

# 传热学

## 对流换热IV

授课老师：苗雨

# 目录

## CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及  
导引

02

管内强制对  
流流动和换  
热的特点

03

管内湍流强  
制对流传热  
关联式

04

管内层流强  
制对流传热  
关联式

05

管内强制对  
流传热的强  
化及应用

01

## 课前回顾及导引

## 课前回顾及导引

1 对于雷诺比拟，努塞尔数与阻力系数的关系表达式？  $Nu = c_f \frac{Re}{2}$

2 雷诺比拟的局部努塞尔数表达式？  $Nu_x = 0.0296 Re_x^{\frac{4}{5}}$

3 雷诺比拟成立的先决条件是什么？  $Pr_t = 1$

4 斯坦顿数St的计算公式是什么？  $St = \frac{Nu}{RePr}$

5 对于契尔顿-柯尔本比拟，努塞尔数与阻力系数关系表达式？  $\frac{c_f}{2} = \frac{Nu}{RePr^{\frac{1}{3}}}$

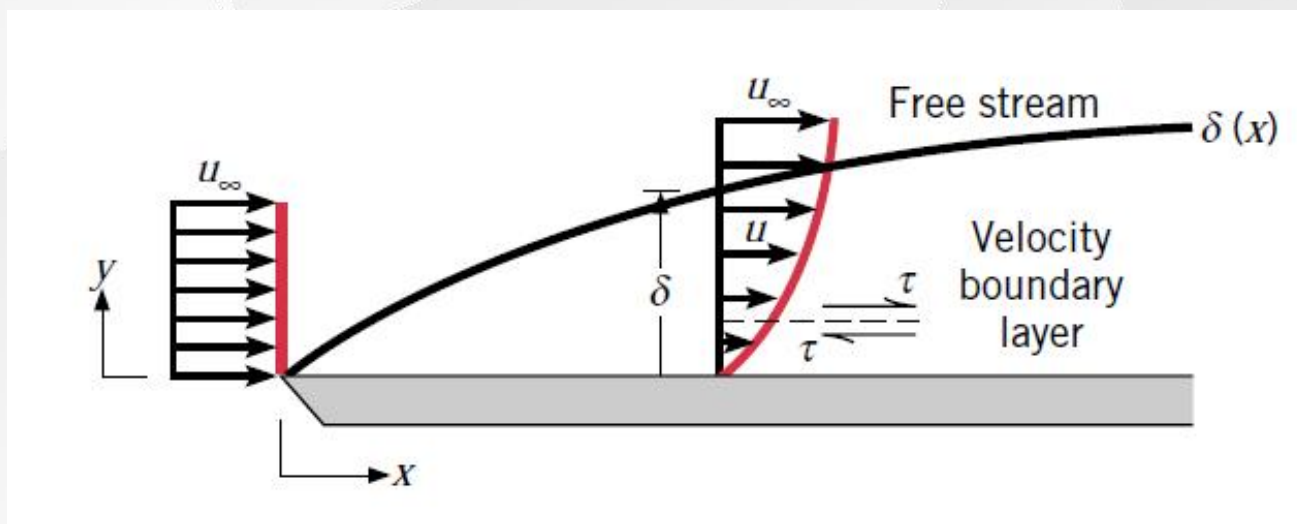
6 当  $Pr_t \neq 1$  时，平均努塞尔数  $Nu_m$  表达式？  $Nu_m = \left( 0.037 Re^{\frac{4}{5}} - 871 \right) Pr^{\frac{1}{3}}$





## 课前回顾及导引

练习题：温度为 $160^{\circ}\text{C}$ 、流速为 $4\text{m/s}$ 的空气流过温度为 $40^{\circ}\text{C}$ 的平板。在离开前沿点为 $3\text{m}$ 处测得局部表面传热系数为 $149\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。试计算该处的 $Re_x$ 、 $Nu_x$ 、 $St_x$ 、 $j$ 、 $c_f$  之值。





# 课前回顾及导引



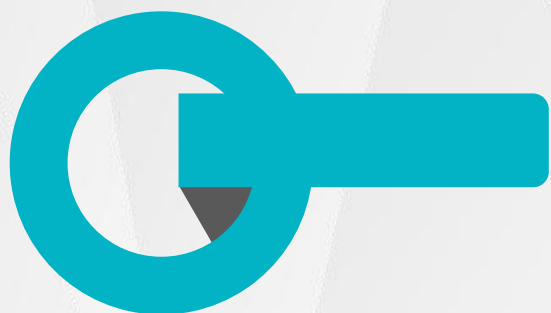
# 02

## 管内强制对流流动和 换热的特点

- 内部流动和外部流动的区别
- 管内强制对流流动和换热的特点

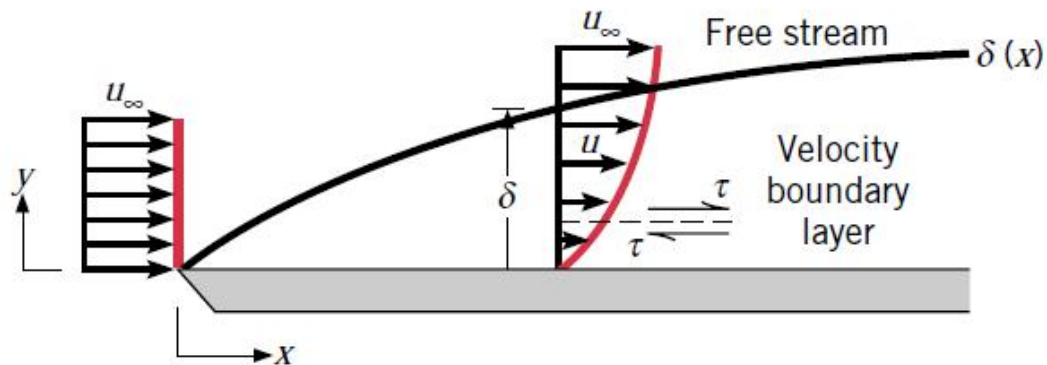


## 内部流动和外部流动的区别



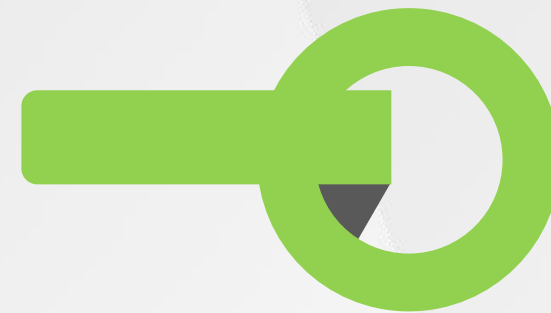
### 外部流动

换热壁面上的流动边界层可以自由发展，**不会受到流道壁面的阻碍或限制**

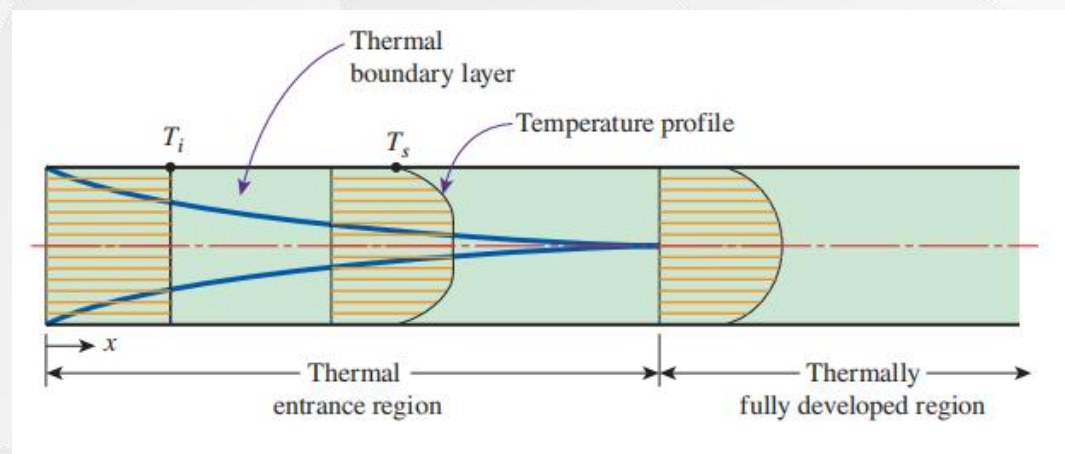


流动边界层与流道壁面之间相对关系不同

### 内部流动



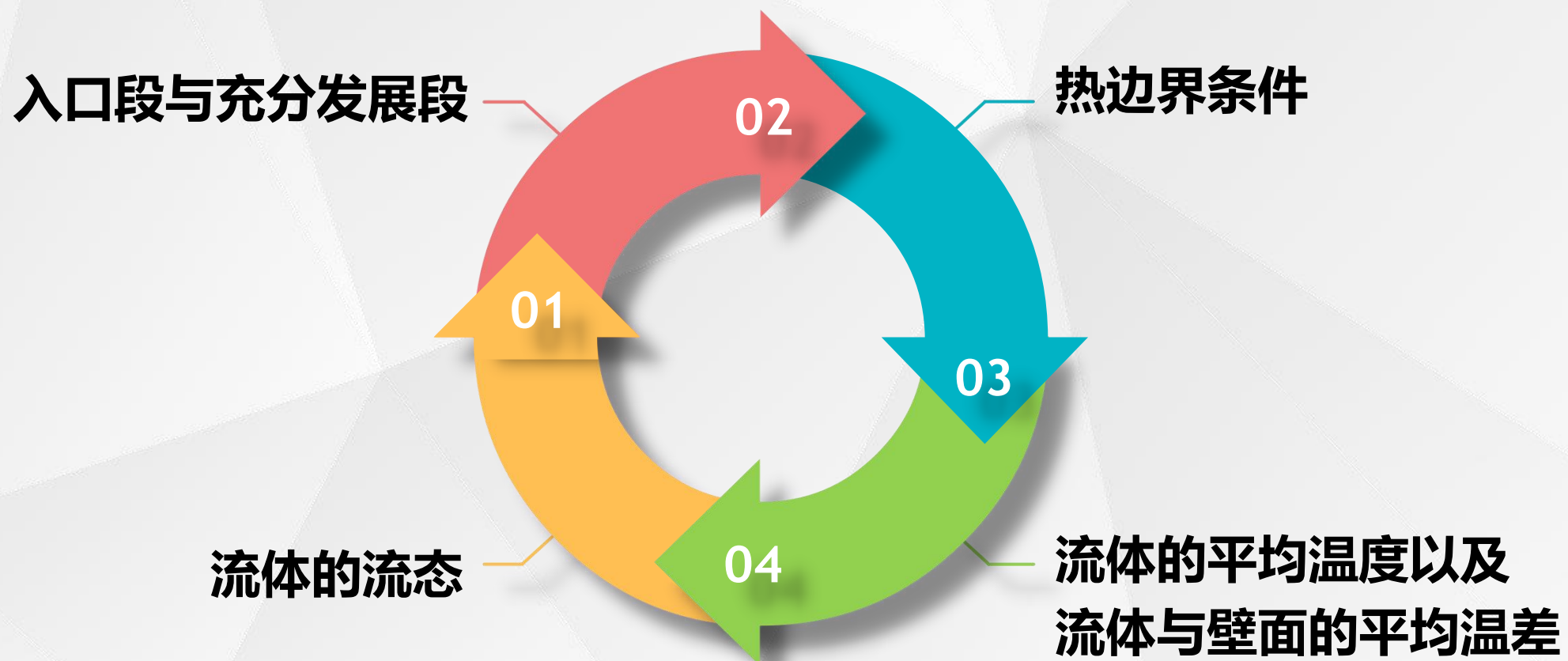
换热壁面上的流动边界层的发展**受到流道壁面的限制**







## 管槽内强制对流流动和换热的特点





## 管槽内强制对流流动和换热的特点

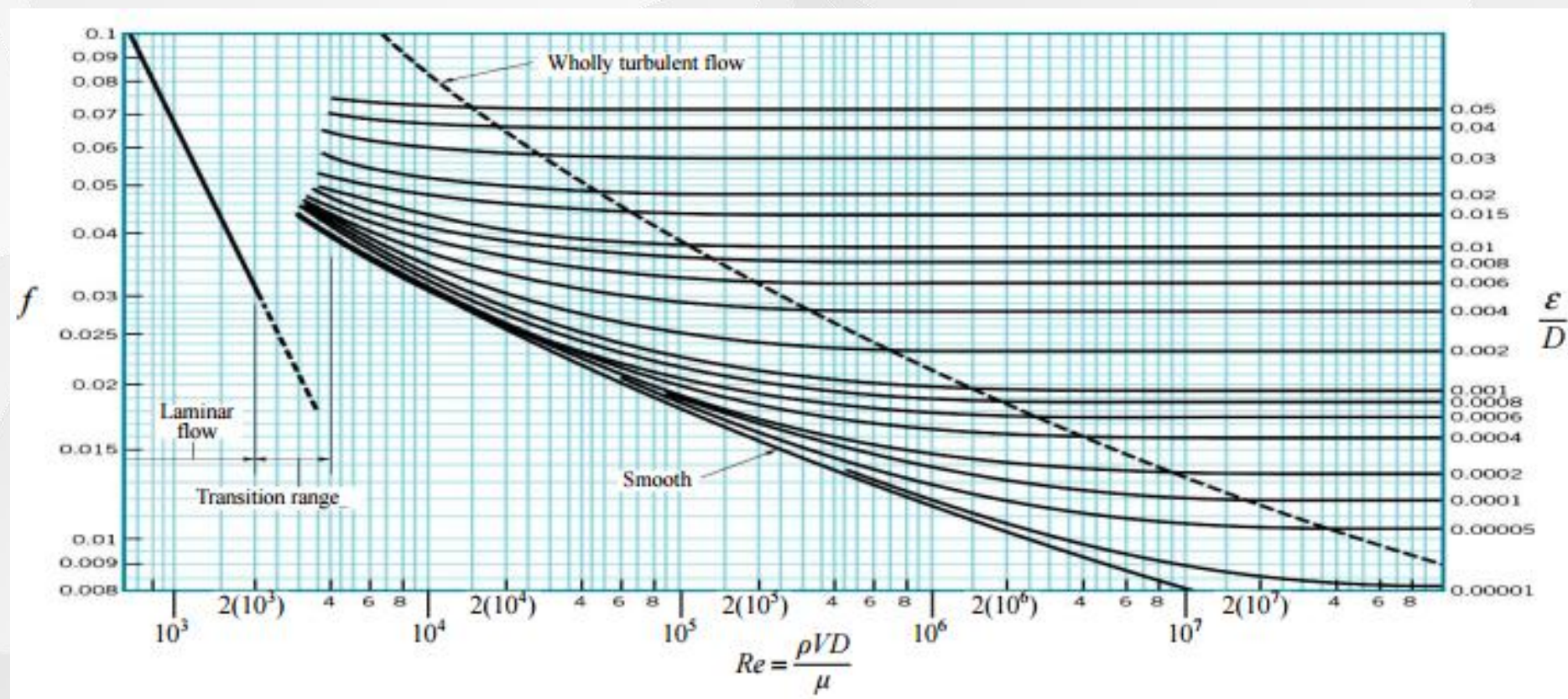
流体的流态



外掠平板对流流动的临界雷诺数的值是多少？

分界点是以管道直径为特征长度的雷诺数，称为临界雷诺数 ( $Re_c$ )，其值为2300。

- 雷诺数大于10000是**完全湍流**
- $2300 \leq Re \leq 10000$ 的范围是**过渡区**
- 小于2300为**层流**





# 管槽内强制对流流动和换热特点

## 入口段和充分发展段

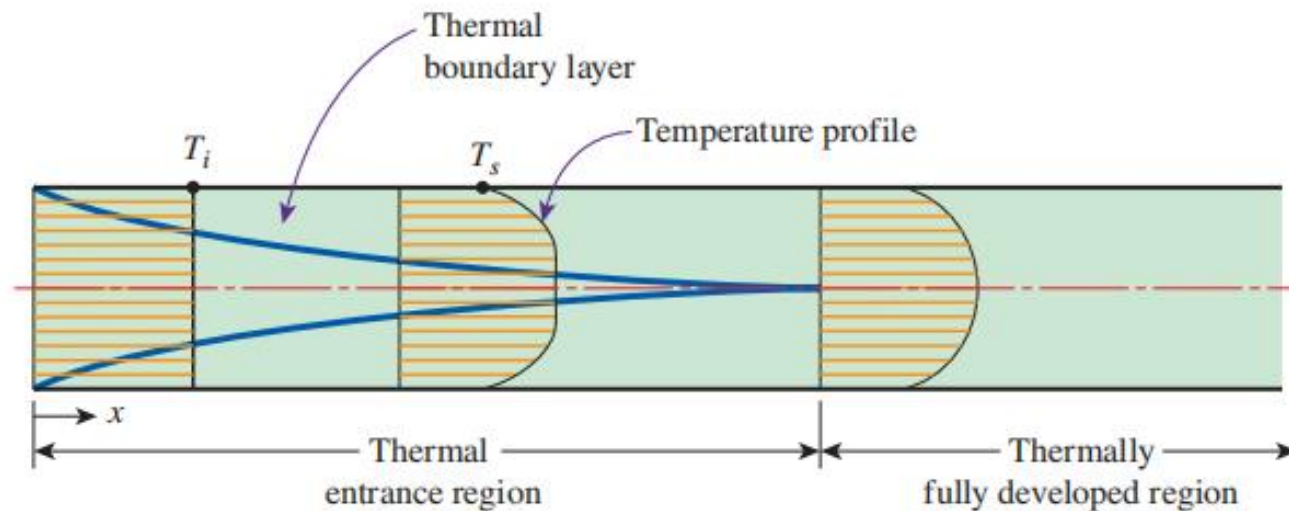
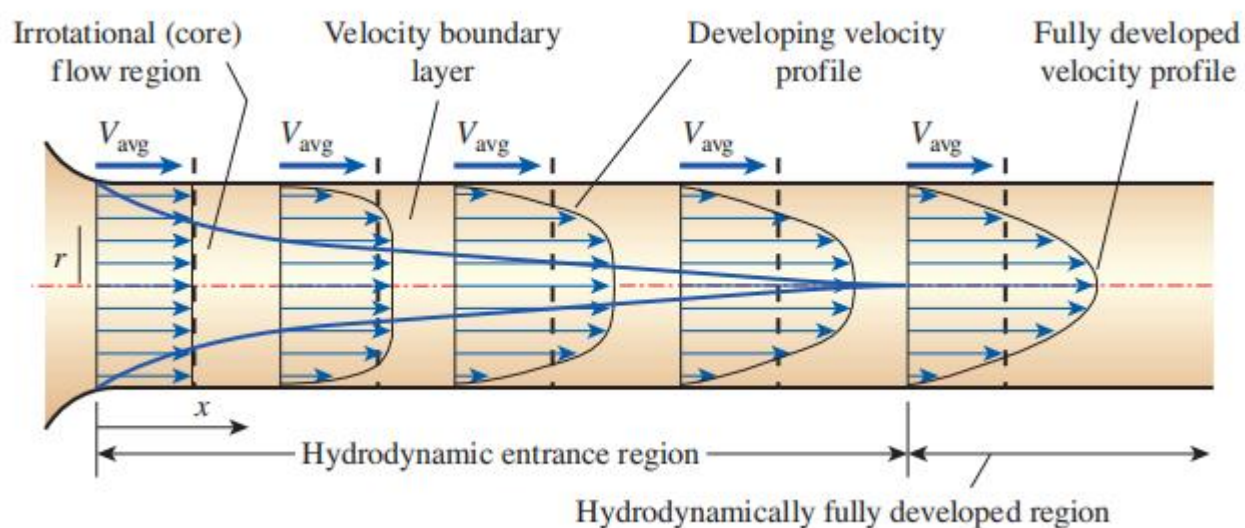
- 当流动边界层及热边界层汇合于管子中心线后称流动及换热已经**充分发展**

流动充分发展段

$$\frac{\partial u(r, x)}{\partial x} = 0$$

热充分发展段

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = 0$$







## 管槽内强制对流流动和换热特点

### 入口段和充分发展段

- 从进口到充分发展段之间的区域称为**入口段**
- 实验研究结果：

层流 流动入口段

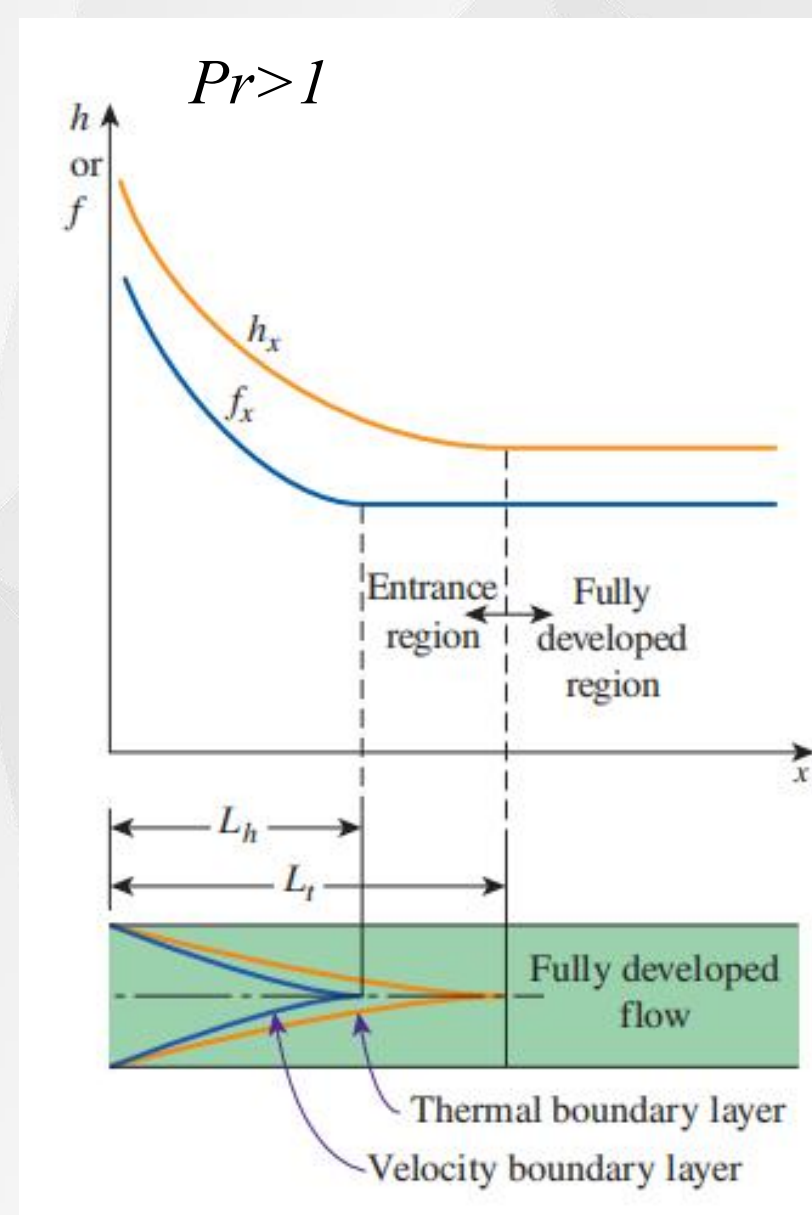
$$\frac{l_h}{d} = 0.05Re$$

热入口段

$$\frac{l_t}{d} = 0.05RePr$$

- $Pr=1$ ,  $l_h=l_t$ , 比如空气
- $Pr>1$ ,  $l_h<l_t$ , 比如高粘度油
- $Pr<1$ ,  $l_h>l_t$ , 比如液态金属

湍流  $l_h \approx l_t > 10d$



入口段热边界层薄，局部表面传热系数大，因此工程上常利用入口段换热效果好的特点，使用短管来强化传热

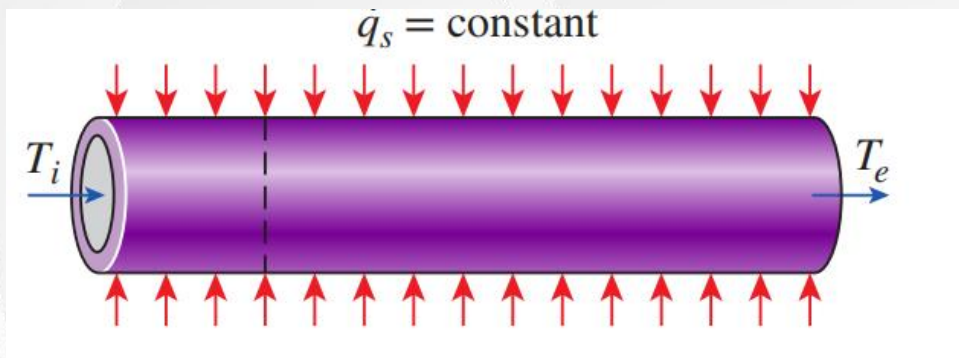




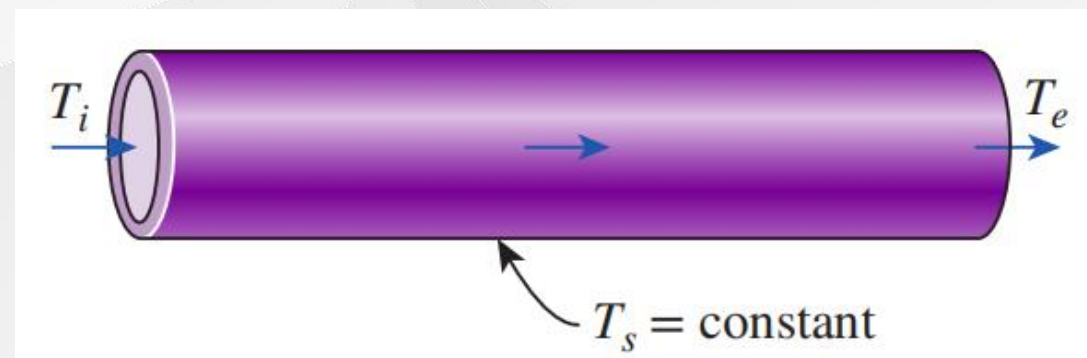
## 管槽内强制对流流动和换热的特点

### 热边界条件

- 均匀热流 (uniform heat flux)
- 均匀壁温 (uniform wall temperature)



**均匀热流**



**均匀壁温**



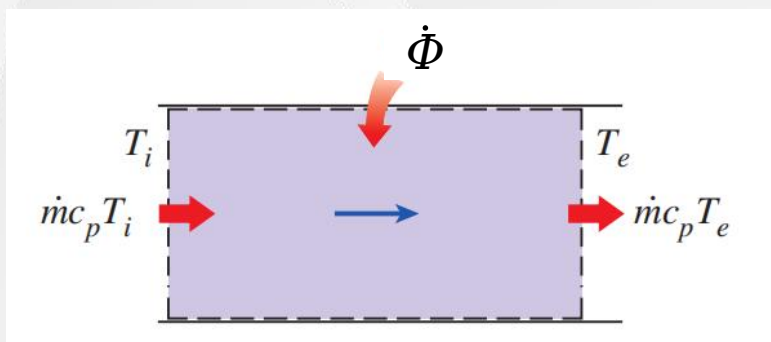
# 管槽内强制对流流动和换热特点

热边界条件

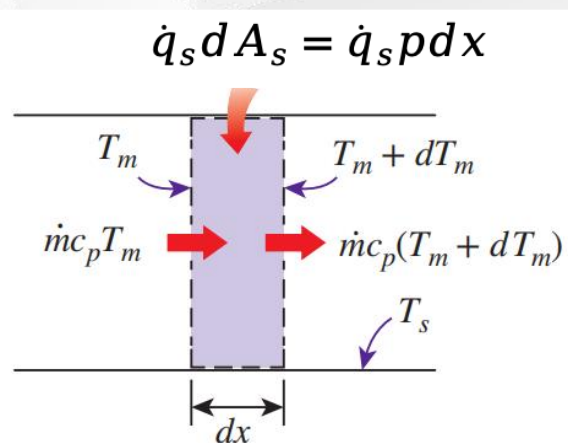
$$\dot{q}_s = h_x(T_s - T_m)$$

$$T_s - T_m = \frac{\dot{q}_s}{h_x}$$

入口段  $h_x$  大, 并逐渐减小  
充分发展段  $h_x$  小, 并趋于平稳

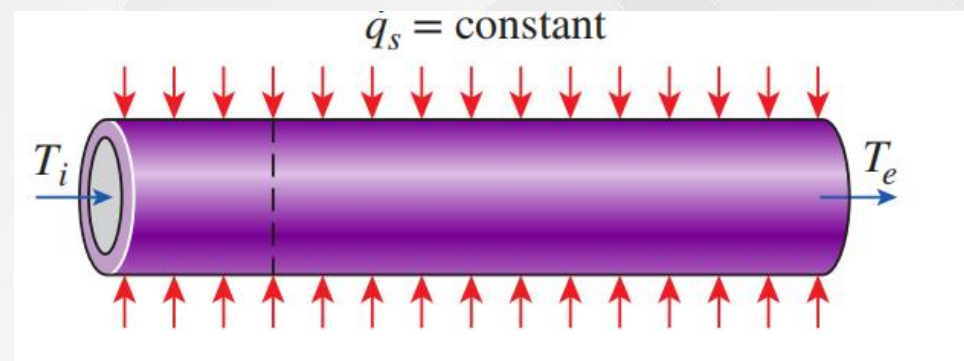


$$\Phi = \dot{q}_s A_s = \dot{m} c_p (T_e - T_i) \quad \Rightarrow \quad T_e = T_i + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} c_p}$$

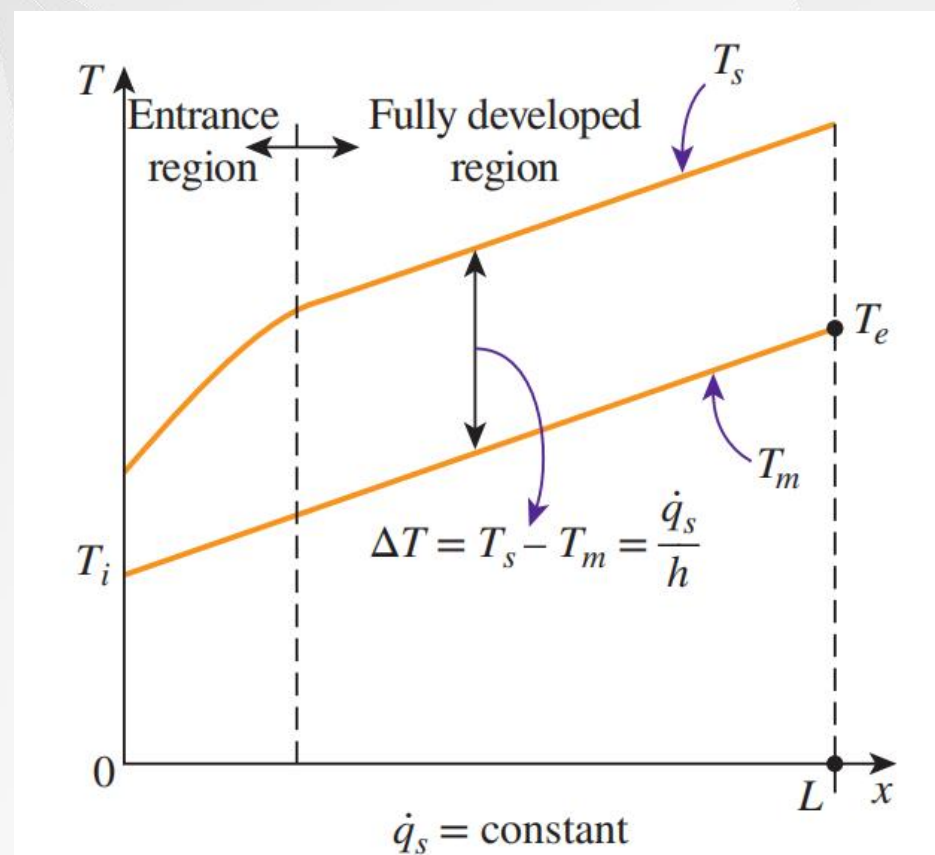


$$\dot{m} c_p dT_m = \dot{q}_s p dx$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{\dot{q}_s p}{\dot{m} c_p}$$



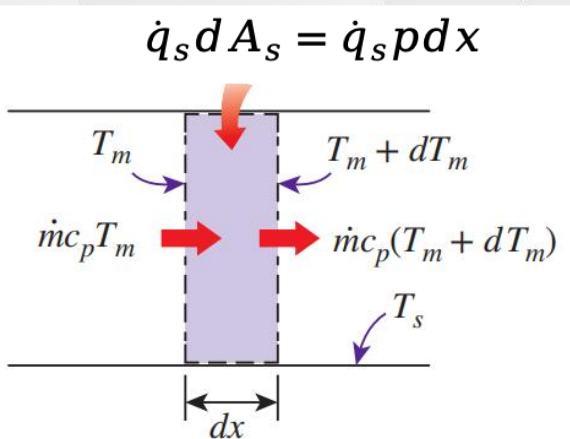
均匀热流





## 管槽内强制对流流动和换热特点

热边界条件



$$\dot{m}c_p dT_m = \dot{q}_s p dx$$

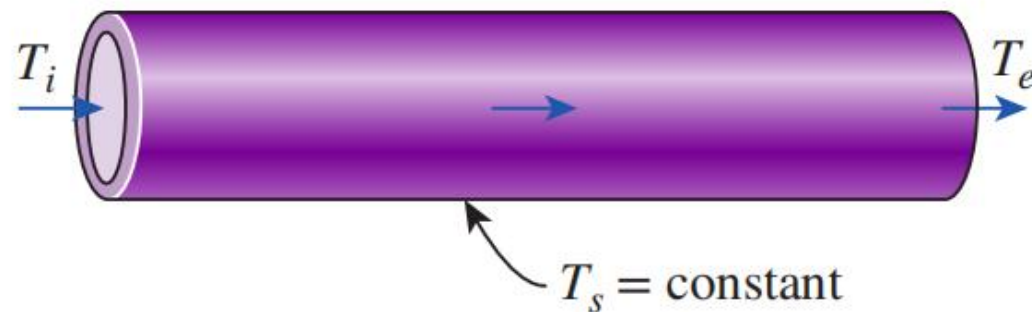
$$\dot{q}_s = h_x (T_s - T_m)$$

$$\dot{m}c_p dT_m = h_x (T_s - T_m) p dx$$

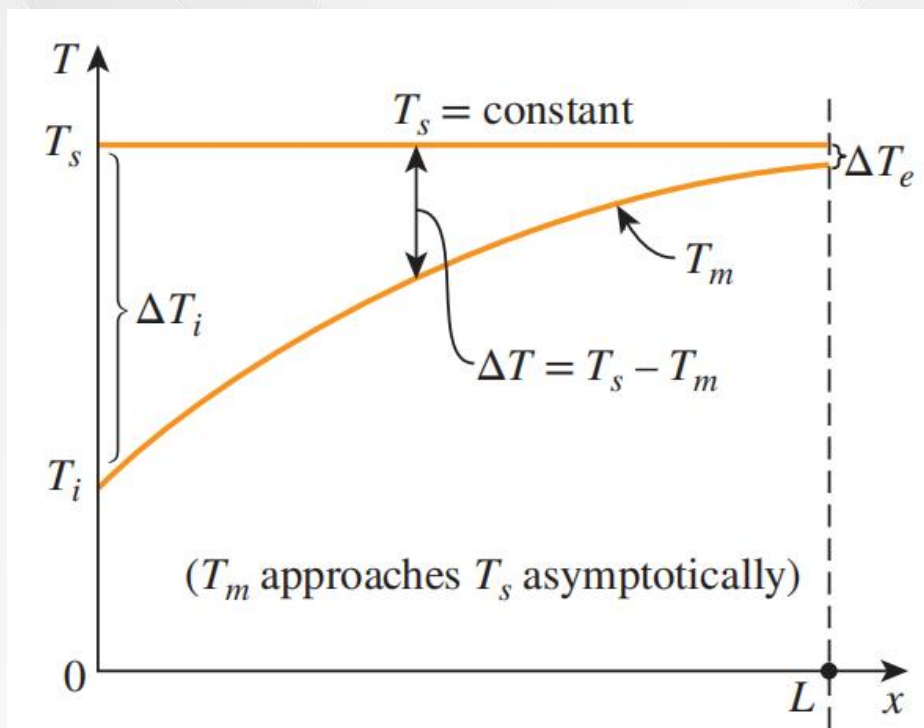
$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\frac{h_x p}{\dot{m}c_p} dx$$

$$\int_{T_i}^{T_e} \frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\int_0^L \frac{h_x p}{\dot{m}c_p} dx$$

$$\ln \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} = -\frac{h_x A_s}{\dot{m}c_p}$$



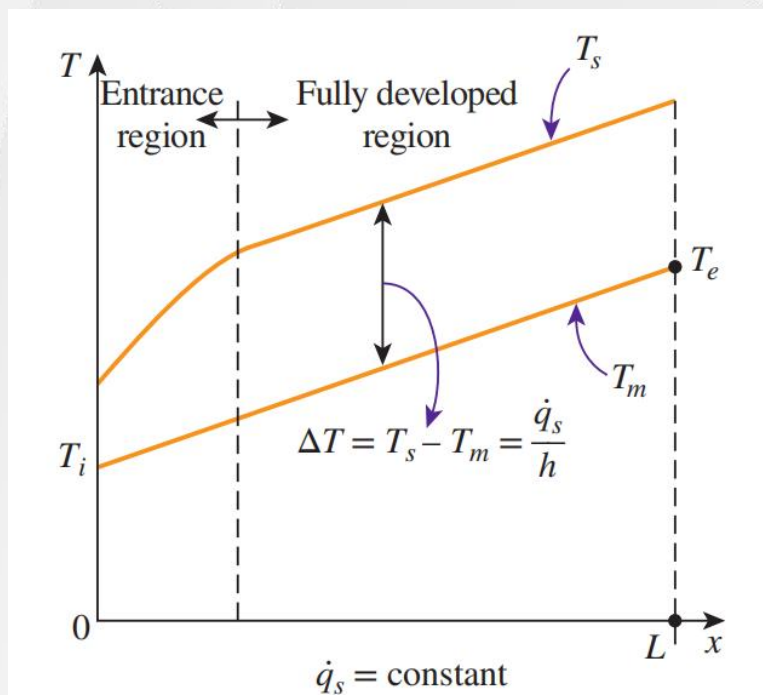
均匀壁温



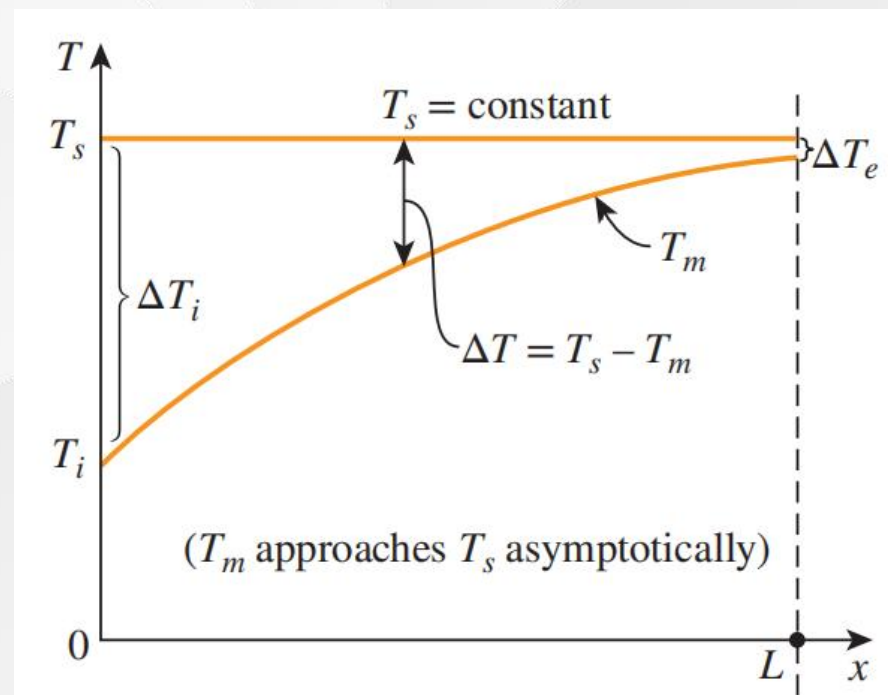


# 管槽内强制对流流动和换热特点

## 热边界条件



## 均匀热流



## 均匀壁温

对于湍流，除液态金属外，两种热边界条件的差别可以忽略

对于层流以及低Pr数介质，两种热边界条件下换热系数差别明显





## 管槽内强制对流流动和换热的特点

流体的平均温度以及流体与壁面的平均温差

管槽内强制对流  
换热计算



计算**物性的定性温度**一般采用流体截面  
平均温度（或进出口截面平均温度）

$$t_f = \frac{\int c_p \rho t u dA}{\int c_p \rho u dA}$$



计算**流体与一长通道  
表面间的对流换热量**  
 $\Phi = hA\Delta T_m$   
需确定平均温差



均匀热流

$$\Delta T_m = T_s - T_m$$



均匀壁温

$$\Delta T_m = \frac{T_e - T_i}{\ln \left( \frac{T_s - T_i}{T_s - T_e} \right)}$$

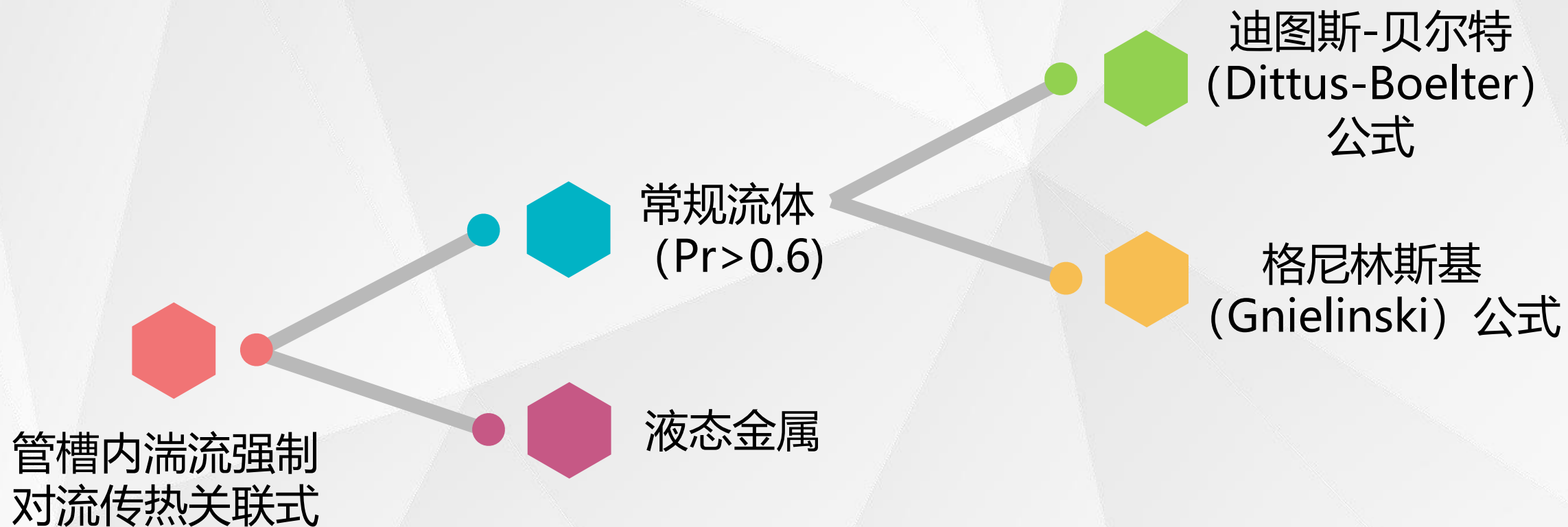
# 03

## 管内湍流强制对流 传热关联式

- 迪图斯-贝尔特 (Dittus-Boelter) 公式
- 格尼林斯基 (Gnielinski) 公式
- 关联式修正
- 液态金属的关联式



## 管槽内湍流强制对流传热关联式





## 迪图斯-贝尔特 (Dittus-Boelter) 公式

历史上应用最普遍的关联式:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n$$

$n=0.4$ , 加热流体

$n=0.3$ , 冷却流体

适用范围:

$l/d \geq 10$  的光滑管  
湍流流动充分发  
展段

$Re_f = 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$   
 $Pr_f = 0.7 \sim 120$

不适用于  $Pr$  数很小的  
液态金属

1

2

3

4

5

流体与壁面具有  
以下温差:  
气体  $\leq 50^\circ\text{C}$ ,  
水  $\leq 20 \sim 30^\circ\text{C}$ ,  
油  $\leq 10^\circ\text{C}$

对于均匀壁  
温和均匀热  
流热边界条  
件均适用





## 格尼林斯基 (Gnielinski) 公式

迄今为止计算准确度最高的关联式:

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

$f$  为管内湍流流动的Darcy阻力系数:

$$f = (1.8 \lg Re - 1.5)^{-2}$$

适用范围: 光滑管道湍流流动过渡区与充分发展段

1

2

$$Re_f = 2300 \sim 10^6$$

$$Pr_f = 0.6 \sim 10^5$$



## 管槽内湍流强制对流传热关联式

注意事项:

迪图斯-  
贝尔特  
(Dittus-  
Boelter)  
公式

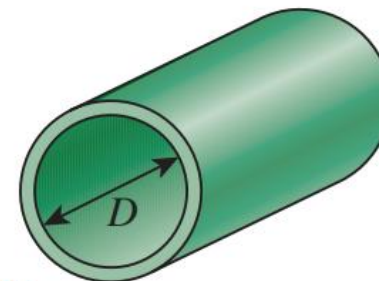
1. 定性温度取为进出口流体平均温度的算术平均值
2. 特征流速为管内平均流速; 特征长度为管内径
3. 非圆截面管, 特征长度取当量直径

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

( $A_c$ 为截面积,  
 $P$ 为周长)

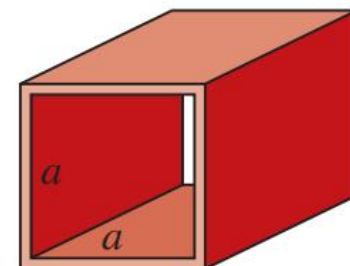
格尼林斯基  
(Gnielinski)  
公式

Circular tube:



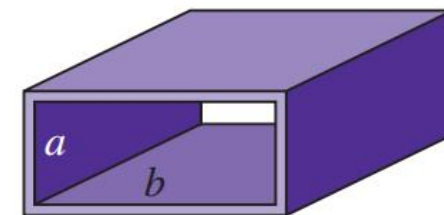
$$D_h = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D$$

Square duct:



$$D_h = \frac{4a^2}{4a} = a$$

Rectangular duct:



$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

## 关联式修正

变物性影响的修正

$C_t$

入口段的修正

$C_l$

螺旋管中的  
湍流换热  
修正  $C_r$

修正后的迪图斯-贝尔特公式:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n C_t C_l C_r$$

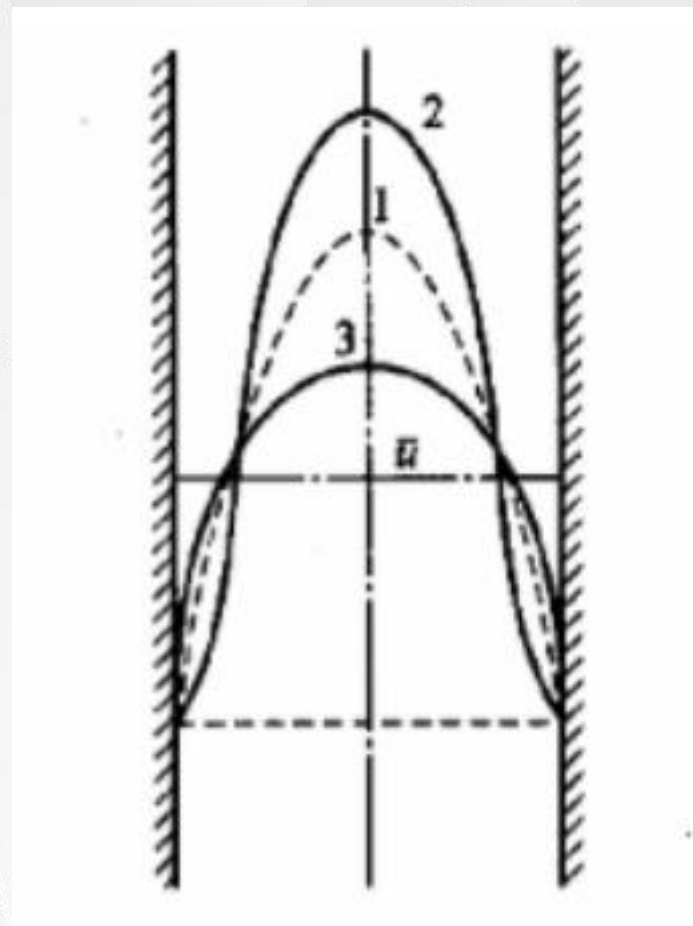
修正后的格尼林斯基公式:

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

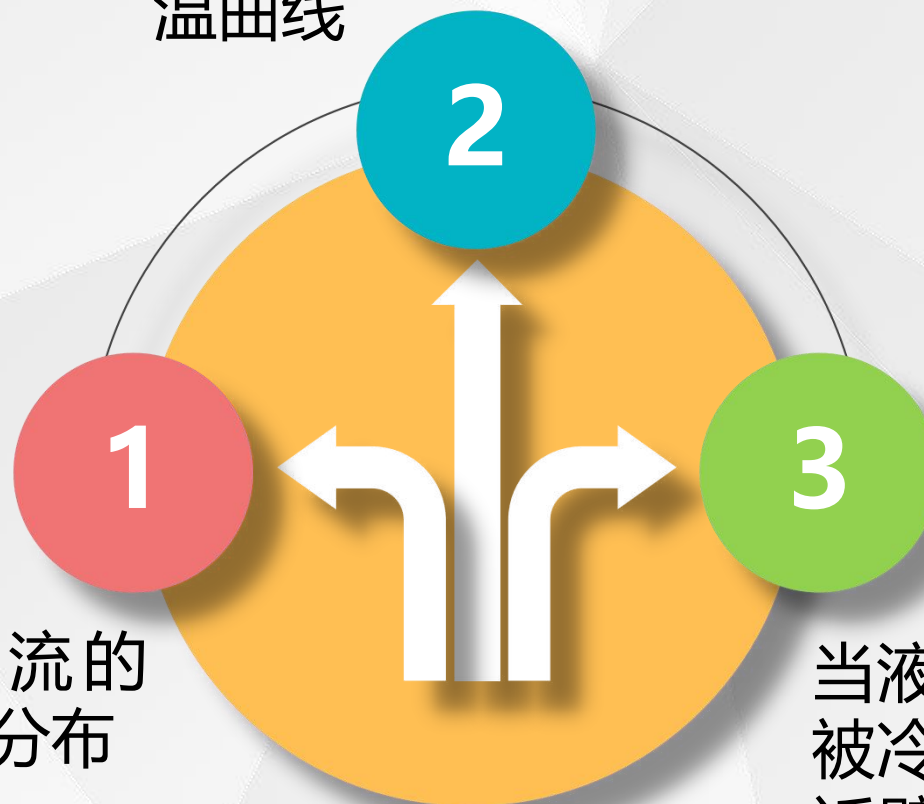


## 关联式修正

### 1. 变物性影响的修正



当液体被冷却或者气体被加热时，黏度升高，近壁处速度分布低于等温曲线



等温流的速度分布

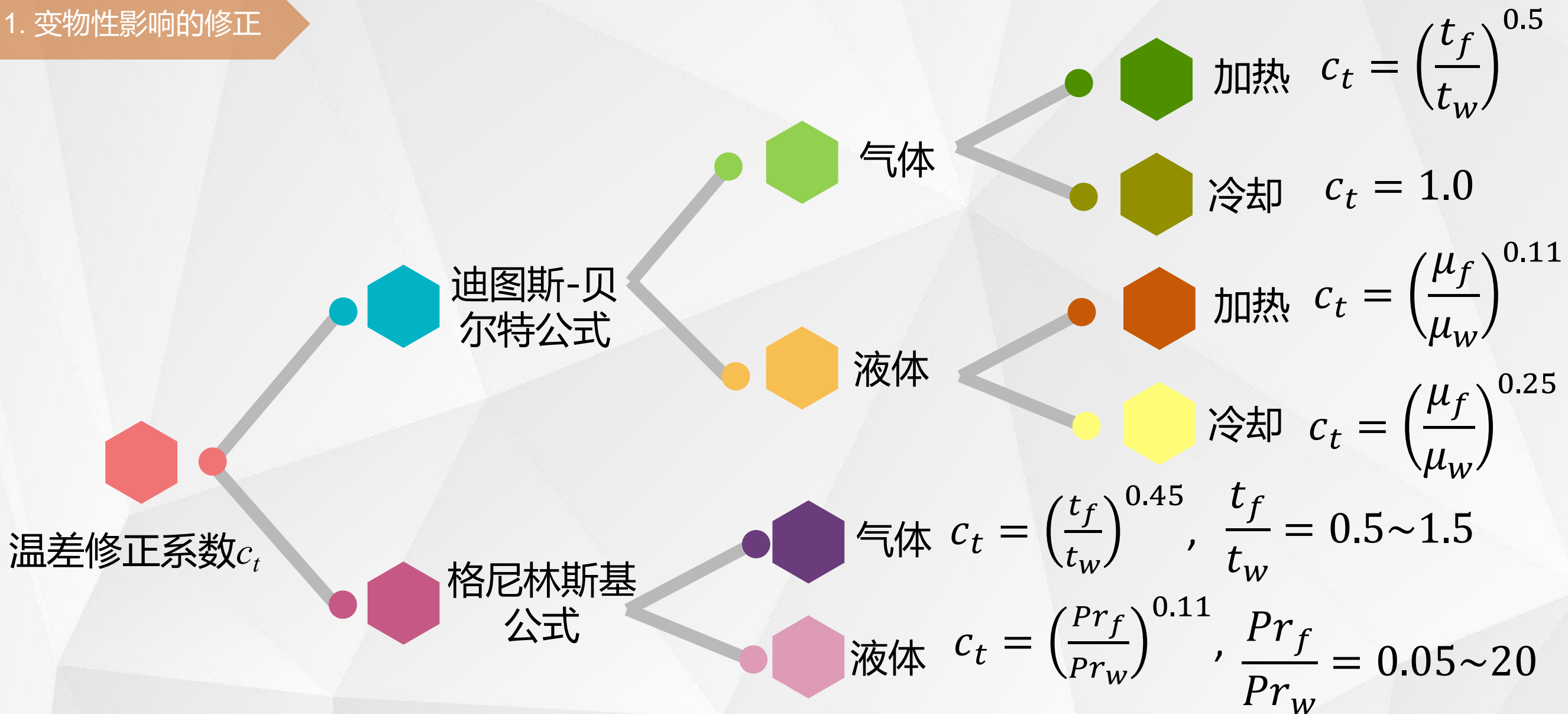
当液体被加热或者气体被冷却时，黏度降低，近壁处速度分布高于等温曲线





## 关联式修正

### 1. 变物性影响的修正

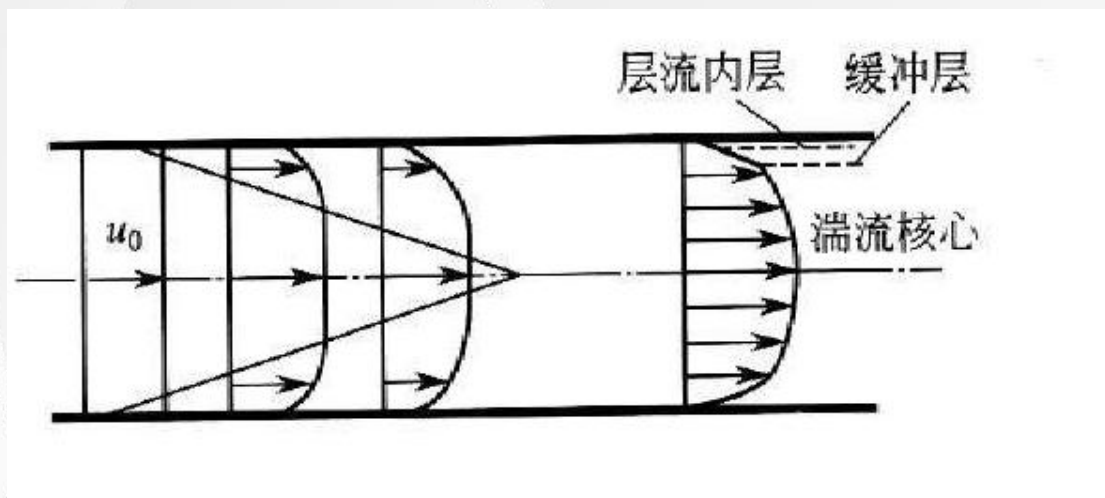




## 关联式修正

### 2. 入口段的修正

$l/d < 10$  的光滑管道入口段，由于热边界层薄，表面传热系数增加



入口段修正系数  $c_l = 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0.7}$

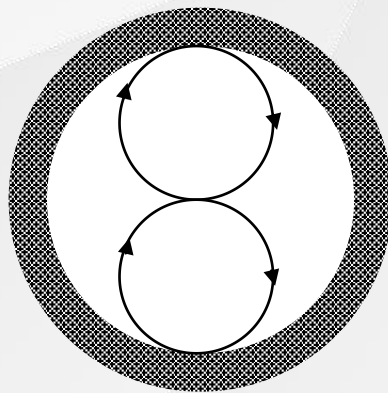
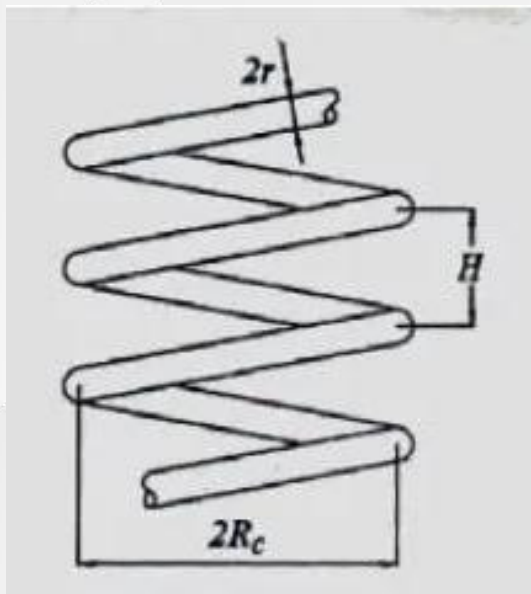


## 关联式修正

### 3. 螺旋管中的湍流换热修正



工程中常采用的螺旋管因其在横截面上可以引起二次环流而起到强化传热的作用而被广泛应用



二次环流指的是垂直于主流方向的环状流动

螺旋管修正系数  $c_r$

气体  $c_r = 1 + 1.77 \frac{d}{R}$

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



## 液态金属的关联式

对于Pr数很小的液体金属 ( $Pr=3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$ )，由于速度边界层与热边界层的相互关系与常规流体不同，换热也具有不同的规律。



均匀热流边界条件  $Nu_f = 4.82 + 0.0185 Pe_f^{0.8}$

$$Pe_f = 100 \sim 10000$$



均匀壁温边界条件  $Nu_f = 5.0 + 0.025 Pe_f^{0.8}$

$$Pe_f > 100$$





## 管槽内湍流强制对流传热关联式

例题1：水以1.2m/s的平均流速流过内径为20mm的长直管。

(1) 管子壁温为75°C，水从20°C加热到70°C；

(2) 管子壁温为15°C，水从70°C加热到20°C。

试计算两种情形下的表面传热系数，并讨论造成差别的原因。

75°C时水的物性参数： $\lambda=0.667\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\nu=0.398\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ， $Pr=2.375$ ；

20°C时水的物性参数： $\lambda=0.598\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\nu=1.003\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ， $Pr=7.004$ ；

70°C时水的物性参数： $\lambda=0.663\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\nu=0.413\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ， $Pr=2.550$ ；

15°C时水的物性参数： $\lambda=0.590\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\nu=1.177\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ， $Pr=8.524$ ；

45°C时水的物性参数： $\lambda=0.642\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\nu=0.675\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ， $Pr=3.952$ 。



## 管槽内湍流强制对流传热关联式

例题2：经过加热的2大气压， $200^{\circ}\text{C}$ 的空气以 $10\text{m/s}$ 的速度流过直径为 $2.54\text{cm}$ 的管子。在管壁上保持均匀热流边界条件，且整个管子的壁温比空气高 $20^{\circ}\text{C}$ 。试计算每单位长度管子的热流量。

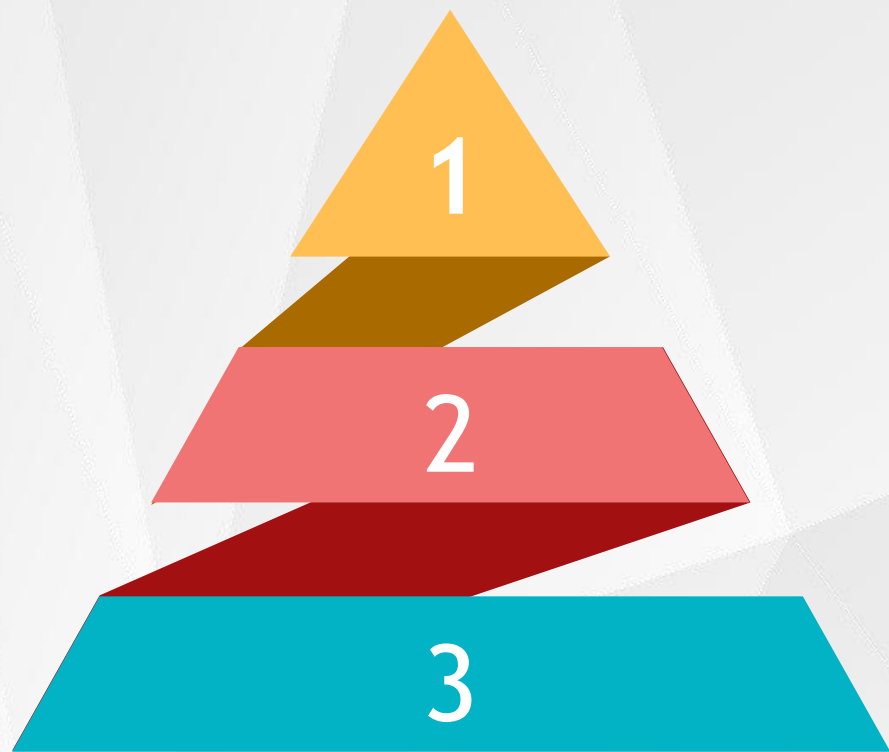
# 04

## 管槽内层流强制对流传热关联式

- 管内层流对流换热特点
- 齐德-泰特 (Sieder-Tate) 公式



## 管内层流对流换热特点



对于同一截面形状的通道，  
均匀热流条件下的Nu数 > 均匀壁温条件下的Nu数

等截面通道层流充分发展时的Nu数与Re数无关

即使用当量直径做特征长度，不同截面管道层流发展的Nu数也不相等



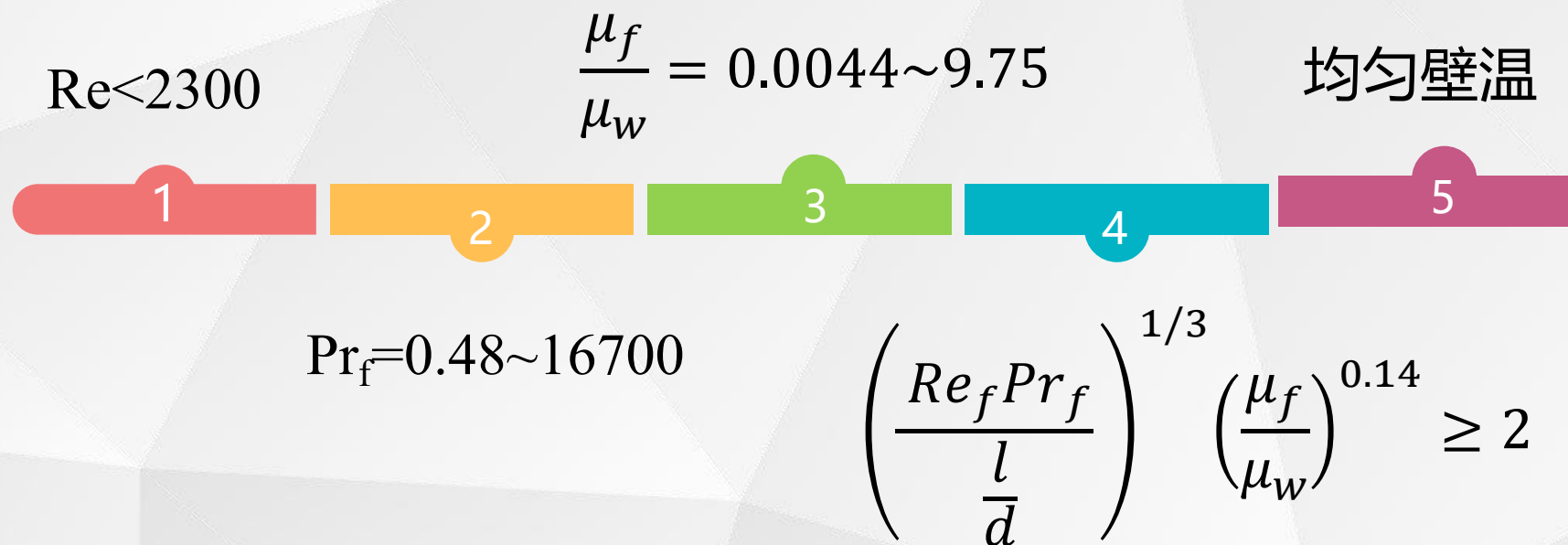


## 齐德-泰特 (Sieder-Tate) 公式

实际工程中，层流时的传热常常处于入口段的范围。对于这种情形，一般采用齐德-泰特公式进行计算：

$$Nu = 1.86 \left( \frac{Re_f Pr_f}{l \bar{d}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

适用范围：





## 管槽内湍流强制对流传热关联式

例题3：温度为60°C的水以2cm/s的平均速度流入直径为2.54cm的圆管，管长为3m，壁温恒定在80°C，试计算该情形下的表面对流传热系数。

60°C时水的物性参数如下： $\rho=985\text{kg/m}^3$ ， $c_p=4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\lambda=0.651\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ， $\mu=4.71\times 10^{-4}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ， $Pr=3.02$ 。

80°C时水的 $\mu=3.55\times 10^{-4}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 。

05

## 管内强制对流传热的强化

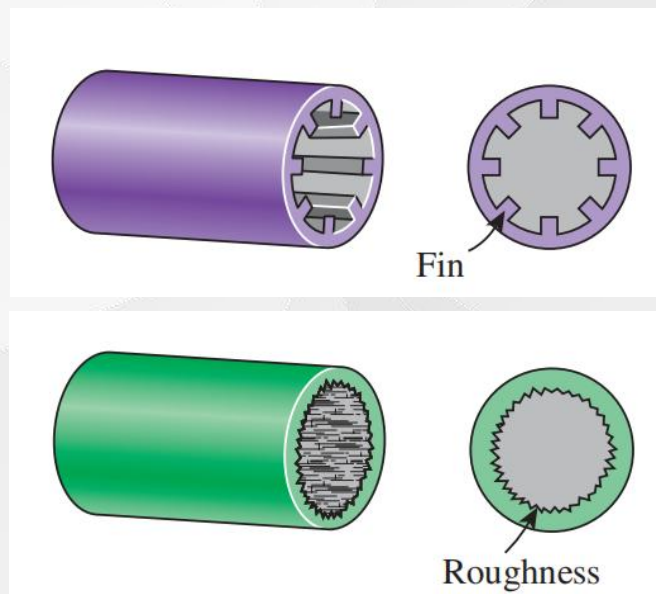


## 管内强制对流传热的强化

1 增加内壁粗糙度，内肋管，内螺纹管

2 使用弯管、扭曲管

3 增加流速







## 预习小测验答案

1.(多选题, 1分)

以下关于管内流体流动描述正确的是?

- A. 管内流体流动状态的分界点是以管道直径为特征长度的雷诺数, 称为临界雷诺数
- B. 管内流体流动雷诺数大于10000为完全湍流
- C. 管内流体流动的临界雷诺数是  $5 \times 10^5$
- D. 从进口到充分发展段之间的区域称为入口段

答案: ABD

2.(多选题, 1分)

对于管内强制对流传热的描述错误的是?

- A. 轴向与周向热流密度均匀的热边界条件叫做均匀热流
- B. 迪图斯-贝尔特公式是历史上应用时间最长也最普遍的关联式, 因此无需修正
- C. 层流时的传热常常处于入口段的范围, 一般采用格林尼斯基公式进行计算
- D. 轴向与周向壁温均匀的热边界条件叫做均匀壁温

答案: BC

3.(多选题, 1分)

以下可以实现管内强制对流传热的强化的措施是?

- A. 增加管道内壁粗糙度
- B. 使用直长管
- C. 使用弯管
- D. 降低流速

答案: AC

作业：《传热学》 P277 6-6