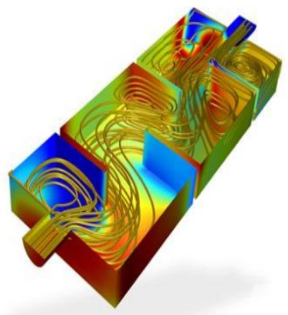


传热学

对流传热V

授课老师：苗雨

目录
CONTENTS

01

课前回顾及导引

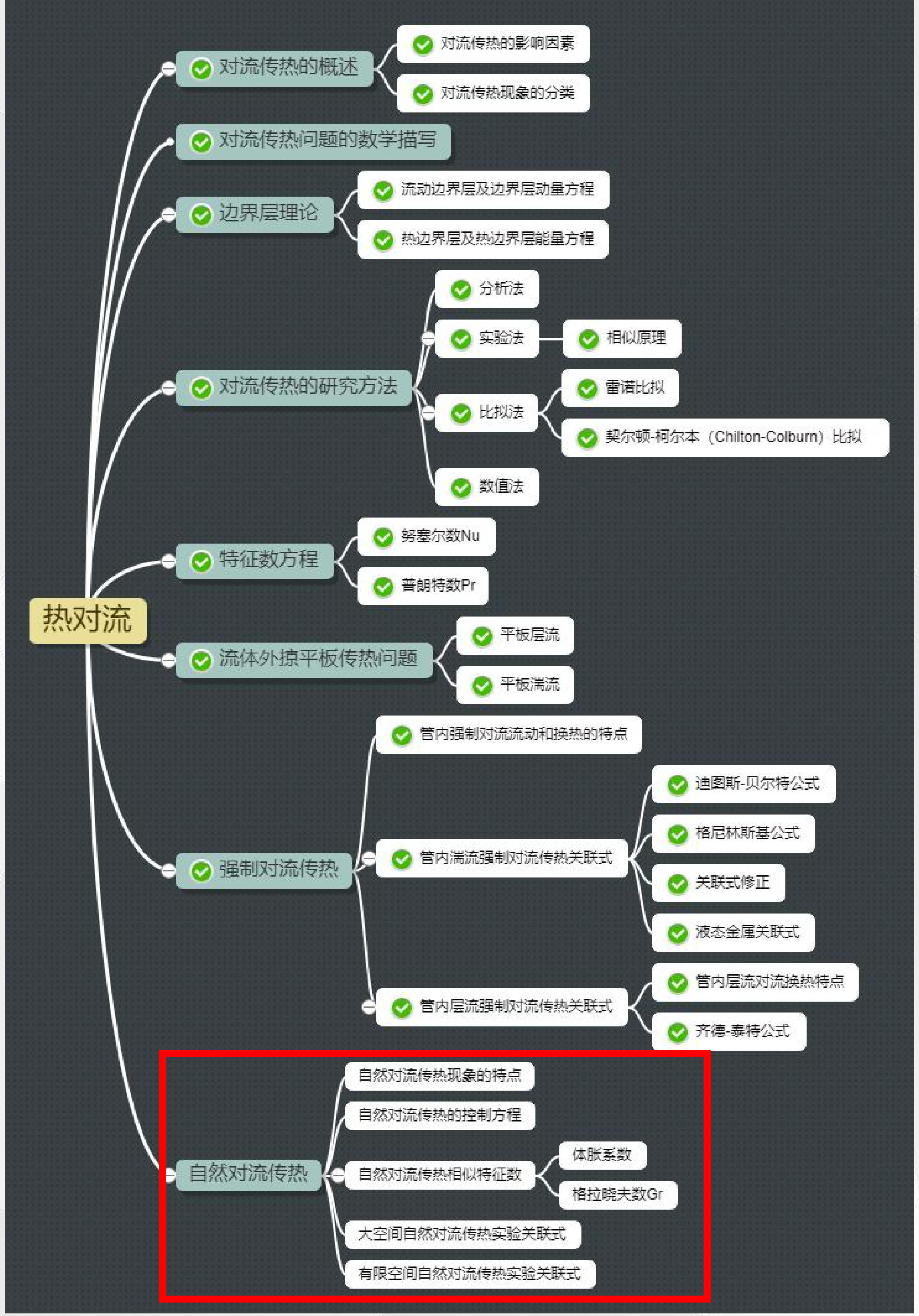
课前回顾及导引

1. 管内流动的临界雷诺数? Re_c=2300

2. 迪图斯-贝特尔公式表达式? $Nu_f = 0.023Re_f^{0.8}Pr_f^n$

3. 在迪图斯-贝特尔公式中，n的取值范围? n=0.4, 加热流体；n=0.3, 冷却流体

课前回顾及导引



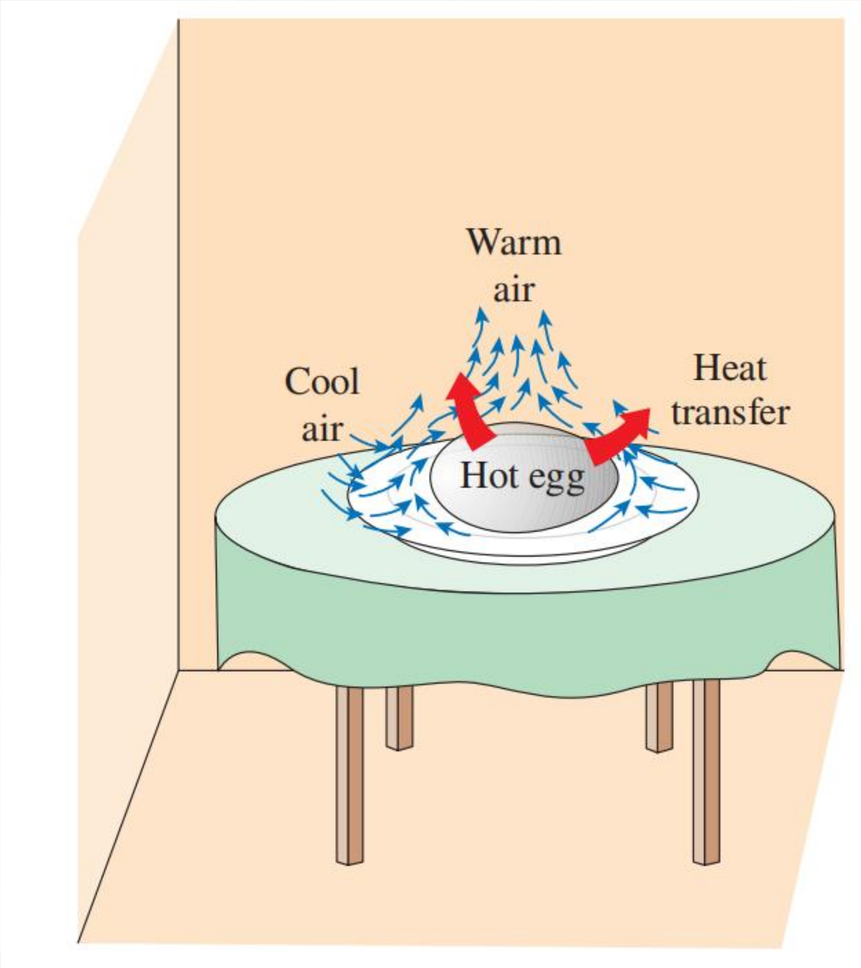
热对流
对流传热的概述
对流传热的影响因素
对流传热现象的分类
对流传热问题的数学描写
边界层理论
流动边界层及边界层动量方程
热边界层及热边界层能量方程
对流传热的研究方法
分析法
实验法
相似原理
比拟法
雷诺比拟
契尔顿-柯尔本（Chilton-Colburn）比拟
数值法
特征数方程
努塞尔数Nu
普朗特数Pr
流体外掠平板传热问题
平板层流
平板湍流
强制对流传热
管内强制对流流动和换热的特点
管内湍流强制对流传热关联式
迪图斯-贝尔特公式
格尼林斯基公式
关联式修正
液态金属关联式
管内层流强制对流传热关联式
管内层流对流换热特点
齐德-泰特公式
自然对流传热
自然对流传热现象的特点
自然对流传热的控制方程
自然对流传热相似特征数
体胀系数
格拉晓夫数Gr
大空间自然对流传热实验关联式
有限空间自然对流传热实验关联式

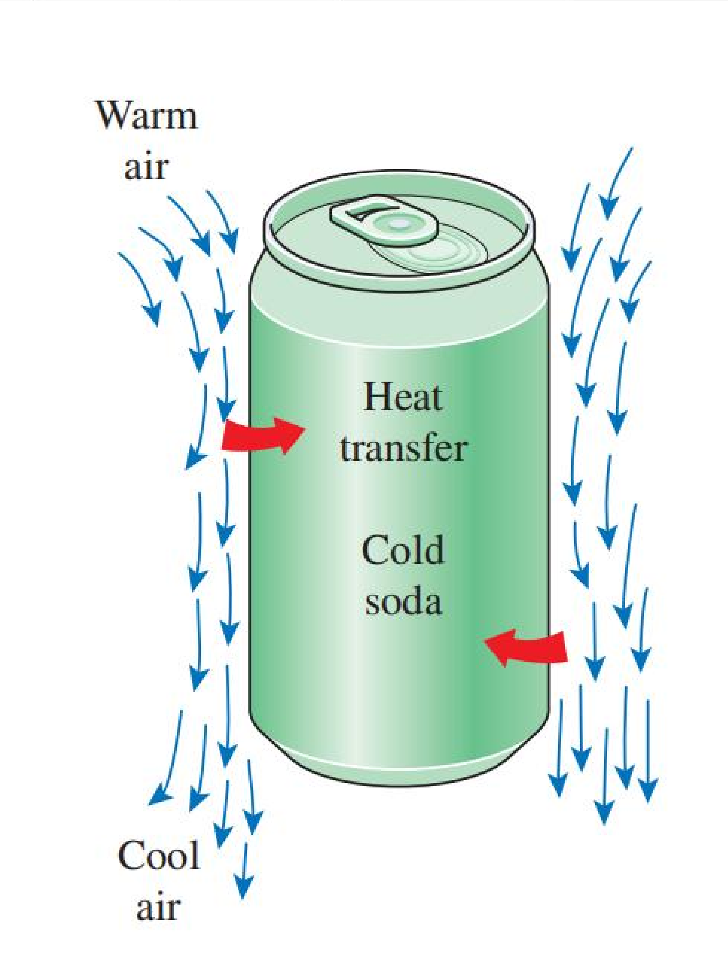
02

自然对流传热现象的特点

- 边界层上的速度与温度分布
- 自然对流的层流与湍流

自然对流传热现象的特点





不依靠泵或风机等外力推动，由流体自身温度场的不均匀所引起的流动称为自然对流

自然对流传热现象的特点

01

自然对流的流动和传热不需要外界动力源

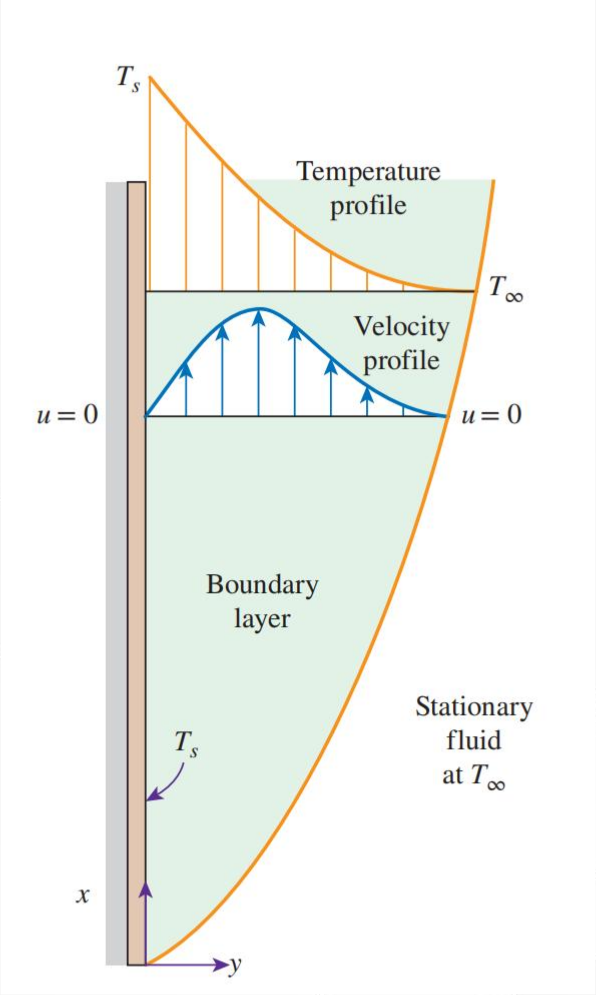
其热流密度在各种对流换热方式中最低

02

换热的驱动力是温差，但是有温差不一定存在自然对流

03

不均匀的温度场和速度场发生于近壁薄层，速度分布两头小、中间大



03

自然对流传热的控制方程与相似特征数

- 自然对流传热的控制方程
- 体胀系数和格拉晓夫数（Gr）

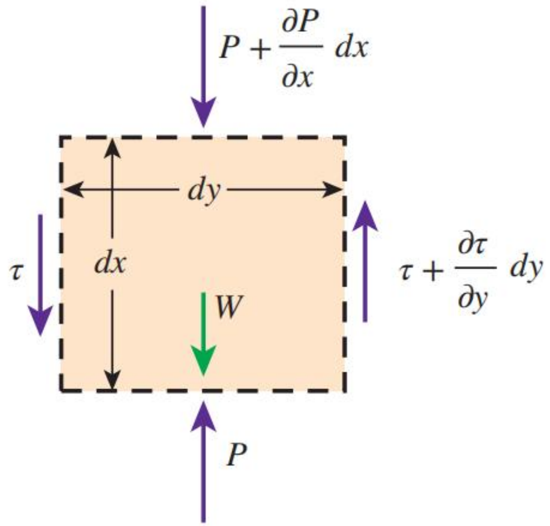
自然对流传热的控制方程

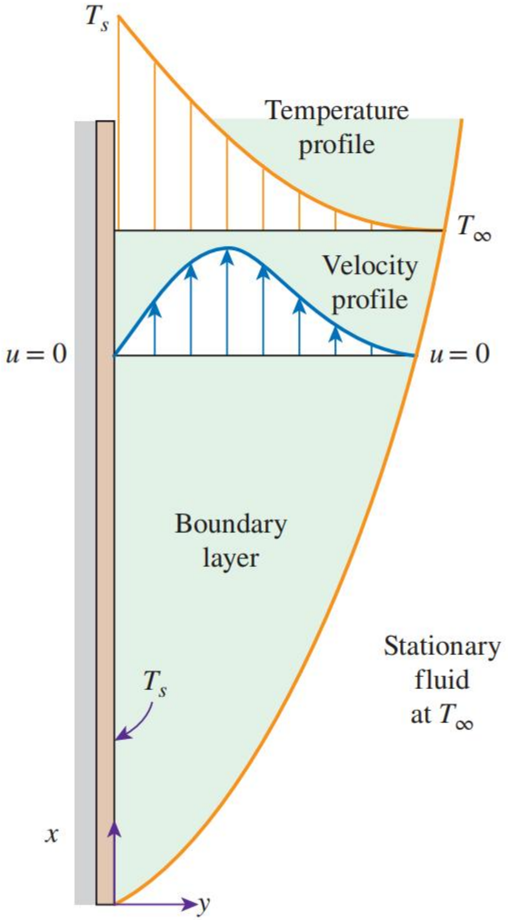
对流动量微分方程 $$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-\rho g-\frac{dP}{dx}$$

在薄层外，$u=v=0$ $$\frac{dP_\infty}{dx}=-\rho_\infty g$$

$$\left.\begin{aligned}&\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=(\rho_\infty-\rho)g+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\\&\alpha_V\approx-\frac{1}{\rho}\frac{\rho_\infty-\rho}{t_\infty-t}\end{aligned}\right\}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=g\alpha_V(t-t_\infty)+v\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$





自然对流传热的控制方程与相似特征数

$$\boxed{Re^2\left(u^*\frac{\partial u^*}{\partial x^*}+v^*\frac{\partial u^*}{\partial y^*}\right)=Gr\Theta^*+\frac{\partial^2 u^*}{\partial {y^*}^2}Re}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=g\alpha_V(t-t_\infty)+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

无量纲化

$$\frac{u_0^2}{l_c}\left[\left(\frac{u}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{x}{l_c}\right)}+\left(\frac{v}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)}\right]=g\alpha_V(t_w-t_\infty)\frac{t-t_\infty}{t_w-t_\infty}+\nu\frac{u_0}{l_c^2}\frac{\partial^2\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)^2}$$

两边除以 $\frac{\nu u_0}{l_c^2}$

$$\frac{u_0 l_c}{\nu}\left[\left(\frac{u}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{x}{l_c}\right)}+\left(\frac{v}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)}\right]=\frac{g\alpha_V(t_w-t_\infty)l_c^2}{\nu u_0}\frac{t-t_\infty}{t_w-t_\infty}+\frac{\partial^2\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)^2}$$

$$Gr=\frac{g\alpha_V(t_w-t_\infty)l_c^3}{\nu^2}$$

两边乘以 $\frac{u_0 l_c}{\nu}$

$$\left(\frac{u_0 l_c}{\nu}\right)^2\left[\left(\frac{u}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{x}{l_c}\right)}+\left(\frac{v}{u_0}\right)\frac{\partial\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)}\right]=\frac{g\alpha_V(t_w-t_\infty)l_c^2}{\nu \cancel{u_0}}\frac{\cancel{u_0} l_c}{\nu}\frac{t-t_\infty}{t_w-t_\infty}+\frac{\partial^2\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\partial\left(\frac{y}{l_c}\right)^2}\frac{u_0 l_c}{\nu}$$

体胀系数和格拉晓夫数（Gr）

$$浮升力 = (\rho_\infty - \rho)g$$

格拉晓夫数Gr：流体上的浮升力与黏滞力的比率，Gr数增大表明浮升力作用相对增大

$$Gr = \frac{g\alpha_V \Delta t l^3}{\upsilon^2} \quad \alpha_V是体胀系数 \quad \alpha_V = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)_P \approx -\frac{1}{\rho}\frac{\rho_\infty - \rho}{t_\infty - t}$$

格拉晓夫数Gr在自然对流中的作用与雷诺数Re在强制对流现象中的作用相当

体胀系数α_V：物质在热胀冷缩效应作用之下，几何特性随着温度的变化而发生变化的规律性系数

瑞利数Ra：流体力学中的无量纲数，指自然对流和扩散热量、动量传递之比

$$Ra = GrPr = \frac{g\alpha_V \Delta t l^3}{\alpha\upsilon}$$

04

大空间和有限空间自然对流传热的实验关联式

- 大空间自然对流传热的实验关联式
- 有限空间自然对流传热的实验关联式

大空间和有限空间自然对流传热的实验关联式

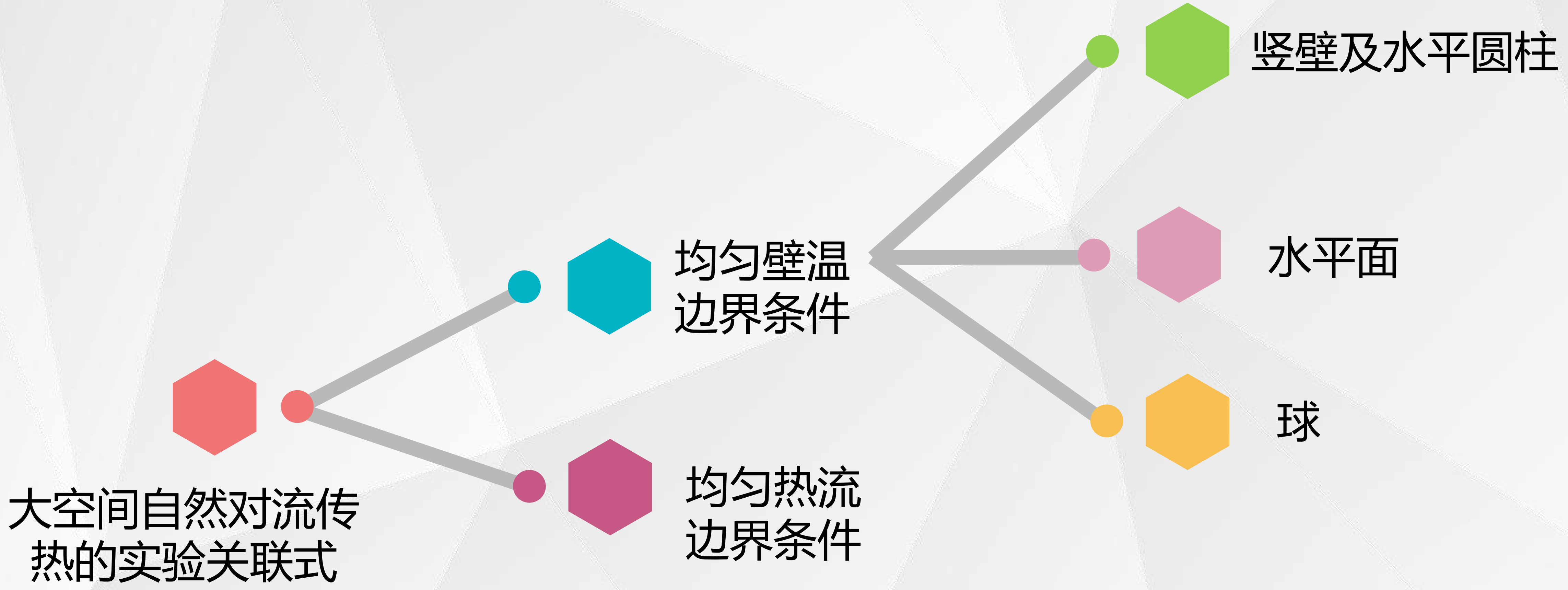
大空间自然对流，又称外部自然对流

指热边界层的发展不受到干扰或阻碍的自然对流，而不拘泥于几何上的很大或无限大。

有限空间自然对流，又称内部自然对流

指热边界层的发展受到干扰或流体的流动受到阻碍，使其换热规律有别于大空间的情形。

大空间自然对流传热的实验关联式



大空间自然对流传热的实验关联式

均匀壁温——竖壁及水平圆柱

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n$$

- 下角标m表示定性温度采用边界层的算术平均温度 $t_m = \dfrac{t_\infty + t_w}{2}$
- Gr数中的Δt为t_w与t_∞之差（$t_w - t_\infty$，流体被加热；$t_\infty - t_w$，流体被冷却）
- 对于理想气体，Gr数中的$\alpha_V = 1/t$
- 特征长度：

  竖壁和竖圆柱，取高度

  横圆柱，取外径
- 竖圆柱可按表中与竖壁用同一个关联式只限于

$$\frac{d}{H} \geq \frac{35}{Gr_H^{1/4}}$$

加热表面形状与位置	流态	C	n	Gr数适用范围
竖平板及竖圆柱	层流	0.59	1/4	$1.43\times10^4 \sim 3\times10^9$
	过渡区	0.0292	0.39	$3\times10^9 \sim 2\times10^{10}$
	湍流	0.11	1/3	$>2\times10^{10}$
横圆柱	层流	0.48	1/4	$1.43\times10^4 \sim 5.76\times10^8$
	过渡区	0.0165	0.42	$5.76\times10^8 \sim 4.65\times10^9$
	湍流	0.11	1/3	$>4.65\times10^9$

大空间自然对流传热的实验关联式

均匀壁温——水平面

热面向上

$$Nu = 0.54(GrPr)^{1/4}，\ 10^4 \le \mathrm{GrPr} \le 10^7$$

$$Nu = 0.15(GrPr)^{1/4}，\ 10^7 \le \mathrm{GrPr} \le 10^{11}$$

热面向下

$$Nu = 0.27(GrPr)^{1/4}，\ 10^5 \le \mathrm{GrPr} \le 10^{11}$$

均匀壁温——球

$$Nu = 2 + \frac{0.589(GrPr)^{1/4}}{\left[1 + (0.469/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}，\ Pr \ge 0.7，\ \mathrm{GrPr} \le 10^{11}$$

大空间自然对流传热的实验关联式

均匀热流

$$Nu = B(Gr^{*}Pr)^{m} \qquad Gr^{*} = GrNu = \frac{g\alpha_V q l^4}{\lambda v^2}$$

热面向上

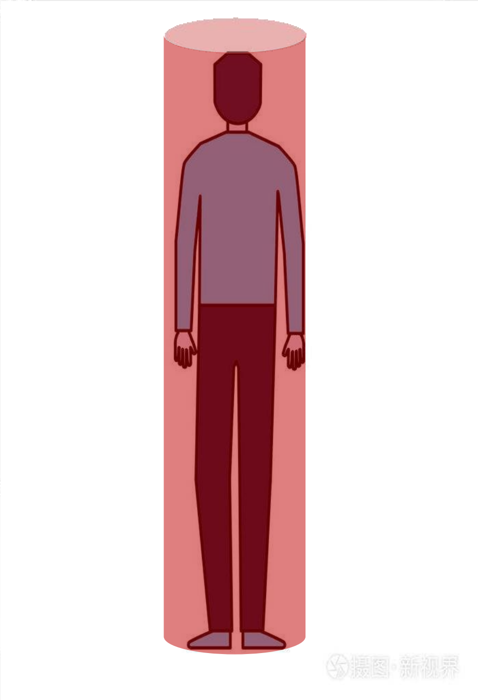
热面向下

定性温度取平均温度，特征长度对矩形取短边长

加热表面形状与位置	B	m	Gr*数适用范围
热面向上	1.076	1/6	6.37×10^{5}~1.12×10^{8}
热面向下	0.747	1/6	

大空间自然对流传热的实验关联式

例题1：假设把人体简化成为直径为30cm、高1.75m的等温竖圆柱，其表面温度比人体体内的正常温度低2℃，试计算该模型位于静止空气中时的自然对流散热量。圆柱两端面的散热可不予考虑，人体正常体温按37℃计算，环境温度为25℃。



大空间自然对流传热的实验关联式

例题2：试计算以下两种情况房间墙壁表面与室内空气间的自然对流传热量。设墙高2.5m。

（1）墙表面温度35℃，室内温度25℃；

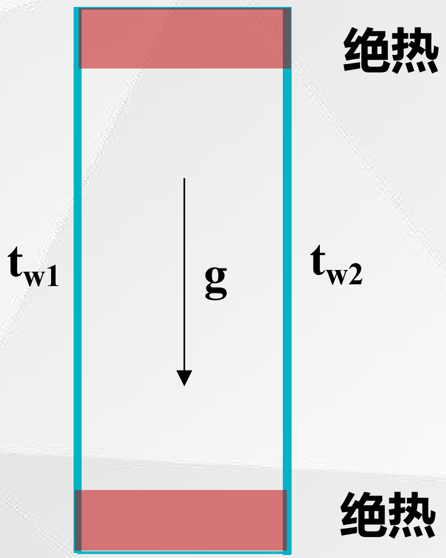
（2）墙表面温度10℃，室内温度20℃。

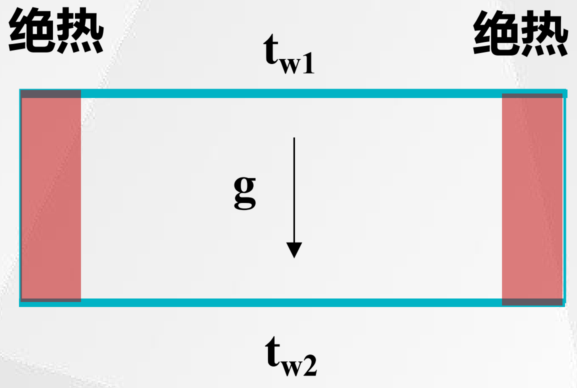
有限空间自然对流传热的实验关联式

夹层内的流动主要取决于以夹层厚度δ 为特征长度的Gr数

$$Gr_g = \frac{g\alpha_V(t_h - t_c)\delta^3}{\nu^2}$$

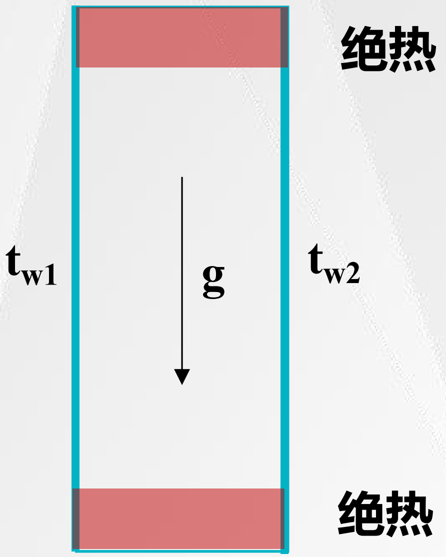
- 当竖直夹层，$Gr_g \le 2860$; 水平夹层，$Gr_g \le 2430$，夹层热量依靠导热
- 超过这个范围，夹层开始自然对流，并随着Gr_g的增大，对流越来越剧烈





有限空间自然对流传热的实验关联式

竖直夹层

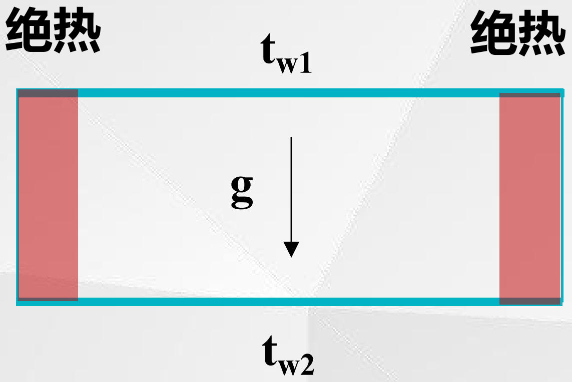


$$Nu = 0.197(Gr_\delta Pr)^{1/4}\left(\frac{H}{\delta}\right)^{-1/9},\ 6\times10^3 \le Gr_\delta \le 2\times10^5$$

$$Nu = 0.073(Gr_\delta Pr)^{1/3}\left(\frac{H}{\delta}\right)^{-1/9},\ 2\times10^5 \le Gr_\delta \le 1.1\times10^7$$

适用范围：$11 \le \frac{H}{\delta} \le 42$

水平夹层



$$Nu = 0.212(Gr_\delta Pr)^{1/4},\ 1.0\times10^4 \le Gr_\delta \le 4.6\times10^5$$

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

有限空间自然对流传热的实验关联式

例题3：一太阳能集热器吸热表面的平均温度为85℃，其上覆盖表面的温度为35℃，两表面形成相距5cm的夹层。试确定在每平方米夹层上空气自然对流的散热量。研究表明，当$Gr_{\delta}Pr \leq 1700$时不会产生自然对流而是纯导热工况。试确定不产生自然对流的两表面间隙的最大值，此时的散热量为多少（不包括辐射部分）？

预习小测验答案

1.(多选题，1分)
以下关于自然对流描述正确的是

A. 不依靠泵或风机等外力推动，由流体自身温度场的不均匀所引起的流动称为自然对流

B. 自然对流的热流密度在各种对流换热方式中最高

C. 换热的驱动力是温差，但是有温差不一定存在自然对流

D. 自然对流中，不均匀的温度场和速度场发生于近壁薄层，速度分布两头小、中间大

答案： ACD

2.(多选题，1分)
以下关于格拉晓夫数描述正确的是?

A. 格拉晓夫数Gr是流体上的浮升力与黏滞力的比率

B. 格拉晓夫数Gr在自然对流中的作用与雷诺数Re在强制对流现象中的作用不同

C. 格拉晓夫数Gr乘以普朗特数Pr等于瑞利数Ra

D. Gr数增大表明浮升力作用相对增大

答案： ACD

3.(多选题，1分)
以下关于大空间和有限空间自然对流传热描述正确的是?

A. 大空间自然对流，又称外部自然对流，指热边界层的发展不受到干扰或阻碍的自然对流，而不拘泥于几何上的很大或无限大。

B. 大空间自然对流问题均匀壁温情况特征长度的选取：对于竖壁和竖圆柱，取高度；对于横圆柱，取外径

C. 有限空间自然对流传热，夹层内的流动主要取决于以夹层厚度δ为特征长度的雷诺数

D. 有限空间自然对流，又称内部自然对流，指热边界层的发展受到干扰或流体的流动受到阻碍，使其换热规律有别于大空间的情形。

答案： ABD

有限空间自然对流传热的实验关联式

例题4：一太阳能集热器置于水平的房顶上。在集热器的吸热表面上用玻璃作顶盖，形成一封闭的空气夹层，夹层厚10cm。设吸热表面的平均温度为90℃，玻璃内表面温度为30℃，试确定由于夹层中空气自然对流散热而引起的热损失。集热器呈正方形，尺寸为1m×1m。又，如果吸热表面不设空气夹层，让吸热表面直接暴露于大气之中，试计算在表面温度为90℃时，由于空气的自然对流而引起的散热量（环境温度取为20℃）。