

# 第四章 传 热

4.1 概述

4.2 热传导

4.3 对流传热概述

4.4 对流传热系数关联式

4.5 传热过程计算

4.6 辐射传热

4.7 换热器

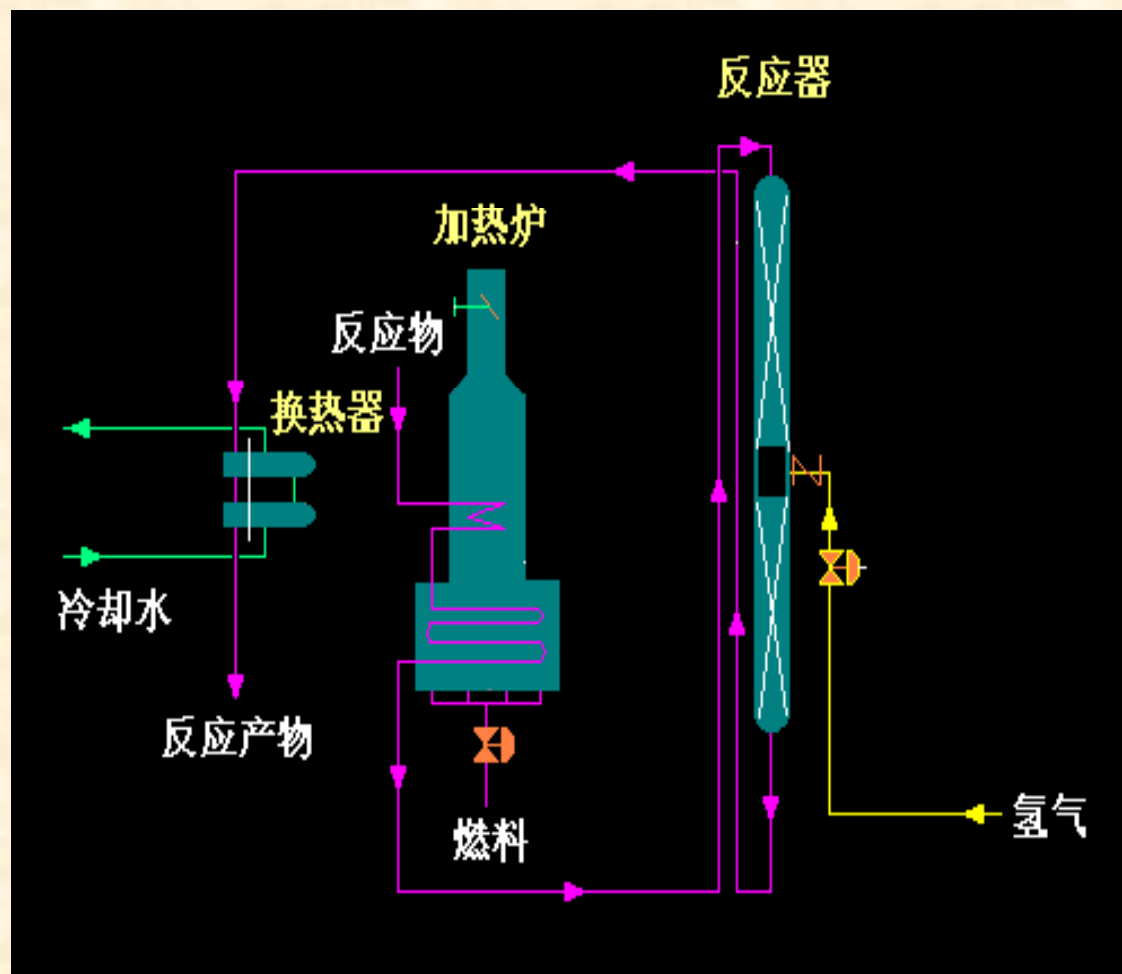
## 本章基本要求

- ◆了解**热传导**基本原理，掌握**傅立叶定律**及平壁、圆筒壁的热传导计算；
- ◆了解**对流传热**的基本原理、**牛顿冷却定律**及影响对流传热的因素；
- ◆掌握对流传热系数的物理意义和经验关联式的用法、使用条件及注意事项；
- ◆了解**辐射传热**的基本概念及基本定律；
- ◆熟练掌握**传热过程的计算**，**传热基本方程式**、**热流量**、**平均传热温度差**、**总传热系数的计算**；了解强化传热过程的途径；
- ◆了解工业生产中常用的换热器类型、结构、特点；掌握列管式换热器的**设计**、**选型**。

## 4.1 概述

### 传热过程在化工生产中的应用

- 化学反应
- 蒸发、蒸馏、干燥
- 高温或低温设备的隔热保温
- 热能的合理利用和废热回收。
- ◆ 强化传热过程
- ◆ 削弱传热过程



## 4.1 概述

### 基本概念

传热推动力和热量传递方向

传热推动力：温差

热量传递方向：从高温向低温传递

传热速率 $Q$ ：单位时间内通过传热面的热量，J/s，W。

热通量 $q$ ：单位面积的传热速率，J/(s,m<sup>2</sup>), W/m<sup>2</sup>。

$$q = \frac{dQ}{dS}$$

$$\text{传热速率} = \frac{\text{传热推动力 (温差)}}{\text{传热热阻}} = \frac{\Delta t}{R}$$

$$q = \frac{\Delta t}{R'}$$

## 4.1 概述

### 基本概念


#### 稳态传热和非稳态传热


稳态传热:  $Q, q, T = f(x, y, z)$

$$Q, q, T = f(x, y, z, \theta)$$

如不加说明一般都指稳态传热过程。

## 4.1 概述

传热的基本方式:  热传导、对流、辐射

一、**热传导**: 热量不依靠宏观混合运动而从物体中的高温区向低温区移动的过程叫热传导, 简称导热。 



## 热传导的特点

一、物体各部分没有相对位移

二、传热机理：依靠微观粒子（分子、原子、电子等）的无规则热运动

- 气体： 分子做不规则热运动时相互碰撞的结果


- 液体： 与气体类似，但机理复杂


- 固体： 导体：自由电子在晶格间的运动


- 非导体：通过晶格结构的振动来实现的

三、导热是物质的固有本质

## 4.1 概述

传热的基本方式：  热传导、对流、辐射

一、**热传导**：热量不依靠宏观混合运动而从物体中的高温区向低温区移动的过程叫热传导,简称导热。 

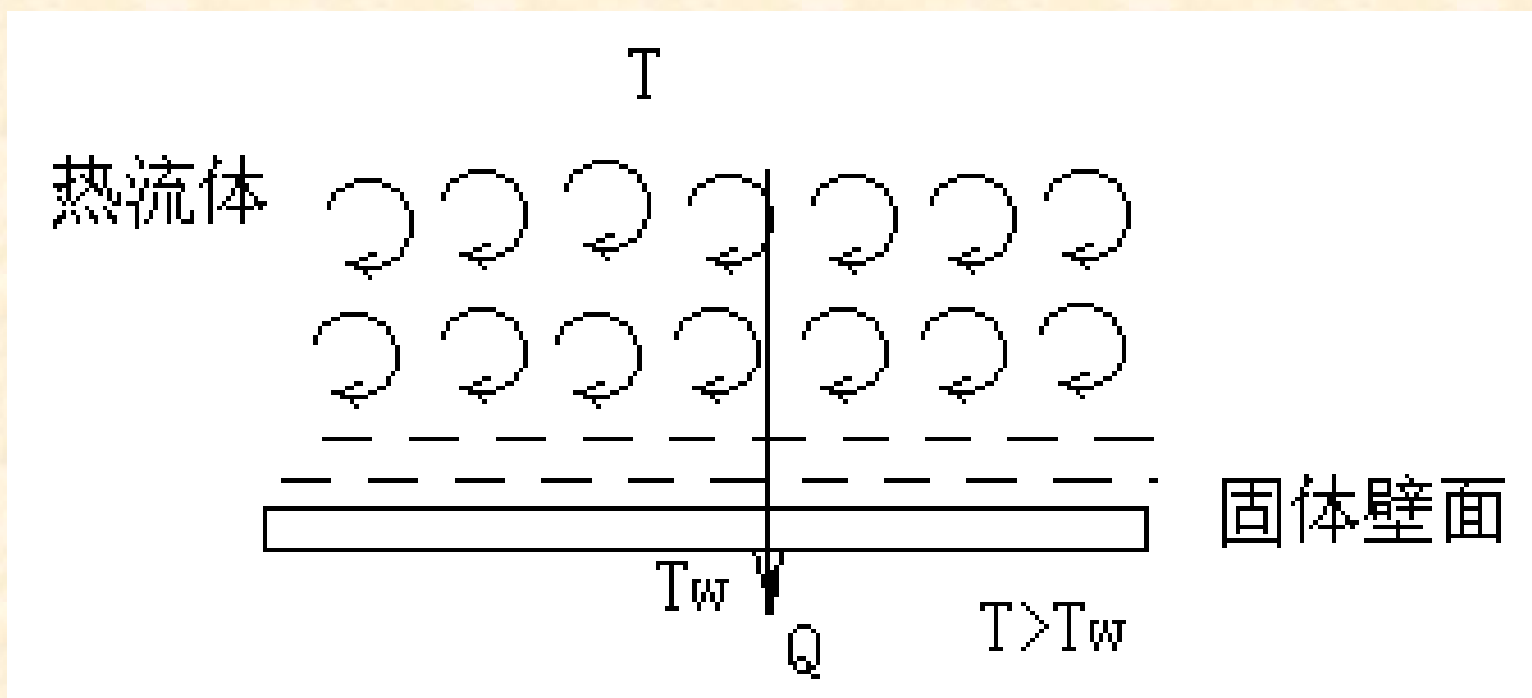
二、**对流**：对流是由流体**内部**各部分质点发生宏观运动而引起的热量传递过程,因而**对流只发生在有流体流动**的场合。 




## 二、对流

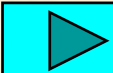
对流 { 自然对流：由密度差引起  
强制对流：由外力使质点强制运动引起

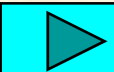
**对流传热（给热）**：流体与固体壁面之间的传热，包括**对流**和**热传导**两种传热方式，这是工程上遇到最多的一种传热方式。



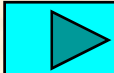
## 4.1 概述

传热的基本方式:  热传导、对流、辐射传热

一、**热传导**: 热量不依靠宏观混合运动而从物体中的高温区向低温区移动的过程叫热传导,简称导热。 

二、**对流**: 对流传热是由流体内部各部分质点发生宏观运动而引起的热量传递过程,因而**对流只发生在有流体流动**的场合。 

三、**热辐射**

物体因热的原因产生电磁波而发出辐射能的过程称为热辐射。 

### 三、热辐射的特点：

- ◆ 无需任何介质；可以在完全真空的地方传递，这是热辐射与热传导和对流传热的最大区别；
- ◆ 热辐射过程中既有能量的转移，也有能量形式的转换；即在高温处，热能转化为辐射能，以电磁波的形式向空间发送，当遇到另一个能吸收辐射能的物体时，即被其部分或全部地吸收而转化为热能。辐射传热即是物体间相互辐射和吸收能量的总结果；
- ◆ 绝对零度以上的任何物体都能发射辐射能；但仅当物体间的温度差较大时，辐射传热才能成为主要的传热方式。

## 4.1 概述

说明:

- ◆ 同一个传热过程中, 热量传递可以其中一种方式进行, 也可以以二种或三种方式同时进行;
- ◆ 工程上为了简化传热问题, 抓住占支配地位的传热方式来着手研究, 而忽略次要地位的传热方式。

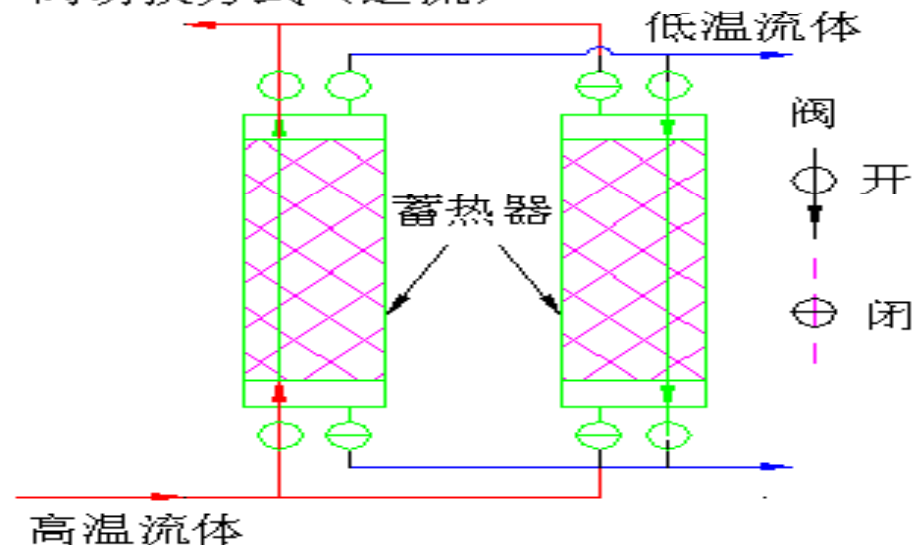
## 4.1.2 传热过程中冷、热流体的接触方式 (p206)

### 直接混合式传热

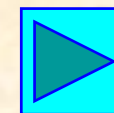


### 蓄热式

阀切换方式 (逆流)



间壁式换热：冷热流体  
通过固体壁面进行换热





### 4.1.3 典型的间壁式换热器（p208）

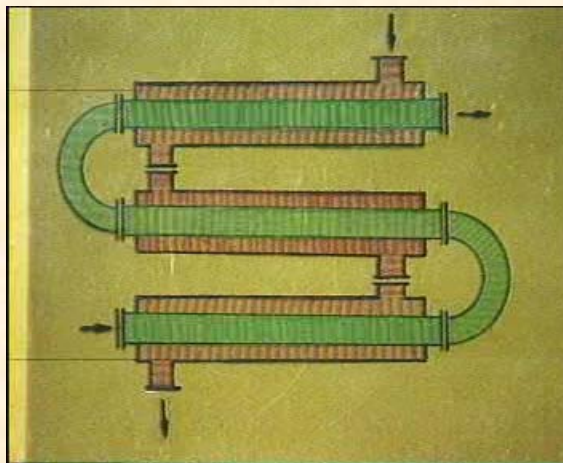
夹套式换热器



列管式换热器



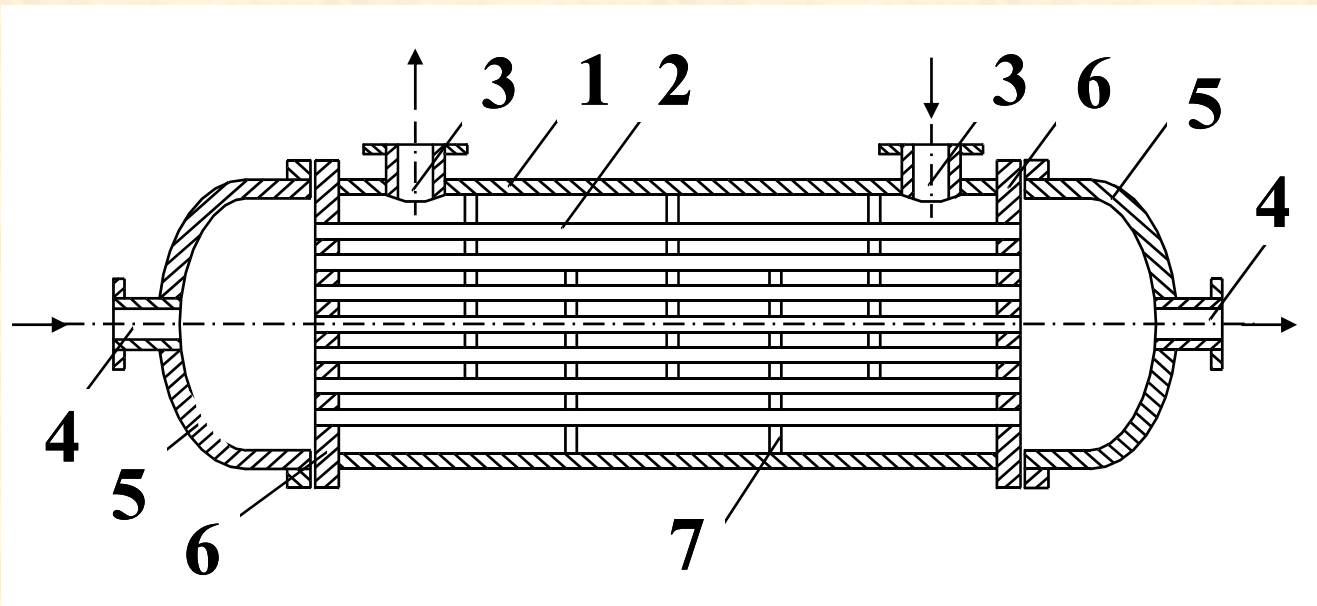
套管式换热器





## 列管式换热器的类型（p208）

单程管壳式



1 外壳

2 管束

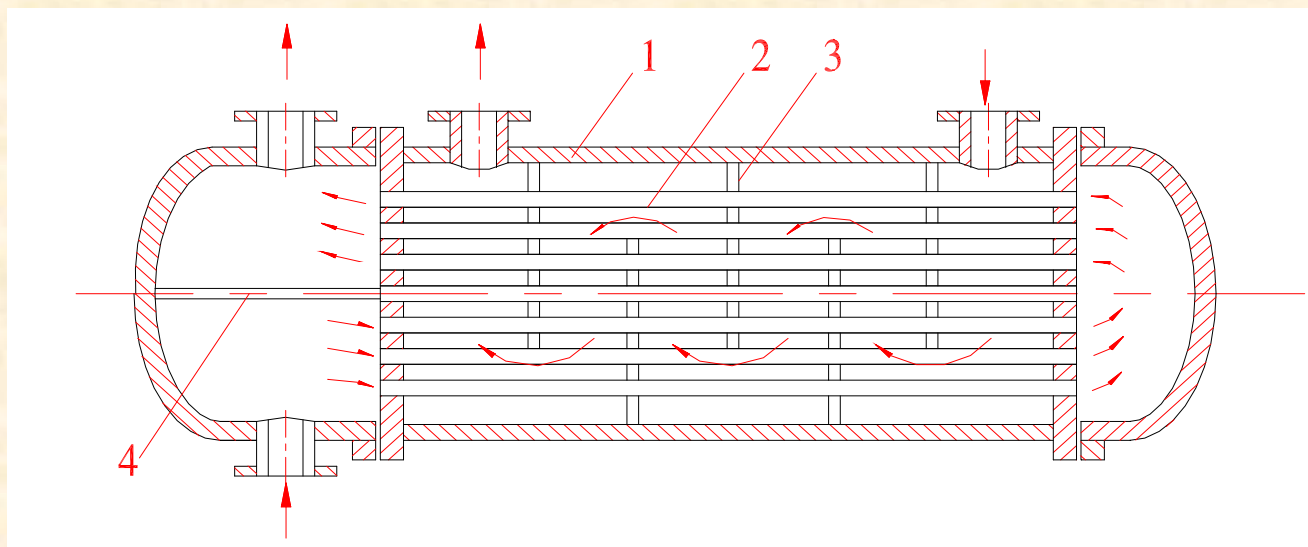
3、4 接管

5 封头

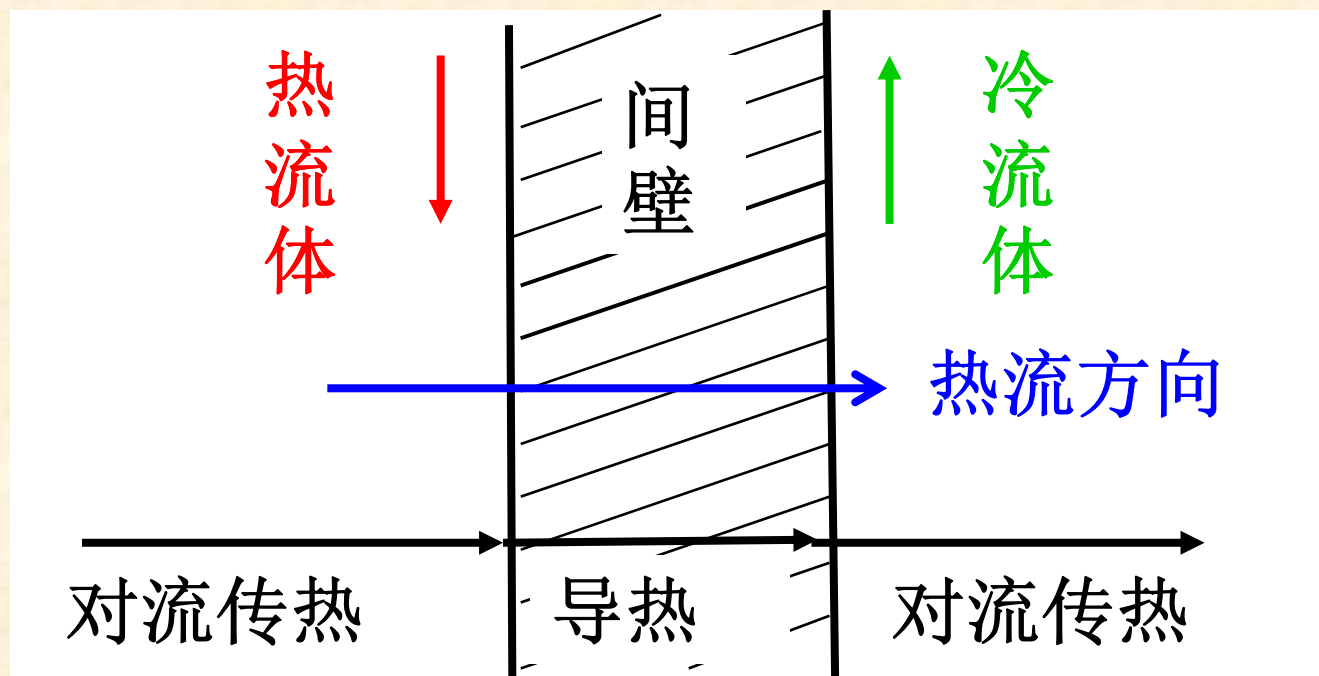
6 管板

7 挡板

双程管壳式



## 间壁式换热器的传热过程(p207)



1. 热流体  $\xrightarrow{Q_1 \text{ 对流传热}}$  间壁左侧
2. 间壁左侧  $\xrightarrow{Q_2 \text{ 热传导}}$  间壁右侧
3. 间壁右侧  $\xrightarrow{Q_3 \text{ 对流传热}}$  冷流体

## 列管式换热器的传热面积 (p208)

传热面积为管壁表面积，根据计算基准不同，有不同的表示方法：

管外侧面积：

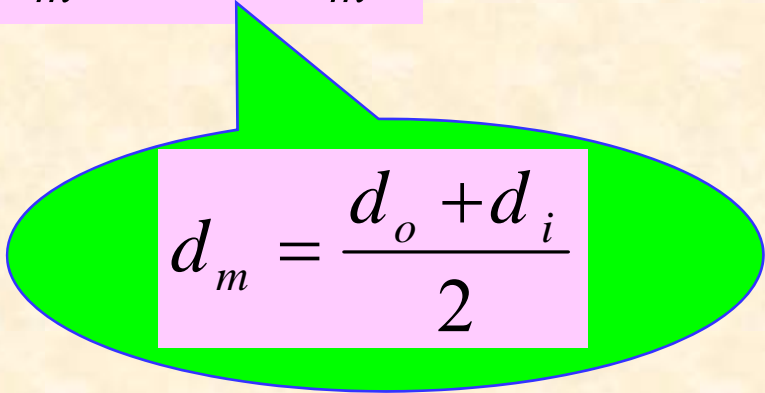
$$S_o = n \pi d_o l$$

管内侧面积：

$$S_i = n \pi d_i l$$

平均面积：

$$S_m = n \pi d_m l$$


$$d_m = \frac{d_o + d_i}{2}$$

## 载热体及其选择 (p210)

**1.定义:** 在化工生产中, 物料在换热器内被加热或冷却时, 通常需要用另一种流体供给或取走热量, 此种流体称为载热体。

### 2、分类

高温载热体(加热剂): 起加热作用

低温载热体(冷却剂): 起冷却作用

### 3、载热体的选择要求

- 1) 载热体的温度易调节控制;
- 2) 载热体的饱和蒸气压较低,加热时不易分解;
- 3) 载热体的毒性小, 不易燃、易爆, 不易腐蚀设备;
- 4) 价格便宜, 来源容易。

## 载热体及其选择 (p210)

表1 常用加热剂及其适用温度范围

加热剂	适用温度, °C
热水	40~100
饱和蒸汽	100~180
矿物油	180~250
联苯混合物	255~380 (蒸汽)
熔盐	142~530
烟道气加热剂	~1000

## 载热体及其选择 (p210)

表2 常用冷却剂及其适用温度范围

冷却剂	适用温度, °C
水	0~80
空气	>30
盐水	0~-15
氨蒸汽	<-15~-30



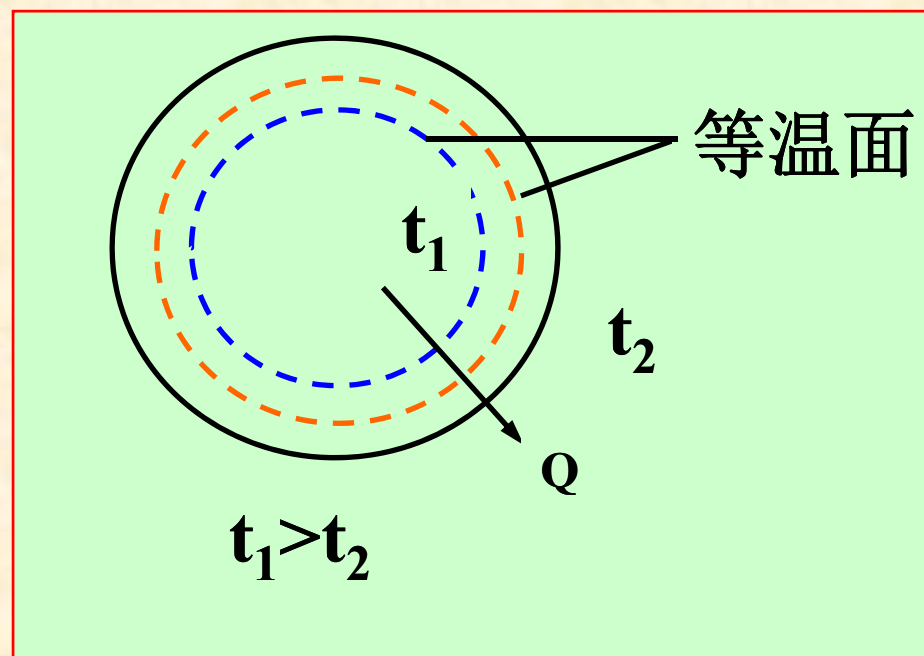
## 4.2 热传导 (p210)

### 几个基本概念

#### 温度场

任一时间，物体（或空间）各点处温度的分布状况。

#### 等温面和等温线



空间任一点在某一瞬间不能同时有两个不同的温度存在，即等温线不能相交（类似于磁场中的磁力线）。

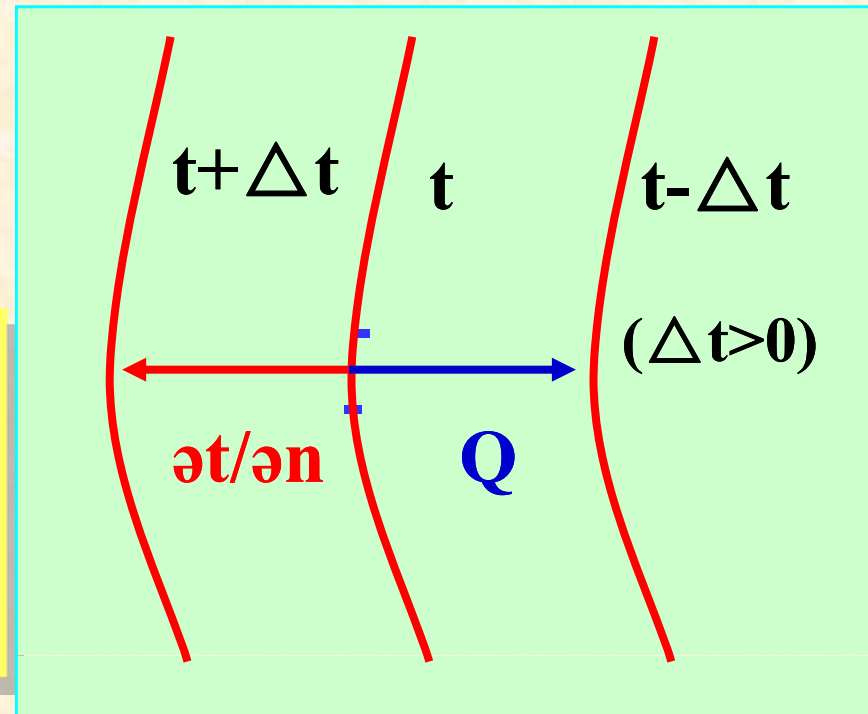
- ◆沿等温面将无热量传递；
- ◆沿和等温面相交的任何方向，有热量的传递；
- ◆与等温面垂直方向的温度梯度最大。

## 4.2 热传导 (p206)

### 几个基本概念

**温度梯度：**沿等温面法线方向的温度的变化率。

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{\frac{\partial t}{\partial n}}$$



温度梯度是向量，其方向垂直于等温面，并以温度增加的方向为正，与热量传递的方向相反。

## 4.2 热传导 (p206)

### 傅立叶定律 (Fourier's Law)

$$dQ = -\lambda dS \frac{\partial t}{\partial n}$$

$Q$ —导热速率,  $W$ ;

$S$ —垂直于热流方向的导热面积,  $m^2$ ;

$\lambda$ —物性参数, 导热系数。  $W/(m \cdot ^\circ C)$  或  $W/(m \cdot K)$ ;

$\partial t / \partial n$  — 温度梯度,  $^\circ C/m$  或  $K/m$ 。

傅立叶定律: 表示传导的导热速率与温度梯度及传热面积成正比。而热流方向却与温度梯度相反。

## 4.2 热传导 (p206)

### 傅立叶定律 (Fourier's Law)

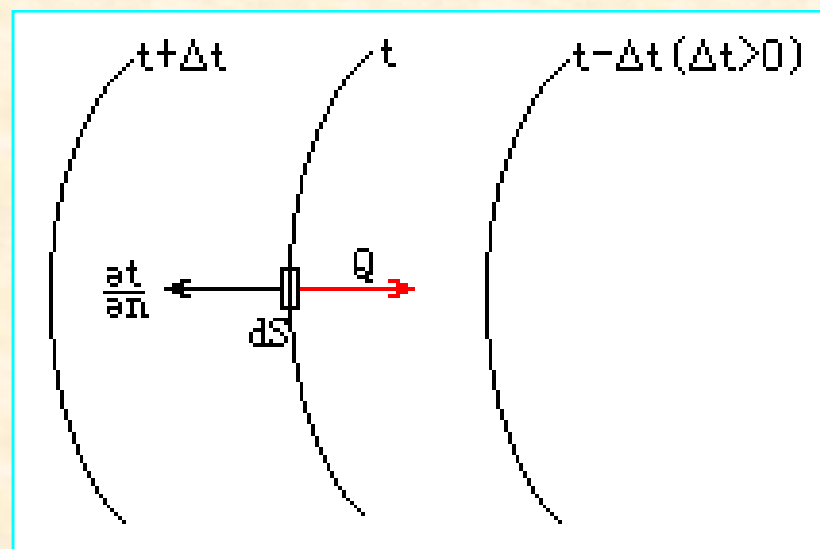
$$dQ = -\lambda dS \frac{\partial t}{\partial n}$$

◆ 负号表示传热方向与温度梯度方向相反

◆ 对一维稳态热传导

$$dQ = -\lambda dS \frac{dt}{dx}$$

◆  $\lambda$  表征材料导热性能的物性参数,  $\lambda$  越大, 导热性能越好



## 4.2 热传导 (p206)

导热系数 $\lambda$

$$\lambda = -\frac{dQ}{dS \frac{\partial t}{\partial n}} = -\frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}}$$

- 1、 $\lambda$ 在数值上等于单位温度梯度下的热通量。
- 2、 $\lambda$ 是物质的固有性质，是分子微观运动的宏观表现。

$\lambda = f(\text{形态, 组成, 密度, 温度, 压力})$

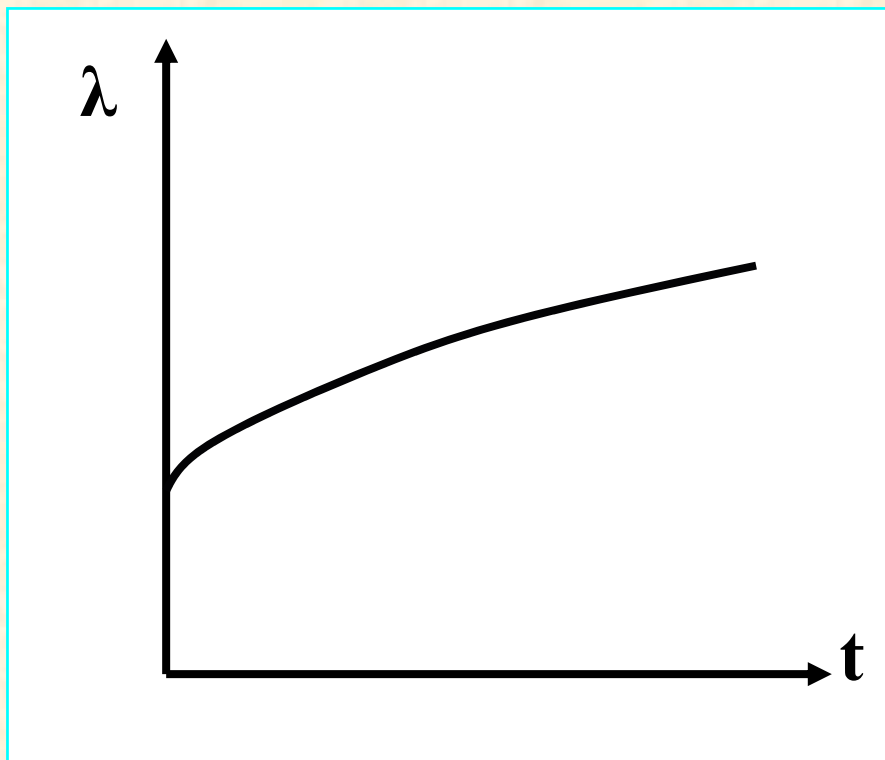
$$\lambda_{\text{金属固体}} > \lambda_{\text{非金属固体}} > \lambda_{\text{液体}} > \lambda_{\text{气体}}$$

**表3 物质导热系数的大致范围**

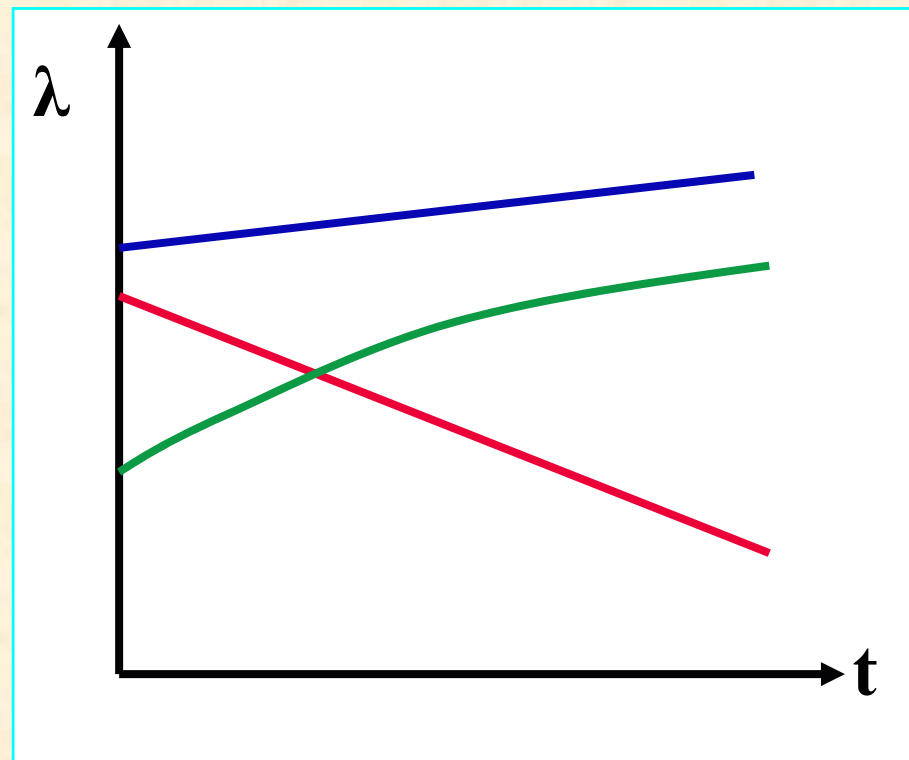
物质种类	导热系数
纯金属	<b>100~1400</b>
金属合金	<b>50~500</b>
液态金属	<b>30~300</b>
非金属固体	<b>0.05~50</b>
非金属液体	<b>0.5~5</b>
绝热材料	<b>0.05~1</b>
气体	<b>0.005~0.5</b>



### 3、导热系数随温度的变化：



气体的随温度的变化趋势



液体的随温度的变化趋势

—— 绝大多数液体  
—— 甘油  
—— 水

## 导热系数随温度变化的一般规律:

对于固体: 金属  $t \uparrow$ ,  $\lambda \downarrow$  (高合金钢例外)

非金属  $t \uparrow$ ,  $\lambda \uparrow$  (冰例外)

多数匀质固体:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t)$$

$\lambda_0$ ——固体在 0 °C 时的导热系数

$\beta$ ——温度系数, 对大多数金属材料,  $\beta < 0$ ;  
对大多数非金属材料,  $\beta > 0$  (单位为 1/K)。

$\lambda = f(T)$ , 可取两侧面平均温度下的  $\lambda$  或取两侧面温度下  $\lambda$  的平均值作为平均导热系数。

# 平壁的一维稳态热传导

## 单层平壁

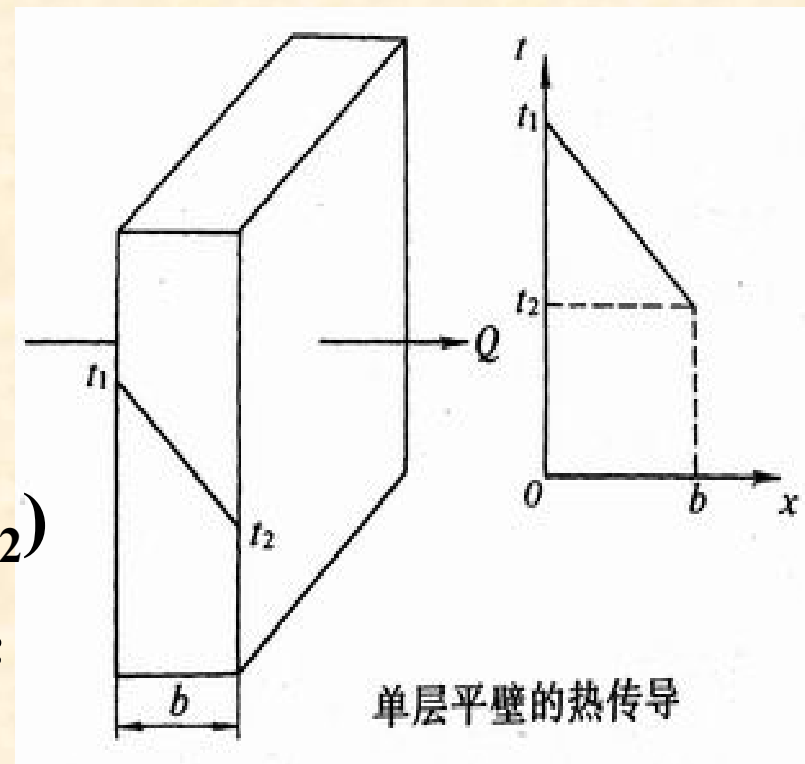
根据傅立叶定律:

$$Q = -\lambda S \frac{dt}{dx}$$

边界条件: ( $x=0, t=t_1; x=b, t=t_2$ )

若 $\lambda$ 不随温度而变化, 则积分得:

$$Q = \frac{\lambda}{b} S (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda S}}$$



## 平壁的一维稳态热传导

1、可用唯象方程表示：

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda S}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$

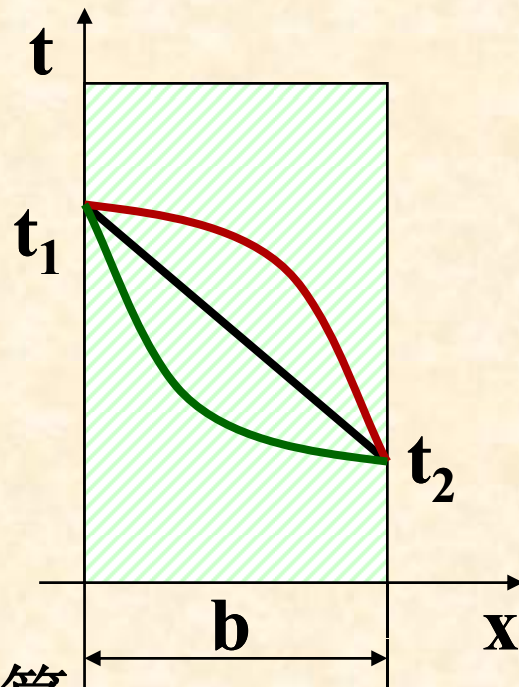
2. 平壁内的温度分布

$$t = t_1 - \frac{Qx}{\lambda S}$$

$\lambda$ 不随 $t$ 变化， 线形关系。

$\lambda = \lambda_0(1 + at)$  抛物线关系。

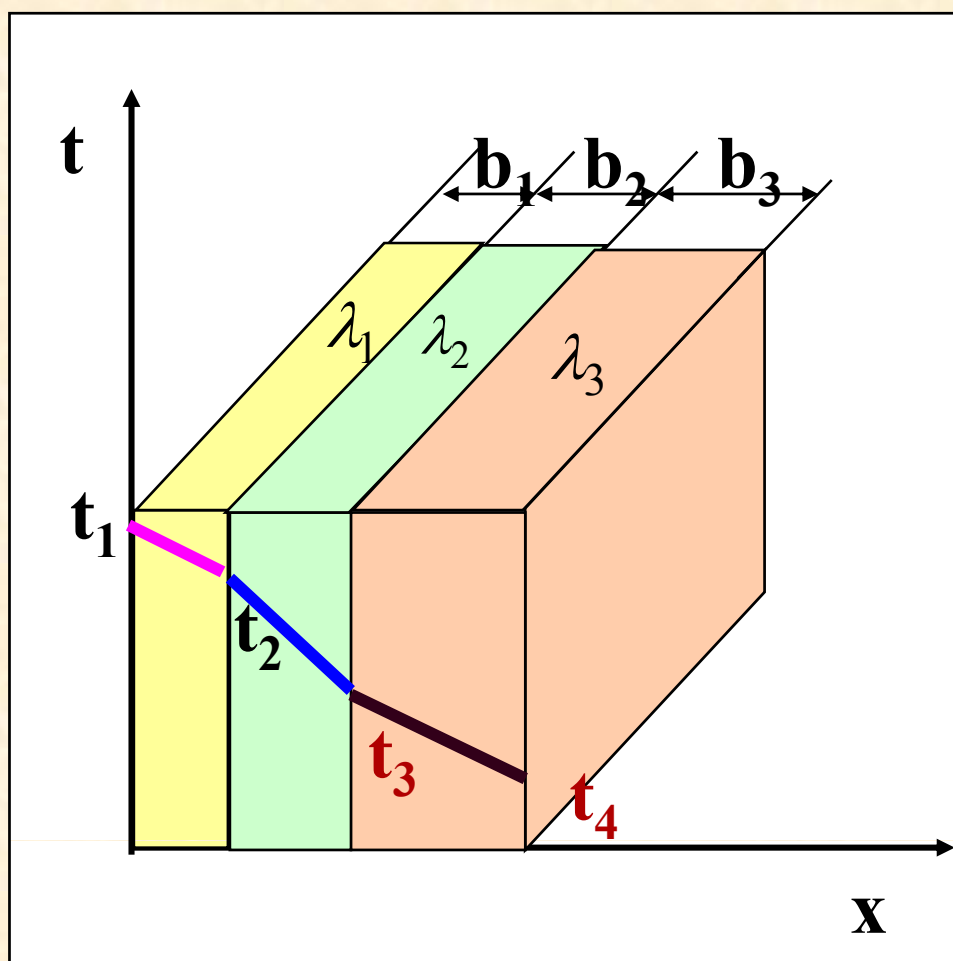
3. 当 $\lambda$ 随 $t$ 变化时，按平均导热系数计算。



## 平壁的一维稳态热传导

### 多层平壁

假设：一维、稳态传热；各层接触良好，接触面两侧温度相同。



$$Q_1 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{\Delta t_1}{R_1}$$

$$Q_2 = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \frac{\Delta t_2}{R_2}$$

$$Q_3 = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S}} = \frac{\Delta t_3}{R_3}$$

## 平壁的一维稳态热传导

**多层平壁** 对一维稳态导热，在平壁内部没有热量积聚，所以通过各层平壁的热流量应相等，即

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S}}$$

$$= \frac{\sum \Delta t_i}{\sum \frac{b_i}{\lambda_i S}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{\lambda_i S}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum R_i} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

推广至 $n$ 层：

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i}$$



## 多层平壁的一维稳态热传导

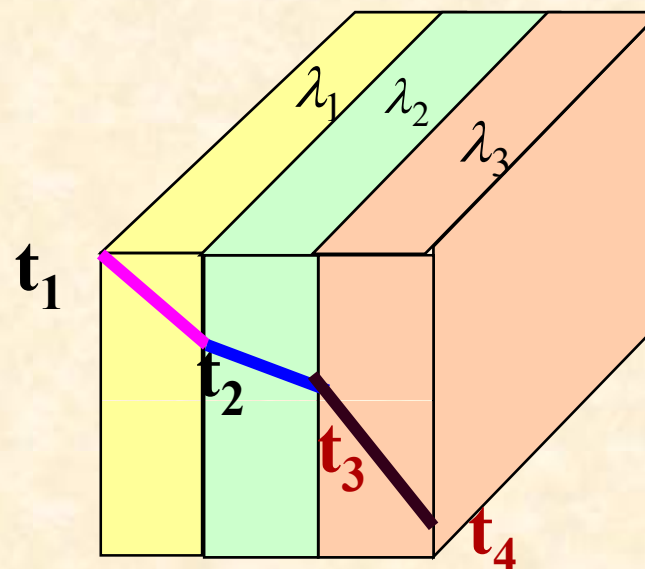
各层的温差

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S}}$$

$$(t_1 - t_2) : (t_2 - t_3) : (t_3 - t_4) = \frac{b_1}{\lambda_1 S} : \frac{b_2}{\lambda_2 S} : \frac{b_3}{\lambda_3 S} = R_1 : R_2 : R_3$$

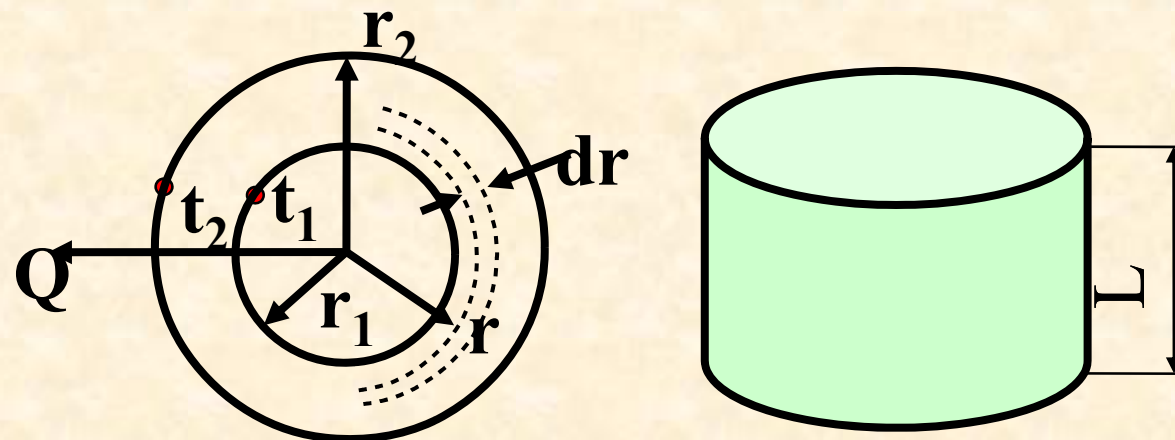
思考：

厚度相同的三层平壁传热，温度分布如图所示，哪一层热阻最大，说明各层 $\lambda$ 的大小排列。




# 圆筒壁的热传导

## 单层圆筒壁的热传导



假定

一维稳定的温度场。

- 
- 作业：
  - P133 1、2（求安装高度）
  - P290 3、7、10、13

# 圆筒壁的热传导

## 单层圆筒壁的热传导

根据傅立叶定律，通过圆筒壁传导的热量为：

$$Q = -\lambda S \frac{dt}{dr} \quad \longrightarrow \quad Q = -\lambda (2\pi r L) \frac{dt}{dr}$$

边界条件  $r = r_1$  时,  $t = t_1$ ,  $r = r_2$  时,  $t = t_2$  设  $\lambda$  不随  $t$  而变

两边积分:

$$\frac{Q}{2\pi L} \int_{r_1}^r \frac{dr}{r} = -\lambda \int_{t_1}^t dt$$

$$\longrightarrow Q = \frac{2\pi\lambda L (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

单层圆筒壁热传导  
的基本方程式

## 单层圆筒壁的热传导

讨论:

1. 上式可以写成:

$$Q = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{b}{\lambda S_m}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$

其中:  $S_m = \frac{S_2 - S_1}{\ln S_2 / S_1}$  或:  $S_m = 2\pi r_m L$

$S_m$ ——对数平均面积;

$r_m$ ——对数平均半径,

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\ln r_2 / r_1}$$

2.  $r_2 / r_1 < 2$   $S_m = (S_1 + S_2) / 2$

3. 圆筒壁内的温度分布

$$t = t_1 - \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda \cdot L} \ln \frac{r}{r_1}$$

$t \sim r$ 成对数曲线变化(假设 $\lambda$ 不随 $t$ 变化)

## 圆筒壁的热传导

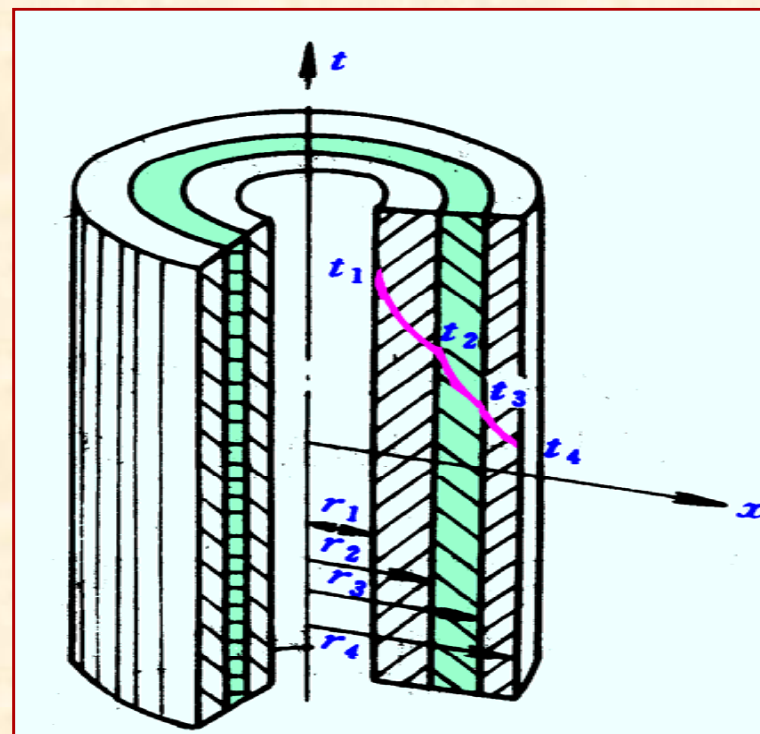
### 多层圆筒壁的热传导

一维稳态传热： $Q=Q_1=Q_2=Q_3$

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S_{m1}}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S_{m2}}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S_{m3}}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_{mi}}} = \frac{\Delta t_{\text{总}}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_{mi}}} = \frac{\Delta t_i}{\frac{b_i}{\lambda_i S_{mi}}}$$

$$Q = \frac{\Delta t_{\text{总}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi L \lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$$

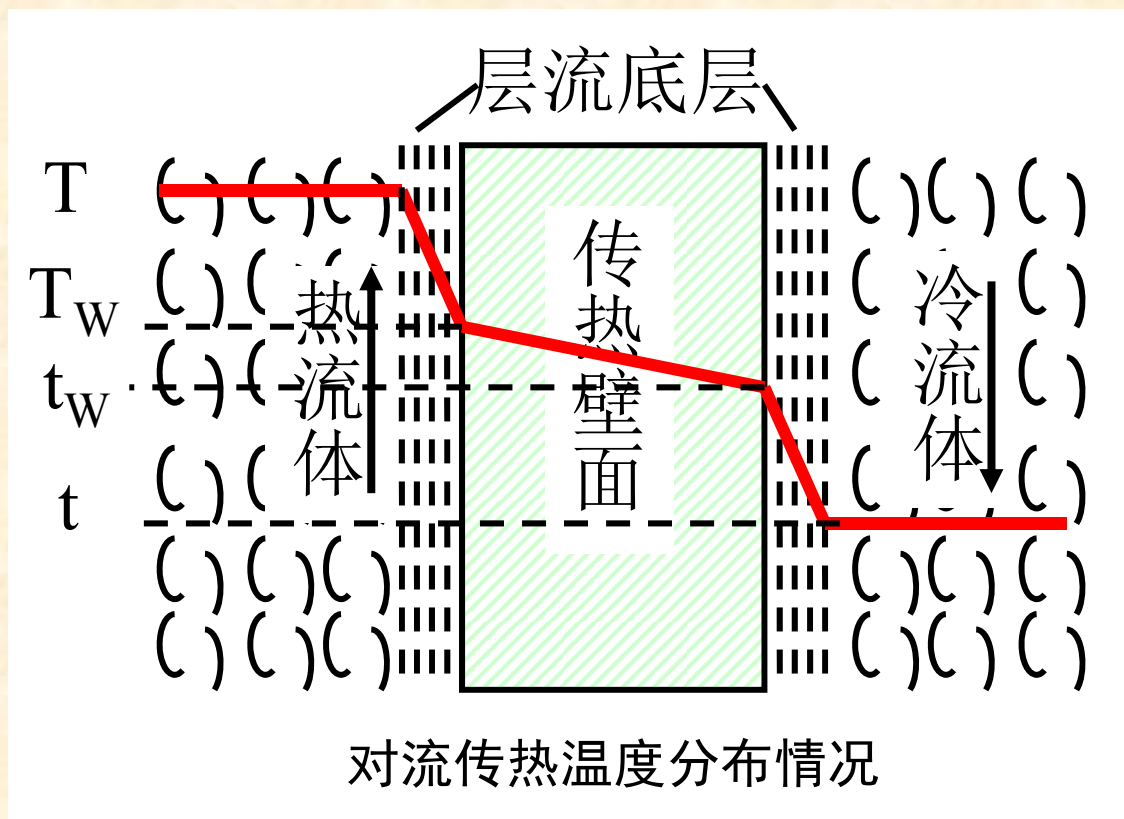
**对于圆筒壁的稳定热传导，通过各层的热传导速率都是相同的，但是热通量却不相等。**





## 4.3 对流传热 (p219)

对流传热：流体通过固体壁面的传热。



- ◆ 流体与壁面的给热包括流体的**对流**和**导热**
- ◆ 对流传热的热阻主要集中在流体靠近壁面的**层流底层**
- ◆ 流体的主体因涡流存在质点的混合使温度趋于一致

## 牛顿冷却定律

仿照傅立叶定律，对流传热速率方程可以表示为：

$$Q = \alpha S (T - T_w) \quad \text{——牛顿冷却定律}$$

式中  $Q$ —对流传热速率，W；

$\alpha$ —对流传热系数，W/(m<sup>2</sup>·°C)；

$T_w$ —壁温，°C；

$T$ —流体平均温度，°C；流体绝热混合后的平均温度。

$S$ —传热面积，m<sup>2</sup>。

牛顿冷却定律并非从理论上推导的结果，而只是一种推论，是一个实验定律，假设 $\alpha \propto \Delta t$ 。

若热流体走管内，冷流体走管外  
对热流体而言：

$$Q = a_i S_i (T - T_w) = \frac{T - T_w}{\frac{1}{a_i S_i}} = \frac{\Delta T}{R_i}$$

对冷流体而言：

$$Q = a_o S_o (t_w - t) = \frac{t_w - t}{\frac{1}{a_o S_o}} = \frac{\Delta t}{R_o}$$

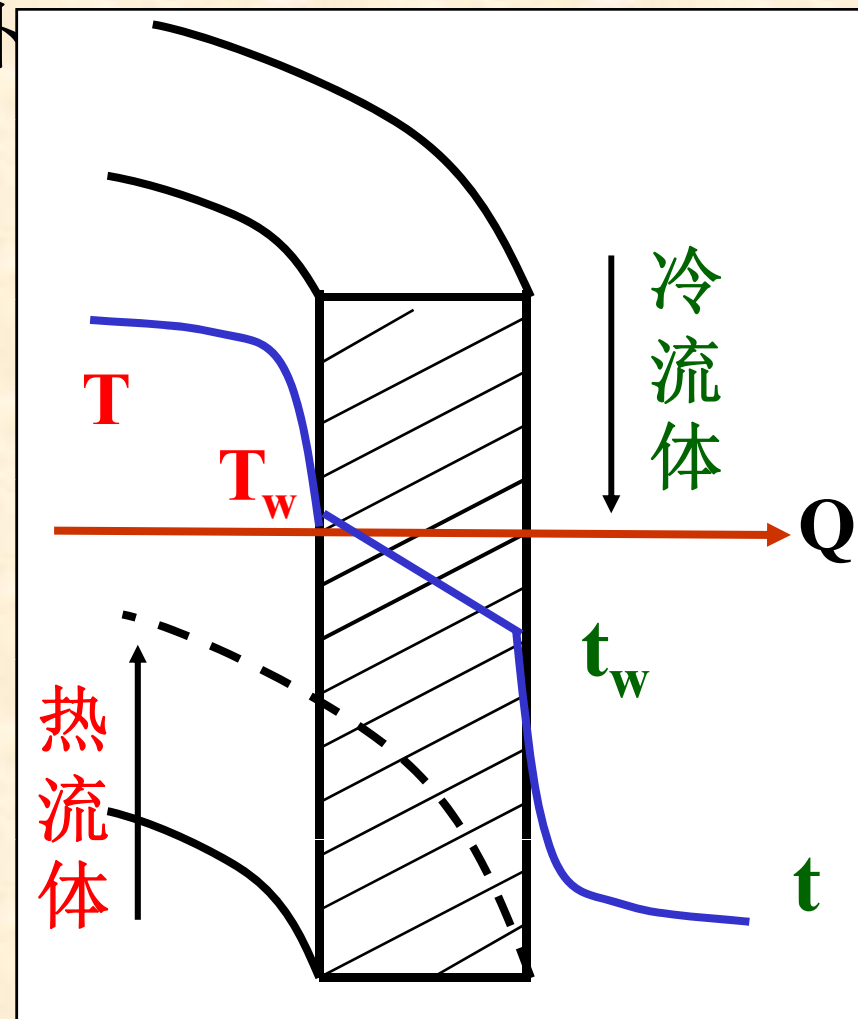
对流传热的**推动力**： $\Delta t = t_w - t$

**阻力**：

$$R = \frac{1}{\alpha S}$$

$$\Delta t = T - T_w$$

$$\alpha = ?$$



## 对流传热系数（p221）

$$\alpha = \frac{Q}{S\Delta t}$$

$\alpha$ ——对流传热系数，表示单位温度差下，单位传热面积的对流传热速率， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$\alpha$ 反映对流传热的快慢， $\alpha$ 越大，对流传热越快；

$\alpha$ 值的数量范围

换热方式	空气自然对流	气体强制对流	水自然对流	水强制对流	水蒸气冷凝	有机蒸汽冷凝	水沸腾
$\alpha$ ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ )	5~25	20~100	20~1000	1000~15000	5000~15000	500~2000	2500~25000

## 4.5.1 影响对流传热系数 $\alpha$ 的因素 (p244)

### 引起流动的原因

自然对流：由于流体内部密度差而引起流体的流动。

强制对流：由于外力和压差而引起的流动。  $\alpha_{\text{强}} > \alpha_{\text{自}}$

### 流体的物性

$\rho \uparrow \text{Re} \uparrow \alpha \uparrow$ ;  $\mu \uparrow \text{Re} \downarrow \alpha \downarrow$ ;  $\lambda \uparrow \alpha \uparrow$ ;  $c_p \uparrow \rho c_p \uparrow \alpha \uparrow$ ;  
 $\beta \uparrow \alpha \uparrow$

### 流动形态

层流、湍流  $\alpha_{\text{湍}} > \alpha_{\text{层}}$

### 传热面的形状，大小和位置

形状：如管、板、管束等；

大小：如管径和管长等；

位置：如管子的排列方式（管束有正四方形和三角形排列）；管或板是垂直放置还是水平放置。

### 是否发生相变

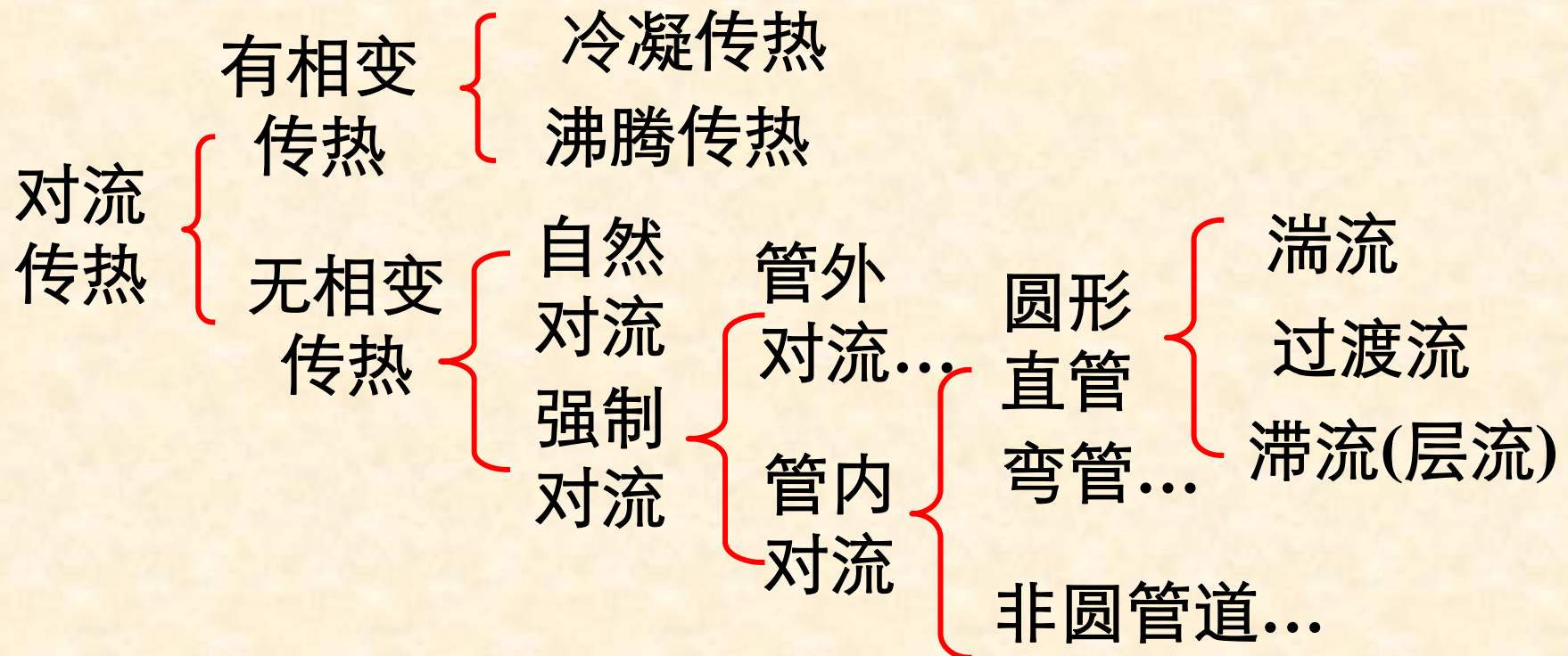
蒸汽冷凝、液体沸腾： $r$ 远大于 $c_p$ ， $\alpha_{\text{相变}} > \alpha_{\text{无相变}}$



## 4.5 对流给热系数的实验关联式 (p244)

对流给热系数的因素非常多，工程上采用因次分析和实验的方法确定不同影响因素之间的具体关系，所有这些关系式统称为对流给热系数的**经验关联式**。

**对流传热分类**:(从大类→小类→具体情况)



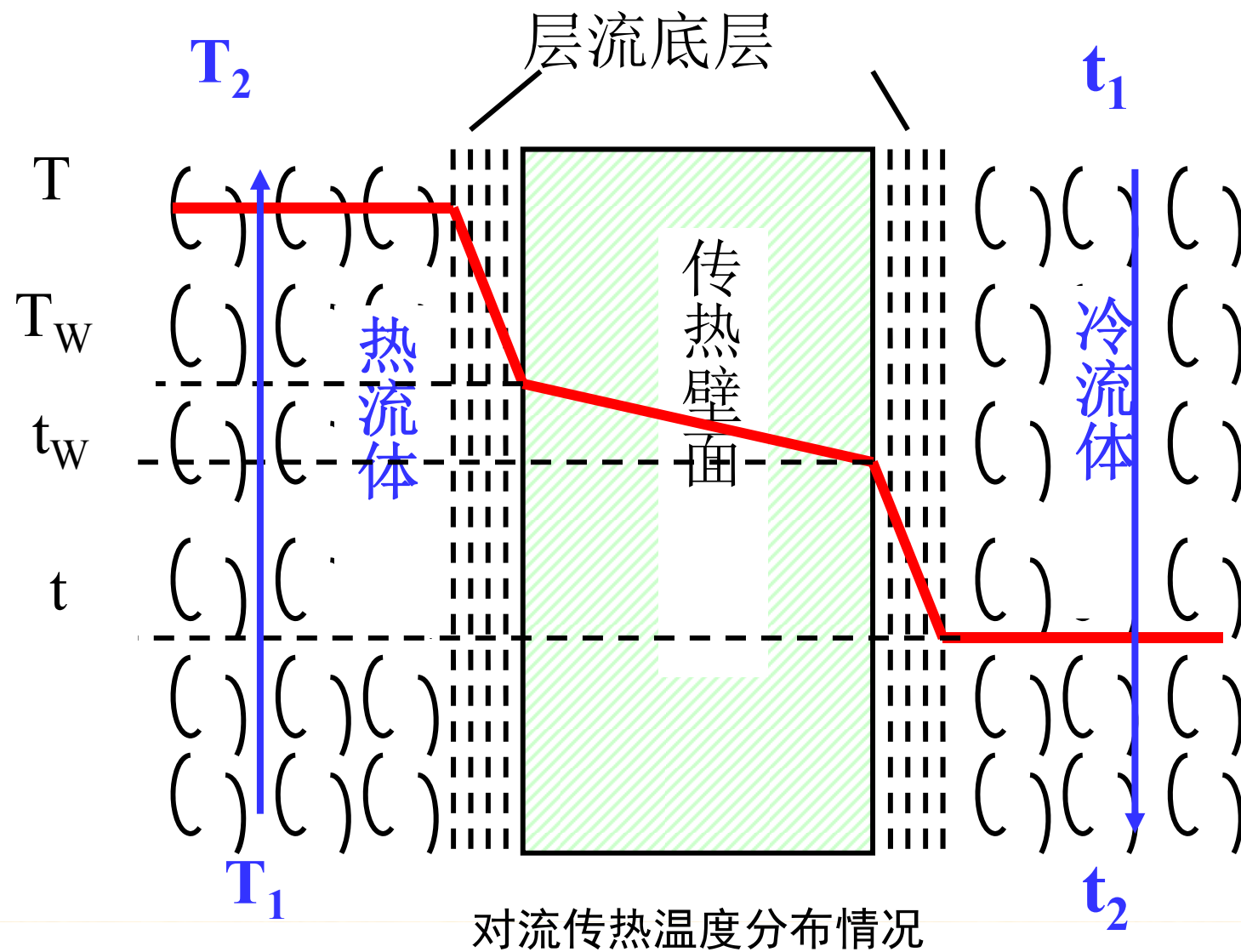


## 4.4 传热过程的计算 (p224)

### 传热过程的基本问题

- (1) 载热体用量的确定;
- (2) 设计新的换热器;
- (3) 核算现有换热器的传热性能;
- (4) 强化或削弱传热的方法。

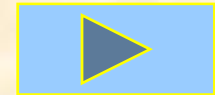
## 4.4 传热过程的计算 (p224)



## 4.4 传热过程的计算 (p224)

两个基本关系式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{热流体放出热量: } Q = W_h C_{p,h} (T_1 - T_2) \\ \text{冷流体吸收热量: } Q = W_c C_{p,c} (t_2 - t_1) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{热量} \\ \text{衡算} \\ \text{式} \end{array}$$



热流体  
对流传热速率

$$Q = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_o S_o}}$$

管壁  
导热速率

$$Q = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}}$$

冷流体  
对流传热速率

$$Q = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_i S_i}}$$

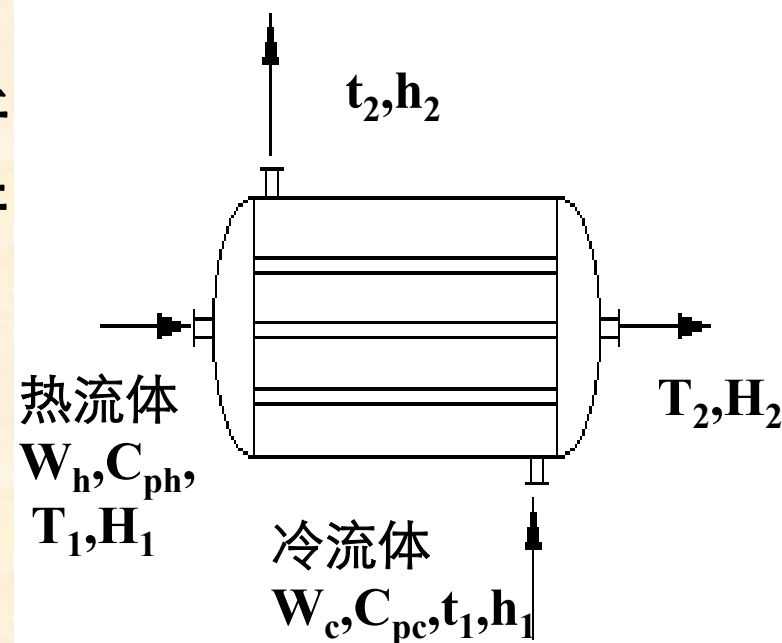
传热速率关系式

## 能量衡算 (p224) $\longrightarrow$ 传热负荷 $Q$

**换热器的热负荷 (传热任务) :**  
生产上对物料加热 (冷却) 时所需提供 (移除) 的热量, 即生产工艺需要的传热速率。

无相变  $Q = W_h C_{ph} (T_1 - T_2)$

$$Q = W_c C_{pc} (t_2 - t_1)$$



$W_h$ 、 $W_c$  — 分别为热流体和冷流体的质量流率,  $\text{kg/s}$ ;

$C_{ph}$ 、 $C_{pc}$  — 分别为热流体和冷流体的比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

只有相变  $Q = Wr$

$r$  — 流体的汽化热或冷凝潜热,  $\text{kJ/kg}$ 。

注意:  $W$  为单位时间内发生相变的物料量 ( $\text{kg/s}$ )

有温变也有相变过程, 需分段计算

例: 在1atm下, 120℃、W(kg/s)过热蒸汽变为60℃水, 求单位时间放出的热量。

120℃蒸汽 → 100℃蒸汽 → 100℃水 → 60℃水

1

2

3

$$Q_1 = WC_g (120 - 100)$$

$$Q_2 = Wr$$

$$Q_3 = WC_{\text{水}} (100 - 60)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

## 4.4 传热过程的计算 (p224)

两个基本关系式:

热流体放出热量:  $Q = W_h C_{p,h} (T_1 - T_2)$

冷流体吸收热量:  $Q = W_c C_{p,c} (t_2 - t_1)$

} 热量衡算式

热流体  
对流传热速率

$$Q = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_o S_o}}$$

管壁  
导热速率

$$Q = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}}$$

冷流体  
对流传热速率

$$Q = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_i S_i}}$$

传热速率关系式



## 4.4 传热过程的计算 (p224)

热流体  
对流传热  
速率

$$Q = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_o S_o}}$$

管壁  
导热  
速率

$$Q = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}}$$

冷流体  
对流传热  
速率

$$Q = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_i S_i}}$$

$$Q = KS\Delta t_m$$

$$q = \frac{Q}{S} = K\Delta t_m$$

—— 传热基本方程式

## 传热基本方程式 (p225)

对间壁式换热（忽略壁面厚度的影响）：

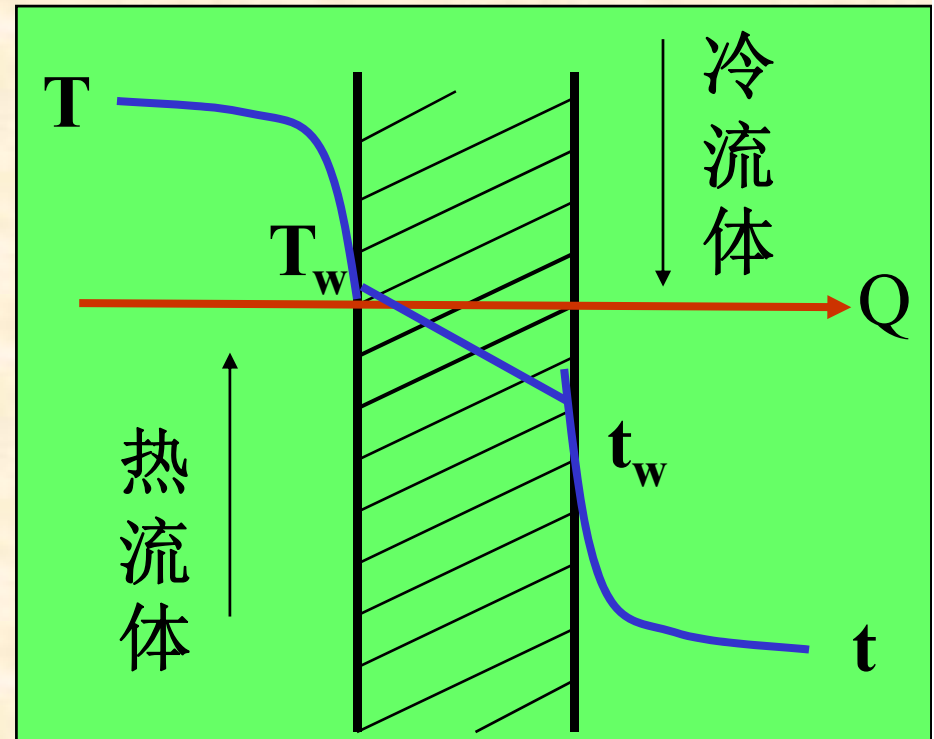
$$q = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_o}} = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda}} = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_i}}$$

$$q = \frac{T - t}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

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

——传热系数

$$q = K(T - t)$$



## 传热基本方程式 (p225)

$$q = K(T - t)$$

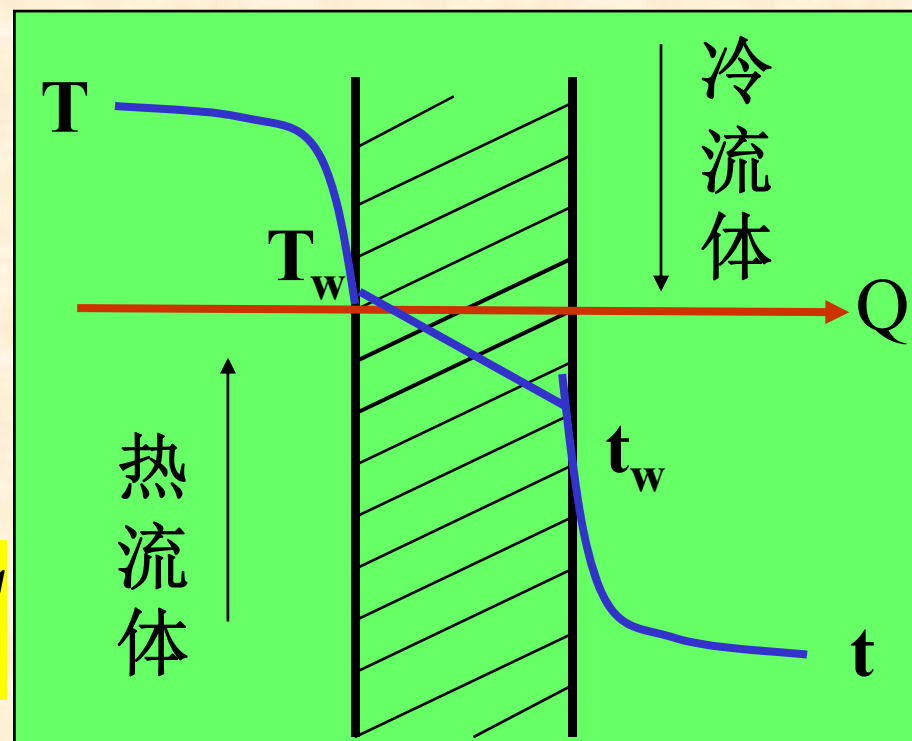
在任一传热面积为 $dS$ 的截面有:

$$dQ = qdS = K(T - t)dS$$

假设 $K$ 沿整个传热面保持不变,  
将 $(T - t)$ 沿整个传热面积分:

$$Q = KS\Delta t_m$$

——传热基本方程式或总传热方程式



## 传热基本方程式 (p225)

$$Q = KS\Delta t_m$$

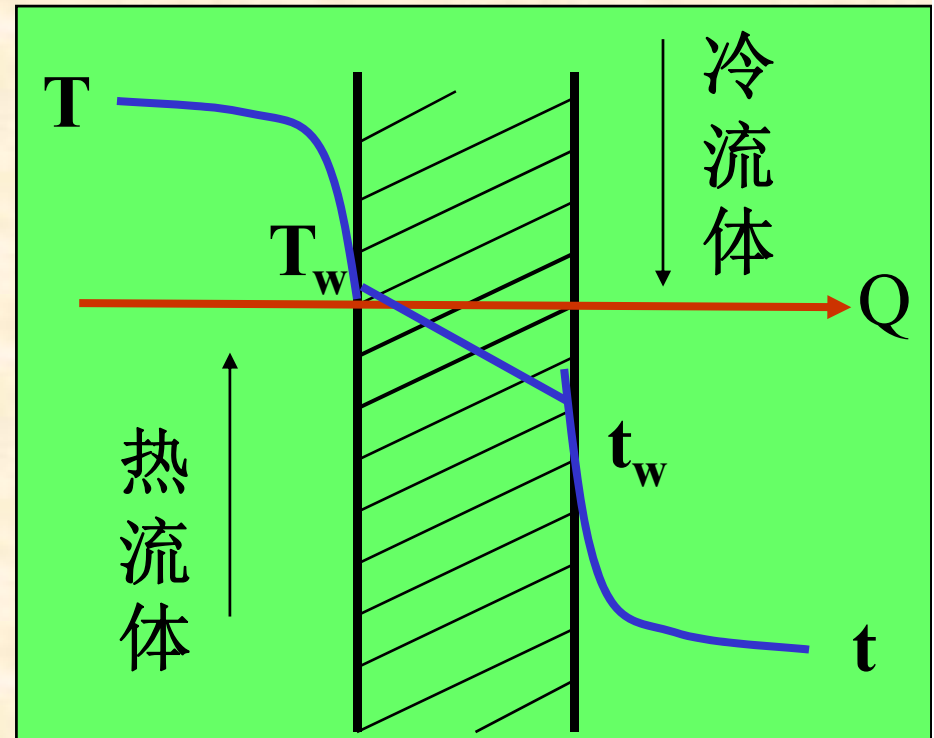
**Q**:单位时间传递的热量(J/s)

**S**:传热面积 (m<sup>2</sup>)

$\Delta t_m$ : 对数平均温度差



**K**:传热系数或总传热系数 [W/(m<sup>2</sup>.K)]



## 对数平均温度差的计算（p229）

$\Delta t_m$ : 冷热流体沿整个传热面的温差的平均值，是传热的**推动力**。

$$\Delta t_m = \frac{\int_0^S \Delta t dS}{S - 0}$$

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

$\Delta t_1, \Delta t_2$ ——换热器两端的传热推动力

## 对数平均温度差的计算 (p229)

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

### 1、两流体温度不变

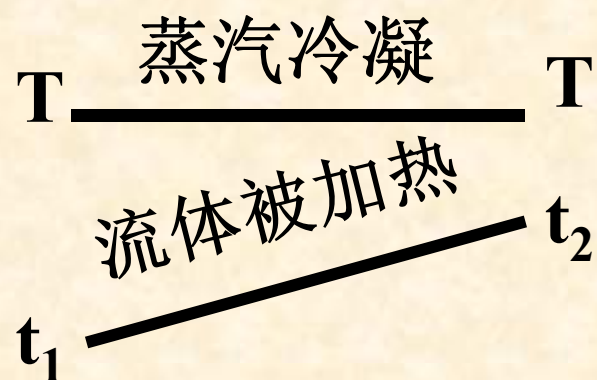
T	<u>蒸汽冷凝</u>	T	$\Delta t_1 = \Delta t_2 = T - t$
t	<u>液体沸腾</u>	t	$\Delta t_m = T - t$



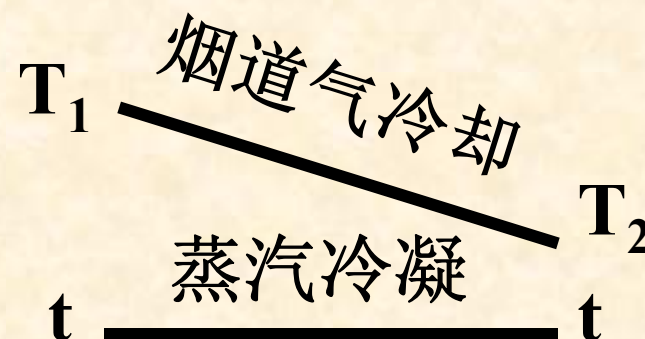
## 对数平均温度差的计算 (p229)

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

### 2、一流体变温



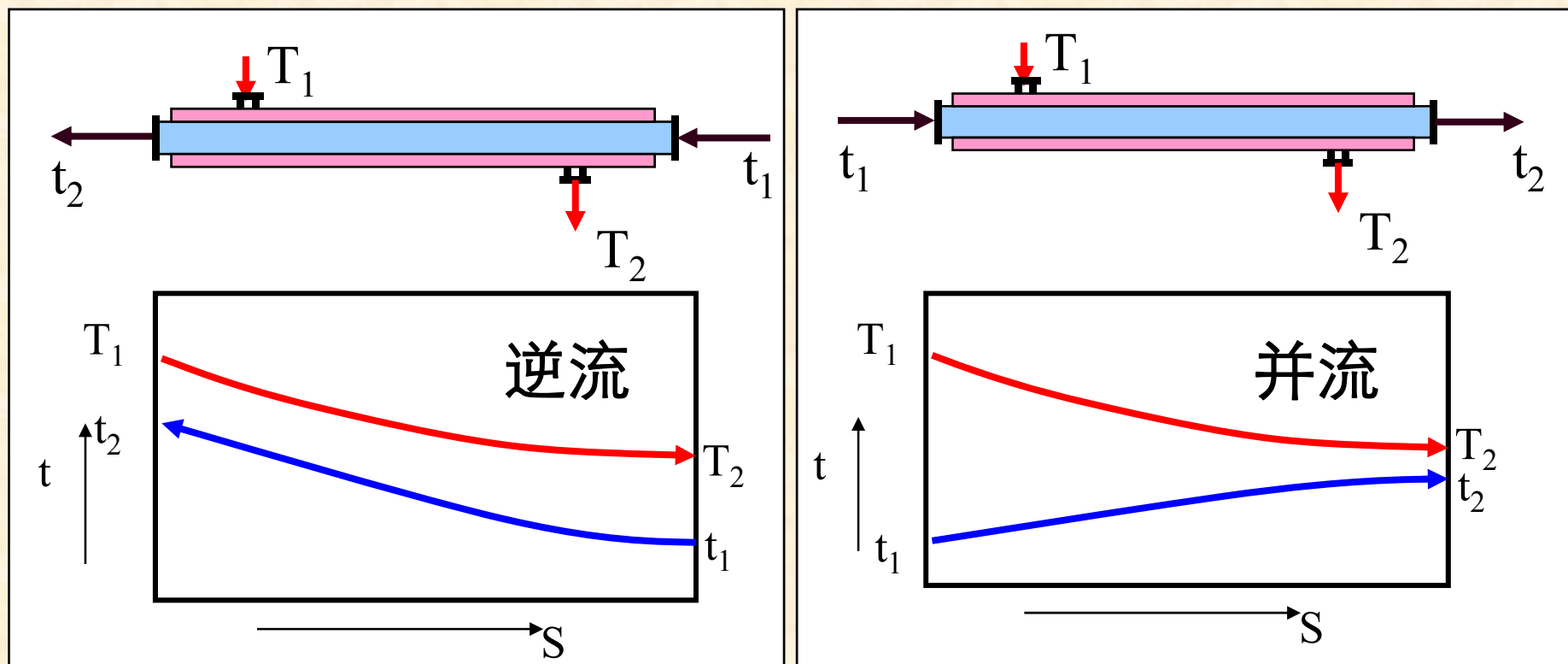
$$\begin{cases} \Delta t_1 = T - t_1 \\ \Delta t_2 = T - t_2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \Delta t_1 = T_1 - t \\ \Delta t_2 = T_2 - t \end{cases}$$

## 对数平均温度差的计算 (p229)

### 3、逆流和并流



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

逆流:

$$\Delta t_1 = T_1 - t_2$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_1$$

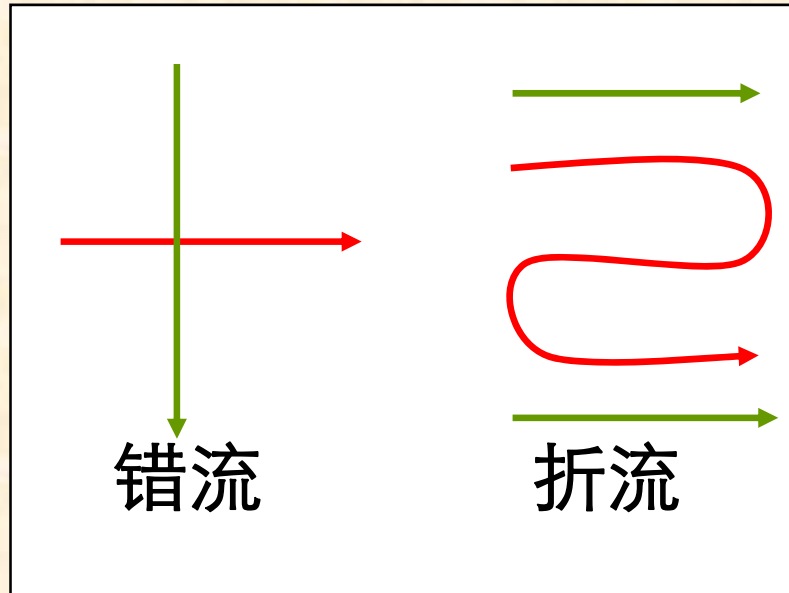
并流:

$$\Delta t_1 = T_1 - t_1$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_2$$

## 对数平均温度差的计算 (p229)

### 4、错流和折流



$$\Delta t_m = \psi \cdot \Delta t_{m, \text{逆}}$$

$\Delta t_{m, \text{逆}}$ : 两流体逆流的对数平均温差

$\psi$  —— 温差修正系数，恒小于1

$$\psi = f(P, R)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{\text{冷流体实际温度变化}}{\text{热流体最大温度变化}}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{\text{热流体实际温度变化}}{\text{冷流体实际温度变化}}$$

注意：  $\psi$  值必须大于0.8，否则必须改变换热器的结构使该条件得以满足。

## 对数平均温度差的计算 (p229)

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

$$\text{并流: } \Delta t_1 = T_1 - t_1 \quad \Delta t_2 = T_2 - t_2$$

$$\text{逆流: } \Delta t_1 = T_1 - t_2 \quad \Delta t_2 = T_2 - t_1$$

讨论:

- 1) 较大温差记为 $\Delta t_1$ , 较小温差记为 $\Delta t_2$ ;
- 2) 当 $\Delta t_1/\Delta t_2 < 2$ , 则可用算术平均值代替

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / 2$$

- 3) 当 $\Delta t_1 = \Delta t_2$

$$\Delta t_m = \Delta t_1 = \Delta t_2$$

## 逆流和并流的比较 (p235)

### 1. 流体最终温度和载热体消耗量比较:

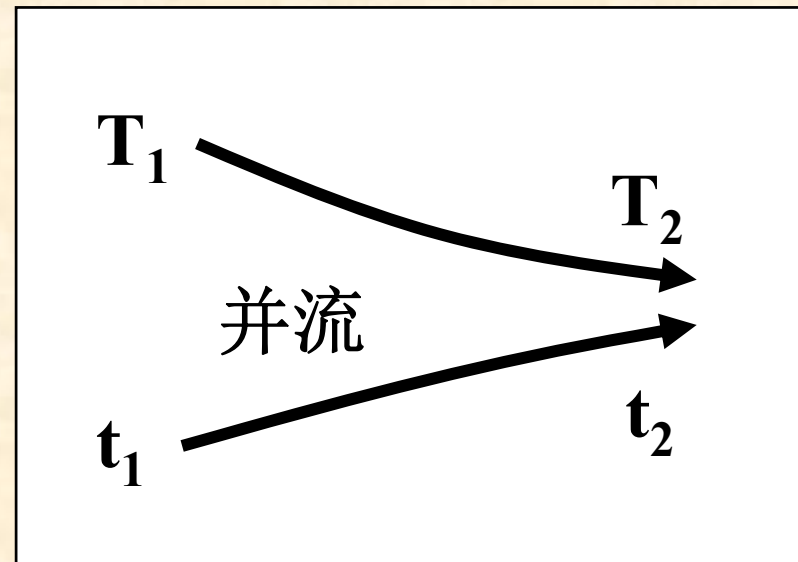
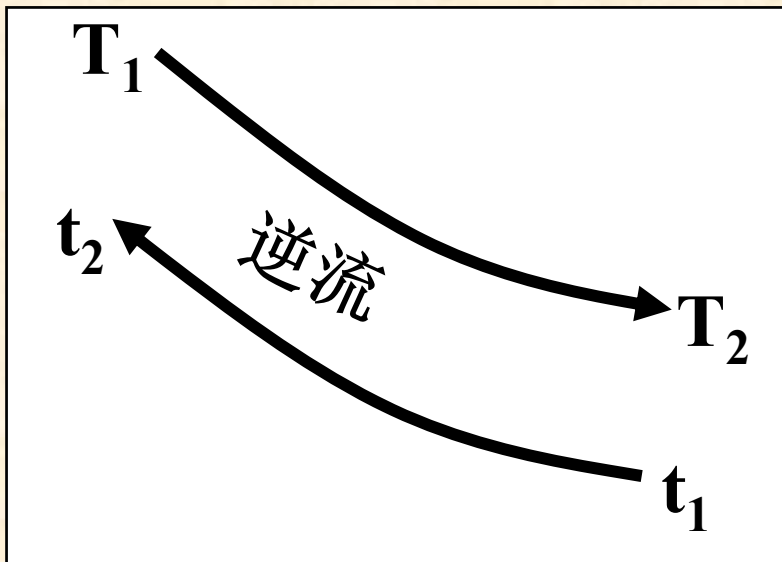
任务: 冷流体被加热, 求加热剂消耗量。

$$(W_h)_{\min} = \frac{Q}{C_{ph}[T_1 - (T_2)_{\min}]}$$

$$(W_{h, \text{逆}})_{\min} < (W_{h, \text{并}})_{\min}$$

逆流:  $t_1$

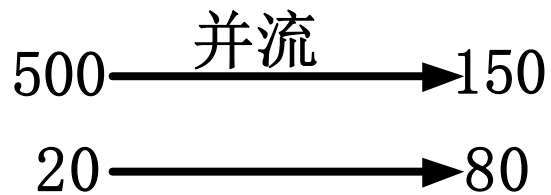
并流:  $t_2$



## 逆流和并流的比较 (p235)

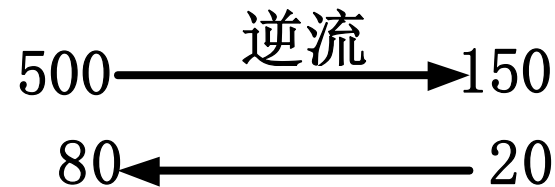
### 2. 传热温差的比较:

例:  $T_1=500^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2=150^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1=20^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2=80^{\circ}\text{C}$



$$\Delta t_1 = 480^{\circ}\text{C} \quad \Delta t_2 = 70^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{m\text{并}} = \frac{480 - 70}{\ln \frac{480}{70}} = 212.95^{\circ}\text{C}$$



$$\Delta t_1 = 420^{\circ}\text{C} \quad \Delta t_2 = 130^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{m\text{逆}} = \frac{420 - 130}{\ln \frac{420}{130}} = 247.3^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{m\text{逆}} > \Delta t_{m\text{并}}$$



## 逆流和并流的比较 (p235)

### 3. 结论

- 一般情况下，逆流优于并流，工程上，多采用逆流操作：当流体进、出口温度已经确定时，逆流操作的平均温度差比并流时大，传递相同热量 $Q$ ，所需传热面积小，而且可以节省加热介质或冷却介质的用量。
- 某些情况下，只能采用并流操作：
  - 热敏性物料的加热，采用并流可避免出口温度过高影响产品质量；
  - 高温换热器中，逆流时 $t_2$ 和 $T_1$ 集中在一端，采用并流，可降低该处壁温，延长换热器使用寿命。

## 传热基本方程式 (p225)

$$Q = KS\Delta t_m$$

**Q**:单位时间传递的热量(J/s)

**S**:传热面积 (m<sup>2</sup>)

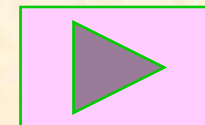
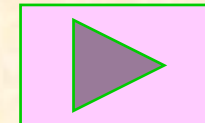
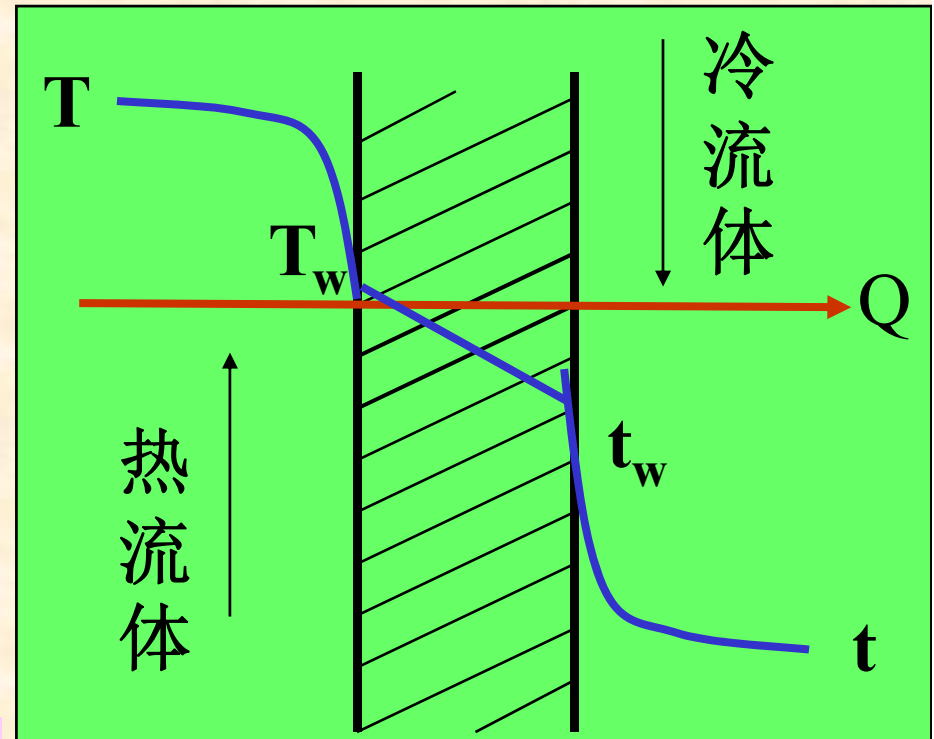
$\Delta t_m$ : 对数平均温度差

$$\Delta t_m = \frac{\int_0^S \Delta t dS}{S - 0}$$

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

$\Delta t_1, \Delta t_2$ ——换热器两端的传热推动力

**K**:传热系数或总传热系数 [W/(m<sup>2</sup>.K)]



## 总传热系数K (p226)

$$Q = KS\Delta t_m$$

$$Q = KS\Delta t_m = \frac{\Delta t_m}{1/KS}$$

总传热系数  $K$  综合反映传热设备性能，流动状况和流体物性对传热过程的影响，倒数  $1/K$  称为传热过程的总热阻。

取得K的途径:

1. 实际测定



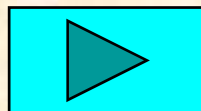
$$Q = KS\Delta t_m$$



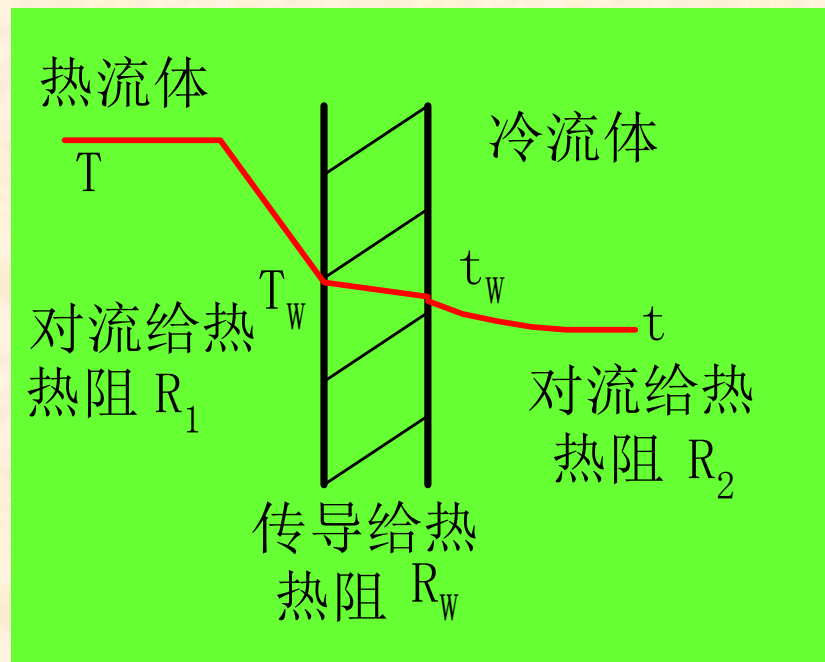
$$K = \frac{Q}{S\Delta t_m}$$

2. 用经验公式求K:

3. 用串联热阻的概念求K:



## 串联热阻的概念求K:



$$Q = \frac{T - T_w + T_w - t_w + t_w - t}{\frac{1}{\alpha_o \cdot S_o} + \frac{b}{\lambda \cdot S_m} + \frac{1}{\alpha_i \cdot S_i}} = \frac{T - t}{\frac{1}{K \cdot S}}$$

$$R = \frac{1}{KS} = \frac{1}{\alpha_o S_o} + \frac{b}{\lambda S_m} + \frac{1}{\alpha_i S_i}$$

串联热阻的概念求K:

$$R = \frac{1}{K \cdot S} = \frac{1}{\alpha_o \cdot S_o} + \frac{b}{\lambda \cdot S_m} + \frac{1}{\alpha_i \cdot S_i}$$

总传热系数必须和所选择的传热面积相对应，选择的传热面积不同，总传热系数的数值也不同

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

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

$$K_i S_i = K_o S_o$$

式中  $K_i$ 、 $K_o$ ——基于管内表面积、外表面积、的总传热系数，w/ (m<sup>2</sup>·°C)

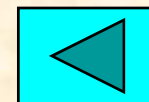
$S_i$ 、 $S_o$ ——换热器内表面积、外表面积，m<sup>2</sup>。

工程大多以换热管的外表面积为基准。

$$S = n \pi d l$$

$$S_o = n \pi d_o l$$

$$S_i = n \pi d_i l$$



## 总传热系数K (p226)

$$Q = KS\Delta t_m$$

$$Q = KS\Delta t_m = \frac{\Delta t_m}{1/KS}$$

总传热系数  $K$  综合反映传热设备性能，流动状况和流体物性对传热过程的影响，倒数  $1/K$  称为传热过程的总热阻。

取得K的途径:

1. 实际测定



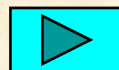
$$Q = KS\Delta t_m$$



$$K = \frac{Q}{S\Delta t_m}$$

2. 用经验公式求K:

3. 用串联热阻的概念求K:



4. K的经验数值





## $K$ 的经验数值

在有关传热手册和专著中载有某些情况下  $K$  的经验数值，可供设计参考。

流体种类	总传热系数 $K(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
水—气体	12~60
水—水	800~1800
水—煤油	350左右
水—有机溶剂	280~850
气体—气体	12~35
饱和水蒸气—水	1400~4700
饱和水蒸气—气体	30~300
饱和水蒸气—油	60~350
饱和水蒸气—沸腾油	290~870

## 影响K的主要因素（p227）

### 污垢热阻的影响：

垢层热阻，使总传热系数减小，传热速率显著下降。因为垢层导热系数很小，即使厚度不大，垢层热阻也很大，往往会成为主要热阻，必须给予足够重视。

如管壁外侧和内侧的污垢热阻分别是  $R_{s0}$  和  $R_{si}$ ，则总热阻

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_o} + R_{s0} + \frac{b}{\lambda} \cdot \frac{d_o}{d_m} + R_{si} \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i}$$

## 影响K的主要因素 (p227)

### 污垢热阻的大致数值

流 体 种 类	污 垢 热 阻 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	流体种类	污垢热 阻 $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
水( $u < 1\text{m/s}$ , $t < 50^\circ\text{C}$ )		蒸气	
海水	0.0001	有机蒸汽	0.0002
河水	0.0006	水蒸气(不含油)	0.0001
井水	0.00058	水蒸气废气(含油)	0.0002
蒸馏水	0.0001	制冷剂蒸汽(含油)	0.0004
锅炉给水	0.00026	气体	
未处理的凉水塔用水	0.00058	空气	0.0003
经处理的凉水塔用水	0.00026	压缩气体	0.0004
多泥沙的水	0.0006	天然气	0.002
盐水	0.0004	焦炉气	0.002

## 影响K的主要因素 (p227)

流体对流给热系数的影响:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_0} \frac{d}{d_0} + \frac{b}{\lambda} \frac{d}{d_m} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d}{d_i}$$

对平壁或薄管壁,  $d \approx d_i \approx d_0 \approx d_m$

$$\frac{b}{\lambda} \ll \frac{1}{\alpha}$$

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

若  $\alpha_0 \gg \alpha_i$ , 则  $K \approx \alpha_i$

若  $\alpha_i \gg \alpha_0$ , 则  $K \approx \alpha_0$

## 影响K的主要因素 (p227)

流体对流给热系数的影响:

有人曾作过实验,数据如下:

$\alpha_0(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\alpha_i(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$	$K(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$
5000	40	39.7
10000	40	39.8
5000	80	78.8

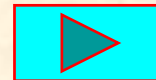
- ◆ K与 $\alpha$ 的关系: 改变较小的 $\alpha$ 值对K值的影响较大。
- ◆  $\alpha$ 对K的影响一般是指不同的流体的流速对K值的影响, 如流体在管内强制湍流给热时有

$$\alpha \propto u^{0.8}$$

#### 4.4.4 总传热方程的应用 (p235)

$$Q = KS\Delta t_m$$

- 1、传热面积的计算
- 2、实验测定总传热系数K
- 3、换热器的操作型计算





例:如图示 求:S=?

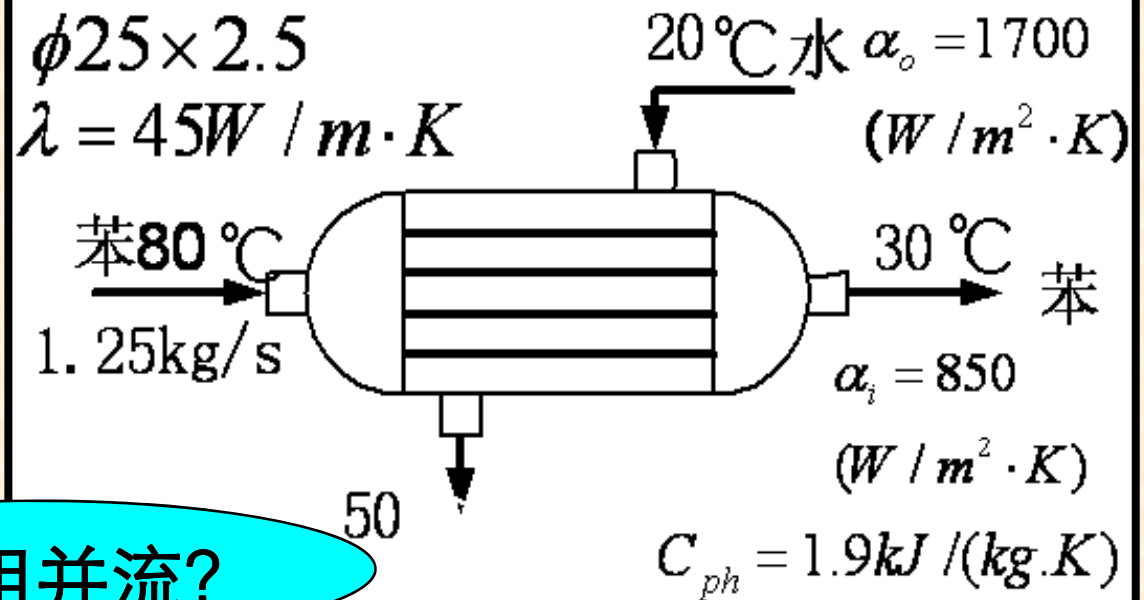
解: 
$$S_o = \frac{Q}{K_o \Delta t_m}$$

$$\begin{aligned} Q &= W_h C_{ph} (T_1 - T_2) \\ &= 1.25 \times 1900 \times (80 - 30) \\ &= 118800 \text{ W} \end{aligned}$$

能否用并流?



$$\begin{aligned} \frac{1}{K_o} &= \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o} \\ &= \frac{25}{850 \times 20} + \frac{0.0025}{45} \cdot \frac{25}{22.5} + \frac{1}{1700} \end{aligned}$$



$$\Delta t_m = \frac{30 - 10}{\ln 30 / 10} = 18.2^\circ \text{C}$$

$$K_o = 471.7 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

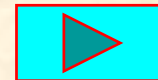
$$S_o = \frac{118800}{471.7 \times 18.2} = 13.8 \text{ m}^2$$

$$S_o = n \pi d_o l$$

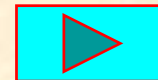
#### 4.4.4 总传热方程的应用 (p235)

$$Q = KS\Delta t_m$$

1、传热面积的计算



2、实验测定总传热系数K



3、换热器的操作型计算

例:为测定一台列管式换热器的K,将1100m<sup>3</sup>/h(标态)压缩空气经换热器从140℃冷却至60℃,冷却介质为水,水温从28℃升到38℃(逆流),该换热器规格如下:S:φ25×2×2200mm;n=91根。此换热器在此操作条件下K=?

解:

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

标态下空气:  $\rho = 1.293 \text{ kg} / \text{m}^3$

100℃下空气:  $C_{ph} = 1.009 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$

$$Q = W_h C_{ph} (T_1 - T_2) = \frac{1100 \times 1.293}{3600} \times 1.009 \times 10^3 (140 - 60) = 31891 \text{ W}$$

$$S_o = n \pi d_o l = 91 \pi \times 0.025 \times 2.2 = 15.7 \text{ m}^2$$



$$\Delta t_m = \frac{102 - 32}{\ln \frac{102}{32}} = 60.4^\circ \text{C}$$

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

$$= 33.63 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

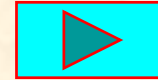
$$K_i = \frac{Q}{S_i \Delta t_m} = 40 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$K_o S_o = K_i S_i = KS$$

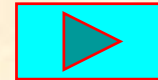
#### 4.4.4 总传热方程的应用 (p235)

$$Q = KS\Delta t_m$$

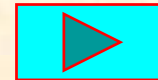
1、传热面积的计算



2、实验测定总传热系数K



3、换热器的操作型计算



例：有一逆流操作的换热器，热流体为空气， $\alpha_1 = 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，冷却水走管内， $\alpha_2 = 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。已知 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ， $t_2 = 85^\circ\text{C}$ ， $T_1 = 100^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 70^\circ\text{C}$ ，忽略管壁热阻和传热面积的变化。当水流量增加一倍时，试求：（1）水和空气的出口温度 $t_2'$ 和 $T_2'$ ；（2）热流量 $Q'$ 比原热量 $Q$ 增加多少？

解：（1）对原工况： $Q = W_c C_{pc} (t_2 - t_1) = W_h C_{ph} (T_1 - T_2)$

$$Q = KS \Delta t_m = KS \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}$$

由上两式联立求解，消去 $(T_1 - T_2)$ 得：

$$\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} = \frac{KS}{W_h C_{ph}} \left( 1 - \frac{W_h C_{ph}}{W_c C_{pc}} \right) \quad (\text{a})$$

原工况:

$$\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} = \frac{KS}{W_h C_{ph}} \left( 1 - \frac{W_h C_{ph}}{W_c C_{pc}} \right) \quad (\text{a})$$

对新工况:

$$\ln \frac{T_1 - t'_2}{T'_2 - t_1} = \frac{K'S}{W_h C_{ph}} \left( 1 - \frac{W_h C_{ph}}{W'_c C_{pc}} \right) \quad (\text{b})$$

(b)/ (a) :

$$\ln \frac{T_1 - t'_2}{T'_2 - t_1} = \ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \times \left( \frac{K'}{K} \right) \left( \frac{1 - \frac{W_h C_{ph}}{W'_c C_{pc}}}{1 - \frac{W_h C_{ph}}{W_c C_{pc}}} \right) \quad (\text{c})$$

其中:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{2000}} = 95.2 \text{ W } / (\text{m} \cdot ^\circ \text{C})$$

$$\frac{W_h C_{ph}}{W_c C_{pc}} = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} = 2.17$$

$$K' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{2^{0.8} \alpha_2}} = 97.2 \text{ W } / (\text{m} \cdot ^\circ \text{C})$$

$$\frac{W_h C_{ph}}{W'_c C_{pc}} = \frac{W_h C_{ph}}{2W_c C_{pc}} = 1.09$$



代入 (c) 式得:

$$\ln \frac{T_1 - t_2'}{T_2' - t_1} = -0.0946 \quad (d)$$

由热量衡算式有:

$$Q = W_c' C_{pc} (t_2' - t_1) = W_h C_{ph} (T_1 - T_2') \quad (e)$$

联立(d)、(e)求解:

$$T_2' = 59.8^\circ\text{C} \quad t_2' = 63.8^\circ\text{C}$$

(2)新旧两种工况的传热速率之比:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{K' \Delta t_m'}{K \Delta t_m} = \frac{W_h C_{ph} (T_1 - T_2')}{W_h C_{ph} (T_1 - T_2)} = 1.34$$

## 对流传热过程的量纲分析 (p245)

$$Nu = C Re^a Pr^k Gr^g$$

对流传热中常用的准数

定 义	名 称	意 义
$Nu = \alpha l / \lambda$	努塞尔准数	待求准数，含待求的给热系数
$Re = \rho u l / \mu$	雷诺准数	反映流动型态对传热的影响
$Pr = c_p \mu / \lambda$	普兰特准数	反映流体物性的影响
$Gr = l^3 \rho^2 \beta g \Delta t / \mu^2$	格拉斯霍夫准数	反映自然对流的影响

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = C \left( \frac{\rho u l}{\mu} \right)^a \left( \frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^k \left( \frac{\beta g \Delta t l^3 \rho^2}{\mu^2} \right)^g$$

## 对流传热过程的因次分析 (p246)

应用  $Nu = C Re^a Pr^k Gr^g$  注意的问题:

### 1. 定性温度

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

$$(2) \quad \text{膜温 } t_m = \frac{t_w + t}{2}$$

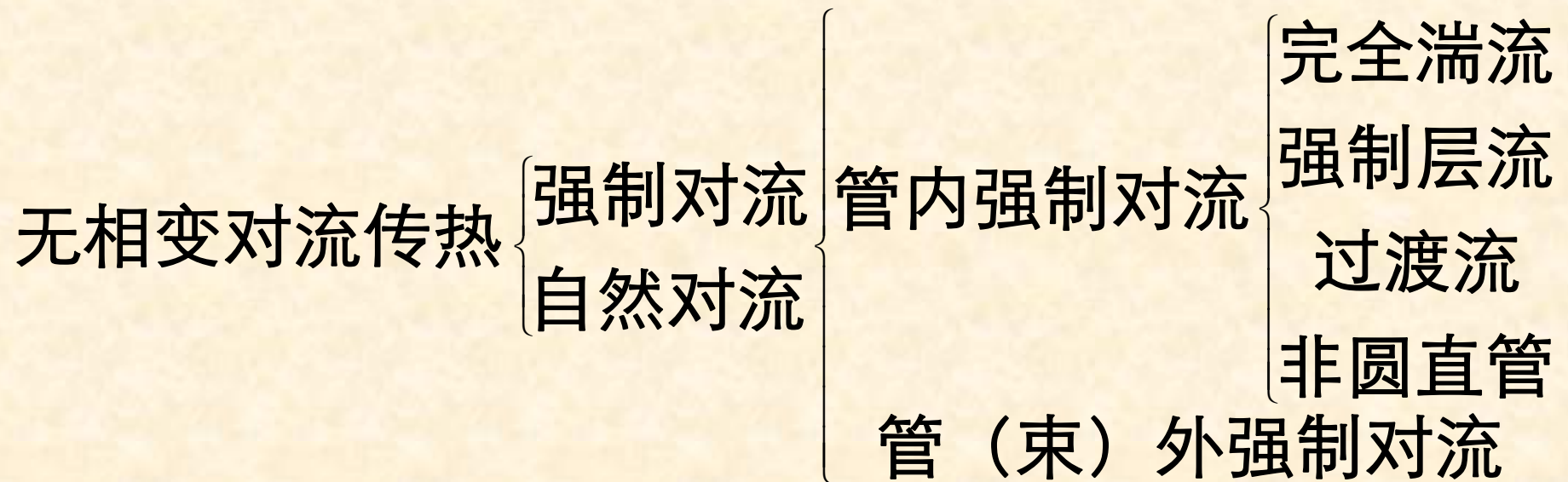
### 2. 特征尺寸 $l$

取对流动与换热有主要影响的某一几何尺寸。

### 3. 应用范围: $Re$ 、 $Pr$ 。

4. 准数是一个无因次数群, 其中涉及到的物理量必须用**统一的单位制度**。

# 流体无相变化时的对流给热系数



## 对流传热中常用的准数

定 义	名 称	意 义
$Nu = \alpha l / \lambda$	努塞尔准数	待求准数，含待求的给热系数
$Re = lu\rho / \mu$	雷诺准数	反映对流强度对传热的影响
$Pr = c_p \mu / \lambda$	普兰特准数	反映流体物性的影响
$Gr = l^3 \rho^2 \beta g \Delta t / \mu^2$	格拉斯霍夫准数	反映自然对流的影响

### 1. 流体在圆形管内作强制湍流

## 流体在圆形管内作强制湍流 (p242)

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

流体被加热时,  $n=0.4$ ; 流体被冷却时,  $n=0.3$

说明:

◆ 适用于低粘度(<2cp)流体,  $Re > 10000$ ;  $0.7 < Pr < 120$ ;  $L/d > 60$

◆ 定性温度: 取流体进、出口温度的算术平均值

◆ 特征尺寸: 取为管内径 $d_i$

◆ 如果 $L/d < 60$ , 仍可用上式, 但要修正, 修正系数为

$$\left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{0.7} \right]$$

## 流体在圆形管内作强制对流 (p248)

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

◆讨论:

若 $n=0.4$ ,有:

$$\alpha \propto (u\rho)^{0.8} \lambda^{0.6} \mu^{-0.4} C_p^{0.4} d_i^{-0.2}$$

当流体物性一定时，影响对流传热的主要有流速和流通截面积，可以通过增大流速、减小流体截面积来强化对流传热。

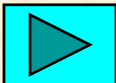
**P250~251自学**



## 对流传热中常用的准数

定 义	名 称	意 义
$Nu = \alpha l / \lambda$	努塞尔准数	待求准数，含待求的给热系数
$Re = lu\rho / \mu$	雷诺准数	反映对流强度对传热的影响
$Pr = c_p \mu / \lambda$	普兰特准数	反映流体物性的影响
$Gr = l^3 \rho^2 \beta g \Delta t / \mu^2$	格拉斯霍夫准数	反映自然对流的影响

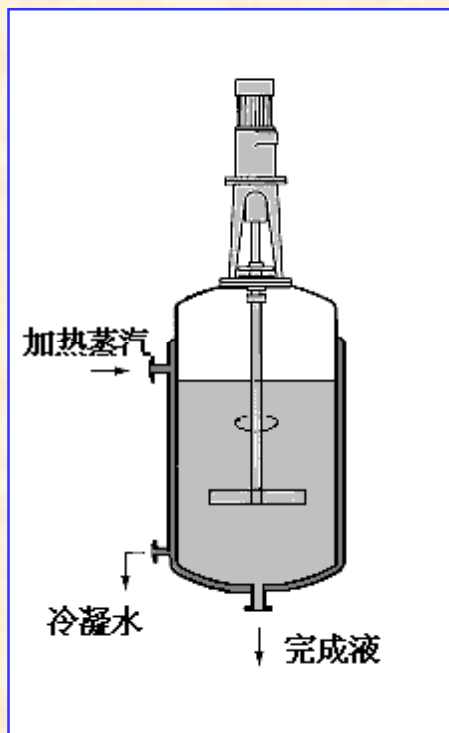
1. 流体在管内作强制对流 

2. 管外强制对流 

## 4.7 换热器 (p271)

### 间壁式换热器的类型和结构型式

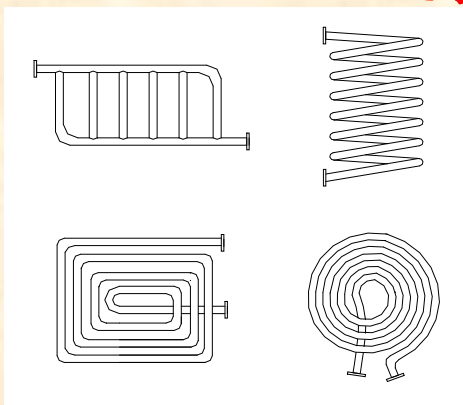
#### 夹套式换热器



结构简单,但传热面积小,传热效率低,为提高传热效果,釜内可安装搅拌器、蛇管。主要用于反应过程的加热或冷却。

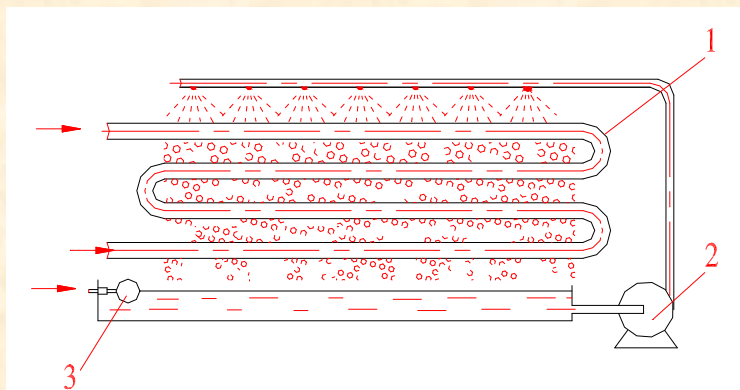
## 间壁式换热器的类型和结构型式

蛇管换热器 { 浸没式(沉浸式)蛇管换热器  
喷淋式蛇管换热器



优点：结构简单，能承受高压；

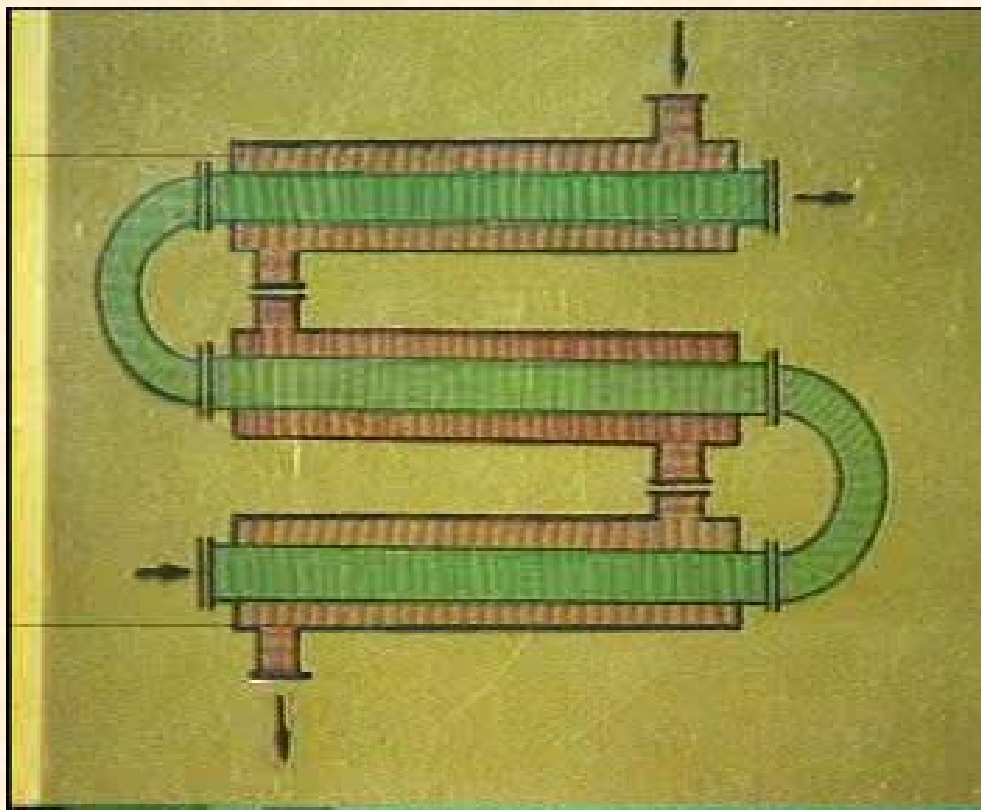
缺点：管外流体的给热系数小，为强化传热，可在器内安装搅



喷淋式换热器的最大优点是便于检修和清洗，对冷却水水质可以适当降低。

# 间壁式换热器的类型和结构型式

## 套管式换热器



螺旋套管换热器

**优点：**结构简单，能承受较高压力，应用灵活；

**缺点：**耗材多，占地面积大，难以构成很大的传热面积，故一般适合于流体流量不大、传热负荷较小的场合。

## 间壁式换热器的类型和结构型式

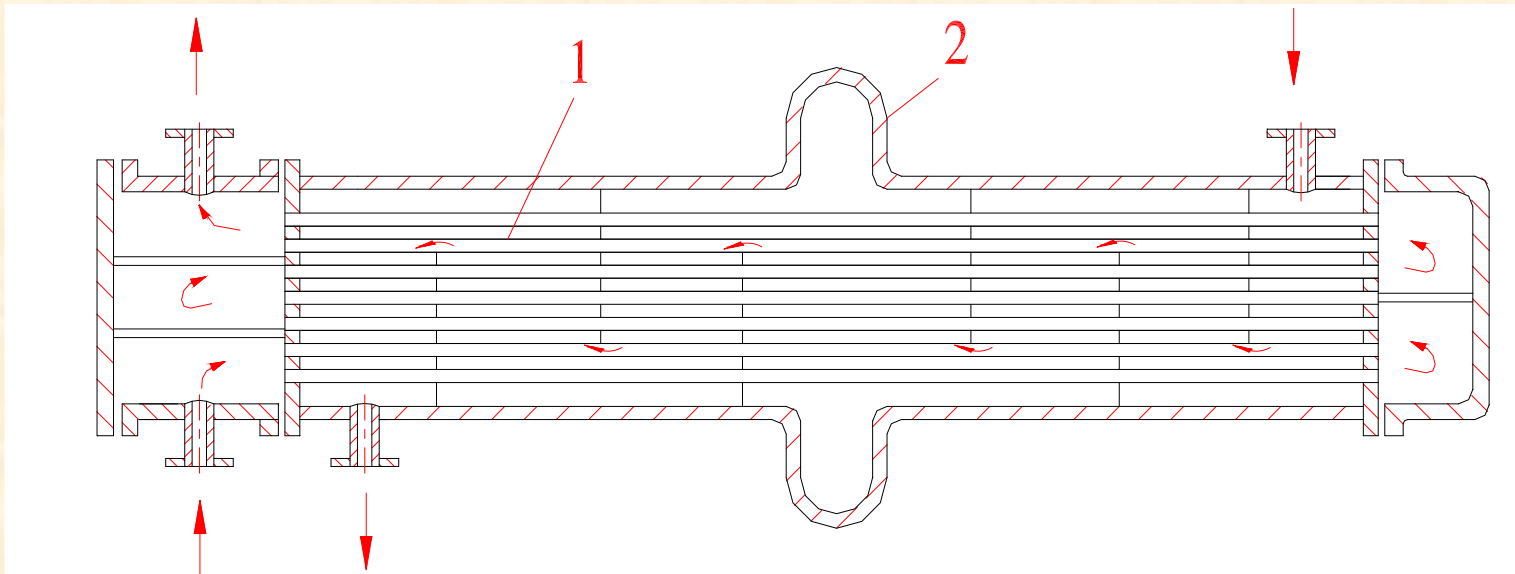
**列管式换热器** 工业上使用最广泛的一种换热设备。

优点：单位体积的传热面积、处理能力和操作弹性大，适应能力强，尤其在高温、高压和大型装置中采用更为普遍。



# 列管式换热器

## 固定管板式

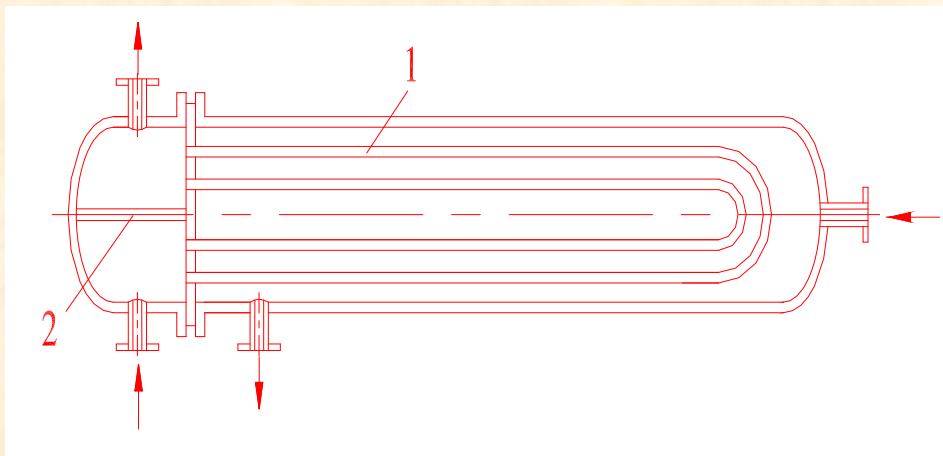


**优点：**结构简单、紧凑、造价便宜；

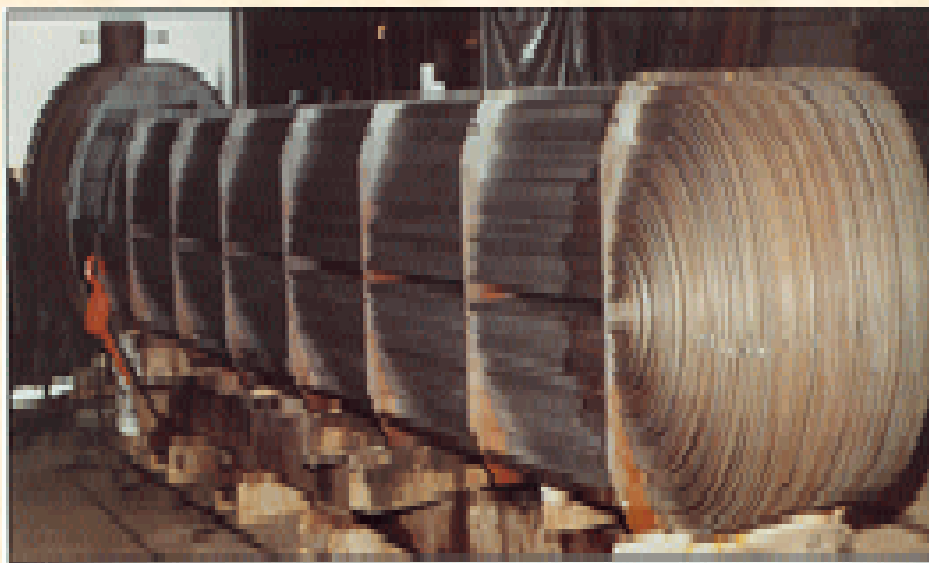
**缺点：**管外不能机械清洗，管板、管子和壳体都是刚性连接，当管壁和壳壁的温度相差较大时，会产生很大的热应力，甚至将管子从管板上拉脱。解决方法补偿圈（或称膨胀节）。

# 列管式换热器

## U 型管式换热器



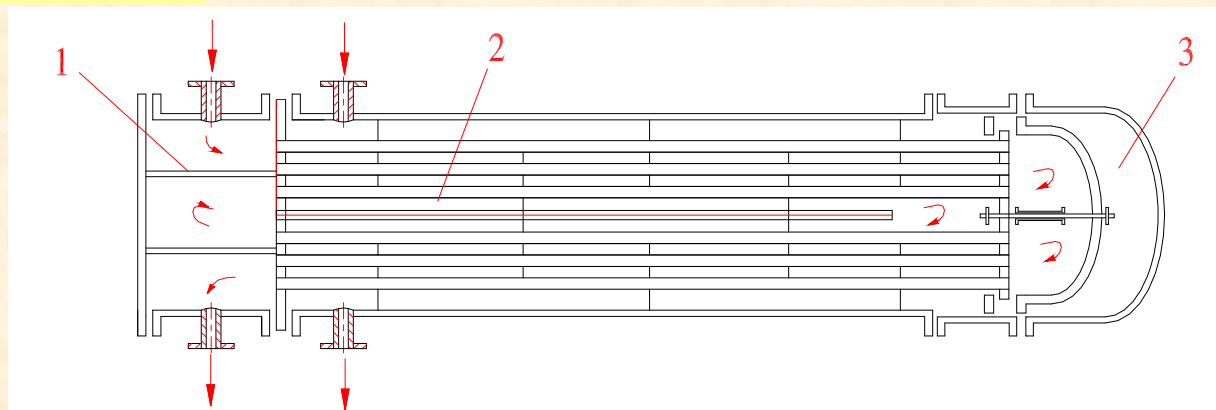
管子受热受冷可以自由伸缩，而与壳体无关。这种结构比较简单，管束可以拔出清洗，但管内的机械清洗困难，因此管内必须是清洁流体。





# 列管式换热器

## 浮头式换热器



**优点：**浮头式换热器具有良好的热补偿性能，可以将管束从壳体中拔出清洗；

**缺点：**结构复杂，造价较高。

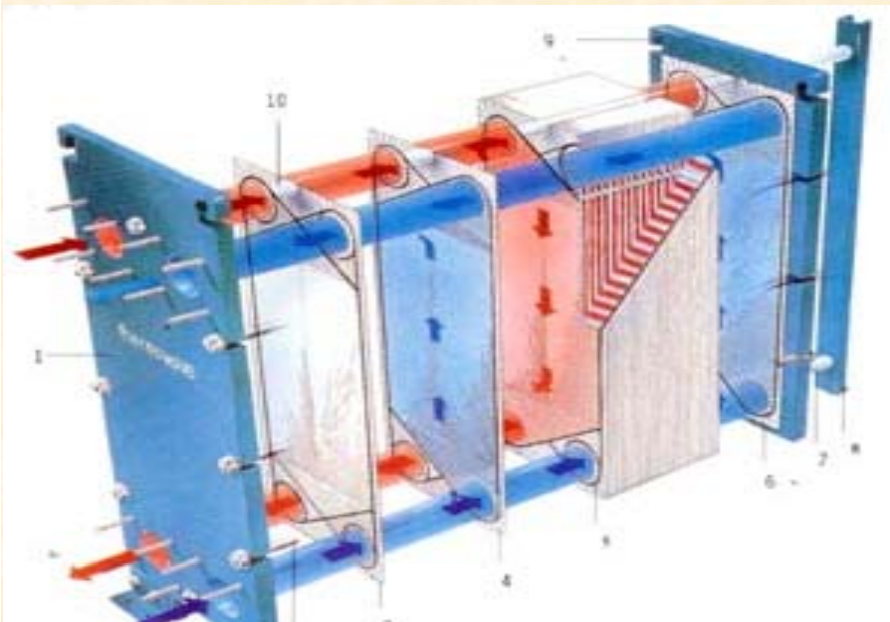
以上几种类型的列管式换热器，我国已有标准化系列产品，可供选用。例如：型号为 $F_B800-180-16-4$ 换热器， $F_B$ 表示浮头式B型， $25 \times 2.5\text{mm}$ 换热管，正方形排列，壳体公称直径800mm，公称传热面积 $180\text{m}^2$ ，公称压力 $16\text{kgf/cm}^2$ ，管程数为4。

## 其他类型的换热器

### 板式换热器：



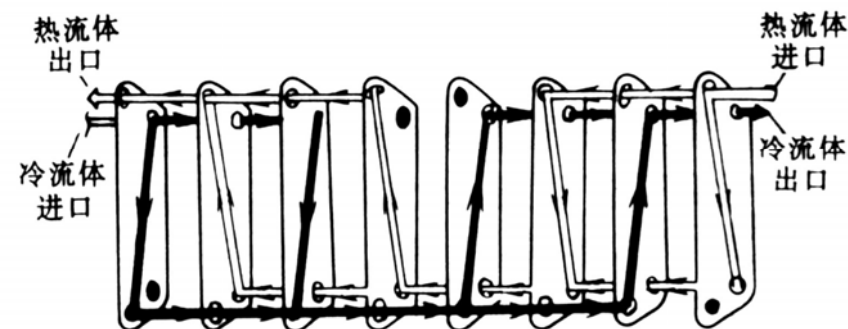
## 板式换热器：



- 1.固定压紧板 2.夹紧螺栓 3.前端板
- 4.换热板片 5.密封垫片 6.后端板
- 7.下导板 8.后支柱 9.活动压紧板
- 10.上导板

### 板式换热器的缺点：

处理能力小,操作压力较低,操作温度不宜太高。



### 板式换热器的优点：

结构紧凑，占用空间小；传热系数高；热损失小；适应性好，易调整；流体滞留量小，对运转条件的变化反应迅速；拆装简单，容易维护；结垢倾向低；低成本。

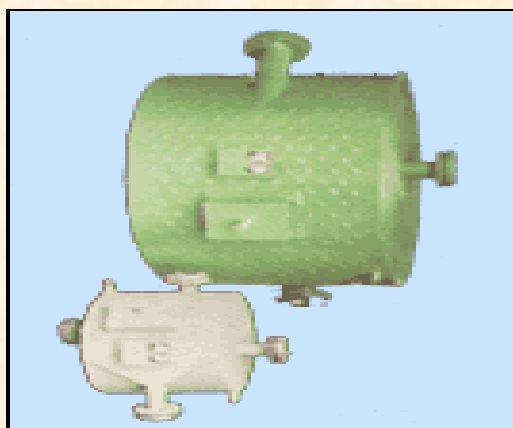
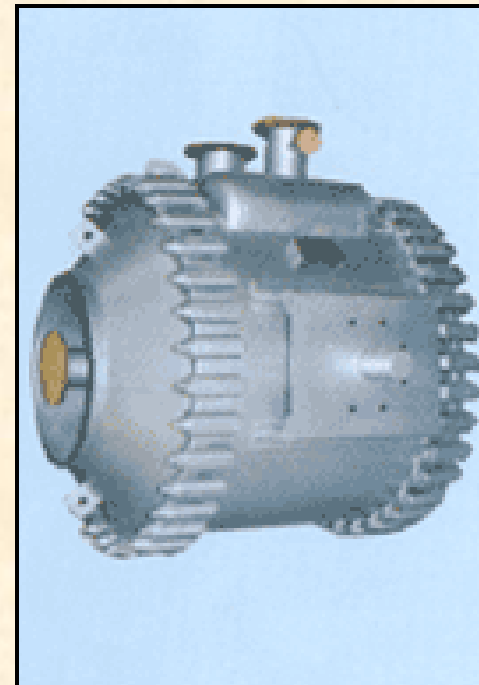
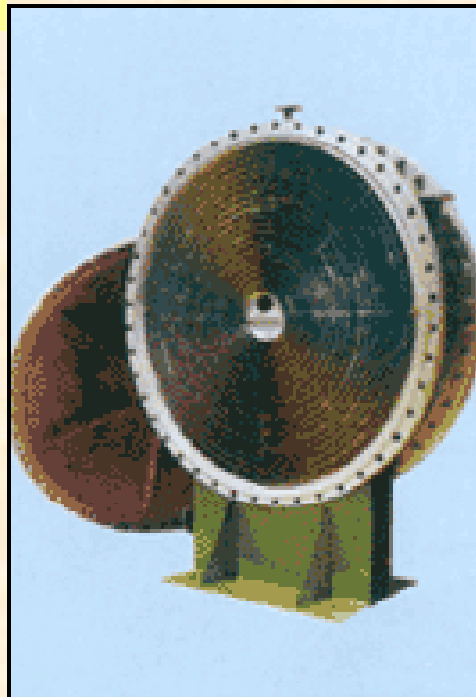
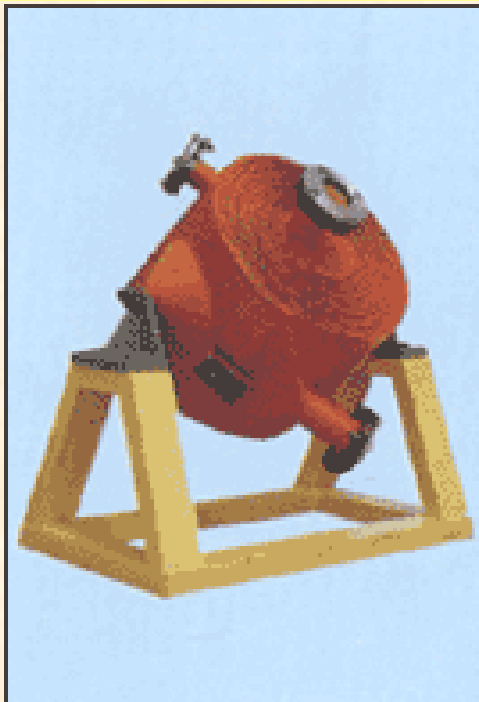
## 其他类型的换热器

### 螺旋板式换热器



## 其他类型的换热器

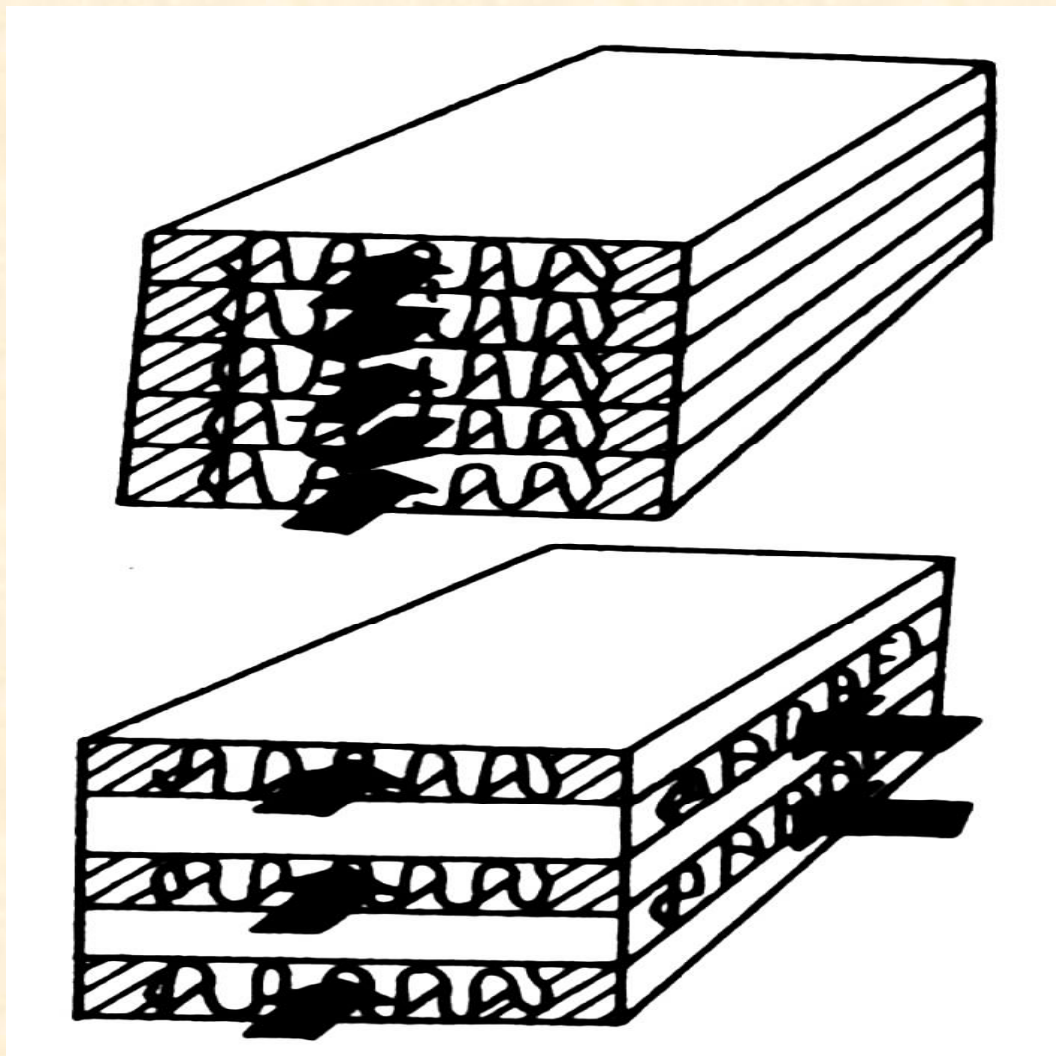
### 螺旋板式换热器





## 其他类型的换热器

### 板翅式换热器



板翅式换热器是一种传热效果更好、结构更为紧凑的换热器。

## 其他类型的换热器

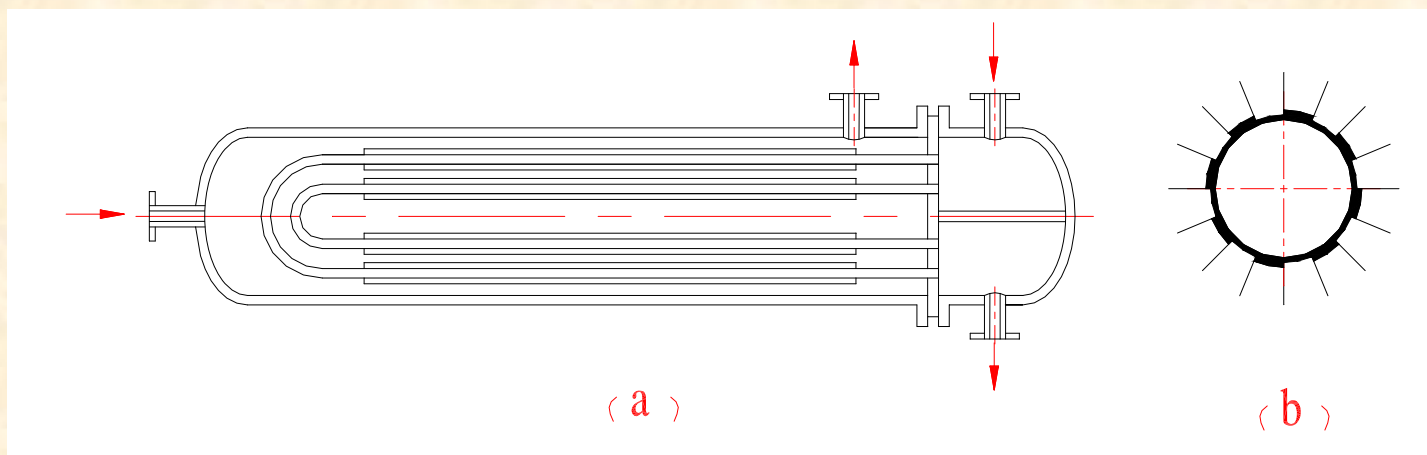
### 翅片式换热器





## 其他类型的换热器

### 翅片式换热器

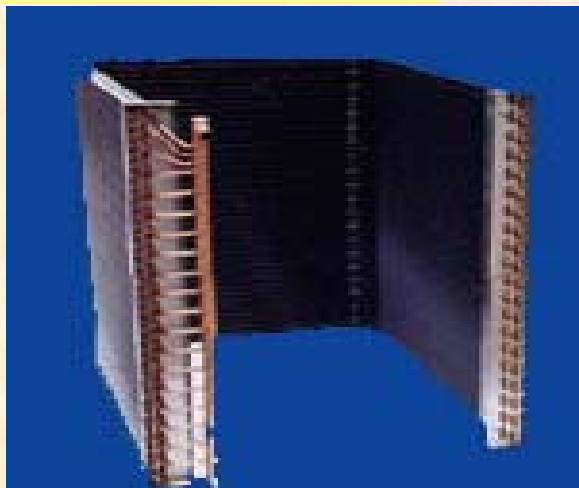


**结构：**在管子外表面上装有径向或轴向翅片；

**用途：**适用于两种流体的给热系数相差很大的场合。翅片与光管的连接应紧密无间，否则会在连接处产生很大的接触热阻。常用的连接方法有镶嵌、缠绕或高频焊接，其中焊接最为密切，但加工费用较高。

## 其他类型的换热器

### 翅片式换热器



翅片盘管换热器



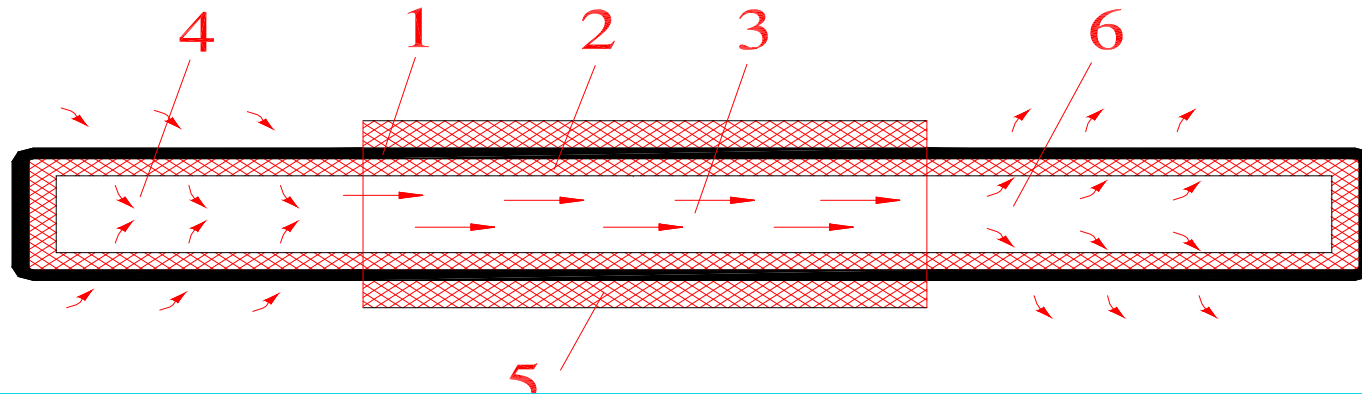
空调机组表冷器



组合式铝合金散热器 (T形翅)

## 其他类型的换热器

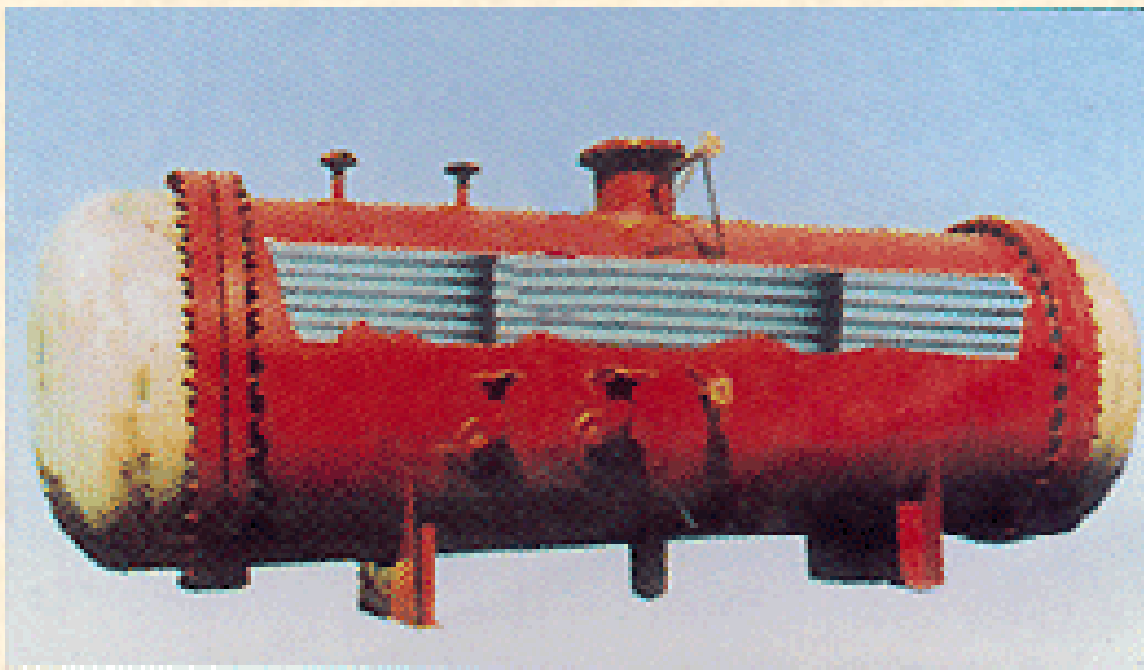
### 热管换热器



1—导管 2—吸液芯 3—蒸汽 4—吸热蒸发端  
5—保温层 6—放热冷凝端

**结构及工作原理：**将一根金属管的两端密封，抽出不凝性气体，充以一定量的某种工作液体而成。当热管的一端被加热时，工作液体受热沸腾汽化，产生的蒸汽流至冷却端冷凝放出冷凝潜热，冷凝液沿着具有毛细结构的吸液芯在毛细管力的作用下回流至加热段再次沸腾汽化，工作介质如此反复循环，热量则由热管的轴向由加热端传至冷却端。

## 其他类型的换热器



**不锈钢波节管**是近十年来在换热设备上使用的新型高效的碳钢直管的替代产品；它具有换热系数高,耐腐蚀,不易结垢等特点;由于管体在轴线上的横截面周期性的变化使管内的介质产生涡流,破坏临界层使波节管更加易于清洗并且不易结垢.

## 换热的强化途径（p288）

说明：强化传热应从热阻大的一侧着手，对有相变的沸腾和冷凝传热，强化传热的要求并不十分迫切。

$$Q = KS\Delta t_m$$

1. 增加传热温差



2. 提高传热系数

3. 提高传热面积



## 增加传热温差

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

1. 与两流体的进出口温度及流动型式有关；
2. 物料温度由工艺决定，但加热或冷却介质的温度可以有很大改变，如提高蒸汽压力可提高蒸汽温度；
3. 逆流操作

## 换热的强化途径（p288）

说明：强化传热应从热阻大的一侧着手，对有相变的沸腾和冷凝传热，强化传热的要求并不十分迫切。

$$Q = KS\Delta t_m$$

1. 增加传热温差
2. 提高传热系数
3. 提高传热面积





## 提高传热系数

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + R_{s1} + R_{s2}}$$

### 1. 改变流动状态

螺纹槽、螺纹管、螺旋槽管、麻花纽带等



## 提高传热系数

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + R_{s1} + R_{s2}}$$

### 2. 提高流速

增加管程数; 增加折流挡板数, 但能耗增加。

### 3. 引入机械振动

### 4. 在流体中加固体颗粒

### 5. 在气流中喷入液滴

### 6. 采用短管换热器

## 换热的强化途径（p288）

说明：强化传热应从热阻大的一侧着手，对有相变的沸腾和冷凝传热，强化传热的要求并不十分迫切。

$$Q = KS\Delta t_m$$

1. 增加传热温差
2. 提高传热系数
3. 提高传热面积



## 提高传热面积

### 1. 加装翅片



### 2. 用螺纹管或螺旋槽管代替光管

## 换热的强化途径（p288）

### 强化传热的新技术

- 电水动力学EHD (Electrichydrodynamics)强化传热技术
- 添加剂强化传热技术
- 纳米流体强化传热技术
- 超声波强化传热技术