

概述1

内流 → 在固壁限定的空间内流动

- ④ 流程短，仅在固壁附件考虑粘性。流程长，粘性力在流场中起重要作用

外流 → 流体从物体外部流过

- ④ 高 Re 问题只在固体壁面附近考虑粘性影响

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 1

概述2

不可压缩流体在管道和缝隙内的流动



- ④ 管流中推动流体运动的主要驱动为压强梯度
- ④ 研究沿程压强损失与壁面摩擦力的关系在工程上有十分重要的意义

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 2

概述3

粘性、均质不可压、定常 → $\rho = \text{const}, \frac{\partial}{\partial t} = 0$

粘性流动两种状态
粘性流体总流伯努利方程

流动结构的转变；
粘性效应不能忽略导致的流动损失

✦ 基础知识

粘性流动两种流动状态，不可压缩流体微分形式控制方程组，伯努利方程，雷诺数，量纲分析

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 3

第九章 管道内的流动

起始段和充分发展流动

总流伯努利方程

水力损失

→ 沿程阻力损失、局部阻力损失

管道计算

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 4

9.1 起始段和充分发展段1

核心区无粘流动 边界层 边界层增长到整个截面

进口段流动 充分发展流动

起始段 $u = u(r, x)$ 充分发展流动 $u = u(r)$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 5

起始段和充分发展段2

速度分布沿流动方向不再变化（各过流断面速度分布相同），壁面切应力为常数，压降与 x 成线性关系(单位长度压降相同)

层流 $\frac{l_e}{D} = 0.06 \text{Re}_D$ $\text{Re} = 2300 \rightarrow l_e = 138D$

湍流 $\frac{l_e}{D} = 4.4 \text{Re}_D^{\frac{1}{6}}$ $l_e = 20D \sim 40D$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 6

实际流体的伯努利方程

实际流体沿流线的伯努利方程

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h'_f$$

水力损失

实际的管道中的流动

总流

过流断面上参数不均匀

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 7

动能修正系数

动能修正系数 $\rightarrow \alpha = \frac{\int_A V^3 dA}{V^3 A}$

反映过流断面上速度分布的不均匀性，圆管湍流过流断面比层流速度分布更均匀

① 圆管内充分发展层流 $\rightarrow \alpha = 2.0$

② 圆管内高 Re 数充分发展湍流

$\rightarrow \alpha \approx 1.0$ $n = 7, \text{Re} = 10^5, \alpha = 1.06$
 $n = 10, \text{Re} > 2 \times 10^6, \alpha = 1.03$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 8

缓变流

缓变流

- ④ 流线之间夹角很小，即流线近似于平行
- ④ 流线曲率很小，即流线近似于直线

$$z + \frac{p}{\rho g} = C$$

缓变流过流断面的压强分布与流体静压强分布一致

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 9

总流伯努利方程1

单位重量流体总流伯努利方程

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_t$$

其中 $h_t = \frac{1}{Q} \int_{A_2} h'_f V_2 dA_2$ **水力损失**

单位重量流体流经两个断面的机械能损失

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 10

总流伯努利方程2

粘性流体总流伯努利方程适用条件

- ④ 不可压缩流体
- ④ 定常流动
- ④ 质量力有势且只有重力
- ④ 两过流断面必须是缓变流过流断面
- ④ 两过流断面间无其它机械能输入输出

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 11

总流伯努利方程3

注意

- ④ 断面压强要求采用同种压强表示方法，不可压缩流动一般采用计示压强表示
- ④ $z, p/\rho g$ 可以是过流断面上任意一点处的值，但必须为同一点的值
- ④ 两过流断面间可以不是缓变流动
- ④ 高 Re 湍流， $\alpha \approx 1$ ；层流 $\alpha = 2.0$ ，计算前需判断流动状态

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 12

总流伯努利方程4

注意

◎ 截面 A_1 , A_2 之间有机能输入输出

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_t + h_{\text{轴}}$$

流体机械向流体输入功 $\Rightarrow h_{\text{轴}} < 0$

例如：水泵，风机 $\Rightarrow h_{\text{轴}} = -h_p < 0$

流体输出功 $\Rightarrow h_{\text{轴}} > 0$

例如：水轮机，汽轮机 $\Rightarrow h_{\text{轴}} = h_t > 0$

2022-4-13

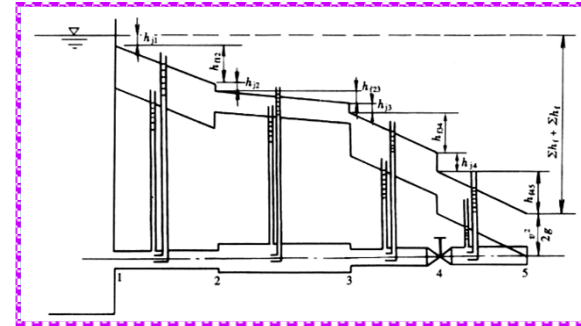
西安交通大学流体力学课程组

13

9.2 圆管内的沿程损失计算

水力损失

总水头线、测压管水头线



2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

14

水力损失

水力损失

沿程能量损失

局部能量损失

沿程损失

流体在均直管道内克服摩擦阻力做功

局部损失

流体流经管道管件、连接件等，由于相互碰撞和形成旋涡等损失的能量

$$h_t = \sum h_l + \sum h_m$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

15

圆管内的沿程损失1

水平均直管充分发展流动沿程损失的计算

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_l$$

流动充分发展 $\bar{V}_1 = \bar{V}_2$ $\alpha_1 = \alpha_2$ $z_1 = z_2$

$$h_l = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

损失的能量来源压强能，或者说压降克服水力损失

其中

$$\Delta p = f(\bar{V}, D, l, \mu, \rho, \Delta)$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

16

圆管内的沿程损失2

量纲分析 $\Rightarrow \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}^2} = \phi\left(\frac{\rho\bar{V}D}{\mu}, \frac{l}{D}, \frac{\Delta}{D}\right)$

Δp 与 l 成正比 $\Rightarrow \Delta p = g\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{D}\right) \frac{l}{D} \frac{1}{2}\rho\bar{V}^2$

达西摩擦因数
(沿程损失系数)

$\Rightarrow h_l = f \frac{l}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

17

圆管内的沿程损失3

达西公式

$\Rightarrow h_l = f \frac{l}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$

◎ 适用于任何截面形状的光滑或粗糙管内的充分发展层流或湍流流动

$\Delta p = h_l \rho g = \frac{1}{2}\rho f \frac{l}{D} \bar{V}^2$ 只适用于水平管

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

18

圆管内的沿程损失4

非水平圆直管内压降

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_l$$

流动充分发展 $\bar{V}_1 = \bar{V}_2$ $\alpha_1 = \alpha_2$

$\Rightarrow \Delta p = p_1 - p_2 = \rho g(z_2 - z_1) + \rho g h_l$
 $= \rho g(z_2 - z_1) + f \frac{l}{D} \frac{1}{2}\rho\bar{V}^2$

压降克服水力损失并提升了水位，或者说损失的能量可能来源压强能和重力势能

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

19

圆管内的沿程损失5

达西摩擦因数 f 或 λ

$\Rightarrow f = g\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{D}\right)$

圆管内层流流动的摩擦系数

由5.4解

$$V = \frac{R^2}{8\mu} \frac{\Delta p}{l}$$

$\Rightarrow \Delta p = \frac{8\mu V l}{R^2} \Rightarrow \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{8\mu V l}{\rho g R^2} = \frac{32\mu V l}{\rho g D^2}$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

20

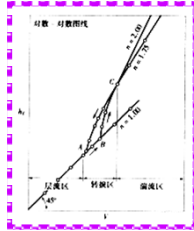
圆管内的沿程损失5

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = h_l \Rightarrow \frac{32\mu V l}{\rho g D^2} = f \frac{l}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

$$\Rightarrow f = \frac{64\mu}{\rho V D}$$

$$\Rightarrow f = \frac{64}{\text{Re}}$$

④ f 基本与 Δ 无关, Δ 非常大的情况除外



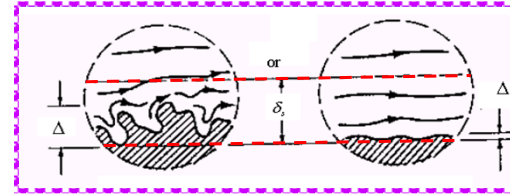
2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

21

圆管内的沿程损失6

圆管内湍流流动的摩擦系数



水力光滑管

$$\Delta \ll \delta_s$$

$$\Rightarrow f = f(\text{Re})$$

水力粗糙管

$$\Delta \approx \delta_s, \Delta \geq \delta_s$$

$$\Rightarrow f = f(\text{Re}, \frac{\Delta}{D})$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

22

圆管内的沿程损失7

湍流流动的摩擦系数只能通过实验获得

④ 尼古拉兹 (Nikuradse) 实验

人工粗糙管, 以颗粒均匀的砂粒粘敷在管壁上

$$\text{Re} = 500 \sim 10^6 \quad \frac{\Delta}{D} = \frac{1}{1014} \sim \frac{1}{30}$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

23

圆管内的沿程损失8

④ 穆迪实验

实际的商品管, 实验结果绘制成莫迪图

等效粗糙度

④ 对商品管作定常流动阻力实验, 在完全粗糙区中测定沿程阻力损失系数, 用冯卡门公式计算粗糙度

$$f = \frac{1}{[1.74 + 2 \lg(D/2\Delta)]^2}$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

24

圆管内的沿程损失9

穆迪图

图中所有区域精度±15%

根据穆迪图确定 f 的步骤

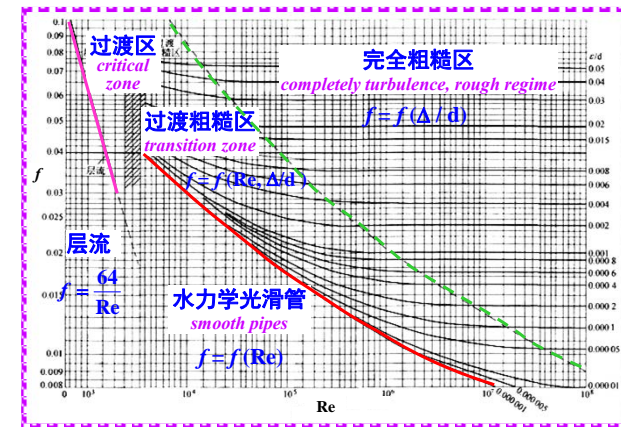
- 根据流动条件计算 Re 数
- 查出所用管子的等效粗糙度 Δ (表7-1, P. 179)
- 根据 Re 和 Δ/d 从图中查出 f

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

25

圆管内的沿程损失10—穆迪图



2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

26

圆管内的沿程损失11

水力光滑管勃拉修斯公式

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad Re < 10^5$$

科尔布鲁克公式

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\Delta/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

适用于整个湍流区域，精度10-15%

显式公式

$$f = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{D} \right)^{0.25}$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

27

圆管内的沿程损失12—例题

水平直管， $D = 4\text{mm}$ ， $V = 50\text{m/s}$ ， $\rho = 1.23\text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 1.79 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\Delta = 0.0015\text{mm}$ 。求：
(1) 层流时0.1m长管内的压降；(2) 湍流压降

$$\text{解：} Re = \frac{\rho D V}{\mu} = \frac{1.23 \times 50 \times 0.004}{1.79 \times 10^{-5}} = 1.37 \times 10^4$$

$$(1) \text{ 层流压降} \quad f = \frac{64}{Re} = 0.00467$$

$$\Delta p_{\text{lam}} = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 = 0.179 \times 10^3 \text{ (Pa)}$$

2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

28

圆管内的沿程损失13-例题

(2) 湍流压降 $\Rightarrow f = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{D}\right)$

由莫迪图

$\text{Re} = 13700, \Delta/D = 0.000375 \Rightarrow f = 0.028$

$\Rightarrow \Delta p_{\text{turb}} = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 = 1.076 \times 10^3 \text{ (Pa)}$

由显式公式 $f = 0.11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{D} \right)^{0.25}$

2022-4-13

西安交通大学力学课程组

29

圆管内的沿程损失14-例题

$\Rightarrow f = 0.11 \left(\frac{68}{13700} + 0.000375 \right)^{0.25} = 0.0297$

科尔布鲁克公式

设初始 $f_1 = 0.02$

$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \lg \left(\frac{0.000375}{3.7} + \frac{2.51}{13700 \sqrt{0.02}} \right)$

$\Rightarrow 0.0307 \Rightarrow 0.0289 \Rightarrow 0.0291 \Rightarrow 0.0291$

2022-4-13

西安交通大学力学课程组

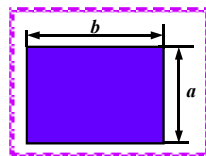
30

9.3 非圆管道沿程水力损失计算

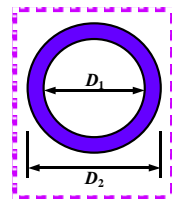
水力直径

$\Rightarrow D_h = \frac{4A}{P}$

◎ A 为过流断面面积, P 为流体与固体边界接触部分周长, 湿周



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



$D_h = D_2 - D_1$

2022-4-13

西安交通大学力学课程组

31

非圆管道沿程损失计算2

非圆管道沿程损失的计算

$\Rightarrow h_l = f \frac{l}{D_h} \frac{V^2}{2g}$

其中 $f = f(\text{Re}_h, \Delta/D_h)$

层流

$f = \frac{C}{\text{Re}_h}$

C 与截面形状和机构尺寸有关
表9-1, P. 341

湍流

莫迪图或经验公式

水力半径

$\Rightarrow R_h = \frac{A}{P} = \frac{D_h}{4}$

2022-4-13

西安交通大学力学课程组

32

9.4 局部水力损失计算

局部损失 经过各种管道构件和管道连接件产生的损失。如：突扩管，突缩管，弯头，阀门等等

- ① 通流截面、流动方向急剧变化引起速度场迅速改变
- ② 流体元相互碰撞增加摩擦
- ③ 流动分离形成旋涡等

单位重量流体局部损失 $\Rightarrow h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 33

局部水力损失计算1

$$h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

$K \Rightarrow$ 局部损失因数（系数）

决定于管件的几何形状、尺寸和流动的雷诺数。雷诺数大时和雷诺数无关

主要通过实验测定

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 34

局部水力损失计算2

突然扩大

总水头线

测压管水头线

旋涡

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 35

局部水力损失计算3

突然扩大的局部损失因数 \leftarrow 通常采用下游速度计算

局部损失	因数	速度
$h_m = K_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g}$	$K_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$	V_1 为小截面速度
$h_m = K_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$	$K_2 = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2$	V_2 为大截面速度

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 36

局部水力损失计算4

管道与大水池相连—管道淹没出口

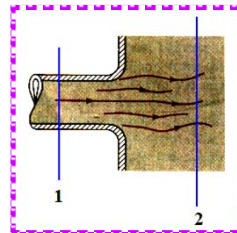
$$A_2 \gg A_1$$

$$h_m = K \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{\bar{V}_1^2}{2g}$$



$$K = 1$$

◎ 管道中水流的速度头完全消耗在水池中



2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

37

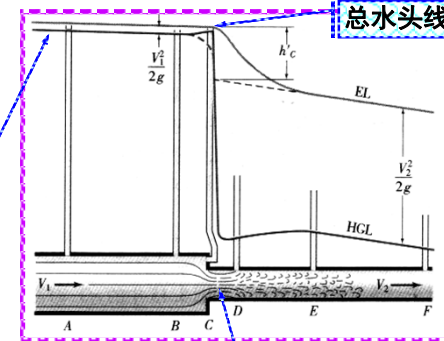
局部水力损失计算5

突然
缩小

测压管
水头线

总水头线

颈缩



2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

38

局部水力损失计算6

局部损失

因数

速度

$$h_m = K_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$$

$$K = 0.5 \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)$$

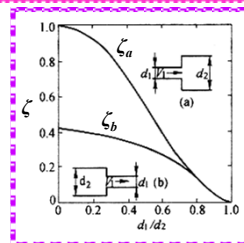
\bar{V}_2 为小截面速度

管道与大水池相连
— 管道入口

$$A_1 \gg A_2$$



$$K = 0.5$$

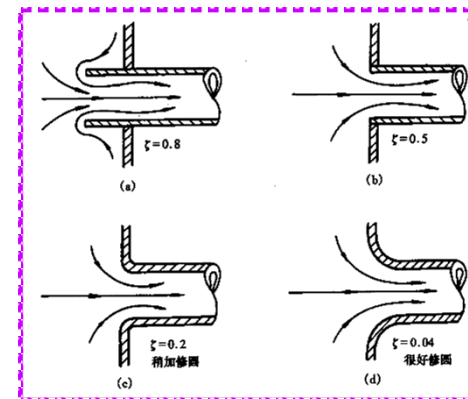


2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

39

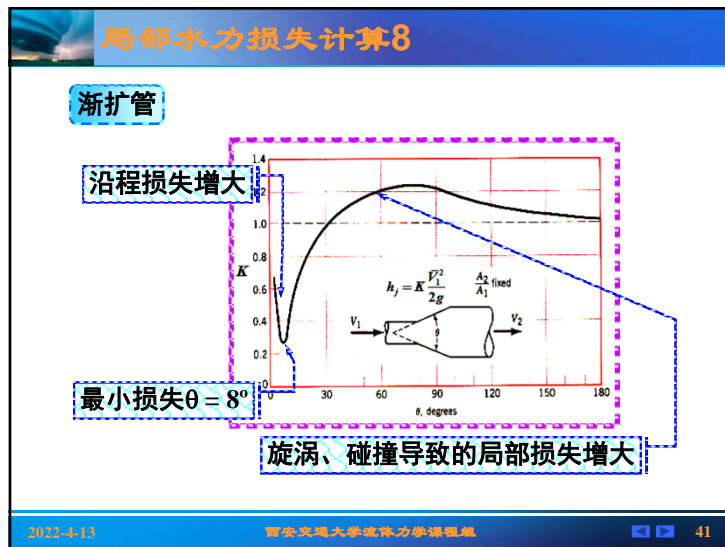
局部水力损失计算7



2022-4-13

西安交通大学流体力学课程组

40



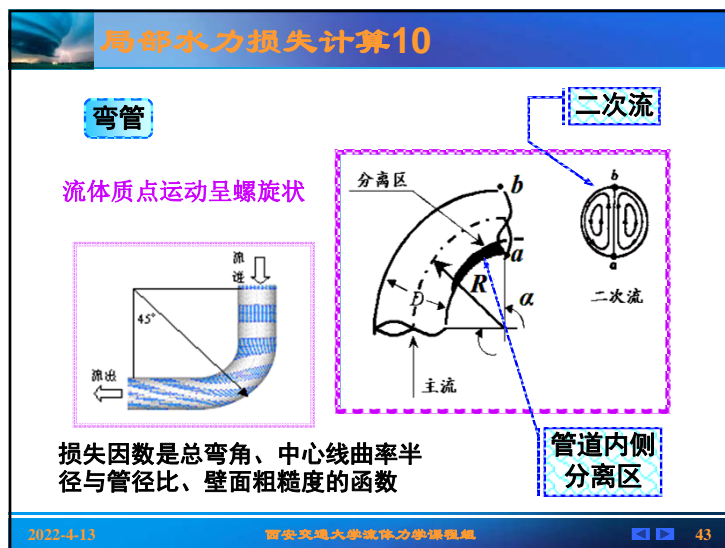
局部水力损失计算9

渐缩管 见P347页 表9.3

$\theta < 60^\circ$ 时, $K < 0.1$

- 渐扩管即使在最佳扩张角下, 一般 $K > 0.3$, 工程上实现低损失的流体减速比较困难
- 工程上实现流体加速相对比较容易

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 42



等值长度和等值局部损失因数 (系数)

等值长度 沿程损失占主要

按损失相等原则将局部损失折算等值长度的沿程损失

$$L_{eff} = \frac{K}{f} D$$

等值局部损失系数 局部损失占主要

按损失相等原则将沿程损失折算等值系数的局部损失

$$K_{eff} = f \frac{L}{D}$$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 44

9.5 管道计算

管道的分类

简单管道

管道直径、流速、流量沿程不变的管道。
单管、含局部阻力件及动力设备管道

复杂管道

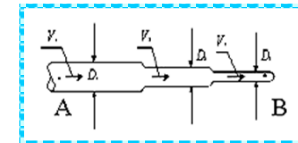
由两根以上管道组成的管道系统。
串联管道、并联管道、分叉管，管网

串联和并联特点

串联管道

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

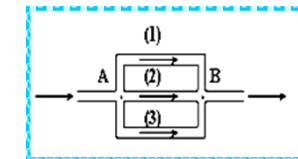
$$h_f = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$



并联管道

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$h_f = h_{f1} = h_{f2} = h_{f3}$$



管道计算的基本方程

连续方程 $\Rightarrow \Sigma Q_{in} = \Sigma Q_{out}$

总流伯努利方程

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_f + h_{\text{轴}}$$

水力损失方程

$$h_f = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{\bar{V}_i^2}{2g} + \sum_i K_i \frac{\bar{V}_i^2}{2g}$$

管道计算的基本方程

沿程损失

$$h_f = f \frac{l}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

局部损失

$$h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

沿程损失系数

层流 $\Rightarrow f = \frac{64}{Re}$

局部损失系数

给出或查附表（手册）

查莫迪图

湍流

$$f = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{D} \right)^{0.25} \quad \text{或} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\Delta/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

简单管道计算—单管1

已知 L, D, Q , 求 h_f

方法

$$Q \rightarrow \left. \begin{matrix} V \\ D \end{matrix} \right\} \rightarrow Re, \Delta/D \rightarrow f \rightarrow h_f$$

注意 非圆通道 $D_h \rightarrow D$

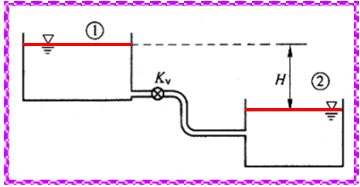
判断流动状态, 层流 $\rightarrow f = \frac{C}{Re}$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 49

简单管道计算—单管2

例: 两贮水池由 $d = 10\text{cm}$, $l = 50\text{m}$ 的铁管连接 ($\Delta = 0.046\text{mm}$), 中有球阀一个 ($K = 5.7$), 90° 弯管 ($K = 0.64$) 两个, 为保证 $Q = 0.04\text{m}^3/\text{s}$, 求 H

解: 伯努利方程

$$z_1 + \frac{p_{1m}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{2m}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + h_f$$


$$\text{由 } \bar{V} = \frac{Q}{\pi d^2/4} = \frac{0.04 \times 4}{\pi \times 0.1^2} = 5.09 \text{ (m/s)}$$

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 50

简单管道计算—单管3

$$Re = \frac{\bar{V}d}{\nu} = \frac{0.1 \times 5.09}{1 \times 10^{-6}} = 5.09 \times 10^5 \quad \text{湍流}$$

$$\rightarrow h_f = H = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{\bar{V}_i^2}{2g} + \sum_i K_i \frac{\bar{V}_i^2}{2g}$$

沿程损失 $\rightarrow h_f = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{\bar{V}_i^2}{2g}$

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0.046 \times 10^{-3}}{0.1} = 0.00046$$

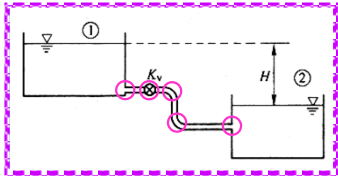
2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 51

简单管道计算—单管4

$$\rightarrow f = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{D} \right)^{0.25} = 0.0172$$

$$\rightarrow h_f = f \frac{l}{d} \frac{\bar{V}^2}{2g} = 11.4 \text{ (m)}$$

局部损失

$$\rightarrow h_m = \sum_i K_i \frac{\bar{V}_i^2}{2g}$$


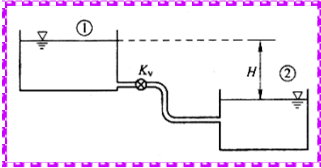
2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 52

简单管道计算—单管5

$$h_m = (K_{in} + K_{阀} + 2K_{弯头} + K_{out}) \frac{\bar{V}^2}{2g} = 11.2 \text{ (m)}$$

$$h_t = h_l + h_m = H = 11.2 + 11.4 = 22.6 \text{ (m)}$$

◎ 若两个管件非常靠近
 则需通过实验确定总
 压降，不能简单叠加



2022-4-13 西安交通大学力学课程组 53

简单管道计算—单管6

已知 h_l , L , Q , 求 D

水平直管, $Q = 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $L = 2438 \text{ m}$ 的管道上压降
 为 63.53 m 水柱, $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 新铸铁管(无镀复层), 求 D 。

解：管道非常长，忽略局部损失

$$z_1 + \frac{p_{1m}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{2m}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + h_l$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta p}{\rho g} = h_l = 65.53 \text{ (m)} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 54

简单管道计算—单管7

$$D^5 = 3.57 f \quad (1)$$

$$\text{Re} = \frac{\bar{V} D}{\nu} = \frac{1.35 \times 10^6}{D} \quad \text{假设为高 Re 湍流} \quad (2)$$

新铸铁管(无镀复层)
$$\frac{\Delta}{D} = \frac{0.3 \times 10^{-3}}{D} \quad (3)$$

设 f_1 $\xrightarrow{(1)}$ D $\xrightarrow{(2)(3)}$ $\text{Re}, \Delta/D$ $\xrightarrow{\text{莫迪图}}$ f_2

比较 $f_1 = f_2$?

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 55

简单管道计算—单管8

$f_1 = 0.02 \Rightarrow D = 0.59 \Rightarrow \text{Re}_1 = 2290000$

$\Rightarrow f_2 = 0.0165 \Rightarrow D = 0.567 \Rightarrow \text{Re}_2 = 2380000$

$\Rightarrow f_3 = 0.0165$

$$\Rightarrow D = \underline{0.567} \text{ (m)}$$

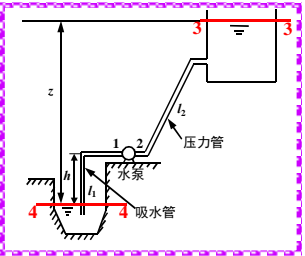
◎ 实际管径应选取稍大于上述计算值的标准管径。计算Re数，校核流动状态。

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 56

简单管道计算—含水泵1

已知 h_f, L, D , 求 Q

例: $h = 3\text{m}$, $z = 15\text{m}$, 吸水管 $d_1 = 0.2\text{m}$, $l_1 = 4\text{m}$, $f_1 = 0.02$, $K_1 = 5$; 压力管 $d_2 = 0.15\text{m}$, $l_2 = 40\text{m}$, $f_2 = 0.025$, $K_2 = 8$; 水泵出口表压 $p_{2m} = 1.8 \times 10^5\text{Pa}$ 。求: (1) 水泵输水的体积流量 Q ; (2) 水泵的输出功率



2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 57

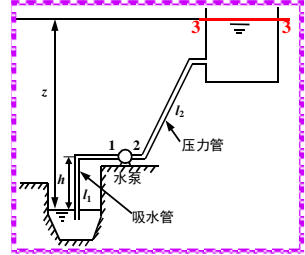
简单管道计算—含水泵2

(1) 水泵输水的体积流量

伯努利方程

$$z_2 + \frac{p_{2m}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} = z_3 + \frac{p_{3m}}{\rho g} + \frac{\alpha_3 \bar{V}_3^2}{2g} + h_t$$

假设为高 Re 湍流 $\alpha_2 = 1$

$$\Rightarrow \frac{p_{2m}}{\rho g} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} - (z - h) = h_t$$


2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 58

简单管道计算—含水泵3

$\Rightarrow \bar{V}_2^2 = 19.62(h_t - 6.35)$

水力损失方程

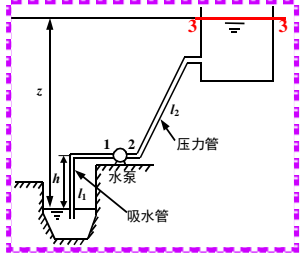
$$h_t = f_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + K_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$$

$$= 0.748 \bar{V}_2^2$$

$\Rightarrow \bar{V}_2 = 3.01(\text{m/s})$

$Q = 0.053(\text{m}^3/\text{s})$

计算Re数, 校核流动状态



2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 59

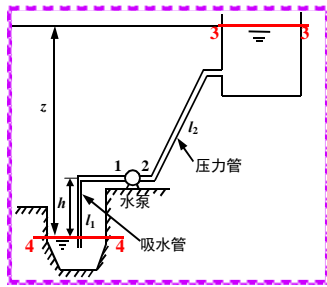
简单管道计算—含水泵4

(2) 水泵的输出功率

伯努利方程

$$z_4 + \frac{p_{4m}}{\rho g} + \frac{\alpha_4 \bar{V}_4^2}{2g} = z_3 + \frac{p_{3m}}{\rho g} + \frac{\alpha_3 \bar{V}_3^2}{2g} + h_t + h_{\text{轴}}$$

$\Rightarrow h_t + h_{\text{轴}} = -z$



2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 60

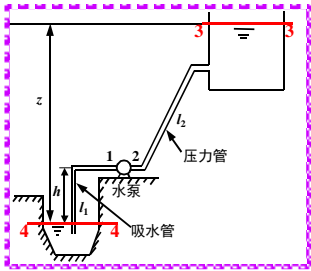
简单管道计算—含水泵7

水力损失方程

$$h_t = f_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + f_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + K_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + K_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$$

其中 $\bar{V}_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = 1.687 \text{ (m/s)}$

→ $h_t = 7.56 \text{ (m)}$



2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 61

简单管道计算—含水泵8

→ $h_{\text{轴}} = -22.56 \text{ (m)}$

$h_{\text{轴}}$ 为负, 说明流体机械向流体输出功

水泵输出功率

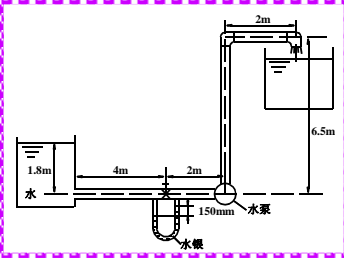
→ $\dot{W} = \rho g Q |h_{\text{轴}}| = 11.73 \text{ (kW)}$

⊙ 如果达西摩擦因数未给定, 则需要迭代计算

2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 62

简单管道计算—含水泵9

例: $d = 50\text{mm}$, $Q = 12\text{m}^3/\text{h}$ 时, 阀门两侧的水银压差计读数为150mm。1、求水通过阀门的压降; 2、若 $f = 0.03$, 管道入口 $\zeta_1 = 0.5$, 求阀门前水的计示压强; 3、不计弯头局部损失, 求水泵供给单位重量水的能量 $h_{\text{机}}$ 。



2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 63

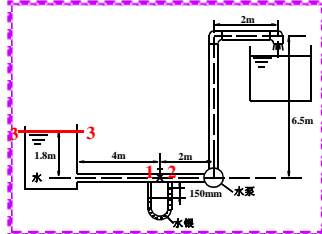
简单管道计算—含水泵10

(1) 水通过阀门的压降

$$p_1 - p_2 = (\rho_{\text{汞}} - \rho_{\text{水}})gh = 18522 \text{ (Pa)}$$

(2) 阀门前表压

由 $\bar{V}_1 = \frac{4Q}{\pi d^2} = 1.698 \text{ (m/s)}$ → $\text{Re} = 84900$ 湍流



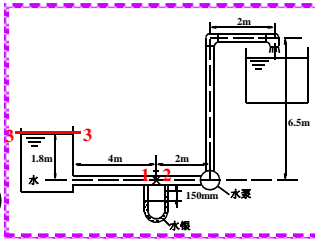
2022-4-13 西安交通大学流体力学课程组 64

简单管道计算—含水泵11

$$z_3 + \frac{p_{3m}}{\rho g} + \frac{\alpha_3 \bar{V}_3^2}{2g} = z_1 + \frac{p_{1m}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + h_t$$

$$\frac{p_{1m}}{\rho g} = 1.8 - \frac{\bar{V}_1^2}{2g} - h_t$$

$$h_t = \left(f \frac{l}{d} + K \right) \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = 0.427 \text{ (m)}$$

$$\Rightarrow p_{1m} = 12013 \text{ (Pa)}$$


2022-4-13 西安交通大学力学课程组 65

简单管道计算—含水泵12

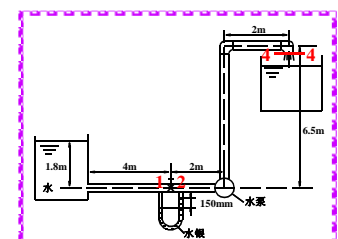
(3) 水泵的 $h_{\text{轴}}$

$$z_2 + \frac{p_{2m}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} =$$

$$z_4 + \frac{p_{4m}}{\rho g} + \frac{\alpha_4 \bar{V}_4^2}{2g} + h_t + h_{\text{轴}}$$

$$\Rightarrow h_t + h_{\text{轴}} = -7.163 \text{ (m)}$$

由 $h_t = f \frac{l}{d} \frac{\bar{V}^2}{2g} \Rightarrow h_{\text{轴}} = -8.07 \text{ (m)}$

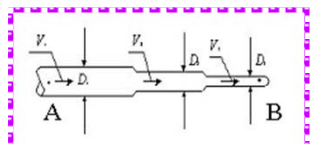


2022-4-13 西安交通大学力学课程组 66

复杂管道计算—串联和并联

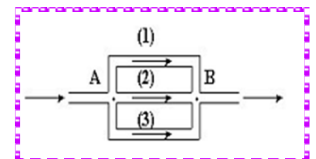
串联管道

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$h_t = h_{t1} + h_{t2} + h_{t3}$$


并联管道

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$h_t = h_{t1} = h_{t2} = h_{t3}$$


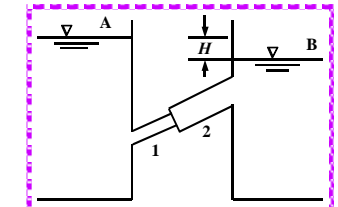
2022-4-13 西安交通大学力学课程组 67

复杂管道计算—串联1

例：两水箱高度差 $H = 6\text{m}$, 串联管道 $L_1 = 300\text{m}$, $D_1 = 0.6\text{m}$, $\Delta_1 = 1.5\text{mm}$, $L_2 = 240\text{m}$, $D_2 = 0.9\text{m}$, $\Delta_2 = 0.3\text{mm}$, 水 $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 求管道的流量 Q 。

解：串联管路，假设为高 Re 湍流

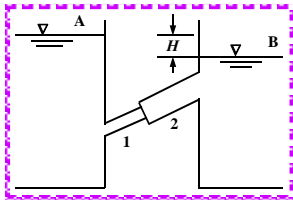
$$z_A + \frac{p_{Am}}{\rho g} + \frac{\alpha_A \bar{V}_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_{Bm}}{\rho g} + \frac{\alpha_B \bar{V}_B^2}{2g} + h_t$$

$$\Rightarrow h_t = H$$


2022-4-13 西安交通大学力学课程组 68

复杂管道计算—串联2

水力损失

$$h_f = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + (K_{in} + K_{扩}) \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + K_{out} \frac{\bar{V}_2^2}{2g}$$


连续方程 $\Rightarrow D_1^2 \bar{V}_1 = D_2^2 \bar{V}_2$

$$\Rightarrow 6 = (1.01 + 500 f_1 + 52.6 f_2) \frac{\bar{V}_1^2}{2g}$$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 69

复杂管道计算—串联3

雷诺数

$$Re_1 = 6 \times 10^5 \times \bar{V}_1 \quad Re_2 = 9 \times 10^5 \times \bar{V}_2$$

相对粗糙度

$$\frac{\Delta_1}{D_1} = 0.0025 \quad \frac{\Delta_2}{D_2} = 0.00033$$

$$\Rightarrow \bar{V}_1 = 2.86 \text{ (m/s)} \quad Q = 0.808 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

计算 Re 数, 校核流动状态

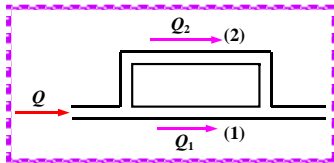
2022-4-13 西安交通大学力学课程组 70

复杂管道计算—并联1

例: 水塔中的水经并联管路流出, 已知 $L_1 = 300\text{m}$, $L_2 = 400\text{m}$, $D_1 = 150\text{mm}$, $D_2 = 100\text{mm}$, $Q = 45 \text{ l/s}$, $f = 0.025$, 忽略局部能量损失, 求 Q_1 , Q_2 , h_f 。

解: 并联管路

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$h_f = h_{f1} = h_{f2}$$


$$\Rightarrow f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \Rightarrow \bar{V}_1 = \sqrt{\frac{L_2 D_1}{L_1 D_2}} \bar{V}_2$$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 71

复杂管道计算—并联2

由 $\frac{\pi}{4} D_1^2 \bar{V}_1 + \frac{\pi}{4} D_2^2 \bar{V}_2 = Q$ **及** $\bar{V}_1 = \sqrt{\frac{L_2 D_1}{L_1 D_2}} \bar{V}_2$

$$\Rightarrow \bar{V}_1 = 1.94 \text{ (m/s)} \quad \bar{V}_2 = 1.37 \text{ (m/s)}$$

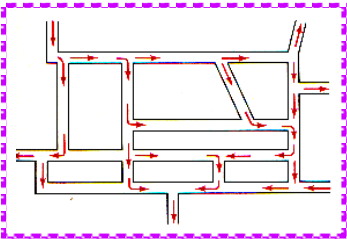
$$\Rightarrow Q_1 = 34.25 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Q_2 = 10.75 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$h_f = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = 9.6 \text{ (m)}$$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 72

复杂管道计算—管网 *piping network*



节点和环路方程

- ④ 节点处流量代数和等于零
- ④ 围绕任一环形回路的压差代数和等于零

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 73

作业

作业：P.372~375

- ④ 9—14
- ④ 9—21
- ④ 9—23
- ④ 9—25
- ④ 9—33
- ④ 9—37

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 74

小结1

起始段和充分发展段

总流伯努利方程

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_f + h_{\text{轴}}$$

- ④ 适用条件
- ④ 缓变流与动能修正系数
- ④ 高 Re 数时 α 的选取, $h_{\text{轴}}$ 的正负

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 75

小结2

沿程损失的计算 $\Rightarrow h_f = f \frac{l \bar{V}^2}{D 2g}$

局部损失的计算 $\Rightarrow h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$

- ④ 沿程损失和局部损失产生的原因
- ④ 层流沿程损失系数, 莫迪图, 显式公式
- ④ 非圆通道沿程损失的计算, 当量直径

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 76

小结3

管道计算

- ④ 连续方程、总流伯努利方程、水力损失方程
- ④ 单管的三种计算，注意列伯努利方程时两缓变过流断面的选取
- ④ 串联管道与并联管道的特点

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 77

复习 4/13/2022

总流伯努利方程

$$\frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_l + h_m$$

水力损失 $\Rightarrow h_l = h_l + h_m$

沿程损失 $\Rightarrow h_l = f \frac{l}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}$

局部损失 $\Rightarrow h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2g}$

当量直径 $\Rightarrow D_h = \frac{4A}{P}$

层流 $f = \frac{C}{Re}$ 圆管 $C = 64$

湍流水力光滑管 $f = f(Re)$

湍流粗糙管 $f = f(Re, \frac{\Delta}{D})$

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 78

复习 4/13/2022

管道问题计算步骤

- ④ 已知平均流速、管径（当量直径）：计算 Re , Δ , 判断流动状态
- 未知平均流速、管径（当量直径）：根据流动工质假设流动状态 — 水、空气（高 Re 湍流），油（层流）
- ④ 列连续、总流伯努利方程，并根据已知条件简化方程
- ④ 列水力损失方程 — 沿程损失 f 与流态有关、局部损失 ζ
- ④ 三个方程联立求解，未知流速或管径时可能需要迭代求解，注意核算假设的流动状态是否正确

2022-4-13 西安交通大学力学课程组 79