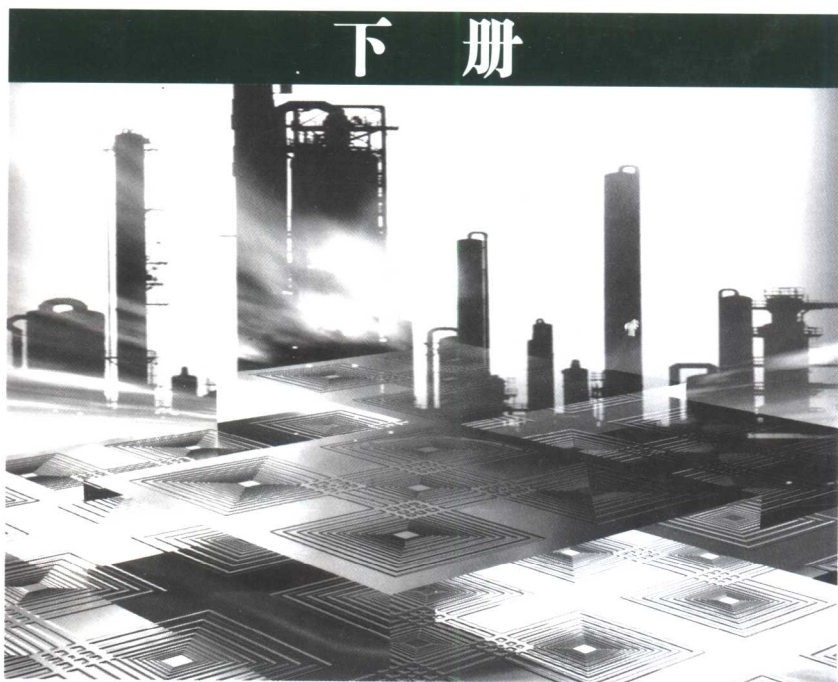


高 静 主编

注册化工工程师执业资格 考试辅导用书

下 册



Chemical Industry Press



化学工业出版社

注册化工工程师执业资格 考试辅导用书 下册

高 静 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

注册化工工程师执业资格考试辅导用书. 下册/高静主编.
北京: 化学工业出版社, 2004. 4
ISBN 7-5025-5577-3

I. 注… II. 高… III. 化学工程-工程师-资格考核-自学参
考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 042658 号

注册化工工程师执业资格考试辅导用书

下册

高 静 主编

责任编辑: 陈 丽 刘俊之 刘兴春 徐 娟

责任校对: 陈 静

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 30½ 字数 848 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5577-3/TQ·1995

定 价: 66.00 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

前 言

为适应我国市场经济的发展和加入世贸组织的需求,根据人事部、建设部关于“勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划”[2001] 05号文件的要求,在全国勘察设计化工工程行业建立注册化工工程师职业资格注册制度,化工工程行业涵盖化工、石化、化纤、医药和轻化。根据人事部、建设部[2003] 36号文件,对长期从事化工工程设计的技术人员,符合“考核认定”条件,经测试合格后,即可取得“中华人民共和国注册化工工程师执业资格证书”。

为了帮助广大专业技术人员准备“注册化工工程师执业资格”的考试,受化学工业出版社的委托,特组织编写本套复习指导书,以方便参考人员系统地做好考前复习准备工作,提高应试的能力。

本书完全是按照“注册化工工程师考试大纲”编写的,同时又具有以下特点:

(1) 本书是一本较系统、较全面的复习资料,包括基础课、专业基础课、专业课三大部分,共涉及 21 门课程,包含了考试大纲要求的全部课程;

(2) 每部分包括基本知识、例题、习题,并配有习题答案;

(3) 为帮助考生检验复习的程度,书中给出了三套模拟试题及标准答案;

(4) 每部分的习题和模拟试题的题型完全是按照正式考试的题型编写。

全书由高静主编,具体分工为:高等数学由金少华编写,普通物理由刘金伟、王俊平编写,普通化学由杨春、苕晓燕编写,理论力学由郭全梅编写,材料力学由邢素芳编写,流体力学由张少峰编写,计算机应用基础由柴欣编写,电工与电子技术由李华、毛一之编写,工程经济由陈立文、陈敬武编写,物理化学由张西惠编写,化工原理由刘继东编写,化工过程控制由刘鸿雁编写,化工设计基础由王淑芳编写,化工污染控制基础由黄志红编写,化工热力学由高静编写,物料及能量平衡由王桂荣编写,化学反应动力学由王桂云编写,化工工艺设计和化工工艺系统设计由崔洪武、钨长城编写,工程经济分析和化工工程项目管理由陈敬武、陈立文编写。

由于本书编写时间较短,加之水平有限、经验不足,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指导。

编者

2004 年 4 月

目 录

1 化工原理	1	2.3 过程检测仪表	137
1.1 流体流动	1	2.4 显示仪表	145
习题	13	2.5 自动控制仪表	148
习题答案	15	2.6 执行器	152
1.2 流体输送机械	15	2.7 简单控制系统的设计	157
习题	27	2.8 计算机控制系统	159
习题答案	30	习题	161
1.3 非均相物系的分离	30	习题答案	163
习题	44	参考文献	163
习题答案	46	3 化工设计基础	164
1.4 液体搅拌	46	3.1 工艺设计	164
习题	48	3.2 工艺设计安全	184
习题答案	49	3.3 工艺设计经济分析	186
1.5 传热	49	4 化工污染控制基础	190
习题	68	4.1 环境污染控制原则	190
习题答案	71	习题	192
1.6 蒸发	71	习题答案	193
习题	76	4.2 废水处理	194
习题答案	77	习题	196
1.7 气体吸收	77	习题答案	198
习题	96	4.3 废气处理	198
习题答案	98	习题	200
1.8 蒸馏	98	习题答案	202
习题	112	4.4 废渣处理	202
习题答案	115	习题	204
1.9 固体干燥	115	习题答案	205
习题	123	4.5 环境噪声控制	205
习题答案	125	习题	207
1.10 液-液萃取	125	习题答案	209
习题	130	参考文献	209
习题答案	131	5 化工热力学	210
参考文献	131	5.1 热力学第一定律	210
2 化工过程控制	132	5.2 热容、焓和熵	210
2.1 自动控制系统基本概念	132	5.3 热力学第二定律、循环过程、 热机效率	212
2.2 被控对象的特性	134		

习题	216	7.2 化学反应器类型比较和选择	266
习题答案	216	7.3 化学反应器的工艺设计	
5.4 立方型状态方程、维里方程	216	算及分析	267
习题	220	习题	279
习题答案	220	习题答案	280
5.5 逸度和逸度系数	220	7.4 反应器的工艺控制	280
习题	223	参考文献	281
习题答案	223	8 化工工艺设计	282
5.6 理想溶液、正规溶液和		8.1 概述	282
无热溶液	223	8.2 工艺设计基础数据	282
5.7 混合性质、偏摩尔性质	224	8.3 工艺设计内容与深度	282
5.8 活度系数、超额性质	225	8.4 工艺设计的原则和方法	286
习题	229	8.5 工艺设计的工作程序及内容	295
习题答案	229	8.6 过程控制方案的确定	296
5.9 气液平衡计算	229	8.7 过程能量设计与分析	302
习题	233	习题	304
习题答案	233	习题答案	308
5.10 液液平衡和液固平衡	233	参考文献	308
习题	236	9 化工工艺系统设计	309
习题答案	236	9.1 概述	309
参考文献	236	9.2 工艺流程设计	309
6 物料及能量平衡	237	9.3 化工管道设计	310
6.1 物料衡算	237	9.4 安全设施设置原则	316
习题	247	9.5 机泵的安装设计 (HG/T	
习题答案	248	20570.5—95)	321
6.2 能量衡算	248	9.6 设备、管道的布置原则	325
习题	255	9.7 系统安全分析	335
习题答案	256	习题	339
6.3 物料和能量联算	256	习题答案	343
习题	257	参考文献	345
习题答案	257	10 工程经济分析	346
6.4 不稳定过程的物料及		10.1 工程造价基本知识	346
能量衡算	257	10.2 技术经济分析的有关数据及经济	
习题	260	效果的评价方法	347
习题答案	261	10.3 设计方案评价的要求和准则	347
6.5 物料及能量损耗分析	261	10.4 成本和费用构成	348
参考文献	262	10.5 工程建设投资构成和	
7 化学反应动力学	263	估算方法	348
7.1 化学反应器基本原理及工		习题	353
业应用	263	习题答案	357
习题	265	11 化工工程项目管理	358
习题答案	266	11.1 工程项目管理概念和	

基本知识	358	答案	438
习题	365	基础考试(下午)模拟试题(一)	439
习题答案	369	基础考试(下午)模拟试题(一)	
11.2 工程项目的实施与控制	369	答案	444
习题	381	基础考试(下午)模拟试题(二)	445
习题答案	389	基础考试(下午)模拟试题(二)	
11.3 工程设计及法律知识	389	答案	450
习题	397	基础考试(下午)模拟试题(三)	451
习题答案	399	基础考试(下午)模拟试题(三)	
基础考试(上午)模拟试题(一)	400	答案	456
基础考试(上午)模拟试题(一)		专业考试模拟试题(一)	457
答案	412	专业考试模拟试题(一)答案	465
基础考试(上午)模拟试题(二)	413	专业考试模拟试题(二)	466
基础考试(上午)模拟试题(二)		专业考试模拟试题(二)答案	473
答案	425	专业考试模拟试题(三)	474
基础考试(上午)模拟试题(三)	426	专业考试模拟试题(三)答案	481
基础考试(上午)模拟试题(三)			

1 化工原理

1.1 流体流动

1.1.1 概述

1.1.1.1 流体的分类和特性

气体和流体统称流体。流体有多种分类方法：

- (1) 按状态分为气体、液体、超临界流体等；
- (2) 按可压缩性分为不可压缩流体和可压缩流体；
- (3) 按是否可忽略分子之间作用力分为理想流体与黏性流体（或实际流体）；
- (4) 按流变特性分为牛顿型和非牛顿型流体。

1.1.1.2 作用在流体上的力

- (1) 质量力（又称体积力） 流体受力大小与其质量成正比，如重力和离心力。
- (2) 表面力 该力与流体表面积成正比。表面力又分为压力（垂直作用于表面上）和剪力（平行作用于表面）两类。静止流体只受到质量力和压力的作用，而流动流体则同时受到质量力、压力和剪力的作用。

1.1.1.3 定态流动与非定态流动

在流动系统中，各截面上流体的有关参数（物性、流速、压强等）仅随位置而变，不随时间而变的流动称为定态流动。流体流动的有关物理量随位置和时间均发生变化，则称为非定态流动。

1.1.2 流体静力学基本方程式

1.1.2.1 流体的密度与静压强

- (1) 流体的密度 单位体积流体所具有的流体质量称为密度，以 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

液体的密度基本上不随压强而变化，随温度略有改变，可视为不可压缩流体。混合液的密度，以 1kg 为基准，可按下式估算，即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{a_n}{\rho_n}$$

气体的密度随压强和温度而变，为可压缩流体。当可当作理想气体处理时，用下式估算，即

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

或

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T}$$

对于混合气体，可用平均摩尔质量 M_m 代替上式中的 M

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n$$

- (2) 流体的静压强

垂直作用于流体单位面积上的表面力称为流体的静压强，俗称压力，以 p 表示，单位为 Pa。压强可有不同的表示方法。

① 根据压强基准选择的不同可用绝压、表压、真空度（负表压）表示。表压和真空度分别用压强表和真空表度量。

表压强 = 绝对压强 - 大气压强

真空度 = 大气压强 - 绝对压强

② 工程上常采用液柱高度 h 表示压强，其关系式为

$$p = h\rho g$$

1.1.2.2 流体静力学基本方程式

(1) 基本方程的表达形式 对于不可压缩流体， ρ 为常数，则有

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2$$

或

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2)$$

当液面上方的压强为 p_0 ，距液面 h 处水平面的压强为 p ，上式可改写为

$$p = p_0 + \rho gh$$

(2) 流体静力学基本方程的应用条件及意义

流体静力学基本方程式只适用于静止的连通着的同一种连续的流体。

平衡方程的物理意义为：总势能守恒；等压面的概念；传递定律；液柱高度表示压强或压强差。

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h$$

1.1.2.3 流体静力学基本方程式的应用

设计各种液柱压差计、液位计，液封高度计算，判断流动方向。

1.1.3 流体流动的基本原理

1.1.3.1 定态流动系统的连续性方程式

连续性方程式是定态流动系统中质量守恒原理的体现。

$$w_1 = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = u A \rho = \text{常数}$$

当流体可视为不可压缩时， ρ 可取作常数，则有

$$V_1 = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数}$$

下标 1、2 分别代表 1—1 与 2—2 截面。

对于可压缩流体，为使计算方便，引入质量流速的概念，即

$$G = \frac{w_1}{A} = \frac{V_1}{A} \rho = u \rho$$

应用连续性方程时，应注意如下两点：

(1) 在衡算范围内，流体必须是连续的，即流体充满管道，并连续不断地从上游截面流入，从下游截面流出；

(2) 连续性方程式反映了定态流动系统中，流量一定时，管路各截面上流速的变化规律。此规律与管路的安排和管路上是否装有管件、阀门及输送机械无关。这里流速是指单位管道横截面上的体积流量。对于不可压缩流体，流速和管径的关系为

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

当流量一定且选定适宜流速时，利用连续性方程可求算输送管路直径，即

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}}$$

用上式算出管径后,要根据管子系列规格选用标准管径。

1.1.3.2 机械能衡算方程式——伯努利方程式

(1) 具有外功加入、不可压缩黏性流体定态流动的伯努利方程式
以 1kg 流体为基准

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f$$

或

$$W_e = g\Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \sum h_f$$

式中,各项单位均为 J/kg。

当流体不流动时

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

(2) 理想流体的伯努利方程式

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

此式表明,理想流体作定态流动时,任一截面上 1kg 流体所具有的位能、静压能与动能之和为定值,但各种形式的机械能可以互相转换。

(3) 伯努利方程式的讨论

① 伯努利方程式的适用条件 不可压缩流体定态连续的流动。

② 理想流体的机械能守恒和转化 总机械能守恒,不同形式的机械能可互相转化。

③ 注意区别方程式中各项能量所表示的意义 式中的 gZ 、 $u^2/2$ 、 p/ρ 指某截面上 1kg 流体所具有的能量; $\sum h_f$ 为两截面间沿程的能量消耗,它不可能再转化为其他机械能; W_e 是 1kg 流体在两截面间获得的能量,是输送机械重要的性能参数之一。由 W_e 可选择输送机械并计算其有效功率,即

$$N_e = W_e w_s$$

④ 伯努利方程式的基准 前面各式都是以 1kg 流体为基准,若以 1N 或 1m³ 流体为基准

1N 流体

$$H_e = \Delta Z + \frac{\Delta u^2}{2g} + \frac{\Delta p}{\rho} + H_f$$

式中,各项单位为 J/N 或 m; H_e 为输送机械的有效压头; H_f 为压头损失; Z 、 $u^2/2g$ 、 $p/\rho g$ 分别称为位压头、动压头和静压头。

1m³ 流体

$$H_T = \rho g \Delta Z + \frac{\Delta u^2}{2} \rho + \Delta p + \rho \sum h_f$$

式中,各项单位均为 J/m³ 或 Pa。 H_T 称为风机的全风压,是选择风机的重要参数之一。

⑤ 伯努利方程式的推广 可压缩流体的流动:若所取系统中两截面间气体的压强变化小于原来绝对压强的 20% 时,则用两截面间流体的平均密度 ρ_m 代替 ρ 。

非定态流动:对于非定态流动的任一瞬间,伯努利方程式仍成立。

1.1.4 流体在管内的流动规律及流动阻力

1.1.4.1 两种流型

(1) 雷诺准数

$$Re = \frac{du\mu}{\rho} = \frac{dG}{\rho}$$

Re 是一个无因次数群, 无论采用何种单位制, 只要各物理量单位一致, 所得 Re 值必相同。其数值反映流体流动的惯性力与黏性力的比值, 即流体质点的湍动程度, 并作为流动类型的判据。根据经验, 当 $Re \leq 2000$ 时为滞流或层流, 当 $Re \geq 2000$ 时, 按湍流或紊流处理。

(2) 牛顿黏性流体定律及流体的黏性 当流体在管内滞流时, 内摩擦力可用牛顿黏性定律表示, 即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{或} \quad \tau = -\mu \frac{du}{dr}$$

遵循牛顿黏性定律的流体为牛顿型流体, 所有气体和大多数液体属于这一类流体。不服从牛顿黏性定律的流体则为非牛顿型流体, 如假塑性流体、胀塑性流体及宾汉塑性流体均属这一类流体。

流体动力黏度 (简称黏度)

$$\mu = \tau / \left(\frac{du}{dy} \right)$$

应注意搞清楚如下概念。

① 流体在圆管进口段内的流动完成了边界层的形成和发展过程。边界层在管中心汇合时, 边界层厚度等于半径, 以后进入完全发展的流动。

当边界层在管中心汇合时, 若边界层内为滞流, 则管内流动为滞流, 即整个边界层均为滞流层; 若边界层为湍流, 则管内流动为湍流。湍流时边界内存在滞流内层、缓冲层及湍流区。 Re 愈大, 湍动愈激烈, 滞流内层愈薄, 流动阻力也愈大。

② 边界层的分离, 加大了流体流动的能量损失, 除黏性阻力外, 还增加了形体阻力, 二者总称局部阻力。

③ 测量管内流动参数 (流速、压强等) 的仪表应安装在流动完全发展的平直管段上。

1.1.4.2 流体在管内的流动阻力

流体在管内的流动阻力由直管阻力和局部阻力两部分构成, 即

$$\sum h_f = f_l + h'_f$$

阻力产生的根源是流体具有黏性, 流动时产生内摩擦。固体表面促使流体流动时其内部发生相对运动, 提供了流动阻力产生的条件。流动阻力大小与流体性质、壁面情况及流动状况有关。

流动阻力消耗了机械能, 表现为静压能的降低, 称为压强降, 用 Δp_f 表示。

注意区别压强降 Δp_f , 与两个截面间的压强差 Δp 的概念。

(1) 流体在直管中的流动阻力

① 直管阻力通式

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

② 滞流时管截面上的速度分布方程式为

$$u_r = \frac{\Delta p_f}{4\mu l} (R^2 - r^2)$$

滞流时:

流体在管内作滞流流动时, 速度分布为抛物线方程。

在管中心线上, $r=0$, 速度为最大, $u_{\max} = \frac{\Delta p_f}{4\mu l} R^2$ 。

在管壁处, $r=R$, 速度为零。

管截面上的平均速度为管中心处最大速度的 1/2, 即

$$u = \frac{\Delta p_f}{8\mu l} R^2 = \frac{1}{2} u_{\max}$$

阻力损失

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l u}{d^2}$$

或

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \frac{32\mu l u}{d^2 \rho}$$

③ 湍流时的摩擦系数 λ (因次分析法) 对于水力光滑管, 当 $Re = 3000 \sim 1 \times 10^5$ 时

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$$

对于粗糙管, λ 与 Re 的关系图中三个不同区域:

滞流区 $Re \leq 2000$ $\lambda = 64 / Re$, λ 与 ϵ/d 无关,

湍流区 $Re > 2000$ $\lambda = (Re, \epsilon/d)$,

完全湍流区 (阻力平方区) $\lambda = f\left[f\left(\frac{\epsilon}{d}\right)\right]$, 与 Re 无关。

④ 圆形管内实验结果的推广——非圆形管的当量直径

$$d_e = 4r_H$$

r_H = 流通截面积/润湿周边。

注意: 不能用 d_e 来计算流体通过的截面积、流速和流量。

(2) 局部阻力 局部阻力系数法和当量长度法

$$h'_f = \xi \frac{u^2}{2}$$

及

$$h'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2}$$

(3) 管路系统的总能量损失

$$\Sigma h_f = \left(\lambda \frac{l + \Sigma l_e}{d} + \Sigma \xi \right) \frac{u^2}{2}$$

由上式可分析欲减小管路系统总阻力损失可能采取的措施, 诸如: ①合理布局, 尽量减小管长, 少装不必要的管件、阀门; ②适当加大管径及尽量选用光滑管; ③可能条件下, 将气体压缩或液化后输送; ④高黏度液体 (如原油) 可采用加热伴管输送; ⑤允许的话, 在液体中加入减阻剂; ⑥高强度磁力降黏减阻; ⑦对管壁面进行预处理——低表面能涂层或小尺度肋条结构。

与此同时也应注意, 有些情况下为了某种工程目的, 特意造成边界层分离或有意增加能量损失, 如节流流量计的设计、液体搅拌、传热及传质过程的强化等。

1.1.5 伯努利方程的工程应用

伯努利方程、连续性方程与能量损失方程的结合可以: ①确定管道中流体的流速或流量; ②确定容器间的相对位置; ③确定输送机械的有效功或轴功率; ④确定管路中流体的压强; ⑤进行管路计算; ⑥根据流体力学原理设计各种流量计。

1.1.5.1 管路计算

设计型计算 即给定输送任务, 设计合理的输送管路系统, 关键是选定管径。

操作型计算 对给定的管路系统求流量或对规定的输送流量计算压强降或有效功。一般需试差计算。

(1) 简单管路计算 简单管路是由等径或异径管段串联而成的管路。流体通过各管段的流量相等, 总阻力损失等于各管段损失之和。

(2) 并联管路计算 遵循原则为主管总流量等于各并联管段流量之和, 即

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

各并联管段的压强降相等, 即

$$\Sigma \Delta p_{f,1} = \Sigma \Delta p_{f,2} = \Sigma \Delta p_{f,3}$$

各并联管路中流量分配按等压降原则计算, 即

$$V_1 : V_2 : V_3 = \sqrt{\frac{d_1^5}{\lambda_1(l+l_e)_1}} : \sqrt{\frac{d_2^5}{\lambda_2(l+l_e)_2}} : \sqrt{\frac{d_3^5}{\lambda_3(l+l_e)_3}}$$

(3) 分支管路计算 遵循原则为主管总流量等于各支管流量之和, 即

$$V = V_1 + V_2$$

单位质量流体在各支管流动终了时的总机械能与能量损失之和相等, 即

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + \sum h_{f,0-1} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_{f,0-2}$$

1.1.5.2 流量(流速)测量

(1) 变压差(定截面)流量计 测速管(皮托管)、孔板流量计、喷嘴和文丘里流量计等均属变压差流量计。其中, 除测速管测量点速度以外, 其余三种测得的均是管截面上的平均速度。

对这类流量计, 若采用 U 形管液柱压差计读数 R 表示压强差, 则流量通式可写作

$$V_s = CA_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = CA_0 \sqrt{\frac{2R(\rho_A - \rho)g}{\rho}}$$

或

$$w_s = \rho V_s = CA_0 \sqrt{2R(\rho_A - \rho)\rho g}$$

式中, C 为流量系数, 测速管、文丘里与喷嘴流量计的 C 都接近于 1; 而孔板流量计的 C 在 0.6~0.7 之间为宜, 对于角接取法法的 C , 可由有关图查取。

在变压差流量计中, 文丘里、喷嘴流量计及测速管的流体阻力很小; 孔板流量计的 U 形管压差计读数及对流量变化反应灵敏, 但其缺点是流体流经孔板前后能量损失较大, 该损失称永久损失。

(2) 变截面(恒压差)流量计——转子流量计 转子流量计读取流量方便, 直观性好, 能量损失小, 测量范围宽, 可用于腐蚀性流体的测量, 但不能用于高温高压的场合, 且安装的垂直度要求较高。转子流量计的流量公式为

$$V_s = C_R A_R \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{A_f \rho}}$$

式中, C_R 为流量系数, 其值接近于 1。

转子流量计的刻度与被测流体的密度有关。当被测流体密度不同于标定介质密度时, 需对原刻度加以校正。若两种情况下流量系数 C_R 相等, 并忽略黏度差别的影响, 则同一刻度下, 两种液体的流量关系为

$$V_{s,2} = C_{R,1} \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_f - \rho_2)}{\rho_2(\rho_f - \rho_1)}}$$

同理, 用于气体的流量计, 同一刻度下, 两种气体的流量关系为

$$V_{s,g,1} = V_{s,g,2} \sqrt{\frac{\rho_{g1}}{\rho_{g2}}}$$

符 号 说 明

英文字母

α ——组分的质量分数;

A ——截面积, m^2 ;

d ——管道直径, m ;

d_e ——当量直径, m ;

d_0 ——孔径, m ;

E ——1kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

h ——高度, m ;

h_f ——1kg 流体流动时的能量损失, J/kg ;

h'_f ——局部能量损失, J/kg ;

H_e ——输送机械为 1N 流体所提供的有效压头, m;
 H_f ——压头损失, m;
 l ——长度, m;
 l_e ——当量长度, m;
 M ——摩尔质量, g/mol;
 N ——输送机械的轴功率, kW;
 N_e ——输送机械的有效功率, kW;
 p ——压强, Pa;
 Δp_f ——1m³ 流体流动时的压强降, Pa;
 P ——压力, N;
 r ——半径, m;
 R ——管道半径, 或液柱压差计读数, m;
 Re ——雷诺准数;
 S ——两流体层的接触面积, m²;
 T ——热力学温度, K;
 u ——流速, m/s;
 $u_{\max}$ ——流动截面上的最大速度, m/s;

u_r ——流动截面上某点的局部速度, m/s;
 V ——体积, m³;
 V_h ——体积流量, m³/h;
 V_s ——体积流量, m³/s;
 y ——组分的物质的量分数;
 w_s ——质量流量, kg/s;
 W_e ——输送机械对 1kg 流体所作的有效功, J/kg;
 Z ——位压头, m。

希腊字母

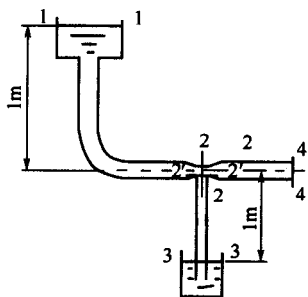
ϵ ——绝对粗糙度;
 ξ ——阻力系数;
 η ——效率;
 μ ——黏度, Pa·s;
 ρ ——密度, kg/m³;
 τ ——内摩擦应力, Pa。

1.1.6 例题

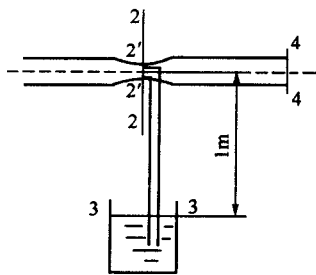
【例 1-1-1】 如图所示, 在管中部有一喉径, 喉径内径和水管内径之比为 0.8。在喉径处有一小管, 与下方 1m 处的水槽相连接, 忽略流体流动过程中的能量损失。

- (1) 判断垂直小管中的流体流向;
- (2) 若将垂直小管改成弯头小管, 如图所示, 判断弯头小管中的流体流向。

解 (1) 选取截面如图所示, 以 3—3 为基准面



例 1-1-1 图 (a)



例 1-1-1 图 (b)

$$3-3 \text{ 面机械能: } Et_3 = gz_3 + \frac{u_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} = 0$$

$$\begin{aligned}
 2-2' \text{ 处机械能: } Et'_2 &= gz'_2 + \frac{u'^2_2}{2} + \frac{p'_2}{\rho} \\
 &= 9.81 + \frac{p_2}{\rho}
 \end{aligned}$$

(1)

1—1 和 4—4 间列伯努利方程

$$\begin{aligned}
 gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} &= gz_4 + \frac{u_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + \sum h_{f_{1-4}} \\
 z_1 = 2\text{m} \quad z_4 = 1\text{m} \quad u_1 = 0 \quad p_1 = 0 \quad p_4 = 0 \quad \sum h_{f_{1-4}} &= 0
 \end{aligned}$$

所以 $u_1 = \sqrt{2g\Delta z} = \sqrt{2 \times 9.81(2-1)} = 4.43 \text{ m/s}$

1—1 和 2—2 间列伯努利方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

$$z_1 = 2 \quad z_2 = 1 \quad u_1 = 0 \quad p_1 = 0 \quad u_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 u_1 = \left(\frac{1}{0.8}\right)^2 \times 4.43 = 6.92 \text{ m/s}$$

$$\frac{p_2}{\rho} = g(z_1 - z_2) - \frac{u_2^2}{2} = 9.81 \times 1 - \frac{6.92^2}{2} = -14.13 \text{ J/kg}$$

代入式 (1) 得, $Et'_2 = 9.81 - 14.13 = -4.32 \text{ J/kg}$

$Et'_2 < Et_3$ 所以水从下往上流。

(2) 假设小管内水静止

$$Et'_2 = 9.81 + \frac{p'_2}{\rho} \quad Et_3 = 0$$

$$\frac{p'_2}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

则

$$Et'_2 = 9.81 + \frac{6.92^2}{2} - 14.13 = 19.62 \text{ J/kg}$$

$Et'_2 > Et_3$ 所以水从上往下流。

【例 1-1-2】 如图所示, 距管路入口 1m 处装有一闸阀, 其阻力系数为 30, 试求

(1) 管路的流量? 管内最低压强?

(2) 若将阀门安装在距管路入口 5m 处, 其阻力系数不变, 管内流量和最低压强如何变化?

解 (1) 选取截面如图, 2—2 为基准面。

$$1-1 \text{ 与 } 2-2 \text{ 间: } g(h+H) = \frac{u^2}{2} + \sum hf_{1-2}$$

$$u = \sqrt{\frac{2g(H+h)}{1 + \xi_B + \xi_C + \lambda \frac{H}{d}}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times (12+1)}{1 + 0.5 + 30 + 0.02 \times \frac{12}{0.1}}} = 2.74 \text{ m/s}$$

1—1 和 B—B 间能量衡算

$$\begin{aligned} p_B &= (\rho gh + p_a) - (1 + \xi_B) \frac{\rho u^2}{2} \\ &= (1000 \times 9.81 \times 1 + 1.013 \times 10^5) - 1.5 \times \frac{1000 \times 2.74^2}{2} = 1.055 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

1—1 和 C—C 间能量衡算

$$\begin{aligned} p_C &= [\rho g(h+z) + p_a] - \left(1 + \xi_B + \xi_C + \lambda \frac{z}{d}\right) \frac{\rho u^2}{2} \\ &= 1000 \times 9.81 \times 2 + 1.013 \times 10^5 - \left(1 + 0.5 + 30 + 0.02 \times \frac{1}{0.1}\right) \times \frac{1000 \times 2.74^2}{2} = 1950 \text{ Pa} \end{aligned}$$

故最低压强在 C 处。但 p_C 低于水的饱和蒸汽压 $p_v = 2338 \text{ Pa}$ 。说明水在 C 点已汽化, C 点压力实际等于 p_v , 故重新计算 u 。

1—1 和 C—C 间列伯努利方程

$$\begin{aligned} g(h+z) + \frac{p_a}{\rho} &= \frac{p_v}{\rho} + \frac{u^2}{2} + \left(\xi_B + \xi_C + \lambda \frac{z}{d}\right) \frac{u^2}{2} \\ U &= \sqrt{\frac{2 \left[g(h+z) + \frac{p_a - p_v}{\rho} \right]}{1 + \xi_A + \xi_B + \lambda \frac{z}{d}}} = \sqrt{\frac{2 \left(9.81 \times 2 + \frac{101300 - 2338}{1000} \right)}{1 + 0.5 + 30 + 0.02 \times 10}} = 2.71 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$V = \frac{\pi d^2}{4} U = 0.785 \times 0.1^2 \times 2.71 = 2.13 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

(2) 假设管内不汽化, 按前面已求得 $u = 2.74 \text{ m/s}$

$$\text{此时: } p'_c = p_c + \rho g \Delta h = 1950 + 1000 \times 9.81 \times (5 - 1) = 2.82 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p'_c > p_v$$

$$V' = \frac{u'}{u} V = \frac{2.74}{2.71} \times 2.13 \times 10^{-2} = 2.15 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

【例 1-1-3】 在图示管路中装有以球心阀和以压力表, 管路出口距高位槽液面的垂直距离为 10m, 压力表轴心距管中心的垂直距离为 0.5m, 假定压力表接管内充满液体。

(1) 调节阀开度, 使出口流速为 1 m/s , 此时压力表 M 的读数为 7.848×10^4 (表压), 试求阻力损失 h_{fAC} 、 h_{fAB} 和 h_{fBC} 各为多少?

(2) 若将阀门开大, 使流量加倍, 问 h_{fAC} 、 h_{fAB} 和 h_{fBC} 各有何变化? 此时压力表读数为多少? (设阀门开大前后, 沿程阻力系数不变)

解 (1) 在断面 1—1 和 2—2 之间列伯努力方程 (以管出口高度为基准), 得到

$$\sum h_{fAC} = gH - \frac{u_2^2}{2} = 9.81 \times 10 - \frac{1^2}{2} = 97.6 \text{ J/kg}$$

在断面 1—1 和 B—B 之间列伯努力方程, 得到

$$\sum h_{fAC} = gH - \frac{p_B}{\rho} - \frac{u_2^2}{2} = 9.81 \times 10 - \frac{7.848 \times 10^4 + 0.5 \times 9.81 \times 1000}{1000} - \frac{1^2}{2} = 14.2 \text{ J/kg}$$

在断面 B—B 和 2—2 之间列伯努力方程, 得到

$$\sum h_{fAC} = \frac{p_B}{\rho} = \frac{7.848 \times 10^4 + 0.5 \times 9.81 \times 1000}{1000} = 83.4 \text{ J/kg}$$

或

$$\sum h_{fBC} = \sum h_{fAC} - \sum h_{fAB} = 97.6 - 14.2 = 83.4 \text{ J/kg}$$

(2) 阀门开大, 流量加倍, 出口流速 $u'_2 = 2 \text{ m/s}$

$$\sum h'_{fAC} = gH - \frac{u'^2_2}{2} = 9.81 \times 10 - \frac{2^2}{2} = 96.1 \text{ J/kg}$$

因 λ 不变, 管路 AB 的阻力损失与流速的平方成正比, 故

$$\frac{\sum h'_{fAB}}{\sum h_{fAB}} = \frac{u'^2_2}{u_2^2} = \frac{2^2}{1^2} = 4$$

$$\sum h'_{fAC} = 4 \sum h_{fAB} = 4 \times 14.2 = 56.8 \text{ J/kg}$$

可见流量加倍, 管路 AB 的阻力损失显著增加, 而 B 点的压强则减少为

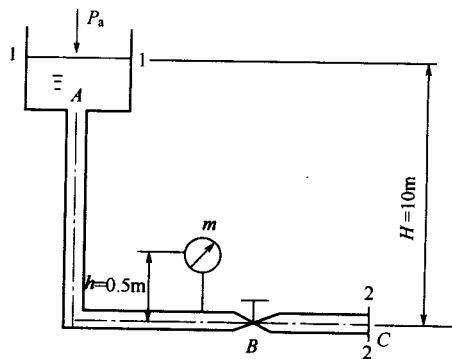
$$p'_B = \rho gH - \frac{\rho u'^2_2}{2} - \rho \sum h_{fAB} = 1000 \times 9.81 \times 10 - \frac{1000 \times 2^2}{2} - 1000 \times 56.8 = 3.93 \times 10^4 \text{ Pa}$$

压力表读数为

$$p'_M = p'_B - \rho gH = 3.93 \times 10^4 - 1000 \times 9.81 \times 0.5 = 3.44 \times 10^4 \text{ Pa}$$

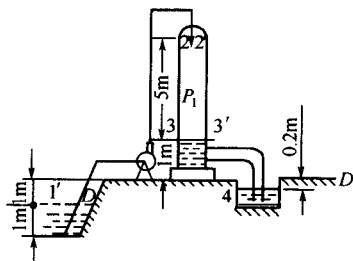
因阀门开大, 管路 BC 的阻力损失减少为

$$\sum h'_{fBC} = \sum h'_{fAC} - \sum h'_{fAB} = 96.1 - 56.8 = 39.3 \text{ J/kg}$$



例 1-1-3 图

【例 1-1-4】 如图，用泵将河水打入洗涤塔中，喷淋下来后流入下水道。已知：管道尺寸



例 1-1-4 图

$\phi 114\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，喷嘴内径 $d_2 = 212\text{mm}$ ，流量 $85\text{m}^3/\text{h}$ ，泵的吸入和压出管路总长分别为 5m 和 35m （不包括出口阻力损失的当量长度在内），管内摩擦系数 $\lambda = 0.023$ 。塔内和下水道水面保持平面，喷头处的压强较塔内高 0.02MPa ，水从塔中流到下水道的阻力损失为 81J/kg 。泵的效率为 65% ，求泵所需功率？

解 取截面如图所示。1—1 和 2—2 之间列机械能衡算式：

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_{f1-2}$$

河面为基准面 $z_1 = 0$ $z_2 = 7\text{m}$ $p_1 = 0$ $u_1 = 0$

$$u_2 = \frac{V}{\pi d_2^2/4} = \frac{85/3600}{\pi \times 0.212^2/4} = 0.67\text{m/s} \quad \text{管内流速: } u = \frac{85/3600}{\pi (114-2 \times 4)^2 \times 10^{-6}/4} = 2.68\text{m/s}$$

$$\sum h_{f1-2} = \lambda \frac{\sum l u^2}{d} = 0.023 \times \frac{5+35}{0.106} \times \frac{2.68^2}{2} = 31.17\text{J/kg}$$

$$\text{代入机械能方程得: } W_e = 9.81 \times 7 + \frac{0.67^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + 31.17 = 100.1 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1)$$

$$\text{又} \quad \frac{p_2}{\rho} = \frac{p_{\#}}{\rho} + \frac{2 \times 10^3}{1000} = \frac{p_3}{\rho} + 20 \quad (2)$$

$$3-3 \text{ 和 } 4-4 \text{ 间列机械能衡算式: } gz_3 + \frac{u_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} = gz_4 + \frac{u_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + \sum h_{f3-4}$$

以 4—4 为基准面 $z_3 = 1.2\text{m}$ $z_4 = 0$ $u_3 = u_4 = 0$ $\sum h_{f3-4} = 8\text{J/kg}$

$$\text{解得: } \frac{p_3}{\rho} = 8 - 9.81 \times 1.2 = -3.77\text{J/kg}.$$

$$\text{代入式 (2) 得 } \frac{p_2}{\rho} = -3.77 + 20 = 16.23\text{J/kg}.$$

代入式 (1) 得

$$W_e = 100.1 + 16.23 = 116.33\text{J/kg}$$

$$N = Ne/\eta = \frac{\rho V W_e}{\eta} = \frac{1000 \times 85 \times 116.33}{3600 \times 0.65} = 4225.7\text{W}$$

【例 1-1-5】 已知：一并联管路 $V = 2\text{m}^3/\text{h}$ ，各支管长度： $l_1 = 1200\text{m}$ ， $l_2 = 1500\text{m}$ ， $l_3 = 800\text{m}$ ， $d_1 = 0.6\text{m}$ ， $d_2 = 0.5\text{m}$ ， $d_3 = 0.8\text{m}$ ， $\rho_{\#} = 1000\text{kg/m}^3$ ， $\mu = 1.0 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ ， $\epsilon = 0.2\text{mm}$ 。

求： V_1 、 V_2 、 V_3 。

解 在主管处分为几支，然后又汇合为一主管的管路，其特点如下。

(1) 能量损失 (1kg 流体)

$$E_A = E_B + \sum h_{f1} \quad E_A = E_B + \sum h_{f2} \quad E_A = E_B + \sum h_{fAB}$$

$$\text{故} \quad \sum h_{fAB} = \sum h_{f1} = \sum h_{f2} \quad (1)$$

$$\text{且} \quad E_A = gZ_A + \frac{u_A^2}{2} + \frac{P_A}{\rho} \quad E_B = gZ_B + \frac{u_{B2}^2}{2} + \frac{P_B}{\rho}$$

$$(2) \text{ 流量} \quad V = V_1 + V_2 \quad (2)$$

各支路流量受式 (1) 和式 (2) 制约

流量分配：由式 (1) 得

$$\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{u_1^2}{2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{u_2^2}{2}$$