

# 勘察设计

注册石油天然气工程师

ZHUCE SHIYOU TIANRANQI GONGCHENGSHI

# 资格考试

专业基础考试复习指南

勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会 编



化学工业出版社

教材出版中心

# 勘察设计

## 注册石油天然气工程师

ZHUCE SHIYOU TIANRANQI GONGCHENGSHI

# 资格考试

## 专业基础考试复习指南

勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会 编



化学工业出版社  
教材出版中心

·北京·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

勘察设计注册石油天然气工程师资格考试专业基础  
考试复习指南/勘察设计注册工程师石油天然气专业管  
理委员会编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 2

ISBN 7-5025-8306-8

I. 勘… II. 勘… III. ①油气勘探-工程师-资格考  
核-自学参考资料②石油工程-设计-工程师-资格考核-自  
学参考资料③天然气工业-设计-工程师-资格考核-自学  
参考资料 IV. TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 014250 号

---

### 勘察设计注册石油天然气工程师资格考试 专业基础考试复习指南

勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会 编

责任编辑: 陈 丽 刘俊之

文字编辑: 丁建华

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 624 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8306-8

定 价: 78.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 内 容 提 要

本书是勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会按照《勘察设计注册石油天然气工程师资格考试专业基础考试大纲》要求组织编写，内容包括流体流动与输送、工程热力学、传热学、分离工程基础、过程控制、工程设计、环境保护共七章。

本书除可帮助参加注册石油天然气工程师资格考试专业基础考试人员做好准备工作外，还可供高等学校石油工程、化学工程与工艺、油气储运工程专业等师生作为专业基础教学参考。

# 前 言

为适应我国社会主义市场经济发展和市场准入制度需要，经全国勘察设计注册工程师管理委员会注工〔2003〕4号文件批准，由中国石油天然气集团公司牵头，有关部门人员参加，共同组成了勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会，并按照人事部、建设部〔2001〕5号文关于《勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划》的要求，在勘察设计石油天然气行业开展了建立注册石油天然气工程师资格制度的各项前期准备工作。

根据人事部、建设部国人发〔2005〕84号文《关于印发〈勘察设计注册石油天然气工程师制度暂行规定〉、〈勘察设计注册石油天然气工程师资格考试实施办法〉和〈勘察设计注册石油天然气工程师资格考核认定办法〉的通知》，勘察设计注册石油天然气工程师制度已正式启动。为了帮助参加资格考试人员系统做好专业基础考试的准备工作，勘察设计注册工程师石油天然气专业管理委员会特委托大庆石油学院，按照《勘察设计注册石油天然气工程师资格考试专业基础考试大纲》内容要求，编写了《勘察设计注册石油天然气工程师资格考试专业基础考试复习指南》。

本指南包括：流体流动与输送、工程热力学、传热学、分离工程基础、过程控制、工程设计、环境保护共七章。主编为王宝辉、宋华。其中，流体流动与输送由刘淑芝、吴炜编写，工程热力学由宫克勤编写，传热学由刘晓燕、赵海谦编写，分离工程基础由陈颖、宋华编写，过程控制由王振民编写，工程设计由张建光编写，环境保护由王宝辉、吴红军编写。西安长庆科技工程有限责任公司、中国石油集团工程设计有限责任公司、西安石油大学、中国石油大学有关专家、教授对本书稿进行了审校。在此，我们谨对他们的大力协助和支持表示衷心的感谢。

由于本指南是首次编写，如有不妥之处，诚恳希望读者批评指正，以便再版时修改完善。

勘察设计注册工程师  
石油天然气专业管理委员会  
2006年2月

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>流体流动与输送</b> .....	<b>1</b>
	【考试大纲】 .....	1
	【复习要点】 .....	1
	【复习内容】 .....	1
1.1	流体流动的阻力 .....	1
1.2	压力管路 .....	10
1.3	流动参数的测量 .....	33
1.4	两相流动 .....	42
1.5	液体输送机械 .....	48
1.6	气体输送与压缩机械 .....	66
	【模拟习题】 .....	77
	【习题答案】 .....	84
	【参考文献】 .....	84
<b>第 2 章</b>	<b>工程热力学</b> .....	<b>85</b>
	【考试大纲】 .....	85
	【复习要点】 .....	85
	【复习内容】 .....	86
2.1	热力学第一定律 .....	86
2.2	理想气体的性质及其热力过程 .....	94
2.3	热力学第二定律 .....	104
2.4	实际气体的性质及水蒸气 .....	109
2.5	气体及蒸汽的流动 .....	116
2.6	压气机及气体动力循环 .....	122
2.7	制冷循环 .....	129
	【模拟习题】 .....	132
	【习题答案】 .....	135
	【参考文献】 .....	135
<b>第 3 章</b>	<b>传热学</b> .....	<b>136</b>
	【考试大纲】 .....	136
	【复习要点】 .....	136
	【复习内容】 .....	136
3.1	基本概念 .....	136
3.2	热传导 .....	142

3.3	对流换热 .....	155
3.4	热辐射 .....	179
3.5	传热过程与换热器 .....	192
	【模拟习题】 .....	205
	【习题答案】 .....	208
	【参考文献】 .....	208
<b>第4章</b>	<b>分离工程基础 .....</b>	<b>209</b>
	【考试大纲】 .....	209
	【复习要点】 .....	209
	【复习内容】 .....	210
4.1	混合物气液平衡原理及计算 .....	210
4.2	平衡蒸馏(闪蒸)原理 .....	220
4.3	精馏 .....	224
4.4	吸收 .....	238
4.5	吸附 .....	258
4.6	非均相混合物的分离 .....	263
	【模拟习题】 .....	274
	【习题答案】 .....	279
	【参考文献】 .....	280
<b>第5章</b>	<b>过程控制基础 .....</b>	<b>281</b>
	【考试大纲】 .....	281
	【复习要点】 .....	281
	【复习内容】 .....	281
5.1	过程控制基础 .....	281
5.2	被控对象特性 .....	286
5.3	常用检测仪表 .....	291
5.4	控制仪表及控制规律 .....	315
5.5	执行器 .....	322
5.6	计算机控制系统 .....	330
	【模拟习题】 .....	334
	【习题答案】 .....	340
	【参考文献】 .....	341
<b>第6章</b>	<b>工程设计 .....</b>	<b>342</b>
	【考试大纲】 .....	342
	【复习要点】 .....	342
	【复习内容】 .....	342
6.1	工程设计要求 .....	342
6.2	工程设计安全 .....	348
6.3	工程设计技术经济分析 .....	351

	【模拟习题】 .....	353
	【习题答案】 .....	354
	【参考文献】 .....	354
<b>第 7 章</b>	<b>环境保护 .....</b>	<b>355</b>
	【考试大纲】 .....	355
	【复习要点】 .....	355
	【复习内容】 .....	355
7.1	环境污染源及其污染物 .....	355
7.2	环境污染源的综合治理 .....	369
7.3	环境保护法规 .....	383
	【模拟习题】 .....	385
	【习题答案】 .....	390
	【参考文献】 .....	390



# 第 1 章 流体流动与输送

## 【考试大纲】

### 1.1 流体流动的阻力

绝对粗糙度 相对粗糙度 水力半径 流态及其划分 雷诺数 圆管沿程阻力、局部阻力的计算 当量长度

### 1.2 压力管路

实际流体总流的伯努利方程 管路特性曲线 简单管路的水力计算 复杂管路（并联、串联、分支）的水力计算 水击现象

### 1.3 流动参数的测量

孔板流量计 超声波流量计 容积式流量计 速度式流量计 质量流量计 其他流量计——测压计

### 1.4 两相流动

气液两相管流的特点 截面含气率 截面含液率 气相折算速度 液相折算速度 两相流的雷诺数

### 1.5 液体输送机械

螺杆泵和往复泵的工作原理 离心泵工作原理 离心泵的汽蚀与吸入特性 离心泵特性曲线 离心泵与管路的匹配 泵功率的计算

### 1.6 气体输送与压缩机械

通风机、鼓风机和真空泵的工作原理与结构 压缩机的工作原理、结构和特性曲线 离心压缩机的滞止和喘振特性 基本工艺参数计算

## 【复习要点】

流体流动与输送是一门密切结合生产实际的综合性技术学科，遵循动量传递原理和流体力学原理。该课程着重叙述流体在流动过程的基本规律，流体运动学与动力学基础，流体阻力和水头损失，压力管路的水力计算及流动参数的测量；气液两相管流的特点、基本概念；常用流体输送设备的结构、工作原理、主要性能参数及操作性能等。该课程强调工程观点、定量计算和操作技能。试题中流体流动与输送占 18 题，题型为单选题，包括基本概念、理解分析、计算等类型。为了使本课程取得满意的成绩，考生在复习过程中，应按考试大纲规定的内容加深对基本概念、基本原理的理解，在此基础上熟练掌握基本的技术方法和技巧。

## 【复习内容】

### 1.1 流体流动的阻力

要求：掌握流体流动过程流动阻力的基本概念；掌握流体流动过程圆管沿程阻力、

局部阻力的计算。

### 1.1.1 基本概念

#### (1) 绝对粗糙度与相对粗糙度

石油天然气工程中所铺设的管道，按其材料的性质和加工情况，大致可分为光滑管与粗糙管两大类。通常把玻璃管、黄铜管、塑料管等列为光滑管；把钢管和铸铁管等列为粗糙管。实际上，即使是用同一材质管子铺设的管道，由于使用时间的长短，腐蚀与结垢的程度的不同，管壁的粗糙程度也会发生很大的差异。管壁的粗糙程度对流体流动过程中的阻力大小产生一定的影响。

绝对粗糙度是指壁面凸出部分的平均高度，称为绝对粗糙度，以  $\Delta$  表示。管壁粗糙度对流体流动阻力的影响程度与其管径的大小有关，如对于绝对粗糙度相同的管道，直径不同其影响也不同。所以在流动阻力计算中不但考虑绝对粗糙度的大小，还要考虑相对粗糙度的大小。相对粗糙度是指绝对粗糙度与管径的比值，即  $\Delta/d$ 。

#### (2) 水力半径

圆管是最常用的断面形式，但是工程上也常有用到非圆形管的情况，例如通风系统中的风道，有许多就是矩形的。

如果设法把非圆形管折合成圆管来计算，那么根据圆管得出的方程和图表也就适用于非圆形管了，这种由非圆形管折合到圆管的方法是从水力半径的概念出发，通过建立非圆形管的当量直径来实现的。

水力半径  $R$ ——流体在流道里的流道截面积  $A$  与润湿周边长度  $\chi$  之比。

$$R = \frac{A}{\chi} \quad (1.1-1)$$

对于常见的圆管来说，水力半径

$$R = \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad (1.1-2)$$

圆管直径  $d$  为半径  $R$  的 4 倍。由此推广到非圆形管，非圆形管的当量直径

$$d_e = 4R$$

例如对于长方形管  $d_e = 4R = \frac{4bh}{2(b+h)} = 2 \frac{bh}{b+h}$

式中， $d_e$  为非圆形管的当量直径； $R$  为非圆形管的水力半径； $b$ ， $h$  分别为长方形的两条边的边长。

【例 1.1-1】如图 1.1-1 所示，半满管流的水力半径  $R = ( \quad )$ 。

- (A)  $d/4$                       (B)  $d/2$   
(C)  $d$                         (D)  $2d$

解

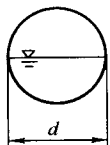


图 1.1-1 [例 1.1-1] 附图

$$R = \frac{A}{\chi} = \frac{\pi d^2/2}{\pi d/2} = d/4$$

故 (A) 为正确答案，(B)、(C)、(D) 为错误答案。

### 1.1.2 流态及其划分

关于流动阻力的研究，首先是从观察流动状态的变化开始的。人们在大量的实践中，通过观察、试验，逐渐掌握了液流阻力的发展规律。早在1883年，雷诺总结了大量的试验结果，发现在管流中存在着两种截然不同的流态，并找出了划分两种流态的标准。

试验的基本做法是用一个保持液面固定的定位水箱1，在侧壁上接出一个流线型的管嘴2，再水平接出一根等直径玻璃管7，玻璃管末端用阀门3控制流量，如图1.1-2所示。

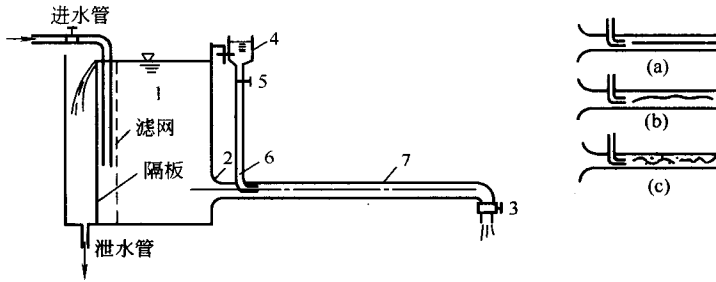


图 1.1-2 雷诺实验装置

1—水箱；2—管嘴；3，5—阀门；4—容器；6—空心针头；7—玻璃管

为了观察流态变化，在水箱上装有盛色液的容器4，从容器4接出小管用阀门5调节，通过小管下部的空心针头6，将色液导入玻璃管中，使色液随水流一起流动。

通过观察色液在水流中的运动状态，看出如下的变化：

当微开阀门3，控制阀门5放入色液，可以看出色液在玻璃管内成非常平稳的直线，如图1.1-2中的(a)所示，说明液流是成平行的直线流动。

当把阀门3逐渐开大，起初色液并不改变，直到管内流速增到某一数值时，色液开始颤动，而后出现断断续续的不稳定状态，如图1.1-2中的(b)所示。

随流速的继续增大，色液便不再连续，而立即向周围紊乱地扩散，如图1.1-2中的(c)所示。

第一种流动状态主要表现为液体质点的摩擦和变形，称为层流（滞流）状态。第三种流动状态则主要表现为液体质点的互相撞击和掺混，称为湍流（紊流）状态。而中间的第二种状态表现为层流到湍流的过渡，称为临界状态。如果试验从大流速到小流速来进行，会出现相反的有关类似变化过程。

### 1.1.3 雷诺数

若用不同的管径和不同的流体分别进行实验，从实验中发现，不仅流速 $u$ 能引起流动状况的改变，而且管径 $d$ 、流体的黏度 $\mu$ 和密度 $\rho$ 也都引起流动状况的改变。足见，流体的流动状况是由多方面因素决定的。通过进一步分析研究，可以把这些影响因素组合成为一个无量纲数群：

$$Re = \frac{d\rho u}{\mu} = \frac{du}{\nu} \quad (1.1-3)$$

式中  $Re$ ——雷诺数或称为雷诺准数；

$u$ ——流体在管内的平均流速, m/s;

$\rho$ ——流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$ ——流体的动力黏度, Pa·s;

$\nu$ ——流体的运动黏度, m<sup>2</sup>/s。

湍流状态下, 惯性力  $\rho u^2$  占主要地位, 雷诺数较大; 层流状态下, 惯性力较弱, 黏性力  $\mu u/d$  居主要地位, 雷诺数较小。故可用雷诺数来判别流态, 它能同时反映出流速、管径和流体物理性质三方面对流态的影响, 综合了引起流动阻力的内因和外因, 揭示了流动阻力的物理本质。

大量的实验结果表明, 一般输液(或低速气体)管路中, 如果  $Re \leq 2000$  即认为是层流; 而  $Re > 2000$  则认为是湍流。

流体在湍流流动时, 在靠近管壁处流体由于黏性力的作用, 流动为层流状态, 即流体在靠近管壁处形成层流层, 称为层流边层或层流次层。

管内流体为湍流时, 近壁处存在两种状态: 雷诺数较小时, 近壁处层流边层完全掩盖住管壁粗糙突起, 其粗糙度对湍流不起作用, 称为水力光滑; 随雷诺数增大, 层流边层变薄, 当粗糙突起高出层流边层之外时, 粗糙突起造成加剧紊动, 粗糙突起突出越高, 阻力越大, 称为水力粗糙。两种状态间还存在过渡的状态, 称为混合摩擦状态。

#### 1.1.4 圆管沿程阻力、局部阻力的计算

流动阻力的大小与流体本身的物理性质、流动状况及壁面的形状等因素有关。

实际工程管路都是由许多直管段和各种管件连接的管系。把直管段的流体流动阻力称为沿程阻力, 所引起的水头损失称为沿程水头损失, 用  $h_f$  表示。而把通过管件局部的流体流动阻力称为局部阻力, 所引起的水头损失, 用  $h_j$  表示。全流程总的水头损失  $h_w$  应是所有沿程水头损失和局部水头损失的总和。即

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (1.1-4)$$

式中各项的单位均为 m, 即单位重量流体流动时所损失的机械能。

衡算基准不同时还可写成以下形式:

$$\Delta p_f = \gamma \sum h_f \quad (1.1-5)$$

式中  $\gamma$ ——流体重力密度(重度), 为单位体积的流体所具有的重量,  $\gamma = \rho g$ , N/m<sup>3</sup>。

上式为单位体积流体流动时所损失的机械能, 也称为压力损失, 单位为 Pa。

一般输油管或输水管中, 沿程水头损失是主要的, 通常约占总损失的 90%, 而局部水头损失只占 10% 左右。室内管线由于管件较多, 局部水头损失有时达到 30% 左右。

##### (1) 圆管沿程阻力的计算

① 圆管层流沿程阻力的计算 管路内层流通常发生在黏度较高或速度较低的情况下。一般输水管线因水的黏度较低很少出现层流流动, 在输油管线中一般在输油量较小及黏度较大的过程中为层流流动, 机械润滑系统多是层流流动。

圆管内各点流速  $u_r$  与点所在半径  $r$  为二次抛物线的关系:

$$u_r = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (1.1-6)$$

式中  $\Delta p$ ——在管长为  $l$  管路中的压强差。

管内的最大流速：

$$u_m = \frac{\Delta p}{4\mu l} \quad R^2 = \frac{\Delta p}{16\mu l} d^2 \quad (1.1-7)$$

流量：

$$Q = \frac{\Delta p \pi d^4}{128\mu l} \quad (1.1-8)$$

式中  $Q$ ——流体在圆形直管内的体积流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

平均流速：

$$u = \frac{\Delta p d^2}{32\mu l} \quad (1.1-9)$$

$$u = \frac{1}{2} u_m \quad (1.1-10)$$

水平直管稳定层流时的沿程水头损失：

$$h_f = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{32\mu l u}{\gamma d^2} \quad (1.1-11)$$

表明层流时管路沿程水头损失与平均流速成正比。习惯上将沿程水头损失用流速水头  $\frac{u^2}{2g}$  的倍数表示：

$$h_f = \frac{32\mu l u}{\rho g d^2} \times \frac{2u}{2u} = \frac{64\mu}{\rho u d} \times \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} = \frac{64}{Re} \times \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g}$$

令 
$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

则 
$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g}$$

式中， $\lambda$  称为摩擦系数（或称为沿程水力摩阻系数、沿程阻力系数），层流时取决于雷诺数  $Re$  的大小。 $l/d$  称为长径比，标志着管路尺寸对阻力的影响。

**【例 1.1-2】** 流体在圆形直管中作层流流动，如果流量等不变，只是将管径增大一倍，则阻力损失为原来的（ ）倍。

(A) 1/2

(B) 1/4

(C) 1/8

(D) 1/16

解

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} = \frac{64\mu}{d u \rho} \times \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g}$$

$$u = Q / \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right)$$

$$h_f = \frac{128\mu l}{\pi \rho g} \times \frac{Q}{d^4}$$

$$h_f' = h_f / 16$$

故 (D) 为正确答案, (A)、(B)、(C) 为错误答案。

② 圆管湍流沿程阻力的计算 根据对湍流时流动阻力性质的理解, 以及所进行的实验研究综合分析, 可以得知, 为克服流动阻力所引起的能量损失  $\Delta p_f$ , 与流体流过的管径  $d$ 、管长  $l$ 、平均流速  $u$ 、流体的黏度  $\mu$  及密度  $\rho$ 、管壁的粗糙度  $\Delta$  有关。据此可以写成一般的一定函数形式, 即

$$\Delta p_f = f(d, l, u, \rho, \mu, \Delta)$$

用量纲分析 (因次分析) 的方法得出:

$$\frac{\Delta p_f}{\rho u^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho u d}, \frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}\right)$$

$$\text{即 } h_f = f\left(Re, \frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}\right) \frac{u^2}{g}$$

实验证明沿程水头损失  $h_f$  与管长成正比, 与管径成反比, 因而可把  $\frac{l}{d}$  提出, 并把流速写为流速水头形式, 则

$$h_f = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right) \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{g} = 2f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right) \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g}$$

$$\text{令 } \lambda = 2f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right)$$

则

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} \quad (1.1-12)$$

式 (1.1-12) 即为管路沿程水头损失的计算通式。对不同流态, 只是  $\lambda$  值有不同规律。

③ 摩擦系数  $\lambda$  的经验公式 湍流时, 在不同  $Re$  值范围内, 对不同的管材,  $\lambda$  的表达式亦不相同, 下面列举几种。

对水力光滑管

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.01 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (1.1-13)$$

对水力粗糙管

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.01 \lg\left(\frac{r_0}{\Delta}\right) + 1.74 \quad (1.1-14)$$

对混合摩擦区

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2 \lg\left(\frac{\Delta}{r_0} + \frac{18.7}{Re \sqrt{\lambda}}\right) \quad (1.1-15)$$

经验表明绝对粗糙度  $\Delta$  值, 约可按表 1.1-1 确定。

由大量实验的结果绘制出不同相对粗糙度情况下的  $\lambda$  与  $Re$  的关系曲线, 称为莫狄图 (图 1.1-3)。

表 1.1-1 某些管表面的绝对粗糙度值

管壁表面特征	$\Delta/\text{mm}$	管壁表面特征	$\Delta/\text{mm}$
清洁无缝钢管, 铝管	0.0015~0.01	新铸铁管	0.25~0.42
新制无缝钢管	0.04~0.15	普通铸铁管	0.50~0.85
通用输油钢管	0.14~0.15	生锈铸铁管	1.00~1.50
普通钢管	0.19	结水垢铸铁管	1.50~3.00
涂沥青钢管	0.12~0.21	光滑水泥管	0.30~0.80
普通镀锌钢管	0.39	粗糙水泥管	1.00~2.00
旧钢管	0.50~0.60	橡皮软管	0.01~0.03

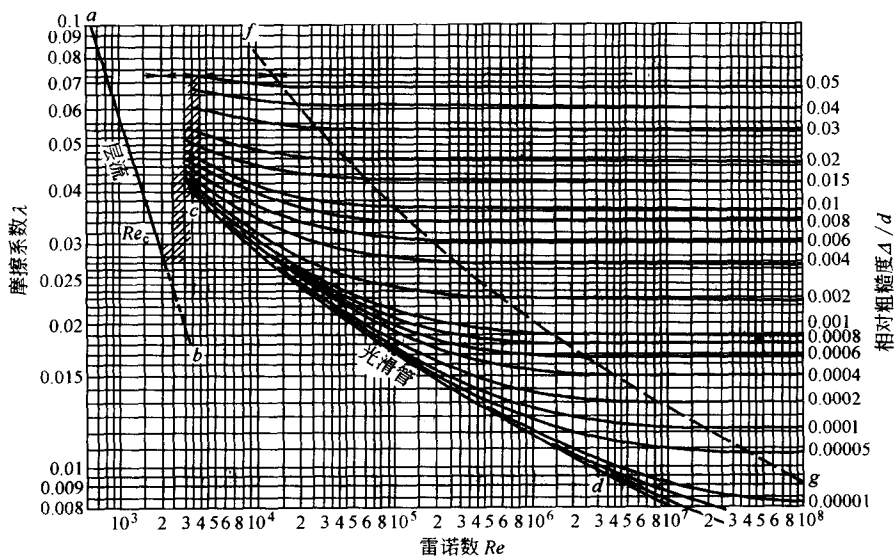


图 1.1-3 摩擦系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$  及相对粗糙度  $\Delta/d$  的关系

莫狄图经过整理归纳成经验公式。表 1.1-2 介绍的是我国输油管道常用的经验公式。

表 1.1-2 常用计算摩擦系数的经验公式

流态类型	相应图上区域	$Re$ 范围 ( $\epsilon = \frac{\Delta}{r_0} = \frac{2\Delta}{d}$ )	常用的经验公式
层流	a-b	$Re \leq 2000$	$\lambda = \frac{64}{Re}$
湍流	水力光滑	$3000 < Re < \frac{59.7}{\epsilon^{1/2}}$	$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$
	混合摩擦	$\frac{59.7}{\epsilon^{1/2}} < Re < \frac{665 - 765 \lg \epsilon}{\epsilon}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \lg \left[ \frac{6.8}{Re} + \left( \frac{\Delta}{3.7} \right)^{1.11} \right]$
	水力粗糙	$Re > \frac{665 - 765 \lg \epsilon}{\epsilon}$	$\lambda = \frac{1}{\left( 2 \lg \frac{3.7d}{\Delta} \right)^2}$

由层流到湍流的过渡状态极不稳定，没有可靠的公式，一般参照水力光滑区来选择  $\lambda$  值。

**【例 1.1-3】** 分别计算下列情况下，流体流过  $\phi 76\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、长 10m 的水平钢管的水头损失及压力损失。

(1) 密度为  $910\text{kg/m}^3$ 、黏度为  $72 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$  的油品，流速为  $1.1\text{m/s}$ ；

(2)  $20^\circ\text{C}$  的水，流速为  $2.2\text{m/s}$ 。

解 (1) 油品：

$$Re = \frac{d\rho u}{\mu} = \frac{0.07 \times 910 \times 1.1}{72 \times 10^{-3}} = 973 < 2000$$

流动为层流。摩擦系数可从图 1.1-3 上查取，也可用公式计算：

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{973} = 0.0658$$

$$\text{压头损失} \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} = 0.0658 \times \frac{10}{0.07} \times \frac{1.1^2}{2g} = 0.58 \text{ (m)}$$

$$\text{压力损失} \quad \Delta p_f = \gamma h_f = \rho g h_f = 910 \times 9.81 \times 0.58 = 5178 \text{ (Pa)}$$

(2)  $20^\circ\text{C}$  水的物性： $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$ ， $\mu = 1.005 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$

$$Re = \frac{d\rho u}{\mu} = \frac{0.07 \times 998.2 \times 2.2}{1.005 \times 10^{-3}} = 1.53 \times 10^5$$

流动为湍流。求摩擦系数尚需知道相对粗糙度  $\Delta/d$ ，查表取钢管的绝对粗糙度  $\Delta$  为  $0.2\text{mm}$ ，则

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{0.2}{70} = 0.00286$$

根据  $Re = 1.53 \times 10^5$  及  $\Delta/d = 0.00286$  查图 1.1-3，得  $\lambda = 0.027$

$$\text{压头损失} \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} = 0.027 \times \frac{10}{0.07} \times \frac{2.2^2}{2 \times 9.81} = 0.95 \text{ (m)}$$

$$\text{压力损失} \quad \Delta p_f = \gamma h_f = \rho g h_f = 998.2 \times 0.95 \times 9.81 = 9303 \text{ (Pa)}$$

**【例 1.1-4】** 流体在直管中的流动时处于湍流水力粗糙区内，流体在相同管径的单位长度管路上流动阻力与 ( ) 有关：

- (A) 相对粗糙度 (B) 雷诺数  
(C) 流速 (D) 摩擦系数

解 在湍流水力粗糙区内流体的摩擦系数仅与相对粗糙度有关，与雷诺数无关，而

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g}$$

故 (A)、(C) 为正确答案，(B)、(D) 为错误答案。

(2) 局部阻力的计算

在液流断面急剧变化以及液流方向转变的地方，发生局部阻力，引起局部水头损失。管路上安装的各种管件虽然多种多样，但产生局部水头损失的原因均是由于：①液流中流速的



重新分布；②在旋涡中黏性力做功；③液体质点的混掺引起的动量变化。

局部水头损失从理论上推导一般较为困难。绝大多数的局部阻力都需要实验方法来确定。用实验方法确定局部水头损失时有两种方法：阻力系数法和当量长度法。

① 阻力系数法 克服局部阻力所消耗的机械能，可以表示为流速水头的某一倍数，即

$$h_j = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (1.1-16)$$

式中， $\zeta$ 称为局部阻力系数，一般由实验测定。因局部阻力的形式很多，常对 $\zeta$ 加注相应的下标。下面列举几种常用的局部阻力系数的求法。

a. 突然扩大与突然缩小。利用连续性方程和伯努利方程（将在后面论述）可得：

突然扩大的局部阻力系数

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (1.1-17)$$

突然缩小的局部阻力系数

$$\zeta_2 = 0.5 \left(\frac{A_1}{A_2} - 1\right)^2 \quad (1.1-18)$$

计算时式（1.1-16）中的速度 $u$ 均以小管中的速度计。

b. 进口和出口。当流体自容器进入管内，可看作从很大的截面 $A_1$ 突然进入很小的截面 $A_2$ ，即 $A_2/A_1 \approx 0$ ，得出 $\zeta_{\text{进口}} = 0.5$ ，称为进口阻力系数；当流体自管子进入容器或从管子排放到管外空间，可看作从很小的截面 $A_1$ 突然进入很大的截面 $A_2$ ，即 $A_1/A_2 \approx 0$ ，得出 $\zeta_{\text{出口}} = 1$ ，称为出口阻力系数。

当流体从管子直接排放到管外空间时，管出口内侧截面上的压强可取为与管外空间相同，但出口截面上的动能及出口阻力应与截面选取相匹配。若截面取管出口内侧，则表示流体并未离开管路，此时截面上仍有动能，系统的总能量损失不包含出口阻力；若截面取管出口外侧，则表示流体已经离开管路，此时截面上动能为零，而系统的总能量损失中应包含出口阻力。由于出口阻力系数 $\zeta_{\text{出口}} = 1$ ，两种选取截面方法计算结果相同。

c. 管路中的配件如弯头、三通、活接头等总称为管件。不同管件或阀门的局部阻力系数可从有关手册中查得。

② 当量长度法 在工程实际中，为了便于把局部水头损失和沿程水头损失合并计算，有时把局部水头损失换算为相当某 $l_e$ 管长的沿程水头损失，写成

$$h_j = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{u^2}{2g} \quad (1.1-19)$$

式中， $l_e$ 称为当量长度。与阻力系数法比较，可以看出

$$\zeta = \lambda \frac{l_e}{d} \text{ 或 } l_e = \frac{\zeta}{\lambda} d \quad (1.1-20)$$

这样，已知局部阻力系数就可求出当量长度 $l_e$ 之值。

由于局部阻力的形式繁多，而且绝大部分处于湍流状态，欲得出较精确的结果，必须亲自进行实验。各种文献、手册中介绍的数据只能作参考。