



宁夏大学“十一五”教材建设丛书
陈育宁 主编

化工原理学习指导

HUAGONG

王福良 主编

YUANLIXUEXIZHIDAO

宁夏人民出版社

化工原理

HUAGONG 学习指导 YUANLIXUEXIZHIDAO

王福良 主编

宁夏人民教育出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

化工原理学习指导 / 王福良主编. —银川: 宁夏人民出版社, 2006. 2

ISBN 7-80596-868-3

I. 化... II. 王... III. 化工原理 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字 (2006) 第014757号

化工原理学习指导

王福良 主编

责任编辑 杨立国 张燕宁 柳毅伟

装帧设计 吴海燕【小狼工作室】

责任印制 来学军

宁夏人民教育出版社 出版发行

地 址 银川市北京东路139号出版大厦 (750001)

网 址 www.nxcbn.com

电子信箱 nxcbmail@126.com

邮购电话 0951-5044614

印 刷 宁夏精捷彩色印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.5

字 数 380千

印 数 1350册

版 次 2006年12月第1版

印 次 2006年12月第1次印刷

书 号 ISBN 7-80596-868-3/G·817

定 价 29.00元

版权所有 翻版必究

序

陈育宁

教材建设是高等学校教学基本建设的重要组成部分,选用和编写高质量的教材,是高校不断提高教学水平、保障教学质量的基础。

为了落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和宁夏大学“十一五”教学工作规划及教材建设的主要任务,更新课程体系,提高教学质量,以适应现代化建设和市场经济的需要,适应培养面向 21 世纪新型高素质人才的需要,启动宁夏大学“十一五”教材建设工程,编写、出版“宁夏大学‘十一五’教材建设”丛书,是必要和及时的。

这套丛书的编写和出版,必须坚持为我校的教育教学工作服务,要根据我校专业建设、课程建设、生源状况、教学水平及师资力量等实际情况,充分发挥我校学科优势和专业特长,努力使教材建设不断深化,整体水平不断提高;要逐步建立以国家规划教材的使用为重点,特色鲜明的自编教材为补充的学校教材建设与管理体制;要不断扩大教材种类,提高教材质量,探索教材建设与供应新途径,建立教材编写与选用新机制,开拓教材使用与管理新局面。

近年来,我校的教育教学工作随着学校规模的不断扩大和办学实力的增强,有了新的发展和提高。2005年,教育部与宁夏回族自治区政府签署协议,共建宁夏大学,为我校加快发展提供了新的机遇。实现学校的发展目标,培养高素质的建设人才,主动服务于国家和地方经济社会发展,是我校面临的重要战略任务。而高层次、高质量的人才培养,必须要求有高水平、高质量的教材建设。为此,本科教育的学科、专业及课程设置,都要作相应的调整。“宁夏大学‘十一五’建材建设”丛书的编写和出版,要适应这一调整,紧紧把握中国高等教育改革与发展的脉搏,与时俱进,面向未来,服务社会;要结合21世纪社会、经济、科技、文化、教育发展的新特点,吸收新成果,解决新问题;要根据素质教育和学分制教学管理的需要,突出适用性和针对性;要在加强基础课、实验课教材编写与出版的同时,不断深化基础理论基础课、实验课教材编写与出版的同时,不断深化基础理论研究,拓宽教材知识面,努力实现整套教材科学性、系统性、开放性、前瞻性和实践性的有机结合,充分体现起点高、水平高,结构严密、体系科学,观点正确、应用性强的特点。

我们相信,在我校广大教师和科研骨干的努力下,在出版界同人的支持下,“宁夏大学‘十一五’教材建设”丛书的编写出版,必将提高质量,多出精品,形成特色;必将面向市场,走向社会,服务教学,为宣传宁夏大学,树立宁夏大学学术形象,推动宁夏大学本科教学水平不断提高发挥积极作用。

2005年8月于银川

化工原理学习指导

Contents 目录

绪 论	001
第一章 流体流动	005
第二章 流体输送设备	042
第三章 非均相物系的分离	067
第四章 传 热	089
第五章 蒸 发	131
第六章 蒸 馏	147
第七章 吸 收	185
第八章 蒸馏和吸收塔设备	223
第九章 液-液萃取	247
第十章 干 燥	264
附 录	292
参考文献	310
后 记	311

绪 论

质量守恒、能量守恒是自然科学中两个最基本的定律,《化工原理》中的许多重要公式都是依据上述两条定律推导出来的。平衡关系、速率关系也是化工计算的基础。

在进行衡算时,常涉及物料的单位不同,状态不同,计算前必须统一基准(标准)、统一状态、统一单位。

1. 物理量的单位换算

(1) 正规单位换算

重力加速度在国际单位制(SI)中, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, 在 $cgs = 981 \text{ cm/s}^2$ 。两者包括单位在内的数值比称为换算因子。重力加速度的换算因子为: $\frac{9.81 \text{ m/s}^2}{981 \text{ cm/s}^2} = \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 1$ 任何单位间的换算因子都是两个相等量之比,其值为1。任何物理量乘以或除以换算因子都不会改变原量的大小,正规单位换算就是利用这一原则去掉不要的单位,留下需要的单位进行的。如把 100 kg(力)/cm^2 换算为 N/m^2 。

$$100 \text{ kg(力)/cm}^2 \times \frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kg(力)}} \times \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 = 9.81 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

(2) 利用公式

如 $h = \frac{p}{\rho g}$ (a) $p = h\rho g$ (b) 如将压强表示成[米流体柱]用(a)式;表示成[Pa]或[N/m^2]则用(b)式。

(3) 现成换算关系

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$= 1.0133 \text{ bar} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

2. 物料衡算

物料衡算是质量守恒定律的一种表达形式,即

$$\sum G_i = \sum G_o + G_A \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_i$ ——输入物料的总和;

$\sum G_o$ ——输出物料的总和;

G_A ——累积或损失的物料。

当定态(稳定)操作时,物料累积量为零,则式(0-1)简化为:

$$\sum G_i = \sum G_o$$





3. 能量衡算

“化工”中涉及的能量经常是热能或热量,故本书以介绍热能衡算为主,其依据是能量守恒定律,即

$$\sum Q_1 = \sum Q_0 + Q_L \quad (0-2)$$

式中 $\sum Q_1$ ——各流股带入的热量总和, kJ 或 kW;

$\sum Q_0$ ——各流股带出的热量总和, kJ 或 kW;

Q_L ——向周围环境散失的热量, kJ 或 kW。

4. 平衡关系

物理或化学变化过程,都有一定的方向、速率和极限。在一定条件下过程达到了变化的极限,即达到了平衡状态。例如,当两个温度不同的物体互相紧密接触时,热量便由温度较高的一方传向温度较低的另一方,直至两物体的温度相等,热量传递过程就达到了平衡。此时,两物体分别向对方传递热量的速率(即单位时间传递的热量)相等。平衡状态实际上是两个方向相反过程的速率相等的状态,是一种动态平衡。任何一种平衡状态的建立都是有条件的,当条件发生变化时,原来的平衡状态就不复存在,平衡就发生移动,直到在新的条件下达到新的平衡。可见平衡状态有两种属性,即相对性和可变性。生产中经常利用它的可变性使平衡向有利于生产的方向移动。

5. 过程速率

平衡关系只表明过程变化的极限,不涉及以什么样的速率趋向平衡。然而,过程速率往往比平衡关系更为重要,因为强化生产直接与过程速率有关。

所谓过程速率,就是单位时间过程的变化量。例如,单位时间传递的热量,称传热速率;单位时间通过分子扩散传递的物质质量,称扩散速率等等。速率也可表示为单位时间,单位体积或面积的变化量,又称通量。

一个物系如果处于非平衡状态,就会发生使物系趋向平衡的变化过程。任何变化过程都同时存在着推动力和阻力。物系的状态偏离平衡的程度越大,推动力就越大,变化的速率也越大;反之,物系的状态越接近平衡,推动力和速率就越小。阻力的作用方向与推动力相反,它对速率的影响也相反。

综上所述,过程速率与推动力和阻力的关系为:

$$\text{过程速率} \propto \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

推动力的性质,决定于过程的性质。例如流体流动过程的推动力是压强差;热量传递过程的推动力是温度差;物质传递过程的推动力是浓度差或分压差等。过程阻力比较复杂,后续章节中讨论。

6. 进行物料、能量衡算时,要按以下步骤进行:

(1) 确定衡算范围(即系统):要根据已知量和未知量所牵涉的范围而定。用一虚线方框把系统与外界隔开。

(2) 确定衡算对象:可以对总物料进行衡算,也可以对某一组分进行衡算。用带箭头的直线表示物料的流动方向。箭头指向方框者为输入,箭尾指向方框者为输出,输入的量等于输出的量。衡算对象须确定物料基准。

(3) 确定衡算基准:间歇操作常以一批处理的物料量为准,连续操作常以单位时间处理的物料量为准。

(4) 物料量可以用质量或物质的量表示,一般不用体积表示,衡算必须用统一的单位制。物料较多时,计算结果可以列成图表。进行能量衡算时,还要规定基准水平面、基准温度和基本状态。

【例 0-1】 用蒸发器浓缩含糖 15% 的稀溶液,以 500 kg/h 流量进料,用蒸汽加热到含糖 60% 的浓溶液,问所得浓溶液和蒸出水分若干?

解 如题意:衡算范围取蒸发器,见图 0-1 中虚线内。

方法一:

基准——500 kg/h 稀液(可变基准)

设蒸发出水分 x kg/h, 得浓溶液 y kg/h。

分别列总物料及糖的物料衡算式,得

$$\begin{cases} x + y = 500 \\ 500 \times 15\% = 60\% y \end{cases}$$

解方程组得: $x = 375$ kg/h, $y = 125$ kg/h

方法二:

基准——500 kg/h 稀液(可变基准)

设蒸发失水 x kg/h, 则所得浓液为 $(500 - x)$ kg/h。对水进行物料衡算:

蒸发前含水量 = 蒸发后含水量 + 失水量

$$500(1 - 15\%) = (500 - x)(1 - 60\%) + x$$

解得: $x = 375$ kg/h

所得浓液为 $(500 - x) = 500 - 375 = 125$ kg/h

方法三:

基准——以处理的稀液中含纯糖量 $500 \times 15\% = 75$ kg/h 为基准(不变基准)。蒸

发前含水率为 $\frac{85}{15}$ kg 水/kg 糖, 蒸发后含水率为 $\frac{40}{60}$ kg 水/kg 糖。

设失水 x kg/h, 对水作物料衡算求取 x :

$$\text{则} \quad 75 \times \frac{85}{15} = 75 \times \frac{40}{60} + x$$

解得: $x = 375$ kg/h

所得浓度为 $500 - 375 = 125$ kg/h

$$\text{或为} \quad 75 + 75 \times \frac{40}{60} = 125 \text{ kg/h}$$

比较以上三种解法:可以看出计算结果是一致的,但方法三以不变基准、列物料衡

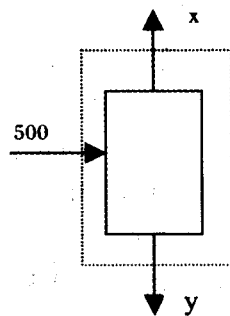


图 0-1





算式最简单,这是化工计算中常用的方法,为以后学习打下基础。

[例0-2] 某贮槽内,用饱和水蒸气将20吨溶液从293K加热到323K通入贮槽内加热蛇管中,冷凝水则在368K排出,溶液的平均热容为 $3.77\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,操作时槽向四周散失的热量共计 $2.51\times 10^5\text{kJ}$,问需要蒸汽多少?

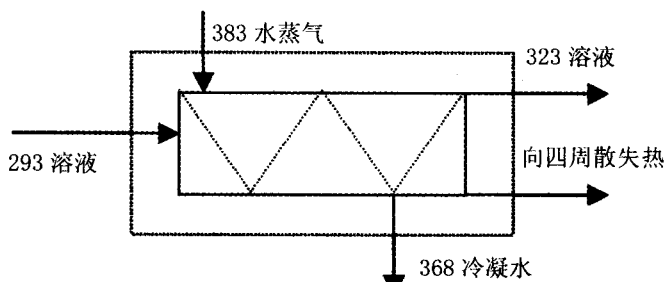


图0-2

解 范围——贮槽,如图0-3中虚线所示。

基准——20吨溶液;基温——273 K

基本状态——液体。

设需饱和水蒸气的量为 $m\text{ kg}$ 。

查水蒸气性质表(见附录)得:383K 饱和水蒸气的焓为 2693.5 kJ/kg ,368K 水的焓为 397.77 kJ/kg 。

输入热量:

293 K 溶液的焓 $Q_1 = 20 \times 10^3 \times 3.77 \times (293 - 273) = 1.508 \times 10^6\text{ kJ}$

283 K 蒸汽的焓 $Q_2 = 2693.5\text{ mkJ}$

输出热量:

323 K 溶液的焓 $Q_3 = 20 \times 10^3 \times 3.77 \times (323 - 273) = 3.77 \times 10^6\text{ kJ}$

368 K 溶液的焓 $Q_4 = 397.77\text{ mkJ}$

向四周散失的热量 $Q_5 = 2.51 \times 10^5\text{ kJ}$

根据热量衡算式 $\sum Q_{\text{入}} = \sum Q_{\text{出}}$ 可得

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$1.508 \times 10^6 + 2693.5m = 3.77 \times 10^6 + 397.77m + 2.51 \times 10^5$$

解得: $m = 1094.6\text{ kg}$ 。

表0-1 贮槽热量衡算结果

输入热量		输出热量	
项目	kJ	项目	kJ
293 溶液	1.508×10^6	323 溶液	3.77×10^6
383 水蒸气	2.948×10^6	368 冷凝水	4.35×10^5
		向四周散失	2.51×10^5
总计	4.456×10^6	总计	4.456×10^6

第一章 流体流动

化工厂管道密如蛛网,流体输送设备和仪表种类繁多,如能做到正确选用、布管,必须研究流体性质及流动规律。

1.1 重要概念与公式

1.1.1 密度与压强

流体的密度是温度和压强的函数: $\rho = f(T, p)$ 。对液体而言,压强 p 对密度 ρ 影响较小。流体的密度可直接测定,也可以查表,但必须换算成操作条件下的数据,还可以通过公式来计算或由比重求得。

(1) 密度
$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

理想气体:
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

m ——气体的质量, kg ;

V ——气体的体积, m^3 ;

p ——气体的绝对压强, N/m^2 或 Pa ;

T ——气体的绝对温度, K ;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;

R ——气体常数, $8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ 。

在 273 K , $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的标准状态下,气体的密度

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (1-2)$$

在操作条件下:
$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (1-3)$$

① 混合气体的密度计算是基于质量守恒定律,以 1 m^3 混合气为基准,各组分混合前后其质量不变,计算公式为

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i x_i = \frac{p_{\text{总}}}{RT} \sum_{i=1}^n M_i y_i \quad (1-4)$$

式中 ρ_i 、 M_i 、 x_i 、 y_i 、——分别为气体混合物中组分 i 的密度、摩尔质量、体积百分数和摩尔分数;

$\sum_{i=1}^n M_i y_i$ ——气体混合物的平均摩尔质量, kg/kmol 。

② 液体混合物的密度,以 1 kg 混合液体为基准,若各组分在混合前后的总体积



不变。则:

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i} \quad (1-5)$$

式中 α_i ——密度为 ρ_i 的组分在混合物中的质量分率, kg/kg。

(2) 压强

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

压强表示流体垂直作用于单位面积上的力。SI 制单位为 N/m^2 (Pa)。其单位很多, 主要换算关系见教材。

1.1.2 流体静力学基本方程及其应用

〔思路〕 静止、匀质且连续的流体在重力与压力的作用下, 内部压强的变化规律可表示为:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} = \text{常数}$$

$$\text{或} \quad p = p_0 + \rho gh \quad (1-6)$$

若 p_0 = 大气压 $p = \rho gh$ (表压)

式中 p_1, p_2 ——流体内部质点在 1、2 处的压强, Pa;

z_1, z_2 ——流体内部质点 1、2 距某一基准面的高度, m;

h ——液柱高度, m;

p_0, p ——分别为液体上方和液柱高度为 h 处的压强, Pa。

(1) 静力学方程多用于计算压强, 所以解题时最好用等压面, 即在连通着的同一流体内部, 深度相同的水平面上各点压强大小相等。由 (1-6) 知: $z_1 = z_2, p_1 = p_2$

(2) 由静力学方程可推导出水平管路上 U 型压差计的测压差公式:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R \quad (1-7)$$

式中 R ——压强计的读数, m;

ρ_A, ρ_B ——指示液与被测流体的密度。

对 (1-7) 式讨论:

① 若 $p_1 > p_2, p_1$ 通大气 $\Delta p = (\rho_A - \rho_B) g R$ (真空度)

② 若 $p_1 > p_2, p_2$ 通大气 $\Delta p = (\rho_A - \rho_B) g R$ (表压)

③ 若被测流体是气体, 因 $\rho_A \geq \rho_B$ 则 $\Delta p \approx \rho_A g R$

④ 如倾斜管路, 则 $\Delta p = (\rho_A - \rho_B) g R + \rho_B g Z$

$Z - 1 - 1'$ 为基准水平面, $2 - 2'$ 为截面倾斜的高度差, m;

(3) 液封装置用来密封气体, 其原理是静力学方程。液封高度 $h = p_{\text{表}} / \rho g$, $p_{\text{表}}$ 为气体容器中气体的表压强, N/m^2 。

1.1.3 流体的平均速度, (简称速度), 体积流量, 质量流量及质量流速间的关系

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-8)$$



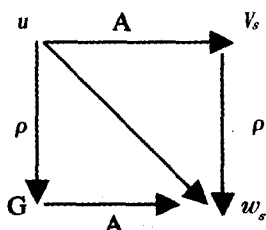
$$V_s = Au \quad (1-9)$$

$$w_s = V_s \rho = Au\rho \quad (1-10)$$

$$G = \frac{w_s}{A} = u\rho \quad (1-11)$$

式中 u ——流体的速度, m/s;
 V_s ——流体的体积流量, m³/s;
 A ——流道的截面积, m²;
 w_s ——流体的质量流量, kg/s;
 G ——流体的质量流速, kg/(m²/s)。

以上关系图示如下:



从 $u \rightarrow w_s$ 有两条途径
 (1) $u \rightarrow V_s \rightarrow w_s$
 (2) $u \rightarrow G \rightarrow w_s$

由(1-8)得
$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} = \sqrt{\frac{V_s}{0.785u}} \quad (1-12)$$

式中 d —管道或塔设备的直径(内径), m。

1.1.4 连续性方程

流体稳态流动时,由质量守恒定律得:

$$u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = w_s = \text{常数} \quad (1-13)$$

对不可压缩性液体,可化简为:

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = V_s = \text{常数} \quad (1-14)$$

若输送管道的截面没有变化, A 为常数,故: $u_1 = u_2 = \dots = u = \text{常数}$

1.1.5 柏努利方程(能量恒算式)

(1) 流体稳态流动时的总机械能衡算式,①(以单位质量 1 kg 为基准)。

$$gz_1 + u_1^2/2 + p_1/\rho + W_e = gz_2 + u_2^2/2 + p_2/\rho + \sum h_f \quad (1-15)$$

式中 W_e —外加功, J/kg;

$\sum h_f$ —流动时因摩擦而损失的能量, J/kg;

gz_1 和 gz_2 、 $u_1^2/2$ 和 $u_2^2/2$ 、 p_1/ρ 和 p_2/ρ ——分别表示单位质量流体所具有的位能、动能、静压能,单位均为 J/kg。

该方程适用于不可压缩的实际流体。对气体而言,当压强变化不大

($\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$) 时,仍可适用,但密度应取平均值。





② 上式也可写成如下形式(以单位重量 1 N 为基准):

$$z_1 + u_1^2/2g + p_1/\rho g + H_e = z_2 + u_2^2/2g + p_2/\rho g + H_f \quad (1-16)$$

式中 H_e ——外界对单位重量的流体所做的功, J/N, 或 m 流体柱, 称为外加压头;

H_f ——损失压头, J/N, 或 m 流体柱;

z_1 和 z_2 、 $u_1^2/2g$ 和 $u_2^2/2g$ 、 $p_1/\rho g$ 和 $p_2/\rho g$ ——分别叫做位压头、动压头、静压头, 单位均为 J/N, 或 m 流体柱。

③ 以单位体积 1m^3 流体为基准的柏努利方程式:

$$z_1\rho g + \frac{u_1^2}{2}\rho + p_1 + W_e\rho = z_2\rho g + \frac{u_2^2}{2}\rho + p_2 + \rho \sum h_f \quad (1-17)$$

上式各项单位均为 Pa, 表示单位体积流体所具有的能量, $\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{Pa}$ 。

(2) 理想流体的柏努利方程

对理想流体, $H_f = 0$, $H_e = 0$ 则有:

$$z_1 + u_1^2/2g + p_1/\rho g = z_2 + u_2^2/2g + p_2/\rho g \quad (1-18)$$

柏努利方程, 其物理意义是流体的任一截面上的位能、动能与静压能之和为一常数(机械能守恒), 但各种形式的能量可以相互转化。

(3) 当流体静止时, 因 $u = 0$, 则:

$$z_1 + p_1/\rho g = z_2 + p_2/\rho g \quad (1-19)$$

这就是静力学方程。显然它只不过是柏努利方程的特殊形式。柏努利方程揭示了, 流体在静止及流动所具有的各种形式的机械能之间的相互转化规律, 因此在解决流体输送问题时应用很广。

1.1.6 输送机械的轴功率

$$N = \frac{N_e}{\eta} = \frac{W_e w_s}{\eta} \quad (1-20)$$

式中 N_e ——单位时间内流体从输送机械获得的能量, 称为有效功率, J/S 或 W;

N ——单位时间输送机械向流体提供的能量, 即转轴消耗的能量, J/S 称为轴功率, J/s 或 W;

η ——输送机械总效率, ($\eta = \eta_{\text{容积}} \times \eta_{\text{机械}} \times \eta_{\text{水力}}$)。

1.1.7 管路阻力

水在水平等径直管内流动, 若在该水平管上联结若干根竖直的玻璃管, 我们可以观察到, 竖直接管内水面沿流向逐渐下降。我们任选两计算截面列柏式求解得: $H_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$, 阻力的表现——压强降。阻力来源: 内因是流体的黏性力, 外因是流动状态。

[思路] 流体在流动过程中所消耗的一部分或全部能量是用来克服流动阻力的, 阻力计算很重要。

(1) 牛顿黏性定律

流体流动时, 单位面积上的摩擦力(剪应力) τ 的大小与速度梯度 du/dy 成正比,

即牛顿黏性定律。表示为:

$$F = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} S \text{ 或 } \tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

$$\text{当径向速度变化为曲线关系时: } \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-21)$$

式中 F ——内摩擦力, N;

S ——两层流体接触面积, m^2 ;

τ ——内摩擦应力或剪应力。

比例系数 μ 为流体的黏度, SI 单位为 $kg/m \cdot s$ ($N \cdot s/m^2$, 或 $Pa \cdot s$)。常用的换算关系: $1cP$ (厘泊) $= 10^{-2}P$ (泊) $= 10^{-3}Pa \cdot s$ 。黏度与密度之比 (即 $\nu = \mu/\rho$) 为运动黏度, 单位为 m^2/s 。

① 分子不缔合的混合液体的平均黏度

$$lg\mu_m = \sum x_i lg\mu_i \quad (1-22a)$$

x_i ——液体混合物中组分的摩尔分数。

② 常压下混合气体的黏度

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-22b)$$

式中 μ_m ——常压下混合气体的黏度;

y_i ——气体混合物中组分的摩尔分数;

μ_i ——与气体混合物同温下组分的黏度;

M_i ——气体混合物中组分的分子量;

i ——表示组分的序号。

(2) 流体流动类型

可用无因次雷诺准数 $Re = d u \rho / \mu$ 来判断流动类型:

$Re \leq 2000$, 为层流 (滞流), 此为层流区;

$2000 < Re < 4000$, 为过渡区, 一般工程计算中, $Re > 2000$ 的情况可作湍流处理;

$Re \geq 4000$, 为湍流 (紊流), 此为湍流区。应该指出, 以 Re 为判据将流动分为三个区, 但是只有两种流型, 过渡区并非表示一种过渡的流型, 它只是表示在此区内可能出现层流, 也可能出现湍流。

层流时, 平均流速为管中心最大流速的二分之一, 主要由液体的黏性引起; 湍流时, 平均流速为管中心最大速度的 0.8 倍, 主要是由流体质点的脉动引起。

(3) 流体通过直管的摩擦阻力

摩擦阻力以能量损失的大小表示:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad J/kg \quad (1-23)$$



以压强降的形式表示为:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad \text{Pa} \quad (1-24)$$

以上两式是直径为 d , 长度为 l 的圆形直管中阻力损失的计算通式即范宁 (Fanning) 公式, 对层流与湍流均适用。 λ 称为摩擦系数。如果知道 λ , 计算阻力就方便了。

① 层流:
$$\lambda = f(Re) = \frac{64}{Re} \quad (1-25)$$

② 湍流: 对光滑管而言, 可采用布拉修斯 (Blasius) 公式计算, 即

$$\lambda = f(Re) = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (1-26)$$

上式适用范围为 $Re = 3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$

对粗糙管而言, λ 是 Re 与相对粗糙度的函数, 即 $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ 。可通过查 λ 获得 (见雷诺准数与摩擦阻力系数图)。 ε 为管壁绝对粗糙度, 可从有关书上查的, d 为管内径。

③ 对非圆形管路, 上述公式中的直径 d 要用当量直径 d_e 来代替。

$$d_e = \frac{4 \times \text{流体流通截面积}}{\text{润湿周边长度}} \quad (1-27)$$

用 d_e 计算湍流阻力比较可信, 用于滞流是不可信的, 一般 $\lambda = C/Re$, C 为一与管道形状有关的系数, C 的值可从有关化工手册上查到。如当流通截面积为环形时, $C = 96$ 。

(4) 管路中的局部阻力

其计算方法有两种: 当量长度法和阻力系数法。

① 当量长度法 将流体流过局部地区所产生的局部阻力折算成相当于流体流过长度为 l_e 的同直径的直管阻力来计算, 表达式为

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

或

$$\Delta p'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-28)$$

管件和阀门等的 l_e 值由实验测定, 也可从有关书上查到。

② 阻力系数法 将克服局部阻力所引起的能量损失表示成动能 $u^2/2$ 的倍数, 即

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

或

$$\Delta p'_f = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-29)$$

局部阻力系数 ζ , 根据局部障碍的具体情况, 由实验测定, 或查有关书本和化工手册。

(5) 管路中的总阻力

柏努利方程中的 $\sum h_f$ 为总的阻力损失, 应包括直管阻力和局部阻力两部分, 则

$$\sum h_f = h_f + h'_f = \lambda \frac{l + \sum l_e}{d} \frac{u^2}{2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} \quad (1-30)$$



工程上常用损失压头(m 流体柱) 表示流体流动阻力,即

$$\sum H_f = h_f + h'_f = \lambda \frac{l + \sum l_e}{d} \frac{u^2}{2g} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2g} \text{ J/kg}$$

(1 - 31)

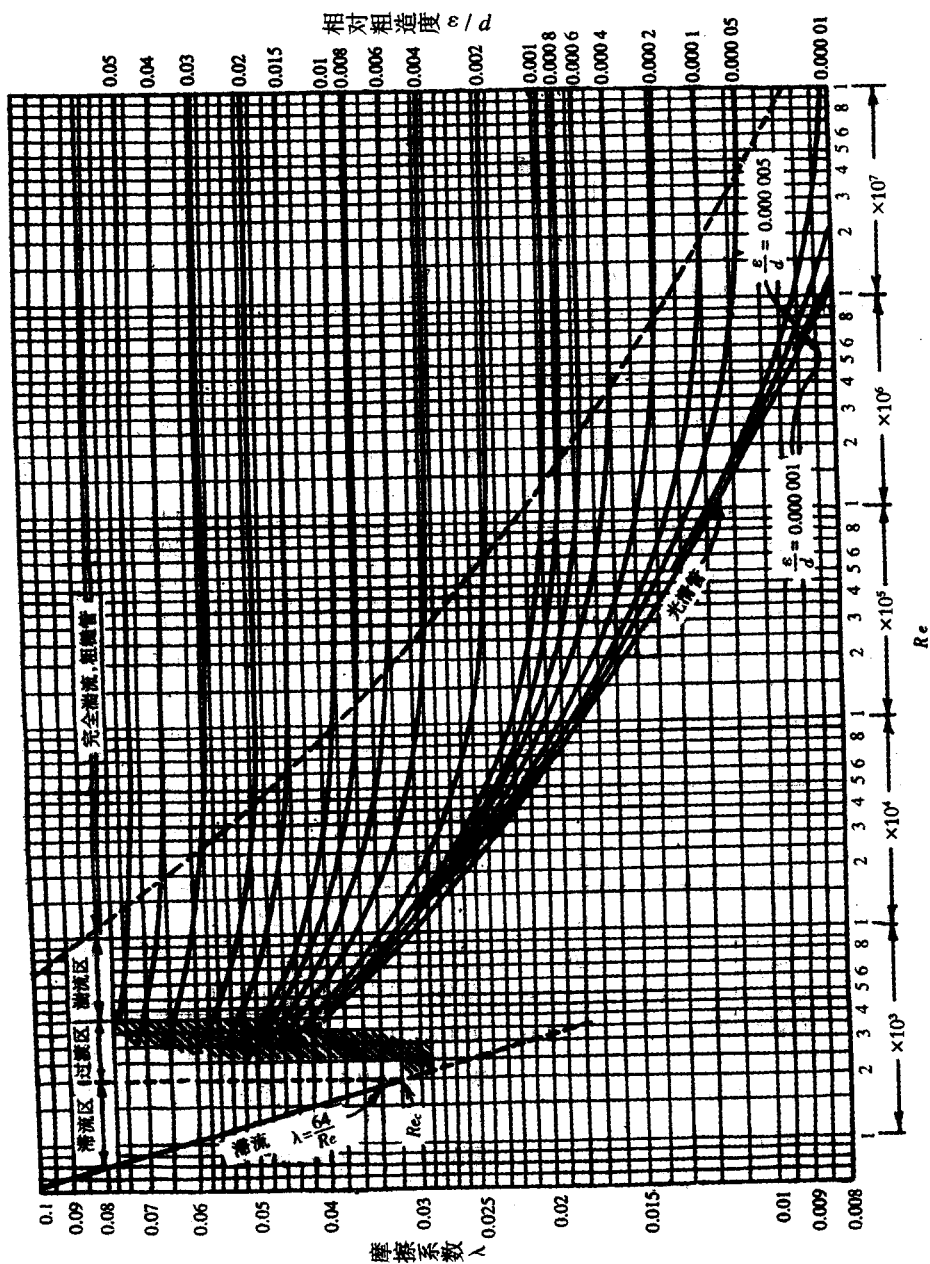


图 1 - 1 摩擦系数与雷诺数及相对粗糙度的关系

