

3. 单相对流传热的实验关系式

b.1 相似原理及量纲分析

$$h = f(p, \rho_p, \lambda, \eta, U, d)$$



几何相似：图形各对应边成比例，对应角相等

物理量地相似：同名的物理量在所有对应时刻、对应地点的数值成比例。

物理现象相似：对于两个同类的物理现象，如果在相应的时刻与相应的地点上与现象有关的物理量一一对应成比例，则称此两现象彼此相似。

对于两个湍流的对流传热现象，如果彼此相似，则必有：

- ① 传热面的几何相似
- ② 速度场相似
- ③ 温度场相似
- ④ 物性场相似

引入准则数的好处：

$$\text{导热问题: } t = f(a, l, \lambda, \delta, h, x) \rightarrow \theta^* = f(B_i, \bar{\tau}_0, x^*)$$

无量纲时间 \uparrow 无量纲坐标
 \downarrow 无量纲边界条件

① 实验时应该测什么量（如何进行实验）。

A_{ext} \rightarrow 强化传热

② 实验结果怎么整理



增大阻力

③ 实验结果推广应用的条件

6.2 柏努利原理的应用

应用特征方程的注意事项：① 特征长度

体积分

② 特征流速

③ 定性温度的选取

管内流动特征长度是 d

6.3 内部流动强制对流传热实验关联式

特征长度 = d

$$\text{截面平均速度: } U_m = \frac{\int_{A_L} \rho u dA}{\rho A_L}$$

$$\text{截面平均温度: } T_b = \frac{\int_{A_L} C_p \rho u dA}{\int_{A_L} C_p \rho u dA}$$

管内湍流传热关联式

Dittus-Bolter 公式: $Nu_f = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \begin{cases} n=0.4, \text{ 加热流体} \\ n=0.3, \text{ 冷却流体} \end{cases}$

范围: $Re = 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$, $Pr = 0.7 \sim 120$

{ 特征尺寸: 内径 d_i 三大特征参数
定性温度: $t_g = (t_{in} + t_{out})/2$
特征流速

特征温差 $\Delta t = |t_w - t_g| \begin{cases} t_w \leq 50^\circ C \\ t_w \geq 20^\circ C \\ t_w \leq 10^\circ C \end{cases}$

不适用于液态金属, $Pr \sim 10^{-2}$

短管修正: $l/d < 60$, C_L

大温差修正: $\begin{cases} \text{气体被加热 } C_t < 1 & \text{液体被加热或冷却} \\ \text{气体被冷却, } C_t = 1 & \end{cases}$

弯管修正: C_r

综合表达式: $Nu_f = 0.023 Re^{0.8} Pr^n C_r C_L C_d$

取 $n=0.4 \rightarrow h = f(u^{0.8}, \rho^{0.8}, \eta^{-0.4}, C_p^{0.4}, \pi^{0.6}, d^{-0.2})$

Gnielinski 公式

$$Nu_f = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr_f}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_f^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] C_t$$

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad - \text{Filonenko 公式}$$

范围: $Re_f = 2300 \sim 10^6$, $Pr_f = 0.6 \sim 10^5$

液态金属 ($Pr = 3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$)

$$\begin{cases} \text{恒壁温条件: } Nu_f = 5.0 + 0.025 Pe_f^{0.8} \\ \text{恒热流条件: } Nu_f = 4.82 \times 0.0185 Pe_f^{0.8} \end{cases}$$

管内层流强制对流传热关联式:

$$Sieder-Tate: Nu_f = 1.86 \left(\frac{Pe_f Pr_f}{L/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14}$$

适用范围: $\frac{\eta_f}{\eta_w} = 0.0044 \sim 9.75$ $Pr_f = 0.48 \sim 16700$

三大特征数同 D-B 公式, f 表示取流体平均温度为定性温度.

b.4 外部流动强制对流传热关联式

外掠等温平板

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad Nu_m = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

特征尺寸: 板长 (局部为 L , 平板为 l)

定性温度: $T_m = (T_{\infty} + t_w)/2$

特征流速: U_{∞}

$\lambda \uparrow$, $\delta \uparrow$, $h \downarrow$

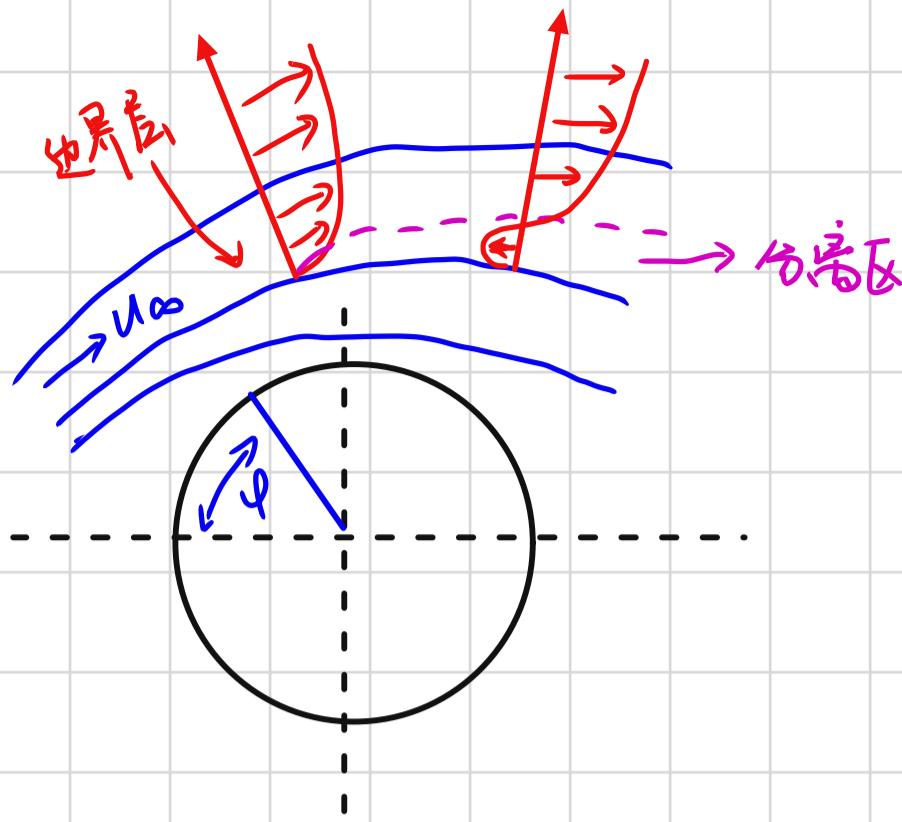
外掠单管

$$\begin{cases} \text{前半用加速流动} & \frac{dp}{dx} < 0, \frac{du}{dx} > 0. \\ \text{后半用减速流动} & \frac{dp}{dx} > 0, \frac{du}{dx} < 0. \end{cases}$$

flow separation

$\frac{dp}{dx} = 0, \frac{du}{dx} = 0.$

位置取决于 Re



$Re < 10$, 不流体

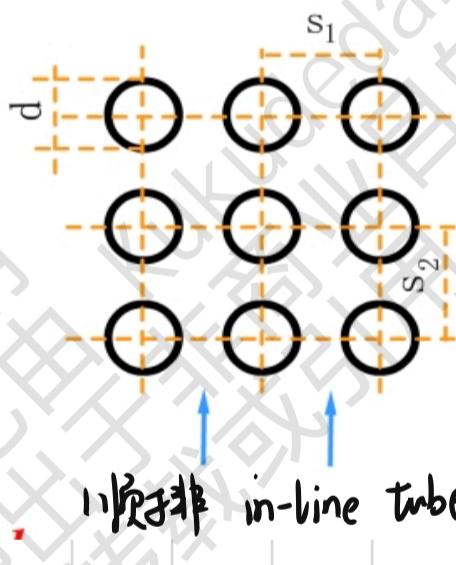
$10 < Re < 1.5 \times 10^5$, 层流脱体, $\psi = 80w85$

$Re > 1.5 \times 10^5$, 湍流脱体, $\psi \approx 140$

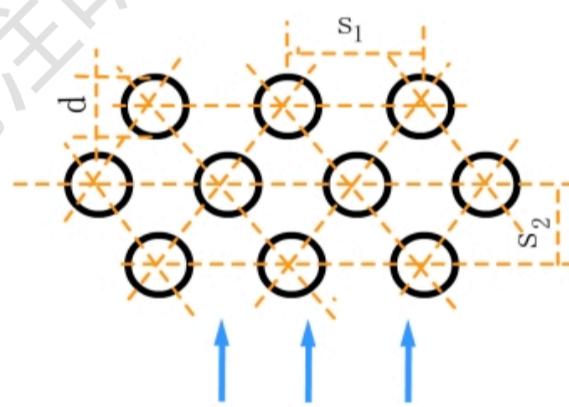
平均 Nu : ① 关联式: $Nu = CR_e^n Pr^{1/3}$

② t_m : 气体及液体通用, $t_m = (t_w + t_\infty)/2$, d -外径, U_∞
 $\left\{ \begin{array}{l} Re = 0.4 \times 10^5 \\ C_{in} \text{ 取决于 } Re \end{array} \right.$

外掠管束:



1) 管排 in-line tube row



2) 管排 staggered

Zhukauskas 关联式. $Nu_f = CR_{ef}^m Pr_f^n \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^k \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^p \epsilon_n$

定性温度: $t_f = (t_f^1 + t_f^2)/2$ 管束进出口流体的平均温度

特征长度: 外径 d

6.5 自由对流换热及其实验关联式.

$$Gr = \frac{\alpha g \Delta t l^3}{V^2} = \frac{\alpha g (t_w - t_\infty) l^3}{V^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{边界层外缘} \cdot P + P_{\infty} g x = \text{const} \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{array} \right. \Rightarrow u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \alpha g(t - t_{\infty}) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

\downarrow $Nu = f(Pr, Gr)$

大空间自然对流传热系数

$$使用关联式: Nu = C(Gr Pr)^n = C(Ra)^n$$

$$\text{定性温度: } t_m = (t_w + t_{\infty})/2$$

特征长度为表面高度 H，或外径 d

$$- \frac{1}{n} \ln n \begin{cases} \frac{1}{4}, 层流 \\ \frac{1}{3}, 湍流 \end{cases}$$

竖平板或竖圆柱 模型

$$\text{均匀热流: } Gr^* = Gr Nu = \frac{g \alpha \Delta t l^3}{\nu^2} \cdot \frac{lh}{\lambda} = \frac{g \alpha \beta l^4}{\nu^2 \lambda}$$

$$Nu = f(Gr^*, Pr)$$

有限空间自然对流传热

竖平板

$$Nu_s = C(Gr_s Pr)^n \left(\frac{H}{s}\right)^{-1/9}$$

水平夹层

$$Nu_s = C(Gr_s Pr)^n$$

$$\begin{cases} C = 0.197 \text{ 层流} \\ C = 0.073 \text{ 湍流} \end{cases} \quad \begin{cases} n = \frac{1}{4} \text{ 层流} \\ n = \frac{1}{3} \text{ 湍流} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C = 0.212 \text{ 层流} \\ C = 0.061 \text{ 湍流} \end{cases} \quad \begin{cases} n = \frac{1}{4} \text{ 层流} \\ n = \frac{1}{3} \text{ 湍流} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{层流: } Gr_s = 8 \cdot 6 \times 10^3 \sim 2.9 \times 10^5 \\ \text{湍流: } Gr_s = 2.9 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^7 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{层流: } Gr_s = 10^4 \sim 4.6 \times 10^5 \\ \text{湍流: } Gr_s > 4.6 \times 10^5 \end{cases}$$

混合对流传热

$$\text{强制对流} \leftarrow 0.1 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 10 \rightarrow \text{自然对流}$$

$$Nu_{\text{mixed}}^n = Nu_{\text{forced}}^n \pm Nu_{\text{natural}}^n$$