

《化 学 工 程 基 础》 学习指引和习题解答

林爱光 编著

清 华 大 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

本书是配合清华大学一类课“化工原理”教材《化学工程基础》而编写的,旨在帮助读者对课程的内容加深理解和熟练应用。考虑到本书的独立性和自成体系,第1~6章首先列出基本内容和主要计算公式以及注意事项,然后再列出习题和习题解答、讨论题和讨论题解答。第7章附有1997年至2002年清华大学招收硕士生“化工原理”入学考试试题和详尽解答,还附有6套近几年清华大学“化学工程基础”考试试题和详尽解答。

本书内容丰富,深浅适宜,解答详尽,使读者在研读题解过程中,加深对概念的理解,学习解题技巧,并从中悟出解化工习题的精髓。读者在使用本书时,请先自行解题,然后再对照题解的具体内容,检验自己解题的具体步骤,进行分析比较,以期达到提高的目的。

本书可作为高等院校化工类及相关专业学生学习“化工原理”课程及考研复习的参考书,也可作为教师教授本课程的参考书,还可作为从事化工工作的技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

《化学工程基础》学习指引和习题解答/林爱光编著. —北京:清华大学出版社,2003

ISBN 7-302-06490-3

.化... .林... .化学工程 - 高等学校 - 教学参考资料 .TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 022942 号

出 版 者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www. tup. com. cn](http://www.tup.com.cn)

责任编辑:刘明华

印 刷 者:北京四季青印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×960 1/16 印张:25 25 字数:464 千字

版 次:2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-06490-3/ TQ·12

印 数:0001~5000

定 价:33.00 元

目 录

绪论.....	1
1 流体的流动与输送	3
1.1 基本内容、主要计算公式和注意事项.....	3
1.1.1 概述.....	3
1.1.2 流体静力学方程.....	3
1.1.3 流体流动的基本方程.....	6
1.1.4 流速与流量的测量	10
1.1.5 流体流动时的阻力	11
1.1.6 管路计算	14
1.1.7 两相流动	14
1.1.8 流体输送设备	16
习题解答	19
课堂练习题	46
讨论题	50
符号说明	54
2 传热过程和传热设备.....	56
2.1 基本内容、主要计算公式和注意事项	56
2.1.1 概述	56
2.1.2 热传导	57
2.1.3 对流传热	60
2.1.4 辐射传热	62
2.1.5 热交换过程的传热计算	63
习题解答	66
讨论题	89
符号说明	97
3 精馏.....	98
3.1 基本内容、主要计算公式和注意事项	98

3 1 1	概述	98
3 1 2	双组分溶液的气液相平衡	98
3 1 3	平衡蒸馏和简单蒸馏	100
3 1 4	双组分连续精馏的分析和计算	101
3 1 5	间歇精馏	106
	习题解答	107
	讨论题	145
	符号说明	155
4	吸收	157
4.1	基本内容、主要计算公式和注意事项	157
4 1 1	概述	157
4 1 2	气液平衡	157
4 1 3	传质机理和传质速率	159
4 1 4	两相间的传质	161
4 1 5	吸收塔的设计与计算	163
	习题解答	168
	讨论题	197
	符号说明	203
5	气液传质设备	205
5.1	基本内容、主要计算公式和注意事项	205
5 1 1	概述	205
5 1 2	填料塔	205
5 1 3	板式塔	208
	习题解答	214
	符号说明	224
6	化学反应工程学	226
6.1	基本内容、主要计算公式和注意事项	226
6 1 1	概述	226
6 1 2	基础反应器	226
6 1 3	物料在反应器内的流动模型	227
6 1 4	均相反应器的计算	227
6 1 5	理想均相反应器的优化选择	233
6 1 6	物料停留时间分布和流动模型	235

6 1 7	非理想流动反应器内的流动模型——扩散模型.....	239
6 1 8	气固相催化反应器.....	241
	习题解答.....	246
	符号说明.....	255
7	试题与解答	257
7.1	清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试试题与解答	257
7 1 1	1997 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	257
7 1 2	1998 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	265
7 1 3	1999 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	276
7 1 4	2000 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	286
7 1 5	2001 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	296
7 1 6	2002 年清华大学硕士研究生“ 化工原理 ”入学考试 试题与解答.....	308
7.2	清华大学本科生“ 化工原理 ”考试试题与解答	317
7 2 1	1996 年 4 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	317
7 2 2	1996 年 6 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	326
7 2 3	1997 年 6 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	333
7 2 4	1998 年 1 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	340
7 2 5	1999 年 6 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	347
7 2 6	2002 年 1 月清华大学本科生“ 化工原理 ”考试 试题与解答.....	353
	参考文献.....	360

附录.....	361
附录 1 化工常用法定计量单位	361
附录 2 常用单位的换算	362
附录 3 某些气体的重要物理性质	365
附录 4 某些液体的重要物理性质	366
附录 5 干空气的物理性质(101.33kPa)	369
附录 6 水的物理性质	370
附录 7 饱和水蒸气表(按温度排列)	372
附录 8 饱和水蒸气表(按压强排列)	374
附录 9 一些有机物的蒸气压	376
附录 10 常用固体材料的密度和比热容	377
附录 11 某些固体材料的热导率	378
附录 12 某些液体的热导率	379
附录 13 某些气体和蒸气的热导率	380
附录 14 管内流体常用流速范围	382
附录 15 列管换热器的传热系数的参考值	382
附录 16 壁面污垢的热阻	384
附录 17 管子的规格	385
附录 18 泵的规格	388
附录 19 4—72—11 型离心通风机规格.....	394
附录 20 管壁的绝对粗糙度	394
附录 21 泰勒标准筛的规格	395

绪 论

(1) 基本概念与方法

过程的速率与推动力成正比,而与过程的阻力成反比。这一基本公式贯穿本课程始终,在动量传递、热量传递和质量传递中都得到反复的应用。此公式可表示为

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

物料衡算

$$\sum F = \sum D + A \quad (0-1)$$

式中: $\sum F$ —— t 时间内输入物料质量的总和;

$\sum D$ —— t 时间内输出物料质量的总和;

A —— t 时间内系统中积累的物料质量总和。

对于稳态过程,则

$$\sum F = \sum D \quad (0-2)$$

热量衡算

$$\sum H_F + Q = \sum H_P + Q_A \quad (0-3)$$

式中: $\sum H_F$ ——单位时间内输入系统的焓值的总和,即物料带入的热量总和;

$\sum H_P$ ——单位时间内输出系统的焓值的总和,即物料带出的热量总和;

Q ——单位时间内从环境传入(系统传给环境)的热量;

Q_A ——单位时间内系统中热量的积累。

对于稳态过程,则

$$\sum H_F + Q = \sum H_P \quad (0-4)$$

进行质量衡算和热量衡算时,必须首先要划定衡算的系统,其次要确定衡算的对象与衡算的基准。

画出清晰的示意图,对理解题意和在解题过程中少犯或不犯错误是非常必要的。

在化工计算中,往往涉及很多参数,如在流体力学中应用伯努利方程时有上下游两个截面,截面上有各种物理量;在换热器的计算中涉及到不同的换热截面、不同厚度的保温层、冷热流体的进出口温度等;在计算精馏的理论塔板时,涉及进出塔板的物流量、组成以及种种参数;在吸收过程中,进出塔的组成和物流量,特别是在吸收和解吸的联合流程的计算中,涉及的参数更多。所有这些计算,画出清晰的示意图对解题都非常有帮助。

(2) 单位制与单位换算

化学工程中各种单位制的单位间的换算因子可以在《化学工程基础》附录 2 中查到,但是我们应当会根据几个基本关系式和定义自行得出换算因子。其实,用 $F = ma$ 及其在重力场中 $a = g = 9.807 \text{ m/s}^2$ 就能解决很大部分的常用换算。

1 流体的流动与输送

1.1 基本内容、主要计算公式和注意事项

1.1.1 概述

化工生产中所处理的原料、半成品及产品大多数是流体,化工生产所涉及的过程大都是在流动条件下进行的。因此,动力的消耗,过程进行的好坏及设备的投资都与流体的流动状态有关。

本章主要讨论流体流动的基本原理和流体在管内流动的规律,以及利用这些原理和规律解决工程实际问题。

有4个方程构成本章的主要框架,它们是:流体静力学方程、流体连续性方程、伯努利方程以及阻力计算公式。流体静力学方程是特定条件下(静止流体)的伯努利方程。由伯努利方程中的物理量导出本章的几个知识点。

首先是有关流体物理性质的几个物理量,包括密度、压强、流量、流速和粘度,应该知道有关它们的算法。其次,伯努利方程中的阻力项引出了有关流体流动的讨论。而谈到阻力,必须明确雷诺数在阻力计算中的作用。根据雷诺数确定流体流动的类型,再根据流型得到阻力系数。要掌握非圆形管和局部阻力的计算。最后,伯努利方程中需要输入外功的量和流体输送设备输给流体的功应该达到平衡,重点解决好工作点的问题。

1.1.2 流体静力学方程

1) 流体的性质

(1) 流体的密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中: ρ ——密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

(2) 理想气体方程

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \rho' \frac{T'p}{Tp'} \quad (1-2)$$

式中: p ——气体的绝对压强, kPa;

T ——气体的热力学温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/ kmol;

R ——气体常数, 8 314 kJ (kmol · K)。

(3) 液体混合物的密度

$$\frac{1}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{\rho_i} \quad (1-3)$$

式中: ρ_n ——液体混合物的平均密度, kg/ m³;

ρ ——液体混合物中 i 组分的密度, kg/ m³;

x_{wi} ——液体混合物中 i 组分的质量分数。

(4) 气体混合物的密度

$$\rho_n = \sum_{i=1}^n \rho x_{vi} \quad (1-4)$$

式中: ρ_n ——气体混合物的平均密度, kg/ m³;

ρ ——气体混合物中 i 组分的密度, kg/ m³;

x_{vi} ——气体混合物中 i 组分的质量分数。

(5) 混合气体的平均摩尔质量

$$M_m = \sum_{i=1}^n M_i y_i \quad (1-5)$$

式中: M_m ——混合气体的平均摩尔质量, kg/ kmol;

M_i ——混合气体中 i 组分的摩尔质量, kg/ kmol;

y_i ——混合气体中 i 组分的摩尔分数。

如果气体混合物可以按照理想气体处理, 一般应该用式(1-2)计算其密度, 其中 M 值用平均摩尔质量 M_m 来代替。如习题 1-3 中只给出温度为 500 , 压强为 0 .101MPa 时的各种气体的体积百分数, 不能用非操作条件下, 如 20 各种气体的密度, 用式(1-4)计算, 而应该先用式(1-5)求出 M_m , 再用式(1-2)计算其密度。

2) 流体的压强

压强的定义:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中: p ——流体的静压强, Pa;

F ——垂直作用于流体的压力, N;

A——作用面的面积, m^2 。

压强垂直作用于流体,所以,在以后的流体流动过程的计算中,取垂直于流动方向的截面来进行计算。即使在流体静力学的计算中,也应该注意这一点。

正确掌握各种压强单位之间的换算非常重要,主要有以下的关系:

$$1\text{atm} = 1.033\text{ kgf/cm}^2 = 760\text{ mmHg} = 10.33\text{ mH}_2\text{O} = 1.0133\text{ bar} \\ = 1.0133 \times 10^5\text{ Pa}$$

$$1\text{kgf/cm}^2 = 0.9678\text{ atm} = 735.6\text{ mmHg} = 10\text{ mH}_2\text{O} = 0.9807\text{ bar} \\ = 9.807 \times 10^4\text{ Pa}$$

因为化工生产与实验和当地的大气压息息相关,所以必须透彻理解绝对压强、表压和真空度的关系(见图 1-1)。对不可压缩流体,在后面的伯努利方程的计算中,上下游的压强可以用表压,这会给计算带来很大的方便。如某一截面处在大气中,此时的表压为零。当然,对可压缩流体是绝对不能简单地用表压来表示的。

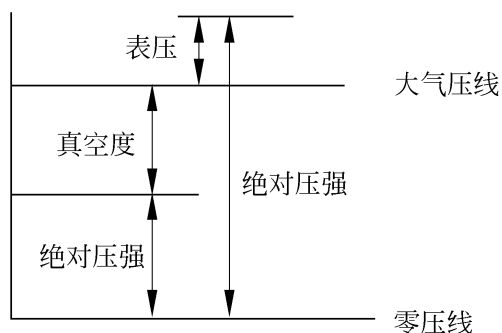


图 1-1 绝对压强、表压与真空度的关系

经常有同学忽略了习题 1-5 中孔盖外面的大气压的存在,以至于得出 14 颗螺钉的结果,这其实是错误地将盖外环境置于真空中的结果。

绝对压强:用绝对零点作起点计算的压强。

表压:绝对压强与大气压强之差

$$p_{\text{表压}} = p_{\text{绝对压强}} - p_{\text{大气压}}$$

真空度:大气压强与绝对压强之差,为负表压强的值

$$p_{\text{真空度}} = p_{\text{大气压}} - p_{\text{绝对压强}}$$

3) 流体静力学基本方程

微分形式:
$$dp/\rho + g dz = 0 \quad (1-7)$$

积分形式:
$$p/\rho + gz = \text{常数} \quad (1-8)$$

一般形式:
$$p_1/\rho + gz_1 = p_2/\rho + gz_2 \quad (1-9)$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (1-10)$$

流体柱高度的计算式:

$$h = (p_2 - p_1)/(\rho g) \quad (1-11)$$

如果流体液面上方是大气压 p_0 ,则在流体液面下方 h 深的液面上的压强 p_2 为

$$p_2 = p_0 + \rho gh \quad (1-12)$$

讨论:流体静力学方程的应用条件是在连续、均一(当然是静止)的流体内。

当流体不连续时,应该分段计算,如习题 1-7 倒 U 形管的计算。

(1) 静力学方程式表明,静压强仅与垂直位置有关,而与各点的水平位置无关,即当 $z_1 = z_2$ 时, $p_1 = p_2$ 。

(2) 当液面上方的压强为 p_0 时,液层下方深 h 的液面处的压强 p_2 即可用

$$p_2 = p_0 + \rho gh \quad (1-13)$$

计算,此即帕斯卡定律。

(3) 式(1-18)表明,在连续、均一的流体内,各点的机械能守恒。

(4) 式(1-11)便是液柱压强计的原理。

上述诸式中的脚标 0, 1, 2, 分别代表 0 截面、1 截面和 2 截面。如 p_0, p_1, p_2 分别表示 0 截面、1 截面和 2 截面上的压强。

4) 流体静力学方程的应用

学习流体静力学方程的应用不仅仅是为了得出最后的计算式,更重要的是深刻理解推导过程中如何应用静力学基本方程式和静力学原理来得出最后的结果。只有这样,才能融会贯通地应用静力学基本方程式去解决其他的问题。

(1) U 形管压差计

$$p_1 - p_2 = R(\rho_0 - \rho)g \quad (1-14)$$

当被测流体为气体,指示液为液体时,式(1-14)可简化为

$$p_1 - p_2 = R\rho_0 g \quad (1-14a)$$

如果 p_2 通大气,则 R 反映的是表压。

(2) 倾斜 U 形管压差计

$$p_1 - p_2 = R_L \sin\alpha(\rho_0 - \rho)g \quad (1-15)$$

式中: α ——U 形管压差计的倾斜管与水平面的夹角。

(3) 微差压差计(双液体 U 形管压差计)

$$p_1 - p_2 = R(\rho_A - \rho_C)g \quad (1-16)$$

扩大室内径和 U 形管内径之比应大于 10, 否则,要考虑扩大室内液面的变化(见习题 1-8)。从上式可知, ρ_A 和 ρ_C 的密度差越小越好, 因为使用倾斜 U 形管压差计和微差压差计的目的无非是使 R 尽可能地大, 以便于观察、读取。

(4) 液封

液封的目的是防止设备内的气体泄露出去以及设备外的气体窜到设备中来, 而又使流体能自由地流出。液封高度可由下式计算:

$$z = p_{\text{表压}} / (\rho_A g) \quad (1-17)$$

1.1.3 流体流动的基本方程

1) 流量与流速

(1) 体积流量

$$q_v = V/t$$

(2) 质量流量

$$q_m = m'/t$$

(3) 质量流量与体积流量的关系

$$q_m = \rho q_v \quad (1-18)$$

(4) 流速、平均流速的计算

$$u = q_v / A \quad (1-19)$$

(5) 质量流量

$$q_m = u A \rho \quad (1-18a)$$

化工生产中,经常使用圆形管道,注意,计算出来的管径要规格化,即根据计算的直径,在有关工艺手册或产品说明书中可查得就近的尺寸。实际流速是在选定的规格化以后的尺寸 d 下的流速:

$$d = \frac{4q_v}{\pi u} \quad (1-20)$$

(6) 质量流速

单位时间单位截面积的质量:

$$G = q_m / A = q_v \rho / A = u \rho \quad (1-18b)$$

2) 粘度

(1) 牛顿粘性定律

$$\tau = F/A = \mu(d u / dy) \quad (1-21)$$

式中: τ ——剪应力, Pa;

μ ——比例系数,称为粘性系数或动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$d u / dy$ ——法向速度梯度, $1/\text{s}$ 。

(2) 混合液体的粘度

对于分子不缔合的液体混合物:

$$\lg \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \lg \mu_i \quad (1-22)$$

(3) 对于低压下的混合气体

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-23)$$

化工生产中碰到的物料往往是混合物,如用吸收和精馏分离混合物,其混合物的物性就要用到一些经验公式,上面两式就是计算混合物粘度的经验式。

3) 流体流动的类型及其判断

雷诺数 Re :

$$Re = du\rho/\mu$$

Re 是无因次的特征数, 使用任何单位制, 都会得到同一数值。

用雷诺数判断流动型态:

$Re < 2\,000$: 层流, $u = 0.5u_{\max}$;

$2\,000 < Re < 4\,000$: 过渡流, 与外部条件有关, 如流体进入管道的情况、管壁粗糙度、有无外界震动;

$Re > 4\,000$: 湍流, $u = 0.8u_{\max}$ 。

4) 流体稳定流动时的连续性方程

连续性方程:

$$q_{m1} = q_{m2} = q_{m3} = q_m = \text{常数}$$

$$A_1 u_1 \rho = A_2 u_2 \rho \quad (1-24)$$

$$q_m = A_1 u_1 \rho = A_2 u_2 \rho = \text{常数} \quad (1-25a)$$

若流体为不可压缩流体, 则

$$q_v = A_1 u_1 = A_2 u_2 = Au = \text{常数} \quad (1-25b)$$

对于圆形管道:

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (1-26)$$

上述诸式中脚标 1, 2, 3 分别表示截面 1, 2, 3, 如 u_1 , u_2 分别表示截面 1, 2 处的流速。在化工计算中, 经常要用到流速和管径的关系, 必须时刻留意这个关系式, 避免犯错误。

5) 流体流动过程的能量守恒和转化(伯努利方程)

(1) 流体稳定流动过程的机械能衡算式既适用于可压缩流体, 也适用于不可压缩流体

$$g\Delta z + \frac{\Delta u^2}{2} + \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = W_e - \sum h_f \quad (1-27)$$

式中: Δz ——位差, m;

W_e ——外界流体输送设备输入体系的能量, J/kg;

$\sum h_f$ ——流体流动过程损耗的能量, J/kg。

(2) 对于不可压缩流体, 有以下几种形式的伯努利方程

mkg 的流体, 其各项的单位为 J

$$mgz_1 + \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mp_1}{\rho} + mW_e = mgz_2 + \frac{mu_2^2}{2} + \frac{mp_2}{\rho} + m \sum h_f \quad (1-28)$$

单位质量的流体,其各项的单位为 J/kg

$$g\Delta z + \frac{\Delta u^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho} = W_e - \sum h_f$$
$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-28a)$$

单位体积的流体,其各项的单位为 Pa

$$\rho g z_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + p_1 + \rho W_e = \rho g z_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + p_2 + \rho \sum h_f \quad (1-28b)$$

重量在法定单位制中已经不用,它曾是工程单位制中一个很重要的物理量,在讨论伯努利方程中的压头时,涉及到单位重量(N)的流体,因此这里还是列出单位重量(N)的流体表示的伯努利方程式。

单位重量(N)的流体,其各项的单位为 $m(\text{流体})$

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \sum H_f \quad (1-28c)$$

(3) 输送设备对流体所做的有用功

$$P_e = W_e q_m = W_e q_v \rho = H_e q_v \rho g \quad (1-29)$$

式中: H_e ——扬程,单位重量流体从泵轴得到的功, m 。

(4) 实际功率 P

$$P = P_e / \eta \quad (1-29a)$$

式中: η ——泵的效率。

(5) 伯努利方程的应用及其注意事项

截面选取: 选取截面时,首先确定上游和下游截面,明确所讨论的流动系统的范围,两截面应该垂直于流动方向;流体在两截面间应该连续;未知量最少。

讨论: 课堂练习题 2 中的(2),流动方向已经变了,上下游截面也随之变化,原来的上游截面变成了下游截面,原来的下游截面则变成了上游截面。对于流体不连续的情况,应该分段计算,如习题 1-7。

基准面: 原则上基准面是任意选取,但一般取最低面。

伯努利方程式中各项物理量的单位必须一致。

讨论: 习题 1-12, 1-13, 1-15 给出能量损失的单位均为 J/kg , 应用伯努利方程解题时必须注意用相应的公式。

如果两个横截面积相差很大,如大截面容器和小管子,则可取大截面处的流速为零。

有分支管路的情况,要注意质量衡算。

截面处不允许有急弯,截面间允许有急弯。

伯努利方程及其应用是流体流动过程的核心,如要正确、有效地解决实际问题,就必须掌握应用伯努利方程的应用范围,牢记上述的 6 点注意事项。

1.1.4 流速与流量的测量

1) 测速管

$$u = C \frac{2R(\rho' - \rho)g}{\rho} \tag{1-30}$$

$$C = 0.98 \sim 1.00$$

测速管安装在稳定段,管长一般为 50 倍直径,至少 8 ~ 12 倍直径。注意,测出的流速 u 为点速度。

2) 孔板流量计

$$u = C_0 \frac{2Rg(\rho' - \rho)}{\rho} \tag{1-31a}$$

$$q_v = \frac{\pi}{4} d_0^2 C_0 \frac{2Rg(\rho' - \rho)}{\rho} \tag{1-31b}$$

式中: C_0 ——孔流系数,与 Re 和 d_0/d_1 有关。

图 1-2 为孔板流量计流量系数的关系曲线图。

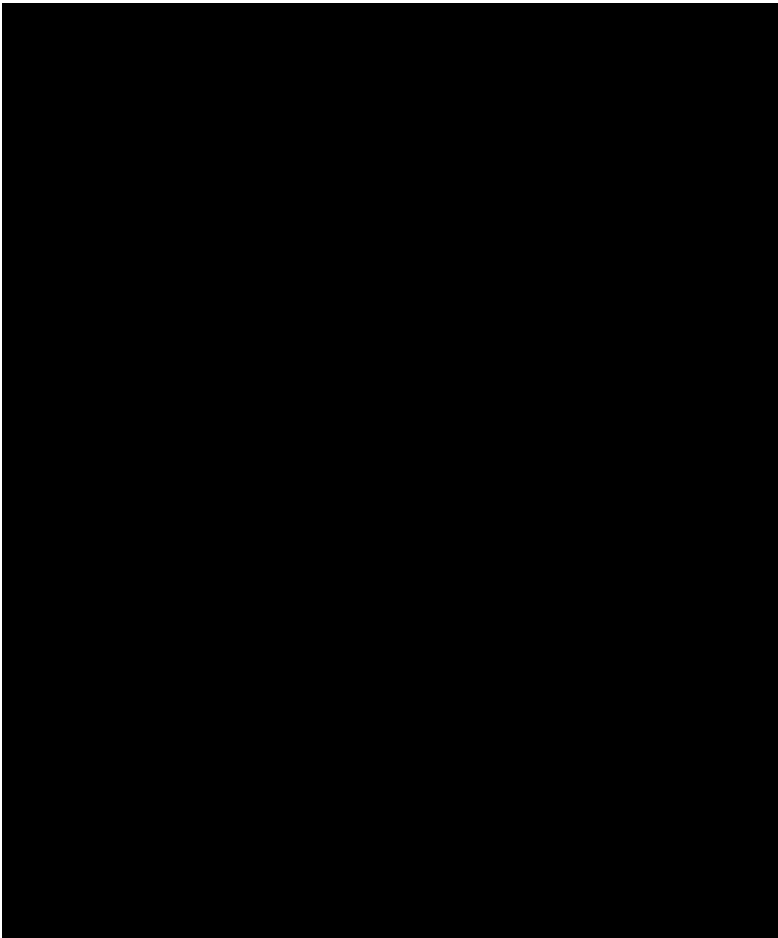


图 1-2 孔板流量计流量系数的关系曲线图

注意,根据式(1-31a)计算出来的是孔板流量计的小孔处的流速,管道内的流速要根据式(1-26)换算。

3) 转子流量计

$$u_2 = C_R \frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \rho} \quad (1-32)$$

当 $Re \geq 10^4$, $C_R \approx 0.98$ 时

$$q_v = u_2 A_2 = C_R A_2 \frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \rho} \quad (1-33)$$

1.1.5 流体流动时的阻力

1) 管路的沿程阻力

(1) 阻力计算的范宁(Fanning)公式

范宁公式有下列 3 种形式:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (1-34a)$$

$$\sum h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u_m^2}{2} \quad (1-34b)$$

$$\sum H_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u_m^2}{2g} \quad (1-34c)$$

应该用哪一个阻力计算式要和伯努利方程中的阻力项一一对应,(1-34a)的单位为 Pa,(1-34b)的单位为 J/kg,(1-34c)的单位为 m(流体)。

计算圆形直管内流体层流流动时的阻力损失的哈根(Hagen)-泊谔叶(Poiseuille)方程:

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l u_m}{d^2} \quad (1-35)$$

(2) 沿程阻力系数

图 1-3 管内流体流动沿程阻力系数曲线图描绘了阻力系数和雷诺数及相对粗糙度的关系:

层流区: $Re \leq 2000$

$$\lambda = 64/Re \quad (1-36)$$

摩擦系数 λ 与管壁粗糙度无关。

过渡区: $2000 < Re < 4000$

在雷诺实验中,红色液体的细线波动,阻力按湍流计算。

湍流区: $Re > 4000$

图 1-3 中虚线以下, λ 与 Re , ε/d 都有关。 λ 随 ε/d 增加而增加,随 Re 增大