



4.3 对流传热

4.3.1 对流传热过程分析

4.3.2 对流传热速率

4.3.3 影响对流传热系数的因素

4.3.4 对流传热系数经验关联式的建立

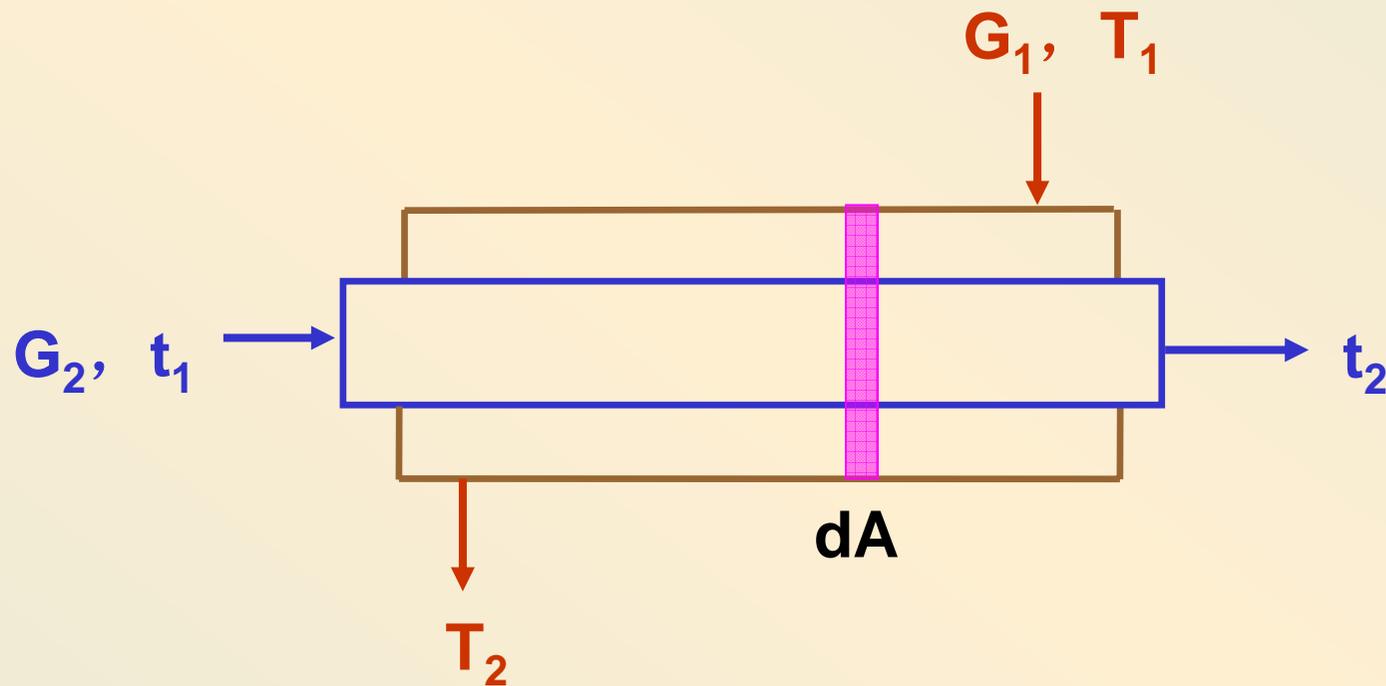
4.3.5 无相变时对流传热系数的经验关联式

4.3.6 有相变时对流传热系数的经验关联式





3.3.1 对流传热过程分析







3.3.2 对流传热速率——牛顿冷却定律

流体被冷却： $Q = \alpha A(T_w - T)$

式中 Q —— 对流传热速率，W；

α —— 对流传热系数，W/(m²·°C)；

T_w —— 壁温，°C；

T —— 流体平均温度，°C；

A —— 传热面积，m²。

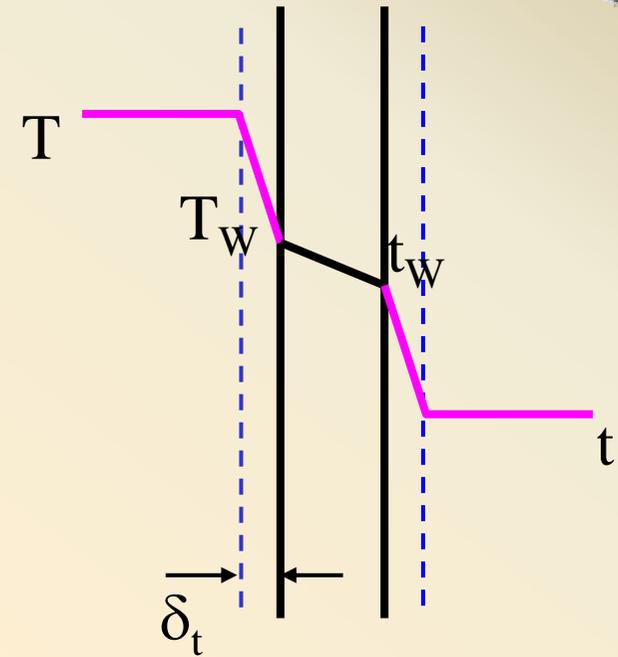




下面来推导牛顿冷却定律

建立膜模型: $\delta_t = \delta_e + \delta$

式中 δ_t ——总有效膜厚度;
 δ_e ——湍流区虚拟膜厚度;
 δ ——层流底层膜厚度。



流体被冷却: $Q = \frac{\lambda}{\delta_t} A(T_w - T) \implies \alpha = \frac{\lambda}{\delta_t}$





1. 牛顿冷却定律是一种推论，假设 $Q \propto \Delta t$ 。

$$Q = \alpha A(t_w - t) = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha A}} = \frac{\Delta t}{R}$$

推动力： $\Delta t = t_w - t$ 阻力： $R = \frac{1}{\alpha A}$

2. 复杂问题简单化表示。





4.3.3 影响对流传热系数 α 的因素

1. 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。

$$\alpha_{\text{强}} > \alpha_{\text{自}}$$

2. 流体的物性

$$\rho, \mu, \lambda, c_p$$





3. 流动形态

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

4. 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。

5. 是否发生相变

蒸汽冷凝、液体沸腾 $\alpha_{\text{相变}} > \alpha_{\text{无相变}}$





4.3.4 对流传热系数经验关联式的建立

一、因次分析

$$\alpha = f(u, l, \mu, \lambda, c_p, \rho, g\beta\Delta t)$$

式中 l ——特性尺寸；

u ——特征流速。

基本因次：长度 L ，时间 T ，质量 M ，温度 θ

变量总数：8个

由 π 定律 $(8-4) = 4$ ，可知有4个无因次数群。

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





$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

Nusselt待定准数

$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

Reynolds, 流动型态对对流传热的影响

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

Prandtl, 流体物性对对流传热的影响

$$Gr = \frac{\beta g \Delta t l^3 \rho^2}{\mu^2}$$

Grashof, 自然对流对对流传热的影响

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





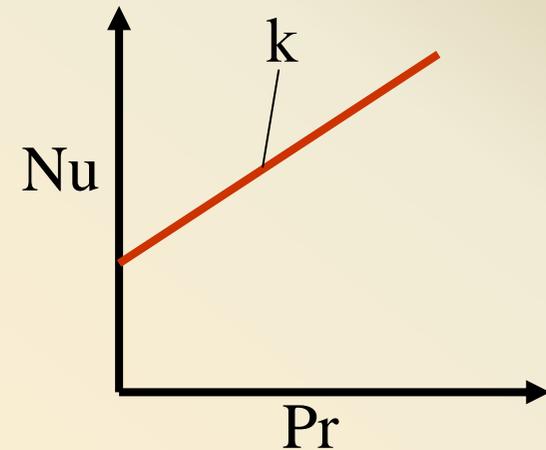
二、实验安排及结果整理

以强制湍流为例： $Nu = CRe^a Pr^k$

1. 采用不同Pr的流体，固定Re

$$\lg Nu = k \lg Pr + \lg CRe^a$$

双对数坐标系得一直线，斜率为k

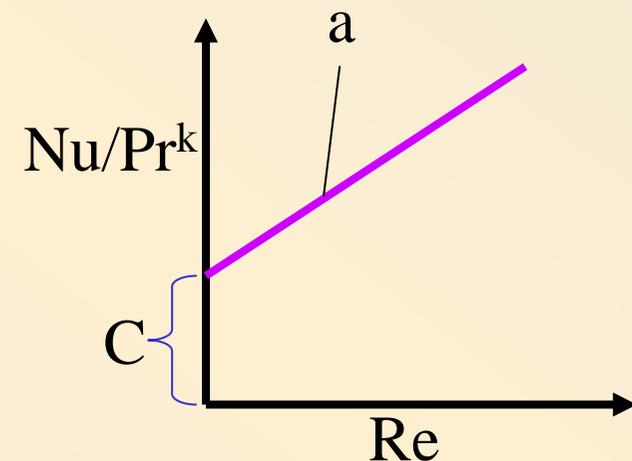


2. 不同Pr的流体在不同的Re下

$$\lg Nu/Pr^k = a \lg Re + \lg C$$

双对数坐标系中得一直线

斜率为a，截距为C





三、定性温度、特性尺寸的确定

1. 确定物性参数数值的温度称为定性温度。

定性温度的取法：

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

2. 特性尺寸

取对流动与换热有主要影响的某一几何尺寸。

3. 准数关联式的适用范围。





4.3.5 无相变时对流换热系数的经验关联式

一、流体在管内的强制对流

1. 圆形直管内的湍流

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

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^k$$

适用范围:

$$Re > 10000, \quad 0.7 < Pr < 160, \quad \mu < 2 \text{mPa}\cdot\text{s}, \quad l/d > 60$$





注意事项:

- 定性温度取 $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$
- 特征尺寸为管内径 d_i
- 流体被加热时, $k=0.4$; 被冷却时, $k=0.3$ 。





$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^k = 0.023 \frac{u^{0.8}}{d^{0.2}} \cdot \frac{\rho^{0.8} c_p^k \lambda^{1-k}}{\mu^{0.8}}$$

强化措施:

- $u \uparrow, \alpha \propto u^{0.8} \Rightarrow \alpha \uparrow$
- $d \downarrow, \alpha \propto 1/d^{0.2} \Rightarrow \alpha \uparrow$
- 流体物性的影响, 选 λ 大的流体 $\Rightarrow \alpha \uparrow$





以下是对上面的公式进行修正：

(1) 高粘度

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$Re > 10000$, $0.7 < Pr < 160$, $l/d > 60$

定性温度取 t_m ；特征尺寸为 d_i

$$\left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \begin{cases} \text{液体被加热} = 1.05 \\ \text{液体被冷却} = 0.95 \\ \text{气体(冷却或加热)} = 1.0 \end{cases}$$





(2) $l/d < 60$ $\delta \downarrow$ $\alpha \uparrow$

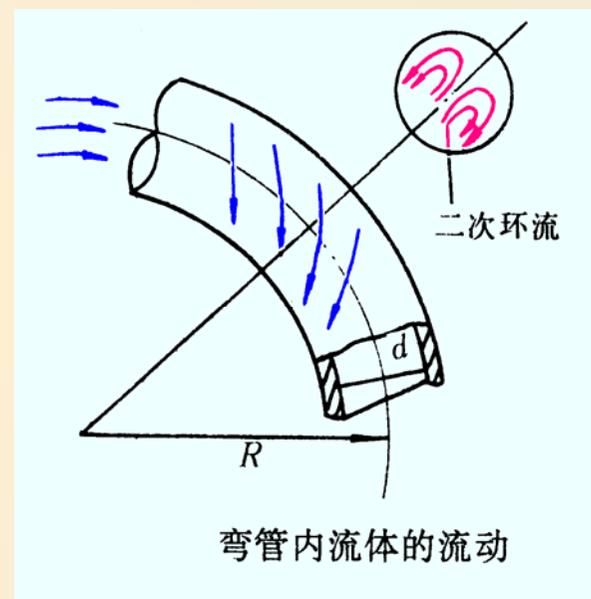
$$f = 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0.7} > 1$$

(3) 过渡流 ($2000 < Re < 10000$) $\delta \uparrow$ $\alpha \downarrow$

$$f = 1 - \frac{6 \times 10^5}{Re^{1.8}} < 1$$

(4) 弯曲管内 $\delta \downarrow$ $\alpha \uparrow$

$$f = 1 + 1.77 \frac{d}{R} > 1$$





(5) 非圆形管强制湍流

1) 当量直径法

用 d_e 代替 d_i 计算， u 不同 d_e ，要用实际的流通面积计算

2) 直接实验法

套管环隙：水-空气系统

$$\alpha = 0.02 \frac{\lambda}{d_e} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.5} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

适用范围：

$$12000 < \text{Re} < 220000; \quad d_2/d_1 = 1.65 \sim 17$$

其中 d_1 为内管外径， d_2 为外管内径





例题4.3.1

一列管式换热器，由38根 $\phi 25 \times 2.5\text{mm}$ 的无缝钢管组成，苯在管内流动，由 20°C 加热到 80°C ，苯的流量为 8.32kg/s ，外壳中通入水蒸气进行加热，求：

(1) 管壁对苯的对流传热系数；

(2) 管子换为 $\phi 19 \times 2\text{mm}$ ，管壁对苯的对流传热系数；

(3) 当苯的流量提高860倍，对流传热系数变化如何？

已知： $\mu = 0.45\text{mPa}\cdot\text{s}$ ， $\lambda = 0.14\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

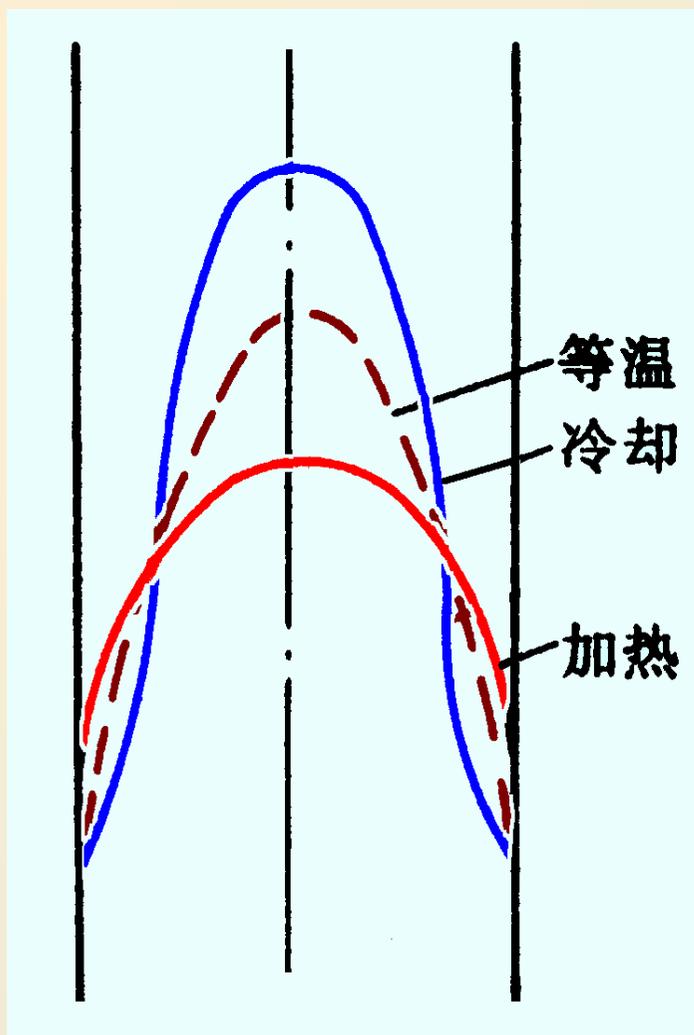




2. 圆形管内强制层流

- 特点：
- 1) 物性特别是粘度受管内温度不均匀性的影响，导致速度分布受热流方向影响。
 - 2) 层流的对流传热系数受自然对流影响严重使得对流传热系数提高。
 - 3) 层流要求的进口段长度长，实际进口段小时，对流传热系数提高。





热流方向对层流速度分布的影响





$$Nu = 1.86 \left(\text{Re Pr} \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

适用范围: $Gr < 25000$ $\left(\text{Re Pr} \frac{d}{l} \right) > 10$

$$0.6 < \text{Pr} < 6700 \quad \text{Re} < 2300$$

当: $Gr > 25000, f = 0.8(1 + 0.015Gr^{\frac{1}{3}})$

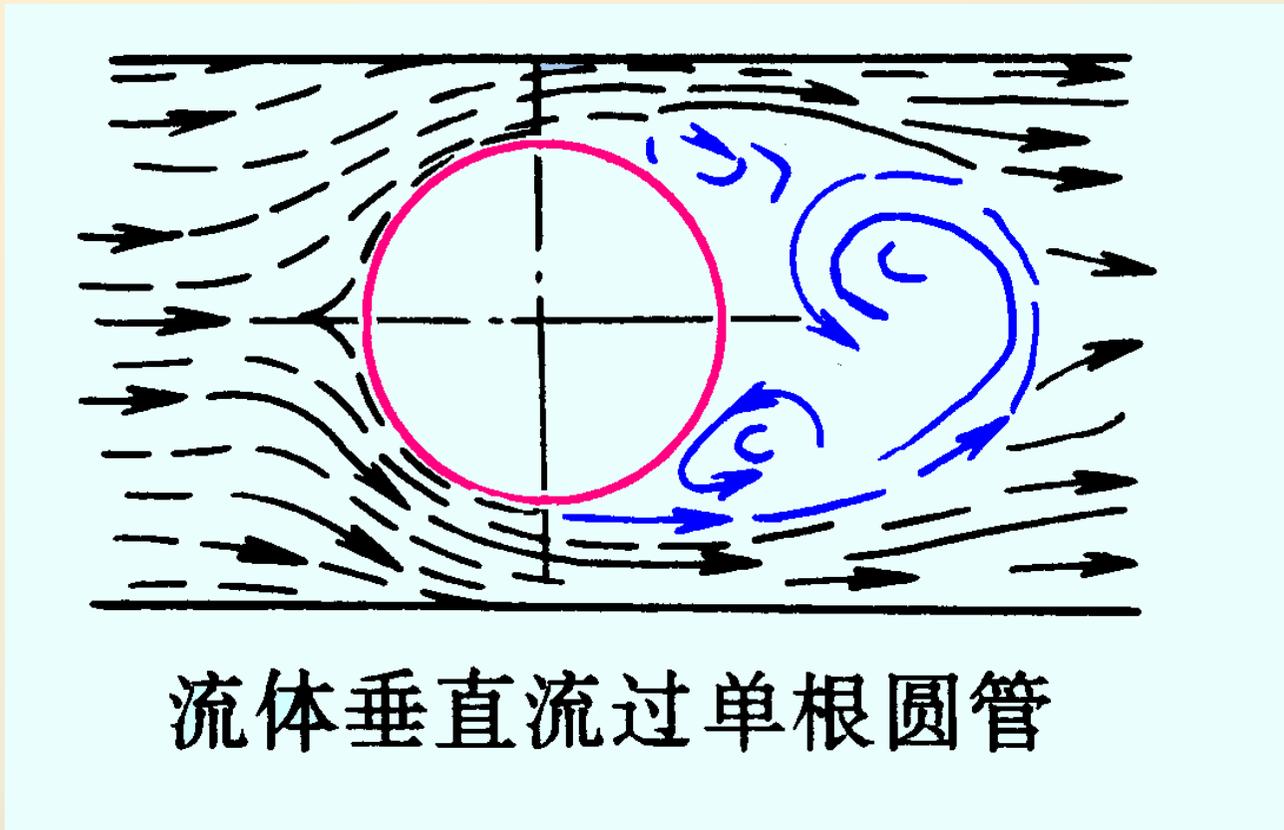
定性温度: $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$





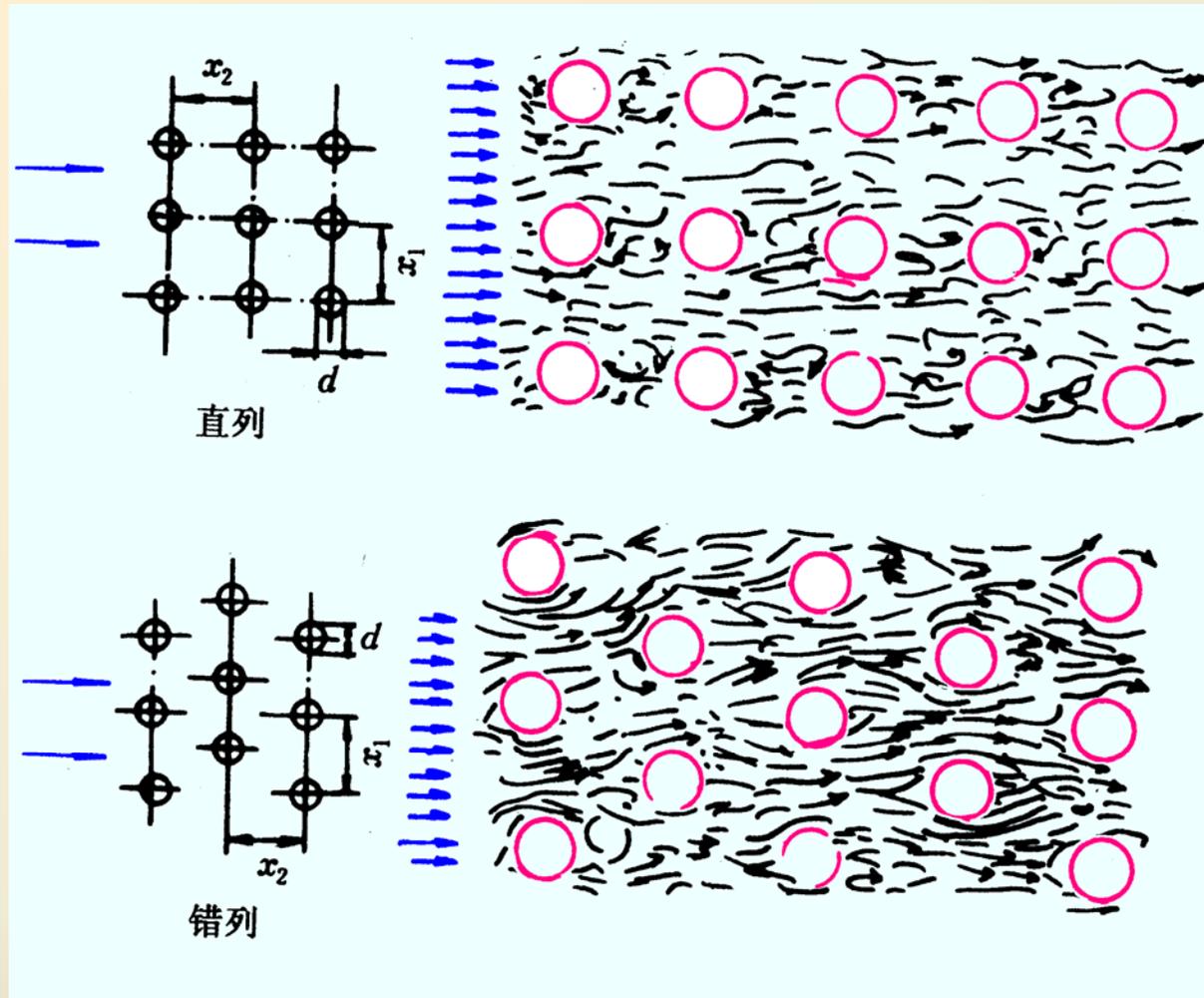
二、管外强制对流的对流传热系数

1. 流体在管束外垂直流过





在换热器内单排管： $Nu = C\varepsilon Re^n Pr^{0.4}$





整个管束:

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i A_i}{\sum A_i}$$

定性温度: $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$

特性尺寸: 管的外径 d_o

适用范围: $5000 < Re < 70000$

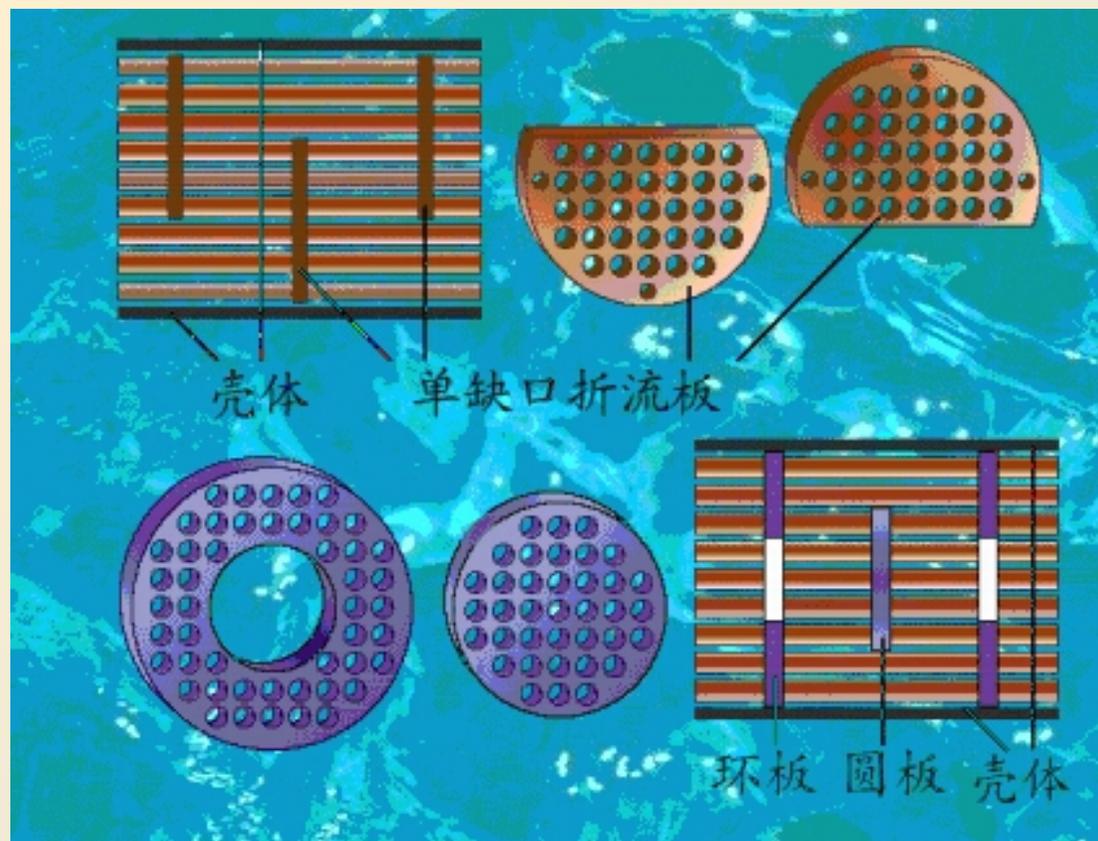
$$\frac{x_1}{d} = 1.2 - 5 \quad \frac{x_2}{d} = 1.2 - 5$$





2. 流体在换热器壳程的流动

挡板形式：圆形、圆缺形





壳程流体的对流传热系数（圆缺形）：

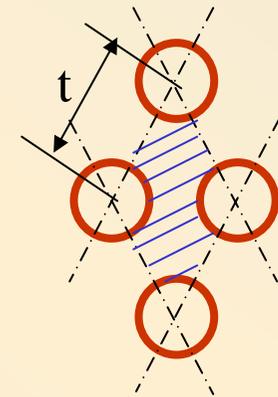
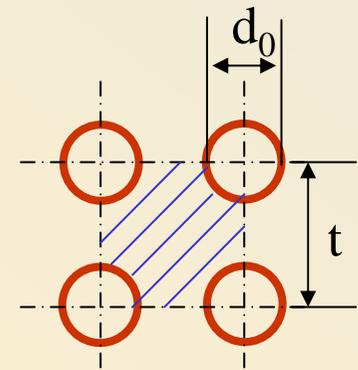
$$Nu = 0.36 Pr^{1/3} Re^{0.55} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

定性温度： $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$

特征尺寸：当量直径 d_e

正方形排列： $d_e = \frac{4(t^2 - 0.785d_0^2)}{\pi d_0}$

正三角形排列： $d_e = \frac{4\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t^2 - 0.785d_0^2\right)}{\pi d_0}$



返回





流速 u 按流通截面最大处的截面计算:

$$S_{\max} = hD \left(1 - \frac{d_o}{t}\right)$$

式中 h ——两块折流挡板间距离, m;

D ——换热器壳径, m;

d_o ——管子的外径, m;

t ——相邻两管中心距, m。





$$\alpha \propto \frac{u^{0.55}}{d_e^{0.45}} f(\lambda, c_p, \mu)$$

提高壳程对流传热系数的措施：

- 1) $u \uparrow \alpha \uparrow$; 但 $u \uparrow$ 流动阻力 $\propto u^2$, $h_f \uparrow$
- 2) $d_e \downarrow \alpha \uparrow$
- 3) 加强湍动, $\alpha \uparrow$

注意：换热器无折流挡板时，流体平行流过管束，对流传热系数按管内强制对流计算，但管子的内径换为当量直径。





三、大空间的自然对流传热

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad Nu = C(Gr, Pr)^n$$

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

注意：c,n与传热面的形状（管或板）、放置位置（垂直、水平）有关。

定性温度：膜温

特征尺寸：垂直的管或板为高度
水平管为管外径



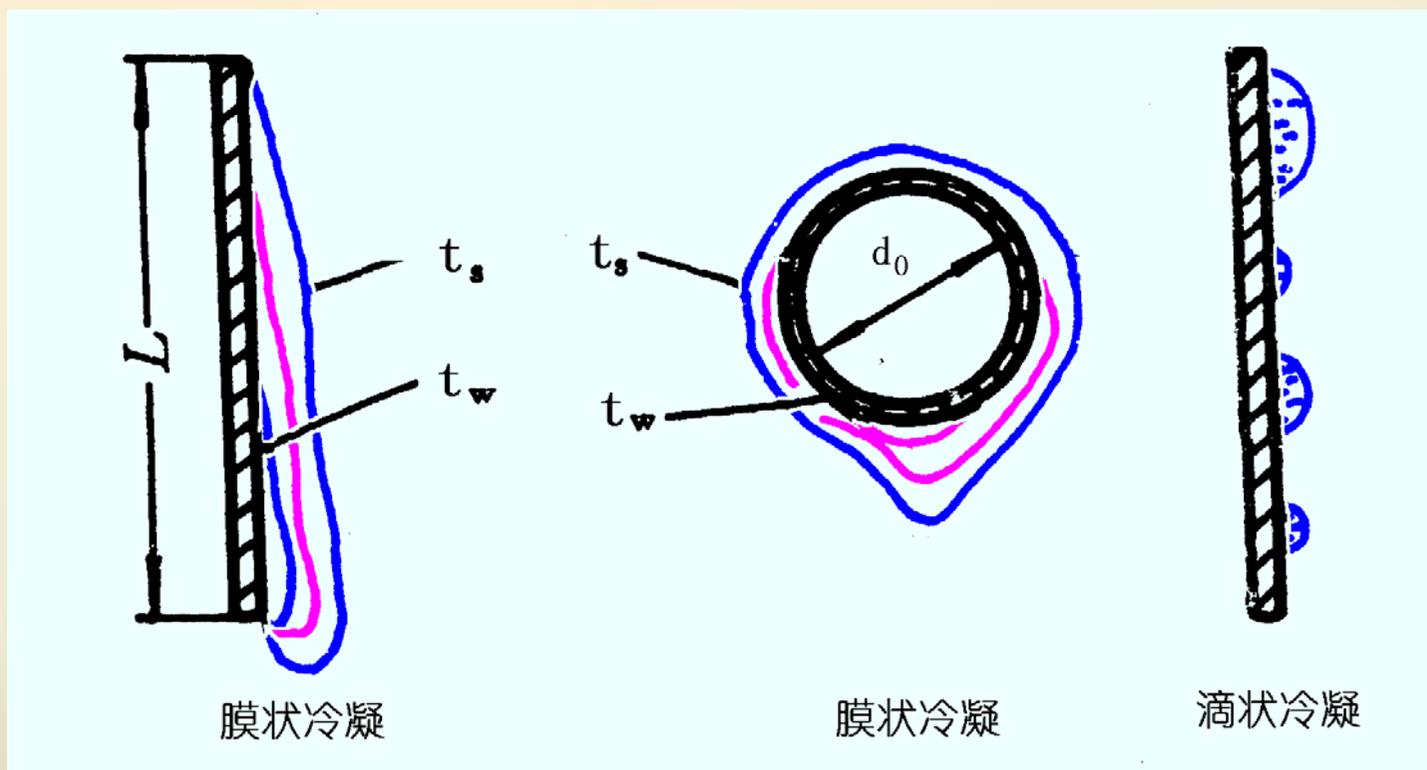


4.3.6 有相变时的对流传热系数

一、蒸汽冷凝

1. 冷凝方式：滴状冷凝和膜状冷凝

$$\alpha_{\text{滴}} > \alpha_{\text{膜}}$$





2. 冷凝过程的热阻：液膜的厚度 δ

3. 蒸汽冷凝的 α

1) 水平管束外
$$\alpha = 0.725 \left(\frac{\rho^2 g r \lambda^3}{n^{2/3} \mu l \Delta t} \right)^{\frac{1}{4}}$$

式中 n ——水平管束在垂直列上的管子数；

r ——汽化潜热 (t_s 下)，kJ/kg。

特性尺寸 l ：管外径 d_o

定性温度：膜温
$$t = \frac{t_s + t_w}{2}$$





2) 竖壁或竖管上的冷凝

$$\text{层流} \quad \alpha = 1.13 \left(\frac{\rho^2 g r \lambda^3}{\mu l \Delta t} \right)^{\frac{1}{4}}$$

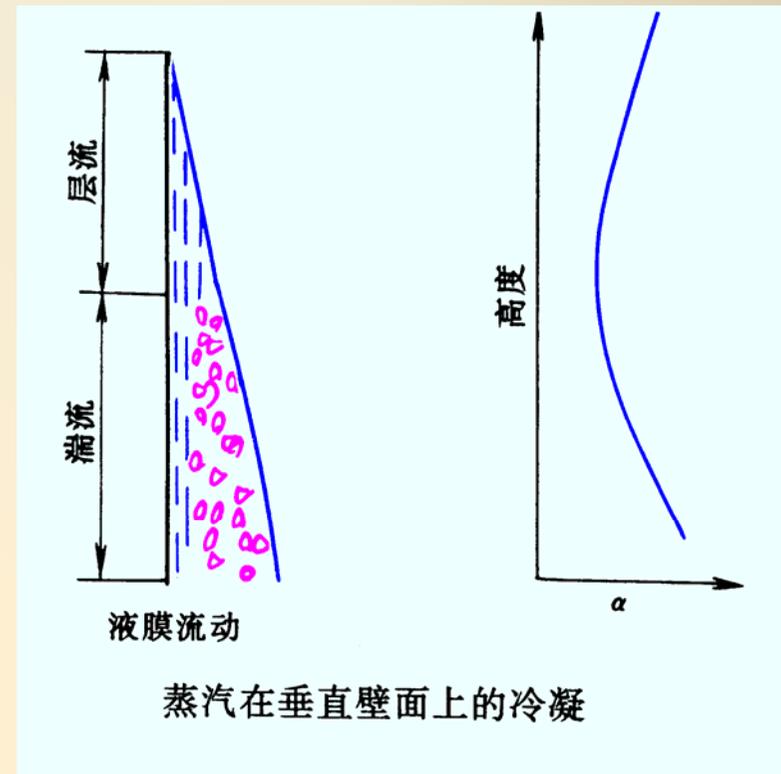
适用条件: $Re < 1800$

$$\text{湍流} \quad \alpha = 0.0077 \left(\frac{\rho^2 g \lambda^3}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{3}} Re^{0.4}$$

适用条件: $Re > 1800$

特性尺寸 l : 管或板高 H

定性温度: 膜温





4. 冷凝传热的影响因素和强化措施

1) 流体物性

冷凝液 $\rho \uparrow \mu \downarrow \delta \downarrow, \alpha \uparrow$; 冷凝液 $\lambda \uparrow, \alpha \uparrow$; 潜热 $r \uparrow \delta \downarrow, \alpha \uparrow$

2) 温差

液膜层流流动时, $\Delta t = t_s - t_w \uparrow, \delta \uparrow, \alpha \downarrow$

3) 不凝气体

不凝气体存在, 导致 $\alpha \downarrow \downarrow$, 定期排放。

4) 蒸汽流速与流向 ($u > 10\text{m/s}$)

同向时, $\delta \downarrow \alpha \uparrow$; 反向时, $\delta \uparrow \alpha \downarrow$; $u \uparrow \uparrow \alpha \uparrow$





5) 蒸汽过热

包括冷却和冷凝两个过程。

6) 冷凝面的形状和位置

目的：减少冷凝液膜的厚度

垂直板或管：开纵向沟槽；水平管束：可采用错列





二、 液体沸腾

沸腾种类 1) 大容积沸腾

2) 管内沸腾

1. 汽泡产生的条件

问题：为什么汽泡只在加热面个别地方产生？

过热度： $\Delta t = t_w - t_s$

汽化核心：一般为粗糙加热面的细小凹缝处

汽化核心 \Rightarrow 生成汽泡 \Rightarrow 长大 \Rightarrow 脱离壁面 \Rightarrow 新汽泡
形成 \Rightarrow 搅动液层





2. 沸腾曲线

1) 自然对流阶段

$$\Delta t < 5^\circ\text{C}$$

2) 核状沸腾阶段

$$25^\circ\text{C} > \Delta t > 5^\circ\text{C}$$

3) 不稳定膜状沸腾

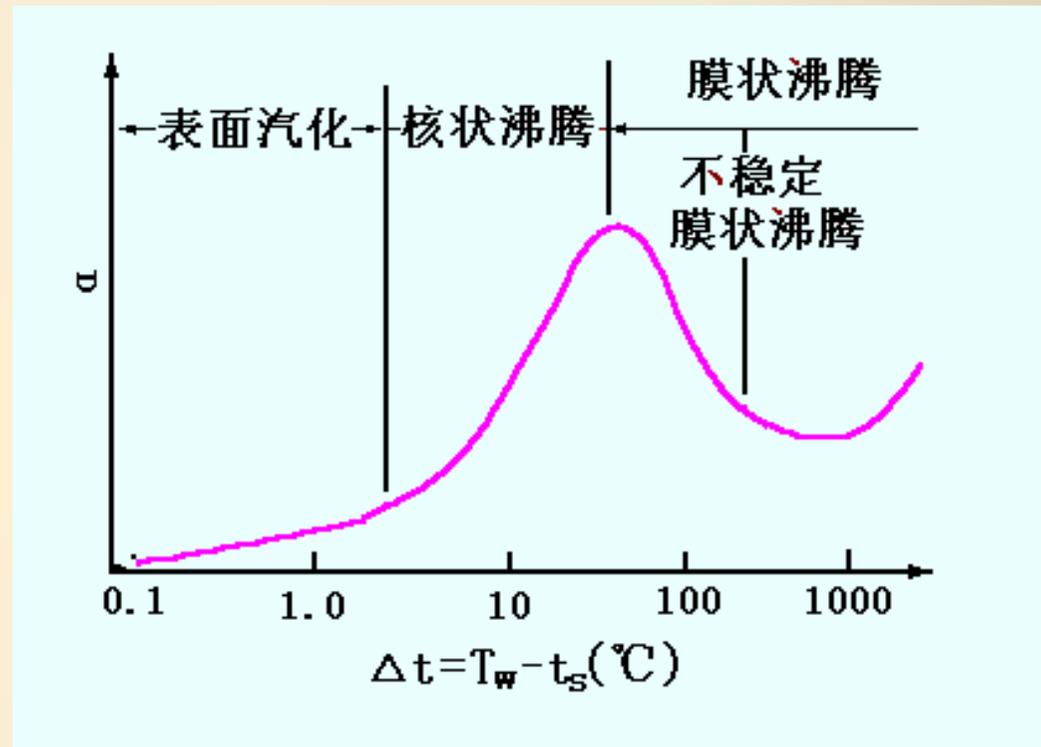
$$25^\circ\text{C} > \Delta t > 5^\circ\text{C}$$

4) 稳定膜状沸腾

$$250^\circ\text{C} > \Delta t > 25^\circ\text{C}$$

工业上：核状沸腾

优点： α 大， t_w 小





3、沸腾传热的影响因素及强化措施

1) 液体的性质

$$\lambda \uparrow, \rho \downarrow, \mu \downarrow, \sigma \downarrow \Rightarrow \alpha \uparrow$$

强化措施：加表面活性剂（乙醇、丙酮等）

2) 温差

在核状沸腾阶段温差提高， $\alpha \uparrow$

3) 操作压强

$$p \uparrow \Rightarrow t_s \uparrow \Rightarrow \mu \downarrow \sigma \downarrow \Rightarrow \alpha \uparrow$$





4) 加热面

新的、洁净的、粗糙的加热面， α 大

强化措施：将表面腐蚀，烧结金属粒



