



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化学工程基础

(第三版)

武汉大学 主编

高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化学工程基础

(第三版)

武汉大学 主编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书按照“化学类专业本科教学质量国家标准”规定的“化学工程基础”课程教学基本内容,针对理科化学与应用化学的专业特点,将动量传递、热量传递、质量传递和反应工程(“三传一反”)的内容融为一体,使读者在较少的学时内了解和掌握化学工程学的基本原理,为学生从实验室研究到工程应用打下坚实的理论基础。

本书是在2009年出版的《化学工程基础》(第二版)基础上修订而成的。全书共11章,分别为化学工业与化学工程学、流体流动与输送、热量传递、传质分离基础、吸收、精馏、其他传质分离技术、化学反应工程学基本原理、均相反应过程、气固相催化反应器和生化反应器。编者或部分重要知识点录制了讲解视频,读者可通过扫描书中二维码观看视频,加深理解。

本书可作为高等学校理科化学类专业的“化学工程基础”课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/武汉大学主编.--3版.--北京:

高等教育出版社,2016.11

ISBN 978-7-04-046173-2

I.①化… II.①武… III.①化学工程-高等学校-教材 IV.①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第197711号

策划编辑	李颖	责任编辑	付春江	封面设计	于文燕	版式设计	马敬茹
插图绘制	杜晓丹	责任校对	刘丽娴	责任印制	田甜		

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 100120
印 刷 北京铭传印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 33.75
字 数 610千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2001年7月第1版 2016年11月第3版
印 次	2016年11月第1次印刷
定 价	48.60元

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 46173-00

第三版前言

本书第一版于2001年出版,2009年出版第二版,为“面向21世纪课程教材”和“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,被全国许多高等学校理科化学类专业选用,受到广大师生的欢迎。

理科化学类专业学生的工程技术知识涉及不多,主要侧重化学基础理论知识和实验室基本操作与综合实验训练,了解化学工业与化学工程学的基本知识,掌握必要的化工传递过程和反应工程原理,对其未来的实验室研究成果转化为工程应用十分重要。

2015年11月28日,编写人员在长沙开会商讨了本书第三版的修订原则和内容。编写人员征求了部分教材使用单位师生的意见和建议,按照“化学类专业本科教学质量国家标准”规定的“化学工程基础”课程教学基本内容,针对理科化学与应用化学的专业特点,在保持第一版和第二版风格的基础上进行了部分改写和更新,修订了第二版教材中的不当表述,补充或改写了“化学工业与化学工程学”“传质分离基础”“吸收”“其他传质分离技术”和“主要参考文献”等部分内容,增加了部分章节的“思考题”“物理量符号说明”和全书的常用专业术语“中英文对照表”。

本书修订的一个特色是结合互联网,在书中配备了重要知识点的讲解视频,由部分编者录制。读者可通过扫描书中二维码观看讲解视频,进一步理解书中内容,使学习更直观、深刻。

参加本书编写与修订工作的有武汉大学罗运柏(第1章、第8章和第9章)、于萍(第2章和第10章),南开大学李富生(第6章)、邱平(第11章),兰州大学严世强(第4章和第5章),厦门大学叶李艺(第3章)、李军(第7章)。全书由罗运柏整理定稿。

本书的再版得到编者所在学校和师生的大力支持。高等教育出版社鲍浩波编辑始终关心本书的编写和修订工作,李颖编辑、付春江编辑为本书的出版付出了辛勤劳动。一些教材使用单位的老师和同学提出了宝贵的建议。在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中的不当或错误之处在所难免,恳请广大读者和同行批评指正,以期及时修订纠正。

编 者

2016 年 4 月

第二版前言

本书自 2001 年作为“面向 21 世纪课程教材”出版以来,全国许多高等学校理科化学类专业选用了本教材。2006 年,本版教材入选普通高等教育“十一五”国家级教材规划选题。

“化学工程基础”是理科化学类专业重要的技术基础课程。本书根据《普通高等学校本科化学专业规范(讨论稿)》和理科化学类专业培养创新人才的要求,既包括了一些传统的化工过程及设备,又介绍了一些化学工程技术的最新进展,内容侧重于理科化学与应用化学专业学生所必须了解的化学工程学及化学反应工程学方面的基本知识。针对理科学生缺乏工程技术知识的实际情况,加强了“化学工业与化学工程”的内容,以便学生在接受化学工程知识之前对化学工业和化工过程有所了解。

与第一版教材相比,此次修订进一步突出了理科特点,改写了原书传质过程、吸收和新型分离技术等章节,适当介绍了实验研究用的反应器和增加了生化反应器的内容,删除了辐射传热和多相催化反应动力学。突出了“三传类似”的思想,对文字做了进一步的润色。

参加本书编写与修订工作的有武汉大学罗运柏(第一章、第八章和第九章)、于萍(第二章和第十章),南开大学李富生(第六章)、邱平(第十一章),兰州大学严世强(第四章和第五章),厦门大学叶李艺(第三章)、李军(第七章)。全书最后由罗运柏整理定稿。

本书初稿承蒙复旦大学徐华龙教授审阅;武汉大学马玉龙老师和周新花老师亲自参与了修订内容的讨论;贵州教育学院陈明元老师提出了很好的修改建议;高等教育出版社鲍浩波、刘佳为本书的出版付出了辛勤劳动;武汉大学教务部和武汉大学化学与分子科学学院对本书修订工作给予了大力支持,在此一并致谢。

限于编者的学识水平,教材中一定会有不当甚至错误之处,恳请广大读者批评指正,编者将不胜感激。

编者

2009 年 5 月

第一版前言

根据教育部关于高等理科教育面向 21 世纪进行教学内容和课程体系改革的精神,在高等教育出版社的积极支持和具体组织下,由武汉大学、南开大学、兰州大学和厦门大学四校共同编写了这本《化学工程基础》教材,供理科化学专业和应用化学专业开设“化工基础”课程使用。

在理科化学系开设化学工程方面的课程由来已久,自新中国成立以来其教学内容已由“工业化学”“化学工艺学”和“化工原理”逐渐演变成为今日的“化学工程基础”。

理科化学和应用化学专业培养的人才,应当既具有扎实的基础理论知识,又具有联系实际分析问题和解决问题的能力。化工基础课程担负的任务是:传授化工基础知识、培养学生的技术经济观点、提高他们从事应用和开发研究的能力,使他们在科技成果转变为生产力的过程中能较好地与工程技术人员相互配合。

本书在编写过程中着重考虑了以下几点:

一、针对理科学生缺乏工程技术知识的实际情况,增加了关于化学工业与化工生产过程的一般性介绍,以便学生在接受化学工程知识之前,对化学工业和化工生产过程有所了解。

二、在“流体流动”“传热”和“传质”等三个传递过程的内容中,着重介绍了过程的基本原理和处理工程问题的思想方法,适当削减了以设备设计为目的的有关工科专业视为重点的内容,增加了反映学科发展的若干新知识,如膜分离技术、超临界萃取技术、反应与分离联用技术、变压吸附技术以及新型加热技术等。

三、在化学反应工程学的内容中,将基础知识单列一章,着重介绍建立数学模型的思想方法,同时将均相反应过程和多相催化反应过程各单列一章,试图加强有关内容的深度和广度。

四、考虑到现代化学工业和生物技术的相互渗透,增加了生化反应器一章。由于生化反应器和化学反应器有许多相似之处,故在介绍了化学反应工程的基本知识后,再介绍生化反应器,所占篇幅不大,但内容却获得了较宽的拓展,扩大了学生的工程技术知识视野。

参加本书编写的有武汉大学马玉龙(第一章、第八章和第九章)、周新花(第二章和第十章),南开大学李富生(第六章)、刘展红(第十一章),兰州大学严世强(第四章和第五章),厦门大学凌敬祥(第三章)、邓旭(第七章),全书最后由马玉龙整理定稿。

本书初稿承蒙福建师范大学蒋家俊老师审阅,提出了许多宝贵意见;武汉大学化学系郑洁修老师对初稿又做了多处修改,付出了辛勤的劳动;在编写和出版过程中,浙江大学俞庆森老师、北京师范大学王定锦老师、高等教育出版社王蕙桦老师和南京大学芮必胜老师等提出了许多很好的意见和建议,在此一并致谢。

由于作者学识水平有限,本书还会有许多不足之处,恳请读者指正,并将改进意见反馈给我们,以便再版时修改。

编 者

2000年11月

目 录

第 1 章 化学工业与化学工程学	1
1.1 化学工业概述	1
1.1.1 化学工业发展概况	1
1.1.2 我国化学工业的发展与进步	3
1.1.3 化学工业分类	4
1.1.4 化学工业的特点与发展趋势	5
1.1.5 化工生产工艺及流程	9
1.1.6 实验室研究与化工过程开发	12
1.2 化学工程学	14
1.2.1 化学工程学的形成与发展	14
1.2.2 化学工程学研究特点、内容和对象	16
1.2.3 化学工程领域发展趋势	17
1.3 物料衡算与能量衡算	20
1.3.1 物料衡算	20
1.3.2 能量衡算	21
1.3.3 单位制与单位换算	22
第 2 章 流体流动与输送	24
2.1 流体静力学	24
2.1.1 相对密度	25
2.1.2 压强	25
2.1.3 流体静力学方程	27
2.1.4 流体静力学方程应用举例	28
2.2 流体流动	30
2.2.1 流体的流量和流速	30
2.2.2 稳态流动与非稳态流动	32
2.2.3 流动型态	32
2.2.4 牛顿黏性定律	34
2.2.5 边界层及边界层分离	36
2.2.6 流体在管内的速度分布	38
2.3 流体流动系统的质量衡算	40

2.4 流体流动系统的能量衡算	41
2.5 管内流动阻力	45
2.5.1 直管阻力损失计算通式	45
2.5.2 层流流动的阻力损失计算	47
2.5.3 湍流摩擦阻力计算与量纲分析法	48
2.5.4 非圆形管内的流动阻力	52
2.5.5 局部阻力损失计算	53
2.6 流体流量的测量	56
2.6.1 孔板流量计	57
2.6.2 转子流量计	59
2.7 流体输送设备	62
2.7.1 离心泵的构造及工作原理	62
2.7.2 往复泵	71
2.7.3 旋转泵	73
2.7.4 真空泵	74
本章物理量符号说明	75
思考题	76
习题	78
第3章 热量传递	85
3.1 概述	85
3.1.1 稳态与非稳态传热	85
3.1.2 传热基本方式	86
3.1.3 热平衡方程与热流量方程	87
3.2 热传导	88
3.2.1 傅里叶定律	88
3.2.2 导热系数	89
3.2.3 平壁的稳态热传导	92
3.2.4 圆筒壁的稳态热传导	93
3.3 对流传热	95
3.3.1 对流传热过程分析	95
3.3.2 牛顿冷却定律	96
3.3.3 传热膜系数	96
3.3.4 对流传热小结	103
3.4 热交换的计算	105
3.4.1 总传热系数	105
3.4.2 传热的平均温度差	108

3.4.3 热交换计算示例	114
3.5 热交换器	115
3.5.1 热交换器的分类	115
3.5.2 间壁式换热器	116
3.6 传热过程的强化	123
本章物理量符号说明	124
思考题	126
习题	127
第4章 传质分离基础	131
4.1 传质分离过程	132
4.1.1 分离与人类的关系	132
4.1.2 传质分离操作的种类	132
4.2 传质过程分析	134
4.2.1 双组分混合体系中的分子传质过程(分子扩散)	134
4.2.2 对流传质过程(对流扩散)	145
4.2.3 两相间的传质模型	148
4.3 传质分离过程的研究进展	150
4.3.1 传质分离理论研究	150
4.3.2 传质分离过程的应用研究	151
习题	153
第5章 吸收	155
5.1 化学工业中的吸收操作	155
5.1.1 吸收操作流程	156
5.1.2 吸收设备	157
5.1.3 其他吸收流程	158
5.1.4 吸收操作分类	158
5.2 吸收过程气液相平衡	160
5.2.1 溶解度曲线	161
5.2.2 亨利定律	164
5.2.3 相平衡与吸收过程的关系	168
5.3 吸收速率方程	170
5.3.1 膜推动力表示的吸收速率方程	171
5.3.2 总推动力表示的吸收速率方程	174
5.3.3 气膜控制与液膜控制	177
5.4 低浓度气体吸收过程的计算	180

5.4.1 低浓度气体的吸收特点	180
5.4.2 物料衡算与操作线方程	180
5.4.3 吸收剂	184
5.4.4 填料层高度的计算	188
5.4.5 吸收塔的调节与分析	200
5.4.6 解吸操作	201
5.5 其他类型吸收过程简介	203
5.5.1 多组分吸收	203
5.5.2 化学吸收	203
5.5.3 非等温吸收	204
习题	205
第6章 精馏	210
6.1 气液相平衡	210
6.1.1 $x-y$ 相图	210
6.1.2 气液相平衡方程	212
6.2 精馏原理	216
6.2.1 精馏基本原理	216
6.2.2 精馏流程	218
6.3 双组分连续精馏的物料衡算和能量衡算	219
6.3.1 恒摩尔流假定	219
6.3.2 物料衡算和热量衡算	220
6.4 理论塔板数的计算	227
6.4.1 逐板计算法	227
6.4.2 图解法	229
6.4.3 回流比的影响及选择	233
6.4.4 进料状况的影响	238
6.4.5 简捷法求理论塔板数	238
6.4.6 塔板效率和实际塔板数	240
6.5 间歇精馏	243
6.5.1 间歇精馏的特点	244
6.5.2 恒回流比操作时的间歇精馏计算	244
6.6 多组分精馏和其他精馏方法简介	249
6.6.1 多组分精馏	249
6.6.2 共沸精馏	251
6.6.3 萃取精馏	252
6.7 传质设备	253

6.7.1 评价塔设备的指标	253
6.7.2 填料塔	254
6.7.3 板式塔	259
本章物理量符号说明	265
思考题	266
习题	267
第7章 其他传质分离技术	270
7.1 膜分离技术	270
7.1.1 分离用膜及膜分离过程与设备	271
7.1.2 反渗透	276
7.1.3 纳滤	282
7.1.4 超滤	284
7.1.5 电渗析	287
7.1.6 气体的膜分离	291
7.1.7 渗透汽化膜分离	293
7.1.8 液膜分离	296
7.2 超临界流体萃取	300
7.2.1 萃取基础	300
7.2.2 超临界流体性质	302
7.2.3 超临界流体与溶质体系的相平衡	304
7.2.4 超临界流体萃取的传质动力学	308
7.2.5 超临界流体萃取工艺	308
7.2.6 超临界流体萃取技术的应用	310
7.3 吸附与离子交换	312
7.3.1 概述	312
7.3.2 吸附平衡-吸附等温线	313
7.3.3 吸附动力学-吸附传质速率	318
7.3.4 固定床吸附器	320
7.3.5 变压吸附	323
7.3.6 离子交换	326
本章物理量符号说明	331
习题	333
第8章 化学反应工程基本原理	336
8.1 化学反应工程概述	337
8.2 工业反应器	338
8.2.1 工业反应器类型	338

8.2.2 工业反应器操作方式	342
8.3 化学反应动力学基础	343
8.3.1 化学反应的转化率和收率	343
8.3.2 反应体积、反应时间与空间速度	346
8.3.3 反应动力学	348
8.4 化学反应器中物料的流动模型	352
8.4.1 全混流模型	353
8.4.2 活塞流模型	353
8.4.3 非理想流动模型	354
8.5 反应器内物料的停留时间分布	356
8.5.1 分布函数	356
8.5.2 停留时间分布函数的测定	358
8.5.3 停留时间分布函数的统计特征值	363
8.6 理想流动模型的停留时间分布	366
8.6.1 活塞流模型的停留时间分布	366
8.6.2 全混流模型的停留时间分布	367
8.7 非理想流动模型	369
8.7.1 轴向扩散模型	369
8.7.2 多釜串联模型	371
本章物理量符号说明	376
习题	377
第9章 均相反应过程	380
9.1 间歇反应器	380
9.1.1 反应器结构和操作	380
9.1.2 反应器基本关系式	380
9.2 活塞流反应器或理想管式反应器	384
9.2.1 简单一级反应	385
9.2.2 简单二级反应	385
9.2.3 反应器体积	386
9.3 连续搅拌釜式反应器	388
9.3.1 简单一级反应	389
9.3.2 简单二级反应	389
9.3.3 反应器体积	389
9.4 全混流反应器的串联操作	393
9.5 均相反应过程优化与反应器选择	398
9.5.1 以生产强度为优化目标	398

9.5.2 以产率和选择性为优化目标	400
习题	402
第 10 章 气固相催化反应器	408
10.1 固体催化剂的特性	408
10.1.1 比表面积	408
10.1.2 孔容积	409
10.2 气固相催化反应过程	410
10.2.1 外扩散的影响	411
10.2.2 内扩散对反应速率的影响	414
10.3 固定床催化反应器	419
10.3.1 固定床催化反应器的类型	419
10.3.2 固定床内的传递特性	421
10.3.3 固定床催化反应器有效容积的计算	424
10.4 固体流态化和流化床反应器	427
10.4.1 固体流态化	428
10.4.2 流化床反应器	431
10.4.3 流化床反应器的放大	434
本章物理量符号说明	437
思考题	437
习题	438
第 11 章 生化反应器	440
11.1 生化反应过程	440
11.1.1 生化反应过程概述	441
11.1.2 生化反应过程的特点	443
11.1.3 酶催化剂的主要类型和用途	444
11.2 生化反应动力学	449
11.2.1 酶催化反应动力学	449
11.2.2 发酵和细胞培养动力学	461
11.3 生化反应器	466
11.3.1 生化反应器的特殊要求	466
11.3.2 生化反应器类型	467
11.3.3 机械搅拌反应釜	468
11.3.4 塔式生化反应器	471
11.3.5 膜生化反应器	475
11.3.6 酶生化反应器	476
11.3.7 生化反应器的计算	477

本章物理量符号说明	482
习题	484
附录	488
主要参考文献	515
中英文词汇对照表	517

第 1 章 化学工业与化学工程学

化学工业是综合利用化学和物理方法将原料生产成化学产品的加工工业,包括基本化学工业、塑料、合成纤维、石油、橡胶、药剂和染料工业等,是利用化学反应改变物质结构、成分、形态等生产化学产品的部门,如无机酸、碱、盐、稀有元素、合成纤维、塑料、合成橡胶、染料、油漆、化肥和农药等。化学工业是国民经济中的一个重要组成部分,它既为农业、轻工业、重工业和国防工业提供生产资料,也为人类衣、食、住、行各方面提供必不可少的化工产品。

化学工程学是工程学科之一,以物理学、化学和数学为基础,结合工业经济基本法则,研究化学工业中具有共同特点的物理和化学变化过程及其有关的机理和设备。具体地说,研究化工单元操作和化学反应工程学以及有关的动量传递、热量传递和质量传递原理、化学热力学和化学动力学以及系统工程等在化学工业上的应用,通过对过程的研究解决化学工业应用中出现的问题。

1.1 化学工业概述

1.1.1 化学工业发展概况

18 世纪,在纺织、印染、制皂工业的推动下,路布兰(N. Leblanc)纯碱制造工艺首先成为近代化学工业的里程碑,由它带动了硫酸、盐酸、漂白粉等化工产品的生产。19 世纪,以煤为基础原料的有机化学工业在德国迅速发展起来。但那时的煤化学工业规模并不大,主要着眼于各种化学产品的开发。

现代化学工业的发展从美国开始。19 世纪末 20 世纪初,石油的开采和大规模石油炼厂的兴建为石油化学工业的发展和化学工程技术的产生奠定了基础。与以煤为基础原料的煤化学工业相比,炼油业的化学背景不