



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工原理

杨祖荣 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工原理

杨祖荣 主 编  
刘丽英 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“十一五”国家级规划教材,也是国家级精品课程“化工原理”的建设成果。

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。全书共九章,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、干燥、液液萃取及其它分离技术。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。所附辅导学习光盘,内容包括模拟试卷、多媒体素材、重点难点解析、习题参考答案等,便于自学。随主教材还配套建设了教师授课用教学课件。

本书适用于应用性、技能型各类教育的化工类专业及相关专业的“化工原理”课程教学,也可供相关科技人员参考。

## 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, 2008.6

ISBN 978-7-04-024293-5

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(2008)第 070890 号

策划编辑 周先海 责任编辑 刘佳 封面设计 张楠 责任绘图 尹文军  
版式设计 陆瑞红 责任校对 王雨 责任印制 韩刚

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京中科印刷有限公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2008 年 6 月第 1 版
印 张	24.75	印 次	2008 年 6 月第 1 次印刷
字 数	640 000	定 价	36.50 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 24293-00

## 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：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

# 前 言

---

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也是国家级精品课程“化工原理”的建设成果,是在普通高等教育“十五”国家级规划教材《化工原理》(杨祖荣主编)的基础上进行完善而成的。

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,突出重点,注重理论联系实际,突出工程观点和研究方法,同时介绍新技术内容。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。为便于学生学习,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。

与本书配套的数字化教学资源有:书后所附的学生用辅导光盘,内容有各章重点、难点分析,主要设备的多媒体素材,部分附录、附表,部分参考例题、模拟试卷,以及习题参考答案等。另提供给教师参考使用的授课用电子教案,请使用本书作为教材的教师向高等教育出版社相关人员索取。

本书由杨祖荣主编,刘丽英、刘伟为副主编。具体参加编写的有: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、干燥、膜分离)、丁忠伟(传热)、刘伟(气体吸收、吸附)、龙秉文(液液萃取)、开封大学陶颖(非均相物系分离、蒸馏)。

本书承蒙北京联合大学唐小恒教授和北京化工大学张泽廷教授审定,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。

编 者

2008年4月

# 目 录

绪论 .....	1	1-7-2 其它类型化工用泵 .....	61
第一章 流体流动与输送机械 .....	5	1-7-3 气体输送机械 .....	64
本章学习要求 .....	5	思考题 .....	69
第一节 流体静力学 .....	5	习题 .....	71
1-1-1 密度 .....	6	本章符号说明 .....	77
1-1-2 压力 .....	7	参考文献 .....	77
1-1-3 流体静力学基本方程 .....	8	第二章 非均相物系分离 .....	79
第二节 流体动力学 .....	12	本章学习要求 .....	79
1-2-1 流体的流量与流速 .....	12	第一节 概述 .....	79
1-2-2 定态流动与非定态流动 .....	14	2-1-1 非均相分离在工业中的应用 .....	79
1-2-3 定态流动系统的质量守恒		2-1-2 颗粒与颗粒群的特性 .....	80
—连续性方程 .....	14	第二节 颗粒沉降 .....	82
1-2-4 定态流动系统的机械能守恒		2-2-1 重力沉降及设备 .....	82
—伯努利方程 .....	15	2-2-2 离心沉降及设备 .....	88
第三节 管内流体流动现象 .....	21	第三节 过滤 .....	92
1-3-1 流体的黏度 .....	21	2-3-1 概述 .....	92
1-3-2 流体的流动型态 .....	23	2-3-2 过滤基本方程式 .....	93
1-3-3 流体在圆管内的速度分布 .....	25	2-3-3 过滤设备 .....	97
第四节 流体流动阻力 .....	27	第四节 过程的强化与展望 .....	101
1-4-1 流体在直管中的流动阻力 .....	27	2-4-1 沉降过程的强化 .....	101
1-4-2 局部阻力 .....	33	2-4-2 过滤过程的强化 .....	102
1-4-3 流体在管路中的总阻力 .....	36	2-4-3 过滤技术展望 .....	102
第五节 管路计算 .....	37	思考题 .....	103
1-5-1 简单管路 .....	37	习题 .....	103
1-5-2 复杂管路 .....	40	本章符号说明 .....	104
第六节 流速与流量的测量 .....	41	参考文献 .....	105
1-6-1 测速管 .....	41	第三章 传热 .....	106
1-6-2 孔板流量计 .....	42	本章学习要求 .....	106
1-6-3 文丘里流量计 .....	45	第一节 概述 .....	106
1-6-4 转子流量计 .....	46	3-1-1 传热在化工生产中的应用 .....	106
第七节 流体输送机械 .....	48	3-1-2 工业生产中的加热剂和冷却剂 .....	107
1-7-1 离心泵 .....	49	3-1-3 传热设备中冷、热流体的接触 .....	

方式 .....	107	习题 .....	158
3-1-4 传热学中一些基本概念 .....	108	本章符号说明 .....	160
第二节 热传导 .....	109	参考文献 .....	161
3-2-1 热传导机理简介 .....	109	<b>第四章 蒸发</b> .....	162
3-2-2 热传导速率的表达——傅里叶定律 .....	109	本章学习要求 .....	162
3-2-3 单层平壁的定态热传导 .....	110	第一节 概述 .....	162
3-2-4 单层圆筒壁的定态热传导 .....	111	4-1-1 蒸发操作及其在工业中的应用 .....	162
3-2-5 通过多层壁的定态热传导 .....	112	4-1-2 蒸发操作的特点 .....	163
第三节 对流传热 .....	114	4-1-3 蒸发操作的分类 .....	163
3-3-1 对流传热过程分析 .....	115	第二节 单效蒸发与真空蒸发 .....	163
3-3-2 对流传热速率——牛顿冷却定律 .....	115	4-2-1 单效蒸发设计计算 .....	163
3-3-3 对流传热系数的实验研究方法 .....	116	4-2-2 蒸发器的生产能力与生产强度 .....	168
3-3-4 流体无相变时的对流传热系数经验关联式 .....	117	第三节 多效蒸发 .....	169
3-3-5 蒸气冷凝传热 .....	125	4-3-1 加热蒸汽的经济性 .....	169
3-3-6 液体沸腾传热 .....	127	4-3-2 多效蒸发 .....	170
第四节 传热计算 .....	129	4-3-3 多效蒸发效数的限制 .....	174
3-4-1 换热器的热量平衡方程 .....	129	第四节 蒸发设备 .....	175
3-4-2 总传热系数 .....	129	4-4-1 蒸发器 .....	175
3-4-3 总传热速率方程 .....	133	4-4-2 蒸发器的选型 .....	178
3-4-4 总传热速率方程与热量平衡方程的联用 .....	134	4-4-3 蒸发装置的附属设备和机械 .....	179
3-4-5 平均传热温差 $\Delta t_m$ 的计算 .....	134	第五节 过程和设备的强化与展望 .....	180
3-4-6 传热过程的设计型计算 .....	138	思考题 .....	181
3-4-7 传热过程的操作型计算 .....	139	习题 .....	181
3-4-8 设备壁温的计算 .....	141	本章符号说明 .....	181
第五节 辐射传热 .....	142	参考文献 .....	182
3-5-1 有关热辐射基本概念 .....	142	<b>第五章 气体吸收</b> .....	183
3-5-2 物体的辐射能力 .....	143	本章学习要求 .....	183
3-5-3 两固体间的辐射传热 .....	145	第一节 概述 .....	183
3-5-4 对流-辐射联合传热 .....	146	5-1-1 化工生产中的传质过程 .....	183
第六节 换热器 .....	147	5-1-2 相组成表示法 .....	184
3-6-1 间壁式换热器 .....	147	5-1-3 气体吸收过程 .....	186
3-6-2 列管式换热器的设计与选型中相关条件的选择 .....	152	5-1-4 气体吸收过程的应用 .....	187
3-6-3 列管式换热器的选型计算 .....	154	5-1-5 吸收剂的选用 .....	188
第七节 传热过程的强化 .....	157	5-1-6 吸收过程的分类 .....	188
思考题 .....	157	第二节 气液相平衡关系 .....	189
		5-2-1 气体在液体中的溶解度 .....	189
		5-2-2 相平衡关系在吸收过程中的应用 .....	192
		第三节 单相传质 .....	194
		5-3-1 定态的一维分子扩散 .....	195

5-3-2 分子扩散系数 .....	198	6-5-2 全塔物料衡算 .....	244
5-3-3 单相对流传质机理 .....	200	6-5-3 操作线方程 .....	245
5-3-4 单相对流传质速率方程 .....	200	6-5-4 进料热状况的影响及 $q$ 线方程 .....	246
第四节 相际传质及总传质速率方程 .....	202	6-5-5 理论板层数的计算 .....	250
5-4-1 双膜理论 .....	202	6-5-6 最小回流比、回流比及其选择 .....	253
5-4-2 吸收过程的总传质速率方程 .....	202	6-5-7 理论板层数的简捷算法 .....	256
第五节 吸收塔的计算 .....	205	6-5-8 精馏装置的热量衡算 .....	257
5-5-1 物料衡算和操作线方程 .....	205	第六节 间歇精馏 .....	259
5-5-2 吸收剂用量与最小液气比 .....	207	6-6-1 恒回流比操作 .....	260
5-5-3 吸收塔填料层高度的计算 .....	209	6-6-2 恒馏出液组成操作 .....	260
5-5-4 吸收塔塔径的计算 .....	214	第七节 恒沸精馏与萃取精馏 .....	261
5-5-5 吸收塔的操作型计算 .....	215	6-7-1 恒沸精馏 .....	261
5-5-6 解吸及其计算 .....	216	6-7-2 萃取精馏 .....	261
5-5-7 强化吸收过程的措施 .....	219	第八节 板式塔 .....	262
第六节 填料塔 .....	220	6-8-1 板式塔的结构 .....	263
5-6-1 填料塔与填料 .....	220	6-8-2 板式塔的流体力学性能 .....	265
5-6-2 填料塔的流体力学性能 .....	222	6-8-3 塔板负荷性能图 .....	268
5-6-3 填料塔的附件 .....	225	6-8-4 全塔效率与单板效率 .....	269
思考题 .....	227	6-8-5 塔高及塔径计算 .....	270
习题 .....	227	第九节 过程的强化与展望 .....	272
本章符号说明 .....	230	6-9-1 蒸馏过程的节能技术 .....	273
参考文献 .....	230	6-9-2 新蒸馏过程的开发 .....	275
<b>第六章 蒸馏</b> .....	<b>232</b>	思考题 .....	275
本章学习要求 .....	232	习题 .....	276
第一节 概述 .....	232	本章符号说明 .....	279
6-1-1 蒸馏操作在化工生产中的应用 .....	232	参考文献 .....	280
6-1-2 蒸馏操作的依据 .....	233	<b>第七章 干燥</b> .....	<b>281</b>
6-1-3 蒸馏过程的分类 .....	233	本章学习要求 .....	281
第二节 双组分物系的气液相平衡 .....	233	第一节 概述 .....	281
6-2-1 理想物系的气液相平衡 .....	234	7-1-1 物料的干燥方式 .....	281
6-2-2 非理想物系的气液相平衡 .....	237	7-1-2 对流干燥特点 .....	282
6-2-3 挥发度及相对挥发度 .....	238	第二节 湿空气的性质及湿度图 .....	282
第三节 简单蒸馏和平衡蒸馏 .....	240	7-2-1 湿空气的性质 .....	282
6-3-1 简单蒸馏 .....	240	7-2-2 湿空气的湿度图及其应用 .....	288
6-3-2 平衡蒸馏 .....	241	第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算 .....	290
第四节 精馏 .....	241	7-3-1 物料含水量的表示方法 .....	290
6-4-1 精馏原理 .....	241	7-3-2 干燥过程的物料衡算 .....	291
6-4-2 精馏操作流程 .....	242	7-3-3 干燥过程的热量衡算 .....	292
第五节 双组分连续精馏的计算 .....	243	7-3-4 干燥系统的热效率 .....	294
6-5-1 理论板的概念与恒摩尔流假设 .....	243	7-3-5 干燥器出口空气状态的确定 .....	295



第四节 干燥速率与干燥时间 .....	297	参考文献 .....	336
7-4-1 物料中所含水分性质 .....	297	<b>第九章 其它分离技术</b> .....	337
7-4-2 恒定干燥条件下的干燥速率 .....	299	第一节 结晶 .....	337
7-4-3 恒定干燥条件下干燥时间的 计算 .....	301	9-1-1 概述 .....	337
第五节 干燥器 .....	302	9-1-2 结晶原理 .....	337
7-5-1 干燥器的基本要求与分类 .....	302	9-1-3 结晶器简介 .....	339
7-5-2 工业上常用干燥器 .....	303	9-1-4 强化与展望 .....	341
7-5-3 干燥器的选型 .....	307	第二节 吸附分离 .....	341
第六节 过程的强化与展望 .....	307	9-2-1 概述 .....	341
7-6-1 干燥过程的强化 .....	307	9-2-2 吸附剂及其特性 .....	342
7-6-2 干燥技术的展望 .....	308	9-2-3 吸附平衡 .....	343
思考题 .....	308	9-2-4 吸附过程与吸附速率的控制 .....	345
习题 .....	308	9-2-5 吸附操作 .....	345
本章符号说明 .....	310	9-2-6 吸附过程的强化与展望 .....	348
参考文献 .....	311	第三节 膜分离 .....	349
<b>第八章 液液萃取</b> .....	312	9-3-1 概述 .....	349
本章学习要求 .....	312	9-3-2 膜与膜组件 .....	351
第一节 概述 .....	312	9-3-3 反渗透 .....	354
8-1-1 萃取的工艺流程 .....	312	9-3-4 超滤与微滤 .....	355
8-1-2 萃取分离的应用场合 .....	313	9-3-5 气体分离 .....	357
8-1-3 萃取操作的特点 .....	313	思考题 .....	357
第二节 液液相平衡 .....	313	本章符号说明 .....	358
8-2-1 三角形相图 .....	313	参考文献 .....	358
8-2-2 部分互溶体系的平衡相图 .....	315	<b>附录</b> .....	359
8-2-3 萃取剂的选择 .....	317	一、常用物理量的单位与量纲 .....	359
第三节 萃取过程计算 .....	318	二、某些气体的重要物理性质 .....	359
8-3-1 单级萃取过程 .....	318	三、某些液体的重要物理性质 .....	360
8-3-2 多级错流过程 .....	320	四、干空气的物理性质(101.3 kPa) .....	362
8-3-3 多级逆流过程 .....	323	五、水及蒸汽的物理性质 .....	363
第四节 萃取设备 .....	327	六、黏度 .....	368
8-4-1 液液萃取设备简介 .....	327	七、导热系数 .....	371
8-4-2 萃取设备的选用 .....	332	八、比热容 .....	375
8-4-3 分散相的选择 .....	332	九、液体汽化热共线图 .....	379
第五节 过程和设备的强化与展望 .....	332	十、管子规格 .....	380
思考题 .....	334	十一、离心泵规格(摘录) .....	381
习题 .....	334	十二、换热器系列(摘录) .....	384
本章符号说明 .....	335	十三、无机物水溶液在大气压下的沸点 .....	387

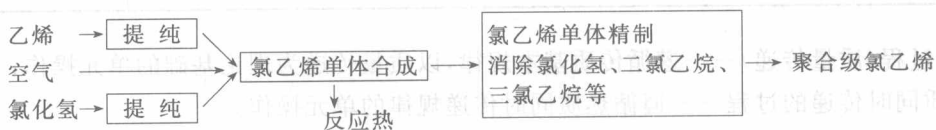
# 绪 论

## 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、食品、冶金等领域或工业延伸、结合,因而出现“化工及其相近过程工业”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,它是以前述乙烯、氯化氢和空气为原料,在压力为 0.5 MPa,温度为 220 °C,以  $\text{CuCl}_2$  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,预、后处理及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基础研究归纳后发现,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:

- 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;

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它物质均匀混合 输入机械能使固体颗粒悬浮,得到具有流体状态的特性,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	利用各组份间挥发度不同,使液体混合物分离 利用各组份在溶剂中的溶解度不同,分离气体混合物 利用各组份在萃取剂中的溶解度不同分离液体混合物 利用各组份在吸附剂中的吸附能力不同分离气、液混合物 利用各组份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它气体中的水汽含量 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 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

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——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)。新中国成立后,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、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:**培养学生具有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,会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;

(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,和建立一个经济核算观点,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

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

式中:  $\sum m_{\lambda}$ ——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(0-1)式既适合一个生产过程,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份的质量作为基准,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。

#### 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

过程的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,此时传热过程达到平衡,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,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,这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。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

## 流体流动与输送机械

### 本章学习要求

#### 1. 掌握的内容

流体的密度和黏度的定义、单位、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;流动类型及其判据,雷诺准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,离心泵的工作点及流量调节,离心泵的安装及使用等。

#### 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

复杂管路计算要点;其它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个工序,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它化工单元操作的基础。

从微观讲,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,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,其表达式为

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

式中  $\rho$ ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

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物性手册中查得,本书附录三给出了一些常用液体的密度。

**气体密度** 对于气体,当压力不太高、温度不太低时,可按理想气体处理,则

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

式中  $p$ ——气体的绝对压力,  $\text{Pa}$ ;

$M$ ——气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;

$T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ ;

$R$ ——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  $\rho_m$  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  $1 \text{ kg}$  混合液体为基准,并设各组分在混合前后体积不变,则  $1 \text{ kg}$  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,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

**气体混合物的密度** 对于气体混合物,其组成通常用体积分分数表示。以  $1 \text{ m}^3$  混合气体为基准,则  $1 \text{ m}^3$  混合气体的质量等于各组分的质量之和,即

$$\rho_m = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \dots + \rho_n \varphi_n \quad (1-4)$$

式中  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ——气体混合物中各组分的体积分分数。

气体混合物的平均密度  $\rho_m$  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

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

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

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  $\varphi$  相同。

**例 1-1** 试求干空气分别在 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在 101.3 kPa、20 °C 下空气的密度为 1.205 kg/m<sup>3</sup>。

空气密度也可根据式(1-2)计算:

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

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

(2) 仍可由式(1-2)计算:

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

或将(1)中的密度换算为 260 kPa、90 °C 条件下的密度:

$$\rho = \rho_1 \frac{p T_1}{p_1 T} = \left[ 1.204 \times \frac{260 \times (273 + 20)}{101.3 \times (273 + 90)} \right] \text{ kg/m}^3 = 2.494 \text{ kg/m}^3$$

## 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,作用于某点不同方向上的压力在数值上均相同。

**压力的单位** 在 SI 单位制中,压力的单位是 N/m<sup>2</sup>,称为帕斯卡,以 Pa 表示。此外,压力的大小也间接地以流体柱高度表示,如用米水柱或毫米汞柱等。若流体的密度为  $\rho$ ,则液柱高度  $h$  与压力  $p$  的关系为

$$p = \rho g h \quad (1-7)$$

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 mH<sub>2</sub>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,是流体的真实压力;以大气压力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

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

表压可由压力表直接测得并在表上直接读数。

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。



绝对压力与表压、真空度的关系如图 1-1 所示。一般为避免混淆,通常对表压、真空度等加以标注,如 2 000 Pa(表压),10 mmHg(真空度)等,还应指明当地大气压力。

**例 1-2** 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 0.02 MPa 和 0.11 MPa,试求绝对压力分别为多少千帕? 设当地的大气压为 101.3 kPa。

**解:** 进口真空表读数即为真空度,则进口绝对压力

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

出口压力表读数即为表压,则出口绝对压力

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

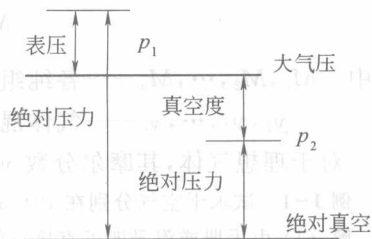


图 1-1 绝对压力与表压、真空度的关系

### 1-1-3 流体静力学基本方程

流体静力学基本方程是研究流体在重力场中处于静止时所受压力和重力的平衡规律,描述静止流体内部的压力与所处位置的关系。

#### 一、流体静力学基本方程

如图 1-2 所示,容器内装有密度为  $\rho$  的液体,液体可认为是不可压缩流体,其密度不随压力变化。在静止液体中取一段液柱,其截面积为  $A$ ,以容器底面为基准水平面,液柱的上、下端与基准水平面的垂直距离分别为  $z_1$  和  $z_2$ 。作用在上、下端面的压力分别为  $p_1$  和  $p_2$ 。

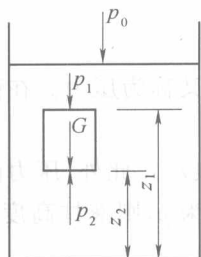


图 1-2 液柱受力分析示意图

重力场中在垂直方向上对液柱进行受力分析:

- (1) 上端面所受总压力  $p_{1,总} = p_1 A$ , 方向向下;
- (2) 下端面所受总压力  $p_{2,总} = p_2 A$ , 方向向上;
- (3) 液柱的重力  $G = \rho g A(z_1 - z_2)$ , 方向向下。

液柱处于静止时,上述三项力的合力应为零,即

$$p_2 A - p_1 A - \rho g A(z_1 - z_2) = 0$$

整理并消去  $A$ , 得

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (1-8)$$

变形得

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g \quad (1-8a)$$

若将液柱的上端面取在容器内的液面上,并设液面上方的压力为  $p_0$ ,液柱高度为  $h$ ,则式(1-8)可改写为

$$p_2 = p_0 + \rho g h \quad (1-8b)$$

式(1-8)、式(1-8a)及式(1-8b)均称为**流体静力学基本方程**,其中式(1-8)、式(1-8b)是以压力形式表示,而式(1-8a)则以能量形式表示。

应当指出,流体静力学基本方程适用于在重力场中静止、连续的同种不可压缩流体,如液体。而对于气体来说,密度随压力变化,但若气体的压力变化不大,密度近似地取其平均值而视为常