传递过程

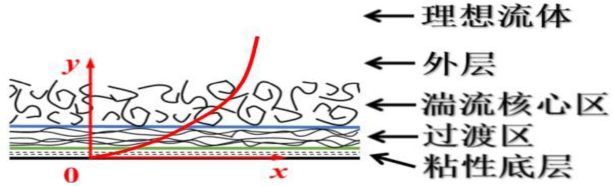
鲍　博　　副教授

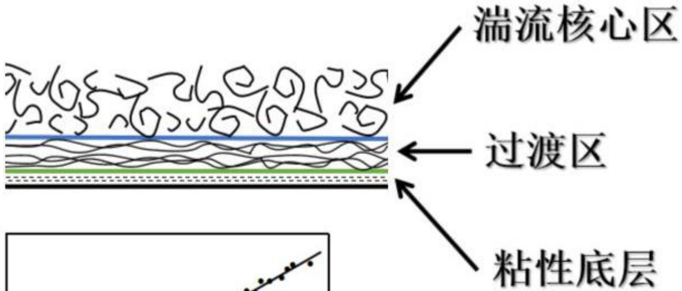
华东理工大学 化工学院

2022年秋季

2.4.3壁面湍流

2.4.3.1 湍流结构

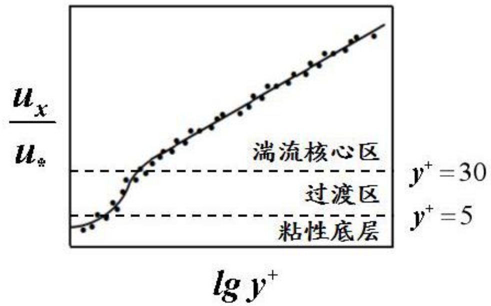




湍流核心区：雷诺应力远远大于粘性应力

过渡区：雷诺应力与粘性应力兼有

粘性底层：流体的粘性力起主导作用

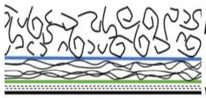


以下时均速度就用u_x表示

2.4.3.2 湍流速度分布

简化雷诺方程得：

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\tau_{yx}^{l}+\tau_{yx}^{t}\right)=0$$



积分：$\tau_{yx}^{l}+\tau_{yx}^{t}=C_1$

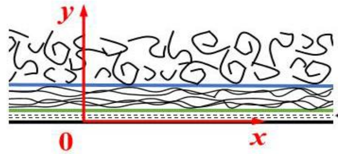
$\because y=0$，$\tau_{yx}^{l}\Big|_{y=0}=\tau_W$，$\tau_{yx}^{t}\Big|_{y=0}=0$ $\therefore C_1=\tau_W$

$$\tau_{yx}^{l}+\tau_{yx}^{t}=\tau_W$$

粘性底层区	过渡区	湍流核心区
$\tau_{yx}^{l}=\tau_W$	$\tau_{yx}^{l}+\tau_{yx}^{t}=\tau_W$	$\tau_{yx}^{t}=\tau_W$

粘性底层

$\tau_{yx}^{l}=\tau_W$ $\quad \tau_{yx}^{l}=\mu\frac{d\bar{u}_x}{dy}$



$$\mu\frac{d\bar{u}_x}{dy}=\tau_W$$

积分：$\bar{u}_x=\frac{\tau_W}{\mu}y+C_2$

$\because y=0$，$\bar{u}_x=0$ $\therefore C_2=0$

时均速度分布：

$$\bar{u}_x=\frac{\tau_W}{\mu}y$$

定义：$\tau_W=\rho u_*^2$ $\quad u_*$摩擦速度

$$\bar{u}_x=\frac{\rho u_*^2}{\mu}y=u_*\frac{u_* y}{\nu}$$

$$\frac{\bar{u}_x}{u_*}=\frac{u_* y}{\nu}$$

定义：$u^+=\frac{\bar{u}_x}{u_*}, y^+=\frac{u_* y}{\nu}$

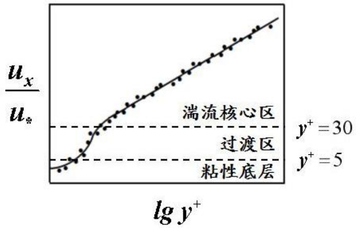
通用速度分布：$\boxed{u^+=y^+}$

u^+无量纲摩擦速度

y+无量纲摩擦距离

湍流核心区

$$\tau^{t}_{yx}=\tau_W \qquad \tau^{t}_{yx}=\rho l^2\left|\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right|\frac{d\bar{u}_x}{dy}$$



普朗特假定：$l=ky$　其中：k 实验测定系数。

$$\rho k^2 y^2\left(\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)^2=\tau_W \qquad \frac{du^+}{dy^+}=\frac{1}{ky^+}$$

$$\frac{d\bar{u}_x}{dy}=\sqrt{\frac{\tau_W}{\rho}}\frac{1}{ky}=\frac{u_*}{ky}$$

积分：$u^+=\frac{1}{k}ln\,y^+ + C$

$$u^+=\frac{\bar{u}_x}{u_*},\ y^+=\frac{u_* y}{\nu}$$

尼古拉兹实验测定得：$\frac{1}{k}=2.5,\ C=5.5$

通用速度分布：$\boxed{u^+=2.5ln\,y^+ + 5.5}$

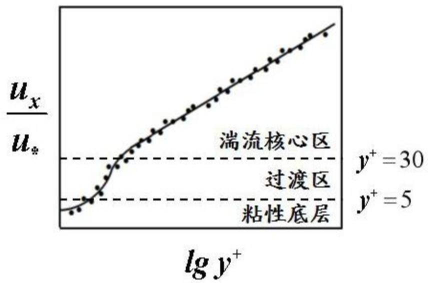
过渡区

$$\tau^{l}_{yx}+\tau^{t}_{yx}=\tau_W$$

类似湍流核心区规律，实验测定可得经验式：

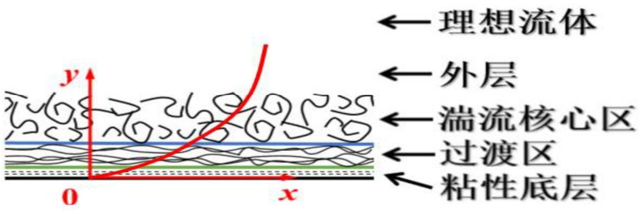
$$u^+=5.05ln\,y^+ - 3.05$$

湍流通用速度分布：（半理论半经验公式）



$$\begin{cases} y^+<5 & u^+=y^+ \\ 5<y^+<30 & u^+=5.05ln\,y^+ - 3.05 = 11.5lg\,y^+ - 3.05 \\ y^+>30 & u^+=2.5ln\,y^+ + 5.5 = 5.75lg\,y^+ + 5.5 \end{cases}$$

平板湍流与管内湍流均属壁面湍流



平板湍流边界层

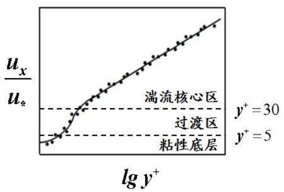
湍流1/7律速度分布

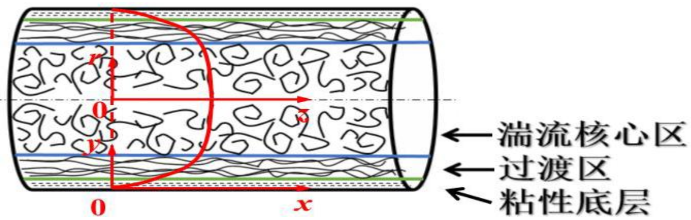
$$\frac{u_x}{U_0}=\left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$$

$$\frac{u_z}{u_{max}}=\left(1-\frac{r}{R}\right)^{1/7}$$

$$1.1\times10^5<Re<3.2\times10^6$$

管内湍流





湍流通用速度分布管内湍流同样适用

例2-9 管内流动截面上的速度

已知：U、D、ν

$$Re=\frac{UD}{\nu}$$

湍 → $f=0.079\,Re^{-\frac{1}{4}}$

层 → $u_x=2U\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$

$$\tau_w=\frac{1}{2}\rho U^2 f$$

$$u_*=\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$y^+=\frac{yu_*}{\nu}$$

（0,5］　$u^+=y^+$

（5,30］　$u^+=5.05\ln y^+-3.05$

（30,∞）　$u^+=2.5\ln y^++5.5$

$$u_x=u^+u_*$$

若水以平均流速0.21m/s，在直径为50mm的圆管中作湍流流动。已知：μ=1.005×10^{-3}Pa.s，ρ=1000kg/m^3

试求：U/u_{max}=?

解：$Re=\dfrac{\rho UD}{\mu}=10448>2100$ 　湍流

$f=0.079\ Re^{-1/4}=7.80\times10^{-3}$

$\tau_w=\dfrac{1}{2}\rho U^2 f=0.17\text{N/m}^2$

$u_*=\sqrt{\dfrac{\tau_w}{\rho}}=0.013\text{m/s}$

y=25mm，　$u_x=u_{max}$

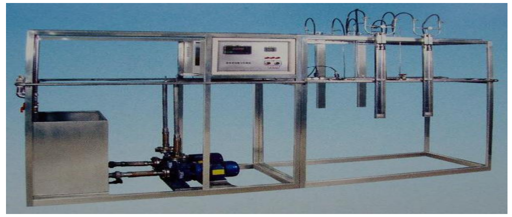
$y^+=\dfrac{yu_*}{\nu}=323>30$

$u^+=2.5\ln y^+ +5.5=19.94$

$u_x=u_{max}=u^+u_*=0.259\text{m/s}$

$U/u_{max}=0.21/0.259\approx0.81$

2.4.3.3 湍流阻力

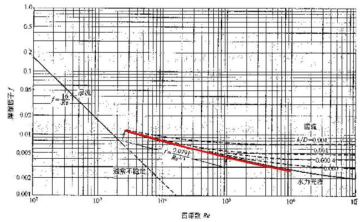


圆管阻力系数

布拉休斯公式

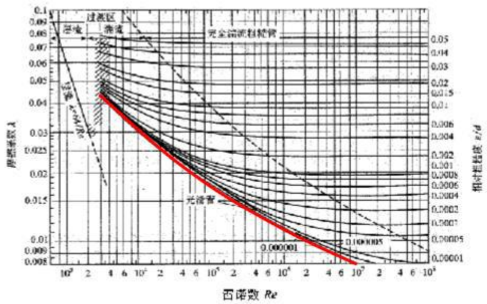
$f=0.079\,Re^{-\frac{1}{4}}$ 　　$4000<Re<10^6$

$$\boxed{\tau_W=f\frac{1}{2}\rho U^2}$$



$\lambda=0.3164Re^{-\frac{1}{4}}$ 　　$4000<Re<10^6$

$$\boxed{-\Delta p=\lambda\frac{L}{D}\frac{1}{2}\rho U^2}$$



对粗糙管 $\lambda=f\left(\dfrac{\rho DU}{\mu},\dfrac{h_s}{D}\right)$

平板湍流的壁面剪切应力

既然湍流通用速度分布可以共用，那么平板湍流的壁面剪切应力也可以借用圆管阻力系数求得。

圆管阻力系数 $f = 0.079\,Re^{-\frac{1}{4}}$

$$\tau_W = f\frac{1}{2}\rho U^2 = 0.079\left(\frac{\rho UD}{\mu}\right)^{-\frac{1}{4}}\frac{1}{2}\rho U^2$$

管内流动边界层厚度：$\delta = \frac{1}{2}D$

管内平均速度与管中心最大速度关系：$U \approx 0.81U_0$

$$\tau_w = 0.023\rho U_0^{\frac{7}{4}}\left(\frac{\nu}{\delta}\right)^{\frac{1}{4}}$$

平板湍流阻力就是利用此式求得

课后思考

1.油轮卸油，油品密度800kg/m³、粘度0.75cP，输油管道内径0.3m。若使流量达到3000m³/h，求长400m 管道的压降？