



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向 21 世纪 课程教材

化学工程与工艺 专业实验

第三版

乐清华 主编
徐菊美 副主编

HUAXUE GONGCHENG YU GONGYI ZHUANYE SHIYAN



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向21世纪课程教材

化学工程与工艺 专业实验



第三版

乐清华 主编
徐菊美 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《化学工程与工艺专业实验》(第三版)为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和面向21世纪课程教材。

《化学工程与工艺专业实验》(第三版)教材既保留了原教材先进的教学理念和模块化的实验项目结构,又充分体现了“学习成果导向”(Outcome-Based Education)的工程教育理念。教材新增“绪论”部分,根据《工程教育认证通用标准》(2015版)中提出的毕业要求,增加实验课程教学目标的描述,明确课程目标对毕业要求的支撑关系,并提出学习成果的评价依据和方法。教材分为“专业实验基础”与“专业实验实例”两大篇。“专业实验基础”介绍了专业实验的组织与实施、专业实验的技术及设备,本次修订增加了化工实验安全知识,强调开展实验过程风险分析、加强风险防范的必要性及具体方法,以强化学生的健康、安全、环保意识和社会责任。“专业实验实例”分为基础数据测试实验、化工热力学实验、反应工程实验、化工分离技术实验、化工工艺实验和研究开发实验六大模块,30个实验项目。此次修订增加了研究开发型实验,可供优秀学生选做。

《化学工程与工艺专业实验》(第三版)可作为高等学校化工及相关专业的本科生教材,也可供科研等相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程与工艺专业实验/乐清华主编. —3版.
北京:化学工业出版社,2017.9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
面向21世纪课程教材
ISBN 978-7-122-30068-3

I. ①化… II. ①乐… III. ①化学工程-化学实验-
高等学校-教材 IV. ①TQ016

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第154145号

责任编辑:杜进祥 徐雅妮 何 丽
责任校对:边 涛

文字编辑:孙凤英
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 刷:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:北京国马印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张15 字数381千字 2018年1月北京第3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:39.00元

版权所有 违者必究

第三版修订说明

本教材 2000 年作为面向 21 世纪课程教材首次出版, 2008 年第一次修订, 并相继被全国众多兄弟院校和科研院所选用。广大读者对本教材提出的“以化工过程研究与开发的方法论为主线, 按化学工程学科发展方向重新构建专业实验教学”的总体思路, 以及在实验内容选材上既充分考虑了教学内容的先进性、典型性和综合性, 又切实考虑了教学实施的可行性的教材特点, 一致表示认同, 同时, 也希望能够按照国际工程教育的标准要求, 进一步强化学生解决复杂工程问题的能力, 强化学生的安全、健康、环保 (SHE) 意识和社会责任, 强化学生的团队合作和沟通能力, 使化工专业实验不仅能反映学科发展和工业技术创新的前沿, 为创新教育和实验教学改革提供支撑, 而且能够引导学生在实验方案的设计和实施过程中综合考虑社会、健康、安全、环保、经济、法律及文化等因素, 强化学生的工程思维和责任意识。根据读者在使用本教材中提出的意见和建议, 结合编者们在教学实践中发现的问题, 此次对教材进行了进一步的修订与完善, 使教材能够紧跟国际工程教育改革的步伐, 在培养学生实践创新能力方面发挥更大的作用。

本次修订保留了原教材的指导思想和主体结构, 即强调实验的方法论, 注重实验选材的典型性、先进性和综合性, 充分考虑实验教学的可操作性, 以化学工程学科发展方向为主线构建专业实验教学的新框架。在此基础上, 根据工程教育的理念和实验教学的特点, 重点对教材的“绪论”和“专业实验基础”篇进行了修订, 明确提出了本课程的教学目标和评价方法, 加强了实验安全技术的介绍, 同时, 对“专业实验实例”篇进行了内容增删和修订, 增加了研究开发性实验的内容。主要修订内容如下。

1. 为体现学习成果导向 (OBE) 的工程教育理念, 本教材在“绪论”部分, 根据我国《工程教育认证通用标准》(2015 版) 对工科毕业生提出了 12 条毕业要求 (Outcomes), 提出了本课程的教学目标, 明确了课程教学目标对标准提出的相关毕业要求的支撑关系, 并将教学目标细化且落实到具体的实验项目中, 使教学目标可衡量、可教学、可评价, 以落实本课程对学生相关毕业能力达成的贡献度。

2. 为强化学生的安全、健康、环保 (SHE) 意识和社会责任, 在第一篇“专业实验基础”部分增加了“化工实验安全知识”的章节, 系统分析了化工实验过程的危害因素, 强调开展实验过程风险分析、加强风险防范的必要性及具体方法, 以强化学生的健康、安全和环保的风险责任意识。

3. 为帮助学生正确地使用数据处理软件, 提高实验数据的准确性和可靠性, 在该篇的第 1 章增加了“常用计算机辅助软件”; 随着分析技术高速发展, 分析仪器越来越普及, 学生有足够的渠道获取相关知识, 因此, 在“实验基础”部分删减“常用分析检测方法及仪器”章节。

4. 对第二篇“专业实验实例”中所有实验项目的“实验目的”都进行了重新表述, 以体现实验项目对“课程目标”的支撑, 并通过实验内容、教学方法和考核评价标准, 将学生相关能力的培养落到实处。

5. 对第二篇“专业实验实例”中的部分实验内容进行了合并、更新和充实。增设了

“化工热力学实验”模块，设置了四种不同类型的热力学实验。在“基础数据测试实验”模块中，增设了“多孔催化剂比表面积及孔径分布的测定”实验项目；在“研究开发实验”模块中增设了“苯-乙醇烷基化制乙苯催化剂的开发研究”“氧化钙基高温二氧化碳吸附剂性能研究”等特色实验项目。

6. 加强了教材的统稿工作，对书中的内容细节、文字表述，以及附图、附表等作了全面修订，使文字风格尽量保持一致。

本教材修订后，既保留了原教材先进的教学理念和模块化的实验项目结构，又充分体现了“学习成果导向”（OBE）的工程教育理念，建立了“专业毕业要求-课程教学目标-教学内容和方法-考核评价标准”之间的关系，在实验内容的设计中，更加强调工程知识的运用，强调实验过程的研究性，强调现代工具的使用，强调安全、健康、环保意识，强调团队合作和沟通交流能力的培养，形成了由教学目标、实验方法、装备技术、分析手段、应用实践构成的完整专业实验教学体系。

参加本书修订工作的人员有乐清华（绪论）、魏永明（1.4、实验二十九）、宁雷（实验七）、李秀军（实验二十八）、徐菊美（3.1~3.4、实验三十）、李平（实验三、实验二十七）、钱炜鑫（实验六）、彭阳峰（实验八）、赵红亮（实验十一）、朱贻安（实验十二）、孙志仁（实验十七）、纪利俊（实验十八）、薛为岚（实验二十三）、朱志华（实验二十六）、雷明（实验附图、附表），全书由乐清华统稿整理。

——本教材修订过程中，得到了华东理工大学化学工程与工艺专业教师的大力支持，房鼎业教授对教材的修订给予了悉心指导，在此一并表示衷心的感谢。

修订者

于华东理工大学，上海

2017.4

第一版导言

一

化学工程与工艺专业是由原化学工程、无机化工、有机化工、煤化工、石油加工、高分子化工、工业催化、电化学工程等专业归并而成的宽口径专业。工程实践能力的培养是本专业教学计划的重要内容和主要任务之一。作为一门重要的专业实践性课程,本课程的目的是培养学生掌握化学工程与工艺专业的专业实验技术与实验研究方法。具体地说,本课程应达到以下6个方面的教学要求。

- (1) 使学生掌握专业实验的基本技术和操作技能。
- (2) 使学生学会专业实验主要仪器和装备的使用。
- (3) 使学生了解本专业实验研究的基本方法。
- (4) 培养学生分析问题和解决问题的能力。
- (5) 培养学生理论联系实际、实事求是的学风。
- (6) 提高学生的自学能力,独立思考能力与创新能力。

二

本书在编写过程中精选了华东理工大学原化学工程、无机化工、有机化工等专业多年来专业实验的教学实例,也反映了我校化学工程学科部分科研成果。全书分“实验基础”与“实验实例”两篇。“实验基础”介绍了专业实验的组织与实施、专业实验的基本技术与装备。“实验实例”包括基础数据测试实验、反应工程实验、分离技术实验、化工工艺实验和研究开发实验等类型,共34个实例,供各校根据条件和教学要求选用。实验实例中有些实例侧重于验证专业理论,使学生加深对理论的理解;有些实验着眼于模拟生产实际过程,以提高学生对工程和工艺问题的认识。为了将现代化教育手段引入实验教学,还介绍了几个计算机仿真实验。研究开发型实验,需由学生按要求提出方案,进行实验设计并自己搭建或改造实验流程,采集和处理数据,以及对结果进行分析,这类实验可供有科研兴趣的学生选做。

化学工程与工艺专业实验不同于理论教学,也有别于基础课程的实验。它具有较强的化学工程与工艺背景,实验流程较长,规模较大,学生需通过较为系统的实验室工作来培养自己的动手能力、分析问题的能力与创新思维,训练自己参加科学研究的能力。化学工程与工艺专业实验课程安排在基础与技术基础课程学完以后,与其他专业课程同时进行。它要求学生有数理化和化工原理的理论基础,有物理、化学、电工、仪表等基本实验技能,通过本课程加强以化学工程与工艺为背景的综合型实验训练。

三

在选择实验实例时,充分考虑了工程学与工艺学实验的适当平衡,并特别注意实验内容的典型性与先进性。

在工程学方面,分别考虑到反应工程、分离工程、传递过程等化学工程学科的需要,安排了连续反应器中的返混、气固相催化反应宏观速率测定、流化床反应器特性测定;超临界萃取提取、液膜与固膜分离;二元汽液平衡数据、三元液液平衡数据测定;液液传质系数、

气液传质系数测定等实验。

在工艺学方面,为使学生通过实验了解有关工艺中的单元过程,本书所安排的合成气中一氧化碳的中、低温变换、有机化工中乙苯脱氢制苯乙烯、精细化工中表面活性剂合成等都有强烈的工艺背景。即使是工程类的实验,也有相当数量以工艺过程为依托,如热钾碱法吸收二氧化碳的吸收速率在无机与煤化工工艺中广泛使用,径向固定床中的流体均布在有机化工与石油化工反应器中都有使用。

所谓“典型性”,即本书所选编的实验反映了不同的工程特征与工艺特性,分离工程领域所包含的精馏、吸收、萃取、膜分离、泡沫分离等内容,在本书中均有代表性实验。反应工程领域中粒内扩散、宏观速率、返混现象、气液相反应过程也都设置有代表性实验,这就可使学生熟悉各类典型单元过程的实验方法。

所谓“先进性”,即实验内容与实验装备要先进。在实验内容上有些实验涉及本专业科研的新进展,如超临界分离技术、径向流动反应器中流体均布等,使学生了解本专业生产与科研发展的前沿。先进性还应体现在装备的先进,实验流程与装备具有较高的水平。

四

本书的使用对象是化学工程与工艺专业的本科生与专科生,建议教学时数 50~60 学时。

本书的第一篇“实验基础”,课内可安排 4~6 个学时,有些内容可让学生自学。第二篇“实验实例”不可能都做,可根据各校的条件与教学计划的学时数决定,选做其中的一部分。对“实验实例”,建议抓好以下教学环节。

(1) 实验预习 学生应根据实验所列预习思考题,了解每个实验的目的、原理、流程、装备与控制,并对实验步骤、实验数据采集与处理方法有所了解。教师应在动手实验前通过多种方式检查学生的预习情况,并记录在案,作为评分依据之一。

(2) 实验过程 在安排实验方案的基础上,精心调节实验条件,细心观察实验现象,正确记录实验数据。教师在指导时,有责任指导学生正确使用实验仪器,并督促学生严格采集实验数据,养成优良的实事求是的学风。要教育学生不得涂改记录,不得伪造数据。实验过程中教师应重视培养学生根据实验现象提出问题、分析问题的能力。

(3) 实验报告 实验完成后,学生应认真独立撰写报告。实验报告应做到层次分明、数据完整、计算正确、结论明确、图表规范、讨论深入。要重视实验讨论环节,实验讨论是对学生创新思维的训练。

一个完整的专业实验过程相当于一个小型的科学研究过程,预习大体上相当于查阅文献和开题论证,实验操作相当于试验数据的测定,实验报告就是一篇小型论文。参加一次实验,要视为参加科学研究的初步训练,学生应认真对待和参与专业实验的全过程。

五

本书由华东理工大学化学工程与工艺实验中心的教师共同编写,房鼎业、乐清华、李福清主编,制定编写大纲和要求。各章节的编写人员如下:

第一篇:1—乐清华;2.1~2.6—李福清;2.7—宁雷。

第二篇:实验 2, 24, 29, 30, 31, 33—乐清华;6, 18, 19, 32—唐小琪;13, 14, 16, 17—许志美;10, 11, 12—朱志华;3, 4—张秋华;21, 23—韩伟;20—孙杏元;15—徐志刚;34—蔡水洪;7—雷坚;8—曹砚君;28—薛为岚;22—许振良;26—陈鸿雁;27—刘殿华;5—张岩;9—孙志仁;1—宋道云;25—蔡建国。

附录:曹砚君。

全书由房鼎业、乐清华统稿,张岩为本书的编著做了大量的资料整理工作。本书主审人

为北京化工大学李成岳教授、四川大学朱家骅教授，两位主审人还分别组织两校实验教学经验丰富的罗澄源教授、古大田教授等审稿，对本书的内容提出了许多修改意见，对提高本书质量有很大帮助。

由于作者的水平和我校实验设备所限，本书定有不少欠缺之处，欢迎读者批评指正。

编者

2000年8月

第二版修订说明

本书 2000 年作为面向 21 世纪课程教材首次出版,并相继被全国众多兄弟院校和科研院所选用。广大读者对本书提出的“以化工过程研究与开发的方法论为主线,按化学工程学科发展方向重新构建专业实验教学”的总体思路,以及在实验内容选材上既充分考虑了教学内容的先进性、典型性和综合性,又切实考虑了教学实施的可行性的教材特点,一致认同,同时,也希望能够进一步充实和完善实验的配套技术,介绍实验装备的先进控制方法,使化工专业实验能够反映学科发展和工业技术创新的前沿,为创新教育和实验教学改革提供支撑。根据读者在使用本书中提出的意见和建议,结合编者几年来在自身教学实践中发现的问题,进行了修订与完善,使本书能够紧跟学科发展和教学改革步伐,在培养学生实践创新能力方面发挥更大的作用。

本次修订保持了第一版教材的指导思想和主体结构,即强调实验的方法论,注重实验选材的典型性、先进性和综合性,充分考虑实验教学的可操作性,以化学工程学科发展方向为主线构建专业实验教学的新框架。在此基础上,根据专业技术发展的趋势和实验教学的特点,重点对“专业实验基础”篇进行了修订,加强了实验技术的介绍,同时,对“专业实验实例”篇进行了内容增删和修订。主要修订内容如下。

1. 为帮助学生了解和掌握化工专业实验常用的分析检测方法和仪器设备,正确地选用分析仪器,提高实验数据的准确性和可靠性,在第一篇中新增了一个章节,即第 3 章:专业实验常用分析检测方法与仪器。分别介绍了气相色谱法、高效液相色谱法、紫外-可见分光光度法、比表面积与孔径分布测定法,以及旋光分析法的原理与仪器使用方法。

2. 为帮助学生了解和掌握计算机控制技术在化工实验和生产装备上的应用原理和 design 思想,在第一篇的第 2 章中增加了“计算机在线(或远程)控制实验技术”的章节,分别介绍了计算机在线控制技术和网络远程控制技术在实验装备和实验教学中的应用原理和实例。

3. 对第一篇第 2 章中的专业实验技术进行了补充。在 2.2 节中,增加了气液吸收相平衡数据的测定技术;在 2.3 节中,增加了气液反应动力学测定的实验技术。在 2.5 节中,增加了吸收实验技术。

4. 对第二篇“专业实验实例”中的部分实验内容进行了合并、更新和充实。如将知识点相近的原实验七和实验二十合并为新实验七“双驱动搅拌器测定气-液传质系数”;在原实验十三中补充了乙醇脱水制乙烯反应宏观动力学的测定方法;更新了原实验二十四“结晶法分离提纯对二氯苯”的内容,并将实验名称改为“降膜熔融结晶法分离提纯对二氯苯”等。

5. 在第二篇“专业实验实例”中删除和新增了部分实验项目。如在该篇第 5 章中增加了实验十五“连续循环管式反应器中返混状况的测定”;在第 6 章中删除了原实验二十六“活性炭吸附法脱除气体中的有机蒸气”,增设了“碳分子筛变压吸附制取氮气”的新技术;在第 8 章中,增设了研究开发型实验三十五“组合膜分离浓缩大豆乳清蛋白”等。

6. 加强了统稿工作,对书中的内容细节、文字表述,以及附图、附表等作了全面修订,使文字风格尽量保持一致。同时,修订了部分实验项目的名称,使之与实验内容更加吻合,

如将原实验九“固体小球对流传热系数的测定”改为“多态气固相传热系统的测定”；将原实验十四“连续流动反应器中的返混测定”改为“多釜串联反应器中返混状况的测定”等。

本书修订后，既保持了原教材先进的教学理念和模块化的实验项目结构，又紧跟学科发展，充实和引进了现代先进的实验技术和装备技术。在实验内容的设计中，更加注重知识点的综合性，强调实验过程的研究性，将创新思维和科研实践能力的培养贯穿于实验教学之中，形成了由实验方法、装备技术、分析手段、应用实践构成的完整专业实验教学体系。

参加本书修订工作的人员有乐清华（第一篇，第二篇实验三、七、十三、二十、二十四、二十六）、薛为岚（实验二十八）、刘殿华（实验二十七）、唐小琪（实验二十三）、徐菊美（实验二、三十五）、宁雷（实验十五）、雷明（实验附图、附表），全书由乐清华统稿整理。

本书修订过程中，得到了华东理工大学化工专业实验中心教师的大力支持，房鼎业教授对教材的修订给予了悉心指导，在此一并表示衷心的感谢。

修订者

于华东理工大学，上海

2007年12月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 专业实验基础 / 5

1 专业实验的组织与实施	5
1.1 实验方案的设计	5
1.2 实验方案的实施	12
1.3 实验数据的处理与评价	21
1.4 常用计算机辅助软件	31
2 专业实验的技术及设备	43
2.1 化工物性数据的测定	43
2.2 热力学数据测定技术	49
2.3 化学反应实验技术及设备	58
2.4 冷模实验技术及设备	68
2.5 分离实验技术及设备	74
2.6 超细超纯产品的制备技术	81
2.7 计算机在线或远程控制实验技术	85
3 化工实验安全知识	93
3.1 化工实验的特点	93
3.2 实验过程危害识别	95
3.3 实验过程风险分析	102
3.4 实验室危害控制措施	105

第二篇 专业实验实例 / 109

4 基础数据测试实验	109
4.1 实验一 化学吸收系统气液平衡数据的测定	109
4.2 实验二 沸石催化剂的制备与成型	113
4.3 实验三 多孔催化剂比表面积及孔径分布的测定	116
4.4 实验四 液-液传质系数的测定	121
4.5 实验五 双驱动搅拌器测定气-液传质系数	125

绪 论

一、教学目标

化学工程与工艺专业是由原化学工程、无机化工、有机化工、煤化工、石油加工、高分子化工、工业催化、电化学工程等专业归并而成的宽口径专业。作为一个过程工程特色鲜明的工科专业,培养学生解决复杂工程问题的能力、团队工作能力、终身学习能力,以及工程伦理和社会责任意识是本专业人才培养的重要目标。根据国际工程联盟-华盛顿协议(International Engineering Alliance-Washington Accord)对工程类本科毕业生提出的12条素质要求,我国制定的《2015版工程教育认证通用标准》对工科毕业生提出了12条毕业要求(Outcomes),即学生毕业时应具有下述能力。

- ① 工程知识:能够将数学、自然科学、工程基础和专业知用于解决复杂工程问题。
- ② 问题分析:能够应用数学、自然科学和工程科学的基本原理,识别、表达并通过文献研究分析复杂工程问题,以获得有效结论。
- ③ 设计/开发解决方案:能够设计针对复杂工程问题的解决方案,设计满足特定需求的系统、单元(部件)或工艺流程,并能够在设计环节中体现创新意识,考虑社会、健康、安全、法律、文化以及环境等因素。
- ④ 研究:能够基于科学原理并采用科学方法对复杂工程问题进行研究,包括设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效的结论。
- ⑤ 使用现代工具:能够针对复杂工程问题,开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具,包括对复杂工程问题的预测与模拟,并能够理解其局限性。
- ⑥ 工程与社会:能够基于工程相关背景知识进行合理分析,评价专业工程实践和复杂工程问题解决方案对社会、健康、安全、法律以及文化的影响,并理解应承担的责任。
- ⑦ 环境和可持续发展:能够理解和评价针对复杂工程问题的专业工程实践对环境、社会可持续发展的影响。
- ⑧ 职业规范:具有人文社会科学素养、社会责任感,能够在工程实践中理解并遵守工程职业道德和规范,履行责任。
- ⑨ 个人和团队:能够在多学科背景下的团队中承担个体、团队成员以及负责人的角色。
- ⑩ 沟通:能够就复杂工程问题与业界同行及社会公众进行有效沟通和交流,包括撰写报告和 Design 文稿、陈述发言、清晰表达或回应指令,并具备一定的国际视野,能够在跨文化背景下进行沟通和交流。
- ⑪ 项目管理:理解并掌握工程管理原理与经济决策方法,并能在多学科环境中应用。
- ⑫ 终身学习:具有自主学习和终身学习的意识,有不断学习和适应发展的能力。

化学工程与工艺专业实验作为一门重要的专业实践性课程,其教学目标应对上述相关毕业要求的达成提供支撑,因此,本教材对课程提出如下教学目标,即通过本课程的实验训练,使学生具备下列能力。

① 能应用工程数学方法处理实验数据,获得模型参数;采用图、表的形式规范地表达实验结果,熟练使用作图软件。(支撑毕业要求 1)

② 能根据特定的研究对象,选用合理的研究方法,设计实验方案、选配实验设备、组织并实施实验,获得有效实验数据,并将实验结果与理论或模型进行比较。(支撑毕业要求 4)

③ 能选用和熟练使用常见的传热、传质、反应、分离设备,掌握其特性;熟练操控计算机自动控制与在线检测的化工实验装备;独立操作重要的化工实验分析仪器;熟练使用多媒体教学软件。(支撑毕业要求 5)

④ 具备安全、环保、风险、责任意识;具备实验室安全知识与技能;能够规范地完成实验操作;了解工程问题的社会影响。(支撑毕业要求 8)

⑤ 能够团队合作完成实验任务;能够主动承担或积极解决实验过程中出现的意外情况,顺利完成实验;能够有条理、有逻辑地表达,完成实验报告。(支撑毕业要求 9、10)

二、教材结构

本书在编写过程中精选了华东理工大学原化学工程、无机化工、有机化工等专业多年来专业实验的教学实例,也反映了华东理工大学化学工程学科的部分科研成果。

全书分“专业实验基础”与“专业实验实例”两篇。“专业实验基础”介绍了专业实验的组织与实施、专业实验的技术及设备以及化工实验安全知识。“专业实验实例”分为基础数据测试实验、化工热力学实验、反应工程实验、化工分离技术实验、化工工艺实验和研究开发实验六个模块,共计 30 个实验项目。每个模块体现一个教学主题,在此主题下设置 4~7 个不同类型的实验项目,可供各校教师和学生灵活选择。实验实例中有些实例侧重于验证专业理论,使学生加深对理论的理解;有些实验着眼于模拟生产实际过程,以提高学生对工程和工艺问题的认识。为了将现代化教育手段引入实验教学,还介绍了计算机仿真实验。研究开发型实验,此类实验要求学生根据任务目标提出解决方案、设计实验计划、完成实验装置的搭建或实验流程的改造、正确采集和处理数据,并对实验结果进行分析判断,获取有效结论。这类实验可供优秀学生选做。

化学工程与工艺专业实验不同于理论教学,也有别于基础课程的实验。它具有更强的化学工程与工艺背景,实验流程较长,规模较大,学生需通过较为系统的实验室工作来培养自己的动手能力、分析问题的能力与创新思维,训练自己参加科学研究的能力。化学工程与工艺专业实验课程安排在基础与技术基础课程学完以后,与其他专业课程同时进行,要求学生有数理化和化工原理的理论基础,以及物理、化学、电工、仪表等基本实验技能,通过本课程加强以化学工程与工艺为背景的综合型实验训练。

三、教材特色

在选择实验实例时,充分考虑了工程学与工艺学实验的适当平衡,并特别注意实验内容的典型性、先进性和综合性。选编的实验项目既体现了化工领域的技术进展,又反映了化工过程及设备的典型工程特征与工艺特性,还设置了以技术开发为目标的大型综合型实验。

在工程学方面,分别考虑到反应工程、分离工程、传递过程等化学工程学科的需要,安排了连续反应器中的返混、气固相催化反应宏观速率测定、流化床反应器特性测定、液膜与固膜分离、二元汽液平衡数据、三元液液平衡数据测定、液液传质系数、气液传质系数测定等实验。

在工艺学方面,为使学生通过实验了解有关工艺中的单元过程。本书所安排的合成气中

一氧化碳的中温-低温串联变换、有机化工中乙苯脱氢制苯乙烯等都有强烈的工艺背景，即使是工程类的实验，也有相当数量以工艺过程为依托，如热钾碱法吸收二氧化碳的气-液传质系数测定在无机与煤化工工艺中广泛使用。

所谓“典型性”，即本书所选编的实验反映了不同的工程特征与工艺特性，分离工程领域所包含的精馏、吸收、吸附、膜分离等内容，在本书中均有代表性实验；反应工程领域中宏观速率、返混现象、气液相反应过程都设置有代表性实验，这可使学生熟悉各类典型单元过程的实验方法。

所谓“先进性”，即实验内容与实验装备的先进性。在实验内容上涉及本专业科研的新进展，如膜分离技术、反应精馏技术等，使学生了解本专业生产与科研发展的前沿。在实验装备的设计上，充分考虑了装置的自动化和多功能化，将先进的在线控制和远程控制技术引入实验流程与装备的控制，提高了实验的时效性和数据的准确性。

所谓“综合性”，即实验项目的设计注重知识的综合性，如反应精馏制备甲缩醛、苯-乙醇烷基化制乙苯催化剂的开发研究、氧化钙基二氧化碳高温吸附剂性能研究等，均综合运用了反应工程、分离工程和化学工艺的知识，强调实验设计的方法论，将培养学生的科研能力、创新能力贯穿实验全过程。

四、教材使用

本书的使用对象是化学工程与工艺专业的本科生与专科生，建议教学 50~60 学时。

本书的第一篇“专业实验基础”，课内可安排 4~6 个学时，有些内容可让学生自学。第二篇“专业实验实例”可根据各校的条件和教学计划的学时数进行选择。对“专业实验实例”的教学，建议抓好以下教学环节。

① 实验预习 学生应根据实验所列预习思考题，了解每个实验的目的、原理、流程、装备与控制，并对实验步骤、实验数据采集与处理方法有所了解。教师应检查学生预习情况，在动手实验前通过多种方式检查学生预习情况，并记录在案，作为评分依据之一。

② 实验过程 学生应根据实验方案设定的计划，安全规范地操作实验设备，精心调节实验条件，细心观察实验现象，正确记录实验数据。教师有责任指导学生正确使用实验仪器，正确采集并如实记录实验数据，养成优良的实事求是的学风。实验过程中教师应重视培养学生根据实验现象提出问题、分析问题的能力。

③ 实验报告 实验完成后，学生应认真独立撰写报告。实验报告应做到层次分明、数据完整、计算正确、结论明确、图表规范、讨论深入。教师应重视和引导学生开展实验结果讨论，强化学生创新思维的训练。

④ 考核评价 为客观评价学生的学习效果、评价教学目标的达成情况、持续改进课程质量，教师应细化课程的考核内容和标准，从实验设计、操作技能、安全规范、团队合作、数据处理和结果分析六个方面分别评价学生相关能力的达成情况。建议参考下列“课程目标-评价内容-评价依据”的对应表制定考核标准。

课程目标	考核评价内容	评价依据
1. 能应用工程数学方法处理实验数据,获得模型参数;采用图、表的形式规范地表达实验结果,熟练使用作图软件(支撑毕业要求 1)	绘图、制表、建模、拟合等工程能力	1. 数据处理方法 2. 数据处理结果
2. 能根据实验目的和特定研究对象,选用合理的研究方法、设计实验方案、选配实验设备、组织并实施实验、获得有效实验数据,并将实验结果与理论或模型进行比较(支撑毕业要求 4)	1. 设计实验能力 2. 组织实施能力 3. 数据采集能力 4. 结果分析能力	1. 实验概述 2. 方案设计 3. 原始数据 4. 结果讨论

续表

课程目标	考核评价内容	评价依据
3. 能选用和熟练使用常见的传热、传质、反应、分离设备,掌握其特性;熟练操控计算机自动控制与在线检测的化工实验装备;独立操作重要的化工实验分析仪器;熟练使用多媒体教学软件(支撑毕业要求 5)	1. 选用和搭建实验设备的能力 2. 通过计算机操控实验装备的能力 3. 仪器分析能力 4. 软件使用能力	1. 预习思考 2. 操作规范
4. 具备安全、环保、风险、责任意识;具备实验室安全知识与技能;能够规范地完成实验操作;了解三废对环境的影响(支撑毕业要求 8)	1. 了解和遵守实验室全情况 2. 实验操作规范性(三废处理、规程)	1. 安全知识测试 2. 操作规范
5. 能够与团队合作完成实验任务;能够主动承担或积极解决实验过程中出现的意外情况,顺利完成实验;能够有条理、有逻辑地表达,完成实验报告(支撑毕业要求 9、10)	1. 与团队合作能力 2. 个人独立实验能力 3. 实验报告撰写	1. 课堂讨论 2. 实验现象 3. 自我评估

一个完整的专业实验过程相当于一个小型的科学研究过程,预习大体上相当于查阅文献和开题论证,实验操作相当于实验数据的测定,实验报告就是一篇小型论文。参加一次实验,要视为参加科学研究的初步训练,学生应认真对待和参与专业实验的全过程。

第一篇

专业实验基础

1 专业实验的组织与实施

化学工程与工艺专业实验是初步了解、学习和掌握化学工程与工艺科学实验研究方法的一个重要实践性环节。专业实验不同于基础实验，其实验目的不仅仅是验证一个原理，观察一种现象或是寻求一个普遍适用的规律，而是有针对性地解决一个具有明确工业背景的化学工程和工艺问题。因此，在实验的组织 and 实施方法上与科研工作十分类似，也是从查阅文献、收集资料入手，在尽可能掌握与实验项目有关的研究方法、检测手段和基础数据的基础上，通过对项目技术路线的优选、实验方案的设计、实验设备的选配、实验流程的组织与实施来完成实验工作，并通过对实验结果的分析与评价获取最有价值的结论。

化学工程与工艺专业实验的组织与实施原则上可分为三个阶段，第一是实验方案的设计，第二是实验方案的实施，第三是实验结果的处理与评价。

1.1 实验方案的设计

实验方案是指导实验工作有序开展的一个纲要。实验方案的科学性、合理性、严密性与有效性往往直接决定实验工作的效率与成败。因此，在着手实验前，应围绕实验目的，针对研究对象的特征对实验工作的开展进行全面的规划和构想，拟定一个切实可行的实验方案。

实验方案的主要内容包括：实验技术路线与方法的选择，实验内容的确定，实验设计。

1.1.1 实验技术路线与方法的选择

化学工程与工艺实验所涉及的内容十分广泛，由于实验目的不同、研究对象的特征不同、系统的复杂程度不同，实验者要想高起点、高效率地着手实验，必须对实验技术路线与方法进行选择。

技术路线与方法的正确选择应建立在对实验项目进行系统周密的调查研究基础之上，认真总结和借鉴前人的研究成果，紧紧把握化学工程理论的指导和科学的实验方法论，以寻求最合理的技术路线、最有效的实验方法。选择和确定实验的技术路线与方法应遵循如下四个原则。

1.1.1.1 技术与经济相结合的原则

在化工过程开发的实验研究中，由于技术的积累，针对一个课题，往往会有多种可供选择的研究方案，研究者必须根据研究对象的特征，以技术和经济相结合的原则对方案进行筛

选和评价,以确定实验研究工作的最佳切入点。

以 CO_2 分离回收技术的开发研究为例。在实验工作之前,由文献查阅得知,可供参考的 CO_2 分离技术主要如下:

- ① 变压吸附 其技术特征是 CO_2 在固体吸附剂上被加压吸附,减压再生。
- ② 物理吸收 其技术特征是 CO_2 在吸收剂中被加压溶解吸收,减压再生。
- ③ 化学吸收 其技术特征是 CO_2 在吸收剂中反应吸收,加热再生。使用的吸收剂主要有两大系列,一是有机胺水溶液系列,二是碳酸钾水溶液系列。

究竟应该从哪条技术路线入手呢?这就要结合被分离对象的特征,从技术和经济两方面加以考虑。假设被分离对象是来自于石灰窑尾气中的 CO_2 ,那么,对象的特征是:气源压力为常压,组成为 CO_2 20%~35%,其余为 N_2 、 O_2 和少量硫化物。

据此特征,从经济角度分析,可见变压吸附和物理吸收的方法是不可取的,因为这两种方法都必须对气源加压才能保证 CO_2 的回收率,而气体加压所消耗的能量 60%~80% 被用于非 CO_2 气体的压缩,这部分能量随着吸收后尾气的排放而损耗,其能量损失是相当可观的。而化学吸收则无此顾忌,由于化学反应的存在,溶液的吸收能力大,平衡分压低,即使在常压下操作,也能维持足够的传质推动力,确保气体的回收。但是,选择哪一种化学吸收剂更合理,需要认真考虑。如果选用有机胺水溶液,从技术上分析,存在潜在的隐患,因为气源中含氧,有机胺长期与氧接触会氧化降解,使吸收剂性能恶化甚至失效。所以,也是不可取的。现在,唯一可以考虑的就是采用碳酸钾水溶液吸收 CO_2 的方案。虽然这个方案从技术和经济的角度考虑都可以接受,但并不理想。因为碳酸钾溶液存在着吸收速率慢,再生能耗高的问题。这个问题可以通过添加合适的催化剂来解决。因此,实验研究工作应从筛选化学添加剂、改进碳酸钾溶液的吸收和解吸性能入手,开发性能更加优良的复合吸收剂。这样,研究者既确定了合理的技术路线,又找到了实验研究的最佳切入点。

1.1.1.2 分解与简化相结合的原则

在化工过程开发中所遇到的研究对象和系统往往是十分复杂的,反应因素、设备因素和操作因素交织在一起,给实验结果的正确判断造成困难。对这种错综复杂的过程,要认识其内在的本质和规律,必须采用过程分解与系统简化相结合的实验研究方法,即在化学工程理论的指导下,将研究对象分解为不同层次,然后,在不同层次上对实验系统进行合理的简化,并借助科学的实验手段逐一开展研究。在这种实验研究方法中,过程的分解是否合理,是否真正地揭示了过程的内在关系,是研究工作成败的关键。因此,过程的分解不能仅凭经验和感觉,必须遵循化学工程理论的正确指导。

由化学反应工程的理论可知,任何一个实际的工业反应过程,其影响因素均可分解为两类,即化学因素和工程因素。化学因素体现反应本身的特性,其影响通过本征动力学规律来表达。工程因素体现实现反应的环境,即反应器的特性,其影响通过各种传递规律来表达。反应本征动力学的规律与传递规律两者是相互独立的。基于这一认识,在研究一个具体的反应过程时,应对整个过程依反应因素和工程因素进行不同层次的分解,在每个层次上抓住其关键问题,通过合理简化,开展有效的实验研究。比如,在研究固定床内的气固相反应过程时,对整个过程可进行两个层次的分解,第一层次将过程分解为反应和传递两个部分,第二层次将反应部分进一步分解成本征动力学和宏观动力学,将传递过程进一步分解成传热、传质、流体流动与流体均布等。随着过程的分解,实验工作也被确定为两大类,即热模实验和冷模实验。热模实验用于研究反应的动力学规律,冷模实验用于研究反应器内的传递规律。接下来的工作,就是调动实验设备和实验手段来简化实验对象,达到实验目的。