

高校经典教材同步辅导丛书
配套天大修订版·夏清、陈常贵主编

九章丛书

Unit Operations
of Chemical Engineering

化工原理

(修订版)

同步辅导及习题全解

(上下册合订本)

主 编 陈洪明 宋 波



◆ 知识点窍 ◆ 逻辑推理 ◆ 习题全解
◆ 全真考题 ◆ 名师执笔 ◆ 题型归类



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高校经典教材同步辅导丛书

化工原理（修订版）同步辅导 及习题全解

主 编 陈洪明 宋 波

编 委（排名不分先后）

程丽园	李国哲	陈有志	苏昭平
郑利伟	罗彦辉	邢艳伟	范家畅
孙立群	李云龙	刘 岩	崔永君
高泽全	于克夫	尹泉生	林国栋
黄 河	李思琦	刘 闯	侯朝阳



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内容提要

本书是配合天津大学姚玉英、夏清、陈常贵主编的《化工原理》(修订版,天津大学出版社)而编写的教材辅导书,旨在帮助读者深刻理解化工原理教材的重点内容,牢固掌握基础知识和基本原理,培养正确的思维方法,以及提高读者的知识水平和应试能力。

本书可作为高等院校化工类各专业的参考用书,也可供考研复习使用。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理(修订版)同步辅导及习题全解/陈洪明,
宋波主编. —北京:中国水利水电出版社,2009

(高校经典教材同步辅导丛书)

ISBN 978-7-5084-5975-2

I. 化… II. ①陈…②宋… 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(2008)第161779号

书 名	高校经典教材同步辅导丛书
作 者	化工原理(修订版)同步辅导及习题全解
出版 发行	主 编 陈洪明 宋 波 中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68367658(营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市梦宇印务有限公司
规 格	148mm×210mm 32开本 9.75印张 400千字
版 次	2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷
印 数	0001—6000册
定 价	17.80元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

化工原理是高等院校化工类各专业必须的一门主干课程,它属于技术基础课,在高等学校的教学计划中起到为自然学科和应用学科衔接的作用。

本书是配合天津大学姚玉英、夏清、陈常贵主编的《化工原理》(修订版,天津大学出版社)而编写的教材辅导书,旨在帮助读者深刻理解化工原理教材的重点内容,牢固掌握基础知识和基本原理,培养正确的思维方法,以及提高读者的知识水平和应试能力。

本书各章主要有五部分:

一、基本要求——结合理工类学校化工原理考研要求,分别对各章知识点做了简要概括,使读者在学习过程中做到目标明确,有的放矢。

二、主要考点分析——将各章节的内容进行了简明扼要的叙述、归纳和总结,突出必须掌握和理解的核心内容,以加深读者对其的理解。

三、典型例题精解——本部分精选了化工原理课程中具有代表性的经典例题,并辅以分析。希望读者在对这些例题的学习后,能达到举一反三,触类旁通。

四、课后习题全解——本部分依据天大修订版的《化工原理》的教材,选以各章习题做详细解答,本书除了有传统习题的解题过程外,还有以下特点:

1. **知识点窍**:运用公式、定理及定义来点明知识点;
2. **逻辑推理**:阐述习题的解题过程;
3. **解题过程**:概念清晰、步骤完整、数据准确、附图齐全。

把“知识点窍”、“逻辑推理”、“解题过程”串起来,做到融会贯通,最后给出教材课后习题的答案,在解题思路和解题技巧上进行精练分析和引导,巩固所学,达到举一反三的效果。

五、思考题——学习上的努力取决于个人的努力和自我鞭策,本部分通过思考题的解答,主要供学生自我检测通过一章的学习是否掌握了本章的重点和难点。

本书在编写过程中,主要参考了匡国柱主编的《化工原理学习指导》、丛德滋等主编的《化工原理详解与应用》及姚玉英等主编的《化工原理学习指导》等,在此深表感谢!

由于编者水平有限及编写时间仓促,不妥之处在所难免,希望广大读者不吝批评指正。

编者

2008年12月

目 录

绪 论	(1)
基本要求	(1)
课后习题详解	(2)
第一章 流体流动	(4)
基本要求	(4)
典型例题精解	(9)
课后习题详解	(18)
思考题解答	(38)
第二章 流体输送机械	(43)
基本要求	(43)
典型例题精解	(48)
课后习题详解	(52)
思考题解答	(60)
第三章 非均相物系的分离和固体的流态化	(65)
基本要求	(65)
典型例题精解	(72)
课后习题详解	(76)
思考题解答	(87)
第四章 传热	(92)
基本要求	(92)
典型例题精解	(100)
课后习题详解	(107)
思考题解答	(125)
第五章 蒸发	(128)
基本要求	(128)
典型例题精解	(130)
课后习题详解	(133)
思考题解答	(136)

第六章 蒸馏	(137)
基本要求	(137)
典型例题精解	(149)
课后习题详解	(157)
思考题解答	(176)
第七章 吸收	(180)
基本要求	(180)
典型例题精解	(193)
课后习题详解	(203)
思考题解答	(215)
第八章 蒸馏和吸收塔设备	(218)
基本要求	(218)
课后习题详解	(226)
思考题解答	(228)
第九章 萃取	(230)
基本要求	(230)
典型例题精解	(235)
课后习题详解	(239)
思考题解答	(246)
第十章 干燥	(248)
基本要求	(248)
典型例题精解	(254)
课后习题详解	(261)
思考题解答	(274)
附录一 化工原理实验	(275)
实验一 离心泵性能参数的测定	(275)
实验二 恒压过滤常数的测定	(278)
实验三 填料精馏塔等板高度的测定	(281)
实验四 流化干燥速率曲线的测定	(284)
附录二 考研综合试题	(287)
攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(A)	(287)
攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(B)	(293)
攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(C)	(299)

绪 论

基本要求

通过学习,了解各单元操作之间的共性,理解动量传递,质量传递,热量传递的类似性和内在联系。掌握单位制及单位换算的基本知识。理解对选定系统作物料衡算和能量衡算的思想。

主要考点分析

(一)化工中国际制基本单位

物理量	SI 单位	cgm 单位	工程制单位
长度	m(米)	cm(厘米)	m(米)
质量	kg(千克)	g(克)	kgf · s ² /m(千克力 · 秒 ² /米)
时间	s(秒)	s(秒)	s(秒)
温度	K(开)	℃或 K(开)	℃

(二)几个非常有用的单位换算

$$1 \text{ 千卡} = 427 \text{ 千克(力) · 米} = 4.187 \text{ kJ}$$

$$\text{N} \cdot \text{m} = \text{J(焦耳)} \quad \text{J/s} = \text{W(瓦)}$$

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa(帕斯卡)}$$

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81 \text{ N} \quad \text{这个公式是工程制单位与 SI 制单位换算的桥梁}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

(三)物料和能量衡算

1 物料衡算

物料衡算可以有效了解和控制生产过程中的原料、成品以及损失的物料数量,物料衡算是质量守恒定律的一种表现形式,即:

$$\sum G_1 = \sum G_0 + G_A$$

式中 $\sum G_1$ ——输入物料的总和;

$\sum G_0$ ——输出物料的总和;

G_A ——累积的物料量。

2 能量衡算

化工计算中遇到的能量衡算依据的是能量守恒定律,对于常见的热量衡算有

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_0 + Q_L$$

式中 ΣQ_1 ——随物料进入系统的总热量, kJ 或 kW;

ΣQ_0 ——随物料离开系统的总热量, kJ 或 kW;

Q_L ——向系统周围散失的热量, kJ 或 kW。

课后习题详解

0.1 热空气与冷水间的总传热系数 K 值均为 $42.99 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 试从基本单位换算开始, 将 K 值的单位改为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

解: $1\text{h}=3600\text{s}$; $1\text{kcal}=4.2 \times 10^3 \text{ kJ}$; $\text{J}/\text{S}=\text{W}$ (瓦特)

进行单位换算: $42.99 \times 4.2 \times 10^3 / 3600 = 50 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = 50 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

0.2 密度 ρ 是单位体积物质具有的质量。在以下两种单位制中, 物质密度的单位分别为:

SI kg/m^3

米制重力单位 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

常温下水的密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 试从基本单位换算开始, 将该值换算为米制重力单位的数值。

解: 米制单位中, 1 千克物体所受重力为 1 kgf , 且 $1 \text{ kgf}=9.8 \text{ N}$

$$10^3 \text{ kg}/\text{m}^3 = 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = \left(\frac{10^3}{9.8}\right) \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = 102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

0.3 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下列经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t+261}$$

式中 p ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, $^\circ\text{C}$ 。

今需将式中 p 的单位改为 Pa, 温度单位改为 K, 试对该式加以变换。

解: 因为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$,

所以 $1 \text{ Pa} = 0.00755 \text{ mmHg}$, $t(\text{摄氏温度}) + 273 = T(\text{开氏温度})$

将 t, p 换成所要求单位即有下式

$$\lg\left(\frac{1}{0.00755} p\right) = 6.421 - \frac{352}{T-273+261}$$

$$\lg p - \lg 0.00755 = 6.421 - 352/(T-12)$$

$$\lg p = 8.546 - 352/(T-12)$$

0.4 将 A, B, C, D 四种组分各为 0.25(摩尔分数, 下同)的某混合溶液, 以 $1000 \text{ kmol}/\text{h}$ 的流量送入精馏塔内分离, 得到塔顶与塔釜两股产品, 进料中全部 A 组分、96% B 组分及 4% C 组分存于塔顶产品中; 全部 D 组分存于塔釜产品中。试计算塔顶和塔釜产品的流量及其组成。

解: 由题可知, 考察物料衡算知识。

进料: $W_A = W_B = W_C = W_D = 10^3 \times 0.25 = 250 \text{ kmol/h}$

塔顶: A 250 kmol/h

$B_D = 250 \times 96\% = 240 \text{ kmol/h}$

$C_D = 250 \times 4\% = 10 \text{ kmol/h}$

塔釜: D 250 kmol/h

$B_W = 250(\text{进料}) - 240(\text{塔顶}) = 10 \text{ kmol/h}$

$C_W = 250(\text{进料}) - 10(\text{塔顶}) = 240 \text{ kmol/h}$

塔顶的物料流量 $W = A + B_D + C_D = 500 \text{ kmol/h}$

$$x_{AD} = \frac{250}{500} = 0.5, x_{DB} = \frac{240}{500} = 0.48, x_{DC} = \frac{10}{250} = 0.02$$

塔釜的物料流量 $W = D + B_W + C_W = 500 \text{ kmol/h}$

$$x_{WB} = 10/500 = 0.02, x_{WC} = 240/500 = 0.48, x_{WD} = 250/500 = 0.5$$

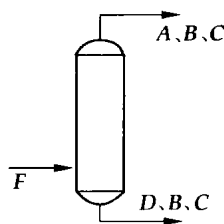


图 0-1

0.5 将密度为 810 kg/m^3 的油与密度为 1000 kg/m^3 的水充分混合成为均匀的乳浊液,测得乳浊液的密度为 950 kg/m^3 。试求乳液中油的质量分数。水和油混合后体积无变化。

解: 设加入油的体积 V_1 , 水的体积为 V_2

$$\text{总质量衡算: } (V_1 + V_2) \times 950 = 810V_1 + 1000V_2 \quad \text{所以 } V_1 = \frac{5}{14}V_2$$

$$\text{对油衡算: } 810V_1 \times 100\% = (V_1 + V_2) \cdot 950 \cdot x$$

$$x = \frac{810}{(V_1 + V_2)950} = \frac{810 \times \frac{5}{14}V_2}{(V_2 + \frac{5}{14}V_2) \times 950} = 0.224$$

0.6 每小时将 200 kg 过热氨气(压强为 1200 kPa)从 95°C 冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为 30°C 。采用冷冻盐水为冷凝、冷却剂,盐水于 2°C 下进入冷凝、冷却器,离开时为 10°C 。求每小时盐水的用量。

热损失可以忽略不计

数据:

95°C 过热氨气的焓, kJ/kg 1647

30°C 饱和液氨的焓, kJ/kg 323

2°C 盐水的焓, kJ/kg 6.8

10°C 盐水的焓, kJ/kg 34

解: 由于不计热损失,氨冷凝所放出热量等于盐水吸收的热量。

$$m_{\text{氨}}(H_1 - H_2) = m_{\text{盐}}(h_1 - h_2)$$

$$\text{已知 } m_{\text{氨}} = 200 \text{ kg}, H_1 = 1647 \text{ kJ/kg}$$

$$H_2 = 323 \text{ kJ/kg}, h_1 = 34 \text{ kJ/kg}, h_2 = 6.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{所以 } m_{\text{盐}} = \frac{200 \times (1647 - 323)}{34 - 6.8} = 9735 \text{ kg/h}$$

第一章 流体流动

基本要求

通过本章的学习,了解流体平衡和运动的基本规律,熟练掌握静力学方程式、连续性方程式、机械能衡算方程式,并能在此基础能较好地解决相关问题,如管路计算、输送设备功率计算等。

一、掌握以下内容

- 1 流体的主要物性(密度、粘度)数据求取及换算;
- 2 流体静力学基本方程式的应用;
- 3 连续性方程、伯努利方程的物理意义、适用条件、解题要点;
- 4 两种流型的比较和工程处理方法;
- 5 流动阻力的计算;
- 6 管路计算和流量(流速)测量。

二、了解以下内容

- 1 牛顿型和非牛顿流体的流变特性以及边界层的相关概念;
- 2 管路的构成管件及阀门的作用;
- 3 因次分析的方法。

主要考点分析

一、流体静力学

1 压强(p)的表示

绝压:以绝对真空为基准测得的压强。

表压:以当地大气压为基准测得的压强,如表压为负值称为真空度。

重要公式:表压=绝对压强-大气压;真空度=大气压-绝对压强。

2 静力学基本方程

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

$$\text{或 } gz + \frac{p}{\rho} = \text{const(常数)}$$

$$\text{或 } p = p_0 + \rho gh$$

适用条件:静止的,连通着的同一种连续流体,该式表达了重力场中静止的连续不

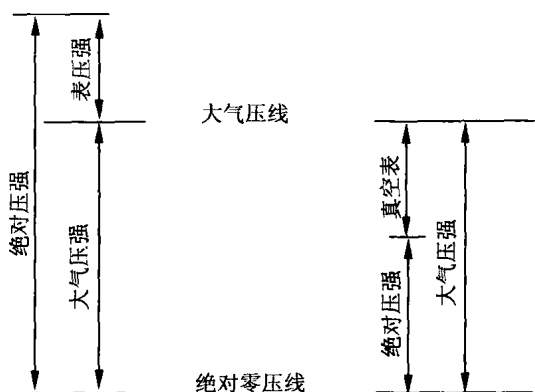


图 1—1 大气压强、绝对压强和表压强
(或真空度)间的关系

可压缩流体内部压强的变化规律。

应用静力学方程时要注意选取等压面。等压面是流体中压力相等的水平面,等压面必须同时满足静止的、连续的同一种流体、处于同一水平面这三个条件,缺一不可。

静力学基本方程也可用于压力变化幅度不大的气体。

以流体静力学基本方程式为依据可设计出各种液柱压差计、液位计,可进行液封高度计算,根据 $(gz + \frac{p}{\rho})$ 的大小判断流向。但需特别注意,U 形管压差计读数反映的是两测量点位能和静压能两项和的差值。

二、流体动力学

1 流量与流速

体积流量 $V(\text{m}^3/\text{s})$, 质量流量 $w(\text{kg}/\text{s})$, 平均流速 $u(\text{m}/\text{s})$, 质量流速 $G(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 其变换关系为: $V = uA$, $w = V\rho = uA\rho$, $G = \frac{w}{A} = \frac{V\rho}{A} = u\rho$

其中, A 为管道截面积。

一般管道截面为圆形,以 d 表示其内径,则有 $u = \frac{V}{\frac{\pi}{4}d^2}$, 于是 $d = \sqrt{\frac{4V}{\pi u}}$ 。如已知流

速可通过这个公式求解管道的直径 d ,但注意管道的直径 d 通常是标准尺寸。

2 稳态流动与非稳态流动

在流动系统中,流体的流速、密度、压力等物理量仅是位置的函数,不随时间改变,则称此系统为稳态流动系统,化工生产多属连续稳态流动。反之,若以上参数不仅随位置变化,而且随时间而变,则称该流动为非稳态流动。

3 稳态流动时的连续性方程

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

对不可压缩流体, ρ 为常数。有

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = uA = V = \text{常数, 圆管内有 } u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2$$

4 伯努利方程

伯努利方程是流体流动中机械能守恒和转化原理的体现,它描述了流入和流出一个系统的流量和流动参数之间的定量关系。

推导伯努利方程式的思路是:从解决流体输送问题的实际需要出发,采取逐渐简化的方法,即进行流动系统的总能量衡算(包括热能和内能)、流动系统的机械能衡算(消去热能和内能)、不可压缩流体定态流动的机械能衡算。

(1) 具有外功加入、不可压缩粘性流体定态流动的伯努利方程式

以 1kg 流体为基准,不可压缩粘性流体定态流经输送系统的伯努利方程式为

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

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

式中的 W_e 为输送机械对 1kg 流体所作的有效功,或 1kg 流体从输送机械获得的有效能量。式中各项单位均为 J/kg。

当流体不流动时, $u=0$, $\sum h_f=0$,也不需要加入外功,于是方程变为

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

可见,流体静力学基本方程式为伯努利方程式的一个特例。

理想流体不产生阻力 $\sum h_f=0$,若无外加功时, $W_e=0$,伯努利方程变为

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

上式表达了流体的位能,静压能,动能之间有相互转换与守恒关系。

(2) 实际流体的伯努利方程

实际流体在流动时存在流动阻力。为了克服流动阻力,系统必须消耗掉一部分机械能。消耗的机械能可分别表示为阻力 $\sum R(\text{J/kg})$ 、压头损失 $\sum h_f(\text{m})$ 、压力降 $\Delta p_f(\text{Pa})$ 等形式。导出的方程相应也有多种形式:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum R(\text{J/kg})$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f(\text{m})$$

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho \sum R(\text{N/m}^2)$$

式中: W_e 、 H_e 、 ρW_e 分别是流体输送机械对 1kg 质量流体、每牛顿流体、每立方米流体所做的功。

5 伯努利方程使用时注意的问题

(1) 应是定常态流动的连续流体;

(2) 各物理量采用统一的单位制计算,对于压力要么都为绝压,要么都为表压;

(3) 对于可压缩流体, $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$ 时, 也可应用;

(4) 要选择恰当的控制体, 即截面的选取, 应包含未知变量, 且有尽可能多的已知量, 一般都与流动方向垂直。

6 机械能

有效功率 $N_e = W_e \cdot w_s$

其中, W_e 是流体输送机械对 1kg 质量流体所做的功, w_s 是流体的质量分数。

若输送机械的效率为 η , 则泵的轴功率 $N = \frac{N_e}{\eta}$ 。

三、流体流动的阻力

1 牛顿粘性定律: $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

其中 μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$

工程中常用运动粘度 ν , $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, 其单位为 m^2/s

牛顿型流体: 剪应力与速度梯度的关系符合牛顿粘性定律的流体。全部气体与大部分液体皆属于牛顿型流体。

非牛顿型流体: 凡不符合牛顿粘性定律的流体。如稠度较高的悬浮液、粘稠液、高分子聚合物液体等。

2 流型的判断

无因次数群 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$

$Re \leq 2000$, 稳定层流;

$Re \geq 4000$, 稳定湍流;

$2000 < Re < 4000$, 过渡流。

3 滞流与湍流的比较

表 1-2 两种流型的比较

流型	滞(层)流	湍(紊)流
判据	$Re \leq 2000$	$Re > 2000$
质点运动情况	沿轴向作直线运动, 不存在横向混合和质点碰撞	无规则杂乱运动, 质点碰撞和剧烈混合。脉动是湍流的基本特点
管内速度分布	抛物线方程 $u = \frac{1}{2} u_{\max}$ 壁面处, $u_w = 0$, 管中心 $u_{\max}$	碰撞和混合使速度平均化 $u \approx 0.8 u_{\max}$ 壁面处 $u_w = 0$, 管中心 $u_{\max}$
边界层	滞流层厚度等于管子半径	层流层—缓冲层—湍流层

直管阻力	粘性内摩擦力,即 牛顿粘性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$	粘性应力+湍流应力,即 $\tau = (\mu + e) \frac{du}{dy}$ (e 为涡流粘度,不是物性,与流动状况有关)
------	---	---

4 流体在直管中的流动阻力

(1) 圆形直管

采用范宁公式
$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

其中 $\lambda = f(Re, \epsilon/d)$, 通过查表确定摩擦系数 λ 。

当流体层流时, $\lambda = 64/Re$, 而与 ϵ/d 无关。

(2) 非圆形直管时, 用当量直径 d_e 代替 d

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流通截面积}}{\text{流体润湿周边}}$$

使用时需注意, 对于非圆形管路的滞流摩擦系数 $\lambda \neq \frac{64}{Re}$, 而是 $\lambda = \frac{C}{Re}$, 常数 C 可查相关手册。计算流体通过的截面积、流速、流量时应采用实际直径 d , 而不是 d_e 。

5 局部阻力

局部阻力系数法
$$h_f' = \zeta \frac{u^2}{2}, \zeta_{\lambda\text{口}} = 0.5, \zeta_{\text{出口}} = 1.0;$$

当量长度法
$$h_f' = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2}$$

应用以上两式求解局部阻力时, 遇到突然扩大或缩小的情况, 式中 u 取细管中的流速。若流动系统的下游截面取在管道出口, 则伯努利方程中的动能项和出口阻力二者只能取一个, 若截面取在出口内侧, 有动能项; 截面取在出口外侧, 则取出口阻力。

6 管路系统的总能量损失

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

由上式可分析欲减小管路系统总阻力损失可能采取如下措施, 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) 高粘度液体(如原油)可采用加伴热管输送。

四、管路计算

1 简单管路

特点是: (1) 各段质量流量不变; (2) 总的阻力损失等于各段损失之和。

常见问题是:

- (1) 已知管径, 管长(当量长度)和流量, 求所需的总压头或输送机械的功率;
- (2) 已知输送系统可提供的总压头, 求已定管路的输送量或一定流量下的管路。

2 复杂管路

特点是:(1)总流量等于各分支管路流量之和;

(2)任一支管内,分支前与汇合后的总压头相等。

主要形式有:分支管路、汇合管路和并联管路。

常见的问题是:

(1)已知管路布置和输送任务,求所需总压头及功率;

(2)已知管路布置和提供的压头,求流量分配或管径大小。

五、流速与流量的测定

1 测速管(毕托管)

$$u_r = \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$$

2 孔板流量

$$V_s = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}}, \quad \text{其中 } C_0 \text{ 一般取 } 0.6 \sim 0.7$$

3 转子流量计

$$V_s = C_r A_r \sqrt{\frac{2g(\rho_r - \rho)V_f}{\rho A_f}}$$

其中 C_r ——转子流量系数约等于 1;

A_r ——环隙截面积, m^2 ;

A_f ——最大截面积, m^2 ;

V_f ——转子体积, m^3 ;

ρ_r ——转子材料密度, kg/m^3 。

注:转子流量计为等压差变截面流量计,而测速管、孔板流量计、文丘里流量计均属于变压差定截面流量计。

典型例题精解

例 1.1 如图 1-2 所示在丙烯精馏塔的回流系统中,丙烯由贮槽回流入塔顶(贮槽液面恒定),精馏塔内操作压力为 1.50MPa(表压),槽内液面上方表压值为 2.01MPa。塔内丙烯出口管距贮槽内液面的高差为 60m,管子内径为 140mm,输送量为 $40 \times 10^3 \text{ kg/h}$ 。管路全部摩擦损失为 150J/kg,试核算将丙烯从贮槽送到精馏塔需要泵的扬程为多少?

【逻辑推理】 分别选取贮槽液面和回流液出口为截面,列出伯努利方程进行求解。

解: 选贮槽液面为 1-1 截面,回流液出口截面为 2-2 截面,以 1-1 为基准面,在两截面之间列伯努利方程

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_c = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f$$

已知: $z_1=0, z_2=60\text{m}, p_1=2.01\times 10^6\text{Pa(表压)}, p_2=1.5\times 10^6\text{Pa(表压)}$

$$u_1 \approx 0, \sum h_f = \frac{150}{9.81} = 15.29\text{m}$$

$$u_2 = \frac{40\,000}{3\,600 \times 600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.14^2} = 1.20\text{m/s}$$

$$\text{代入上式, 得 } \frac{2.01 \times 10^6}{600 \times 9.81} + H_e = 60 + \frac{1.50 \times 10^6}{600 \times 9.81} + \frac{1.2^2}{2 \times 9.81} + 15.29$$

$$H_e = 18.72\text{m}$$

说明: 如果两设备间的位差不是 60m, 而是一个较小的值, 则不再需要泵, 单靠压差能将液体压入塔中, 在化工生产中经常遇到。

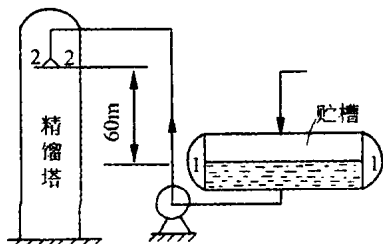


图 1-2

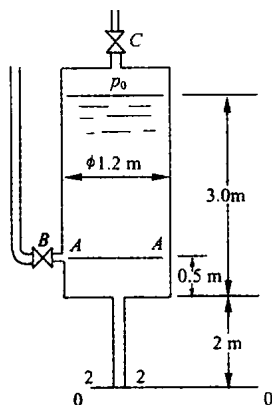


图 1-3

例 1.2 如图 1-3 所示真空高位槽为一简易的恒速加料装置(马利奥特容器)。

罐的直径 $D=1.2\text{m}$, 底部连有长 2m、直径为 $\phi 34\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的放料钢管。假设放料时管内流动阻力为 12J/kg (除出口阻力外, 包括了所有局部阻力)。罐内吸入 3.0m 深的料液, 料液上面为真空, 试提出一个简单的恒速放料方法, 使容器内 A—A 面以上的料液在恒速下放出, 并计算将容器中料液全部放出所需的时间 θ 。

【逻辑推理】 由于容器内液面上方的真空, 当打开 B 阀时, 如果 $p_0 + \rho g H$ (H 为 A—A 截面上方液柱高度, m) 小于大气压, 则空气将鼓到液面上方空间, 待液面上方压强加上液柱静压强等于大气压时, 即停止鼓气, 这样一直保持 A—A 截面为大气压强, 在 A—A 截面以上料液排放过程中都维持这种平衡状态, 于是实现了 A—A 截面以上料液的恒速排放。在 A—A 截面以下, 由于液面上方为大气压强, 而液面不断下降, 故以减速排放。恒速段的排料速度由 A—A 与 2—2 两截面之间列伯努利方程求得; 减速段所需时间由微分物料衡算及瞬间伯努利方程求得。

解: (1) 如图 1-3 所示选取截面和基准面, 在 A—A 截面与 2—2 截面之间列伯努利方程

$$gz_A + \frac{u_A^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f$$

无外加功 $W_c=0, u_A=0, z_2=0, p_A=p_2=0$ (表压)

$z_A=2+0.5=2.5\text{m}, \sum h_f=12\text{J/kg}$

化简为 $\frac{u_2^2}{2}+12=2.5\times 9.81, u_2=5.003\text{m/s}$

此过程为恒速阶段,所需时间为 θ_1

$$\theta_1 = \frac{V}{V_s} = \frac{\frac{\pi}{4} \times 1.2^2 \times (3.0-0.5)}{\frac{\pi}{4} \times 0.03^2 \times 5.003} = 800\text{s}$$

(2) 降速段所需时间 θ_2

设在 $d\theta$ 时间内容器内液面下降高度为 dh , 则该微分时间内的物料衡算关系为

$$\frac{\pi}{4} D^2 dh = -\frac{\pi}{4} d^2 u d\theta$$

$$d\theta = -\left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{dh}{u} = -1600 \frac{dh}{u} \quad (1)$$

由伯努利方程, 速度 u 是高度 h 的函数 $gh = \frac{u^2}{2} + \sum h_f$

$$\text{即 } u = \sqrt{2(gh-12)} = 4.429 \sqrt{h-1.224} \quad (2)$$

$$\text{将式(2)代入(1), 得 } d\theta = -\frac{1600}{4.429} \frac{dh}{\sqrt{h-1.224}} = -361 \frac{dh}{\sqrt{h-1.224}}$$

$$\text{带入积分边界条件 } \int_0^{\theta_2} d\theta = -361 \int_{2.5}^{2.0} \frac{1}{\sqrt{h-1.224}} dh, \quad \theta_2 = 180\text{s}$$

总时间 $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 800 + 180 = 980\text{s}$ 。

例 1.3 如图 1-4 所示管路, 封闭容器侧壁 C 处接一细管通大气, 底部接一弯管, 并在近出口处装一闸阀 A。已知管长为 5m, 管径为 20mm, C 处距管子出口处垂直距离为 2.5m, 阀门 A 开度为 $1/2$ ($\zeta=4.5$), 假设管内直管阻力系数为 0.02, 试求:

(1) 欲将流量减少 35%, 若采用关小 A 阀的办法, 则阀门 A 阻力系数 ζ 有何变化?

(2) 若欲将流量在 (1) 调节的基础上再减少 1%, 仍采用调节 A 阀的办法, 则阀门 A 阻力系数 ζ 又有何变化?

【知识点窍】 阀门对管路流量的调节。

解: (1) 在如图 1-4 所示的 1-1 和 2-2

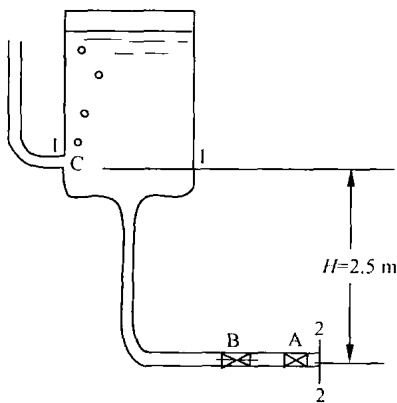


图 1-4

$$\text{截面间列伯努利方程 } gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f$$

其中 $p_1=p_2=0$ (表压), $u_1=0, u_1=u_2$ 。