

9.4 圆管内流动的阻力损失

9.4.1 圆管阻力损失、阻力系数

讲伯努利方程时曾言：实际流动必有能量损失，有两种：

沿程损失：管道壁面摩擦引起的压降；

局部损失：流向的突变，弯头/突扩/突缩/三通等，局部的涡流引起能量耗散。 稍后...

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

$$h_f = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}$$

沿程阻力系数 λ (摩擦因数)

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{u_m^2}{2g} = \frac{\Delta p^*}{\rho g} = \frac{p_1^* - p_2^*}{\rho g} \quad \text{单位: 米}$$

管道沿程损失的 Darcy-Weisbach 公式
 Δp^* : 损失掉的总压

圆管层流 ($Re < 2300$): $\lambda = 64/Re$ 上上次课...

圆管湍流 ($Re \geq 2300$): λ 有前人实验得出的近似公式... 2

例9-2 (P200): 管内流动的压降(压力损失/阻力损失/阻力...)

$D=100\text{mm}$, $L=200\text{m}$, 平均流速分别是 $u_{m1}=0.5\text{m/s}$, $u_{m2}=3\text{m/s}$,

已知 $\mu=0.05\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\rho=900\text{kg/m}^3$, 求 $\Delta p=?$ (或 h_f)

解: ① $u_{m1}=0.5\text{m/s}$:

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{900 \times 0.5 \times 0.1}{0.05} = 900 < 2300$$

流动为层流状态, 故 $\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{900} = 0.0711$

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{u_m^2}{2} = 0.0711 \times \frac{200}{0.1} \times 900 \times \frac{0.5^2}{2} = 16.0 \times 10^3 \text{ (Pa)}$$

② $u_{m2}=3\text{m/s}$ 时: $Re = 900 \times 3/0.5 = 5400 > 4000$

属湍流流动且 $Re < 10^5$, 故

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4} = 0.3164 \times 5400^{-1/4} = 0.0369$$

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{u_m^2}{2} = 0.0369 \times \frac{200}{0.1} \times 900 \times \frac{3^2}{2} = 298.9 \times 10^3 \text{ (Pa)}$$

说明: ②是湍流, 因题目未给出表面粗糙度, 故按光滑管计算。 4

管道流动:
一个问题拿到手
往往先算雷诺数

9.4.2 光滑圆管湍流的 λ 【经验/实验公式】

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.884 \ln(Re \sqrt{\lambda}) - 0.91 \quad \xrightarrow{\text{实验修正}} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.873 \ln(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8$$

或 尼古拉兹公式: $10^5 < Re < 3 \times 10^6$: $\lambda = 0.0032 + 0.221/Re^{0.237}$

或 基于 Blasius 1/7 次方速度分布的公式: $Re < 10^5$: $\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$

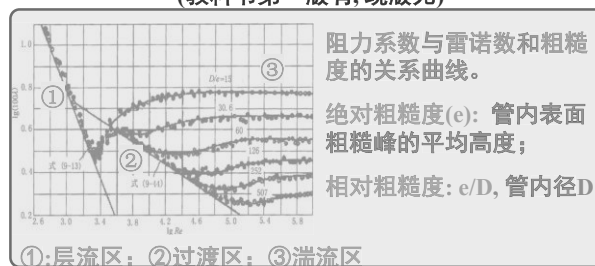
这些公式不必记, 查资料; 如果考试题目中须给出

9.4.3 粗糙圆管湍流的 λ : 有三种方法

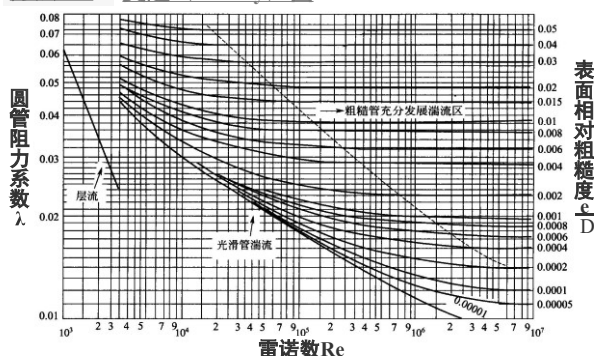
方法一:

尼古拉兹 (Nikuladse) 图: 用沙粒粘在圆管内表面做成粗糙管, 大量实验, 获得了粗糙圆管沿程阻力系数曲线。

(教科书第一版有, 现版无)



方法二: 莫迪 (Moody) 图



比尼古拉兹图甚至更有名、更简单实用

(λ 和 Re 仍采用对数坐标, 但直接标数值, 方便易查) 6

方法三: 实验公式

水力光滑管: $e < 5y^*$

粗糙峰全在粘性层内; λ 采用卡门-普朗特阻力系数公式

适用条件: $4000 < Re < 26.98(D/2e)^{8/7}$

过渡型圆管: $5y^* < e < 70y^*$

粗糙峰部分在粘性层内; 阻力系数 λ 采用 Colebrook 公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 0.87 \ln \left(\frac{e}{R} + \frac{18.7}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad \text{适用条件: } 26.98(D/2e)^{8/7} < Re < 4160(D/2e)^{0.85}$$

水力粗糙管: $e > 70y^*$

粗糙峰高于粘性底层, 阻力系数 λ 采用实验公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.884 \ln \frac{R}{e} + 1.68 \quad \text{经验} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.87 \ln \frac{R}{e} + 1.74 \quad \text{修正} \quad \text{适用条件: } Re > 4160(D/2e)^{0.85}$$

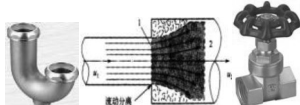
应用: 需结合管材、物性等参数/资料/图表, P201-202 例题, 7

9.4.4 局部阻力损失

弯头/三通/阀门/设备管口(突扩/突缩)等局部损失或压降通过局部阻力系数 ζ 计算:

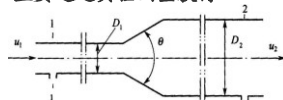
$$h_f = \zeta \frac{u_m^2}{2g}$$

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho u_m^2}{2}$$



局部损失系数 $\zeta=?$

主要通过实验测量获得



$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_{f1-2}$$

$$h_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - h_{f1-2}$$

建立了详细的技术资料供查阅,如《实用流体阻力手册》。

8

小结: 复杂管路损失计算的几种基本问题

- 1) 临界雷诺数、层流的沿程阻力系数
- 2) 非圆截面管: 湿周、当量水力直径
- 3) 并联管路、串联管路、混联管路...
- 4) 管道总阻力计算: 沿程阻力 + 各种局部阻力
- 5) 阻力损失基础上, 求管道中某些点的压强

解题秘诀:

- 1) 伯努利方程是出发点! 计算 Re 往往是第一步。
- 2) 沿程损失、局部损失的计算式必须烂于心!

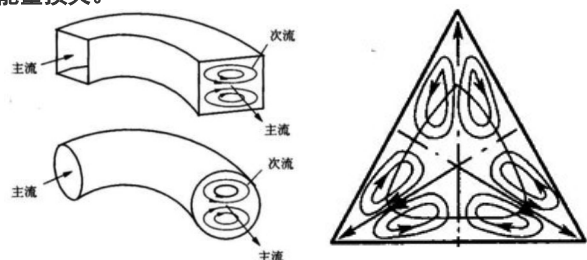
$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\bar{v}_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\bar{v}_2^2}{2g} + h_f$$

- 3) 损失的单位须搞清楚: 水头 h_f (m) (总) 压差 Δp^* (Pa)
换算关系: $\Delta p^* = \rho \times g \times h_f$

10

② 管道(通道)中的二次流、分离流

沿流道中心线的流动称主流(main flow); 与主流相垂直的截面内的流动称二次流(secondary flow), 它将导致流动能量损失。



第一类二次流
由流道转弯或系统旋转引起

第二类二次流
由湍流引起

12

【例9-6】水的泵送, P205

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $D = 200 \text{ mm}$ $e/D = 0.0003$

接头A: $r/D = 0.1$

弯头B&C: $R_w/D = 2$

$q_v = 150 \text{ L/s}$. 泵输出功率 $N = 20 \text{ kW}$, 求 $p_D = ?$ 【注意另一种问法: 求管道总损失!!】

解: ① 流速和雷诺数:

$$u = \frac{4q_v}{\pi D^2} = \frac{4 \times 150 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.2^2} = 4.775 \text{ (m/s)}, \quad Re = \frac{uD}{\nu} = \frac{4.775 \times 0.2}{1.14 \times 10^{-6}} = 8.38 \times 10^5$$

② 沿程阻力: 由 $e/D = 0.0003$, $Re = 8.38 \times 10^5$, 查图 9-8 得阻力系数 $\lambda = 0.016$

$$h_{f, \text{passage}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g} = 0.016 \times \frac{140}{0.2} \times \frac{4.775^2}{2 \times 9.8} = 13.03 \text{ (m)}$$

③ ABCD四处局部阻力:

查表 9-3 和表 9-2 得局部阻力系数: $\zeta_A = 0.09$, $\zeta_B = \zeta_C = 0.15$, 且 $\zeta_D = 1$

$$h_{f, \text{local}} = \zeta \frac{u^2}{2g} = (0.09 + 0.15 + 0.15 + 1) \times \frac{4.775^2}{2 \times 9.8} = 1.62 \text{ (m)}$$

④ 从表面0到D的总损失: $h = h_{f, \text{passage}} + h_{f, \text{local}}$ (m), 或 $\Delta p = \dots$ (Pa) 答: ...
还可进一步根据泵的功率(能量补充)求D点的压力。

9

9.5 其它几个问题的说明

① 管道进口段的流动

管道均匀来流, 须经历一段长度的发展才形成充分发展的速度分布。发展段中, 近壁是逐步加厚的边界层; 边界层外面是未扰动的外流。管道中, 流动充分发展之后, 边界层充满全管径, 将不再有边界层概念。

层流来流

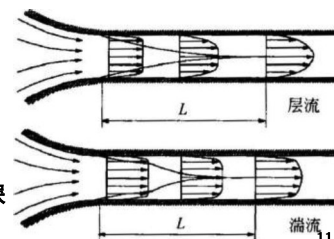
近壁是层流边界层

$$L = 0.0575 D Re$$

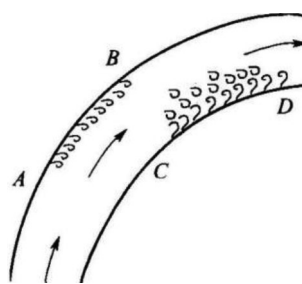
粗略: $L = 100D$

湍流来流

先是层流边界层, 后转变成湍流边界层, $L = 50D$



流道中因为转弯、系统旋转、绕流、压力梯度等原因, 近壁处发生流体质点脱离壁面的现象, 称流动分离。分离流也是流动能量损失的一种重要的原因。



弯道中的分离流动

13

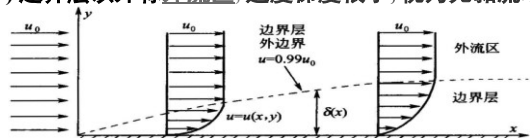
③ 关于外部流动（绕流）与边界层理论

流体在通道内部的流动（如管流），称为内部流动。
流体在物体外部流过，则称外部流动，或称绕流。

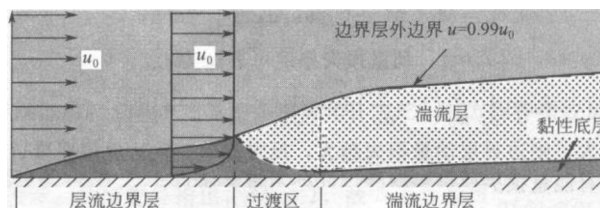
边界层理论：普朗特1904年(29岁)航空学早期提出，当时主要应用是机翼绕流，是对N-S方程的一种简化！

将绕物体的流动人为地分成两个区域：

- 1) 近壁很薄的流体层称**边界层**，其中流体黏性极为重要，垂直于边界层方向的速度梯度很大。
- 2) 边界层以外称**外流区**，速度梯度很小，视为无黏流动。



14

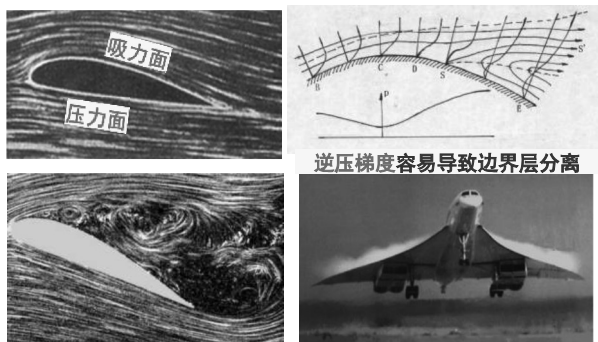


如果壁面足够长，有无可能一直保持层流边界层而不转换？

边界层厚度：有多种定义方法，最常用的是将流体速度从 $u=0$ 到 $u=0.99u_0$ (u_0 : 自由来流的速度) 对应的流体层厚度定义为**边界层的厚度**。

有了边界层的概念，“流动分离”等异常复杂的现象就可用“边界层分离”来描述，问题可以简化。

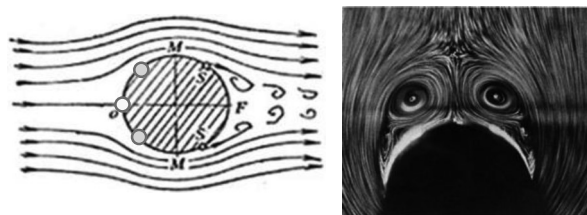
15



吸力面：分离有利于提高升力，但易导致不稳定，有危险
压力面：一般不允许发生流动分离

绕流物体表面的边界层及边界层分离现象

16



圆柱/圆球绕流表面的边界层分离现象
逆向压力梯度通常是造成流动分离的原因

17

④ 关于流体流动的数值模拟

N-S方程是流体动力学的灵魂，课程后来进一步介绍了看似更复杂的雷诺方程/雷诺应力/湍流模型等。

第6章与第9章是何关系？雷诺方程+湍流模型有什么用？

数值计算求解N-S方程，研究流动的现象、过程和机理，这一新兴的研究领域称为计算流体力学，**Computational Fluid Dynamics**，简称**CFD**，是一门奥妙无穷、充满生机、令人振奋的前沿科学。

教科书第12章有一点初步知识，但谬误百出。感兴趣的同学可参考以下教材自学：

帕坦卡著，张政译：《传热与流动的数值计算》，科学出版社，1989。
陶文铨：《数值传热学》（第2版），西安交通大学出版社，2001。

博士生《流动与传热数值计算》课程，欢迎选课。

18