



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

化工原理

第二版

杨祖荣 主 编

刘丽英 刘 伟 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

化 工 原 理

第二版

杨祖荣 主 编
刘丽英 刘 伟 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在第一版基础上修订。重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。全书包括绪论、流体流动与输送机械、非均相物系分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、固体干燥及其他分离技术。本次修订对第三章内容做了较大调整。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介绍计算方法和典型设备，同时适当介绍本学科的新进展。内容简练，深入浅出，突出重点，便于自学，引导创新。

本书可作为高等院校化工及相关专业的教材，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. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2009.6

普通高等教育“十五”国家级规划教材. 北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 978-7-122-05211-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 047755 号

责任编辑: 何 丽
责任校对: 周梦华

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 字数 693 千字 2009 年 7 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

自本书第一版问世以来，广大读者和同行给予了许多关注、鼓励和支持，并对书中的不足之处提出了宝贵的修改意见。另外，近几年来化工技术快速发展，化工及相关专业人才的培养目标也发生了一些变化。以上原因促使我们对本书第一版教材内容进行了修订和补充。在修订过程中，更加强调体现化工原理课程的工程特色，以培养读者解决工程实际问题的能力为目标。对各章节，在内容论述和例题选编方面，更加突出工程中设计型和操作型问题的区别和联系。同时，对第3章的内容做了较大的调整。

本书主编杨祖荣教授，副主编刘丽英、刘伟。参加编写工作的有杨祖荣（绪论、蒸发、结晶）、刘丽英（流体流动与输送设备、固体干燥、膜分离）、丁忠伟（传热）、刘伟（气体吸收、吸附分离）、苏海佳（蒸馏）及开封大学陶颖（非均相物系分离）。

作者十分感谢清华大学蒋维钧教授审阅本书，并提出许多宝贵意见，同时，感谢北京化工大学化工原理教研室的同事在修订工作所给予的支持和帮助。

编者
2009年2月于北京

第一版前言

本书是教育部为普通高等院校组织编写的“十五”国家级规划教材及北京市高等教育精品教材立项项目。

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，同时反映出新技术的发展。各章中设有“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、熟悉与了解的内容；各章末附有思考题和习题。本书可作为化工类及相关专业（包括化工、石油、生物化工、食品、制药、材料、轻纺、冶金、环境工程等）的化工原理教材，也可供有关部门的技术人员参考。

为了配合教与学，我们还出版了与本书配套的《化工原理学习辅导》和《化工原理电子教案》。前者主要介绍各章节重点，难点解析，部分习题解答及工程案例，自测练习及部分研究生入学试卷等；后者为全部章节电子教案（powerpoint 及部分多媒体素材）及习题详解。以供学生和教师使用。

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（流体流动与输送机械、固体干燥、膜分离），刘伟（气体吸收、吸附）、苏海佳（传热、蒸馏）及开封大学陶颖（非均相物系分离）。

本书承蒙清华大学蒋维钧教授审阅，并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中，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。

鉴于编者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者
2004年5月

目 录

绪 论	1
第 1 章 流体流动与输送机械	5
1.1 流体基本性质	5
1.1.1 连续介质的假定	5
1.1.2 流体的压缩性	6
1.1.3 作用在流体上的力	6
1.1.4 质量力与密度	6
1.1.5 压力	7
1.1.6 剪切力与黏度	8
1.2 流体静力学	9
1.2.1 静压力特性	9
1.2.2 流体静力学基本方程	10
1.3 流体动力学	14
1.3.1 流体的流量与流速	14
1.3.2 定态流动与非定态流动	15
1.3.3 定态流动系统的质量衡算	15
1.3.4 定态流动系统的机械能衡算	16
1.4 流体流动的内部结构	23
1.4.1 流体的流动型态	23
1.4.2 流体在圆管内的速度分布	24
1.5 流体流动阻力	28
1.5.1 直管阻力	28
1.5.2 局部阻力	36
1.5.3 流体在管路中的总阻力	38
1.6 管路计算	40
1.6.1 简单管路	40
1.6.2 复杂管路	44
1.7 流速与流量的测量	45
1.7.1 测速管	46
1.7.2 孔板流量计	47
1.7.3 文丘里流量计	49
1.7.4 转子流量计	50
1.8 流体输送机械	52
1.8.1 离心泵	53
1.8.2 其他类型化工用泵	66
1.8.3 气体输送机械	69
思考题	74
习题	75
本章符号说明	81
参考文献	81
第 2 章 非均相物系分离	82
2.1 概述	82
2.1.1 非均相物系分离在工业中的应用	82
2.1.2 颗粒与颗粒群的特性	83
2.2 颗粒沉降	85
2.2.1 颗粒在流体中的沉降过程	85
2.2.2 重力沉降及设备	85
2.2.3 离心沉降及设备	91
2.3 过滤	95
2.3.1 概述	95
2.3.2 过滤基本方程式	96
2.3.3 过滤设备	99
2.4 非均相物系分离过程强化与展望	104
2.4.1 沉降过程的强化	104
2.4.2 过滤过程的强化	104
2.4.3 过滤技术展望	105
思考题	106
习题	106
本章符号说明	107
参考文献	108
阅读参考文献	108
第 3 章 传热	109
3.1 概述	109
3.1.1 传热在化工生产中的应用	109

3.1.2	工业生产中的加热剂和冷却剂	110	3.4.4	总传热速率方程与热量平衡方程的联用	138
3.1.3	传热设备中冷、热流体的接触方式	110	3.4.5	平均传热温差的计算	138
3.1.4	传热学中一些基本概念	111	3.4.6	传热过程的设计型计算	142
3.2	热传导	112	3.4.7	传热过程的操作型计算	142
3.2.1	热传导机理简介	112	3.4.8	设备壁温的计算	144
3.2.2	热传导速率的表达——傅里叶定律	112	3.5	辐射传热	145
3.2.3	热导率	113	3.5.1	热辐射的基本概念	145
3.2.4	单层平壁的定态热传导	114	3.5.2	物体的辐射能力	146
3.2.5	单层圆筒壁的定态热传导	115	3.5.3	两固体间的辐射传热	148
3.2.6	通过多层壁的定态热传导	116	3.5.4	对流-辐射联合传热	149
3.3	对流传热	118	3.6	换热器	150
3.3.1	对流传热过程分析	118	3.6.1	间壁式换热器	150
3.3.2	对流传热速率——牛顿冷却定律	119	3.6.2	列管式换热器的设计与选型中相关条件的选择	157
3.3.3	对流传热系数的实验研究方法	119	3.6.3	列管式换热器的选型计算	158
3.3.4	流体无相变时的对流传热系数经验关联式	121	3.7	传热过程的强化	161
3.3.5	蒸气冷凝传热	129	3.7.1	换热器中传热过程的强化	161
3.3.6	液体沸腾传热	131	3.7.2	换热网络的优化	162
3.4	传热过程计算	133	3.7.3	换热器中污垢的产生、阻垢和清洗	162
3.4.1	换热器的热量平衡方程	133	思考题		163
3.4.2	总传热系数	134	习题		164
3.4.3	总传热速率方程	137	本章符号说明		167
			参考文献		167
第4章	蒸发	168			
4.1	概述	168	4.3.3	多效蒸发效数的限制	182
4.1.1	蒸发操作及其在工业中的应用	168	4.4	蒸发设备	182
4.1.2	蒸发操作的特点	168	4.4.1	蒸发器	182
4.1.3	蒸发操作的分类	169	4.4.2	蒸发器的选型	185
4.2	单效蒸发与真空蒸发	169	4.4.3	蒸发装置的附属设备和机械	185
4.2.1	单效蒸发流程	169	4.5	蒸发过程和设备的强化与展望	187
4.2.2	单效蒸发设计计算	169	思考题		187
4.2.3	蒸发器的生产能力与生产强度	174	习题		187
4.3	多效蒸发	175	本章符号说明		188
4.3.1	加热蒸汽的经济性	175	参考文献		188
4.3.2	多效蒸发	175	阅读参考文献		188
第5章	气体吸收	190			
5.1	概述	190	5.2	吸收过程的气-液相平衡关系	196
5.1.1	化工生产中的传质过程	190	5.2.1	气体在液体中的溶解度	196
5.1.2	相组成表示法	191	5.2.2	相平衡关系在吸收过程中的应用	201
5.1.3	气体吸收过程	193	5.3	单相内传质	202
5.1.4	气体吸收过程的应用	194	5.3.1	单相内物质的分子扩散	203
5.1.5	吸收剂的选用	194	5.3.2	分子扩散系数	207
5.1.6	吸收操作的分类	195			

5.3.3 单相对流传质机理	211	5.6 填料塔	234
5.3.4 单相内对流传质速率方程	212	5.6.1 填料	235
5.4 相际对流传质及总传质速率方程	213	5.6.2 填料塔的流体力学性能	237
5.4.1 双膜理论	213	5.6.3 填料塔的附件	241
5.4.2 吸收过程的总传质速率方程	214	5.6.4 强化吸收过程的措施	241
5.5 吸收塔的计算	218	5.6.5 填料塔分离技术新进展	243
5.5.1 物料衡算和操作线方程	219	思考题	244
5.5.2 吸收剂用量与最小液-气比	220	习题	245
5.5.3 吸收塔填料层高度的计算	222	本章符号说明	247
5.5.4 吸收塔塔径的计算	229	参考文献	248
5.5.5 吸收塔的操作型计算	229	阅读参考文献	248
5.5.6 解吸及其计算	231		
第6章 蒸馏	249		
6.1 概述	249	6.5.7 理论板数的简捷计算	282
6.2 双组分溶液的汽-液平衡	250	6.5.8 精馏装置的热量衡算	284
6.2.1 理想溶液的汽-液平衡	250	6.5.9 双组分精馏的操作型计算	286
6.2.2 温度组成图 ($t-x-y$ 图)	251	6.6 间歇精馏	287
6.2.3 气液平衡图 ($x-y$ 图)	252	6.6.1 维持馏出液浓度恒定的操作	288
6.2.4 挥发度与相对挥发度	253	6.6.2 维持回流比恒定的操作	289
6.2.5 非理想溶液的汽-液平衡	255	6.7 恒沸精馏与萃取精馏	289
6.3 简单蒸馏和平衡蒸馏	256	6.7.1 恒沸精馏	289
6.3.1 简单蒸馏	256	6.7.2 萃取精馏	290
6.3.2 平衡蒸馏	257	6.8 板式塔	291
6.4 精馏原理	257	6.8.1 板式塔的结构特点和流体力学特性	291
6.4.1 多次部分汽化、部分冷凝	257	6.8.2 塔板的流体力学状况	293
6.4.2 连续精馏装置流程	258	6.8.3 塔板效率	295
6.4.3 塔板的作用	259	6.8.4 塔高和塔径的计算	297
6.4.4 精馏过程的回流	260	6.8.5 塔板负荷性能图	299
6.5 双组分连续精馏塔的计算	260	6.8.6 板式塔的类型	300
6.5.1 理论板的概念与恒摩尔流的假设	261	6.9 蒸馏过程的强化与展望	303
6.5.2 全塔物料衡算	261	思考题	304
6.5.3 操作线方程	263	习题	305
6.5.4 进料热状况的影响及 q 线方程	265	本章主要符号说明	309
6.5.5 理论塔板数的确定	268	参考文献	310
6.5.6 回流比的影响与选择	275	阅读参考文献	310
第7章 固体干燥	311		
7.1 概述	311	7.3.1 物料中水分含量的表示方法	321
7.1.1 物料的去湿方法	311	7.3.2 水分在气-固两相间的平衡	321
7.1.2 物料的干燥方法	311	7.4 干燥过程的计算	323
7.1.3 对流干燥特点	312	7.4.1 干燥过程的物料衡算	323
7.2 湿空气的性质与湿度图	312	7.4.2 干燥过程的热量衡算	325
7.2.1 湿空气的性质	312	7.4.3 干燥系统的热效率	326
7.2.2 湿空气的湿度图及其应用	318	7.4.4 干燥器空气出口状态的确定	327
7.3 固体物料的干燥平衡	321	7.5 干燥速率与干燥时间	329

7.5.1 干燥速率	329	7.7.1 干燥过程强化	340
7.5.2 恒定干燥条件下干燥时间的 计算	332	7.7.2 干燥设备改进	341
7.6 干燥器	334	7.7.3 干燥技术展望	342
7.6.1 干燥器的基本要求与分类	334	思考题	343
7.6.2 工业上常用的干燥器	335	习题	343
7.6.3 干燥器的选型	339	本章符号说明	345
7.7 固体干燥过程的强化与展望	340	参考文献	346
		阅读参考文献	346
第8章 其他分离技术	347		
8.1 结晶	347	8.2.6 吸附过程的强化与展望	359
8.1.1 概述	347	8.3 膜分离	361
8.1.2 结晶原理	347	8.3.1 概述	361
8.1.3 结晶器简介	349	8.3.2 膜与膜组件	363
8.1.4 结晶过程的强化与展望	350	8.3.3 反渗透	365
8.2 吸附分离	351	8.3.4 超滤与微滤	366
8.2.1 概述	351	8.3.5 气体分离	368
8.2.2 吸附剂及其特性	352	8.3.6 膜接触器	368
8.2.3 吸附平衡	353	思考题	370
8.2.4 吸附速率	355	主要符号说明	371
8.2.5 吸附操作与装置	357	阅读参考文献	371
附录	372		
附录一、常用物理量的单位与量纲	372	3. 气体热导率共线图 (101.3kPa)	384
附录二、某些气体的重要物理性质	372	附录八、比热容	386
附录三、某些液体的重要物理性质	373	1. 液体比热容共线图	386
附录四、干空气的物理性质 (101.3kPa)	374	2. 气体比热容共线图 (101.3kPa)	388
附录五、水及蒸汽的物理性质	375	附录九、液体汽化热共线图	390
1. 水的物理性质	375	附录十、无机物水溶液的沸点 (101.3kPa)	392
2. 水在不同温度下的黏度	376	附录十一、管路规格	393
3. 饱和水蒸气表 (按温度排列)	377	附录十二、离心泵规格 (摘录)	393
4. 饱和水蒸气表 (按压力排列)	378	1. IS型单级单吸离心泵规格	393
附录六、黏度	379	2. Y型离心油泵规格	397
1. 液体黏度共线图	379	附录十三、换热器系列 (摘录)	398
2. 气体黏度共线图	381	1. 管壳式热交换器系列标准 (摘自 JB/T 4714、4715—92)	398
附录七、热导率	382	2. 管壳式换热器型号的表示方法	403
1. 固体热导率	382		
2. 某些液体的热导率	383		

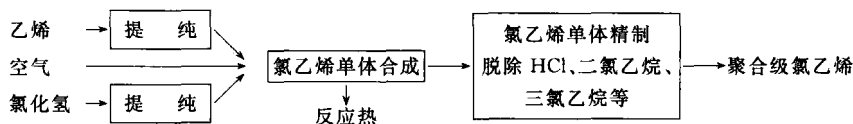
绪 论

0.1 化工生产过程与单元操作

0.1.1 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。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、食品、冶金等工业领域延伸与结合，并出现“化工及其相近过程工业”的提法，更显现其在国民经济中的重要地位。

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各不相同，但加以归纳，均可视为由原料预处理过程、化学反应过程和反应产物后处理 3 个基本环节组成。例如，乙烯法制取氯乙烯的生产过程是以乙烯、氯化氢和空气为原料，在压力为 0.5MPa、温度为 220℃、CuCl₂ 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，原料和反应产物预处理和后处理环节中的提纯、精制分离，包括为反应过程维持一定的温度、压力需进行的加热、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，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。

0.1.2 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。但研究化工生产诸多物理过程后发现，根据这些物理过程的操作原理和特点，可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，见表 0-1。工程上将这些具有共性的基本操作称为单元操作 (Unit operation)。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。

在对上述单元操作进行基础研究归纳后还发现，它们遵循若干类似的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，其余单元操作分属于以下几类。

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 输入机械能使流体间或与其他物质均匀混合 输入机械能使固体颗粒悬浮,得到具有流体状态的特性,用于燃烧、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,使物料升温、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、质同时传递过程
压缩 冷冻	利用外力做功,提高气体压力 加入功,使热量从低温物体向高温物体转移	热力过程
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部分	机械过程

流体动力过程 (fluid flow process) (动量传递)——遵循流体力学基本规律,以动量传递 (momentum transfer) 为理论基础的单元操作;

传热过程 (heat transfer process) (热量传递)——遵循传热基本规律,以热量传递 (heat transfer) 为理论基础的单元操作;

传质过程 (mass transfer process) (质量传递)——遵循传质基本规律,以质量传递 (mass transfer) 为理论基础的单元操作;

热、质同时传递的过程——遵循热质同时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。

0.2 《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、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:主要研究化工生产过程中各单元操作的基本原理、典型设备及其设计计算方法,主要内容如下所述(见表 0-1)。

① 流体动力过程 包括流体流动与输送、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。具体要求有以下几点。

- ① 选型 根据生产工艺要求、物料特性和技术、经济特点，能合理地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，当缺乏数据时能设法获取，如通过实验测取必要数据；
- 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过程技术，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。它们是各单元操作之间、各专业学科之间互相渗透、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和观点

在计算和分析单元操作的问题时，经常会用到下列 4 个基本概念和一个观点，即物料衡算、能量衡算、过程平衡和速率这 4 个基本概念和建立一个经济核算的观点，它们贯穿了本课程始终，应熟练掌握并灵活运用。这里仅作简单的介绍。

(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的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 $\sum G_{\text{入}}$ ——输入物料量的总和；

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出物料量的总和；

G ——积累物料量。

在进行物料衡算（mass balance）时，应注意下列几点。

① 确定衡算系统 式(0-1)既适合于一个生产过程，也适合于一个设备，甚至适合于设备中的一个微元。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 一般选不再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，通常以单位时间为基准。

③ 确定对象的物理量和单位 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。

【例 0-1】 某一连续操作的蒸发器将含 NaOH 为 x_F (质量分数) 的稀溶液蒸发浓缩到质量分数为 x_w 。该蒸发器每小时的进料量为 F 千克, 试求每小时所得浓碱液量 W 及水分蒸发量 V 各为多少千克。

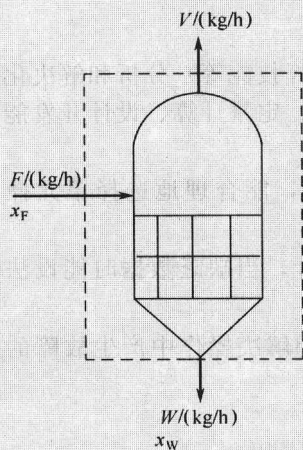


图 0-1 例 0-1 附图

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

(2) 确定衡算基准, 过程为定态, 时间基准取 1h, 则总物料衡算式为

$$F = V + W$$

溶质衡算式为

$$F x_F = W x_w$$

由上两式解得

$$W = \frac{x_F}{x_w} F$$

$$V = \left(1 - \frac{x_F}{x_w}\right) F$$

(2) 能量衡算 (energy balance) 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 1 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) 物系的平衡关系 (equilibrium relation) 是指物系的传热或传质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, 当用清水吸收氨-空气混合物中的氨时, 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, 氨在气液两相间达到平衡, 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) 过程传递速率 (rate of transfer process) 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内单位面积传递的热量表示; 传质过程速率用单位时间内单位面积传递的物质质量表示。显然, 过程传递速率越大, 设备生产能力越大, 或在完成同样产量时设备的尺寸越小。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成以下关系式

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

过程的推动力 (driving force) 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 (resistance) 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传递速率, 但各有什么利弊, 将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, 而且, 不仅应考虑单一设备的优化, 还必须满足过程的系统优化。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 1 章 流体流动与输送机械

本章学习要求

● 掌握的内容

流体的密度和黏度的定义、单位及影响因素，压力的定义、表示法及单位换算；流体静力学方程、连续性方程、伯努利方程及其应用；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。

● 熟悉的内容

层流与湍流的特征；复杂管路计算要点；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。

● 了解的内容

层流内层与边界层；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 (fluid) 是具有流动性的物质，包括气体和液体。化工生产中所涉及的物料大多为流体，为满足生产工艺的要求，常需要将流体物料从一设备输送至另一设备，从上一工序输送至下一工序，流体流动与输送遂成为最普遍的化工单元操作之一。此外，化工生产中所涉及的过程（如传热、传质以及化学反应等）也多是在流体流动条件下进行的，这些过程进行的快慢及效果等均与流体流动状况密切相关，因此，研究流体流动问题也是研究其他化工单元操作的重要基础。

本章在讨论流体基本性质的基础上，重点研究流体流动的基本规律以及流体输送所用的机械等。

1.1 流体基本性质

1.1.1 连续介质的假定

处于流动状态的物质，无论是气体还是液体，都是由运动的分子所组成。这些分子彼此之间有一定间隙，并且总是处于随机运动状态中。因此，从微观角度来看，流体的质量在空间和时间上的分布是不连续的。但在研究流体流动时，人们感兴趣的不是单个分子的微观运动，而是流体的宏观运动。因此，工程上常将流体视为充满所占空间的、由无数彼此间没有间隙的流体质点（或微团）组成的连续介质，这就是流体的连续介质假定 (continuum assumption)。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。引入连续介质假定后，流体的物理性质和运动参数均具连续变化特性，从而可以利用基于连续函数的数学工具，从宏观角度研究流体流动的规律。

应予以指出，连续介质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。

1.1.2 流体的压缩性

压缩性是指流体的体积随压力变化的关系。如果流体的体积不随压力而变化, 该流体称为不可压缩性流体 (**incompressible fluid**); 若随压力发生变化, 则称为可压缩性流体 (**compressible fluid**)。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, 其体积会有较大的变化, 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。

1.1.3 作用在流体上的力

流动中的流体所受的作用力可分为两种: 质量力和表面力。

质量力 (body force) 是作用于流体每个质点上的力, 其大小与流体的质量成正比。对于均匀质量的流体, 该力也与流体的体积成正比, 故又称为体积力。流体在重力场中所受的重力与在离心力场中所受的离心力都是典型的质量力。

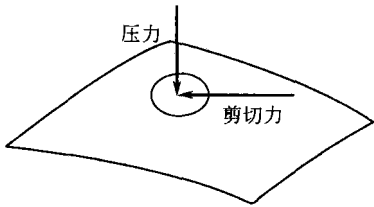


图 1-1 微元面上的表面力

表面力 (surface force) 是通过直接接触而作用于流体表面的力, 其大小与流体的表面积成正比。对于任一流体微元表面, 作用于其上的表面力可分为垂直于表面的法向力和平行于表面的切向力。通常, 垂直于表面的法向力称为压力, 平行于表面的切向力称为剪切力。如图 1-1 所示。

以下分别讨论质量力与表面力以及与其相关的流体性质。

1.1.4 质量力与密度

流体的质量力与流体的质量成正比, 即与流体的密度成正比。

流体的**密度 (density)** 是指单位体积流体的质量, 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 。

对于一定的流体, 其密度是压力和温度的函数, 即

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

液体密度 液体可视为不可压缩性流体, 其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的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。

液体混合物的密度可按理想溶液由单组分密度进行计算。对于液体混合物, 其组成通常用质量分数表示。现以 1kg 混合液体为基准, 并设各组分在混合前后体积不变, 则 1kg 混合液体的体积等于各组分单独存在时体积之和, 即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-2)$$

式中 a_1, a_2, \dots, a_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 。

气体密度 气体为可压缩性流体, 其密度随压力和温度变化。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

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

式中 p ——气体的绝对压力, Pa;
 M ——气体的摩尔质量, kg/mol;
 T ——绝对温度, K;
 R ——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。

气体混合物的密度也可根据单组分密度进行计算。对于气体混合物, 其组成通常用体积分数表示。以 1m^3 混合气体为基准, 则 1m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和, 即

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

式中 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ ——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(1-3) 计算, 但式中的摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 替代, 即

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

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

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

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

对于理想气体, 其摩尔分数 y 与体积分数 ϕ 相同。

1.1.5 压力

压力是垂直作用于流体表面的力, 其方向指向流体的作用面。通常单位面积上的压力称为流体的静压强, 简称压强, 习惯上也称为压力 (以后所提压力, 如不特别指明, 均指压强)。

压力的单位 在 SI 单位中, 压力的单位是 N/m^2 , 称为帕斯卡, 以 Pa 表示。此外, 在实际生产和工程中压力的大小也间接地以液体柱高度表示, 如用米水柱或毫米汞柱等。若液体的密度为 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, 同一压力用不同物质液柱表示时, 其高度不同。因此, 当以液柱高度表示压力时, 必须指明液体的种类, 如 600mmHg , $10\text{mH}_2\text{O}$ 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: 一种是绝对真空; 另一种是大气压力。基准不同, 表示方法也不同。以绝对真空为基准测得的压力称为绝对压力, 它是流体的真实压力; 以大气压为基准测得的压力称为表压或真空度。

若绝对压力高于大气压力, 则高出部分称为表压, 即

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

表压可由压力表测量并在表上直接读数。

若绝对压力低于大气压力, 则低出部分称为真空度, 即

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

真空度也可由真空表直接测量并读数。

绝对压力、表压与真空度的关系如图 1-2 所示。一般为避免混淆, 通常对表压、真空度

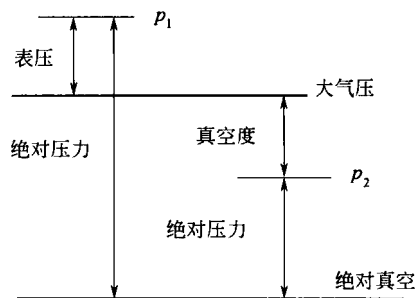


图 1-2 绝对压力、表压与真空度的关系

等加以标注,如2000Pa(表压),10mmHg(真空度)等,同时还应指明当地大气压力。

【例 1-1】 一台操作中的离心泵,进口真空表及出口压力表的读数分别为 0.02MPa 和 0.11MPa。试求:(1)泵进口与出口的绝对压力(kPa);(2)二者之间的压力差。设当地的大气压为 101.3kPa。

解 (1) 进口真空表读数即为真空度,则进口绝对压力

$$p_1 = 101.3 - 0.02 \times 10^3 = 81.3 \text{ kPa}$$

出口压力表读数即为表压,则出口绝对压力

$$p_2 = 101.3 + 0.11 \times 10^3 = 211.3 \text{ kPa}$$

(2) 泵出口与进口的压力差

$$p_2 - p_1 = 211.3 - 81.3 = 130 \text{ kPa}$$

或直接用表压及真空度计算

$$p_2 - p_1 = 0.11 \times 10^3 - (-0.02 \times 10^3) = 130 \text{ kPa}$$

1.1.6 剪切力与黏度

剪切力是平行作用于流体表面的力。流体与固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体在剪切力的作用下将产生相应的变形以抵抗外力,而静止流体在剪切力的作用下将发生连续不断的变形,即流体具有流动性。

1.1.6.1 牛顿黏性定律

如图 1-3 所示,设有上、下两块面积很大且相距很近的平行平板,板间充满某种静止流体。若将下板固定,而对上板施加一个恒定的外力,上板就以恒定速度 u 沿 x 方向运动。若 u 较小,则两板间的流体就会分成无数平行的薄层而运动,黏附在上板底面下的流体层以速度 u 随上板运动,其下各层流体的速度依次降低,紧贴在下板表面的流体层因黏附在静止板上,其速度为零,两平板间流体速度呈线性变化。对任意相邻两层流体来说,上层速度较大,下层速度较小,前者对后者起带动作用,而后者对前者起拖曳作用,流体层之间的这种相互作用产生剪切力。此作用力是在流体内部产生,通常亦称为内摩擦力。流体在流动时产生内摩擦力的性质,称为流体的黏性。

平行平板间流体的速度分布为直线,而流体在圆管内流动时,速度分布呈抛物线形,如图 1-4 所示。

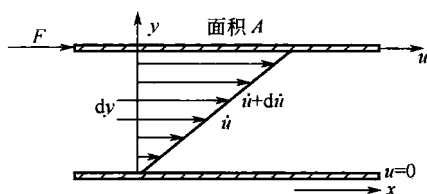


图 1-3 平板间流体速度变化

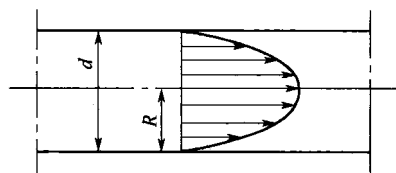


图 1-4 实际流体在管内的速度分布

实验证明,对于一定的流体,剪切力 F 与两流体层的速度差 $d\dot{u}$ 成正比,与两层之间的垂直距离 dy 成反比,与两层间的接触面积 A 成正比,即

$$F = \mu A \frac{d\dot{u}}{dy} \quad (1-8)$$

式中 F ——剪切力(内摩擦力),N;

$\frac{d\dot{u}}{dy}$ ——法向速度梯度,即在与流体流动方向相垂直的 y 方向流体速度的变化率,1/s;

μ ——比例系数,称为流体的黏度或动力黏度,Pa·s。