

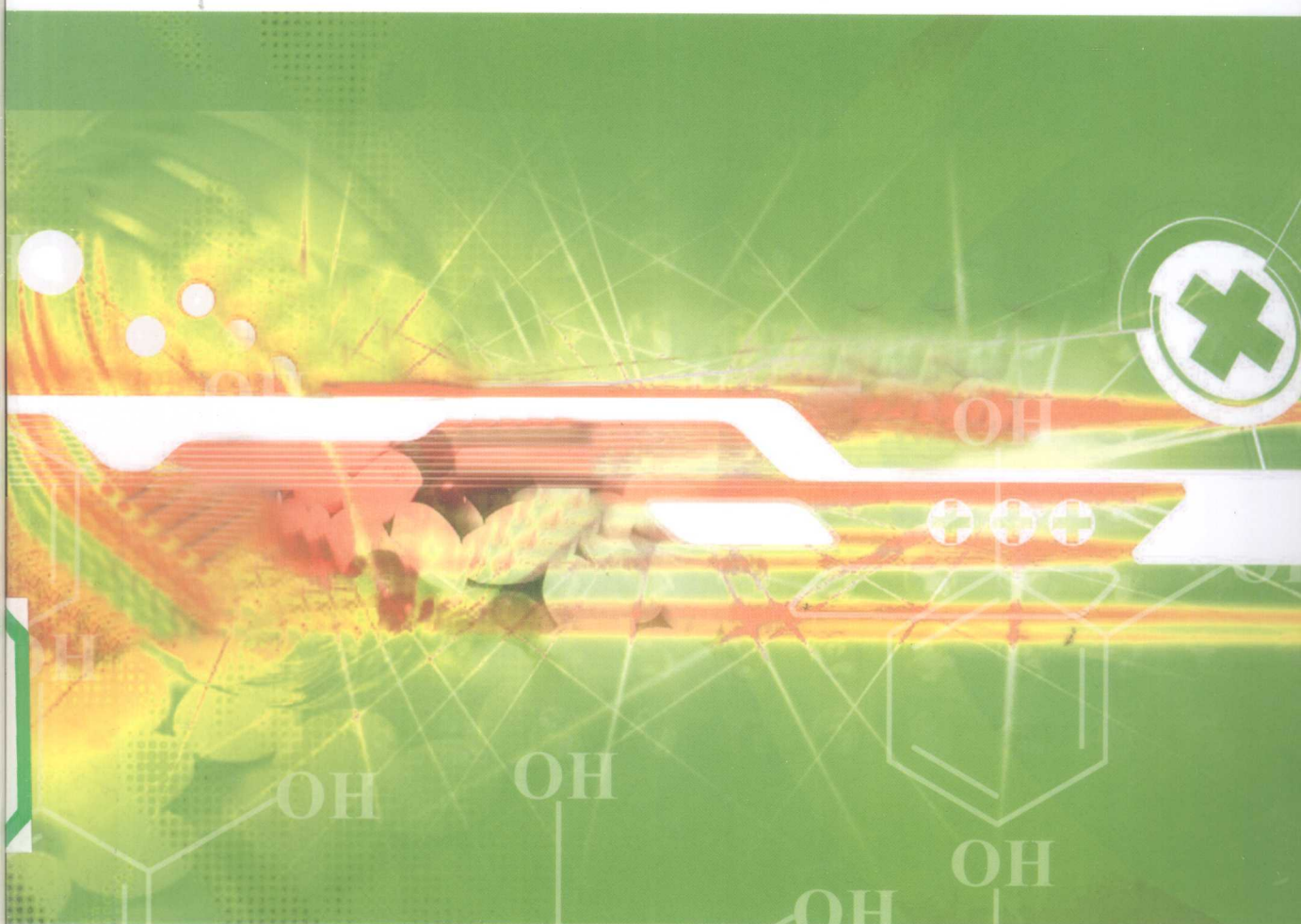


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高职高专药学类专业规划教材

制药化工过程及设备

(第二版)

主编 王志祥



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高职高专药学类专业规划教材

内 容 简 介

制药化工过程及设备

(第二版)

主 编 王志祥
副主编 黄德春 崔志芹 刘书华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

崔志芹(中国药科大学)

戴 琳(中国药科大学)

郭宏钧(安庆医药高等专科学校)

黄德春(中国药科大学)

林 文(中国药科大学)

刘书华(黔东南民族职业技术学院)

江苏工业学院图书馆
藏书章

王志祥(中国药科大学)

杨 照(中国药科大学)

张立峰(邢台医学高等专科学校)

科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

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、蒸馏与吸收、萃取、干燥、吸附与离子交换、药物粉体生产设备和典型剂型生产设备等内容。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. —2版. —北京:科学出版社,2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·全国高职高专药学类专业规划教材

ISBN 978-7-03-025797-0

I. 制… II. 王… III. ①制药化业—化工过程—高等学校:技术学校—教材
②制药工业—化工设备—化工过程—高等学校:技术学校—教材 IV. TQ460.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 185858 号

策划编辑:裴中惠/责任编辑:张 茵/责任校对:张 琪

责任印制:刘士平/封面设计:黄 超

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:787×1092 1/16

2009年10月第 二 版 印张:23 3/4

2009年10月第四次印刷 字数:563 000

印数:6 501—10 500

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书第一版自2005年出版至今,受到许多兄弟院校及相关行业的同行、读者的支持和肯定。使用实践证明,本书的章节体系、内容、深浅等尚能满足教学需要。但由于制药工业的飞速发展,新技术、新工艺和新设备层出不穷,对人才素质和教材质量也提出了更高要求,第一版的某些内容已不能适应本课程的教学要求,因此决定再版修订。

修订时在保持本书第一版原有特色的基础上,结合高职教育的特点,精简了部分章节,增加了药物粉体生产设备和典型剂型生产设备两章内容。各章均增加了链接,并编有较多的实例,提高了本书的趣味性、实用性和可读性。为便于学生掌握教学内容,章后均有目标检测题,题型包括单选题、思考题和计算题,并在书后给出了各章单选题和计算题的参考答案。此次再版既拓展了本书的应用领域,又补充了最新科技成果。

本书是“十一五”国家级规划教材,并得到江苏省高等教育改革重点课题以及中国药科大学教学改革项目的支持。一些同行专家也对本书的再版提出了宝贵意见。作者在此一并表示诚挚的谢意。

由于水平所限,错误和不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正,以使本书更趋完善。

王志祥

2009年7月于中国药科大学

王志祥

2009年7月于中国药科大学

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、中药学等相关专业及专业的教材,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“黏度”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,以利于该书的进一步修改和完善。

王志祥

2005 年 4 月于中国药科大学

王志祥

2005 年 4 月于中国药科大学

(801)		附录 章 8 附录
(901)		附录 附录 附录 1 附录
(905)		附录 附录 附录 附录 5 附录
(915)		附录 附录 附录 附录 附录 附录
(955)		附录 附录 附录 附录 附录 附录

目 录

绪论	(1)
第1章 流体流动	(5)
第1节 流体静力学	(5)
第2节 流体动力学	(13)
第3节 流动现象与流动阻力	(21)
第4节 流速与流量的测量	(30)
第5节 管子、管件、阀门及管道	(34)
第2章 流体输送设备	(43)
第1节 液体输送设备	(43)
第2节 气体输送设备	(58)
第3章 沉降与过滤	(66)
第1节 重力沉降	(66)
第2节 离心沉降	(73)
第3节 过滤	(76)
第4节 膜过滤	(82)
第5节 气体净化	(88)
第4章 传热	(97)
第1节 概述	(97)
第2节 热传导	(101)
第3节 对流传热	(106)
第4节 传热计算	(116)
第5节 换热器	(123)
第5章 蒸发	(135)
第1节 概述	(135)
第2节 单效蒸发	(136)
第3节 多效蒸发与蒸发节能	(140)
第4节 蒸发器的生产能力、生产强度和效数的限制	(144)
第5节 蒸发设备	(144)
第6章 结晶	(153)
第1节 基本概念	(153)
第2节 结晶操作与控制	(156)
第3节 结晶设备	(159)
第7章 蒸馏与吸收	(164)
第1节 蒸馏	(164)
第2节 吸收	(192)

第8章 萃取	(198)
第1节 液液萃取	(199)
第2节 固液萃取	(206)
第3节 超临界流体萃取	(216)
第9章 干燥	(224)
第1节 概述	(224)
第2节 湿空气的性质	(228)
第3节 湿物料的性质	(233)
第4节 干燥过程的计算	(235)
第5节 干燥速率与干燥速率曲线	(242)
第6节 干燥设备	(244)
第10章 吸附与离子交换	(253)
第1节 吸附	(253)
第2节 离子交换	(263)
第11章 药物粉体生产设备	(271)
第1节 粉碎	(271)
第2节 筛分	(279)
第3节 混合	(283)
第12章 典型剂型生产设备	(289)
第1节 丸剂生产设备	(289)
第2节 片剂生产设备	(292)
第3节 胶囊剂生产设备	(298)
第4节 注射剂生产设备	(305)
第5节 口服液剂生产设备	(319)
主要参考文献	(323)
附录	(324)
附录1 单位换算因数	(324)
附录2 饱和水的物理性质	(325)
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)	(327)
附录4 某些液体的物理性质	(329)
附录5 饱和水蒸气表(按温度排列)	(331)
附录6 饱和水蒸气表(按压力排列)	(333)
附录7 干空气的热物理性质($p=1.013\times 10^5\text{ Pa}$)	(335)
附录8 液体的黏度(101.3kPa)	(336)
附录9 气体的黏度(101.3kPa)	(339)
附录10 固体材料的导热系数	(341)
附录11 某些液体的导热系数	(342)
附录12 气体的导热系数(101.3kPa)	(344)
附录13 液体的比热容	(346)
附录14 气体的比热容(101.3kPa)	(348)
附录15 液体的气化潜热(蒸发潜热)	(350)
附录16 管子规格	(352)

附录 17 常用流速范围	(355)
附录 18 IS 型单级单吸离心泵规格(摘录)	(356)
附录 19 错流和折流时的对数平均温度差校正系数	(359)
附录 20 换热器系列标准(摘录)	(361)
附录 21 壁面污垢热阻	(363)
制药化工过程及设备教学基本要求	(364)
部分目标检测题参考答案	(368)

药,同时全宗不站单本基其干齐限习要主由同捕站单同不。器同章站由同之捕站单同不除新会
站单本基位格由中捕站单同常丁出第1-0

站单出得味站单本基位格由中捕站单同常 1-0 要

绪 论

站单出得	站单本基	站单出得	站单本基	站单出得	站单本基
					
学习目标					

1. 了解制药过程与单元操作
2. 理解本课程的学习方法
3. 掌握单位换算

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,我们就无需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。

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

“米”定义的起源与发展

国际单位制的长度单位“米”(meter)起源于法国。1790 年 5 月由法国科学家组成的特别委员会,建议以通过巴黎的地球子午线全长的四千万分之一作为长度单位——米,1791 年获法国国会批准。为了制造出表征米的量值的基准器,在法国天文学家捷梁布尔和密伸的领导下,于 1792~1799 年,对法国敦刻尔克至西班牙的巴塞罗那进行测量。1799 年根据测量结果制成一根 3.5mm×25mm 矩形截面的铂杆,以此杆两端之间的距离定为 1m,并交法国档案局保管,所以也称为“档案米”,这就是最早的“米”的定义。

由于档案米的变形情况严重,于是,1872 年放弃了“档案米”的定义,而以铂铱合金(90%的铂和 10%的铱)制造的米原器作为长度的单位。但使用米原器作为米的客观标准也存在很多缺点,如材料变形、测量精度不高等,很难满足计量学和其他精密测量的需要。此外,万一米原器损坏,复制将无所依据。

1960 年第十一届国际计量大会将米的定义更改为“米的长度等于氪-86 原子的 2p₁₀ 和 5d1 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1 650 763.73 倍”,这一自然基准,性能稳定,没有变形问题,容易复现,而且具有很高的复现精度。我国于 1963 年也建立了氪-86 同位素长度基准。米的定义更改后,国际米原器仍按原规定保存在国际计量局。

20 世纪 70 年代以来,对时间和光速的测定,都达到了很高的精确度。因此,1983 年第 17 届国际计量大会又将米的定义更改为“米是 1/299 792 458s 的时间间隔内光在真空中行程的长度”。这样,基于光谱线波长的米的定义就被新的米定义所替代了。



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(a)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

$$1\text{N}=1\text{kg}\times 1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}=1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}=9.81\text{N}=9.81\times 10^5\text{dyn}$$

$$1\text{kgf}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}=9.81\text{N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}=9.81\text{kg}=9.81\times 10^3\text{g}$$

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

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

其中

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

它表示一个原单位相当于多少个新单位。

千克与千克力

千克是国际单位制中的质量单位,也是国际单位制的7个基本单位之一。法国大革命后,山法国科学院制定。最初的定义与长度单位有关,即规定“1000cm³的纯水在4℃时的质量”,并用铂铱合金制成原器,保存在巴黎,后称国际千克原器。1901年第三届国际计量大会规定“千克是质量(而非重量)的单位,等于国际千克原器的质量”。千克用符号 kg 表示。千克力是工程技术中常用的计力单位,规定为国际千克原器在纬度 45° 的海平面上所受的重力,符号为 kgf。工程技术书中常把“力”字省略,因此易与质量单位混淆。

链接



4℃ 时水的密度用物理单位制表示为 1.00 g · 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 kg · m⁻³。换算时,首先确定换算因数,即

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

则

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

案例 0-1



在 SI 制中,压力的单位为 Pa(帕[斯卡]),即 N · m⁻²。已知 1 atm 的压力相当于 1.033 kgf · cm⁻², 试以 SI 制单位表示 1 atm 的压力。

解:首先确定换算因数

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

则

$$1 \text{ atm} = 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = \frac{1.033 \times 9.81 \text{ N}}{(10^{-2} \text{ m})^2} = 1.013 \ 25 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1.013 \ 25 \times 10^5 \text{ Pa}$$

案例 0-2

小结

1. 每一种药品的生产过程都由若干个单元反应和若干个基本的物理操作串联而成。
2. 本课程的性质和任务。
3. 单位换算。

目标检测

一、单选题

1. 在国际单位制(SI制)中,下列4个单位中_____是导出单位。
A. 长度 B. 质量 C. 时间 D. 力
2. 在物理单位制(CGS制)中,下列4个单位中_____是导出单位。
A. 长度 B. 质量 C. 时间 D. 力
3. 在工程单位制中,下列4个单位中_____是导出单位。
A. 长度 B. 质量 C. 时间 D. 力

二、计算题

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

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \frac{1 \text{ kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$1 \text{ P} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \frac{1 \text{ g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ kg}}{10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}} = \frac{1 \times 10^{-1} \text{ kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.01325 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1.01325 \times 10^5 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}^2} = 1.01325 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

第1章 流体流动

第1章 流体流动



学习目标

1. 掌握流体静力学基本方程式及其应用
2. 掌握连续性方程式、伯努利方程式及其应用
3. 掌握流动阻力的计算方法
4. 熟悉常用流量计的结构和测量原理
5. 熟悉常用管子、阀门及管件,了解管路连接及管道布置技术

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。

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状态时的规律。

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

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

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

$$s = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1-3)$$

式中 s ——液体的相对密度(比重);

ρ_{H_2O} ——标准大气压下 4℃ 时水的密度,其值为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(一) 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 ——气体的物质的量, kmol;

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

R ——摩尔气体常量, $8.314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

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($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$)下,气体的密度为

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} = \frac{p_0 M}{RT_0} \quad (1-6)$$

式中 ρ_0 ——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

$$\rho = \rho_0 \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} = \frac{M}{22.4} \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \quad (1-7)$$

使用式(1-7)的优点在于 ρ_0 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,其密度可用式(1-8)计算

$$\rho_m = \rho_1 x_{v_1} + \rho_2 x_{v_2} + \cdots + \rho_n x_{v_n} = \sum_{i=1}^n (\rho_i x_{v_i}) \quad (1-8)$$

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

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

(二) 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,其密度可用式(1-9)计算

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w_1}}{\rho_1} + \frac{x_{w_2}}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_{w_n}}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{w_i}}{\rho_i} \quad (1-9)$$

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 $\sum_{i=1}^n x_{wi} = 1$ 。

波美比重计

液体的密度常采用比重计来测量。波美比重计是一种常用的比重计。波美比重计有两种: 一种用来测量密度大于 1 的液体, 称为“重表”; 另一种用来测量密度小于 1 的液体, 称为“轻表”。波美比重计除了测量比重外, 还可根据测得的比重, 通过波美表查出所测溶液的质量分数。将波美比重计浸入被测溶液中, 所得读数称为波美度或度数。波美度是以法国化学家波美 (Antoine Baume) 的名字来命名的。目前, 波美表都是针对特定溶液而专用的, 如酒精波美表、盐水波美表等。

链接

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

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

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 $3 \times 10^4 \text{ Pa}$, 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

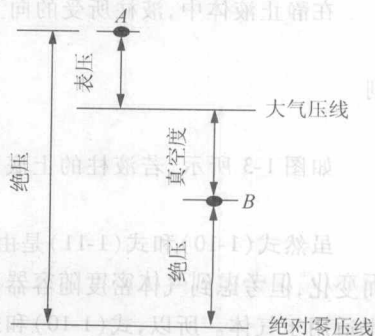


图 1-1 绝压、表压和真空度的关系

可不加标注,如 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$ (表压)、 $5 \times 10^3 \text{ Pa}$ (真空度)等。



某精馏塔在南京地区操作时塔顶的表压为 730 mmHg ,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 761 mmHg ,兰州地区的平均大气压强为 640 mmHg 。

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

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

案例 1-1

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。

从静止液体中任取一垂直液柱,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 。

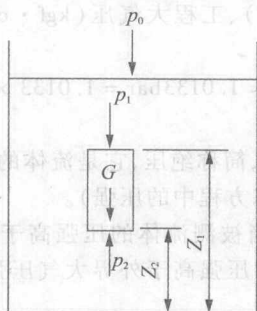


图 1-2 流体静力学基本方程式的推导

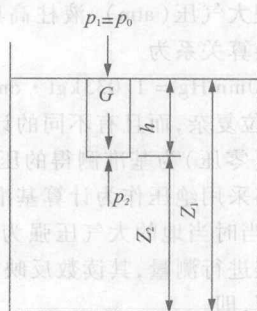


图 1-3 以液面为基准的静力学方程式的推导

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

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

则

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-10)$$

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(1-10)可改写为

$$p_2 = p_0 + \rho gh \quad (1-11)$$

虽然式(1-10)和式(1-11)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(1-10)和式(1-11)也适用于气体。所以,式(1-10)和式(1-11)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以下几点。

(1) 静止液体内部任一点的压强与液体密度和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,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。

(4) 式(1-11)也可改写为

$$h = \frac{p_2 - p_0}{\rho g} \quad (1-12)$$

即压力或压力差的大小可用液柱高度表示。由式(1-12)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,可近似认为容器中静止气体内部各点的压强均相等。

著名的数学家和物理学家——帕斯卡

帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662年)是法国著名的数学家、物理学家、哲学家和散文家。1660年,帕斯卡提出封闭容器中的静止流体的某一部分发生的压强变化,将毫无损失地传递至流体的各个部分和容器壁。帕斯卡还发现,静止流体中任一点的压强各向相等,即该点在通过它的所有平面上的压强都相等,这一定律后人称为帕斯卡原理(定律),它奠定了流体静力学和液压传动的基础。1642年,刚满19岁的帕斯卡设计制造了世界上第一架机械式计算装置——使用齿轮进行加减运算的计算机,它成为后来的计算机的雏形。科学界铭记着帕斯卡的功绩,国际单位制规定“压强”单位为“帕[斯卡]”。计算机领域更没有忘记帕斯卡的贡献,1971年面世的PASCAL语言,也是为了纪念这位先驱,使帕斯卡的英名长留在电脑时代里。

链接

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,且在同一水平面上,因此,B-B'为等压面。

同理 $p_C = p_{C'}$ 。

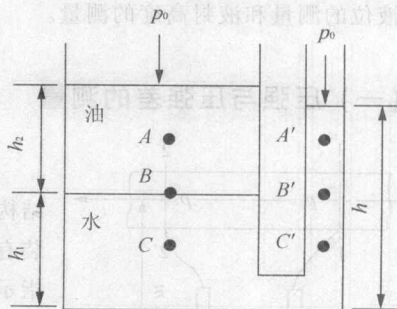


图1-4 案例1-2附图

案例1-2