



第10章 传热过程分析与换热器计算

哈尔滨工业大学

<http://iaaf.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

本章的主要内容

<http://iaaf.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

- 引言
- 传热过程的分析与计算
- 换热器的类型
- 换热器中传热过程平均温差
- 间壁式换热器的热设计

哈尔滨工业大学

1 引言

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

导热、对流、辐射同地点、同时共同起作用时的换热

❖ 耦合计算（导热、对流、辐射三个过程相互影响）例：

■ 辐射与对流，高温烟气对对流排管换热

■ 气动热辐射 是高超声速高温气体动力学、气动热物理研究的重要内容，特别是高超声速气体动力学与红外辐射的耦合传输

哈尔滨工业大学

1 引言

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

❖ 解耦计算（叠加法），在一定范围内误差不大。例如：炉膛内的高温烟气对对流排管换热

$$Q = Q_c + Q_r \\ = h_c A (t_f - t_w) + \varepsilon_s \sigma (T_f^4 - T_w^4)$$

❖ 如果辐射占的份额不多时，用对流换热系数的形式表示。

哈尔滨工业大学

1 引言

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$Q = h_t A (t_f - t_w) = (h_c + h_r) A (t_f - t_w)$$

$$h_r = \frac{\varepsilon_s \sigma (T_f^4 - T_w^4)}{(t_f - t_w)} = \varepsilon_s \sigma (T_f^2 + T_w^2) (T_f + T_w)$$

❖ 式中： h_r 称为辐射换热系数； h_t 称为复合换热系数。

哈尔滨工业大学

1 引言

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

一、定义：

热量由热流体通过间壁传给冷流体的过程。

二、传热公式

$$Q = k (t_{f1} - t_{f2}) A \quad [W]$$

❖ $k [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ 传热系数

❖ $\sum R = 1/k$ 传热热阻（总热阻）

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

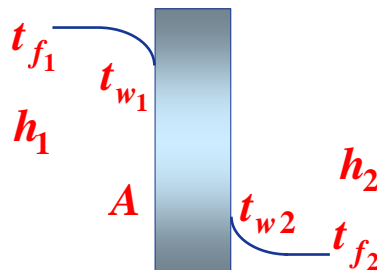
❖ 通过平壁的传热

$$Q = k(t_{f1} - t_{f2})A$$

❖ 传热系数

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}}$$

$$\sum R = \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2} \quad (\text{串联})$$



哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

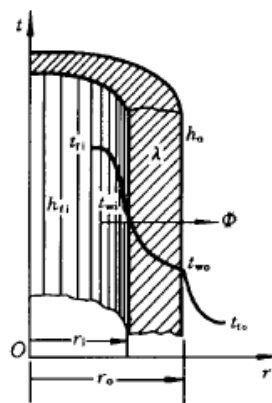
shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

通过圆管的传热

❖ 由于圆管内外侧的表面积不相等，所以对内侧而言，与对外侧而言的传热系数在数值上是不同的。

❖ 稳态条件下，无限长，只有径向传热，不考虑热损失。



通过圆管的传热

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

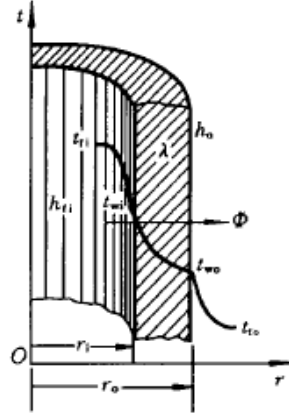
航空航天热物理研究所

- ❖ 三个传热环节
- ❖ f_i, f_o 表示管内外侧流体
- ❖ w_i, w_o 表示管内外侧壁面

$$t_{f_i} - t_{w_i} = \frac{Q}{h_i \pi d_i l}$$

$$t_{w_i} - t_{w_o} = \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_o}{d_i}$$

$$t_{w_o} - t_{f_o} = \frac{Q}{h_o \pi d_o l}$$



哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

- ❖ 三式相加，得

$$Q = \frac{\pi l (t_{f_i} - t_{f_o})}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}}$$

- ❖ 习惯上用管外侧面积为基准（工程上使用方便）

$$\begin{aligned} Q &= k_o A_o (t_{f_i} - t_{f_o}) = k_o \pi d_o l (t_{f_i} - t_{f_o}) \\ &= k \pi d_o l (t_{f_i} - t_{f_o}) \end{aligned}$$

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

❖ 上式中 k 代表以外侧面积 A_o 为基准的 k_o

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}}$$

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

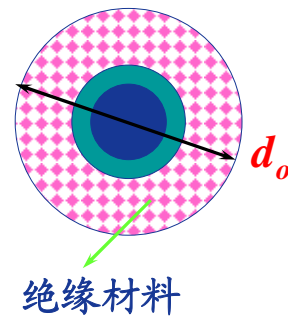
shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

❖ 在平壁上加厚保温层，热阻 \uparrow ， $k \downarrow$ ， $Q \downarrow$

❖ 在圆管壁上包保温层是否也一样呢？



哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

❖ 由式
$$Q = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}}$$

❖ 当 $\delta \uparrow$, $d_o \uparrow$

❖ (a) $\delta \uparrow \rightarrow$ 导热热阻 \uparrow

❖ (b) $d_o \uparrow \rightarrow \frac{1}{h_o d_o} \downarrow$

} 所以对于圆管
 $\delta \uparrow$, 并不一定
使 $k \downarrow$, 及 $Q \downarrow$

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

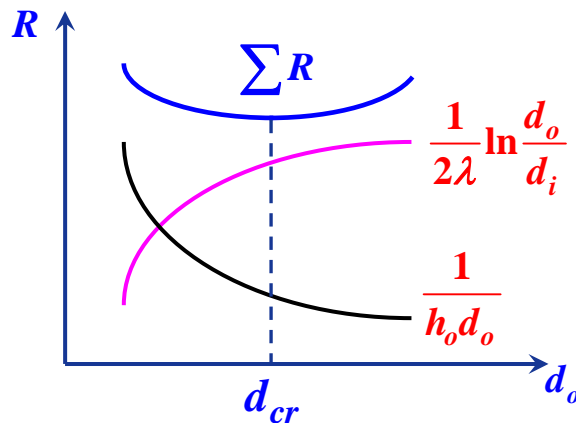
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

❖ 对应 $\sum R$ 最小值的 d_o (外径) 称为临界绝缘直径 d_{cr}



❖ 故 $\sum R$ 有一个最小值, 即 k 有个最大值, 此与 $\sum R$ 有关 d_o

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

- ❖ 当 $d_o < d_{cr}$ 时, 加大 d_o 使 $\sum R \downarrow$, 散热 $Q \uparrow$
- ❖ 当 $d_o \geq d_{cr}$ 时, 加大 d_o 使 $\sum R \uparrow$, 散热 $Q \downarrow$

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

- ❖ 求 d_{cr}

$$\frac{dQ}{dd_o} = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo}) \left(\frac{1}{2\pi d_o} - \frac{1}{h_o d_o^2} \right)}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}} = 0$$

- ❖ 得

$$(d_o)_{cr} = \frac{2\lambda}{h_o} = d_{cr}$$

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

- ❖ 上式中 d_{cr} 是散热量为最大值的条件，而不是散热量为最小值时的直径。可对 $d = d_{cr}$ 求 Q/l 的二阶导数，其结果为

$$\frac{d^2(Q/l)}{d(d_{cr})^2} = -2\pi(t_{fi} - t_{fo}) \frac{h_o^2}{1 + \ln(d_{cr}^2/d_i)}$$

- ❖ 由上式：二阶导数小于零，表明有极大值。因此，上面所定义的直径是最大热损失，而不是最小热损失。

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

- ❖ 由临界绝缘直径表达式：

- 用导热系数 λ 越大的材料保温， d_{cr} 就大
- 若 $\lambda = 20 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ ， $h_o = 10 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
则 $d_{cr} = 4m$ 。
- 若 $\lambda = 0.2 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ ， $h_o = 10 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
则 $d_{cr} = 0.04m$ 。

哈尔滨工业大学

2 传热过程的分析与计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

临界绝缘直径

- ❖ 由于一般工程所用的绝缘材料， d_{cr} 很小
- ❖ 对于动力管道，一般 d 均 $> d_{cr}$ ，故很少考虑 d_{cr} ，因为
$$\lambda = 0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}), h_o = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) \longrightarrow d_{cr} = 22 \text{ mm}$$
- ❖ 但是对于电线，需考虑 d_{cr}

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

一、换热器的分类

❖ 多种分类法

- 按冷却工质分：空冷、水冷、油冷
- 按制造换热器的材料分：铜、钢、陶瓷
- 按结构特点分：管式、壳式、板式

❖ 此处按传热原理分

间壁式、混合式、蓄热（回热）式

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

间壁式

暖风机、燃气加热器、冷凝器等

混合式

空调工程中的喷淋室、火力发电厂中的冷却塔

蓄热（回热）式

锅炉中回热式空气预热器

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

间壁式换热器

冷热流体被壁面隔开热传递过程包括热流体与壁面间对流换热、壁中的导热、壁面与冷流体间的对流换热；有时还包括辐射换热

暖风机、燃气加热器、冷凝器、蒸发器等

间壁式换热器的分类

管壳式换热器、板式换热器、肋片管式换热器、板翅式换热器、螺旋板式换热器

紧凑式换热器、微尺度换热器

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

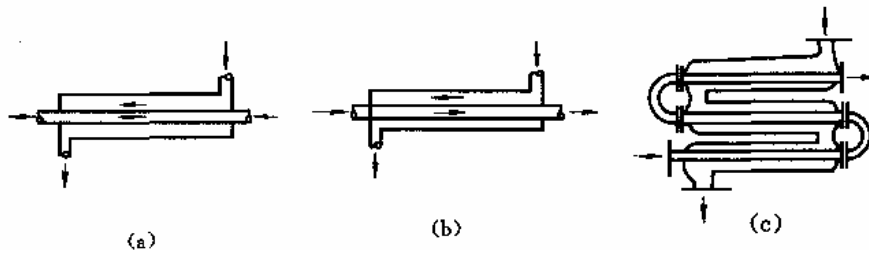
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

1、间壁式换热器的主要型式

(1) 套管式换热器



适用于传热量不大或流体流量不大的情形。

哈尔滨工业大学

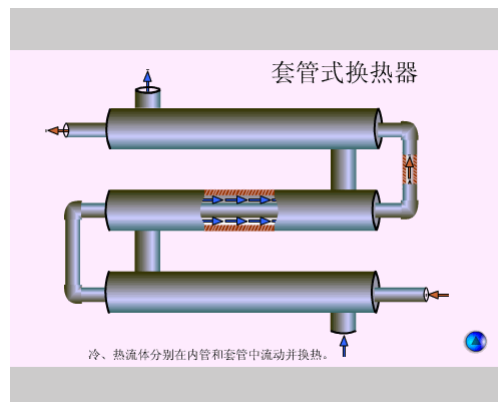
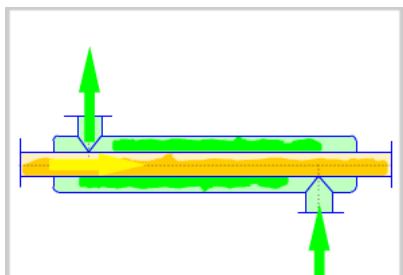
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(1) 套管式换热器



3 换热器的类型

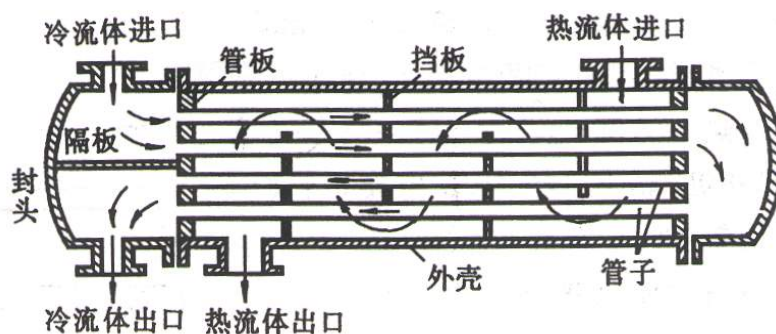
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 壳管式换热器

这是间壁式换热器的一种主要形式，又称管壳式换热器。



简单的壳管式换热器示意图

大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

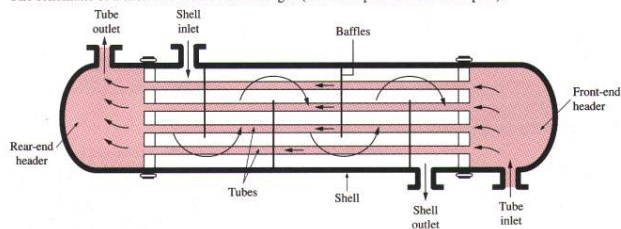
(2) 壳管式换热器



优点：结构坚固、易于制造、适应性强、处理能力大、高温高压下也可应用、清洗方便
缺点：材料消耗大、不紧凑
应用：工业上用得最多，历史悠久，占主导地位

FIGURE 10-4

The schematic of a shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass).



3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 壳管式换热器

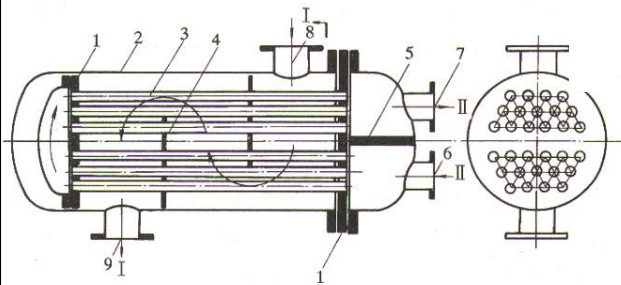


图 10-4 管壳式换热器示意图

1-管板; 2-外壳; 3-管子; 4-挡板; 5-隔板; 6、7-管程进口及出口; 8、9-壳程进口及出口

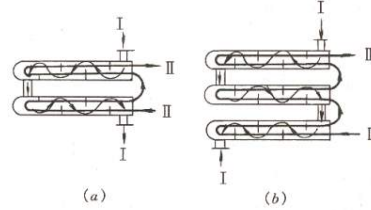


图 10-5 多壳程与多管程换热器

(a) 2壳程 4管程; (b) 3壳程 6管程

哈尔滨工业大学

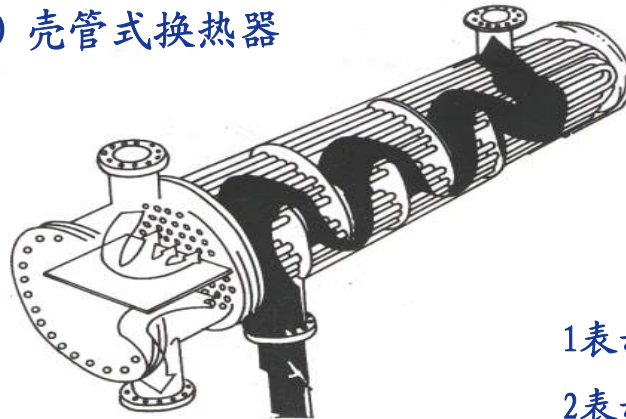
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 壳管式换热器



1表示壳程数

2表示管数

1-2 型换热器剖面示意图

1-2型换热器

哈尔滨工业大学

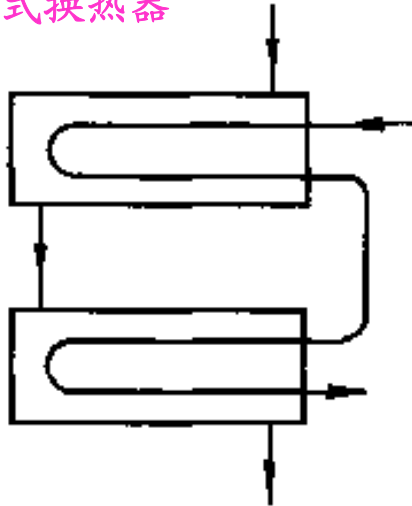
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 壳管式换热器



2-4型换热器

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 壳管式换热器

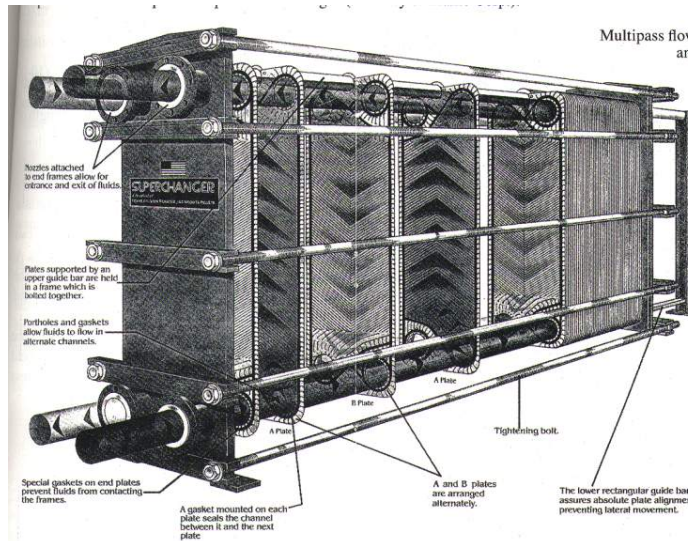


FIGURE 10-5

Multipass flow arrangements in shell-and-tube heat exchangers.

3 换热器的类型

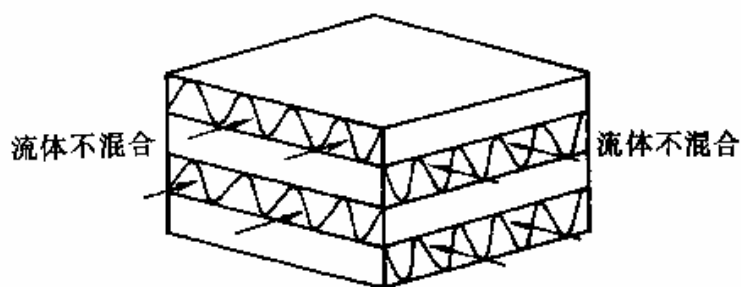
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(3) 交叉流换热器

它是间壁式换热器的又一种主要型式。根据换热表面结构的不同又可有管束式、管翅式及板翅式等的区别。



哈尔滨工业大学

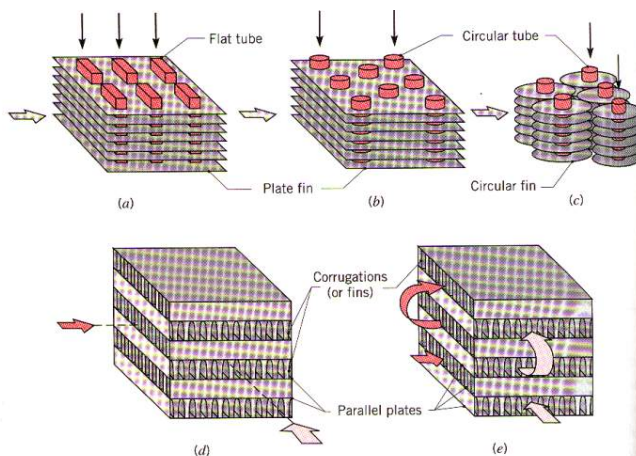
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(3) 交叉流换热器



肋片管式：肋化系数可达25；传热系数可提高1~2倍，结构较紧凑、适于两侧流体表面传热系数相差较大时，肋片侧流动阻力大、可能有较大的接触热阻

板翅式：结构紧凑、轻巧、传热面高；承压100bar，易堵塞

FIGURE 11.5 Compact heat exchanger cores. (a) Fin-tube (flat tubes, continuous plate fins). (b) Fin-tube (circular tubes, continuous plate fins). (c) Fin-tube (circular tubes, circular fins). (d) Plate-fin (single pass). (e) Plate-fin (multipass).

哈尔滨工业大学

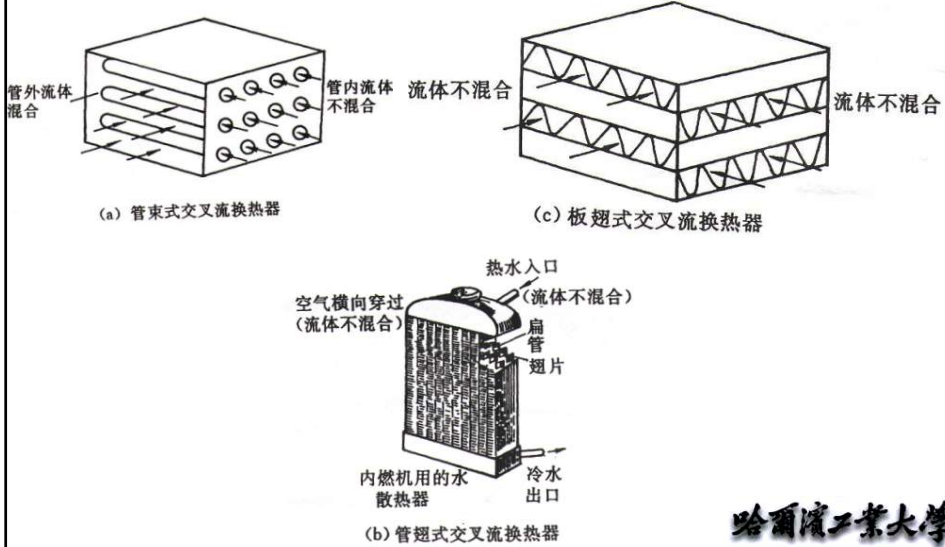
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(3) 交叉流换热器



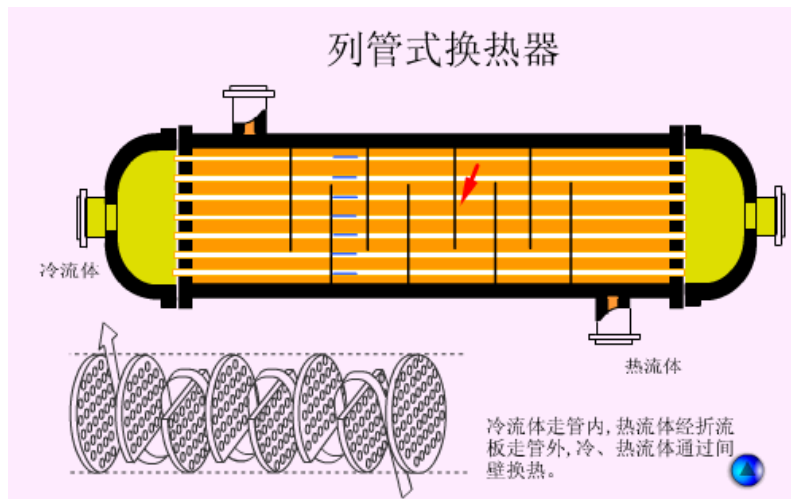
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(3) 交叉流换热器



3 换热器的类型

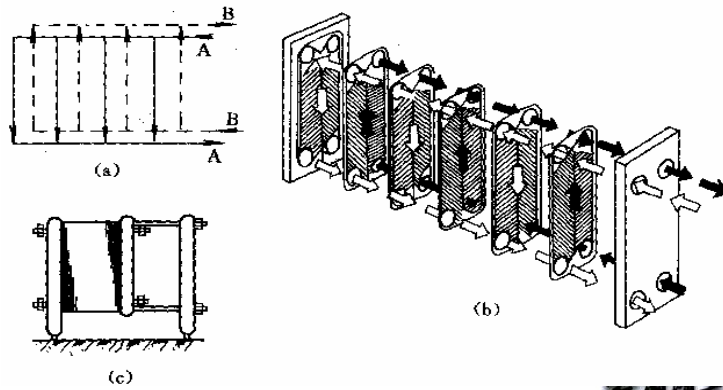
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(4) 板式换热器

板式换热器拆卸清洗方便，故适合于含有易污染物的流体的换热。



哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(4) 板式换热器

优点：结构紧凑、金属消耗量低、换热系数高、阻力相对小、使用灵活、清洗方便

缺点：承压和温度不太高 (<28bar, -30~170度)

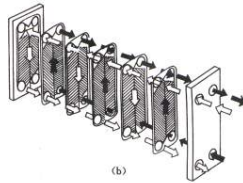
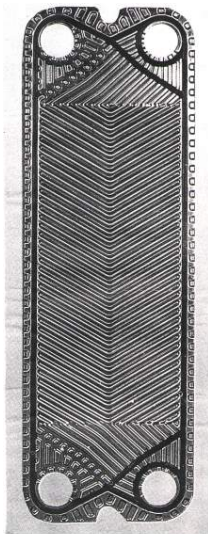
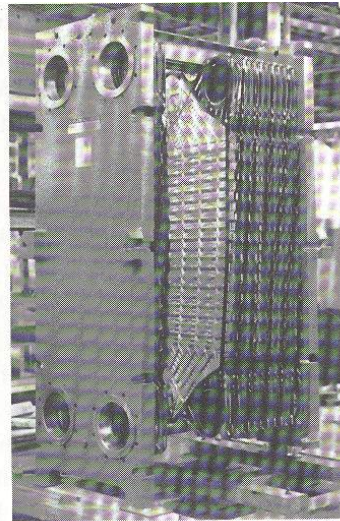


图 9-10 板式换热器示意图

应用：供热采暖、食品、医药、化工等



3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(4) 板式换热器

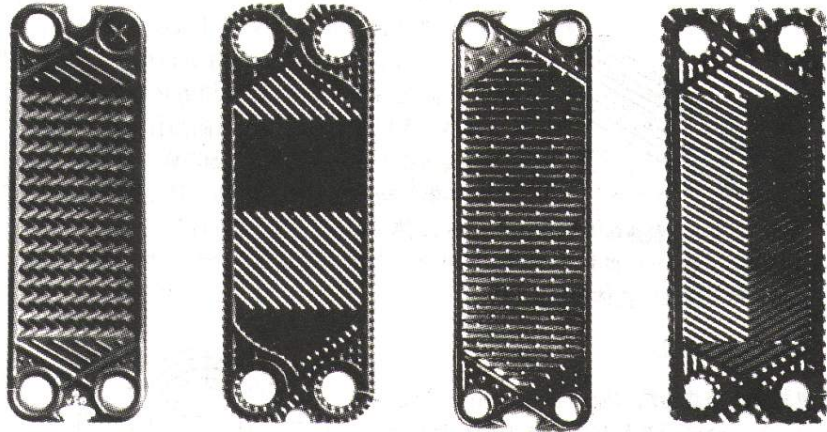


图 10-7 板式换热器的板片

哈尔滨工业大学

3 换热器的类型

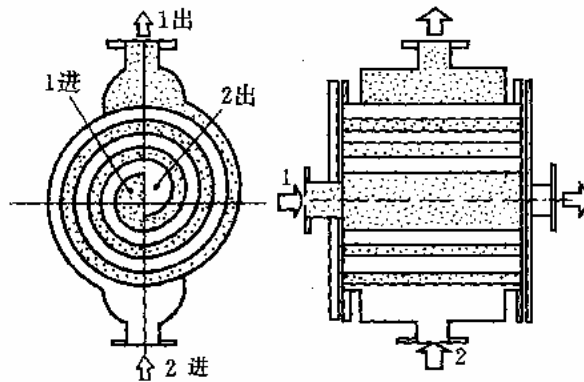
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(5) 螺旋板式换热器

这种换热器换热效果较好，缺点是换热器的密封比较困难。



工业大学

3 换热器的类型

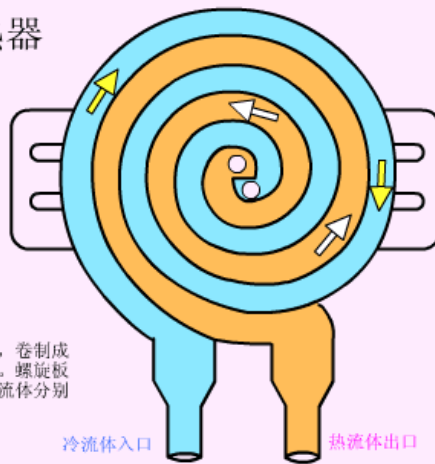
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(5) 螺旋板式换热器

螺旋板式换热器



由两块相互平行的钢板，卷制成相互隔开的螺旋形流道。螺旋板的两端焊有盖板。冷热流体分别在两流道内流动。

哈尔滨工业大学

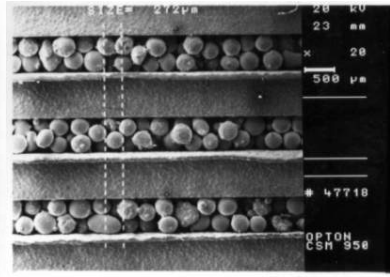
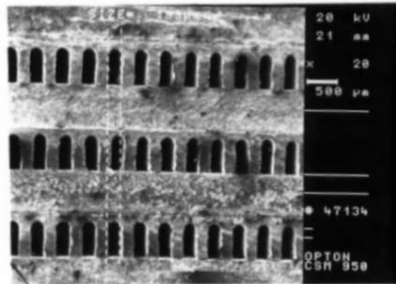
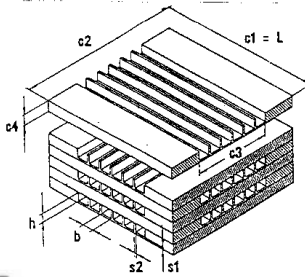
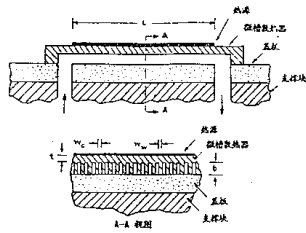
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器



3 换热器的类型

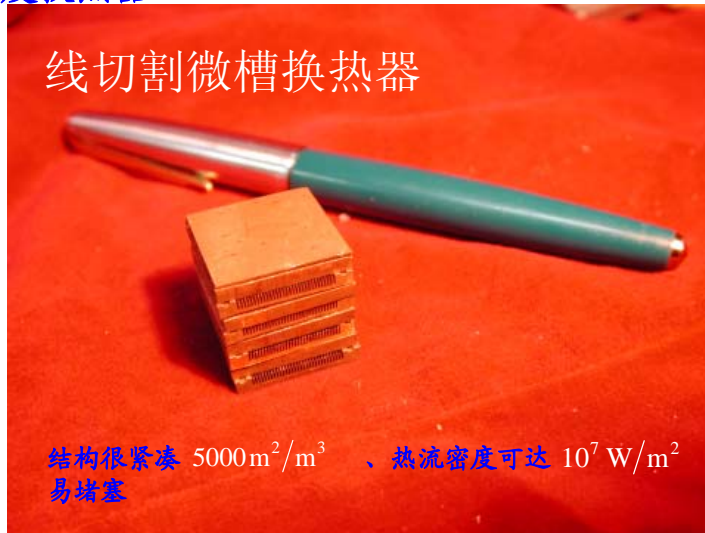
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器

线切割微槽换热器



结构很紧凑 $5000\text{m}^2/\text{m}^3$ 、热流密度可达 $10^7\text{W}/\text{m}^2$
易堵塞

哈尔滨工业大学

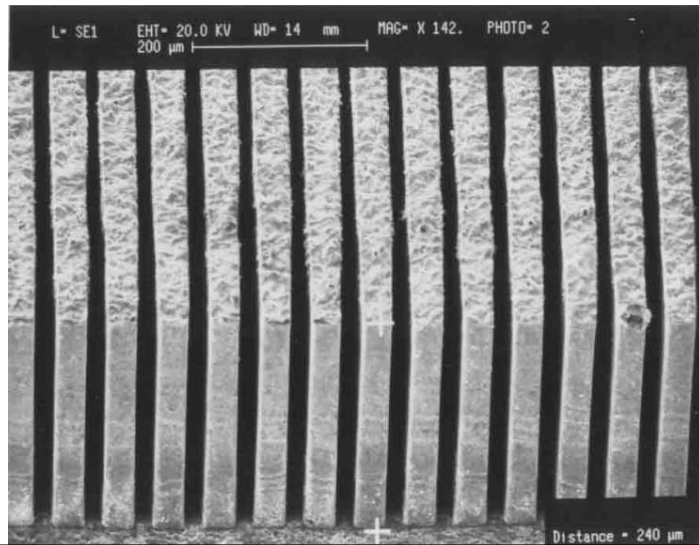
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器



哈尔滨工业大学

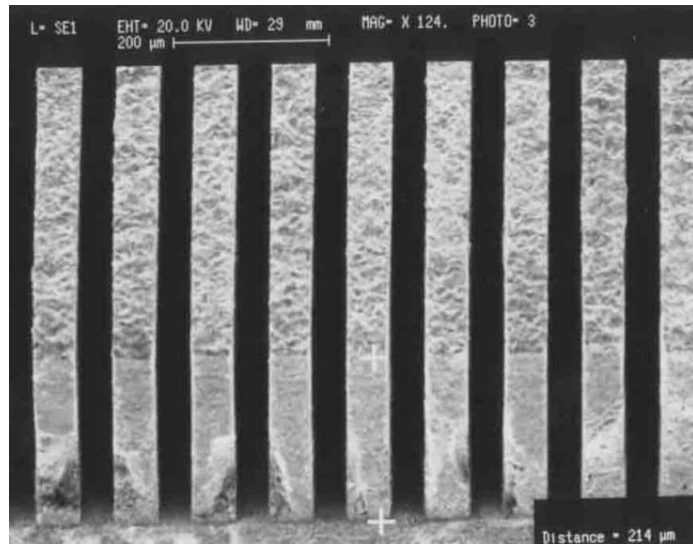
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器



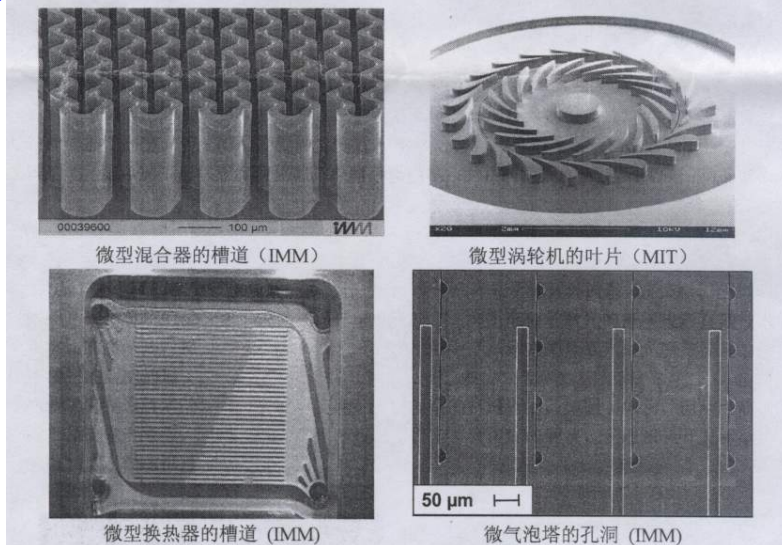
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器



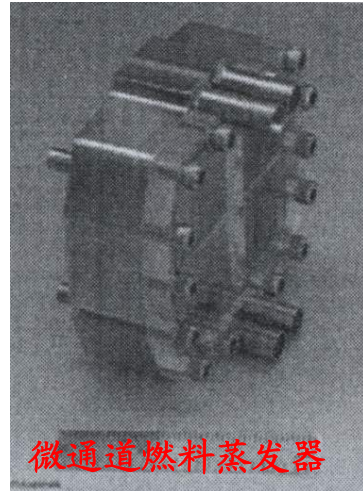
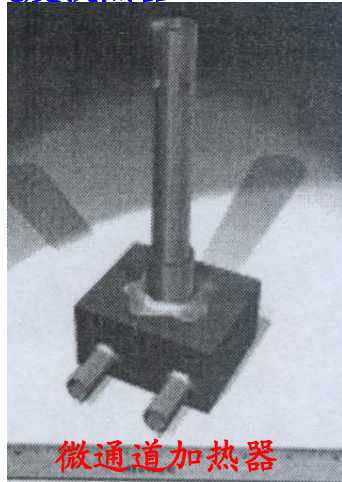
3 换热器的类型

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

微尺度换热器



哈尔滨工业大学

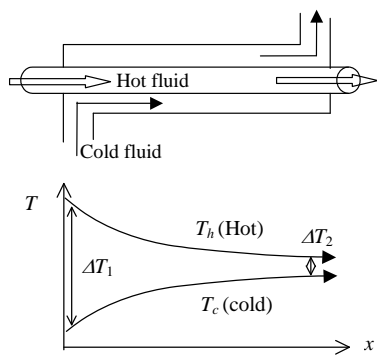
4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

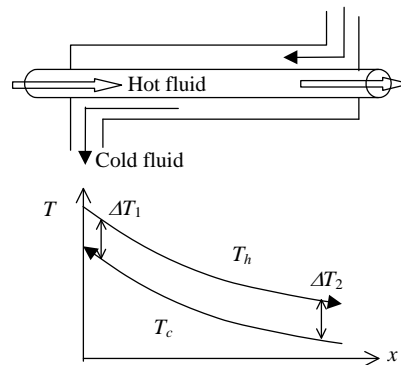
shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

套管式换热器：最简单的一种间壁式换热器，流体有顺流和逆流两种，适用于传热量不大或流体流量不大的情形



顺流



逆流

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

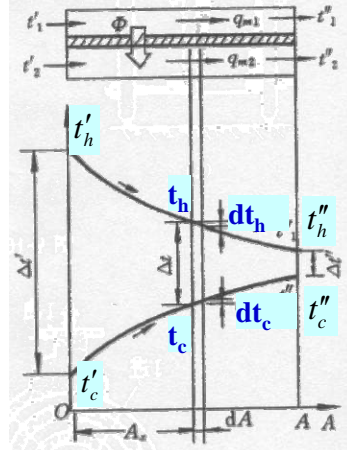
简单顺流及逆流换热器的对数平均温差

传热方程的一般形式:

$$\Phi = kA\Delta t_m$$

这个过程对于传热过程是通用的,但是当温差 Δt_m 沿整个壁面不是常数时,比如等壁温条件下的管内对流换热,以及我们现在遇到的换热器等。对于前者我们曾经提到过对数平均温差(LMTD)的公式,但是没有给出推导。下面我们就来看看LMTD的推导过程

以顺流情况为例,并作如下假设:(1)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;(2)传热系数是常数;(3)换热器无散热损失;(4)换热面沿流动方向的导热热量可以忽略不计。



哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

要想计算沿整个换热面的平均温差,首先需要知道当地温差随换热面积的变化,即 $\Delta t_x = f(A_x)$,然后再沿整个换热面积进行平均

在前面假设的基础上,并已知冷热流体的进出口温度,现在来看图微元换热面 dA 一段的传热。温差为:

$$\Delta t = t_h - t_c \Rightarrow d\Delta t = dt_h - dt_c$$

在固体微元面 dA 内,两种流体的换热量为:

$$d\Phi = kdA \Delta t$$

对于热流体和冷流体:

$$d\Phi = -q_{mh}c_h dt_h \Rightarrow dt_h = -\frac{1}{q_{mh}c_h} d\Phi$$

$$d\Phi = q_{mc}c_c dt_c \Rightarrow dt_c = \frac{1}{q_{mc}c_c} d\Phi$$

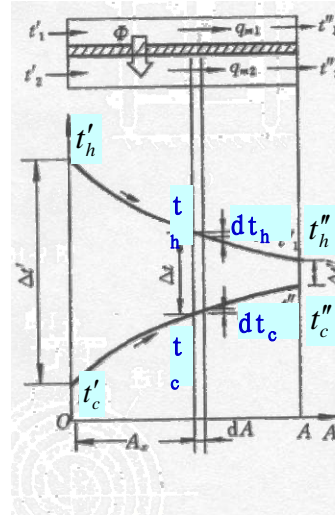


图 9-13 顺流时平均温差的推导

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$\begin{cases} d\Delta t = dt_h - dt_c = -\left(\frac{1}{q_{mh}c_h} + \frac{1}{q_{mc}c_c}\right)d\Phi = -\mu d\Phi \\ d\Phi = kdA \Delta t \end{cases} \quad \mu = \frac{1}{q_{mh}c_h} + \frac{1}{q_{mc}c_c}$$

$$\rightarrow d\Delta t = -\mu d\Phi = -\mu kdA \Delta t \quad \rightarrow \frac{d\Delta t}{\Delta t} = -\mu kdA$$

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

$$\rightarrow \Delta t_x = \Delta t' \exp(-\mu k A_x)$$

可见，当地温差随换热面呈指数变化，则沿整个换热面的平均温差为：

$$\Delta t_m = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t_x dA_x = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t' \exp(-\mu k A_x) dA_x$$

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$\Delta t_m = \frac{1}{A} \int_0^A \Delta t' \exp(-\mu k A_x) dA_x = -\frac{\Delta t'}{\mu k A} (\exp(-\mu k A) - 1) \quad (1)$$

$$\ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t'} = -\mu k A_x \quad \xrightarrow{A_x = A} \quad \ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = -\mu k A \quad (2)$$

$$\rightarrow \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = \exp(-\mu k A) \quad (3)$$

(1)+(2)+(3)

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} \left(\frac{\Delta t''}{\Delta t'} - 1 \right) = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$$

对数平均温差

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

顺流:

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

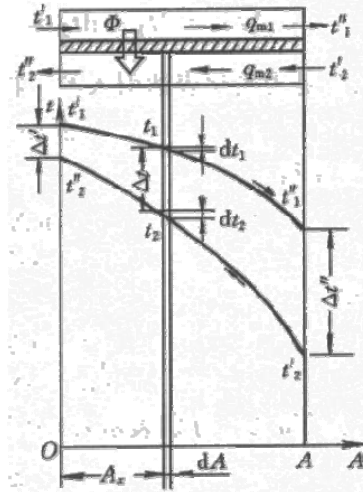


图 9-14 逆流时平均

温差的推导

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

逆流时:

$$\Delta t = t_h - t_c \Rightarrow d\Delta t = dt_h - dt_c$$

$$d\Phi = kdA \Delta t$$

$$d\Phi = -q_{mh} c_h dt_h \Rightarrow dt_h = -\frac{1}{q_{mh} c_h} d\Phi$$

$$d\Phi = q_{mc} c_c dt_c \Rightarrow dt_c = \frac{1}{q_{mc} c_c} d\Phi$$

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

$$\mu = \frac{1}{q_{mh} c_h} - \frac{1}{q_{mc} c_c}$$

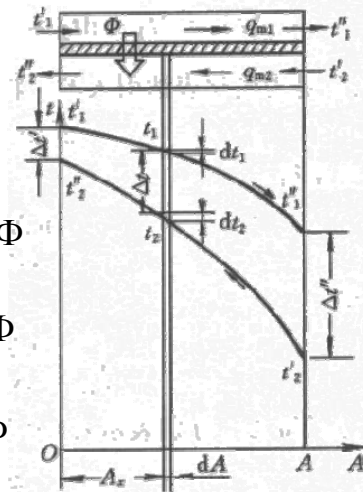


图 9-14 逆流时平均

温差的推导

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

其他过程和公式与顺流是完全一样，因此，最终仍然可以得到：

$$\Delta t_{m, \text{逆流}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}$$

顺流和逆流的区别在于：

顺流: $\Delta t' = t'_h - t'_c$ $\Delta t'' = t''_h - t''_c$

逆流: $\Delta t' = t'_h - t''_c$ $\Delta t'' = t''_h - t'_c$

或者我们也可以将对数平均温差写成如下统一形式(顺流和逆流都适用)

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

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

算术平均温差

平均温差的另一种更为简单的形式是算术平均温差，即

$$\Delta t_{m, \text{算术}} = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2} \quad \Delta t_{m, \text{对数}} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$$

算术平均温差相当于温度呈直线变化的情况，因此，总是大于相同进出口温度下的对数平均温差，当 $\Delta t_{\max}/\Delta t_{\min} \leq 2$ 时，两者的差别小于4%；当 $\Delta t_{\max}/\Delta t_{\min} \leq 1.7$ 时，两者的差别小于2.3%。

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

其他复杂布置时换热器平均温差的计算

以上所讨论的对数平均温差(LMTD)只是针对纯顺流和纯逆流情况，而这种情况的出现是比较少的，实际换热器一般都是处于顺流和逆流之间，或者有时是逆流，有时又是顺流。对于这种复杂情况，我们当然也可以采用前面的方法进行分析，但数学推导将非常复杂，实际上，逆流的平均温差最大，因此，人们想到对纯逆流的对数平均温差进行修正以获得其他情况下的平均温差。

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

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。书中分别给出了管壳式换热器和交叉流式换热器的 ψ 。

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

关于 ψ 的注意事项

- (1) ψ 值取决于无量纲参数 P 和 R

$$P = \frac{t_c'' - t_c'}{t_h' - t_c'}, \quad R = \frac{t_h' - t_h''}{t_c'' - t_c'}$$

式中，下标1、2分别表示两种流体，上角标'表示进口，''表示出口，图表中均以P为横坐标，R为参量。

- (2) R的物理意义：两种流体的热容量之比

$$R = \frac{t_h' - t_h''}{t_c'' - t_c'} = \frac{q_{mc} C_c}{q_{mh} C_h}$$

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) 对于管壳式换热器，查图时需要注意流动的“程”数

哈尔滨工业大学

4 换热器中传热过程平均温差

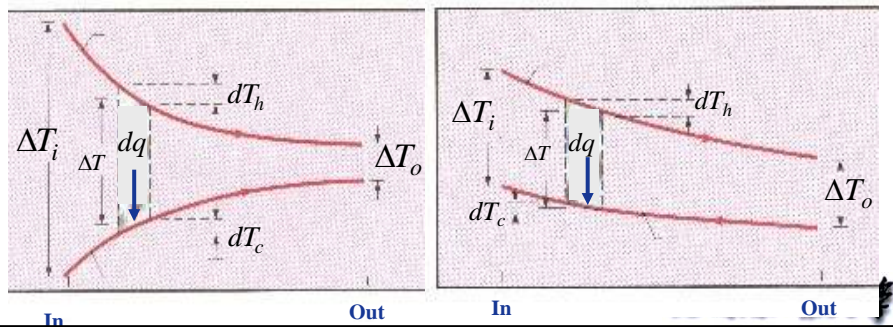
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

各种流动形式的比较

- (1) 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 Δt_m 最大，顺流则最小；
- (2) 顺流时 $t_h'' < t_c''$ ，而逆流时， t_c'' 则可能大于 t_h'' 可见，逆流布置时的换热最强。



4 换热器中传热过程平均温差

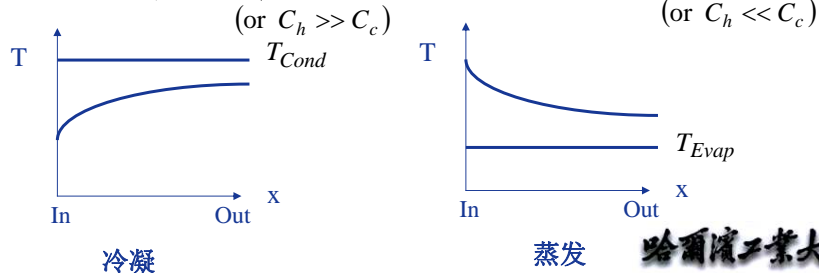
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(3) 那么是不是所有的换热器都设计成逆流形式的就最好呢？不是，因为一台换热器的设计要考虑很多因素，而不仅仅是换热的强弱。比如，逆流时冷热流体的最高温度均出现在换热器的同一侧，使得该处的壁温特别高，可能对换热器产生破坏，因此，对于高温换热器，又是需要故意设计成顺流

(4) 对于有相变的换热器，如蒸发器和冷凝器，发生相变的流体温度不变，所以不存在顺流还是逆流的问题。



哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

换热器热计算分两种情况：设计计算和校核计算

- (1) **设计计算**：设计一个新的换热器，以确定所需的换热面积
- (2) **校核计算**：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，核算他能否胜任规定的新任务。

换热器热计算的基本方程式是**传热方程式**及**热平衡式**

$$\Phi = kA\Delta t_m$$

$$\Phi = q_{mh}c_h(t'_h - t''_h) = q_{mc}c_c(t''_c - t'_c)$$

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$\Phi = kA\Delta t_m \quad (1)$$

$$\Phi = q_{mh}c_h(t'_h - t''_h) \quad \Phi = q_{mc}c_c(t''_c - t'_c) \quad (2)$$

式中， Δt_m 不是独立变量，因为它取决于 t'_h, t''_h, t'_c, t''_c 以及换热器的布置。另外，根据公式(2)可是，一旦 $q_{mh}c_h$ 和 $q_{mc}c_c$ 以及 t'_h, t''_h, t'_c, t''_c 中的三个已知的话，我们就可以计算出另外一个温度。

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

因此，上面的两个方程中共有8个未知数，即

$\Phi, k, A, q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$, 以及 t'_h, t''_h, t''_c, t'_c 中的三个

需要给定其中的5个变量，才可以计算另外三个变量。

对于**设计计算**而言，给定的是 $q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$ ，以及进出口温度中的三个，最终求 k, A

对于**校核计算**而言，给定的一般是 $A, q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$ ，以及2个进口温度，待求的是 t''_h, t''_c

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

换热器的热计算有两种方法，一种是**平均温差法**，另一种是**效能-传热单元数(ϵ -NTU)法**

1 平均温差法，就是直接应用公式(9-14)和(9-15)进行热计算，

其具体步骤如下：

对于**设计计算** ($q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$ 及进出口温度中的三个，求 k, A)

- (1) 初步布置换热面，并计算出相应的总传热系数 k
- (2) 根据给定条件，由热平衡式(9-15)求出进、出口温度中的那个待定的温度
- (3) 由冷热流体的4个进出口温度确定平均温差 Δt_m
- (4) 由传热方程式(9-14)计算所需的换热面积 A ，并核算换热面联测流体的流动阻力
- (5) 如果流动阻力过大，则需要改变方案重新设计。

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

对于校核计算 ($A, q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$ 及两个进口温度, 求 t_h'', t_c'')

- (1) 先假设一个流体的出口温度, 按热平衡式(2)计算另一个出口温度
- (2) 根据4个进出口温度求得平均温差 Δt_m
- (3) 根据换热器的结构, 算出相应工作条件下的总传热系数k
- (4) 已知kA和 Δt_m , 按传热方程式计算在假设出口温度下的 Φ
- (5) 根据4个进出口温度, 用热平衡式(2)计算另一个 Φ , 这个值和上面的 Φ , 都是在假设出口温度下得到的, 因此, 都不是真实的换热量
- (6) 比较两个 Φ 值, 满足精度要求, 则结束, 否则, 重新假定出口温度, 重复(1)~(6), 直至满足精度要求。

从上面的过程可见, 平均温差法适用于设计计算, 不太适合校核计算, 于是人们找到一种替代方法, 即效能-传热单元数法

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

2 效能-传热单元数法 $\Phi = q_{mh}c_h(t_h' - t_h'')$ $\Phi = q_{mc}c_c(t_c'' - t_c')$

(1) 换热器的效能和传热单元数

换热其效能的定义是基于如下思想: 当换热器无限长, 对于一个逆流换热器来讲, 则会发生如下情况

a 当 $q_{mh}c_h \leq q_{mc}c_c$ 时, $t_h'' = t_c'$, 则 $q_{\max} = q_{mh}c_h(t_h' - t_c')$

b 当 $q_{mc}c_c \leq q_{mh}c_h$ 时, $t_c'' = t_h'$, 则 $q_{\max} = q_{mc}c_c(t_h' - t_c')$

于是, 我们可以得到

$$q_{\max} = (q_m c)_{\min} (t_h' - t_c') = C_{\min} (t_h' - t_c')$$

然而, 实际情况的传热量q总是小于可能的最大传热量 q_{\max} , 我们将 q/q_{\max} 定义为换热器的效能, 并用 ε 表示, 即

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}} = \frac{C_h(t_h' - t_h'')}{C_{\min}(t_h' - t_c')} = \frac{C_c(t_c'' - t_c')}{C_{\min}(t_h' - t_c')}$$

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

对于一个已存在的换热器，如果已知了效能 ε 和冷热流体的进口温差，则实际传热量可很方便地求出

$$q = \varepsilon q_{\max} = \varepsilon C_{\min}(T'_h - T'_c)$$

那么在未知传热量，之前， ε 又如何计算？和那些因素有关？

以顺流换热器为例，并假设 $q_{mh}c_h \leq q_{mc}c_c$ 则有 $C_{\min} = C_h$

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}} = \frac{C_h(t'_h - t''_h)}{C_{\min}(t'_h - t'_c)} = \frac{t'_h - t''_h}{t'_h - t'_c} \Rightarrow t'_h - t''_h = \varepsilon(t'_h - t'_c)$$

根据热平衡式(2)得 $C_h(t'_h - t''_h) = C_c(t''_c - t'_c)$

热容比

于是 $t''_c - t'_c = \frac{C_h}{C_c}(t'_h - t''_h) = C_r(t'_h - t''_h)$

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

两蓝色公式相加：

$$(t'_h - t'_c) - (t''_h - t''_c) = \varepsilon(t'_h - t'_c) + C_r(t'_h - t''_h)$$

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$t'_h - t''_h = \varepsilon(t'_h - t'_c) \quad \text{代入下式得}$$

$$\begin{aligned} (t'_h - t'_c) - (t''_h - t''_c) &= \varepsilon(t'_h - t'_c) + C_r(t'_h - t''_h) \\ &= \varepsilon(t'_h - t'_c) + C_r\varepsilon(t'_h - t'_c) \\ &= \varepsilon(1 + C_r)(t'_h - t'_c) \end{aligned}$$

$$1 - \frac{t''_h - t''_c}{t'_h - t'_c} = 1 - \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = \varepsilon(1 + C_r) \quad + \quad \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = \exp(-\mu kA)$$

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{1 - \exp(-\mu kA)}{1 + C_r} \quad + \quad \mu = \frac{1}{q_{mh}c_h} + \frac{1}{q_{mc}c_c} = \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}$$

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_h} \left(1 + \frac{C_h}{C_c}\right)\right]}{1 + C_r} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_h} (1 + C_r)\right]}{1 + C_r}$$

工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

上面的推导过程得到如下结果，对于顺流：

当 $q_{mh}c_h \leq q_{mc}c_c$ 时

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{C_h}{C_c}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_h}(1 + C_r)\right]}{1 + C_r}$$

当 $q_{mh}c_h \geq q_{mc}c_c$ 时，同样的推导过程可得：

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{C_c}{C_h}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_c}(1 + C_r)\right]}{1 + C_r}$$

上面两个公式合并，可得：

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_{\min}}(1 + C_r)\right]}{1 + C_r}$$

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kA}{C_{\min}}(1 + C_r)\right]}{1 + C_r}$$

换热器效能公式中的 kA 依赖于换热器的设计， C_{\min} 则依赖于换热器的运行条件，因此， kA/C_{\min} 在一定程度上表征了换热器综合技术经济性能，习惯上将这个比值（无量纲数）定义为传热单元数 NTU，即

$$NTU = \frac{kA}{C_{\min}}$$

因此，

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$$

与顺流类似，逆流时

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{(1 - C_r) \exp[-NTU(1 - C_r)]}$$

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

顺流:
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$$

逆流:
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{(1 - C_r) \exp[-NTU(1 - C_r)]}$$

当冷热流体之一发生相变时, 相当于 $C_{\max} \rightarrow \infty$, 即

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \rightarrow 0, \text{ 于是上面效能公式可简化为}$$

$$\varepsilon = 1 - \exp[-NTU]$$

当两种流体的热容相等时, 即 $C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = 1$, ε 公式可以简化为

顺流:
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-2 \times NTU]}{2}$$
 逆流:
$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(2) 用效能-传热单元数法计算换热器的步骤

a 设计计算 ($q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$, 及进出口温度中的三个, 求 k, A)

显然, 利用已知条件可以计算出 ε , 而带求的 k, A 则包含在 NTU 内, 因此, 对于设计计算是已知 ε , 求 NTU , 求解过程与平均温差法相似, 不再重复

b 校核计算 ($A, q_{mh}c_h, q_{mc}c_c$, 及两个进口温度, 求 t_h'', t_c'')

由于 k 事先不知, 所以仍然需要假设一个出口温度, 具体如下:

- ① 假设一个出口温度 t_c'' , 利用热平衡式计算另一个 t_h''
- ② 利用四个进出口温度计算定性温度, 确定物性, 并结合换热器结构, 计算总传热系数 k
- ③ 利用 k, A 计算 NTU
- ④ 利用 NTU 计算 ε
- ⑤ 利用(9-17)计算 Φ , 利用(9-14)计算另一个 Φ
- ⑥ 比较两个 Φ , 是否满足精度, 否则重复以上步骤

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

从上面步骤可以看出，假设的出口温度对传热量 Φ 的影响不是直接的，而是通过定性温度，影响总传热系数，从而影响NTU，并最终影响 Φ 值。而平均温差法的假设温度直接用于计算 Φ 值，显然 ϵ -NTU法对假设温度没有平均温差法敏感，这是该方法的优势

3 换热器设计时的综合考虑

换热器设计是综合性的课题，必须考虑出投资，运行费用，安全可靠等诸多因素。

4 换热器的结垢及污垢热阻

污垢增加了热阻，使传热系数减小，这种热阻成为污垢热阻，用 R_f 表示，

$$R_f = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0}$$

式中， k 为有污垢后的换热面的传热系数， k_0 为洁净换热面的传热系数。

哈尔滨工业大学

5 换热器中热计算

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

对于两侧均已结垢的管壳式换热器(也包括了以圆管为换热通道的其他间壁式换热器)，以管子外表面为计算依据的传热系数可以表示成

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + R_{fi}\right) \frac{A_o}{A_i} + R_w + \left(\frac{1}{h_o} + R_{fo}\right) \frac{1}{\eta_o}}$$

如果管子外壁没有肋化，则肋面总效率 $\eta_o = 1$ 。

管壳式换热器的部分污垢热阻可以在相关的表中查得。如果污垢热阻没有具体指出是管子的哪一侧，而是说“总污垢热阻”，则为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} + R_w + R_f + \frac{1}{h_o} \frac{1}{\eta_o}}$$

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

强化传热的目的: 缩小设备尺寸、提高热效率、保证设备安全

削弱传热的目的: 减少热量损失

根据不同的需求,对于实际传热的传热过程,有时需要强化,有时则需要削弱。显然,根据不同的传热方式,强化和削弱传热的手段应该不同。

强化换热的原则: 哪个环节的热阻大,就对哪个环节采取强化措施。

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

增强换热

采取某些技术措施,提高单位传热面积的传热量,使设备紧凑、重量轻、节省材料、降低动力消耗等

削弱换热

采取隔热保温措施,使换热设备热损失降低,达到节能、安全防护及满足工艺要求等目的

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

增传热的方法:

- 1、扩展传热面
- 2、改变流动状况: 增加流速、加插入物扰动、旋转流动装置、射流方法
- 3、使用添加剂改变流体物性: 气流中添加少量固体颗粒、蒸汽或气体中喷入液滴
- 4、改变表面状况: 增加粗糙度、表面涂层改变表面结构
- 5、改变换热面的形状和大小
- 6、改变能量传递方式: 对流—辐射板
- 7、靠外力产生振荡, 强化传热: 机械或电的方法使传热面或流体振荡、对流体施加声波或超声波增加脉动、外加静电场加强电介质流体的混合

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

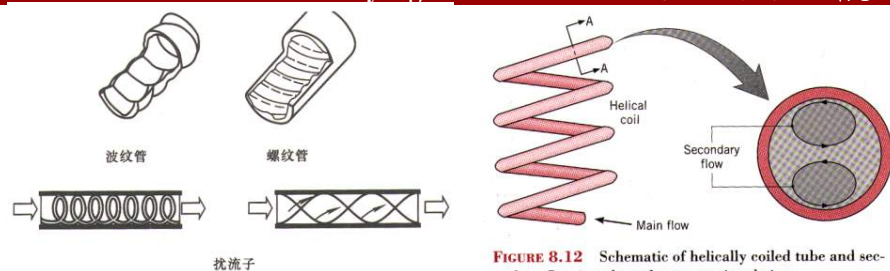
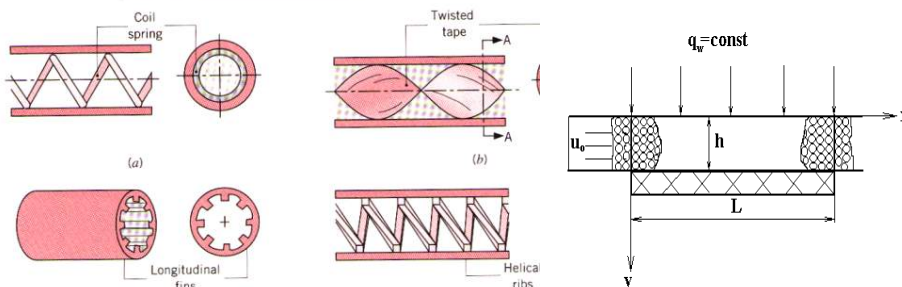


FIGURE 8.12 Schematic of helically coiled tube and secondary flow in enlarged cross-sectional view.

图 12-18 强化对流换热措施示意图



6 传热的强化和隔热保温技术

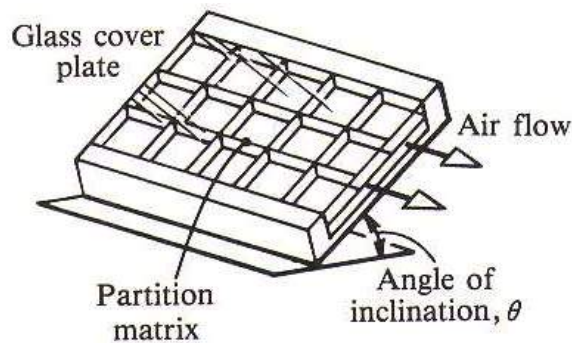
<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

削弱换热的方法:

- 1、覆盖热绝缘材料: 泡沫、超细粉末、真空
- 2、改变表面状况: 改变表面辐射特性、附加抑制对流的元件、在保温材料表面或内部添加憎水剂 (使其不吸湿不受潮)



業大學

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

例题1 压缩空气在中间冷却器的管外横掠流过, $h_o=90\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。冷却水在管内流过, $h_i=6000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。冷却管是外径为16mm厚1.5mm的黄铜管。求: (a) 此时的传热系数; (b) 如管外的对流换热系数增加一倍, 传热系数有何变化? (c) 如管内的对流传热系数增加一倍, 传热系数又作如何变化?

解: (a) 黄铜的导热系数为 $111\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{6000} \times \frac{16}{13} + \frac{0.016}{2 \times 111} \ln \frac{16}{13} + \frac{1}{90}}$$

$$= \frac{1}{0.000205 + 0.000149 + 0.0111} = 88.3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

哈爾濱工業大學

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

(b) 略去管壁热阻，传热系数为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{6000} \times \frac{16}{13} + \frac{1}{180}} = 174 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

(c) 略去管壁热阻，传热系数为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{12000} \times \frac{16}{13} + \frac{1}{90}} = 89.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

管外的对流换热系数增加一倍，传热系数增加96%

管内的对流传热系数增加一倍，传热系数增加不足1%

强化换热的原则：

在热阻最大的环节上下功夫

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

一般说来管壁热阻较小，常常要强化对流热阻

强化对流换热的原则：

- (1). 无相变的对流换热：减薄边界层，加强流体混合；
- (2). 核态沸腾：增加汽化核心
- (3). 膜状凝结：减薄液膜及加速凝结液膜的排泄
- (4). 减小污垢热阻：工质的预处理，定期清洗

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

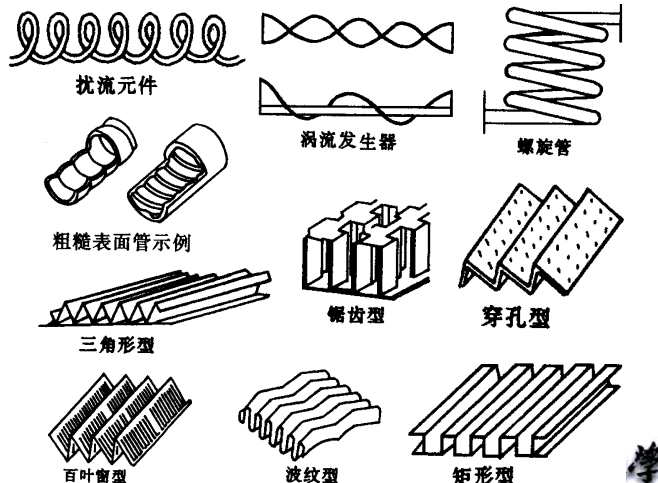
shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

一、强化换热的手段:

1. 无源技术: 除输送传热介质所需的功率外, 不需附加动力

- 涂层表面
- 粗糙表面
- 扩展表面
- 扰流元件
- 涡流发生器
- 螺旋管
- 添加物
- 冲击射流



6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

2. 有源技术

除输送传热介质所需的功率外, 需外加动力

- 对介质进行机械搅拌
- 受热面振动
- 流体振动
- 电磁场
- 介质种加入异物或介质

3. 强化换热的方式的综合评价

应当综合考虑传热效果、流动阻力、成本和运行费用;

哈尔滨工业大学

6 传热的强化和隔热保温技术

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所

二、隔热保温技术(Thermal Insulation and Insulating)

隔热保温技术是强换传热的反过程，是传热学的一个重要分支。

保温效率(Insulation Efficiency)

是一个判断热力管道保温优劣的技术指标，它以下式定义：

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

式中： Φ_0 --每单位长度裸管的散热量，W/m；

Φ_x --每单位长度包有厚 x mm保温材料的管子的散热量，W/m。

哈尔滨工业大学



哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所

<http://iaat.hit.edu.cn>

shuaiyong@hit.edu.cn

航空航天热物理研究所