



普通高等教育“十一五”规划教材

山东省精品课程教材



化工原理

HUAGONG YUANLI

王晓红 田文德 王英龙 编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

山东省精品课程教材

化 工 原 理

王晓红 田文德 王英龙 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以流体流动、传热及传质分离为重点,论述了化工、石油、轻工、食品、冶金工业等的典型过程原理及应用。内容包括流体流动原理及应用(流体流动及输送机械)、传热原理及应用(传热理论及设备)、传质原理及应用(蒸馏、吸收、萃取及相应设备)、固体颗粒流体力学基础与机械分离、固体干燥、其他单元(蒸发、结晶、吸附、混合、膜分离),每章均配有工程案例分析及习题、思考题。

本书在关注学科最新发展动态、结合科研的基础上,对单元操作基本概念及原理进行深入浅出的论述,同时着力突出培养学生的工程能力。可作为大专院校化工及相关专业的教材使用,也可供有关部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/王晓红,田文德,王英龙编.——北京:化学工业出版社,2009.6
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-05233-9

I. 化… II. ①王…②田…③王… III. 化工原理-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 052307 号

责任编辑:刘俊之
责任校对:吴 静

文字编辑:李锦侠
装帧设计:刘丽华

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 22½ 字数 591 千字 2009 年 6 月北京第 1 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:38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理课程是过程工业中多个专业的一门重要技术基础课程，是从基础课程过渡到专业课程的一个桥梁，它的教学目的是初步建立起学生的工程观念。1999年，青岛科技大学化工原理课程被确定为山东省首批教学改革试点课程，经过积极的建设，2004年又被确定为山东省精品课程，本书就是精品课程建设的配套教材。

在多所院校教学学时数不断减少的教改背景下，如何利用有限的40~60学时来让学生初步掌握典型单元操作的基本知识和基本技能，并突出我校的教学特色，是我们编写本书的焦点所在。我们依据厚基础、重实践、勤思考的基本思路，在删改了许多陈旧的教学内容及简化了一些过于繁杂的计算方法后，注意吸收过程工业领域不断更新的新理论、新技术、新设备等最新成果，介绍学科的发展动态，并结合我校取得的最新科研成果，以期让读者了解如何利用传统基本理论推动日新月异的工业发展。

本教材以三种传递理论为基本脉络，以流体流动原理及应用（流体流动及输送机械）、传热原理及应用（传热理论及设备）、传质原理及应用（蒸馏、吸收、萃取及相应设备）为讲述重点，深入浅出地讨论了过程工业常用单元的基本原理及应用，研究了固体颗粒流体力学的基础理论与机械分离方法，并对干燥、蒸发、结晶、吸附、混合、膜分离等单元过程作了简要介绍。同时，重点章末均配有典型工程案例分析，通过日常生活和工业生产中一些与所学知识有关的问题，介绍求解思路，激发学习兴趣，让读者深切体会到“学有所用”的认同感。

参加本书编写工作的有王晓红（绪论、第1~3章）、田文德（第4~6章、附录），王英龙编辑校核了习题，另外，化工原理教研室的多位教师参与了本书编写方案拟订工作，对此，一并致以诚挚的谢意。

由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编者

2009年1月

目 录

绪论	1	第2章 传热及传热设备	73
0.1 化工原理课程基本内容及特点	1	2.1 传热基本概念	73
0.2 化工原理的研究基础与方法	3	2.1.1 传热基本方式	73
0.3 单位制与单位换算	5	2.1.2 传热速率	73
第1章 流体流动原理及应用	7	2.2 热传导	74
1.1 流体基本概念	7	2.2.1 热传导基本概念	74
1.1.1 流体特征	7	2.2.2 傅里叶定律	74
1.1.2 流体力学基本概念	7	2.2.3 固体平壁稳态热传导	75
1.1.3 流体密度	7	2.2.4 固体圆筒壁稳态热传导	78
1.2 流体静力学	9	2.3 对流传热	80
1.2.1 压强	9	2.3.1 牛顿冷却定律	80
1.2.2 流体静力学基本方程	10	2.3.2 无相变对流传热系数计算	83
1.2.3 流体静力学基本方程应用	11	2.3.3 有相变对流传热系数计算	88
1.3 流体流动的基本概念	14	2.4 热辐射	91
1.3.1 流量与流速	14	2.4.1 辐射传热基本概念	91
1.3.2 稳态流动及非稳态流动	15	2.4.2 物体的辐射能力	92
1.3.3 牛顿黏性定律	15	2.4.3 物体间的辐射传热	93
1.3.4 流动型态	17	2.4.4 对流与辐射联合传热	94
1.4 流体流动的质量与能量衡算	20	2.5 间壁式换热器传热计算	95
1.4.1 质量衡算——连续性方程	20	2.5.1 间壁式换热简介	95
1.4.2 总能量衡算	21	2.5.2 热量衡算	95
1.4.3 流体流动的机械能衡算式——柏努利方程式	22	2.5.3 总传热速率方程	96
1.5 流体流动阻力计算	26	2.5.4 总传热系数的确定	97
1.5.1 直管阻力计算	26	2.5.5 平均传热温度差的计算	100
1.5.2 摩擦系数 λ 的确定	27	2.5.6 换热器的传热计算	102
1.5.3 局部阻力计算	31	2.6 换热设备	107
1.6 管路计算	33	2.6.1 换热器类型	107
1.6.1 管路组成	33	2.6.2 强化传热途径	116
1.6.2 简单管路计算	36	2.6.3 管壳式换热器设计	117
1.6.3 复杂管路计算	37	工程案例分析	124
1.7 流体输送机械	38	习题	125
1.7.1 离心式输送机械	38	思考题	126
1.7.2 往复式输送机械	53	符号说明	127
1.7.3 其他类型输送机械	58	第3章 传质原理及应用	128
1.8 流速与流量测量	62	3.1 传质基本概念	128
工程案例分析	69	3.1.1 分子扩散	128
习题	69	3.1.2 对流传质	132
思考题	72	3.2 蒸馏	134
符号说明	72	3.2.1 气液相平衡原理	135
		3.2.2 蒸馏方式	138

3.2.3	精馏原理	139
3.2.4	物料衡算与操作线方程	140
3.2.5	热量衡算	145
3.2.6	精馏设计计算	147
3.2.7	回流比的选择及影响	152
3.2.8	特殊精馏	155
3.2.9	间歇精馏	157
3.3	吸收	158
3.3.1	吸收基本原理	158
3.3.2	气液相平衡关系	159
3.3.3	吸收速率	163
3.3.4	填料塔简介	165
3.3.5	吸收剂用量计算	166
3.3.6	吸收设计计算	169
3.3.7	其他	174
3.4	萃取	175
3.4.1	萃取原理	175
3.4.2	液液相平衡	177
3.4.3	萃取过程计算	181
3.4.4	新型萃取过程简介	186
3.5	传质设备	187
3.5.1	板式塔	187
3.5.2	填料塔	194
3.5.3	萃取设备	202
	工程案例分析	207
	习题	208
	思考题	211
	符号说明	211

第4章 固体颗粒流体力学基础与机械

	分离	214
4.1	固体颗粒特性	214
4.1.1	单一颗粒特性	214
4.1.2	颗粒群的特性	215
4.1.3	粒径测量	216
4.2	固体颗粒在流体中运动时的阻力	217
4.3	沉降分离	218
4.3.1	重力沉降	218
4.3.2	离心沉降	222
4.4	过滤	228
4.4.1	过滤原理	228
4.4.2	过滤基本方程式	230
4.4.3	过滤设备	232
4.4.4	过滤操作的改进	235
4.5	固体流态化	236
4.5.1	固体流态化现象	236
4.5.2	固体流态化流体力学特性	237

4.5.3	分布板对流化质量的影响	239
4.5.4	固体流态化技术的应用	240
4.6	其他机械分离技术	242
4.6.1	静电除尘	242
4.6.2	湿法捕集	243
	工程案例分析	245
	习题	246
	思考题	247
	符号说明	248

第5章 固体干燥

5.1	干燥基本概念	249
5.1.1	干燥的传质传热基本原理	249
5.1.2	湿空气性质	250
5.2	干燥工艺计算	255
5.2.1	物料衡算	257
5.2.2	热量衡算	257
5.3	干燥动力学	258
5.3.1	物料中水分分类	258
5.3.2	恒定干燥条件下的干燥速率	260
5.4	干燥设备	264
5.4.1	干燥器的类型	264
5.4.2	干燥器的选型	266
5.4.3	干燥器的设计	267
	工程案例分析	270
	习题	271
	思考题	273
	符号说明	273

第6章 其他单元

6.1	蒸发	274
6.1.1	蒸发器的结构	274
6.1.2	单效蒸发的工艺计算	278
6.1.3	多效蒸发	280
6.1.4	蒸发过程常用的节能措施	285
6.2	结晶	286
6.2.1	结晶过程分类	286
6.2.2	晶体的几何形态	287
6.2.3	结晶中的平衡溶解度	287
6.2.4	溶液结晶过程的计算	289
6.2.5	溶液结晶设备	290
6.2.6	熔融结晶过程及设备	293
6.2.7	结晶过程的强化与展望	294
6.3	吸附	294
6.3.1	概述	294
6.3.2	吸附剂	295
6.3.3	吸附原理	296
6.3.4	吸附速率	298

6.3.5 吸附操作与设备	299	7. 某些固体材料的黑度	329
6.4 混合	301	8. 某些液体的热导率	329
6.4.1 混合机理	301	9. 干空气的重要物理性质	330
6.4.2 影响混合作用的各种物理性质	302	10. 水的重要物理性质	330
6.4.3 搅拌装置的结构	303	11. 水在不同温度下的黏度	331
6.4.4 打旋现象	305	12. 饱和水蒸气性质表 (一)	331
6.4.5 搅拌功率	306	13. 饱和水蒸气性质表 (二)	332
6.4.6 叶轮类型	308	14. 液体黏度共线图	334
6.4.7 搅拌槽的放大	311	15. 气体黏度共线图	336
6.5 膜分离	312	16. 液体比热容共线图	337
6.5.1 概述	312	17. 气体比热容共线图	339
6.5.2 膜分离过程分类	312	18. 液体汽化潜热共线图	340
6.5.3 膜装置	314	19. 无机物水溶液在大气压下的沸点	341
6.5.4 新型膜过程	317	20. 某些气体溶于水的亨利系数	342
工程案例分折	319	21. 某些二元物系的气液平衡组成	342
思考题	321	22. 管子规格	343
符号说明	322	23. IS 型离心泵性能表	344
附录	323	24. Y 型离心油泵 (摘录)	349
1. 常用法定计量单位	323	25. F 型耐腐蚀泵	350
2. 单位换算表	323	26. 4-72-11 型离心泵通风规格 (摘录)	350
3. 某些气体的重要物理性质	326	27. 管壳式热交换器系列标准 (摘录)	351
4. 某些液体的重要物理性质	327	参考文献	352
5. 常用固体材料的密度和比热容	328		
6. 固体材料的热导率	328		

绪 论

0.1 化工原理课程基本内容及特点

化工原理是化工、生物、冶金、食品等多个专业的一门重要的技术基础课，其主要任务是研究化工类型生产中各种物理操作问题的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算。化工原理是工程类专业学生在大学学习中的一个转折点，是从基础课程过渡到专业课程的一个桥梁，它的教学目的是初步建立起学生的工程观念。

为了清晰介绍化工原理课程的任务及特点，首先需要了解以下基本概念。

(1) 化工过程 化学工业是指对原料进行大规模加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，最终得到具有特定物理化学性质产品的工业。化工过程涉及的范围相当广泛，如石油炼制、化工、冶金、制药等，在国民经济中占有十分重要的地位。

概括地说，化工过程包括发生化学反应的过程和发生物理变化的过程。然而，即使在现代化大型生产中，反应器的数量并不是很多，绝大多数的设备都是用于反应前、后工序的预处理、后处理，即物理过程的。这种物理过程改变了物料的状态和物性，占有化学工业的大部分设备投资和操作费用，与产品的产量和质量密切相关，其地位是相当重要的。

(2) 单元操作 通常，一种产品的生产过程往往需要几个或几十个物理加工过程，而且各种生产工艺路线千差万别，但所发生的各种物理变化过程及操作原理基本相同，所用设备也可以大同小异。例如聚氯乙烯和纯碱生产中最后工序都要脱水、干燥；酿酒和乙烯生产中都要将液体混合物分开；制糖和制盐生产中都要将水溶液中的水分蒸发，等等。这些操作工序是过程工业中共有的，像物料的加热与冷却，即传热操作几乎在所有的工业领域，甚至在日常生活中都是离不开的。正是这些共有的操作工序，引起了人们的研究兴趣。20 世纪 20 年代提出了“单元操作”(unit operations)的概念。单元操作在国内较多时候称为“化工原理”(principles of chemical engineering)，20 世纪 50~60 年代曾称为“化工过程及设备”，80 年代也曾称为“化学工程”、“化学工程基础”。常用的单元操作已有几十种之多。主要包括：流体流动、流体输送机械、沉降、过滤、蒸发、传热、蒸馏、吸收、萃取、塔设备、干燥、吸附、膜分离、搅拌、冷冻、流态化、结晶、升华等，见表 0-1。

动量传递是研究动量在运动的介质中所发生的变化规律，如流体流动、沉降和混合等操作中的动量传递；热量传递是研究热量由一个地方到另一个地方的传递，如传热、干燥、蒸发、蒸馏等操作中存在这种传递；质量传递涉及物质由一相转移到另一不同的相，在气相、液相和固相中，其传递机理都是一样的，如蒸馏、吸收、萃取等操作中存在这种传递。

(3) 化工原理的任务及特点 化工原理课程的主要任务是培养学生运用本学科的基础理论及基本技能，来分析解决化工生产实际问题的能力，包括：①选型，即根据生产工艺要求、物料特性及技术要求，能合理选择恰当的单元操作及设备；②设计，对已选的单元操作进行设备设计和工艺计算；③操作，熟悉该单元的操作原理、操作方法，具备初步的分析及解决操作故障的能力。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	原理与目的	基本理论基础
流体输送	输入机械能,将一定量的流体由一处送到另一处	流体动力过程(动量传递)
沉降	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	
过滤	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	
搅拌	输入机械能,使流体间或与其他物质均匀混合	
流态化	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	
换热	利用温差输入或移出热量,使物料升温、降温或改变相态	传热过程(热量传递)
蒸发	加热以气化物料,使之浓缩	
蒸馏	利用各组分挥发度不同,使液体混合物分离	传质过程(质量传递)
吸收	利用各组分在溶剂中的溶解度不同,分离气体混合物	
萃取	利用各组分在萃取剂中的溶解度不同,分离液体混合物	
吸附	利用各组分在吸附剂中的吸附能力不同,分离气、液混合物	
膜分离	利用各组分对膜渗透能力的差异,分离气体或液体混合物	
干燥	加热湿固体物料,使之干燥	热、质同时传递过程
增减湿	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	
结晶	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	
压缩	利用外力做功,提高气体压力	热力过程
冷冻	加入功,使热量从低温物体向高温物体转移	
粉碎	用外力使固体物体破碎	机械过程
颗粒分级	将固体颗粒分成大小不同的部分	

化工原理课程突出特点是符号多、公式多、单位换算多。尤其是刚开始学习的时候总觉得没有头绪。尽管如此,只要下点功夫仍然可以把课本学好。然而,要强调指出的是,化工原理面临着真实的、复杂的生产问题,即特定的物料,在特定的设备内,进行特定的过程,这就使问题的复杂性不完全在于过程本身,而首先在于过程工业设备复杂的几何形状和多变的物性。所以,研究工程问题的方法论和解决生产实际问题的能力,在化工原理的学习中上升到了显著的地位。

(4) 化工原理与化学工程 虽然化工原理有时也叫做化学工程,实际上前者仅是后者的基础。就化学工程的发展来看,包括如下几个分支。

① 化工传递过程 在许多单元操作的发展过程中,人们逐渐认识到它们之间存在共同的原则,可进一步归纳为动量传递、热量传递和质量传递,总称为化工传递过程。

② 化工热力学 是在化学热力学和工程热力学的基础上形成的,主要研究多组分系统的温度、压力、各相组成和各种热力学性质间相互关系的数学模型以及能量(包括低品位能量)的有效利用问题。

③ 化学反应工程 从化学反应设备的实际出发,深入分析其中的过程规律性,找出其共同点逐渐形成了化学反应工程,其研究的核心问题是反应器中化学反应速率的快慢及其影响因素,从而能够正确选择反应器的类型和操作条件,使化学反应实现工业化。

④ 化工系统工程 主要研究化工过程模拟分析、综合和最优化等。过程综合指已知过程的输入和输出,确定过程的结构,即选择适宜的设备类型、流程结构和操作条件等;最优化指要求过程的性能指标达到某些最优数值,包含了过程最优设计、最优控制和最优管理等意义。

本来化学工程是直接支撑化学工业的主要工程技术,是重要的学科支持。化学工程经过近一个世纪的发展,其应用领域不但覆盖了几乎所有的过程工业,而且新的生长点正不断产生,如“生化工程”、“环境工程”等,其研究对象广泛而复杂,已远远地超出了化学工程的

范畴，遍布于能源、资源、环境、运输、医药卫生、材料、农业以及生物等诸多领域。

0.2 化工原理的研究基础与方法

要做一个合格的工程师是不容易的，过程工业的复杂性和影响过程的众多因素，使得问题的解决十分困难，一般的处理方法是：理论分析，实验研究，经验估计，权衡调整，要运用以上各类方法处理问题，首先从掌握以下概念入手。

(1) 平衡关系 在化学工业的许多单元操作中，例如吸收、蒸馏等，平衡关系具有重要的意义。平衡关系是一种动态平衡，平衡条件可以用热力学法则来描述，而过程进行的方向和所能达到的极限都可以由平衡关系推知。因此，物理化学是化工原理的一个重要基础。

(2) 过程速率 任何一个物系如果不是处在平衡状态，则必然会发生趋向平衡的过程，而过程变化的速率总是和它所处状态与平衡状态的差距（推动力）成正比，而与阻力成反比，即过程速率=过程推动力/过程阻力。推动力的性质取决于过程的内容，如传热的推动力是温度差，流体流动的推动力是压力差；与推动力相对应的阻力则与操作条件和物性有关。过程速率指明了过程进行的快慢程度，属于动力学在工程问题中的应用，动力学特征主要取决于过程的机理，而大部分过程的机理与动量、热量和质量传递密切相关，所以，传递过程是化工原理的另一个重要基础。

(3) 三种衡算 质量衡算、能量衡算和动量衡算是化工原理课程中分析问题采用的基本方法。衡算的一般步骤是：首先确定衡算范围，具体包括微分衡算和总衡算，微分衡算取微元体为衡算范围，而总衡算的衡算范围可以是单个装置，也可以是一段流程、一个车间或一个工厂；其次是确定衡算对象和衡算基准；最后按衡算的通式进行计算，即：

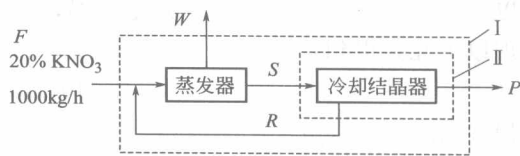
$$\text{输入的量} = \text{输出的量} + \text{累积的量}$$

当过程为稳态时，在衡算范围内累积的量等于零，即：

$$\text{输入的量} = \text{输出的量}$$

上述三种衡算中，质量衡算和能量衡算最为常用。在过程的开发设计、模拟优化、操作控制等工作中，质量衡算和能量衡算是必不可少的依据。

【例 0-1】 在硝酸钾的生产过程中，20%（质量分数，下同）的硝酸钾水溶液以 1000kg/h 的流量送入蒸发器，在 422K 下蒸发出部分水而得到 50% 的浓硝酸钾溶液，然后送入冷却结晶器，在 311K 下结晶，得到含水 4% 的硝酸钾结晶和含硝酸钾 37.5% 的饱和溶液。前者作为产品取出，后者循环回到蒸发器。过程为稳态操作，试计算硝酸钾结晶产品量、水蒸发量和循环的饱和溶液量。



【例 0-1】附图

解：根据题意画出过程的物料流程图。

(1) 求硝酸钾结晶产品量 P 取包括蒸发器和冷却器的整个过程为衡算系统（虚线框 I），取 1h 为衡算基准，以硝酸钾为衡算对象，因系统稳态操作，输入系统的硝酸钾量应等于输出系统的硝酸钾量。则

$$1000 \times 0.2 = 0.96P$$

即

$$P = 1000 \times 0.2 / 0.96 = 208.3 \text{ kg/h}$$

(2) 求水蒸发量 W 仍取系统 I，衡算基准为 1h，以总物料为衡算对象，则

$$1000 = W + P$$

$$W=1000-P=1000-208.3=791.7\text{kg/h}$$

(3) 求循环的饱和溶液量 R 取冷却结晶器为系统 II, 衡算基准为 1h, 以总物料为衡算对象, 作总物料衡算, 可得

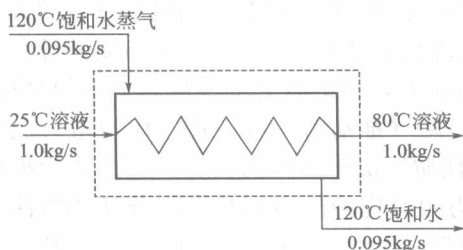
$$S=208.3+R$$

以硝酸钾为衡算对象, 作硝酸钾的物料衡算, 得

$$S \times 0.5 = 208.3 \times 0.96 + R \times 0.375$$

上两式联立, 可得

$$R=766.6\text{kg/h}$$



【例 0-2】附图

【例 0-2】在换热器里将平均比热容为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 的某种溶液自 25°C 加热到 80°C , 溶液流量为 1.0kg/s 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气, 其消耗量为 0.095kg/s , 蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解: 首先根据题意画出过程示意图 (见本例附图)。选 1s 作为基准。

从附录 12 查出 120°C 饱和水蒸气的焓值为

2708.9kJ/kg , 120°C 饱和水的焓值为 503.67kJ/kg 。

在图中虚线范围内作热量衡算。

随流股带入换热器的总热量 $\Sigma Q_1 = Q_1 + Q_2$, 其中:

蒸汽带入的热量 $Q_1 = 0.095 \times 2708.9 = 257.3\text{kW}$

溶液带入的热量 $Q_2 = 1 \times 3.56 \times (25 - 0) = 89\text{kW}$

所以 $\Sigma Q_1 = 257.3 + 89 = 346.3\text{kW}$

随流股带出换热器的总热量 $\Sigma Q_0 = Q_3 + Q_4$, 其中:

冷凝水带出的热量 $Q_3 = 0.095 \times 503.67 = 47.8\text{kW}$

溶液带出的热量 $Q_4 = 1 \times 3.56 \times (80 - 0) = 284.8\text{kW}$

所以 $\Sigma Q_0 = 47.8 + 284.8 = 332.6\text{kW}$

整理以上几式得到:

$$346.3 = 332.6 + Q_L$$

热损失 $Q_L = 13.7\text{kW}$

$$\text{热损失百分数} = \frac{Q_L}{Q_1 - Q_3} = \frac{13.7}{257.3 - 47.8} = 0.0654 = 6.54\%$$

(4) 研究方法 如何将基础理论研究成果应用到现代大型工业设备中, 主要采用数学模型法, 其实质是通过数学模型来放大和设计工业过程和设备。该方法的关键在于所建立的数学模型是否能够描述过程的本质问题, 而对过程本质的认识又来源于实践, 因此, 实验仍然是数学模型法的主要依据。

数学模型大体可分为四类, 即: 理论模型、经验模型、半经验半理论模型和人工智能模型。

① 理论模型 是指模型方程完全是在理论分析的基础上建立起来的数学表达式。尽管这类模型严格可靠, 但面对复杂的工程问题常常是难以做到, 只有那些过程十分简单, 关系极其明确的少数操作才有可能属于此类。

② 经验模型 是指模型方程完全是靠回归实验数据得到的数学表达式, 没有任何理论

依据。这类模型的主要缺点是,从模型方程的形式上看不出所研究问题的内在规律,且受实验范围所限,外推性很差。但是,若其他类型的数学模型难以得到时,使用经验模型仍不失为一种补偿的方法。

③ 半经验半理论模型 半经验半理论模型介于上述两种模型之间,是处理复杂工程问题的最有效、最常用的模型。这种模型的建立是理论与实验的结合,即:通过对所研究对象的过程机理进行理论分析,建立模型方程的表达式,进而通过实验确定模型参数。这样,可减少盲目性,增加可信性,外推性也有较大改善。

④ 人工智能模型 模拟或部分模拟人类智能的数学模型称为人工智能模型。人工神经网络模型是典型的智能模型,它是由大量的神经元互连而成的网络,模拟人脑神经网络的学习和记忆功能是人工神经网络的核心任务。近些年来,人工智能模型的理论研究已取得了突破性进展并在解决某些复杂的工程问题中获得了成功。相信随着计算机技术的发展和非经典数学方法的研究,人工智能模型必将广泛地应用到各种工程系统和生产系统中去。

本书主要介绍和应用经验模型、半经验半理论模型。

0.3 单位制与单位换算

(1) 基本单位和导出单位 凡是物理量均有单位,可分为基本单位和导出单位两类。在描述单元操作的众多物理量中,独立的物理量叫基本量,其单位叫基本单位,如时间、长度、质量等。不独立的物理量叫导出量,其单位叫导出单位,如速度、加速度、密度等。基本单位仅有几个,而导出单位由基本单位组成,数量很多。

(2) 单位制度 基本单位加上导出单位称为单位制度。由于历史和地区的原因,出现了对基本单位的不同选择,因而产生了不同的单位制度。常用的单位制有绝对单位制(包括物理单位制和米制)、重力单位制(工程单位制)、国际单位制(SI制)和英制。

长期以来,科技领域存在多种单位制度并用的局面。同一个物理量,有时在不同的单位制中具有不同的单位和数值,给计算和交流带来了麻烦,且很容易出错。为了改变这一局面,1960年10月,第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制,叫国际单位制。该单位制共有七个基本单位,分别为长度、时间、质量、热力学温度、电磁强度、光强度和物质的量,外加平面角和立体角两个辅助单位。其优点是,所有的物理量都可以用上述七个基本单位导出(有时要借助辅助单位),且任何一个导出量由上述七个基本单位导出时,都不需要引入比例系数。

1984年,国内确定了统一实行以SI制为基础,包括由我国指定的若干非SI制在内的法定单位制,并规定,自1991年起除个别领域外不允许使用非法定单位制。本课程主要采用法定单位制,兼顾各单位制之间的换算。

(3) 单位换算 单位换算虽然简单,但即使是一个经验丰富的工程师,稍一马虎也会出错,所以必须认真对待。如SI制与工程单位制的换算如下。

① 质量与重力 在SI制中,1kg质量的物体,若用工程单位制表示,该物体的重力为1kgf。即同一物体用SI制表示的质量与用工程单位制表示的重力在数值上相等。所以在有关手册中查得工程单位制的重力,SI制的质量可直接取其数值。但应注意,两者数值相等,但概念不同。质量是物体所含物质的多少,而重力是物体受地球引力的大小,一般认为地球附近的引力大小近似不变。

② 重力与重力 在工程单位中重力是基本单位,但在SI制中重力是导出单位。因此,在工程单位制中重力为1kgf的物体,若用SI制表示,该物体的重力为9.81N。

【例 0-3】 实验测得空气垂直流过管子外侧时, 管壁对流传热系数计算公式为:

$$\alpha = 0.37 G^{0.37} [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})]$$

式中 G ——空气的质量流速, $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ 。

试把空气质量流速的单位改为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 对流传热系数的单位为 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$, 写出相应的计算式。

$$\begin{aligned} \text{解:} \quad 1\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) &= 0.4536\text{kg}/(0.3048^2\text{m}^2 \cdot 3600\text{s}) \\ &= 1.356 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) &= 1.055 \times 10^3 \text{J}/(0.3048^2\text{m}^2 \cdot 3600\text{s} \cdot \frac{1}{1.8}^\circ\text{C}) \\ &= 5.678 \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

$$\text{则} \quad \alpha' \left(\frac{1}{5.678} \right) = 0.37 \left[G' \cdot \frac{1}{1.356 \times 10^{-3}} \right]$$

$$\text{处理得到:} \quad \alpha' = 24.18 (G')^{0.37} \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$$

式中, G' 的单位是 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(4) 量纲分析 量纲与单位不是一个概念。如长度的单位有米、厘米、毫米、英尺和英寸等, 为了明确长度的特性, 可用量纲 L 表示。人们规定, 用一个符号表示一个基本量, 这个符号连同它的指数叫基本量纲。而基本量纲的组合叫导出量纲。基本量纲和导出量纲统称量纲。各物理量均可以用量纲表示, 如长度用 L , 质量用 M , 时间用 θ , 温度用 T , 密度用 M/L^3 等。

在过程工业中, 由于一些物理过程十分复杂, 建立理论模型颇为困难。如果过程的影响因素已经明了, 作为影响因素的物理量的相互关系, 可进行某种程度的预测, 这种预测方法称为量纲分析。量纲分析的依据是量纲一致性原则或 π 定理。所谓量纲一致性原则, 是指一个物理量方程的各项量纲必相同。所谓 π 定理, 是指量纲一致性的方程都可以化为无量纲数群的形式, 方法是将方程中的各项同除以其中的任何一项即可, 且有:

$$\text{无量纲数群的个数} = \text{变量数} - \text{基本量纲的个数}$$

若能找出过程的影响因素, 使用量纲分析的方法将其归纳为无量纲数群表示的经验模型, 用实验确定模型的系数和指数, 这在化工原理上是可行的。这样的经验模型不仅关联式简单, 而且可减少实验的工作量。

第 1 章 流体流动原理及应用

1.1 流体基本概念

1.1.1 流体特征

气体和液体总称为流体，流体具有流动性且无固定形状。过程工业中所处理的物料，包括原料、半成品及产品等，大多数是流体。流体的输送、传热、传质或化学反应，大多是在流体流动的情况下进行的，因而流体流动状态对这些过程有很大影响，它是过程工业的基础。

1.1.2 流体力学基本概念

流体力学是研究流体在相对静止和运动时所遵循的宏观基本规律，同时研究流体与固体相互作用的学科，流体力学有许多分支，例如“水利学”及“空气动力学”等。“流体流动”是为“化工原理”课程的需要而编写的流体力学最基础的内容，主要是研究流体的宏观运动规律，其介绍范围主要局限在流体静力学、流体在管道内流动的基本规律及流量测量等方面。

运用流体流动的基本知识，可以解决管径的选择及管路的布置；估算输送流体所需的能量、确定流体输送机械的型式及其所需的功率；测量流体的流速、流量及压强等；为强化设备操作及设计高效能设备提供最适宜的流体流动条件。

由于讨论流体流动问题时，着眼点不在于研究流体复杂的分子运动，因此本章采用连续性假设，即把流体看成是由大量质点（又称分子集团）组成的连续介质，因为质点的大小与管道或设备的尺寸相比是微不足道的，可认为质点间是没有间隙的，可用连续函数描述。但是，高真空下的气体，连续性假定不能成立。

1.1.3 流体密度

1.1.3.1 密度 ρ

单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度。通常以 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

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

式中 m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

不同流体的密度是不同的。对任何一种流体，其密度是压力与温度的函数，即 $\rho = f(P, T)$ 。其中，压力对液体的密度影响很小，可忽略不计，故液体可视为不可压缩流体；而气体是可压缩性流体，其密度随系统压力明显变化。

温度对气体及液体的密度均有一定的影响，故在平时查取流体密度时应注明温度条件。

(1) 气体密度计算 因为气体具有可压缩性及膨胀性，其密度随温度、压力的变化而变化较大。当温度不太低，压力不太高时，气体可按理想气体处理，根据理想气体状态方程

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-2)$$

则

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

式中 n ——气体的物质的量， kmol ；

p ——气体的绝对压力, kPa;

T ——气体的绝对温度, K;

M ——气体的千摩尔质量, kg/kmol;

R ——气体常数, $R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

理想气体操作状况 (压力 p , 温度 T) 下的密度 ρ 与标准状况 (压力 $p_0=1\text{atm}$, 温度 $T_0=273\text{K}$) 下的密度 ρ_0 之间的换算可由下式进行:

$$\rho=\rho_0\cdot\frac{p}{p_0}\cdot\frac{T_0}{T} \quad (1-3)$$

若气体按真实气体计算, 则需引入压缩系数进行校正。

当计算气体混合物密度时, 可假设混合物各组分在混合前后质量不变, 取 1m^3 混合气体为基准, 则气体混合物密度可由下式计算。

$$\rho_m=\rho_1y_1+\rho_2y_2+\rho_3y_3+\cdots+\rho_ny_n \quad (1-4)$$

式中 ρ_m ——气体混合物密度, kg/m³;

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——气体中各组分的密度, kg/m³;

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各组分的体积分数, 由于理想气体遵守道尔顿分压定律, 所以混合气体中各组分的体积分数同时等于摩尔分数或分压比。

气体混合物的密度也可由式(1-2a) 计算, 此时式中的千摩尔质量 M 应由混合气体的平均千摩尔质量 M_m 代替。

$$M_m=M_1y_1+M_2y_2+\cdots+M_ny_n \quad (1-5)$$

式中 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的千摩尔质量, kg/kmol。

(2) 液体密度计算 对于纯组分液体密度, 可查取附录或有关的工艺及物化手册。

液体混合物密度的计算, 可取 1kg 混合物为基准, 并假定混合前、后总体积不变。液体混合物组成常用组分的质量分数表示, 故液体混合物密度 ρ_m 可表示为

$$\frac{1}{\rho_m}=\frac{x_1}{\rho_1}+\frac{x_2}{\rho_2}+\cdots+\frac{x_n}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——液体混合物中各组分的质分数;

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度, kg/m³。

【例 1-1】 在盐酸制造过程中, 氯化氢气体混合物 (其中含 25% HCl、75% 空气, 均为体积分数), 在 50℃ 及 743mmHg (绝对压强) 的条件下进入吸收塔, 试计算气体混合物的密度。

解: 已知: HCl 的千摩尔质量为 36.5kg/kmol, 空气的千摩尔质量为 29kg/kmol, 混合气体中各组分的体积分数为: HCl=0.25, 空气=0.75。 $T=50\text{K}+273\text{K}=323\text{K}$, $p=743\text{mmHg}$ 。

$$M_m=M_1y_1+M_2y_2$$

$$=36.5\times 0.25+29\times 0.75$$

$$=9.125+21.75$$

$$=30.875\text{kg/kmol}$$

气体混合物的密度, 由式(1-3) 求得:

$$\rho_m=\rho_0\cdot\frac{p}{p_0}\cdot\frac{T_0}{T}$$

$$=\frac{30.875}{22.4}\times\left(\frac{743}{760}\right)\times\left(\frac{273}{323}\right)$$

$$=1.377\times 0.979\times 0.845$$

$$=1.14\text{kg/m}^3$$

【例 1-2】 计算 293K 时 60% (质量分数) 的醋酸水溶液的密度。

解: 293K 时 $\rho_{\text{水}} = 998 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{醋酸}} = 1049 \text{ kg/m}^3$ 。

在 293K 时醋酸水溶液的密度为:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{\text{水}}}{\rho_{\text{水}}} + \frac{x_{\text{醋酸}}}{\rho_{\text{醋酸}}} = \frac{0.40}{998} + \frac{0.60}{1049}$$

所以 $\rho_m = 1028 \text{ kg/m}^3$

1.1.3.2 比容 v

比容是密度的倒数, 单位为 m^3/kg , 即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

1.2 流体静力学

1.2.1 压强

流体单位面积上所承受的垂直作用力, 称为流体的静压强, 简称压强, 以符号 p 表示, 而流体的压力 P 称为总压力。

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-8)$$

式中 p ——流体压强, N/m^2 或 Pa ;

P ——垂直作用于面积 A 上的总压力, N ;

A ——作用面的表面积, m^2 。

压强的单位除用 Pa 表示外, 还可用大气压 (atm)、米水柱 (mH_2O)、毫米汞柱 (mmHg)、巴 (bar) 等表示, 所以熟练掌握压强不同单位间的换算十分重要。

$1 \text{ atm (物理大气压)} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ (工程大气压, at) = $1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.0133 \text{ bar}$

工程上为计算方便, 还引入工程大气压换算系统。

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

此处需要指出: 1 kgf 指 1 kg 物体在 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 重力场中受到的重力, 称为“千克力”, 则 1 kgf/cm^2 作为压强单位有时在有些文献或工程现场中用到。

流体的压强除用不同的单位来表示外, 还可以用不同的方法来表示。

设备内流体的真实压强称为绝对压强, 简称绝压。

当设备内流体的绝对压强高于外界大气压时, 常在设备上安装压力表, 压力表上的读数称为表压强 (也称表压), 它反映流体绝压高于外界大气压的数值, 即可表示为:

表压强 = 绝对压强 - 外界大气压 (当时当地)

当设备内流体的真实压强低于外界大气压时, 工程上视为负压操作, 常在设备上安装真空表, 真空表上的读数称为真空度, 它反映流体绝压低于外界大气压的数值, 即可表示为:

真空度 = 外界大气压 (当时当地) - 绝对压强

绝对压强、外界大气压、表压强和真空度之间的关系如图 1-1 所示。不难看出, 真空度实际上是流体表压的负值。例如, 体系的真空度为 $3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$, 则其表压为 $-3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

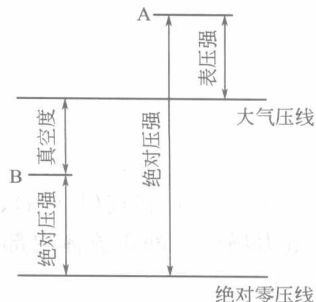


图 1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系

为了避免不必要的错误,在工程计算中,必须在压强的单位后加括号或加注脚注明压强的不同表示方法。例如: $p=2.0\text{kgf/cm}^2$ (表压), $p_{\text{真空度}}=300\text{mmHg}$, $p=4.9\times 10^5\text{Pa}$ (绝对压强) 等。

【例 1-3】 已知当地大气压 (绝对压强) p_0 为 750mmHg , 某容器内气体的真空度为 0.86kgf/cm^2 , 试求该气体的绝对压强及表压分别是多少, 单位用 Pa 表示。

解:
$$p_0 = 750\text{mmHg} = 750 \times \frac{1.013 \times 10^5}{760} = 9.997 \times 10^4 \text{Pa}$$

$$p_{\text{真空度}} = 0.86\text{kgf/cm}^2 = 0.86 \times 9.81 \times 10^4 = 8.437 \times 10^4 \text{Pa}$$

所以
$$p(\text{绝对压强}) = p_0 - p_{\text{真空度}} = (9.997 - 8.437) \times 10^4 = 1.56 \times 10^4 \text{Pa}$$

$$p_{\text{表压}} = p - p_0 = -p_{\text{真空度}} = -8.437 \times 10^4 \text{Pa}$$

1.2.2 流体静力学基本方程

流体的静止状态是流体运动的一种特殊形式,它之所以能在设备内维持相对静止状态,是它在重力与压力作用下达到平衡的结果。所以,静止流体的规律就是流体在重力场的作用下流体内部压力变化的规律。该变化规律的数学描述,称为流体静力学基本方程,简称静力学方程。

静力学方程导出的思路是,在静止的流体中取微元体作受力分析,建立微分方程,然后在一定的边界条件下积分。

如图 1-2 所示,在面积为 A 的液柱 (方形、矩形、圆形均可) 上取微元高度 dZ , 对微元体 AdZ 作受力分析:

下底面总压力 pA

上底面总压力 $-(p+dp)A$

本身重力 $\rho gAdZ$

流体静止时,上述三力之和等于零,即

$$dp + \rho gZ = 0 \quad (1-9)$$

对于不可压缩流体 (即 $\rho=\text{常数}$), 则上式不定积分求得

$$\frac{p}{\rho} + gZ = \text{常数} \quad (1-9a)$$

若取边界条件为: $Z=Z_1, p=p_1; Z=Z_2, p=p_2$, 则式(1-9) 定积分得

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 \quad (1-10)$$

对式(1-10) 整理变形还可以得到以下几式:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = g(z_1 - z_2) = gh \quad (1-10a)$$

$$p_2 = p_1 + \rho gh \quad (1-10b)$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = z_1 - z_2 = h \text{ (m 流体柱高)} \quad (1-10c)$$

式(1-10) 和式(1-10a)、式(1-10b)、式(1-10c) 均称为流体静力学基本方程式,说明了在重力场中,静止流体内部压强的变化规律。

[讨论]:

① 静力学基本方程成立的前提条件: 在重力场中,流体是静止的、连续的同一种流体,且流体的密度为常数。若流体的密度不能作为常数处理时,则式(1-10) 和式(1-10a)、式(1-

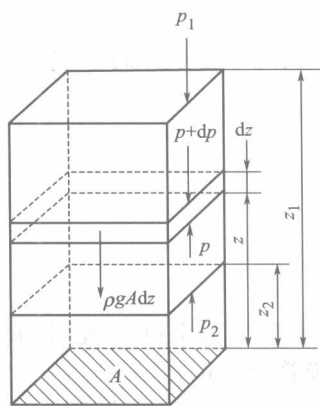


图 1-2 静止流体内部力的平衡