



普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

化工原理

杨祖荣 主编

高等教育出版社



TQ02-43
Z9

普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

化 工 原 理

杨祖荣 主 编
刘丽娟 刘 伟 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。全书共八章,包括绪论、流体流动与输送设备、非均相物系分离、传热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥及其他分离技术。每章均编有适量的例题,章首有本章学习要求,章末附有思考题和习题。

本书理论联系实际,强调工程观点,在阐明基本原理的基础上,注重各化工单元的基本操作方法,同时适当介绍本学科的新进展。内容深入浅出,突出重点,并附有辅导学习光盘,便于自学。本书作为化工及相关专业高职高专或成教的教材,也可供化工及相关部门技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 杨祖荣主编. —北京:高等教育出版社,
2004.4 (2005 重印)
ISBN 7-04-013898-0

I. 化... II. 杨... III. 化工原理-高等学校:技
术学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 010485 号

策划编辑 蒋青 责任编辑 应丽贞 封面设计 杨立新 责任绘图 朱静
版式设计 胡志萍 责任校对 杨雪莲 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总机 010-58581000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 25.25
字 数 620 000

版 次 2004年4月第1版
印 次 2005年4月第2次印刷
定 价 34.90元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 13898-00

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化,基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。可作为化工类及相关专业(包括化工、石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保等专业)的教材,也可供有关部门的技术人员参考。

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。在编写过程中,力争保证系统完整,并做到深入浅出,注重理论联系实际,突出工程观点和研究方法,同时反映新技术。各章中增加“过程强化与展望”一节,介绍过程的强化措施及该过程的发展方向。为便于学习,各章首有本章学习要求,明确本章应掌握、了解与熟悉的内容;各章末附有思考题和习题;同时还附有辅导光盘,内容有各章重点内容纲要,主要设备的二维、三维动画,部分附录、附表,模拟试卷等,便于学生自学。

本书采用的物理量符号主要依据国家标准,但为使用方便,部分符号仍沿用习惯用法。

本书主编杨祖荣,副主编刘丽英、刘伟。参加编写工作的有北京化工大学杨祖荣(绪论、蒸发、结晶)、刘丽英(流体流动与输送设备、膜分离)、刘伟(吸收、吸附)、开封大学陶颖(非均相分离、精馏)及重庆工业高等专科学校贾云(传热、干燥)。

本书承蒙北京联合大学唐小恒教授主审,他提出了许多宝贵意见。在编写过程中,编者的同事们给予了热情的关心、支持和帮助,在此向他们表示深切的谢意。

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

绪论	1	习题	79
第一章 流体流动与输送设备	5	主要符号说明	85
第一节 流体静力学	6	参考文献	86
1-1-1 密度	6	第二章 非均相物系分离	87
1-1-2 压力	7	第一节 概述	87
1-1-3 流体静力学平衡方程	8	2-1-1 非均相分离在工业中的应用	87
第二节 流体动力学	14	2-1-2 颗粒与颗粒群的特性	88
1-2-1 流体的流量与流速	14	第二节 颗粒沉降	90
1-2-2 定态流动与非定态流动	16	2-2-1 颗粒在流体中的沉降过程	90
1-2-3 定态流动系统的质量守恒—— 连续性方程	16	2-2-2 重力沉降及设备	91
1-2-4 定态流动系统的机械能守恒—— 柏努利方程	17	2-2-3 离心沉降及设备	97
第三节 管内流体流动现象	24	第三节 过滤	102
1-3-1 流体的粘度	24	2-3-1 概述	102
1-3-2 流体的流动型态	26	2-3-2 过滤基本方程式	103
1-3-3 流体在圆管内的速度分布	28	2-3-3 过滤设备	106
第四节 流体流动阻力	30	第四节 过程强化与展望	111
1-4-1 流体在直管中的流动阻力	30	2-4-1 沉降过程的强化	111
1-4-2 局部阻力	37	2-4-2 过滤过程的强化	112
1-4-3 流体在管路中的总阻力	39	2-4-3 过滤技术展望	112
第五节 管路计算	41	思考题	113
1-5-1 简单管路	41	习题	114
1-5-2 复杂管路	44	主要符号说明	115
第六节 流速与流量的测量	45	参考文献	115
1-6-1 测速管	45	第三章 传热	117
1-6-2 孔板流量计	47	第一节 概述	117
1-6-3 文丘里流量计	50	3-1-1 传热过程在化工生产中的应用	118
1-6-4 转子流量计	51	3-1-2 传热基本方式	118
第七节 流体输送设备	53	3-1-3 工业换热方式和典型传热设备	119
1-7-1 离心泵	53	第二节 热传导	120
1-7-2 其他类型化工用泵	68	3-2-1 傅里叶定律及导热系数	120
1-7-3 气体输送设备	72	3-2-2 平壁的热传导	123
思考题	78	3-2-3 圆筒壁的热传导	126
		第三节 对流传热	128

3-3-1 对流传热分析	129	习题	201
3-3-2 牛顿冷却定律及对流传热系数 ..	130	主要符号说明	201
3-3-3 对流传热中量纲分析法的应用 ..	132	参考文献	202
3-3-4 流体无相变时的对流传热系数 ..	134	第五章 气体吸收	203
3-3-5 流体有相变时的对流传热系数 ..	141	第一节 概述	203
第四节 传热计算	144	5-1-1 化工生产中的传质过程	203
3-4-1 热负荷计算	144	5-1-2 相组成表示法	204
3-4-2 总传热速率方程	145	5-1-3 气体吸收过程	207
3-4-3 总传热系数	146	5-1-4 气体吸收过程的应用	208
3-4-4 平均温度差法	149	5-1-5 吸收剂的选用	208
3-4-5 壁温的计算	155	5-1-6 吸收过程的分类	209
第五节 辐射传热	156	第二节 气液相平衡关系	209
3-5-1 热辐射的基本概念	156	5-2-1 气体在液体中的溶解度	209
3-5-2 物体的辐射能力	157	5-2-2 相平衡关系在吸收过程中的	
3-5-3 两固体间的辐射传热	158	应用	213
3-5-4 辐射和对流的联合传热	158	第三节 单相传质	215
第六节 换热器	159	5-3-1 定态的一维分子扩散	215
3-6-1 换热器的分类	159	5-3-2 分子扩散系数	220
3-6-2 列管换热器的结构及选用	159	5-3-3 单相对流传质机理	221
3-6-3 其他常用换热器	169	5-3-4 单相对流传质速率方程	222
第七节 过程强化与展望	172	第四节 相际对流传质及总传质速率	
思考题	173	方程	223
习题	174	5-4-1 双膜理论	223
主要符号说明	176	5-4-2 吸收过程的总传质速率方程	224
参考文献	177	第五节 吸收塔的计算	227
第四章 蒸发	178	5-5-1 物料衡算和操作线方程	227
第一节 概述	178	5-5-2 吸收剂用量与最小液气比	229
第二节 单效蒸发与真空蒸发	180	5-5-3 吸收塔填料层高度的计算	231
4-2-1 单效蒸发设计计算	180	5-5-4 吸收塔塔径的计算	237
4-2-2 蒸发器的生产能力与生产强度 ..	185	5-5-5 吸收塔的操作型计算	237
第三节 多效蒸发	186	5-5-6 解吸及其计算	239
4-3-1 加热蒸汽的经济性	186	5-5-7 强化吸收过程的措施	242
4-3-2 多效蒸发	187	第六节 填料塔	243
4-3-3 多效蒸发效数的限制	194	5-6-1 填料塔与填料	243
第四节 蒸发设备	195	5-6-2 填料塔的流体力学性能	246
4-4-1 蒸发器	195	5-6-3 填料塔的附件	249
4-4-2 蒸发器的选型	198	思考题	251
4-4-3 蒸发装置的附属设备和机械	198	习题	251
第五节 过程和设备的强化与展望	199	主要符号说明	254
思考题	201	参考文献	255

第六章 蒸馏	256	习题	304
第一节 概述	256	主要符号说明	307
6-1-1 蒸馏操作在化工生产中的应用	256	参考文献	308
6-1-2 蒸馏操作的依据	257	第七章 干燥	309
6-1-3 蒸馏过程的分类	257	第一节 概述	309
第二节 双组分物系的气液相平衡	258	7-1-1 干燥过程的分类及应用	309
6-2-1 理想物系的气液相平衡	258	7-1-2 干燥过程进行的条件	311
6-2-2 非理想物系的气液相平衡	261	第二节 湿空气的性质及湿度图	312
6-2-3 挥发度及相对挥发度	262	7-2-1 湿空气的性质	312
第三节 简单蒸馏和平衡蒸馏	265	7-2-2 湿度图及应用	318
6-3-1 简单蒸馏	265	第三节 干燥过程的物料衡算与热量 衡算	321
6-3-2 平衡蒸馏	266	7-3-1 干燥过程的物料衡算	321
第四节 精馏	268	7-3-2 干燥过程的热量衡算	322
6-4-1 精馏原理	268	7-3-3 干燥器出口空气状态的确定	326
6-4-2 精馏操作流程	269	第四节 干燥速率和干燥时间	327
第五节 双组分连续精馏的计算	270	7-4-1 物料中所含湿分的性质	327
6-5-1 理论板的概念与恒摩尔流的 假设	270	7-4-2 干燥速率和干燥速率曲线	328
6-5-2 全塔物料衡算	271	7-4-3 恒定干燥条件下干燥时间的 计算	331
6-5-3 操作线方程	272	第五节 干燥器	333
6-5-4 进料热状况的影响及 q 线方程	274	7-5-1 干燥器的性能要求及选用原则	333
6-5-5 理论板层数的计算	277	7-5-2 工业常用干燥器	333
6-5-6 最小回流比、回流比及其选择	280	第六节 过程强化与展望	337
6-5-7 理论板层数的简捷算法	283	思考题	338
6-5-8 精馏装置的热量衡算	285	习题	339
第六节 间歇精馏	286	主要符号说明	340
6-6-1 恒回流比操作	287	参考文献	341
6-6-2 恒馏出液组成操作	288	第八章 其他分离技术	343
第七节 恒沸精馏与萃取精馏	288	第一节 结晶	343
6-7-1 恒沸精馏	288	8-1-1 概述	343
6-7-2 萃取精馏	289	8-1-2 结晶原理	343
第八节 板式塔	290	8-1-3 结晶器简介	346
6-8-1 板式塔的结构	290	8-1-4 强化与展望	346
6-8-2 板式塔的流体力学性能	293	第二节 吸附分离	347
6-8-3 塔板负荷性能图	296	8-2-1 概述	347
6-8-4 全塔效率与单板效率	297	8-2-2 吸附剂及其特性	348
6-8-5 塔高及塔径计算	298	8-2-3 吸附平衡	349
第九节 过程的强化与展望	300	8-2-4 吸附过程与吸附速率的控制	351
6-9-1 蒸馏过程的节能技术	301	8-2-5 吸附操作	351
6-9-2 新蒸馏过程的开发	303		
思考题	303		

8-2-6 吸附过程的强化与展望	354	4. 饱和水蒸气表(按压力排列)	374
第三节 膜分离	355	六、粘度	376
8-3-1 概述	355	1. 液体粘度共线图	376
8-3-2 膜与膜组件	357	2. 气体粘度共线图	378
8-3-3 反渗透	360	七、导热系数	379
8-3-4 超滤与微滤	361	1. 固体导热系数	379
8-3-5 气体分离	363	2. 某些液体导热系数	380
思考题	364	3. 气体导热系数共线图(101.3kPa)	381
主要符号说明	364	八、比热容	383
参考文献	364	1. 液体比热容共线图	383
附录	366	2. 气体比热容共线图(101.3kPa)	385
一、常用物理量的单位与量纲	366	九、液体汽化热共线图	387
二、某些气体的重要物理性质	367	十、管子规格	388
三、某些液体的重要物理性质	368	十一、离心泵规格(摘录)	389
四、干空气的物理性质(101.3kPa)	370	1. IS型单级单吸离心泵规格	389
五、水及蒸汽的物理性质	371	2. Y型离心油泵规格	391
1. 水的物理性质	371	十二、换热器系列(摘录)	391
2. 水在不同温度下的粘度	372	十三、无机物水溶液在大气压下的	
3. 饱和水蒸气表(按温度排列)	373	沸点	394

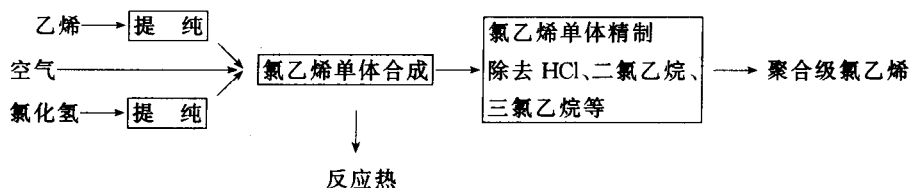
绪 论

一、化工生产过程与单元操作

1: 化工生产过程

化学工业是将原料进行化学和物理方法加工而获得产品的工业。化工产品不仅是工业、农业和国防部门的重要生产资料,同时也是人们日常生活中的重要生活资料。特别是近年来,传统化学工业向石油化工、精细化工、生物化工、环境、医药、冶金等领域或工业延伸、结合,因而出现“化工及其相近工业”的提法。不容置疑,它们已成为国民经济中十分重要的部分。

化工产品种类繁多,生产过程十分复杂,每种产品的生产过程也不相同,但加以归纳均可视为由原料预处理过程、反应过程和反应产物后处理过程三个基本环节组成。例如,乙烯法制取氯乙烯生产过程,它是以乙烯、空气和氯化氢为原料,在压力为 0.5 MPa,温度为 220 ℃,以 CuCl_2 为催化剂等条件下反应,制取氯乙烯。在反应前,乙烯和氯化氢需经预处理除去有害物质,避免催化剂中毒。反应后产物中,除反应主产物氯乙烯外,还含有未反应的氯化氢、乙烯及副产物,如二氯乙烷、三氯乙烷等,需经后处理过程,如氯化氢的吸收过程,二氯乙烷、三氯乙烷与氯乙烯的分离过程等,最终获得聚合级精制氯乙烯。其生产过程简图如下:



上述生产过程除单体合成属化学反应过程外,原料和反应产物的提纯、精制、分离,包括为反应过程维持一定的温度、压力而进行的加热、冷却、压缩等均为物理加工过程。据资料报道,化学与石油化学、制药等工业中,预处理、后处理物理加工过程的设备投资约占全厂设备投资的 90% 左右,由此可见它们在化工生产过程中的重要地位。

2. 单元操作

通常,一种产品的生产过程往往需要几个或数十个物理加工过程。但研究后发现,根据这些物理过程的操作原理和特点,可以将其归纳为若干基本的操作过程,如流体流动及输送、沉降、过滤、加热或冷却、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、结晶及吸附等,如表 0-1 所示。我们将这些具有共性的基本操作称为单元操作。由于各单元操作均遵循自身的规律和原理,并在相应的设备中进行,因此,单元操作包括过程原理和设备两部分内容。

在对诸多单元操作进行研究归纳后发现,它们遵循若干基本规律并具有相应的理论基础。从表 0-1 可以看出,除压缩、冷冻、粉碎、颗粒分级分属热力过程和机械过程外,其余单元操作分属:

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	过程原理与目的	基本过程(理论基础)
流体输送 沉降 过滤 搅拌 流态化	输入机械能将一定量流体由一处送到另一处 利用密度差,从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡 根据尺寸不同的截留,从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒 输入机械能使流体相互或与其他物质均匀混合 输入机械能使固体颗粒悬浮,使其具有流体状态的特性,利于燃烧、反应、干燥等过程	流体动力过程 (动量传递)
换热 蒸发	利用温差输入或移出热量,使物料升、降温或改变相态 加热以汽化物料,使之浓缩	传热过程 (热量传递)
蒸馏 吸收 萃取 吸附 膜分离	利用各组分间挥发度不同,使液体混合物分离 利用各组分在溶剂中的溶解度不同,分离气体混合物 利用各组分在萃取剂中的溶解度不同,分离液体混合物 利用各组分在吸附剂中的吸附能力不同,分离气、液混合物 利用各组分对膜渗透能力的差异,分离气体或液体混合物	传质过程 (质量传递)
干燥 增减湿 结晶	加热湿固体物料,使之干燥 利用加热或冷却来调节或控制空气或其他气体中的水汽含量 利用不同温度下溶质溶解度不同,使溶液中溶质变成晶体析出	热、质同时传递
压缩 冷冻	利用外力做功,提高气体压力 利用外力做功,使热量从低温物体向高温物体转移	
粉碎 颗粒分级	用外力使固体物体破碎 将固体颗粒分成大小不同的类别	

流体动力过程(动量传递)——遵循流体力学基本规律,以动量传递为理论基础的单元操作;
 传热过程(热量传递)——遵循传热基本规律,以热量传递为理论基础的单元操作;
 传质过程(质量传递)——遵循传质基本规律,以质量传递为理论基础的单元操作;
 热、质同时传递的过程——同时遵循热质传递规律的单元操作。

1923年,美国麻省理工学院教授 W.H. 华克尔等出版了第一部关于单元操作的著作《化工原理》(Principles of Chemical Engineering)。解放后,我国也相继出版了以单元操作为主线的《化工原理》、《化工过程与设备》等教材,至今仍沿用《化工原理》这一名称。

二、化工原理课程的性质、内容及任务

本课程的性质:本课程是继数学、物理、基础化学、物理化学、计算机基础之后开设的一门技术基础课,它也是一门实践性很强的课程,所讨论的每一单元操作均与生产实践紧密相连。

本课程的内容:主要研究化工生产中各单元操作的基本原理、典型设备及其设计计算方法,主要有表 0-1 中列出的:

- (1) 流体动力过程:包括流体流动、流体输送机械、非均相物系分离等单元操作;
- (2) 传热过程:包括传热、蒸发等单元操作;
- (3) 传质过程:包括蒸馏、吸收、吸附、膜分离等单元操作;
- (4) 热质过程:包括干燥、结晶等单元操作。

本课程的任务:培养学生运用本学科基础理论及技能(如电算技能等),分析和解决化工生产

中有关实际问题的能力。特别是要注意培养学生的工程观点、定量计算、设计开发能力和创新理念。具体要求有：

(1) 选型：根据生产工艺要求、物料特性和技术、经济特点，合理选择单元操作及设备；

(2) 设计计算：根据选定的单元操作，进行工艺计算和设备设计，当缺乏数据时会设法获取，如通过实验测取必要数据等；

(3) 操作：熟悉操作原理、操作方法和调节参数，具备分析和解决操作中产生的故障的基本能力；

(4) 开发创新：具备探索强化或优化过程与设备的基本能力。

特别应该指出的是，近年来，随着高新技术产业的发展，例如新材料、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化工技术，如膜分离技术、超临界流体技术、超重力场分离、反应精馏技术、电磁分离技术等。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，注意培养学生灵活运用本学科以及各学科间的知识及技术来开发新型单元操作和化工新技术的基本能力十分重要。

三、单元操作中常用的基本概念和观点

在计算和分析单元操作的问题时，经常会用到下列四个基本概念和一个观点，即物料衡算、能量衡算、过程平衡和过程速率四个基本概念，和经济核算观点。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：

$$\sum G_{\text{入}} - \sum G_{\text{出}} = G \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_{\text{入}}$ ——输入物料质量的总和；

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出物料质量的总和；

G ——积累物料质量。

在进行物料衡算时，应注意下列几点：

(1) 确定衡算系统：上述式(0-1)既适合于一个生产过程，也适合于一个设备，甚至设备中的一个微元。计算时，应先确定衡算系统，并将其圈出，列出衡算式，求解未知量。

(2) 选定计算基准：一般选没有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，可用一次(一批)操作为基准，对于连续过程，通常以单位时间的变化量为基准。

(3) 确定衡算对象的物料量和单位：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强的变化而改变。另外，在衡算中单位应统一。

2. 能量衡算

本教材中讨论的能量衡算主要为机械能和热能衡算。机械能衡算将在第一章中介绍。热量衡算将在传热、蒸馏、干燥等章节中介绍。其衡算步骤和注意事项，与物料衡算基本相同。

3. 过程平衡

过程平衡表示过程进行的方向和能达到的极限。例如传热，当两物质温度不同，即热量不平

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,此时传热过程达到极限,两物质间不再有热量的净传递。

在传质过程中,例如吸收过程,当用清水吸收空气与氨混合物中的氨时,氨在两相间不平衡,空气中的氨将进入水中,当水中的氨含量增至一定值时,氨在气液两相间达平衡,即不再有质量的净传递。

由上可知过程平衡可以用来判断过程能否进行,以及进行的方向和能够达到的极限。

4. 过程速率

过程速率是指过程进行的快慢,通常用单位时间内过程进行的变化量表示。如传热过程速率用单位时间内传递的热量,或用单位时间单位面积传递的热量表示;传质过程速率用单位时间单位面积传递的物质质量表示。显然,过程的速率越大,设备生产能力越大,或在完成同样产量时,所需设备的尺寸越小。工程上,过程速率问题往往比过程平衡问题更为重要。过程速率通常可表示成以下关系式:

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

过程的推动力是指过程在某瞬间距平衡状态的差值。如传热推动力为温度差,传质推动力为实际浓度与平衡浓度之差。过程的阻力,则取决于过程机理,如操作条件、物性等。显然提高推动力和减少过程阻力均可提高过程速率,但各有什么利弊,需要结合各单元操作的实际情况予以讨论。

5. 经济核算

在设计具有一定生产能力的设备时,根据设备型式、材料不同,可提出若干不同设计方案。对于同一设备,选用不同操作参数,则设备费和操作费也不同。因此,不仅要考虑技术先进,同时还要通过经济核算来确定最经济的设计方案,达到技术和经济的优化。当今,对于工程技术人员而言,建立优化的技术经济观点十分重要和必要。

第一章 流体流动与输送设备

本章学习要求

1. 掌握的内容

流体的密度和粘度的定义、单位、影响因素,压强的定义、表示法及单位换算;流体静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用;流动型态及其判据,雷诺数的物理意义及计算;流体在管内流动的机械能损失计算;简单管路的计算;离心泵的工作原理、性能参数、特性曲线,泵的工作点及流量调节,泵的安装及使用等。

2. 熟悉的内容

层流与湍流的特征;测速管、孔板流量计及转子流量计的工作原理、基本结构与计算;往复泵的工作原理及正位移特性;离心通风机的性能参数、特性曲线。

3. 了解的内容

层流内层与边界层;复杂管路计算要点;其他化工用泵的工作原理及特性;往复压缩机的工作原理。

流体是气体与液体的总称。化工生产中所处理的物料及加工后得到的半成品、成品等,大多是流体,为满足生产工艺的要求,常需要将流体物料从一个工序输送至另一工序,流体流动与输送遂成为最普遍的化工单元操作之一。此外,化工生产中的传热、传质以及化学反应等大多是在流体流动状态下进行的,这些过程的速率与流体流动的状况密切相关,所以研究流体流动问题也是研究其他化工单元操作的基础。

从微观上讲,流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成,而且分子总是处于随机运动状态。但工程上,在研究流体流动时,常从宏观出发,将流体视为由无数流体质点(或微团)组成的连续介质。所谓质点是指由大量分子构成的微团,其尺寸远小于设备尺寸,但却远大于分子自由程。这些质点在流体内部紧紧相连,彼此间没有间隙,即流体充满所占空间,为连续介质。这种连续性假定,可以避免复杂的分子运动,从宏观的角度来研究流体流动的规律。应予以指出,连续性假定对大多数工程情况是适用的,但在高真空稀薄气体的情况下,该假定不再成立。

如果流体的体积不随压力变化而变化,则该流体称为**不可压缩性流体**;若随压力发生变化,则称为**可压缩性流体**。一般液体的体积随压力变化很小,可视为不可压缩性流体;而对于气体,当压力变化时,体积会有较大的变化,常视为可压缩性流体,但如果压力的变化率不大,该气体也可当作不可压缩性流体处理。

本章主要研究流体流动的基本规律以及流体输送所用的设备等。

第一节 流体静力学

流体静力学主要研究流体处于静止时各种物理量的变化规律。流体静力学基本原理在化工生产中应用广泛,如流体压力(差)的测量、容器液位的测定和设备液封等。

1-1-1 密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,表达式为

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

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 。

对一定的流体,其密度是压力和温度的函数,即

$$\rho = f(p, T)$$

液体密度 一般液体的密度基本上不随压力变化(极高压力除外),但随温度变化。液体密度随温度变化关系可从手册中查得,本书附录三给出了一些常用液体的密度值。

气体密度 对于气体,当压力不太高、温度不太低时,可按理想气体状态方程计算:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa ;

M ——气体的摩尔质量, kg/mol ;

T ——热力学温度, K ;

R ——摩尔气体常数,其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

一般在手册中查得的气体密度都是在一定压力与温度下的数值,若条件不同,则此值需进行换算。

化工生产中遇到的流体,大多为几种组分构成的混合物,而通常手册中查得的是纯组分的密度,混合物的平均密度 ρ_m 可以通过纯组分的密度进行计算。

液体混合物的密度 对于液体混合物,其组成通常用质量分数表示。现以 1 kg 混合液体为基准,并假设各组分在混合前后体积不变,则 1 kg 混合液体的体积等于各组分单独存在时体积之和,即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-3)$$

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

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——各纯组分的密度, kg/m^3 。

气体混合物的密度 对于气体混合物,其组成通常用体积分数表示。以 1 m^3 混合气体为基

准,则 1 m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和,即

$$\rho_m = \rho_1 \phi_1 + \rho_2 \phi_2 + \cdots + \rho_n \phi_n \quad (1-4)$$

式中 $\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_n$ ——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 也可用式(1-2)计算,但式中的摩尔质量 M 应用混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替,即

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-5)$$

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中 M_1, M_2, \cdots, M_n ——各纯组分的摩尔质量, kg/mol ;

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

对于理想气体,其摩尔分数 y 与体积分数 ϕ 相同。

例 1-1 试求于空气分别在 101.3 kPa 、 20°C 及 260 kPa 、 90°C 条件下的密度。

解: (1) 由手册或附录四可直接查得 101.3 kPa 、 20°C 空气的密度为 1.205 kg/m^3 。

空气密度也可根据式(1-2)计算:

已知干空气的摩尔质量 $M = 28.95 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$, 则

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \times 28.95 \times 10^{-3}}{8.314 \times (273 + 20)} \text{ kg/m}^3 = 1.204 \text{ kg/m}^3$$

(2) 仍可由式(1-2)计算:

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{260 \times 10^3 \times 28.95 \times 10^{-3}}{8.314 \times (273 + 90)} \text{ kg/m}^3 = 2.494 \text{ kg/m}^3$$

或将(1)中的密度换算为 260 kPa 、 90°C 条件下的密度:

$$\rho = \rho_1 \frac{pT_1}{p_1 T} = 1.204 \times \frac{260 \times (273 + 20)}{101.3 \times (273 + 90)} \text{ kg/m}^3 = 2.494 \text{ kg/m}^3$$

1-1-2 压力

流体垂直作用于单位面积上的力,称为流体的静压强,简称压强,习惯上又称为压力。在静止流体中,作用于任意点不同方向上的压力在数值上均相同。

压力的单位 在 SI 中,压力的单位是 N/m^2 ,称为帕斯卡,以 Pa 表示。此外,压力的大小也可间接地以液柱高度表示,如用米水柱或毫米汞柱等。若流体的密度为 ρ ,则液柱高度 h 与压力 p 的关系为

$$p = \rho gh \quad (1-7)$$

由上式可知,同一压力,用不同液柱表示时,其高度不同。因此,当以液柱高度表示压力时,必须指明流体的种类,如 600 mmHg 、 $10 \text{ mH}_2\text{O}$ 等。

标准大气压有如下换算关系:

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

压力的表示方法 压力的大小常以两种不同的基准来表示:一是绝对真空;另一是大气压