《传 热 学》电子课件

上海电力学院
能源与环境工程学院
工程热物理学科

第6章　单相对流传热的实验关联式

§6.1　相似原理与量纲分析

一、问题的引出（为什么要用相似原理）

实验是认识物理现象不可或缺的手段，然而，经常遇到如下问题:

- 变量太多导致实验次数巨大

$$h = f(u,\ d,\ \lambda,\ c_p,\ \rho,\ \eta) \qquad\qquad Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$$

实验次数: 10^6　　　　实验次数: 10^2

- 实验中应测哪些量（是否所有的物理量都测）
- 实验数据如何整理（整理成什么样函数关系）
- 实物试验很困难或太昂贵的情况，如何进行试验?

§6.1　相似原理与量纲分析

二、相似原理的内容

1. 什么是物理现象相似？

对于同类的物理现象，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。

◆ 同类物理现象：用相同形式并具有相同内容的微分方程式所描写的现象。

2. 相似物理现象之间的关系

(1) 同名特征数对应相等；

以对流换热现象为例，

$$h(t_w - t_f) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0} \xrightarrow{\text{无量纲化}} \frac{hl}{\lambda} = \left.\frac{\partial\left[(t_w - t)/(t_w - t_f)\right]}{\partial(y/l)}\right|_{y=0} \xrightarrow{\text{现象1和现象2相似}} \left(\frac{hl}{\lambda}\right)_1 = \left(\frac{hl}{\lambda}\right)_2$$

§6.1 相似原理与量纲分析

二、相似原理的内容

2.相似物理现象之间的关系

(2) 各特征数之间存在着函数关系（准则数方程）。

- 第三类边界条件下的非稳态导热: $\Theta = f(Fo, Bi, \dfrac{x}{\delta})$
- 对流换热: $Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$

3.物理现象相似的条件

(1) 单值性条件相似

- 初始条件
- 几何条件
- 边界条件
- 物理条件

(2) 同名的已定特征数相等

§6.1 相似原理与量纲分析

三、相似原理解决的问题

1. 模型实验的设计

2. 实验数据的测量及整理

- 实验中只需测量各特征数所包含的物理量,避免了测量的盲目性
- 按特征数之间的函数关系整理实验数据，得到实用关联式

3. 实验结论可推广至其它相似现象使用

§6.1　相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

1. 相似分析法

在已知物理现象数学描述的基础上，建立两现象之间的一些列比例系数，尺寸相似倍数，并导出这些相似系数之间的关系，从而获得无量纲量。

(1)　对流换热

现象1：

$$h' = -\frac{\lambda'}{\Delta t'}\frac{\partial t'}{\partial y'}\bigg|_{y'=0}$$

现象2：

$$h'' = -\frac{\lambda''}{\Delta t''}\frac{\partial t''}{\partial y''}\bigg|_{y''=0}$$

建立相似倍数：

$$\frac{h'}{h''} = C_h' \qquad \frac{\lambda'}{\lambda''} = C_\lambda'$$

$$\frac{t'}{t''} = C_t' \qquad \frac{y'}{y''} = C_y$$

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

1.相似分析法

现象1: $h' = -\dfrac{\lambda'}{\Delta t'}\left.\dfrac{\partial t'}{\partial y'}\right|_{y'=0}$

现象2: $h'' = -\dfrac{\lambda''}{\Delta t''}\left.\dfrac{\partial t''}{\partial y''}\right|_{y''=0}$

相似倍数间的关系:

$$\frac{C_h C_y}{C_\lambda} h'' = -\frac{\lambda''}{\Delta t''}\left.\frac{\partial t''}{\partial y''}\right|_{y''=0}$$

$$\frac{C_h C_y}{C_\lambda} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{h' y'}{\lambda'} = \frac{h'' y''}{\lambda''} \quad \Rightarrow \quad Nu_1 = Nu_2$$

相似的对流换热现象，其**Nu**数相等。

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

1.相似分析法

(2) 流动现象

◈ 粘滞力为主的强制流动

采用相似分析，从动量方程出发。

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dx}+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \Longrightarrow \quad Re=\frac{ul}{\nu}$$

◈ 浮升力为主的自然流动

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\boxed{g\alpha(t-t_\infty)}+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \Longrightarrow \quad Gr=\frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2}$$

式中：

α－流体的体积膨胀系数　K^{-1}

Gr－表征流体浮生力与粘性力的比值

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

1. 相似分析法

(3) 能量守恒

采用相似分析，从能量方程出发。

$$u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}=a\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{Pe}=\frac{ul}{a}$$

$$\mathrm{Pe}=\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Re} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{Pr}_1=\mathrm{Pr}_2$$

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

2. 量纲分析法

π 定理：一个表示n个物理量间关系的量纲一致的方程式，一定可以转换为包含 $n-r$ 个独立的无量纲物理量群间的关系。r 指基本量纲的数目。

以圆管内单相强制对流换热为例，

(1) 确定相关的物理量

$$h = f(u, d, \lambda, \eta, \rho, c_p) \qquad n = 7$$

(2) 确定基本量纲，选择基本物理量

4个基本量纲：时间 [T]，长度 [L]，质量 [M]，温度 [Θ]

选 u, d, λ, η 为基本物理量

注意：所选基本物理量即要包含基本量纲，又要相互独立

§6.1　相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

2. 量纲分析法

(3) 将基本物理量逐一与其它物理量组成无量纲量

$$\pi_1 = h u^{a_1} d^{b_1} \lambda^{c_1} \eta^{d_1}$$

$$\pi_2 = \rho u^{a_2} d^{b_2} \lambda^{c_2} \eta^{d_2}$$

$$\pi_3 = c_p u^{a_3} d^{b_3} \lambda^{c_3} \eta^{d_3}$$

(4) 应用量纲一致性原则确定待定系数

$$\begin{aligned}\pi_1 &= h u^{a_1} d^{b_1} \lambda^{c_1} \eta^{d_1} \\ &= M^1 T^{-3} \Theta^{-1} \cdot L^{a_1} T^{-a_1} \cdot L^{b_1} \cdot M^{c_1} L^{c_1} T^{-3c_1} \Theta^{-c_1} \cdot M^{d_1} L^{-d_1} T^{-d_1} \\ &= M^{1+c_1+d_1} T^{-3-a_1-3c_1-d_1} \Theta^{-1-c_1} \cdot L^{a_1+b_1+c_1-d_1}\end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 0 \\ b_1 = 1 \\ c_1 = -1 \\ d_1 = 0 \end{cases}$$

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

2. 量纲分析法

(4) 应用量纲一致性原则确定待定系数

$$\begin{cases} a_1 = 0 \\ b_1 = 1 \\ c_1 = -1 \\ d_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \pi_1 = h u^{a_1} d^{b_1} \lambda^{c_1} \eta^{d_1} = \frac{hd}{\lambda} = Nu$$

$$\pi_2 = \frac{\rho u d}{\eta} = \frac{ud}{\nu} = \mathrm{Re} \qquad \Rightarrow \qquad Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$$

$$\pi_3 = \frac{\eta c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} = \mathrm{Pr}$$

§6.1 相似原理与量纲分析

四、物理现象涉及的特征数的获得

2. 量纲分析法

强制对流: $Nu = f(Re, Pr)$

自然对流换热: $Nu = f(Gr, Pr)$

混合对流换热: $Nu = f(Re, Gr, Pr)$

按上述关联式整理实验数据，得到实用关联式解决了实验中实验数据如何整理的问题。

Nu — 待定特征数 （含有待求的 h）

Re，***Pr***，***Gr*** — 已定特征数

§6.2　相似原理的应用

一、模化实验的设计

模型与原型中的对流换热过程必须相似;

- 单值性条件相似
- 已定准则数相等

近似模化：只对过程有决定性影响的条件满足相似原理的要求。

二、实验数据的测量

实验中只测量各特征数所包含的物理量。

§6.2　相似原理的应用

三、实验数据的整理

目的：完满表达实验数据的规律性、便于应用。

特征数关联式通常整理成已定准则的幂函数形式。

$$\mathrm{Nu} = c\,\mathrm{Re}^n$$

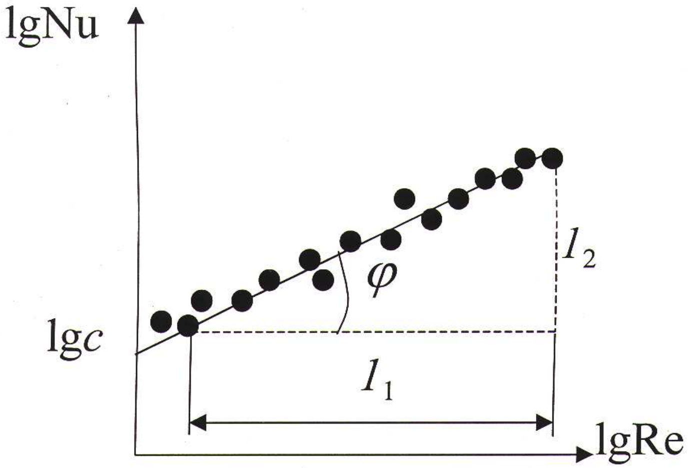
$$\mathrm{Nu} = c\,\mathrm{Re}^n\,\mathrm{Pr}^m$$

$$\mathrm{Nu} = c(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})^n$$

c*、*n*、*m 等需由实验数据确定，通常由图解法和最小二乘法确定。

§6.2　相似原理的应用

三、实验数据的整理



$$\mathrm{Nu} = c\,\mathrm{Re}^n$$

$$\lg \mathrm{Nu} = \lg c + n \lg \mathrm{Re}$$

$$n = \mathrm{tg}\,\varphi = \frac{l_2}{l_1};\qquad c = \frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Re}^n}$$

$$\mathrm{Nu} = c\,\mathrm{Re}^n\,\mathrm{Pr}^m$$

指数***m***的确定：对同一**Re**数下不同种类流体的实验数据进行整理。

§6.2 相似原理的应用

四、使用特征数方程的注意事项

1. 常见的特征数

表 6-1 常见相似准则数的物理意义

特征数名称	定义	释义
毕渥数 Bi	$\frac{hl}{\lambda}$	固体内部导热热阻与其界面上换热热阻之比（注意，λ 为固体的导热系数）。
傅里叶数 Fo	$\frac{a\tau}{l^2}$	非稳态过程的无量纲时间，表征过程进行的深度。
格拉晓夫数 Gr	$\frac{gl^3\alpha\Delta t}{\nu^2}$	浮升力与粘性力之比的一种度量。
j 因子	$St \cdot Pr^{2/3}$	无量纲表面传热系数。
努塞尔数 Nu	$\frac{hl}{\lambda}$	壁面上流体的无量纲温度梯度（注意 λ 为流体的导热系数）。
普朗特数 Pr	$\frac{\eta c_p}{\lambda}=\frac{\nu}{a}$	动量扩散厚度与热量扩散厚度之比的一种度量。
雷诺数 Re	$\frac{ul}{\nu}$	惯性力与粘性力之比的一种度量。
斯坦顿数 St	$\frac{Nu}{RePr}$	一种修正的努塞尔数，或视为流体实际的换热热流密度与流体可传递最大热流密度之比［注意 $Nu/(Re\ Pr)=h/(\rho c_p u)=h\Delta t/(\rho c_p u\Delta t)$］。

§6.2　相似原理的应用

四、使用特征数方程的注意事项

2. 特征长度

- 应按照特征数方程规定的方式选取
- 通常取研究问题中具有代表性的尺度作为特征长度。

3. 定性温度

- 应按照特征数方程规定的方式选取
- 常见定性温度 $\dfrac{t_{f1}+t_{f2}}{2}$ $\dfrac{t_f+t_w}{2}$

4. 特征数方程不能任意推广到该方程的实验参数的范围以外。

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

一、管槽内强制对流流动和换热的特征

1. 流动特征

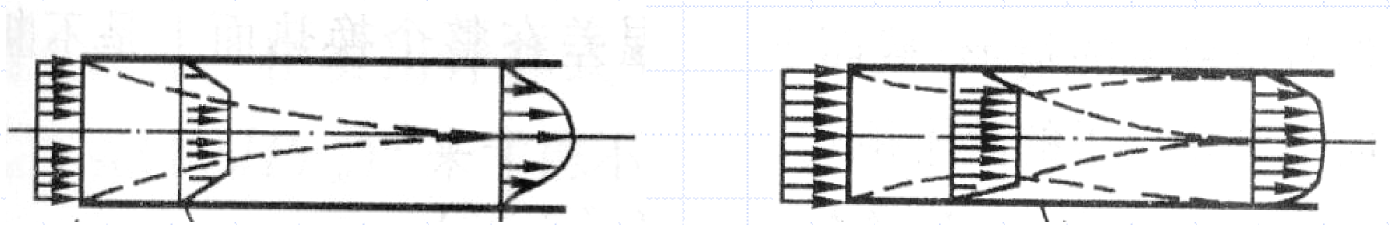
- 流动有层流、紊流之分

  层流: <

  过渡区: < <

  旺盛湍流: <

- 入口段的存在

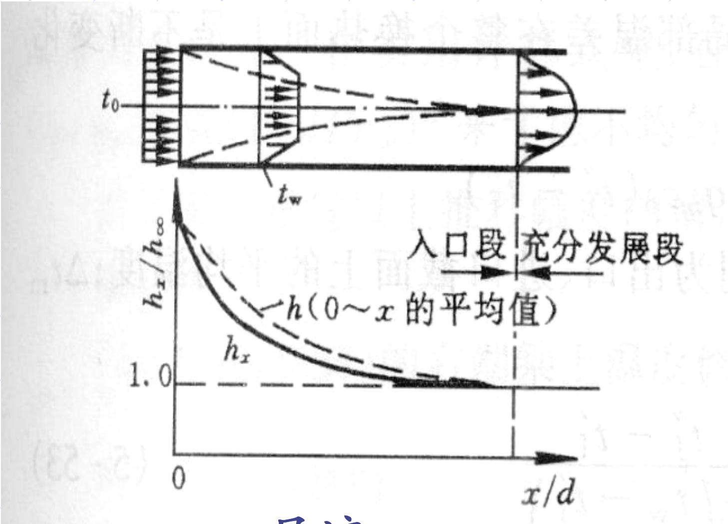


§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

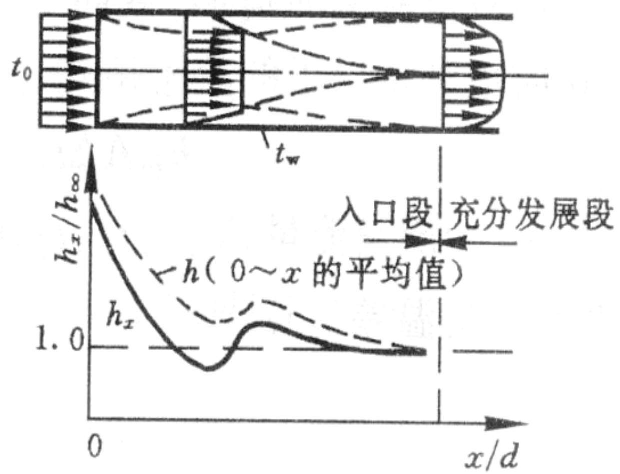
一、管槽内强制对流流动和换热的特征

2. 换热特征

- 流动处于层流、紊流时，换热有区别
- 入口段的存在



层流



湍流

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

一、管槽内强制对流流动和换热的特征

2.　换热特征

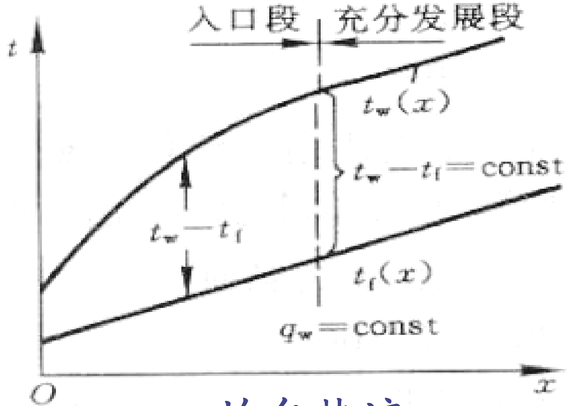
➢ 热边界条件：均匀壁温、均匀热流

- 对表面传热系数 ***h*** 的影响

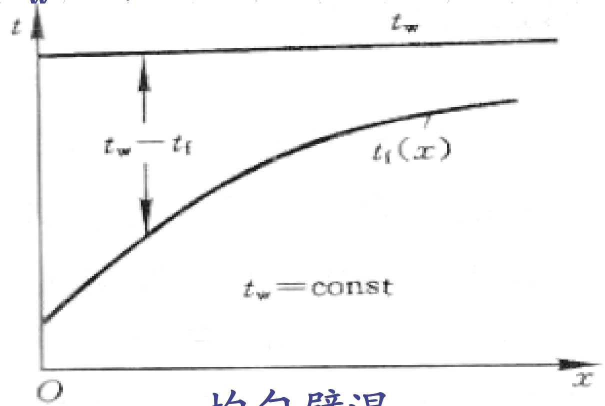
  紊流：除液态金属外，两种条件的差别可不计。

  层流：两种边界条件下的换热系数差别明显。

- 对流体温度t_f和壁面温度t_w的影响



均匀热流



均匀壁温

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

一、管槽内强制对流流动和换热的特征

2. 换热特征

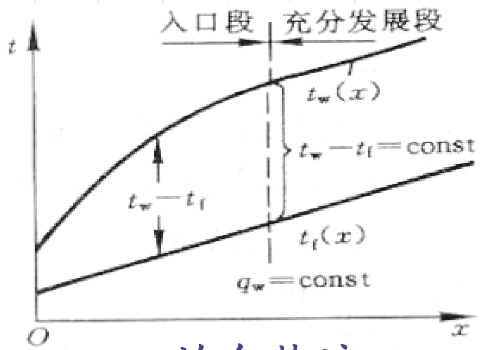
- 热边界条件：均匀壁温、均匀热流
  - 平均温差

均匀热流：充分发展段温差不变，故为 $| \ - \ |$。

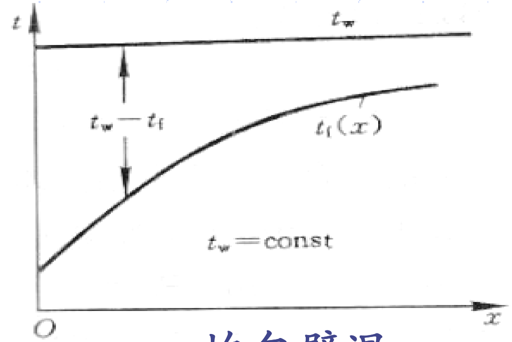
均匀壁温：壁温恒定，但局部温差变化变，故，

$$\Delta t_m = \frac{| \ - \ '| + | \ - \ ''|}{2}$$

$$\Delta t_m = \frac{t''_f - t'_f}{\ln\left(\dfrac{w - \ 'f}{w - \ ''f}\right)}$$



均匀热流



均匀壁温

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

一、管槽内强制对流流动和换热的特征

3.特征速度及定性温度的确定

特征速度：一般取截面平均流速。

定性温度：一般为截面上流体的平均温度（或进出口截面平均温度）。

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

1. 实用上使用最广的是实验关联式

$$Nu_f = 0.023\,\mathrm{Re}_f^{0.8}\,\mathrm{Pr}_f^n$$

式中：加热流体时n=0.4，冷却流体时n=0.3

定性温度采用流体平均温度t_f，

特征长度为管内径 d

实验验证范围：此式适用与流体与壁面具有中等以下温差场合。

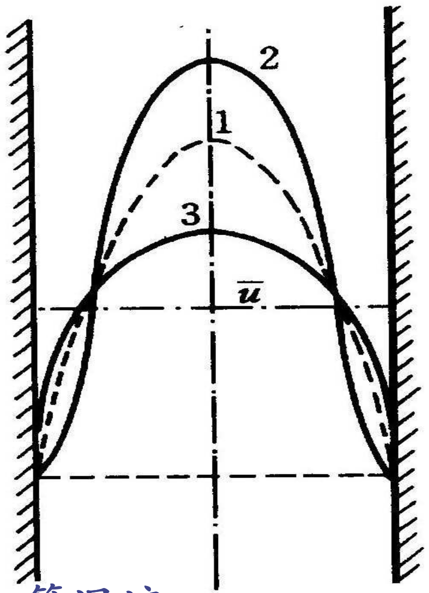
$$\mathrm{Re}_f = 10^4 \sim 1.2\times10^5 \qquad \mathrm{Pr}_f = 0.7 \sim 120$$

$$l/d \ge 60$$

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

2. 截面温度不均匀的影响



1－－等温流

2－－冷却液体或加热气体

3－－加热液体或冷却气体

- 实际上来说，截面上的温度并不均匀，导致速度分布发生畸变。
- 一般在关联式中引进乘数$(\eta_f/\eta_w)^n$或$(\Pr_f/\Pr_w)^n$来考虑不均匀物性场对换热的影响。

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

3. 中等以上温差实验关联式的修正

（1）迪贝斯－贝尔特修正公式

$$Nu_f = 0.023\,\mathrm{Re}_f^{0.8}\,\mathrm{Pr}_f^{n}\,c_t$$

对气体被加热时， $c_t = \left(\dfrac{T_f}{T_w}\right)$

当气体被冷却时， $c_t =$

对液体 $c_t = \left(\dfrac{\eta_f}{\eta_w}\right)$ $\begin{cases} m = & \text{液体受热时} \\ = & \text{液体被冷却时} \end{cases}$

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

3. 中等以上温差实验关联式的修正

（2）采用齐德－泰特公式

$$Nu_f = 0.027\,\mathrm{Re}_f^{0.8}\,\mathrm{Pr}_f^{1/3}\left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0.14}$$

定性温度为流体平均温度　（η 按壁温　确定），管内径为特征长度。

实验验证范围为：$\mathrm{Re}_f \geq 10^4 \sim 1.2\times10^5$　$\mathrm{Pr}_f = 0.7 \sim 16700$

$l/d \geq 60$

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

3. 中等以上温差实验关联式的修正

（3）采用米海耶夫公式:

$$Nu_f = 0.021 \mathrm{Re}_f^{0.8} \mathrm{Pr}_f^{0.43} \left(\frac{\mathrm{Pr}_f}{\mathrm{Pr}_w} \right)^{0.25}$$

定性温度为流体平均温度　　，管内径为特征长度。

实验验证范围为：$\mathrm{Re}_f \geq 10^4 \sim 1.75 \times 10^6$　　$\mathrm{Pr}_f = 0.6 \sim 700$

$l/d \geq 60$

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

4. 实验关联式的推广及修正

（1）非圆形截面管道

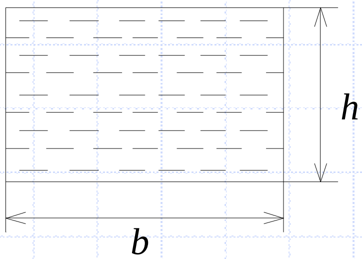
特征尺度替换成当量直径d_e

$$d_e = 4\frac{A_c}{P}$$

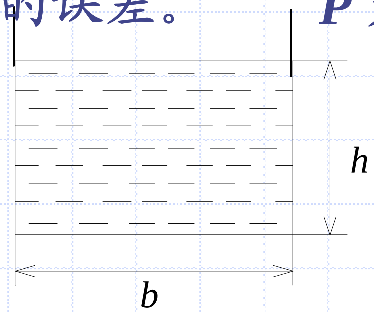
A_c为槽道的流动截面积

P 为湿周长

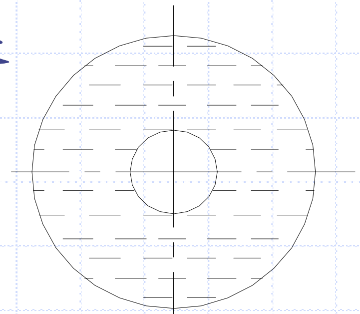
注意: 对截面上出现尖角的流动区域，采用当量直径的方法会导致较大的误差。



$$d_e = \frac{4hb}{2(h+b)} = \frac{2hb}{h+b}$$



$$d_e = \frac{4hb}{2h+b}$$



d_1, d_2

$$d_e = \frac{4(\frac{\pi}{4}d_2^2 - \frac{\pi}{4}d_1^2)}{\pi d_1 + \pi d_2} = d_2 - d_1$$

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

4. 实验关联式的推广及修正

（2）入口段

入口段的传热系数较高，当管道较短或入口段影响不可忽略时，需考虑入口效应的修正。

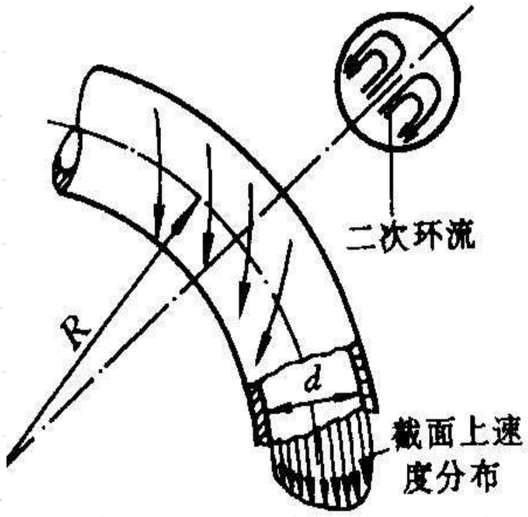
$$c_l = 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0.7}$$

（3）螺线管

螺线管截面上的二次流强化了换热。

对于气体 $$c_r = 1 + 10.3\left(\frac{d}{R}\right)^3$$

对于液体 $$c_r = 1 + 1.77\frac{d}{R}$$



§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

二、管内湍流换热实验关联式

5. 小**Pr**数流体的光滑圆管内充分发展湍流换热的准则式:

◆ 均匀热流边界

$$Nu_f = 4.82 + 0.0185 Pe_f^{0.827}$$

$$\mathrm{Re}_f = 3.6\times10^3 \sim 9.05\times10^5, \qquad Pe_f = 10^2 \sim 10^4$$

◆ 均匀壁温边界

$$Nu_f = 5.0 + 0.025 Pe_f^{0.8}$$

$$Pe_f > 100$$

特征长度为内径，定性温度为流体平均温度

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

三、管内层流换热关联式

层流充分发展对流换热通过理论分析获得了一些结果。

表 6-2 不同截面形状的管槽内层流充分发展换热的 Nu 数

截面形状	$Nu = hd_e/\lambda$		$fRe\left(Re = \frac{ud_e}{\nu}\right)$ ①
	均匀热流	均匀壁温	
正三角形	3.11	2.47	53
正方形	3.61	2.98	57
正六边形	4.00	3.34	60
圆	4.36	3.66	64
$\frac{b}{a}=2$ 长方形	4.12	3.39	62

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

三、管内层流换热关联式

表6-2(续)

截面形状	$Nu = hd_e/\lambda$		$fRe\left(Re=\dfrac{ud_e}{\nu}\right)$
	均匀热流	均匀壁温	
$\frac{b}{a}=3$	4.79	3.96	69
$\frac{b}{a}=4$	5.33	4.44	73
$\frac{b}{a}=8$	6.49	5.60	82
$\frac{b}{a}=\infty$	8.23	7.54	96

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

三、管内层流换热关联式

表 6-3 环形空间内层流充分发展对流换热的 Nu 数

（一侧壁面绝热，另一侧壁面等温）

内外径之比 d_i/d_o	内壁　Nu_i	外壁　Nu_o
0	/	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

§6.3 内部强制对流传热的实验关联式

三、管内层流换热关联式

层流充分发展对流换热的特点:

（1）对于同一截面形状的通道，均匀热流条件下的Nu高于均匀壁温下的Nu，故层流条件下热边界条件的影响不可忽略。

（2）对于等截面直通道，层流充分发展时的Nu与Re无关。

（3）即使使用当量直径作特征长度，不同截面管道层流充分发展的Nu也不相等，说明当量直径仅是一个几何参数，不能用它来统一不同截面通道的换热与阻力计算的表达式。

§6.3　内部强制对流传热的实验关联式

三、管内层流换热关联式

实际工程换热设备中，层流时的换热常常处于入口段的范围。可采用下列齐德－泰特公式。

$$Nu_f = 1.86\left(\frac{Re_f Pr_f}{l/d}\right)^{1/3}\left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0.14}$$

定性温度为流体平均温度t_f（η_w按壁温t_w确定），管内径为特征长度，管子处于均匀壁温。

实验验证范围为：

$$\frac{\eta_f}{\eta_w} = 0.0044 \sim 9.75, \qquad \left(\frac{Re_f Pr_f}{l/d}\right)^{1/3}\left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0.14} \geq 2$$

§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

外部流动：换热壁面上的流动边界层与热边界层能自由发展，不会受到邻近壁面存在的限制。

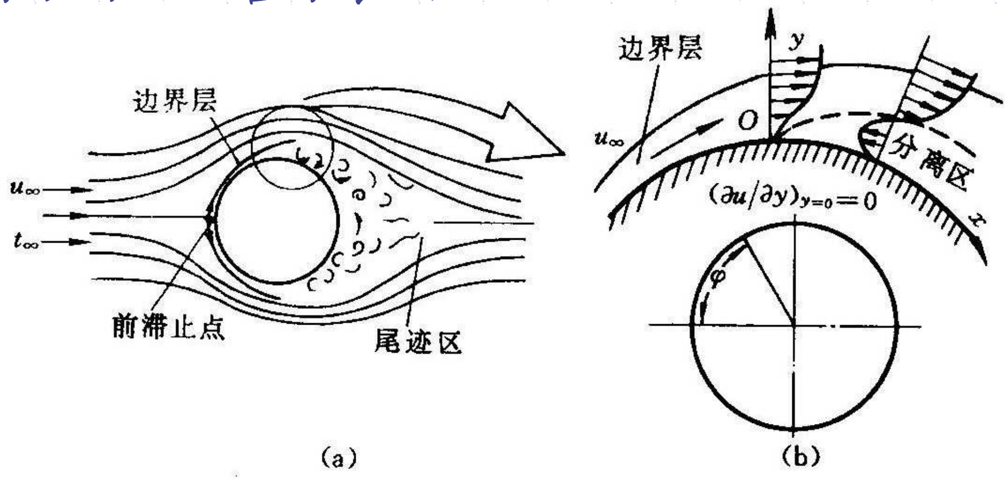
一. 横掠单管换热实验关联式

1. 横掠单管

流体沿着垂直于管子轴线的方向流过管子表面。

2. 横掠单管的流动特征

横掠单管流动具有边界层特征，还会发生绕流脱体，产生回流、漩涡和涡束。

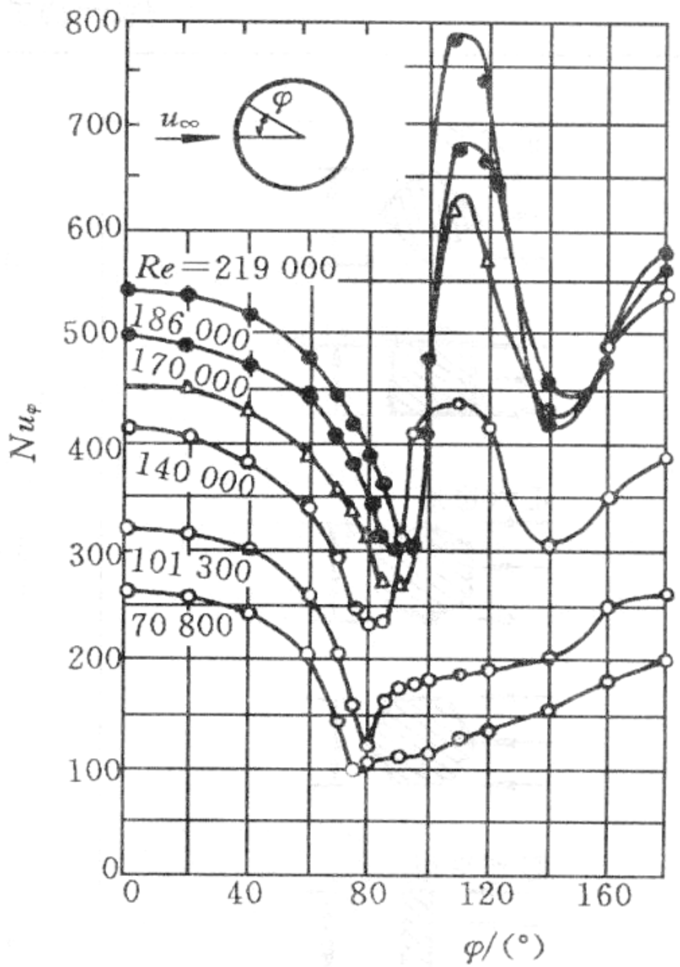


§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

一. 横掠单管换热实验关联式

3. 横掠单管的换热特征

边界层的成长和脱体决了外掠圆管换热的特征。

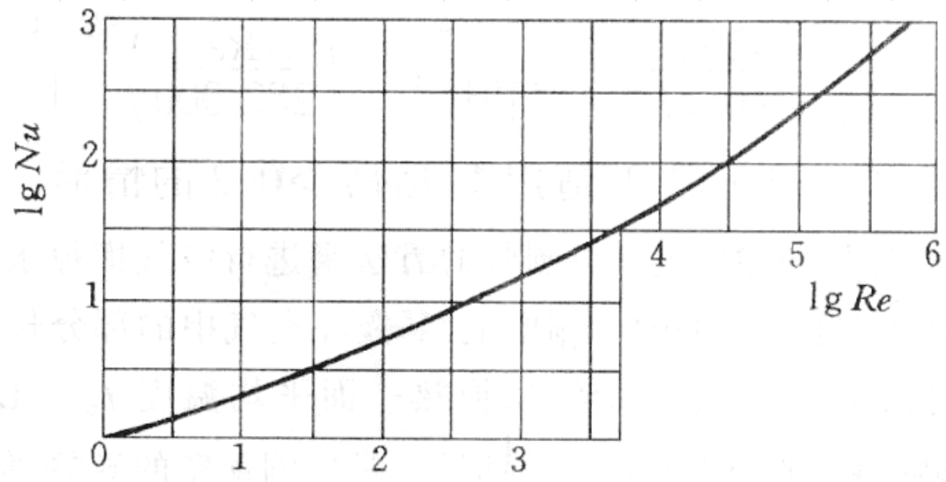


§6.4 外部强制对流传热–流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

一. 横掠单管换热实验关联式

3. 横掠单管的换热特征

虽然局部表面传热系数变化比较复杂，但从平均表面换热系数看，渐变规律性很明显。



空气横掠圆管换热的实验结果[①]

采用以下分段幂次关联式：

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{n}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$$

§6.4　外部强制对流传热–流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

一. 横掠单管换热实验关联式

4.横掠单管的实验关联式

◆ 横掠圆管的实验关联式

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^n\,\mathrm{Pr}^{1/3}$$

定性温度为 $(t_w + t_\infty)/2$

特征长度为管外径

Re数的特征速度为来流速度$\boldsymbol{u_\infty}$

空气实验验证范围： $t_\infty = 15.5 \sim 982$℃ ， $t_w = 21 \sim 1046$ ℃。

C及n的值见表5-5

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

一．横掠单管换热实验关联式

4. 横掠单管的实验关联式

◆ 气体横掠非圆形管的实验关联式

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{n}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$$

指数**C**及**n**值见表**5-6**，表中示出的几何尺寸**l**是计算**Re**数及**Nu**数时用的特征长度。

	Re	*C*	*n*
正方形 	$5\times10^{3}\sim10^{5}$	0.246	0.588
	$5\times10^{3}\sim10^{5}$	0.102	0.675
正六边形 	$5\times10^{3}\sim1.95\times10^{4}$ $1.95\times10^{4}\sim10^{5}$	0.160 0.038 5	0.638 0.782
	$5\times10^{3}\sim10^{5}$	0.153	0.638
竖直平板 	$4\times10^{3}\sim1.5\times10^{4}$	0.228	0.731

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

一．横掠单管换热实验关联式

4.横掠单管的实验关联式

◆ 其它实验关联式

对流体横向外掠单管提出了以下在整个实验范围内都能适用的准则式：

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62\,\mathrm{Re}^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}}{[1+(0.4/\mathrm{Pr})^{2/3}]^{1/4}}\left[1+\left(\frac{\mathrm{Re}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

式中：定性温度为 $(t_w + t_\infty)/2$

适用于 $\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr} > 0.2$ 的情形

§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

二. 流体外掠球体的实验结果

对流体外掠圆球的平均表面传热系数可以用以下关联式来确定:

$$Nu = 2 + (0.4\mathrm{Re}^{1/2} + 0.06\mathrm{Re}^{2/3})\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{\eta_\infty}{\eta_w}\right)^{1/4}$$

式中: 定性温度为: t_∞

特征长度为: 球体直径

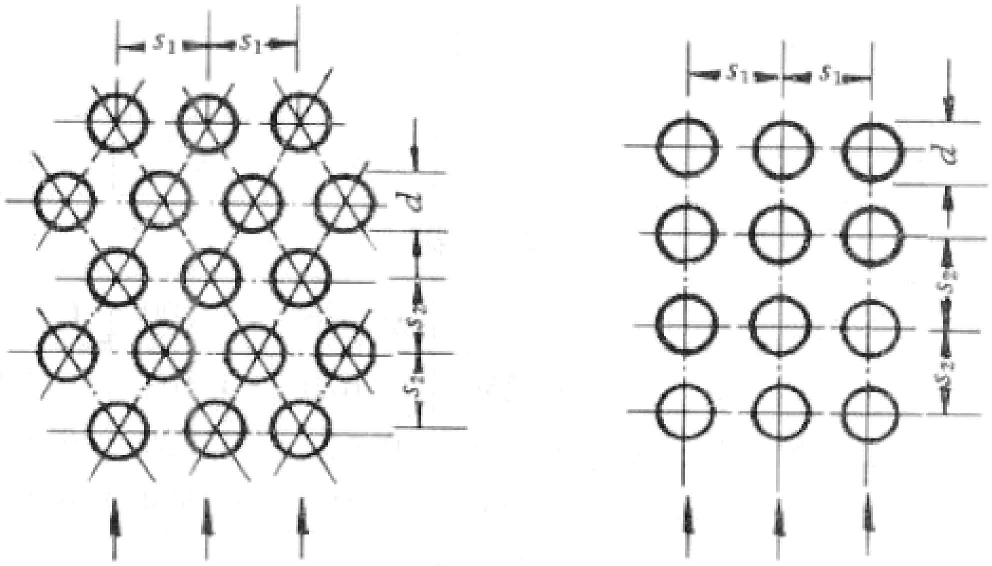
适用于范围: $0.71<\mathrm{Pr}<380$, $3.5<\mathrm{Re}<7.6\times10^6$

§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三. 横掠管束换热实验关联式

1. 管束的排列形式

- 顺排
- 叉排
- 叉排换热强
  阻力损失大
  难于清洗。



(a) 叉排　　(b) 顺排

2. 影响管束换热的因素

- **Re、Pr数**
- 管束排列形式
- 管间距
- 管束排数

§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三. 横掠管束换热实验关联式

3. 气体横掠10排以上管束的实验关联式

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^m$$

式中：定性温度为 $(t_w + t_\infty)/2$

特征长度为管外径，

Re数中的流速采用整个管束中最窄截面处的流速。

实验验证范围： $\mathrm{Re}_f = 2000 \sim 40000$

C和***m***的值见**5-7**表

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三. 横掠管束换热实验关联式

3. 气体横掠10排以上管束的实验关联式

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{m}$$

s_2/d \ s_1/d	1.25		1.5		2		3	
	C	m	C	m	C	m	C	m
顺　排								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.063 3	0.752
1.5	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.067 8	0.744
2	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
叉　排								
0.6							0.213	0.636
0.9					0.446	0.571	0.401	0.581
1			0.497	0.558				
1.125					0.478	0.565	0.518	0.560
1.25	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.5	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.421	0.574

§6.4 外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三. 横掠管束换热实验关联式

4. 气体横掠10排以下管束的实验关联式

对于排数少于10排的管束，平均表面传热系数可在10排以上的基础上乘以管排修正系数 ε_n。

$$h' = \varepsilon_n h$$

管排修正系数 ε_n

总排数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
顺 排	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	1.0
叉 排	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.0

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三.　横掠管束换热实验关联式

5. 较宽范围Pr数的横掠管束的实验关联式

- 16排以上顺排管束

表 6-7 流体横掠顺排管束平均表面传热系数计算关联式(≥16 排)

关 联 式	适用 Re 数范围	
$Nu_f=0.9Re_f^{0.4}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$1\sim10^2$	(5-75a)
$Nu_f=0.52Re_f^{0.5}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$10^2\sim10^3$	(5-75b)
$Nu_f=0.27Re_f^{0.63}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$10^3\sim2\times10^5$	(5-75c)
$Nu_f=0.033Re_f^{0.8}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$2\times10^5\sim2\times10^6$	(5-75d)

式中：定性温度为进出口流体平均温度；Pr_w按管束的平均壁温确定；

Re数中的流速取管束中最小截面的平均流速；特征长度为管子外径。

实验验证范围：$Pr=0.6\sim500$

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三. 横掠管束换热实验关联式

5.较宽范围Pr数的横掠管束的实验关联式

- 16排以上叉排管束

表 6-8　流体横掠叉排管束平均表面传热系数计算关联式(≥16 排)

关联式	适用 Re 数范围	
$Nu_f=1.04Re_f^{0.4}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$1\sim5\times10^2$	(5-76a)
$Nu_f=0.71Re_f^{0.5}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$5\times10^2\sim10^3$	(5-76b)
$Nu_f=0.35\left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{0.2}Re_f^{0.6}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$, $\frac{s_1}{s_2}\leqslant2$	$10^3\sim2\times10^5$	(5-76c)
$=0.40Re_f^{0.6}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$, $\frac{s_1}{s_2}>2$	$10^3\sim2\times10^5$	(5-76d)
$Nu_f=0.031\left(\frac{s_1}{s_2}\right)^{0.2}Re_f^{0.8}Pr_f^{0.36}(Pr_f/Pr_w)^{0.25}$	$2\times10^5\sim2\times10^6$	(5-76e)

§6.4　外部强制对流传热-流体横掠单管、球体及管束的实验关联式

三.　横掠管束换热实验关联式

5.较宽范围Pr数的横掠管束的实验关联式

◆ 16排以下管束的修正

表 6-9　茹卡乌斯卡斯公式的管排修正系数 ε_n

总排数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
顺排，$Re>10^3$	0.700	0.800	0.865	0.910	0.928	0.942	0.954	0.965	0.972	0.978	0.983	0.987	0.990	0.992	0.994
叉排 $10^2<Re<10^3$	0.832	0.874	0.914	0.939	0.955	0.963	0.970	0.976	0.980	0.984	0.987	0.990	0.993	0.996	0.999
$Re>10^3$	0.619	0.758	0.840	0.897	0.923	0.942	0.954	0.965	0.971	0.977	0.982	0.986	0.990	0.994	0.997

§6.5　大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

一、自然对流的流动与换热特征

1. 自然对流

不依靠泵或风机等外力推动，流体流动由流体自身温度场的不均匀所引起的对流换热。

2. 流动和换热特征

- 不均匀温度场仅发生在靠近换热壁面的薄层之内。
- 速度分布呈现两头小中间大的特点。
- 温度分布呈现逐渐变化的特点。

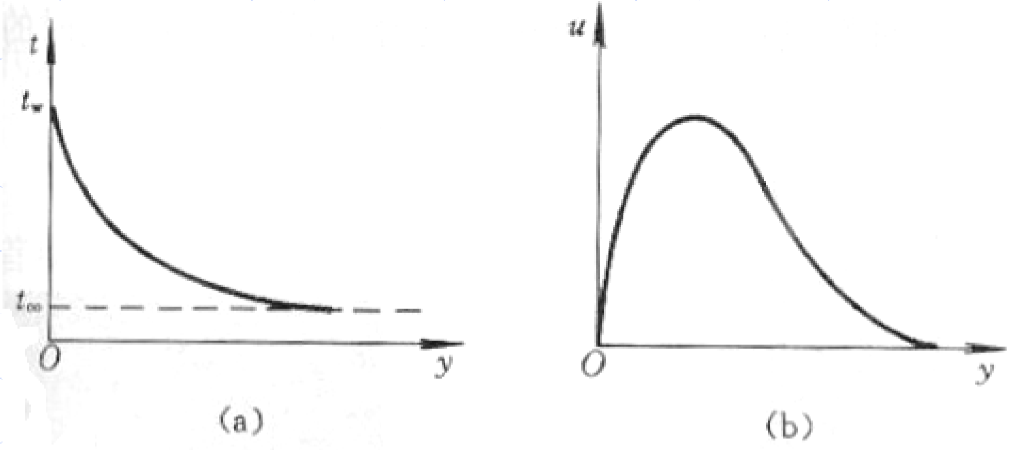


图6-15 竖壁附近自然对流的温度分布与速度分布

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

一、自然对流的流动与换热特征

2. 流动和换热特征

◆ 速度、温度分布的实测结果与理论分析的比较。

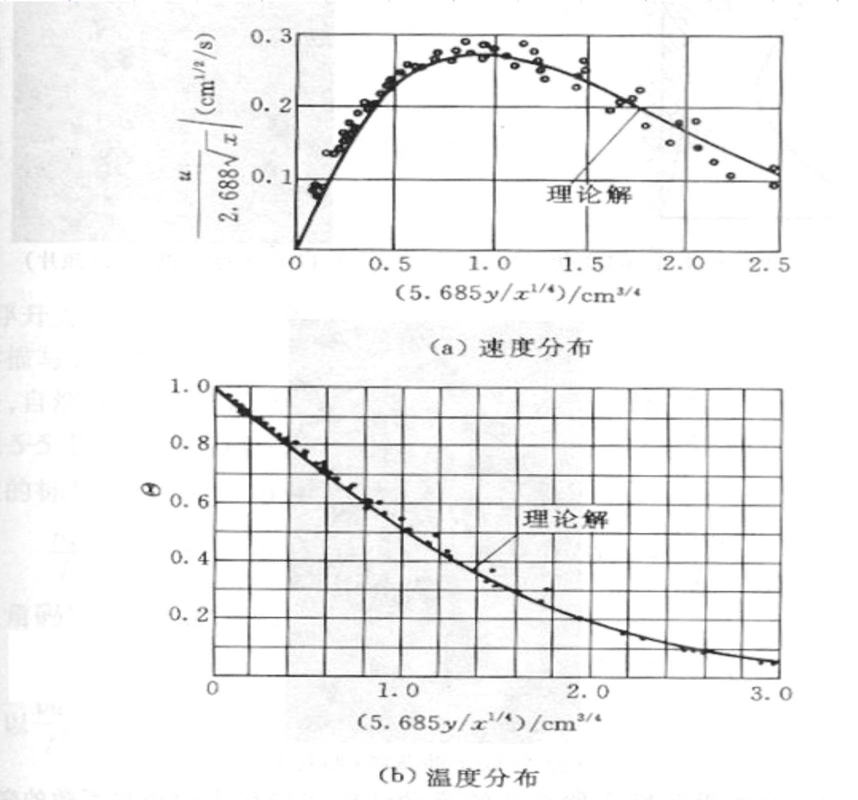


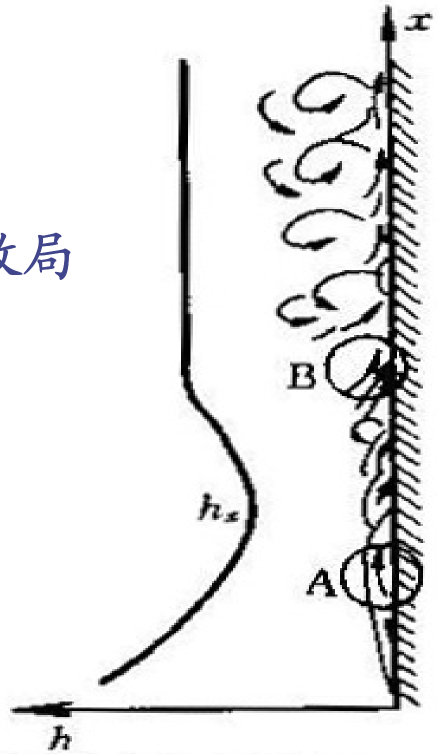
图6-16 竖板层流自然对流边界层理论分析与实测结果的对比

§6.5　大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

一、自然对流的流动与换热特征

3. 流动对换热的影响

- 自然对流亦有层流和湍流之分。
- 层流时，换热热阻主要取决于薄层的厚度，故局部表面传热系数逐渐降低。
- 层流转湍流时，局部表面传热系数有所提升。
- 旺盛湍流时，局部表面传热系数几乎是常量。



(a) 沿壁高的流动情况及 h_x 的变化

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

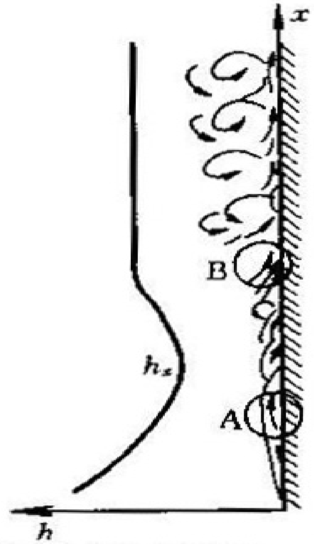
二、自然对流换热的准则方程式的导出

从对流换热微分方程组出发，可得到自然对流换热的准则方程式。

1. **Gr**数的导出

运动方程

$$\begin{cases} u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=f_x-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{dx}+\nu\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \\ u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}=f_y-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{dy}+\nu\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \end{cases}$$



由边界层理论得，$u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=f_x-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{dx}+\nu\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}$

只受重力时，$f_x=-g$

平板薄层外，因$u=v=0$，故：$\dfrac{dp}{dx}=-\rho_\infty g$

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

二、自然对流换热的准则方程式的导出

1. **Gr**数的导出

运动方程简化为：
$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\frac{g}{\rho}(\rho_\infty-\rho)+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

引入体积膨胀系数，
$$\alpha=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p\approx-\frac{1}{\rho}\frac{\rho_\infty-\rho}{T_\infty-T}$$

令，
$$\theta=T-T_\infty$$

运动方程改写为：
$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=g\alpha\theta+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

二、自然对流换热的准则方程式的导出

1. **Gr**数的导出

对运动方程进行无量纲化:

$$u^* = \frac{u}{u_0} \qquad x^* = \frac{x}{l} \qquad y^* = \frac{y}{l} \qquad \Theta^* = \frac{(t - t_\infty)}{(t_w - t_\infty)}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g\alpha\theta + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\Downarrow$$

Re数

$$\boxed{\frac{u_0 l}{\nu}}\left(u^*\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^*\frac{\partial u^*}{\partial y^*}\right) = \boxed{\frac{g\alpha\Delta t l^2}{\nu u_0}}\Theta^* + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}}$$

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta t l^2}{\nu u_0}\frac{u_0 l}{\nu} = \frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2}$$

Gr称为格拉晓夫数

在物理上，**Gr**数是浮升力/粘滞力比值的一种量度。**Gr**数的增大表明浮升力作用的相对增大。

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

二、自然对流换热的准则方程式的导出

2. 自然对流换热准则方程式

- 由运动方程得到**Gr**、**Re**数
- 由能量方程得到**Pr**、**Re**数
- 由对流换热公式得到**Nu**数
- 注意**Re**=***f*****(Gr)**

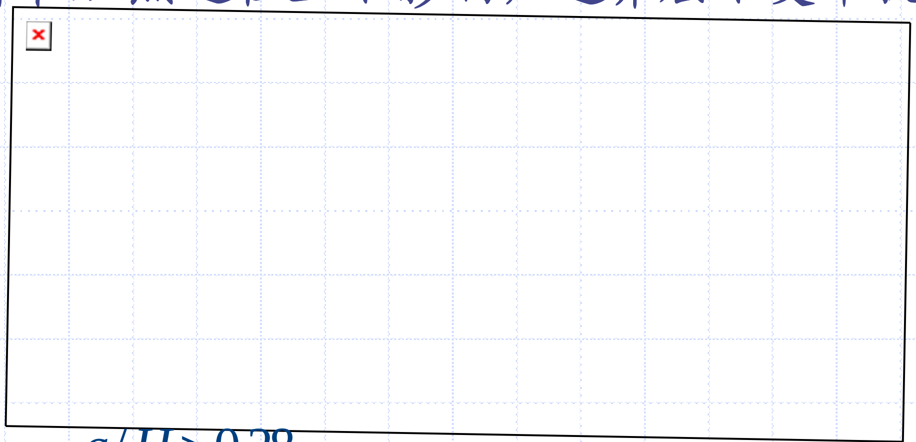
$$Nu = f(Gr, \mathrm{Pr})$$

§6.5　大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

三、自然对流的分类

1. 大空间自然对流

流体的冷却和加热过程互不影响，边界层不受干扰。



$a/H>0.28$　　　　$b/H>0.01$

2. 有限空间自然对流

流体的冷却和加热过程互不影响，边界层相互干扰。

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

四、大空间自然对流的实验关联式

1. 均匀壁温条件下的实验关联式

工程中广泛使用的实验关联式： $Nu = C(Gr\,\Pr)^n$

式中：定性温度采用 $(t_w + t_\infty)/2$

Gr数中的温差 Δt 为 t_w 与 t_∞ 之差，

特征长度的选择：竖壁和竖圆柱取高度，

横圆柱取外径

常数*C*和*n*的值见表5-12。

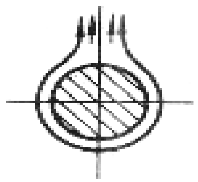
对于符合理想气体性质的气体，$\alpha=1/T$

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

四、大空间自然对流的实验关联式

工程中广泛使用的实验关联式: $$Nu = C(Gr\,\Pr)^n$$

表6-10 式(6-37)中的常数C和n

加热表面形状与位置	流动情况示意	流态	系数 C 及指数 n		Gr 数适用范围
			C	n	
竖平板及竖圆柱		层流 过渡 湍流	0.59 0.029 2 0.11	1/4 0.39 1/3	$10^4 \sim 3\times10^9$ $3\times10^9 \sim 2\times10^{10}$ $>2\times10^{10}$
横圆柱		层流 过渡 湍流	0.48 0.044 5 0.10	1/4 0.37 1/3	$10^4 \sim 5.76\times10^8$ $5.76\times10^8 \sim 4.65\times10^9$ $>4.65\times10^9$

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

四、大空间自然对流的实验关联式

2. 均匀热流条件下的实验关联式

对于常热流边界条件下的自然对流，往往采用下面方便的专用形式：

$$Nu = B(Gr^* \Pr)^m$$

常数**B**和***m***的值见表5-13。

式中： $Gr^* = GrNu = \dfrac{g\alpha q l^4}{\lambda \nu^2}$

定性温度采用 $(t_w + t_\infty)/2$

Gr数中的温差Δt为 t_w 与 t_∞ 之差，

特征长度的选择：矩形短边长。

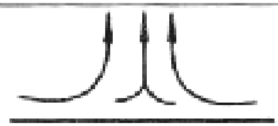
§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

四、大空间自然对流的实验关联式

2. 均匀热流条件下的实验关联式

$$Nu = B(Gr^{*}\,\mathrm{Pr})^{m}$$

表 6-11 式(6-43)中的常数 B 和 m

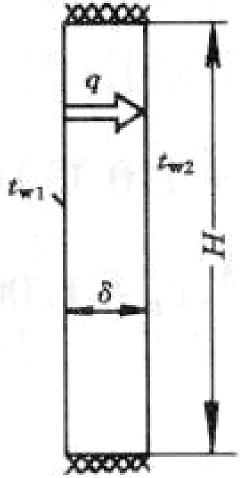
加热表面形状与位置	流动图示	系数 B 及指数 p		Gr^{*} 数适用范围
		B	m	
水平板热面朝上或冷面朝下		1.076	1/6	$6.37\times10^{5}-1.12\times10^{8}$
水平板热面朝下或冷面朝上		0.747	1/6	$6.37\times10^{5}-1.12\times10^{8}$

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

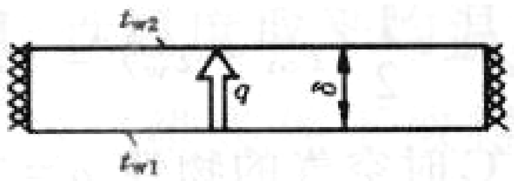
五、有限空间自然对流的实验关联式

1. 夹层内的自然对流换热

- 竖直封闭夹层的自然对流换热



- 水平封闭夹层的自然对流换热



§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

五、有限空间自然对流的实验关联式

2. 夹层内传热的形式

$$Gr_\delta = \frac{g\alpha\Delta t\delta^3}{\nu^2}$$

特征长度为：夹层厚度 δ

- Gr_δ 极低时换热依靠纯导热。竖直夹层，$Gr_\delta \le 2860$

  水平夹层，$Gr_\delta \le 2430$

- 随着 Gr_δ 的提高，会依次出现向层流特征过渡的流动（环流）、层流特征的流动、湍流特征的流动。

- 对竖夹层，纵横比 H/δ 对换热有一定影响。

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

五、有限空间自然对流的实验关联式

3. 夹层内自然对流换热的实验关联式

$$Nu = C(Gr_\delta \Pr)^n \left(\frac{H}{\delta}\right)^m$$

◆ 对于竖空气夹层，推荐以下实验关联式

$$Nu = 0.197(Gr_\delta \Pr)^{1/4}\left(\frac{H}{\delta}\right)^{-1/9} \qquad (Gr_\delta = 8.6\times10^3 \sim 2.9\times10^5)$$

$$Nu = 0.073(Gr_\delta \Pr)^{1/3}\left(\frac{H}{\delta}\right)^{-1/9} \qquad (Gr_\delta = 2.9\times10^5 \sim 1.6\times10^7)$$

实验验证范围为：$H/\delta = 11 \sim 42$

§6.5　大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

五、有限空间自然对流的实验关联式

3. 夹层内自然对流换热的实验关联式

- 对于水平空气夹层，推荐以下实验关联式

$$Nu = 0.212(Gr_\delta \Pr)^{1/4} \qquad Gr_\delta = 1\times10^4 \sim 4.6\times10^5$$

$$Nu = 0.061(Gr_\delta \Pr)^{1/3} \qquad Gr_\delta > 4.6\times10^5$$

实际上，除了自然对流外，夹层中还有辐射换热，此时通过夹层的换热量应是两者之和。

§6.5 大空间与有限空间内自然对流传热的实验关联式

六、自然对流与强制对流并存的混合对流

在对流换热中有时需要既考虑强制对流亦考虑自然对流，考察浮升力与惯性力的比值

$$\frac{g\alpha \Delta t l^3}{\nu^2}\frac{\nu^2}{u^2 l^2}=\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2}$$

$Gr/\mathrm{Re}^2 \geq 0.1$　　自然对流的影响不能忽略

$Gr/\mathrm{Re}^2 \geq 10$　　强制对流的影响相对于自然对流可以忽略不计

作业

- 相似原理与量纲分析(286页):6-1
- 管槽内强制对流传热（287页）：6-10、6-14
- 外掠平板对流换热（289页）：6-26
- 外掠单管与管束（290页）：6-34、6-38
- 大空间自然对流（292页）：6-43