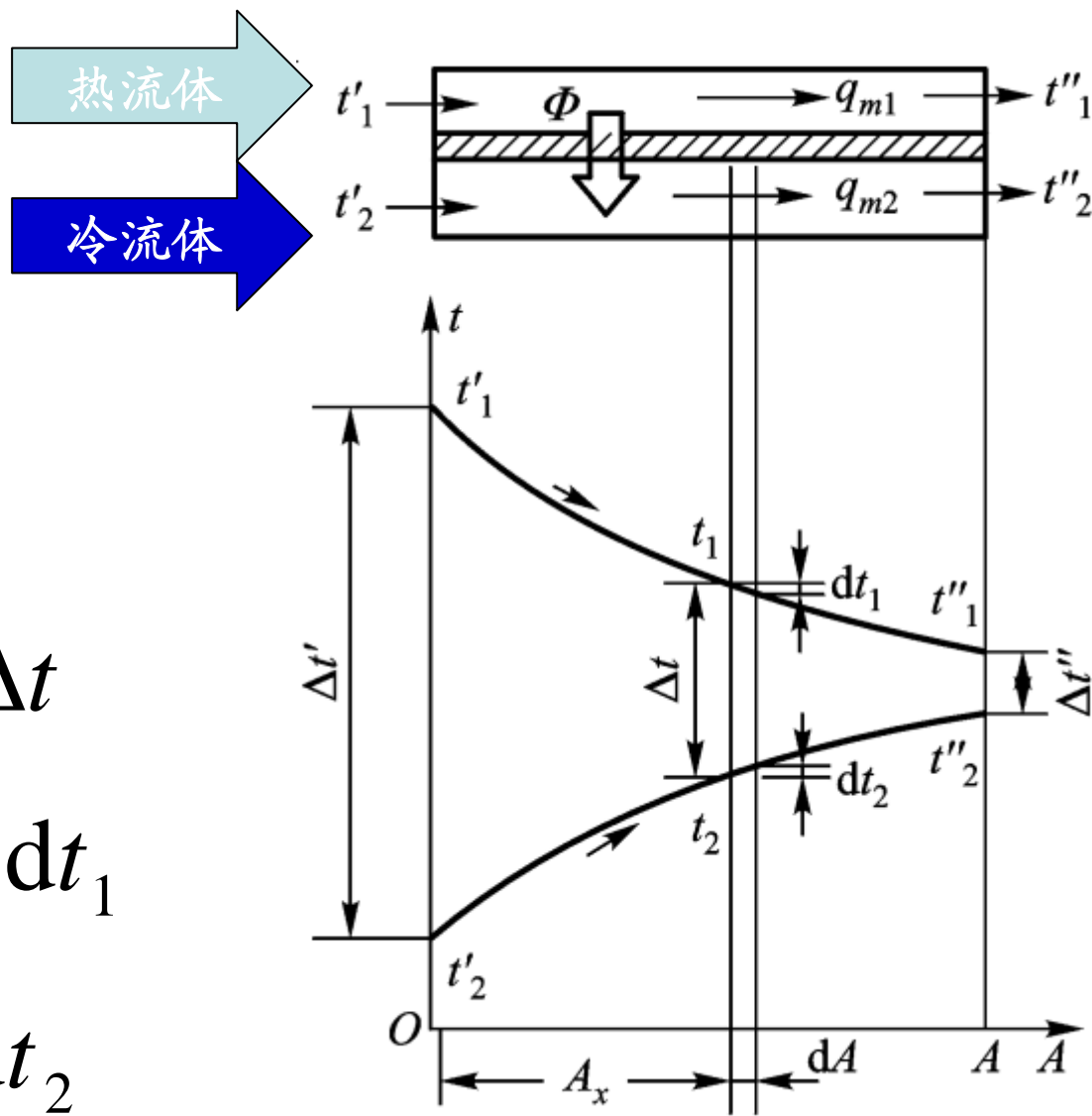
取 x 处一微元来分析

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

$$d\Phi = k \cdot dA \cdot \Delta t$$

$$d\Phi = -q_{m1} c_1 \cdot dt_1$$

$$d\Phi = q_{m2} c_2 \cdot dt_2$$



$$d\Phi = -q_{m1}c_1 \cdot dt_1$$

$$\Rightarrow dt_1 = -\frac{1}{q_{m1}c_1} d\Phi$$

$$d\Phi = q_{m2}c_2 \cdot dt_2$$

$$\Rightarrow dt_2 = \frac{1}{q_{m2}c_2} d\Phi$$

$$d\Delta t = d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2$$

$$d\Delta t = -\left(\frac{1}{q_{mh}c_h} + \frac{1}{q_{mc}c_c}\right) d\Phi = -\mu d\Phi$$

$$d\Phi = k \cdot dA \cdot \Delta t$$


$$d\Delta t = -\mu d\Phi = -\mu k \cdot dA \cdot \Delta t$$

$$\longrightarrow \frac{d\Delta t}{\Delta t} = -\mu k dA$$

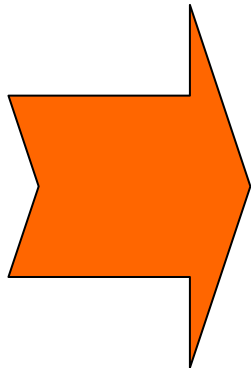
$$\longrightarrow \int_{\Delta t'}^{\Delta t_x} \frac{d\Delta t}{\Delta t} = -\mu k \int_0^{A_x} dA$$

$$\longrightarrow \ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t'} = -\mu k A_x$$

$$\Delta t_x = \Delta t' \cdot e^{(-\mu k A_x)}$$

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

$$\Delta t_m = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t' e^{-\mu k A_x} dA_x$$



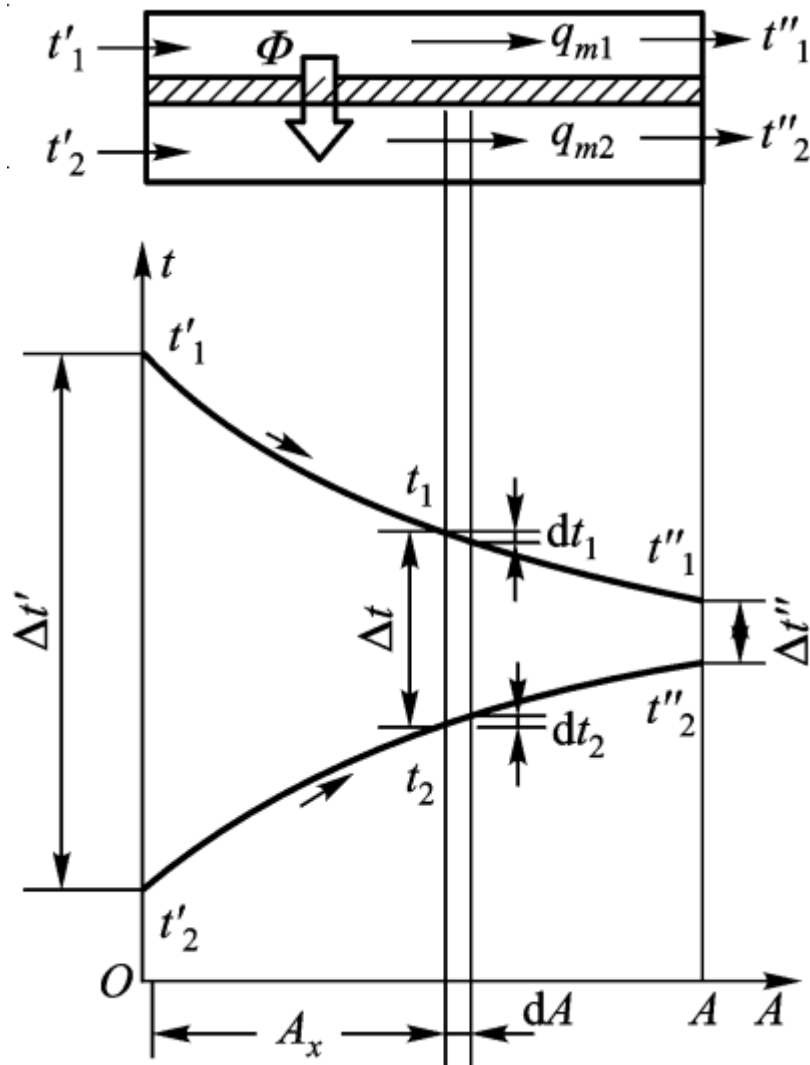
$$= \frac{\Delta t'}{A} \left(-\frac{1}{\mu k} e^{-\mu k A_x} \Big|_0^A \right)$$

$$= -\frac{\Delta t'}{\mu k A} (e^{-\mu k A} - 1)$$

$$\Delta t_m = -\frac{\Delta t'}{\mu k A} (e^{-\mu k A} - 1)$$

$$\Delta t_x = \Delta t' \cdot e^{(-\mu k A_x)}$$

$$\Delta t_m = -\frac{1}{\mu k A} (\Delta t'' - \Delta t')$$



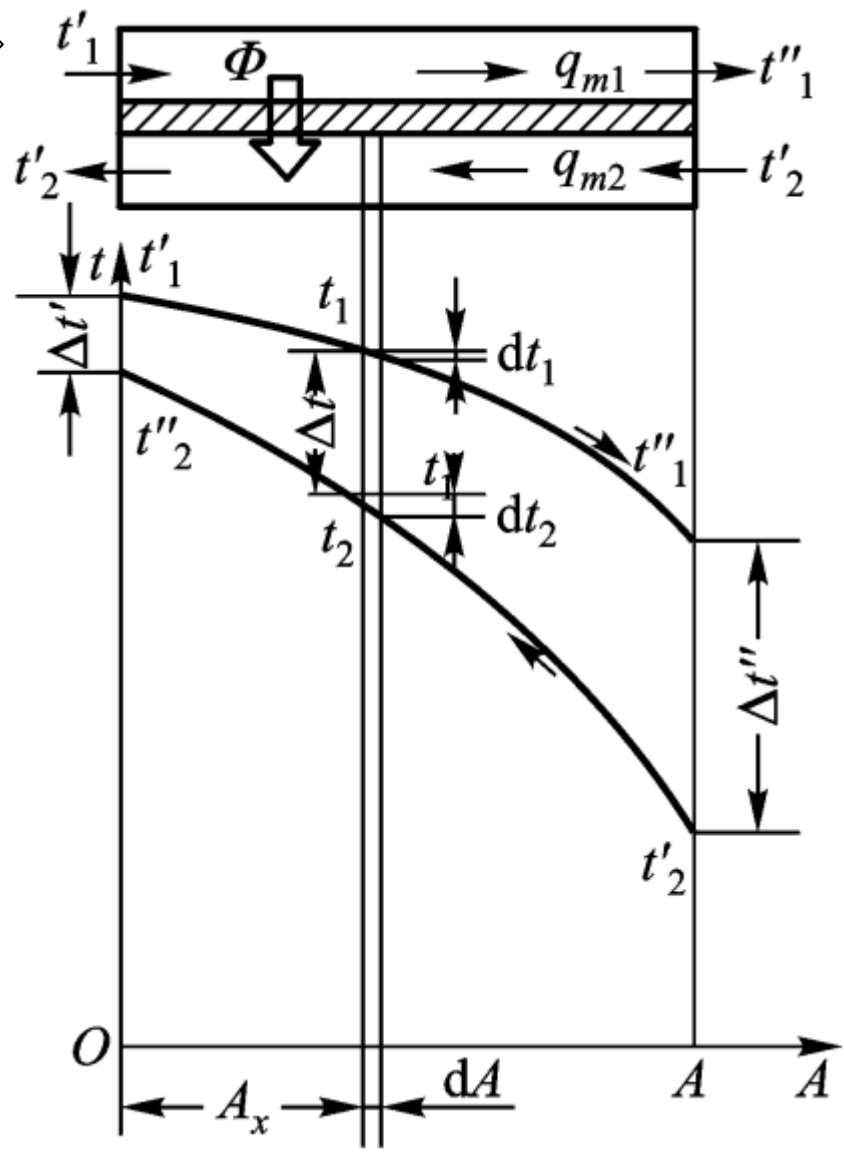
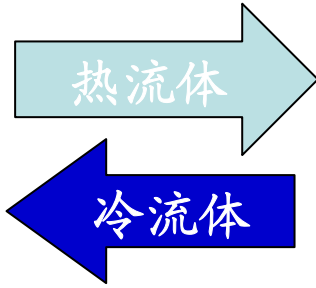
$$\Delta t_m = -\frac{1}{\mu k A} (\Delta t'' - \Delta t')$$

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

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}}$$

对数平均温差
LMTD

逆流时 (课后作业)

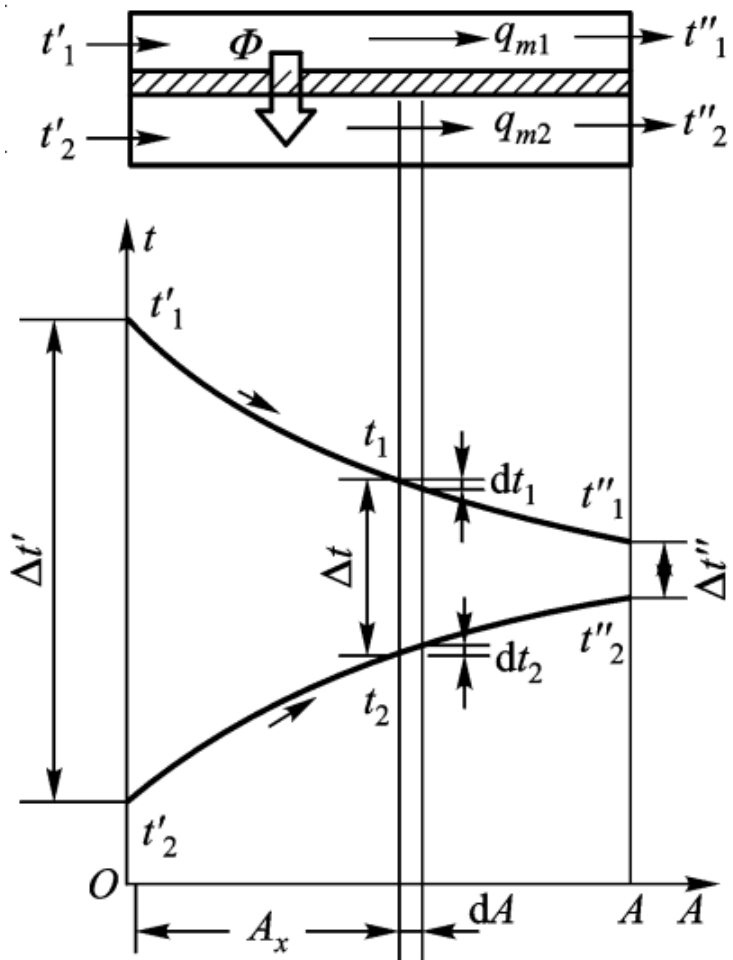


$$\Delta t = t_1 - t_2$$

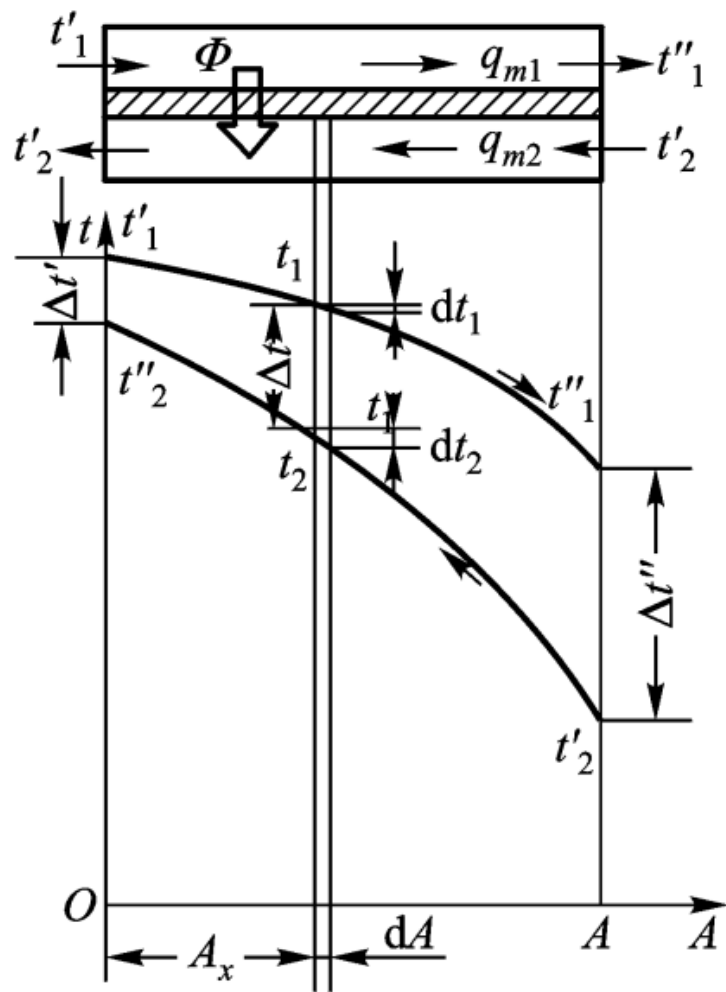
$$d\Phi = k \cdot dA \cdot \Delta t$$

$$d\Phi = -q_{m1}c_1 \cdot dt_1$$

$$d\Phi = -q_{m2}c_2 \cdot dt_2$$



$$\Delta t' = t'_1 - t'_2 \quad \Delta t'' = t''_1 - t''_2$$



$$\Delta t' = t'_1 - t'_2 \quad \Delta t'' = t''_1 - t''_2$$

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

$$\Delta t_{\max} = \max(\Delta t', \Delta t'')$$

$$\Delta t_{\min} = \min(\Delta t', \Delta t'')$$

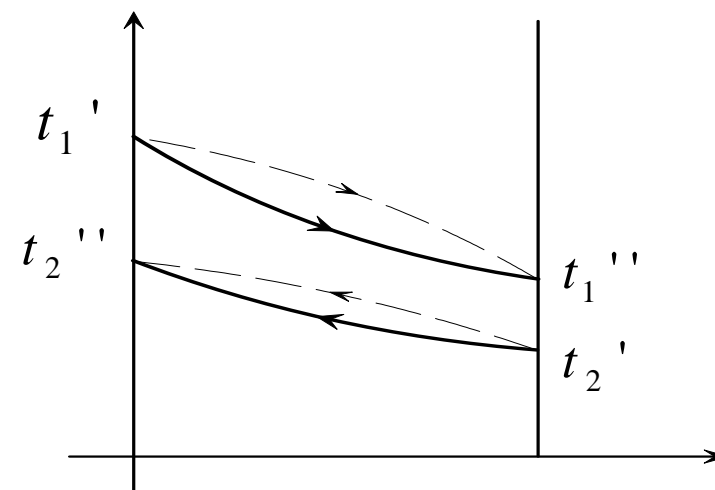
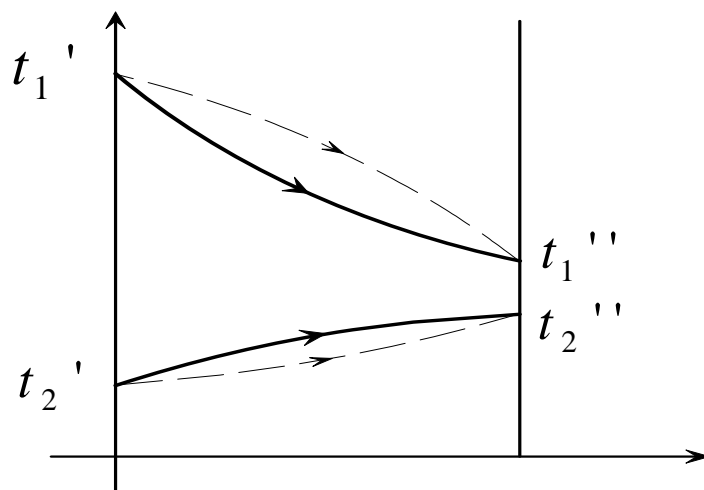
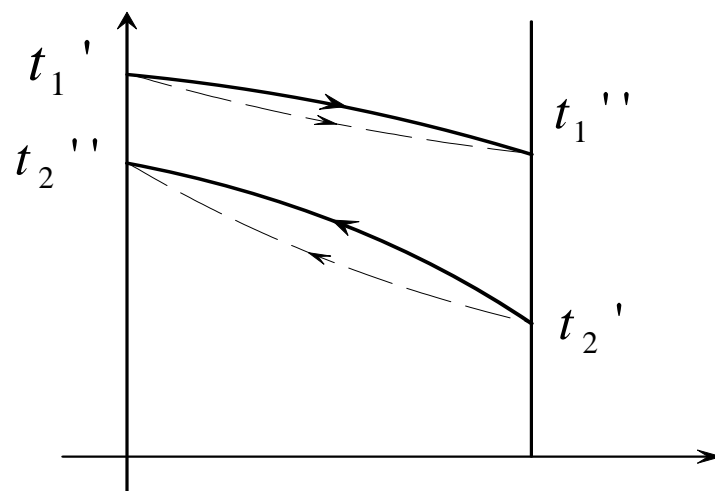
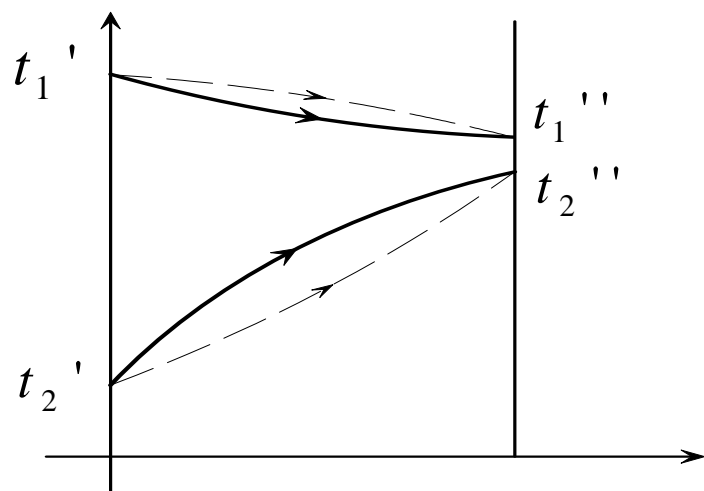
3、算术平均温差

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2}$$

$$\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} \leq 2 \quad \leq 4\%$$

$$\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} \leq 1.7 \quad \leq 2.3\%$$

4、温度曲线



三、其它复杂流动布置时平均温差的计算

$$\Delta t_m = \psi (\Delta t_m)_{ctf}$$

- $(\Delta t_m)_{ctf}$ 是给定的冷热流体的进出口温度布置成逆流时的LMTD
- ψ 是小于1的修正系数

1、 ψ 值取决于无量纲参数 P 和 R

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

2、 P 的物理意义

流体2的实际温升与理论上所能达到的最大温升之比，所以只能小于1

3、 R 的物理意义

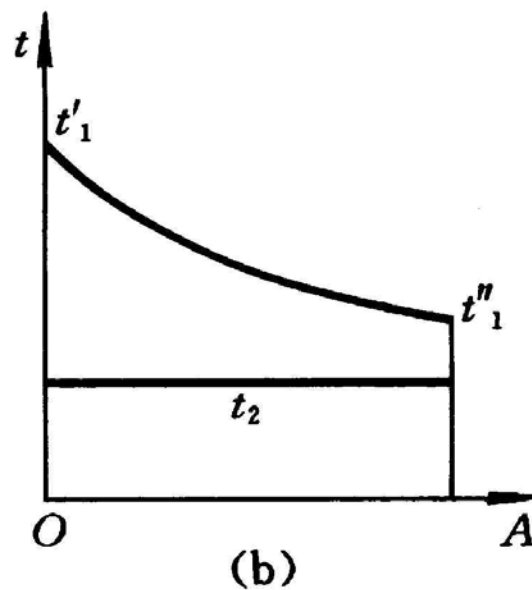
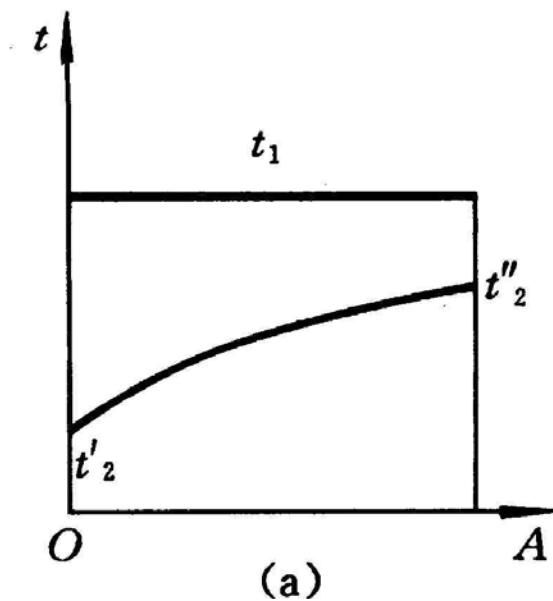
两种流体的热容量之比

四、各种流动形式的比较

1、顺流和逆流

- 顺流和逆流是两种极端情况，在相同的进出口温度下，逆流的平均温差最大，顺流的平均温差最小；
- 顺流时 $t_2'' < t_1''$ ，而逆流时， t_2'' 则可能大于 t_1'' ，可见，逆流布置时的换热最强；
- 逆流时，冷热流体的最高温度集中在换热器的同一侧，使得该处的壁温特别高。

2、其中一种流体发生相变



✓ 这时候没有顺流和逆流之分

第十章 传热和换热器

§ 10-6 换热器计算

一、目的、依据和方法

1、目的

- 设计一个新的换热器，以确定所需的换热面积
设计计算 design calculation
- 对已有或已选定了换热面积的换热器，在非设计工况条件下，核算它传递多少热量
校核计算 performance calculation

2、基本方程

- 传热方程式

$$\Phi = kA\Delta t_m$$

- 热平衡方程式

$$\begin{aligned}\Phi &= q_{m1}c_1(t_1' - t_1'') \\ &= q_{m2}c_2(t_2'' - t_2')\end{aligned}$$

 Φ k A $q_{m1}c_1$ $q_{m2}c_2$ $t_1' \quad t_1''$ $t_2' \quad t_2''$

其中
三个

3、方法

- 平均温差法

直接应用传热方程式和热平衡方程式进行热计算的方法

重点掌握

- 效能-传热单元数(ε -NTU)法

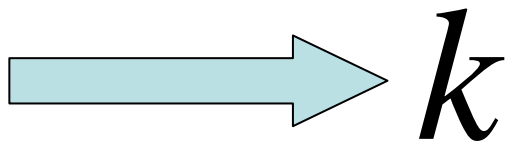
掌握有关概念

二、换热器热计算的平均温差法

1、设计计算

一般给定冷热流体的水当量和进出口温度中的三个，需要确定换热面积 A

①初步选定冷热流体的流动方向及换热表面型式



②由热平衡式求出冷热流体进出口温度中的那个未知的温度

③确定平均温差 $\Delta t_m = \frac{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$

④计算所需的换热面积A $A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta t_m}$

⑤核算冷热流体的流动阻力，如过大则需要改变方案重新设计。

2、校核计算

一般给定换热器的结构、面积、冷热流体的进口温度和水当量，校核该换热器能否达到要求：

- 能否把热流体冷却到给定温度
- 或能否把冷流体加热到给定温度

三、换热器热计算的效能-传热单元数法

1、换热器的效能

$$\varepsilon = \frac{|t' - t''|_{\max}}{t_1' - t_2'}$$

- 分子为冷流体或热流体在换热器中的进出口温差的最大值
- 分母为换热器中可能发生的最大温差

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

已知 ε 后

$$\Phi = (q_m c)_{\min} \varepsilon (t_1' - t_2')$$

2、传热单元数

$$\text{NTU} = \frac{kA}{(q_m c)_{\min}}$$

重要的设计参数

3、 ε 与哪些变量有关

$$\varepsilon = f\left(\text{NTU}, \frac{(q_m c)_{\min}}{(q_m c)_{\max}}\right)$$

- 顺流

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

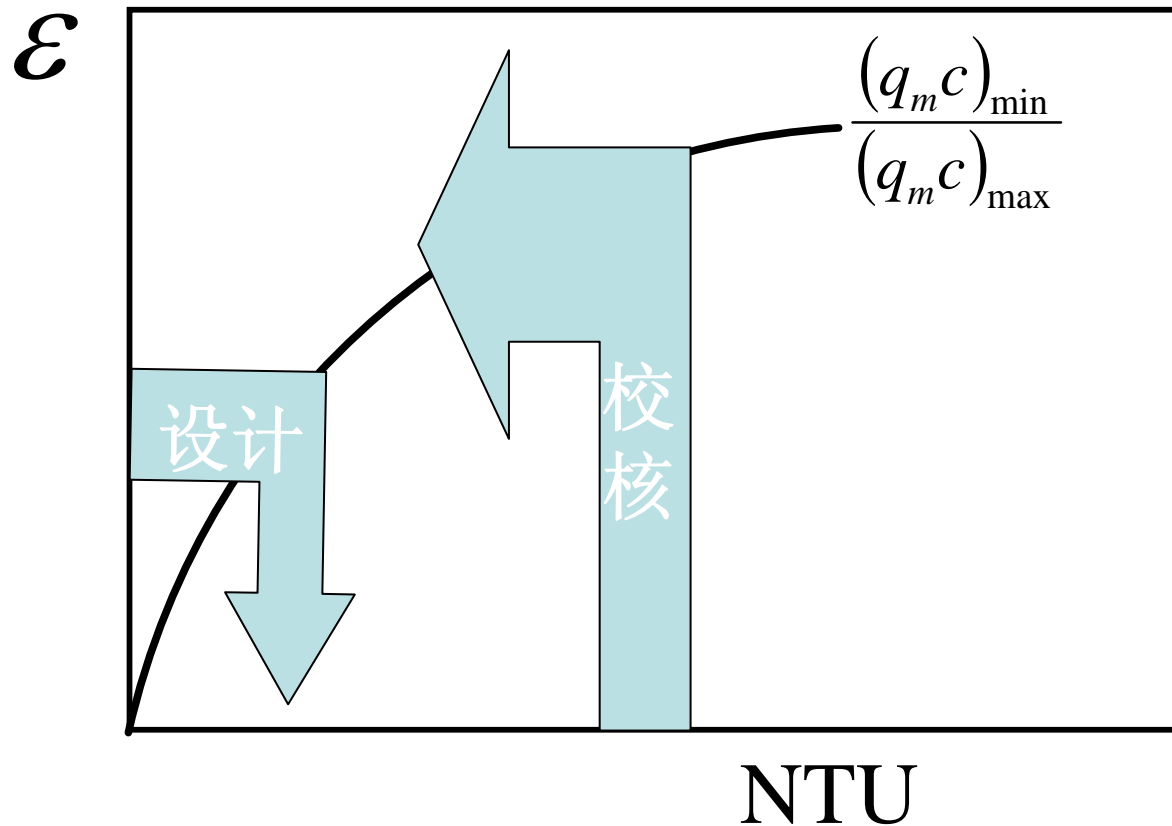
- 逆流

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

- 其它

为了便于工程计算，绘制成线算图如10-17~21

4、利用 ε -NTU 图进行换热器的热计算



污垢热阻

thermal resistance of fouling

污垢热阻的危害

- 换热表面由于水垢、污泥、油污等覆盖而引起的附加热阻
- λ 很小

水垢约 $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、灰垢 $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$



已知:

$$q_{m1} = 2\text{kg/s} \qquad c_1 = 2260\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$
$$t_1' = 160^\circ\text{C} \qquad t_1'' = 60^\circ\text{C}$$
$$q_{m2} = 2\text{kg/s} \qquad c_2 = 4179\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$
$$t_2' = 25^\circ\text{C}$$
$$d_o = 0.5\text{m} \qquad k = 250\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

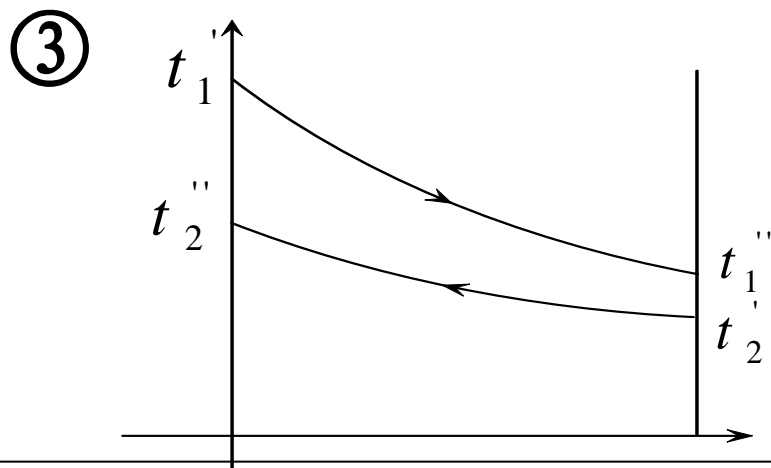
求：管长

这是设计计算

$$\textcircled{1} \left\{ \begin{aligned} \Phi &= q_{m1}c_1(t_1' - t_1'') = 2 \times 2260 \times (160 - 60) \\ &= 4.52 \times 10^5 \text{ W} \\ t_2'' &= t_2' + \frac{\Phi}{q_{m2}c_2} = 25 + \frac{4.52 \times 10^5}{2 \times 4179} = 79^\circ\text{C} \end{aligned} \right.$$

$$\textcircled{2} \quad t_1'' = 60^\circ\text{C} \quad t_2'' = 79^\circ\text{C}$$

$t_2'' \geq t_1''$ 换热器必须逆流布置



$$\textcircled{4} \quad \Delta t_m = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln[(t_1' - t_2'') / (t_1'' - t_2')]} = \frac{(160 - 79) - (60 - 25)}{\ln \frac{160 - 79}{60 - 25}}$$
$$= 54.82^\circ\text{C}$$

$$\textcircled{5} \quad l = \frac{A}{\pi d_o} = \frac{1}{\pi d_o} \frac{\Phi}{k \Delta t_m}$$
$$= \frac{4.52 \times 10^5}{3.14 \times 0.5 \times 250 \times 54.82} = 21 \text{ m}$$