

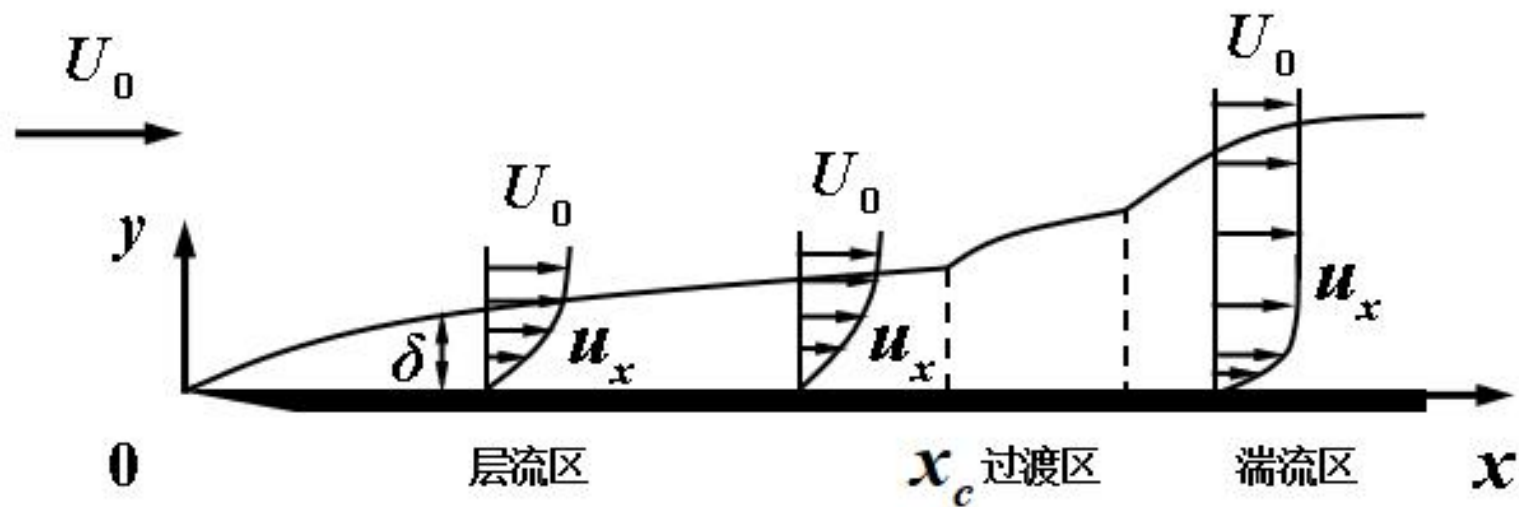
边界层现象

孙志仁

第七讲. 边界层现象

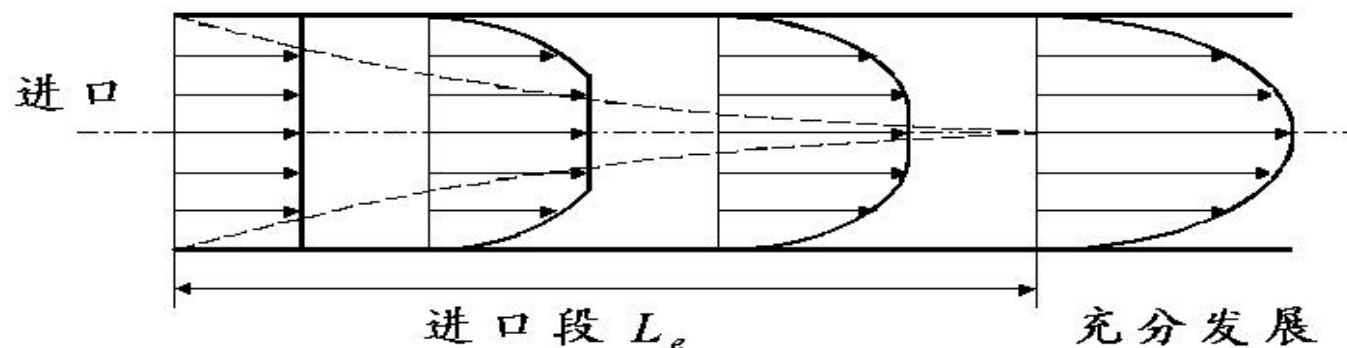
- 1. 平板边界层发展**
- 2. 圆管进口段**
- 3. 绕球边界层分离**
- 4. 管道内边界层分离**
- 5. 阻力机理与减阻**

1. 平板边界层发展



问题探讨 层流区对应层流状态？

2. 圆管进口段



进口段：沿流动方向 u_x 分布变化，中心速度加速，边界层厚度增加直至交汇。

管内流动状态与边界层发展的关系：



层流汇交，层流



湍流汇交，湍流

进口段长度估算



层流时:

$$\frac{L_e}{D} = 0.08 Re + 0.7$$

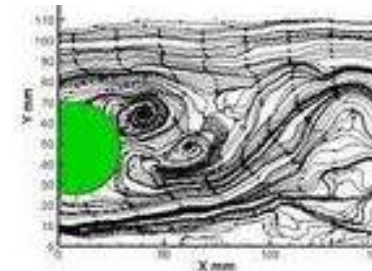
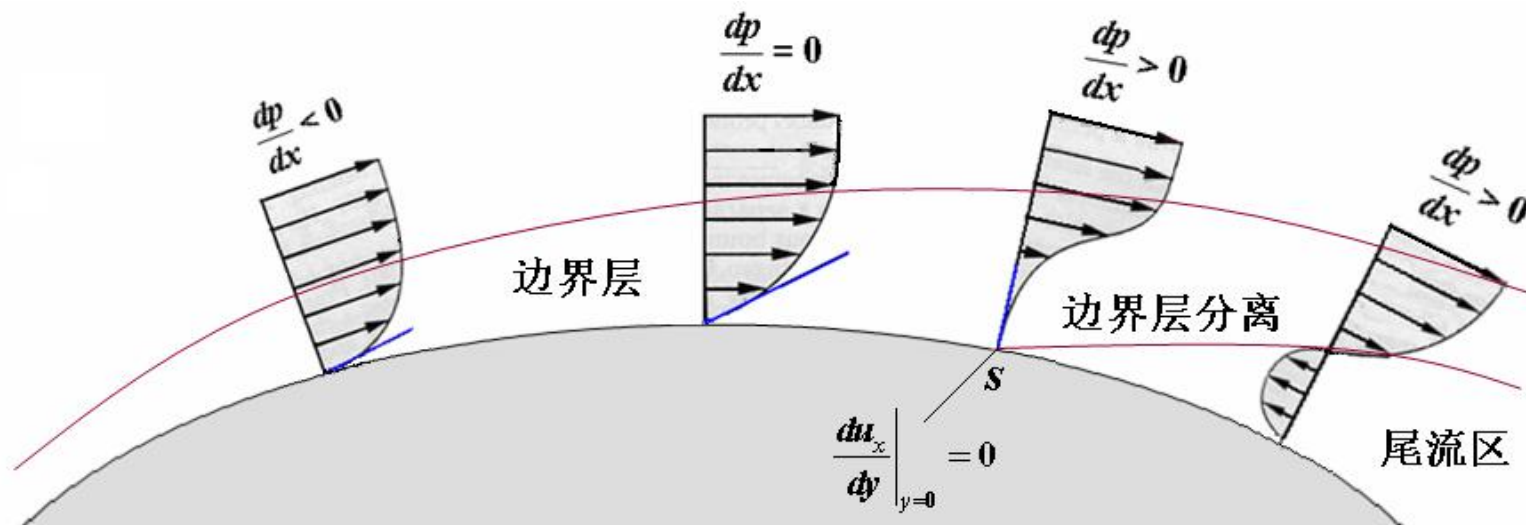
湍流时:

$$\frac{L_e}{D} = 1.4 Re^{\frac{1}{4}}$$

很低 Re 下:
$$\frac{L_e}{D} = \frac{0.072}{1 + 0.04 Re} + 0.061 Re$$

近似计算: 层流: $L_e \approx 100D$ 湍流: $L_e \approx 50D$

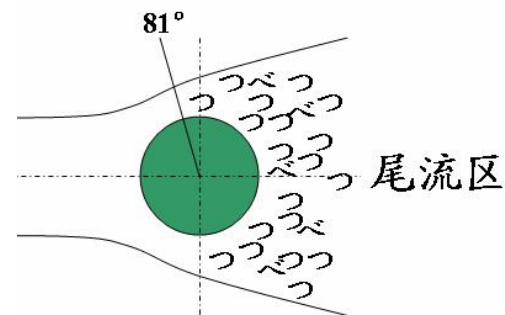
3. 绕球边界层分离



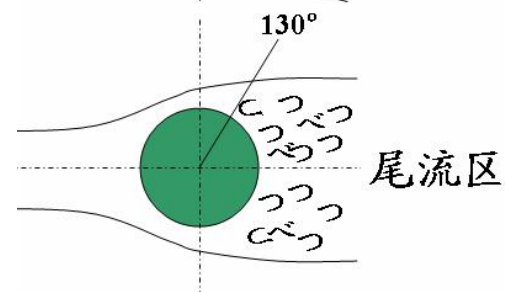
边界层分离条件

失速 $\frac{du_x}{dy} \Big|_{y=0} = 0$

层流边界层分离

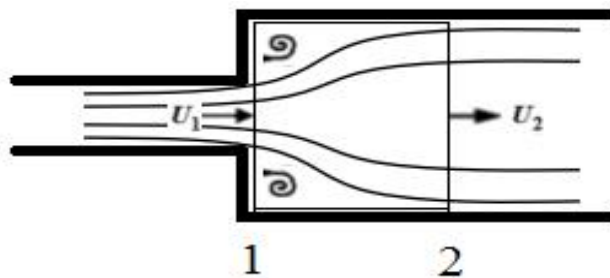


湍流边界层分离



4. 管道内边界层分离

突然扩张管道



动量守恒: $\Sigma \vec{F} = (W\vec{U})_2 - (W\vec{U})_1$

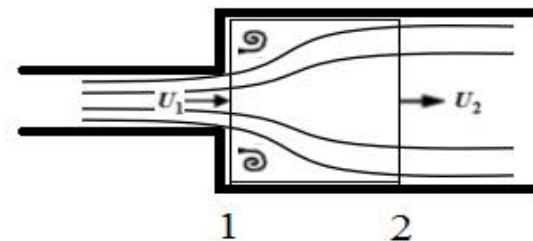
$$p_1 A_2 - p_2 A_2 = \rho U_2 A_2 U_2 - \rho U_1 A_1 U_1$$



$$p_1 - p_2 = \rho U_2^2 - \rho U_1^2 \frac{A_1}{A_2} \xrightarrow{U_2 = U_1 \frac{A_1}{A_2}} p_1 - p_2 = \rho U_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - \frac{A_1}{A_2} \right)$$

突然扩张管道水平放置，其机械能守恒由式：

$$\frac{1}{2}\rho U_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho U_2^2 + p_2 + h_f$$



$$h_f = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{1}{2}\rho U_1^2$$

定义局部阻力系数为：

$$\xi = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

等径管道, $A_1=A_2$, $\xi=0$;

管道出口, $A_2\rightarrow\infty$, $\xi=1$ 。

5. 阻力机理与减阻

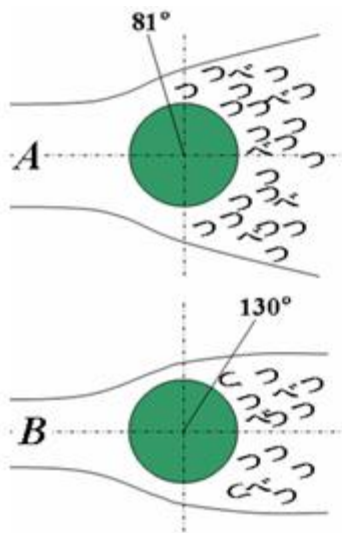
τ 摩擦阻力 D_F ; 与接触面有关。

ρ 压差（形体）阻力 D_p ; 与形状有关。

两者相对大小取决于：



形状



Re 数

总阻力：

$$D = D_F + D_p$$



粗糙度

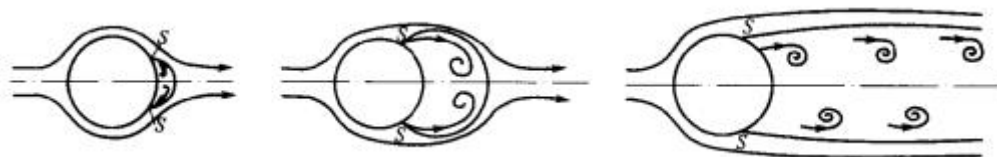
绕球流动阻力系数

①. 爬流区：无尾流。



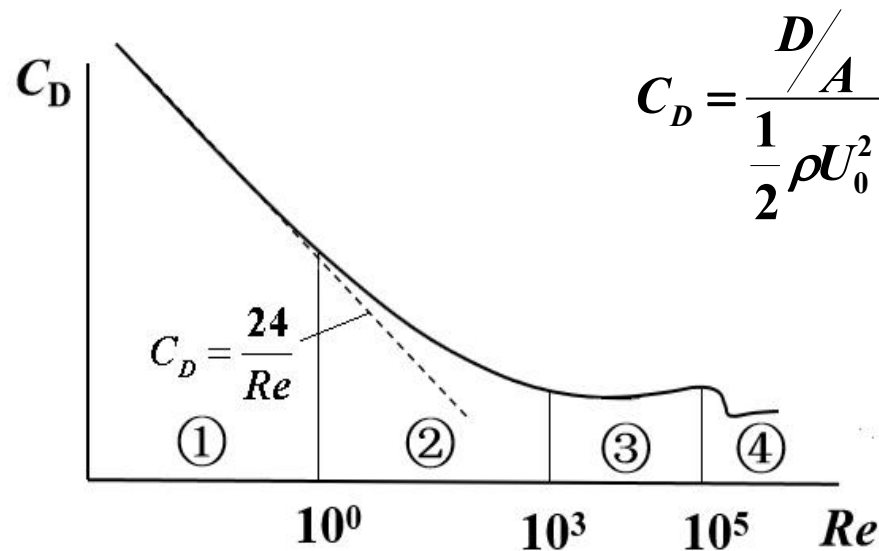
②. 卡门涡街区：

尾流从稳定变为不稳定。两侧交替，对称，有周期地释放旋涡。

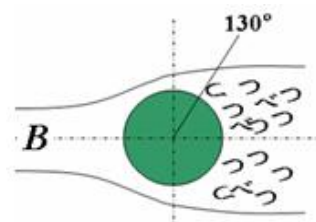
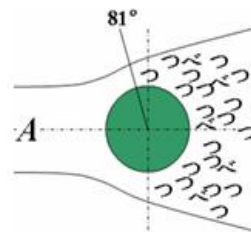


③. 阻力平方区：层流边界层分离， $Re \uparrow$ ， $D \uparrow$ 而 C_D 不变。

④. 阻力危机区：当 $Re \approx 3 \times 10^5$ 时，层流边界层转变为湍流边界层分离。尾流区大幅度减小，总阻力 $D \downarrow \downarrow$ ，因而使 $C_D \downarrow \downarrow$ 。



绕球流动



边界层与减阻

①. 流线型

②. 包橡胶膜

③. 吹喷技术

④. 加减阻剂

⑤. 人工湍流

⑥. 开缝导流



水中加5ppm的聚氧化乙烯，当 $Re=1 \times 10^5$ 时，
摩擦阻力系数可减小40%。

课后思考

1. 高尔夫球为什么是“麻子球”，而不是光滑球？
2. 流体流经图示弯管时的阻力称局部阻力,其形状与边界层分离有何关系？

