



21世纪高职高专教材

供药学、药剂学、中药学、制药工程、制剂工程、医药市场营销等专业使用

制药化工过程及设备

王志祥 主编



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪高职高专教材

(供药学、药剂学、中药学、制药工程、制剂工程、
医药市场营销等专业使用)

制药化工过程及设备

主 编 王志祥
副 主 编 崔志芹 黄德春
编 者 (按姓氏笔画为序)
 王志祥 史益强 杨 照
 黄德春 崔志芹 戴 琳

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据制药工业的特点和制药化工过程及设备课程的教学要求,精选若干个典型单元操作进行介绍,编有绪论、流体流动、流体输送设备、沉降与过滤、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、吸附与离子交换、膜分离技术等内容。本书力求深入浅出,简明扼要,注重理论知识在工程实际中的应用。

本书突出高职高专教育的特色,主要作为高职制药工程、制剂工程、药剂学、药学、中药学等专业及相关专业的教材,也可供化工与制药行业从事开发、生产和管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制药化工过程及设备/王志祥主编. —北京:科学出版社,2005.7

21 世纪高职高专教材

ISBN 7-03-015699-4

I. 制… II. 王… III. ①药物—制造—化工过程—高等学校:技术学校—教材
②药物—制造—化工设备—高等学校:技术学校—教材 IV. TQ460.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 062600 号

责任编辑:胡治国 吴茵杰 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:刘士平 / 封面设计:卢秋红 陈 敬

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 7 月第 一 版 开本:850×1168 1/16

2005 年 7 月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—4 000

字数:529 000

定价:34.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

21 世纪高职高专教材编写委员会

供药学、药剂学、中药学、制药工程、制剂工程、
医药市场营销等专业使用

主任委员 王广基

副主任委员 杨静化 周俭慰 徐文强

委 员 (按姓氏笔画为序)

王志祥	王 泽	王小平	毛金银
朱连喜	邬瑞斌	汤启昭	阮田保
苏 斌	邵 芸	陆振达	明广奇
季常新	於 平	段国峰	钱春华
高祖新	黄 纯	黄达芳	黄家利
曹观坤	蔡 凤	翟松涛	樊一桥

编委会秘书 王 莉

总 序

近十几年来,中国高等职业技术教育的发展,为中国的高教事业撑起了一片新的蓝天绿地。高等职业技术教育越来越为社会和广大学生认同、看重。

高等职业技术教育对于学生承担着科学与技术的双重教育任务,既要讲授科学文化知识,又要培训实践技能。因此,它必须具有新的教育理念和新的培养模式。教材建设是办好高等职业技术教育的重要环节之一。

中国药科大学高等职业技术学院十分重视教材建设。经过两年多的运作,组织了一批有丰富知识、教学经验、实践经验的教师和一批有现代教育理念、熟悉科技发展进程和方向的青年骨干教师,围绕药学各专业高等职业教育培养的目标和方向,第一批编写了《工业药剂学》、《药物化学》、《化学原理与化学分析》、《药物分析》、《制药化工过程及设备》、《计算机组装与维护》、《医药市场营销》、《医学基础》、《药学工作应用文》、《制药机械学》、《生物化学》、《微生物学》、《中医学基础》、《药理学》、《生理学》、《医药应用统计》、《药用物理》、《中药炮制学》、《中药药剂学》、《医药数学建模教程》、《高等数学》、《有机化学》、《实用中药鉴定学》计 23 门课程的高职教材。

一本好的教材,会给学习者以深刻的启迪,学习者不但能从中循序渐进地学到科学文化知识,从中还能够较快地接触到这门课程的本质;能够打开视窗,拓展视野,发现和思考新问题;能够接受到相应的人文教育,提高学习者的品味;能够洞知科学技术的发展方向和前沿阵地。我们的教材编写人员尽力按这个方向编写教材,它们将受到广大读者的检验。

本套教材主要特色:紧扣职业技术教育,淡化理论推导,加强理论与实际的结合,面向药品生产、质量检验和销售一线的技术要求,特别是药剂专业与药学专业(质量保证),以工艺为主线进行了串联,充分体现了我院在进行示范性高职建设过程中的成果。因此,本套教材特别适合于药学类高职教育。

囿于水平、人力、时间,教材中会有不尽恰当的地方,甚至会有谬误,欢迎广大读者、教师、专家赐教,批评,以便再版时修瑕。

今后,我们还将计划编写出版药学类专业其他课程的教材。

本套教材主要面向高职专科生,考虑到专转本的需要,《药学高等数学》增加了部分带 * 内容。另外,根据教学计划的差异,有的课程的教材可供高职本科使用。

承蒙科学出版社的大力支持和关注,这套教材得以较快的速度编纂和付梓,在此,我们谨向科学出版社表示诚挚的谢意。

杨静化

2004 年 5 月

编写说明

制药化工过程的单元操作种类很多,每种单元操作均有十分丰富的内容。根据 21 世纪制药工业的特点和制药化工过程及设备课程的教学要求,本书精选了若干个典型单元操作进行介绍,力求全面系统地阐明制药化工过程的基本原理及主要设备。全书共分十二章,包括流体流动、流体输送设备、沉降与过滤、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、吸附与离子交换、膜分离技术等内容。

本书主要作为高职制药工程、制剂工程、药剂学、药学、中药学等专业及相关专业的教材,在内容选择和深度上,力求能反映医药高职教育的特点和教学改革的需要,尽可能做到简明扼要,重点突出,并特别注重理论知识在工程实际中的应用。章后附有习题和思考题,用以进一步加深学生对课程内容的掌握和理解。

本书中的“粘度”以全国自然科学名词审定委员会公布的《化学名词》为标准。

虽然作者在编写和修改过程中已作了很大努力,但由于水平所限,加之时间仓促,错误和不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正,以利于本书的进一步修改和完善。

王志祥

2005 年 4 月于中国药科大学

目 录

绪论	(1)
第 1 章 流体流动	(4)
第 1 节 流体静力学	(4)
第 2 节 流体在管内的流动	(12)
第 3 节 流体在管内的流动现象	(19)
第 4 节 流体在管内的流动阻力	(23)
第 5 节 流速与流量的测量	(31)
第 2 章 流体输送设备	(38)
第 1 节 液体输送设备	(38)
第 2 节 气体输送设备	(53)
第 3 章 沉降与过滤	(60)
第 1 节 重力沉降	(60)
第 2 节 离心沉降	(67)
第 3 节 过滤	(71)
第 4 章 传热	(84)
第 1 节 概述	(84)
第 2 节 热传导	(88)
第 3 节 对流传热	(94)
第 4 节 传热计算	(106)
第 5 节 换热器	(113)
第 5 章 蒸发	(123)
第 1 节 概述	(123)
第 2 节 单效蒸发	(124)
第 3 节 多效蒸发与蒸发节能	(129)
第 4 节 蒸发器的生产能力、生产强度和效数的限制	(133)
第 5 节 蒸发设备	(134)
第 6 章 结晶	(142)
第 1 节 基本概念	(142)
第 2 节 结晶动力学与结晶控制	(145)
第 3 节 结晶计算	(148)
第 4 节 结晶设备	(151)

第 7 章 蒸馏	(155)
第 1 节 概述	(155)
第 2 节 双组分溶液的气液平衡	(156)
第 3 节 蒸馏与精馏原理	(161)
第 4 节 双组分连续精馏塔的计算	(165)
第 5 节 精馏塔	(179)
第 6 节 水蒸气蒸馏	(185)
第 8 章 吸收	(189)
第 1 节 概述	(189)
第 2 节 气液相平衡	(192)
第 3 节 传质机理与吸收速率	(195)
第 4 节 吸收塔的计算	(205)
第 5 节 解吸及其他类型吸收	(210)
第 9 章 萃取	(213)
第 1 节 液液萃取	(213)
第 2 节 固液萃取	(221)
第 10 章 干燥	(228)
第 1 节 概述	(228)
第 2 节 湿空气的性质和湿度图	(231)
第 3 节 湿物料的性质	(239)
第 4 节 干燥过程的计算	(241)
第 5 节 干燥速率	(247)
第 6 节 干燥设备	(250)
第 11 章 吸附与离子交换	(257)
第 1 节 吸附	(257)
第 2 节 离子交换	(266)
第 12 章 膜分离技术	(271)
第 1 节 概述	(271)
第 2 节 超滤	(275)
第 3 节 反渗透	(276)
第 4 节 电渗析	(279)
参考文献	(282)
附录 1 单位换算因数	(283)
附录 2 饱和水的物理性质	(284)
附录 3 某些有机液体的相对密度(液体密度与 4℃ 时水的密度之比)	(286)
附录 4 某些液体的物理性质	(288)
附录 5 饱和水蒸气表(按温度排列)	(290)

附录 6	饱和水蒸气表(按压力排列)	(292)
附录 7	干空气的热物理性质($p = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$)	(294)
附录 8	液体的粘度	(296)
附录 9	气体的粘度(101.3kPa)	(299)
附录 10	固体材料的导热系数	(301)
附录 11	液体的导热系数	(302)
附录 12	气体的导热系数(101.3kPa)	(304)
附录 13	液体的比热	(306)
附录 14	气体的比热(101.3kPa)	(308)
附录 15	液体的气化潜热(蒸发潜热)	(310)
附录 16	管子规格	(312)
附录 17	常用流速范围	(315)
附录 18	IS 型单级单吸离心泵规格(摘录)	(316)
附录 19	错流和折流时的对数平均温度差校正系数	(319)
附录 20	换热器系列标准(摘录)	(321)
附录 21	壁面污垢热阻	(324)
	《制药化工过程及设备》教学大纲	(325)

绪 论

一、制药过程与单元操作

制药工业是根据中、西医相结合的临床实践生产医疗上所需的药品,即通过反应、分离、制剂等处理方法制成可供使用的药品。

药品的种类很多,每一种药品都有其独特的生产过程,但归纳起来,各种不同的生产过程都是由若干个化学反应和若干个基本的物理操作串联而成,每一个基本的物理操作过程都称为一个单元操作。例如,利用中药材中各组分在提取剂中的溶解度不同来提取中药有效成分的操作过程称为固液萃取(提取)单元操作;利用混合物中各组分与固体吸附剂表面分子结合力的不同,使其中的一种或几种组分分离出来的操作过程称为吸附单元操作;通过冷却或使溶剂气化的方法,使溶液达到过饱和而析出晶体的操作过程称为结晶单元操作,等等,这些均是常见的制药化工单元操作。再如,制剂生产中的许多过程,如粉碎、筛分、混合、造粒、压片、包衣等,均是常见的制剂单元操作。这样,我们就无须将每一个药品生产过程都视为一种特殊的或独有的知识加以研究,而仅研究组成药品生产过程的每一个单元操作即可。由于化学反应器和制剂单元操作的内容已包含于《制药工程学》等相关课程中,因此,本课程仅研究典型制药化工单元操作的基本原理及设备,并探讨这些单元操作过程的强化途径。

二、本课程的性质和任务

本课程是制药工程、药物制剂等制药类专业学生必修的一门技术基础课程,是利用《数学》、《物理》、《化学》、《物理化学》等先修课程的知识来解决制药生产中的实际问题,并为《制药工艺学》、《制药工程学》等后续工程类专业课程的学习打下基础。所以,本课程是自然科学领域的基础课向工程学科的专业课过渡的入门课程,在整个教学计划中起着承上启下的作用。

本课程是一门理论与实践密切结合的技术基础课,也是一门学以致用用的课程。在教学和学习过程中,要理论联系实际,树立工程的观点,从工程和经济的角度去考虑技术问题。通过本课程的课堂教学和实验训练,使学生能掌握典型制药化工单元操作的基本原理及设备,并具备初步的工程实验研究能力和实际操作技术。对学生而言,努力学好本课程,将来无论是在科研院所,还是在工厂企业工作,都是大有裨益的。

三、单位换算

长期以来,工程上采用工程制,科学研究采用 CGS 制。多种单位制并存,使计算和交流极

不方便,而且容易导致错误。从1960年10月起,国际上普遍推行SI制。因此,在实际使用中经常会遇到不同单位制之间的换算问题。不同单位制间的主要区别在于其基本单位不完全相同,表0-1给出了常用单位制中的部分基本单位。

表0-1 常用单位制中的部分基本单位和导出单位

国际单位制(SI制)				物理单位制(CGS制)				工程单位制			
基本单位		导出单位		基本单位		导出单位		基本单位		导出单位	
长度	质量	时间	力	长度	质量	时间	力	长度	力	时间	质量
m	kg	s	N	cm	g	s	dyn	m	kgf	s	kgf·s ² ·m ⁻¹

我国目前使用的是以SI制为基础的法定计量单位制,它是根据我国国情,在SI单位的基础上,适当增加一些其他单位构成的。例如,质量的单位吨(t),体积的单位升(L),时间的单位分(min)、时(h)、日(d)、年(Y)仍可使用。

本书采用法定计量单位,但在实际应用中,仍可能遇到非法定计量单位,需要进行单位换算。不同单位制之间的主要区别在于其基本单位不完全相同。在国际单位制和物理单位制中质量是基本单位,力是导出单位。而在工程单位制中力是基本单位,质量是导出单位。因此,必须掌握三种单位制之间力与质量之间的关系,才能正确地进行单位换算。

在工程单位制中,将作用于1kg质量上的重力,即1kgf作为力的基本单位。由牛顿第二定律 $F = ma$ 得

$$\begin{aligned}
 1\text{N} &= 1\text{kg} \times 1\text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \\
 1\text{kgf} &= 1\text{kg} \times 9.81\text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 9.81\text{N} = 9.81 \times 10^5 \text{dyn} \\
 1\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} &= 9.81\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} = 9.81\text{kg} = 9.81 \times 10^3 \text{g}
 \end{aligned}$$

根据三种单位制之间力与质量的关系,即可将物理量在不同单位制之间进行换算。在进行单位换算时,我们只需要用新单位代替原单位,用新数值代替原数值即可,其中

$$\text{新数值} = \text{原数值} \times \text{换算因数} \quad (0-1)$$

式中

$$\text{换算因数} = \frac{\text{原单位}}{\text{新单位}} \quad (0-2)$$

它表示一个原单位相当于多少个新单位。

例0-1 4℃时水的密度用物理单位制表示为 $1.00\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,试用法定计量单位制表示4℃时水的密度。

解 在法定计量单位制中,密度的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。换算时,首先确定换算因数,即

$$\frac{\text{g}}{\text{kg}} = 10^{-3}, \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 10^{-2}$$

则

$$1.00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{kg}}{(10^{-2} \text{m})^3} = 1 \times 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

例0-2 在SI中,压力的单位为Pa(帕斯卡),即 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。已知1个标准大气压的压力相当于 $1.033 \text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$,试以SI单位表示1个标准大气压的压力。

解 首先确定换算因数

$$\frac{\text{kgf}}{\text{N}} = 9.81, \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 10^{-2}$$

则

$$1 \text{ atm} = 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = \frac{1.033 \times 9.81 \text{ N}}{(10^{-2} \text{ m})^2} = 1.01325 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

习 题

1. 在物理单位制中,粘度的单位为 P(泊),即 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,试将该单位换算成 SI 制中的粘度单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。
2. 已知通用气体常数 $R = 0.08206 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,试以法定单位 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 表示 R 的值。

第

1

章

流体流动

气体和液体都具有流动性,通常总称为流体。当温度和压力改变时,气体的体积会发生显著变化,故一般可视为可压缩流体;而液体的体积随温度和压力的变化很小,一般可视为不可压缩流体。气体与液体的区别在于气体具有可压缩性,但当温度和压力的变化率均很小时,气体也可近似按不可压缩流体处理。

流体不仅具有流动性,而且具有连续性和粘性。工程上,通常只研究流体的宏观运动规律,而不研究单个流体分子的微观运动,即将流体看作是由无数流体质点或微团所组成的连续介质,亦即流体具有连续性。此外,流体还具有产生内摩擦力的性质,即流体还具有粘性(见本章第3节)。

制药化工生产中所处理的物料大多数为流体,设备之间用管道连接起来。按照生产工艺要求,将物料从一个设备输送至另一个设备,由上一道工序转移至下一道工序,逐步完成各种物理变化和化学变化,得到所需要的产品。因此,制药化工过程的实现都会涉及到流体流动。此外,大多数制药化工单元操作也都与流体流动密切相关,因此流体流动是本课程最基本的内容。

第1节 流体静力学

流体静力学是研究流体在外力(重力和压力)的作用下处于静止或相对静止时的规律。

一、流体的密度

单位体积的流体所具有的质量,称为流体的密度,即

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

式中 ρ ——流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

在SI制中,密度的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;在物理单位制中,密度的单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;在工程单位

制中,密度的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$,它们之间的关系为

$$1\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} = 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} = 102 \text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4} \quad (1-2)$$

某液体的密度与标准大气压下 4°C 的纯水的密度之比,称为该液体的相对密度或比重,即

$$s = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-3)$$

式中 s ——液体的相对密度或比重;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ——标准大气压下 4°C 时水的密度,其值为 $1000 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1. 气体的密度 气体为可压缩流体,其密度随压力的增加而增大。纯气体的密度一般可从物理化学手册或有关资料中查得。

当压力不太高(临界压力以下)、温度不太低(临界温度以上)时,气体可近似地按理想气体处理,则

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的压力, kPa ;

T ——气体的温度, K ;

n ——气体的千摩尔数, kmol ;

M ——气体的千摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$;

R ——通用气体常数, $8.314 \text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

所以,压力为 p 、温度为 T 的气体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-5)$$

由于 R 的取值随 p 、 T 、 M 所用单位的不同而不同,故工程上常用标准状态下的气体密度来计算实际状态下的气体密度。在标准状态($p_o = 101.3 \text{kPa}$, $T_o = 273.15 \text{K}$)下,气体的密度为

$$\rho_o = \frac{M}{22.4} = \frac{p_o M}{RT_o} \quad (1-6)$$

式中 ρ_o ——气体在标准状态下的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由式(1-5)和式(1-6)得

$$\rho = \rho_o \times \frac{p}{p_o} \times \frac{T_o}{T} = \frac{M}{22.4} \times \frac{p}{p_o} \times \frac{T_o}{T} \quad (1-7)$$

使用式(1-7)的优点在于 ρ_o 为已知,而且反映了温度和压力对气体密度的影响,即气体的密度与压力成正比,与温度成反比。

实际生产中所遇到的气体可能是由多个组分所组成的气体混合物,其密度可用下式计算

$$\rho_m = \rho_1 x_{v1} + \rho_2 x_{v2} + \cdots + \rho_n x_{vn} = \sum_{i=1}^n (\rho_i x_{vi}) \quad (1-8)$$

式中 ρ_m ——气体混合物的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ_i ——同温同压下组分 i 单独存在时的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

x_{vi} ——气体混合物中组分 i 的体积分数,显然 $\sum_{i=1}^n x_{vi} = 1$ 。

气体混合物的密度也可按式(1-7)计算,即

$$\rho_m = \frac{M_m}{22.4} \times \frac{p}{p_o} \times \frac{T_o}{T} \quad (1-9)$$

式中 M_m ——气体混合物的平均千摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$, 可按下式计算

$$M_m = \sum_{i=1}^n (M_i x_{vi}) \quad (1-10)$$

式中 M_i ——气体混合物中组分 i 的千摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 。

2. 液体的密度 液体的密度随压力的变化很小, 常可忽略其影响。纯液体的密度一般可从物理化学手册或有关资料中查得。

实际生产中所遇到的液体一般是由多个组分所组成的液体混合物, 其密度可用下式计算

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{\rho_i} \quad (1-11)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ_i ——液体混合物中组分 i 的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

x_{wi} ——液体混合物中组分 i 的质量分数, 显然 $\sum_{i=1}^n x_{wi} = 1$ 。

二、流体的压强

流体垂直作用于单位面积上的力, 称为流体的压强, 但习惯上也称为流体的压力。作用于整个面积上的力称为总压力。在静止流体中产生的压强称为静压强或静压力, 从各个方向作用于某一点的压力大小均相等。

在 SI 制中, 压强的单位为 Pa(帕斯卡)。但在一些手册、书籍和工程实际中习惯上还采用其他单位, 如物理大气压(atm)、液柱高度(mmHg、mmH₂O)、工程大气压(kgf·cm⁻²)、巴(bar)等, 它们之间的换算关系为

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

压强不仅单位复杂, 而且有不同的计量基准。

以绝对真空(零压)为基准测得的压强, 称为绝对压强, 简称绝压, 它是流体的真实压强。在物理、热力学中多采用绝压作为计算基准(如理想气体状态方程中的压强)。

压强还可以当时当地的大气压强为基准进行测量。当被测流体的压强高于外界的大气压强时, 采用压强表进行测量, 其读数反映了被测流体的绝对压强高于外界大气压强的数值, 称为表压强, 简称表压, 即

$$\text{表压(强)} = \text{绝对压强} - \text{大气压强}$$

当被测流体的压强低于外界的大气压强时, 采用真空表进行测量, 其读数反映了被测流体的绝对压强低于外界大气压强的数值, 称为真空度, 即

$$\begin{aligned} \text{真空度} &= \text{大气压强} - \text{绝对压强} \\ &= -(\text{绝对压强} - \text{大气压强}) \\ &= -\text{表压} \end{aligned}$$

可见, 真空度又是表压强的负值, 且流体的绝对压强愈低, 真空度就愈大。例如, 真空度为 $3 \times$

10^4Pa , 则表压强为 $-3 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

实际使用的真空表, 其数值范围常为 $-0.1 \sim 0 \text{MPa}$, 此时读数为负值, 即为表压, 表示成真空度时要改为正值。

由压强表或真空表测得的读数必须根据当时当地的大气压强进行校正, 才能得到测量点处的绝对压强值。

绝压、表压和真空度之间的关系如图 1-1 所示。图中 A 点的测定压强高于大气压强, B 点的测定压强低于大气压强。

为便于区分压强的三种不同表示形式, 防止混淆, 凡表示表压或真空度的压强单位后, 均以括号加以标注, 而绝压可不加标注, 如 $4 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $4 \times 10^5 \text{Pa}(\text{表压})$ 、 $5 \times 10^3 \text{Pa}(\text{真空度})$ 等。

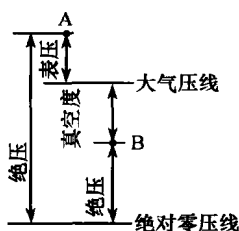


图 1-1 绝压、表压和真空度的关系

例 1-1 某精馏塔在南京地区操作时塔顶的表压为 730mmHg , 现拟将该塔的精馏技术转让至兰州地区。若要求塔内的绝对压强保持不变, 试计算在兰州地区操作时塔顶的真空度。已知南京地区的平均大气压强为 761mmHg , 兰州地区的平均大气压强为 640mmHg 。

解 在南京地区操作时塔顶的绝对压强为

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} - \text{真空度} = 761 - 730 = 31 \text{mmHg}$$

在兰州地区操作时塔内的绝对压强保持不变, 则在兰州地区操作时塔顶的真空度为

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} = 640 - 31 = 609 \text{mmHg}$$

三、流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式是描述在重力场中静止流体内部压力随深度变化的数学表达式。对于不可压缩流体, 密度不随压力而变化, 可用下述方法导出流体静力学基本方程式。

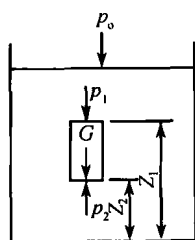


图 1-2 流体静力学基本方程式的推导

从静止液体中任取一垂直液体柱, 如图 1-2 所示。图中液柱的横截面积为 A , 液体的密度为 ρ 。以容器底面所在的平面为基准水平面, 并设液柱上、下底面与基准水平面之间的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 。

设作用于液柱上、下底面的压强分别为 p_1 和 p_2 , 则上底面所受的向下的总压力为 $p_1 A$, 下底面所受的向上的总压力为 $p_2 A$ 。液柱所受的重力为 $G = A(Z_1 - Z_2)\rho g$, 方向向下。

在静止液体中, 液柱所受的向上和向下的力达到平衡, 即

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

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-12)$$

如图 1-3 所示, 若液柱的上底面为液面, 则 $p_1 = p_0$ 。又 $h = Z_1 - Z_2$, 故式(1-12)可改写为

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

虽然式(1-12)和式(1-13)是由液体导出的, 液体的密度可视为常数, 而气体的密度随压力而变化, 但考虑到气体密度随容器高度的变化甚微, 一般也可视为常数, 故式(1-12)和式(1-13)也适

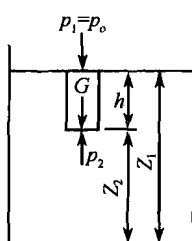


图 1-3 以液面为基础的静力学方程式的推导

用于气体。所以,式(1-12)和式(1-13)统称为流体静力学基本方程式。

由流体静力学基本方程式可知:

(1) 静止液体内部任一点的压强与液体密度及该点距液面的深度有关。密度越大或所处的位置越深,则该点的压力就越大。

(2) 当 ρ 不变,且 $Z_1 = Z_2$ 时, $p_1 = p_2$ 。因此,静止的、连续的同一种流体内部,处于同一水平面上的各点压力均相等。压力相等的水平面常称为等压面。等压面的概念在流体静力学中的应用相当广泛。

(3) 当液面上方的压强 p_0 发生改变时,液体内部各点的压强 p 将发生同样大小的改变,即作用于容器内液面上方的压力能以同样的大小传递至液体内部任一点的各个方向上,这就是巴斯噺原理。

(4) 式(1-13)也可改写为

$$h = \frac{p_2 - p_0}{\rho g} \quad (1-14)$$

即压力或压力差的大小可用液柱高度表示。由式(1-14)可知, h 与 ρ 有关。因此,当用液柱高度表示压力或压力差时,应注明液体的种类和温度,否则将失去意义。

(5) 由于气体的密度很小,故在高度差不大的容器中,可近似认为容器内静止气体内部各点的压强均相等。

例 1-2 在图 1-4 所示的敞口容器内盛有油和水,已知 $\rho_{\text{油}} < \rho_{\text{水}}$,故 $h < h_1 + h_2$ 。若 A 与 A'、B 与 B' 及 C 与 C' 分别处于同一水平面上,试判断 $p_A = p'_{A'}$ 、 $p_B = p'_{B'}$ 及 $p_C = p'_{C'}$ 是否成立。

解 $p_A = p'_{A'}$ 不成立。因为 A、A' 虽处于静止的同一水平面上,但不是连续的同一种流体,因此, A-A' 不是等压面。

$p_B = p'_{B'}$ 成立,因为 B、B' 处于静止的连续的同一种流体内部,且在同一水平面上,因此, B-B' 为等压面。

同理 $p_C = p'_{C'}$ 。

例 1-3 试应用流体静力学基本方程式判断例 1-2 中 p_A 和 $p'_{A'}$ 的大小。

解 由例 1-2 可知, A、A' 虽处于静止的同一水平面上,但不是连续的同一种流体。由流体静力学基本方程式可得

$$\begin{aligned} p_B &= p_A + \rho_{\text{油}} g h_{AB} \\ p'_{B'} &= p'_{A'} + \rho_{\text{H}_2\text{O}} g h_{AB} \end{aligned}$$

由 $p_B = p'_{B'}$ 及 $\rho_{\text{H}_2\text{O}} > \rho_{\text{油}}$ 可知

$$p_A > p'_{A'}$$

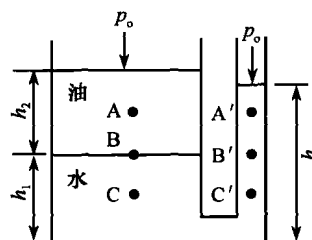


图 1-4 例 1-2 附图

四、流体静力学基本方程式的应用

流体静力学基本方程式常用于某处流体表压或流体内部两点之间压强差的测量。此外,还用于液位的测量和液封高度的测量。