



全国普通高等院校工科化学

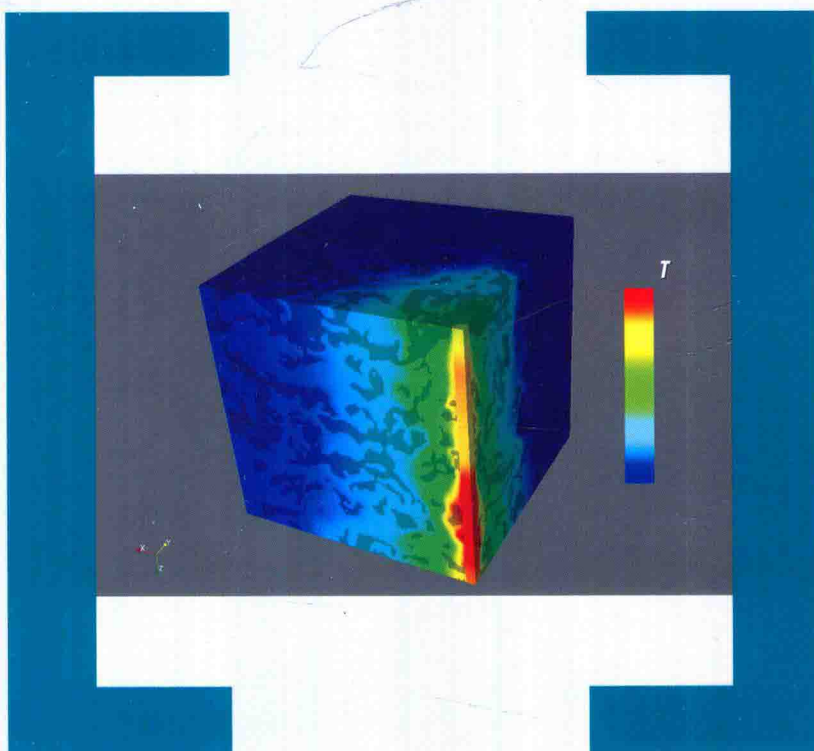
规划精品教材

化工原理

(第二版) 上册

Principles of Chemical Engineering

◎ 郑旭煦 主编
◎ 杜长海



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

Q G R T G D Y X G K H X G H J P J C

化工原理

(第二版)上册

主 编	郑旭煦	杜长海		
副主编	徐冬梅	高 军	李金龙	李 宁
	孙 德	邵 晶		
参 编	顾丽莉	左小华	张治山	孙中亮
	李天一	王海南	胡伟华	李 敏
	张伟光	许 惠	叶 梅	马 隆
	左卫元			



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书为全国普通高等院校精品课程规划教材,由重庆工商大学、长春工业大学、山东科技大学、齐齐哈尔大学、长春理工大学、昆明理工大学、湖北理工学院、海南大学、黄冈师范学院、百色学院等院校长期工作在教学第一线的教师,根据多年教学实践,参考国内外同类教材,在第一版基础上修订而成。

全书分为上、下两册,上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、搅拌、非均相系统的分离、传热、蒸发等,下册包括吸收、蒸馏、气液传质设备、液-液萃取、固体干燥、其他传质分离过程等。除绪论外,每章均有例题、习题和思考题。

本书可作为普通高等院校化工类专业本科生教材,也可供相关部门工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理:全2册/郑旭煦,杜长海主编. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2015.10
全国普通高等院校工科化学规划精品教材
ISBN 978-7-5680-1299-7

I. ①化… II. ①郑… ②杜… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 245008 号

化工原理(第二版)上下册
Huagong Yuanli

郑旭煦 杜长海 主编

策划编辑:王新华

责任编辑:王新华

封面设计:刘 卉

责任校对:何 欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:39

字 数:994 千字

版 次:2009 年 6 月第 1 版 2016 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:86.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第二版前言

本书系统地阐述了“三传”基础理论、主要化工单元操作的基本原理和过程计算、典型设备的结构及性能,涉及流体流动、流体输送机械、搅拌、非均相系统的分离、传热、蒸发、吸收、蒸馏、气液传质设备、液-液萃取、固体干燥和其他传质分离过程等单元过程,力求做到理论联系实际、突出工程观点、强调研究方法,并适当引入过程强化措施、新型分离技术等前沿领域的研究内容。

本书分为上、下两册,由郑旭煦、杜长海主编,李然主审。本书由重庆工商大学、长春工业大学、山东科技大学、齐齐哈尔大学、长春理工大学、昆明理工大学、湖北理工学院、海南大学、黄冈师范学院、百色学院等院校教师在第一版基础上修订完成。参与修订的人员如下:郑旭煦(重庆工商大学)、杜长海(长春工业大学)、李然(长春工业大学)、徐冬梅(山东科技大学)、高军(山东科技大学)、李金龙(齐齐哈尔大学)、李宁(重庆工商大学)、孙德(长春工业大学)、邵晶(长春理工大学)、顾丽莉(昆明理工大学)、左小华(湖北理工学院)、张治山(山东科技大学)、孙中亮(海南大学)、李天一(长春工业大学)、王海南(黄冈师范学院)、胡伟华(长春理工大学)、李敏(山东科技大学)、张伟光(齐齐哈尔大学)、许惠(重庆工商大学)、叶梅(重庆工商大学)、马小隆(山东科技大学)、左卫元(百色学院)。

在本书编写和修订过程中,参考了国内外公开出版的同类书籍,并偶有引用,特在此说明并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月

目 录

第 0 章 绪论	(1)
0.1 化学工业与单元操作	(1)
0.2 化工原理课程的性质及学习要求	(2)
0.3 单元操作中常用的基本概念	(2)
0.4 基本研究方法	(4)
第 1 章 流体流动	(5)
1.1 概述	(5)
1.2 流体静力学	(5)
1.2.1 流体的物理性质	(5)
1.2.2 流体压力	(7)
1.2.3 流体静力学基本方程	(8)
1.2.4 流体静力学基本方程的应用	(10)
1.3 流体动力学	(14)
1.3.1 流量与流速	(14)
1.3.2 定态流动与非定态流动	(16)
1.3.3 连续性方程	(17)
1.3.4 伯努利方程	(18)
1.3.5 伯努利方程的应用	(23)
1.4 流体流动现象	(27)
1.4.1 流动类型	(27)
1.4.2 流体在圆管内流动时的速度分布	(30)
1.4.3 边界层的概念	(33)
1.5 流体在管内的流动阻力	(36)
1.5.1 流体在直管中的流动阻力	(37)
1.5.2 管路中的局部阻力	(45)
1.5.3 流体在管路系统中的总阻力	(47)
1.5.4 管路基本知识	(48)
1.6 管路计算与布置原则	(51)
1.6.1 管路计算	(51)
1.6.2 管路布置的一般原则	(55)
1.7 流量测量	(56)
1.7.1 变压头恒截面型流量计	(56)
1.7.2 恒压差变截面型流量计——转子流量计	(63)
思考题	(65)
习题	(66)
本章主要符号说明	(71)

第2章 流体输送机械	(74)
2.1 离心泵	(74)
2.1.1 离心泵的工作原理与主要构件	(74)
2.1.2 离心泵的基本方程	(76)
2.1.3 离心泵的主要性能参数和特性曲线	(78)
2.1.4 离心泵的安装高度	(81)
2.1.5 离心泵的工作点与流量调节	(84)
2.1.6 离心泵的组合操作	(85)
2.1.7 离心泵的类型与选用	(87)
2.2 其他类型化工用泵	(90)
2.2.1 往复泵	(90)
2.2.2 旋转泵	(93)
2.2.3 旋涡泵	(94)
2.3 气体输送机械	(94)
2.3.1 离心式通风机、鼓风机、压缩机	(95)
2.3.2 旋转鼓风机和压缩机	(98)
2.3.3 往复压缩机	(98)
2.3.4 真空泵	(100)
思考题	(102)
习题	(103)
本章主要符号说明	(104)
第3章 搅拌	(106)
3.1 概述	(106)
3.2 搅拌设备	(106)
3.2.1 搅拌设备的基本结构	(106)
3.2.2 常见的搅拌器类型	(107)
3.2.3 搅拌作用下流体的流动	(109)
3.3 混合机理	(113)
3.3.1 均相系统的混合机理	(113)
3.3.2 非均相系统的混合机理	(114)
3.3.3 搅拌效果的度量	(115)
3.4 搅拌功率	(116)
3.4.1 搅拌釜内叶轮的泵出流量、压头及功率	(116)
3.4.2 功率关联式及功率曲线	(117)
3.5 搅拌装置的设计	(121)
3.5.1 搅拌器的选型	(121)
3.5.2 搅拌器的放大准则	(122)
3.6 其他混合设备	(123)
思考题	(125)

习题	(125)
本章主要符号说明	(125)
第4章 非均相系统的分离	(127)
4.1 概述	(127)
4.2 流体通过颗粒床层的流动	(127)
4.2.1 颗粒及颗粒床层的特性	(127)
4.2.2 流体通过固定床层的压降	(130)
4.3 过滤	(133)
4.3.1 过滤概述	(133)
4.3.2 过滤基本方程	(134)
4.3.3 过滤设备及过滤计算	(138)
4.4 沉降	(145)
4.4.1 颗粒在流体中的沉降过程	(145)
4.4.2 重力沉降设备	(149)
4.4.3 离心沉降设备	(152)
4.5 固体流态化	(158)
4.5.1 流态化过程	(158)
4.5.2 流化床的流化类型与不正常现象	(159)
4.5.3 流化床的主要特性	(160)
思考题	(161)
习题	(162)
本章主要符号说明	(164)
第5章 传热	(166)
5.1 概述	(166)
5.1.1 传热在化工生产中的应用	(166)
5.1.2 加热介质与冷却介质	(166)
5.1.3 传热的三种基本方式	(167)
5.1.4 热流量与热流密度	(168)
5.1.5 定态传热与非定态传热	(168)
5.2 热传导	(168)
5.2.1 基本概念和傅里叶定律	(168)
5.2.2 导热系数	(169)
5.2.3 平壁的定态热传导	(171)
5.2.4 圆筒壁的定态热传导	(173)
5.3 对流传热	(175)
5.3.1 对流传热过程分析	(175)
5.3.2 牛顿冷却定律	(176)
5.3.3 影响对流传热系数的因素	(176)
5.3.4 对流传热系数无因次分析	(177)

5.3.5 流体无相变时对流传热系数的经验关联式	(178)
5.3.6 流体有相变时的对流传热系数	(183)
5.4 热辐射	(190)
5.4.1 热辐射的基本概念	(190)
5.4.2 物体的辐射能力与斯蒂芬-玻耳兹曼定律	(191)
5.4.3 克希霍夫定律	(192)
5.4.4 两固体间的相互辐射	(192)
5.4.5 影响辐射传热的主要因素	(195)
5.4.6 辐射-对流联合传热	(195)
5.5 传热过程的计算	(196)
5.5.1 热量衡算	(196)
5.5.2 总热流量方程	(197)
5.5.3 平均传热温度差	(198)
5.5.4 总传热系数和壁温的计算	(204)
5.6 换热器	(207)
5.6.1 间壁式换热器	(207)
5.6.2 新型高效换热器	(211)
5.6.3 列管式换热器的设计和选用计算中的有关问题	(216)
5.6.4 列管式换热器的选用步骤	(218)
5.6.5 换热器的传热强化途径	(221)
思考题	(223)
习题	(223)
本章主要符号说明	(226)
第6章 蒸发	(228)
6.1 概述	(228)
6.1.1 蒸发操作的分类	(228)
6.1.2 蒸发操作的特点	(229)
6.2 单效蒸发	(229)
6.2.1 单效蒸发流程	(229)
6.2.2 单效蒸发计算	(230)
6.2.3 蒸发器的生产能力与生产强度	(234)
6.3 多效蒸发	(236)
6.3.1 加热蒸汽的经济性	(236)
6.3.2 多效蒸发流程	(237)
6.3.3 多效蒸发的计算	(239)
6.3.4 多效蒸发效数的限制	(242)
6.4 蒸发器	(245)
6.4.1 蒸发器的类型	(245)
6.4.2 蒸发器的总传热系数	(251)

6.4.3 蒸发设备的附属装置	(253)
6.4.4 蒸发器的选型	(254)
思考题	(257)
习题	(257)
本章主要符号说明	(258)
附录	(259)
附录 A 单位和量纲	(259)
附录 B 水与蒸汽的物理性质	(260)
附录 C 干空气的物理性质	(270)
附录 D 液体的物理性质	(272)
附录 E 气体的重要物理性质	(289)
附录 F 固体性质	(295)
附录 G 管子规格	(297)
附录 H 泵与风机	(301)
附录 I 换热器基本参数	(307)
附录 J 筛的主要参数	(315)
附录 K 管壳式换热器总传热系数 K 的推荐值	(317)
主要参考文献	(319)

第0章 绪 论

0.1 化学工业与单元操作

化学工业是对原料进行化学和物理加工而获得产品的工业。化工产品在经济中占有重要地位,它不仅是工业、农业和国防部门的重要生产资料,也是人们日常生活中的重要生活资料。

化工产品种类繁多,生产工艺流程各异,但是众多的化工生产过程,都是由化学反应和若干物理操作有机组合而成的。化学反应为化工生产过程的核心,物理过程则为化学反应准备必要条件和将反应混合物分离而获得有用的产品。这些物理过程在整个化工生产中占有极其重要的地位,它们在工厂的设备投资和操作费中占主要比例,决定了整个化工生产过程的经济效益。

一种化工产品的生产过程通常需要几个到数十个物理过程,分析这些物理过程的基本原理,可以将其归纳为若干种基本操作过程,称之为化工单元操作,简称单元操作。

随着化学工业的发展,单元操作不断发展,本书不能逐一列述,按照各单元操作所遵循的基本规律和工程目的,表 0-1 列出了化工常用单元操作的主要类型。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	过程目的	传递过程
液体输送	输入机械能,输送液体、气体	动量传递
搅拌	输入机械能,使物质均匀混合或分散	
沉降	利用密度差,分离非均相混合物	
过滤	通过对不同尺寸颗粒的截留,分离非均相混合物	
换热	输入或移出热量,使物料升温、降温或改变相态	热量传递
蒸发	汽化溶剂,使物料浓缩	
蒸馏	利用各组分间挥发性差异,分离均相液体混合物	质量传递
吸收	利用溶解度差异,分离均相气体混合物	
吸附	利用各组分在吸附剂中的吸附差异,分离均相流体混合物	
萃取	利用各组分在萃取剂中溶解度的差异,分离均相液体混合物	
膜分离	利用各组分对膜渗透能力的差异,分离均相气体或液体混合物	热、质同时传递
干燥	加热汽化湿固体物料,使固体物料干燥	
结晶	利用物质在不同温度下溶解度差异,使溶液中溶质结晶析出	

在研究上述单元操作时,人们逐渐认识到它们的共同规律即内在联系,从而进一步形成了称为动量传递、热量传递、质量传递的传递过程理论,传递过程理论是各单元操作的共同理论基础。

化工生产中,同一单元操作在不同的生产过程中遵循共同的原理,例如石油化工中,烃类的分离和酿造工业中酒精的提纯等,都采用精馏这一单元操作来实现,它们共同遵循质量传递原理,并使用相同的设备——精馏塔,但工艺条件(如温度、压力等),设备结构和工艺尺寸不完全一致;同一化工过程可采用不同的单元操作,如均相混合液体分离,可用精馏操作,也可用萃取操作、膜分离操作,究竟采用什么过程,需考虑经济上的合理性。

0.2 化工原理课程的性质及学习要求

化工原理是一门技术基础课,本课程的理论基础是已学过的数学、物理、物理化学和计算机基础等。学习本课程时要综合运用这些基础知识,分析和解决化工生产的实际问题。

化工原理属于工程科学,是一门实践性很强的课程。在教学过程中,应特别强调理论联系实际,注意培养学生的工程观点,定量计算、设计和开发能力及创新理念,同时,有以下具体要求。

(1) 单元操作和设备的选择能力:根据生产工艺要求、物料特性和技术经济特性,合理选择单元操作及设备。

(2) 工程设计能力:根据选定的单元操作,进行工艺过程计算和设备设计,当缺乏数据时能够通过查阅资料文献、现场测定或实验测定,获取所需数据。

(3) 操作和调节生产过程能力:熟悉生产过程,具备分析和解决操作中所产生的故障的基本能力。

(4) 开发创新能力:根据生产实际要求探索强化或优化过程与设备的基本能力。

应特别指出的是,近年来,随着高新技术产业的发展,如新材料、生物化工、制药、环境工程等领域的发展和崛起,出现了一系列新兴的单元操作和过程技术。如膜分离技术、超临界流体技术、反应精馏技术等,它们是各单元操作、各专业学科间互相渗透、耦合的结果。因此,培养学生灵活运用本学科的知识,以及通过各学科间知识与技术的耦合以开发新型单元操作与设备的基本能力十分重要。

0.3 单元操作中常用的基本概念

在化工过程和单元操作的分析与计算时,经常用到下列四个基本概念,即物料衡算、能量衡算、过程平衡和过程传递速率,它们贯穿了本课程始终,应熟练掌握并灵活运用。这里仅作简单介绍。

1. 物料衡算

根据质量守恒定律,进入与离开某一过程或设备的物料质量之差,应等于积累在该过程或设备中的物料质量,即

$$\sum m_{\text{入}} - \sum m_{\text{出}} = m \quad (0-1)$$

式中: $\sum m_{\text{入}}$ —— 输入物料质量的总和;

$\sum m_{\text{出}}$ —— 输出物料质量的总和;

m —— 积累物料的质量。

在进行物料衡算时,应注意以下几点。

(1) 确定衡算范围:上述式(0-1)既适合一个生产过程,也适合一台设备,甚至设备中的一个微元。计算时,应先确定衡算范围,列出衡算方程式,求解未知量。

(2) 选定计算基准:一般选不变化的量作为衡算的基准。例如,用物料的总质量或物料中某一组分的质量作为基准。对于间歇过程,可以一次(一批)操作为基准;对于连续过程,通常以单位时间为基准。

(3) 确定物理量的单位:物料量可用质量或物质的量表示,但一般不用体积表示。因为体积,特别是气体体积,会随温度和压力的变化而改变。另外,在衡算中单位应统一。

【例 0-1】 某一连续操作的蒸发器将 NaOH 浓度为 20% (质量分数) 的稀溶液蒸发浓缩到浓度为 50% (质量分数)。该蒸发器每小时的进料量为 10 000 kg,试求每小时所得浓碱液量 W 及蒸发水量 V 。

解 (1) 画出过程示意图,圈出衡算范围,标出各物理量,如例 0-1 附图所示。

(2) 确定衡算基准。过程为定态,时间基准取 1 h,则总物料衡算式为

$$F = V + W$$

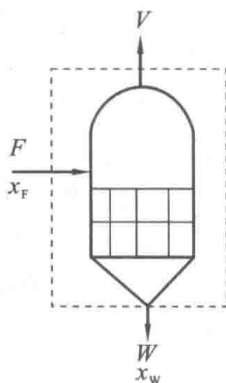
溶质衡算式为

$$F x_F = W x_w$$

由以上两式解得

$$W = \frac{x_F}{x_w} F = 10\,000 \times \frac{20}{50} \text{ kg/h} = 4\,000 \text{ kg/h}$$

$$V = \left(1 - \frac{x_F}{x_w}\right) F = \left(1 - \frac{20}{50}\right) \times 10\,000 \text{ kg/h} = 6\,000 \text{ kg/h}$$



例 0-1 附图

2. 能量衡算

化工过程涉及的能量衡算多为热量衡算,热量衡算的基础是能量守恒定律,其衡算方法、步骤和注意事项,与物料衡算基本相同。除此之外,热量衡算必须选物态和温度基准。

3. 过程平衡

系统的过程平衡关系表示过程进行的方向和能达到的极限。例如,当两物质温度不同,即温度不平衡时,热量就会从高温物质向低温物质传递,直到温度相等为止,此时传热达到平衡,过程达到极限,两物质间不再有热量的净传递。用过程平衡关系可以判断过程能否进行,以及进行的方向和能够达到的极限。

4. 过程传递速率

过程传递速率表征过程进行的快慢,通常用单位时间内过程进行的变化量表示。显然,过程传递速率越大,设备生产能力越大,在完成同样的传递任务时,设备的尺寸就越小。工程上,过程传递速率问题往往比过程平衡问题更为重要。过程传递速率通常可表示为

$$\text{过程传递速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

过程推动力是指过程在某瞬间距平衡状态的差值。过程阻力由很多因素决定,如操作条件、物性等。显然,提高过程推动力和减小过程阻力均可提高过程传递速率。

0.4 基本研究方法

化工原理作为一门工程科学,其目的是解决真实的、复杂的生产实际问题。探求合理的研究方法是本课程的重要方面。在长期的历史发展过程中形成了两种基本研究方法,即实验研究法和数学模型法。

1. 实验研究法——经验法

在实际化工过程中,很多情况下难以用数学方程定量描述和分析、预测,而必须通过实验来解决,即所谓的实验研究法。它一般以因次(量纲)分析法为指导,依靠实验建立过程参数之间的相互关系,而且通常是把各种参数的影响表示成由若干个有关参数组成的、具有一定物理意义的无因次数群(也称特征数)的影响。在本课程的学习过程中,将经常见到以无因次数群表示的关系式。

2. 数学模型法——半经验半理论法

数学模型法首先要对化工实际问题的机理作深入分析,从复杂的工程问题中排除非主要因素,抓住过程本质,作出合理的简化,建立物理模型和数学模型来解决工程实际问题。数学模型法所得结果通常包括反映过程特性的模型参数,还需通过实验确定,因而这是一种半经验、半理论的方法。

本课程中,两种方法并重,学习时,应仔细体会何时采用实验研究法,何时采用数学模型法。掌握这些方法,将有助于增强分析问题与解决问题的能力。

第1章 流体流动

1.1 概 述

化工过程中需进行物理或化学加工处理的物料主要是液体和气体,即流体。流体输送是化工过程基本的单元操作之一,流体流动的基本原理对化工过程的进行状况、设备投资与动力消耗有着重要影响。利用流体流动的基本原理,可测量流体输送系统中的压力变化和流量,计算输送管路参数与所需功率,选择输送设备的规格型号,强化化工设备的传质和传热过程等。

流体是由大量存在间隙的分子组成的,分子呈无规则运动状态。从分子角度看,流体是不连续的,但在工程应用中人们关心的是流体的宏观运动结果,即大量流体分子的统计平均特性,从而提出流体的连续介质概念,即将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质,每个分子集团称为质点,质点间没有任何空隙,即可认为流体充满其所占据的空间。在外力作用下,流体质点产生相对运动,形成流动。但是,并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如高度真空下的气体就不能再视为连续介质了。

本章着重讨论流体流动过程的流体力学和流体在管内的流动特性和规律,以及其在流体输送和管路计算中的应用。

1.2 流体静力学

流体静力学研究流体处于平衡状态时,其内部受力的变化规律。流体静力学的知识可应用于流体在设备或管道中压力的测定、液位的测量和设备液封等方面。在讨论流体静力学前,先介绍流体的相关性质。

1.2.1 流体的物理性质

1. 流体的密度

单位体积流体具有的质量,称为流体的密度,其定义式为

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

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

对任何一种流体,其密度是压力和温度的函数,可用下式表示:

$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

其中液体的密度基本上不随压力变化(极高压力除外),故液体可视为不可压缩流体。但液体的密度随温度改变而变化。气体具有可压缩性及膨胀性,是可压缩的流体,其密度随压力和温度改变而变化,因此对于气体的密度必须标明其状态。一般当压力不太高、温度不太低时,可按理想气体状态方程计算。

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中: p ——气体的绝对压力, Pa;

T ——气体的热力学温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/mol;

R ——摩尔气体常数, 8.314 J/(mol · K)。

对于一定质量的理想气体, 其体积、压力和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'} \quad (1-4)$$

将密度的定义式代入上式并整理得

$$\rho = \rho' \frac{T'p}{Tp'} \quad (1-5)$$

式中: 上标“'”表示所指定的状态条件。

一般情况下, 某状态下理想气体的密度可按下式进行计算:

$$\rho = \frac{MT_0 p}{22.4Tp_0} \quad (1-6)$$

式中: 下标“0”表示标准状态。

在化工过程中所遇到的流体, 通常是含有多个组分的混合物。对于液体混合物, 各组分的组成常用质量分数表示。假定各组分在混合前后其体积不变, 则 1 kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和, 即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-7)$$

式中: $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度, kg/m³;

$w_1, w_2, \dots, w_n$ ——液体混合物中各组分的质量分数。

对于气体混合物, 各组分的组成常用体积分数来表示。假定各组分在混合前后质量不变, 则 1 m³ 混合气体的质量等于各组分的质量之和, 即

$$\rho_m = \rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n \quad (1-8)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ ——气体混合物中各组分的体积分数。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1-3)计算, 此时应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替式(1-3)中的气体摩尔质量 M , 气体混合物的平均摩尔质量 M_m 可按下式计算:

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_n y_n \quad (1-9)$$

式中: $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔质量, kg/mol;

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

2. 比容与相对密度

比容是密度的倒数, 单位为 m³/kg, 即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-10)$$

相对密度为物质的密度与标准物质的密度之比。对于固体和液体, 标准物质多选用 4 °C 的水; 对于气体, 则多采用标准状态(0 °C, 1 × 10⁵ kPa)下的空气。

1.2.2 流体压力

流体垂直作用于单位面积上的力,称为压力强度,简称压强,习惯上称为压力。在静止流体内部,任一点的压力方向都与作用面相垂直,且大小相等。

在国际单位制中,压力的单位是 Pa,称为帕斯卡。但实际应用中还采用其他单位,如 atm(标准大气压)、某流体柱高度、bar(巴)或 kgf/cm^2 等,它们之间的换算关系为

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

工程上为了使用和换算方便,常将 1 kgf/cm^2 近似地作为 1 个大气压,称为 1 工程大气压(at)。于是

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

压力除用不同的单位计量外,还可以用不同的方法来表示。以绝对零压作起点计算的压力,称为绝对压力,简称绝对压,是流体的真实压力。

流体的压力可用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压大于外界大气压时,所用的测压仪表称为压力表。压力表上的读数表示被测流体的绝对压比大气压高出的数值,称为表压,即

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

当被测流体的绝对压小于外界大气压时,所用测压仪表称为真空表。真空表上的读数表示被测流体的绝对压低于大气压的数值,称为真空度,即

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

显然,设备内流体的绝对压愈低,则它的真空度就愈高。真空度又是表压的负值。例如,真空度为 $1.5 \times 10^3 \text{ Pa}$,则表压是 $-1.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

大气压和绝对压、表压、真空度之间的关系可以用图 1-1 表示。

为避免绝对压、表压、真空度之间相互混淆,规定对表压和真空度均加以标注,如 $3 \times 10^3 \text{ Pa}$ (表压)、 $4 \times 10^3 \text{ Pa}$ (真空度)等。同时应当指出,环境的大气压会随大气的温度、湿度和所在地区的海拔高度而改变。

【例 1-1】 容积为 10 m^3 的密闭容器内盛有 20°C 的氨气,容器顶压力表读数为 $1.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。试求容器内氨气的质量。当地大气压为 $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

解 根据密度定义得

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

式中: m ——容器内氨气的质量,kg;

V ——容器的体积, m^3 。

由于密度定义式是由理想气体状态方程推导出的,故式中 p 一定要用绝对压。

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{(1.6 + 1.0133) \times 10^5 \times 10 \times 17}{8.314 \times 10^3 \times (273 + 20)} \text{ kg} = 18.24 \text{ kg}$$

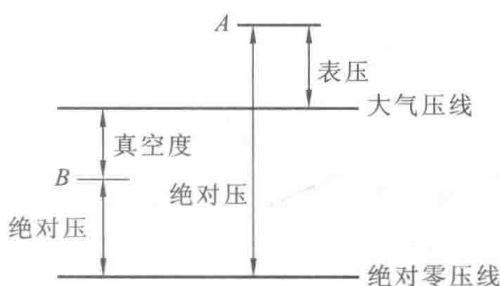


图 1-1 大气压和绝对压、表压、真空度之间的关系

1.2.3 流体静力学基本方程

流体静力学研究流体在外力作用下达到平衡时各物理量的变化规律。

当流体处于相对静止状态时,由于重力可以看作是不变的,变化的只是压力,描述流体在重力和压力作用下平衡规律的数学表达式,称为流体静力学基本方程。此方程推导如下。

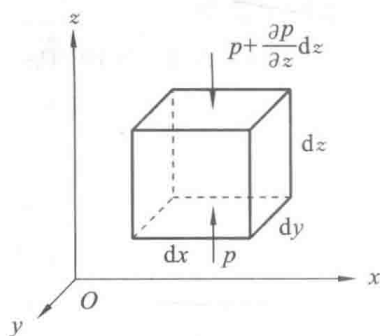


图 1-2 微元流体的静力平衡

在密度为 ρ 的静止流体中,取一流体微元立方体,其边长分别为 dx 、 dy 、 dz ,它们分别与 x 、 y 、 z 轴平行,如图 1-2 所示。

由于流体处于静止状态,因此所有作用于该立方体上的力在坐标轴上的投影之代数和应等于零。

对于 z 轴,作用于该立方体上的力有:

- (1) 作用于下底面的总压力 $p dx dy$;
- (2) 作用于上底面的总压力 $-\left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz\right) dx dy$;
- (3) 作用于整个立方体的重力 $-\rho g dx dy dz$ 。

在 z 轴方向的平衡式可写成

$$p dx dy - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz\right) dx dy - \rho g dx dy dz = 0$$

$$\text{即} \quad -\frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz - \rho g dx dy dz = 0 \quad (1-11)$$

式(1-11)各项除以 $dx dy dz$,则 z 轴方向力的平衡式可简化为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (1-11a)$$

对于 x 、 y 轴,作用于该立方体的力仅有压力,亦可写出其相应的力的平衡式,简化后得 x 轴:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-11b)$$

y 轴:

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1-11c)$$

式(1-11a)、式(1-11b)和式(1-11c)称为流体平衡微分方程,积分该微分方程组可得到流体静力学基本方程。

将式(1-11a)、式(1-11b)、式(1-11c)分别乘以 dz 、 dx 、 dy ,并相加后得

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = -\rho g dz \quad (1-11d)$$

上式等号的左侧即为压力的全微分 dp ,于是

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (1-11e)$$

对于不可压缩流体, ρ = 常数,积分上式,得

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-11f)$$