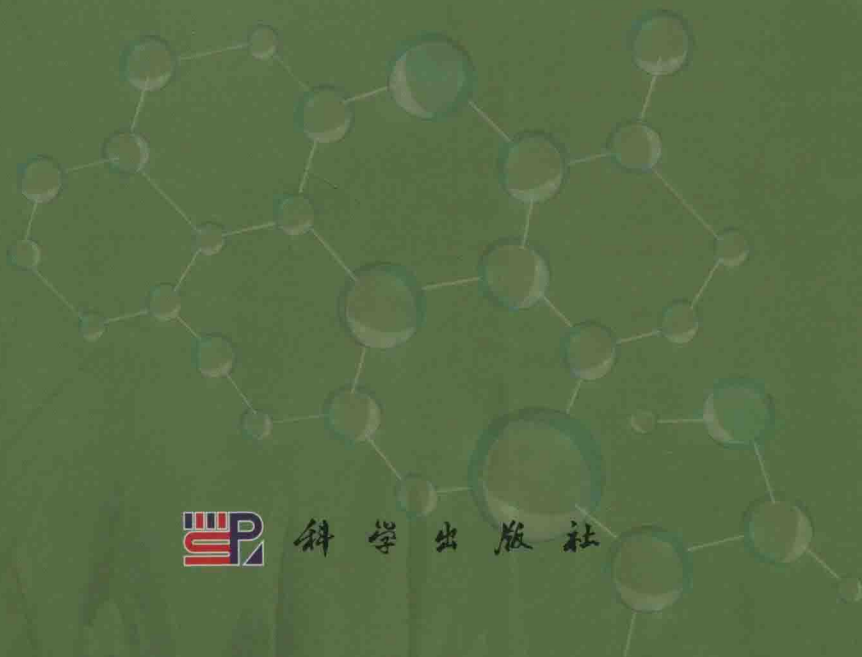




绿色化学前沿丛书

绿色介质与过程工程

张锁江 张香平 王均凤 等 著



科学出版社

绿色化学前沿丛书

绿色介质与过程工程

张锁江 张香平 王均凤 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了绿色过程工程的基本概念,概述了近年来该领域的重要进展和发展趋势,以及国内外的前沿和热点。在此基础上,以绿色介质的分子设计、构效关系及工业应用为主线,重点围绕绿色催化、绿色多相反应工程、绿色分离过程、绿色过程评价及集成方法,阐述绿色催化、传递和工程放大的科学原理,以及过程集成和设计的新方法。同时本书还重点介绍了若干典型的绿色化工新技术,如碳资源循环利用、有毒有害原料替代、生物质高效利用、等离子体等。

本书不仅适用于绿色化学及过程工程领域的科研工作者和工程技术人员参考阅读,还可作为科普读物,具有广泛的读者群体。

图书在版编目(CIP)数据

绿色介质与过程工程 / 张锁江等著. —北京: 科学出版社, 2019.10

(绿色化学前沿丛书 / 韩布兴总主编)

ISBN 978-7-03-062368-3

I. ①绿… II. ①张… III. ①化工过程—无污染技术 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 200544 号

责任编辑: 翁靖一 付林林 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 10 月第一次印刷 印张: 24 1/4

字数: 470 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

绿色化学前沿丛书

编 委 会

顾 问：何鸣元_{院士} 朱清时_{院士}

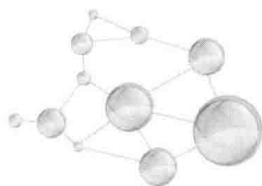
总 主 编：韩布兴_{院士}

副总主编：丁奎岭_{院士} 张锁江_{院士}

丛书编委（按姓氏汉语拼音排序）：

邓友全	丁奎岭 _{院士}	韩布兴 _{院士}	何良年
何鸣元 _{院士}	胡常伟	李小年	刘海超
刘志敏	任其龙	佘远斌	王键吉
闫立峰	张锁江 _{院士}	朱清时 _{院士}	

总 序



化学工业生产人类所需的各种能源产品、化学品和材料，为人类社会进步作出了巨大贡献。无论是现在还是将来，化学工业都具有不可替代的作用。然而，许多传统的化学工业造成严重的资源浪费和环境污染，甚至存在安全隐患。资源与环境是人类生存和发展的基础，目前资源短缺和环境问题日趋严重。如何使化学工业在创造物质财富的同时，不破坏人类赖以生存的环境，并充分节省资源和能源，实现可持续发展，是人类面临的重大挑战。

绿色化学是在保护生态环境、实现可持续发展的背景下发展起来的重要前沿领域，其核心是在生产和使用化工产品的过程中，从源头上防止污染，节约能源和资源。主体思想是采用无毒无害和可再生的原料、采用原子利用率高的反应，通过高效绿色的生产过程，制备对环境友好的产品，并且经济合理。绿色化学旨在实现原料绿色化、生产过程绿色化和产品绿色化，以提高经济效益和社会效益。它是对传统化学思维方式的更新和发展，是与生态环境协调发展、符合经济可持续发展要求的化学。绿色化学仅有二十多年的历史，其内涵、原理、内容和目标在不断充实和完善。它不仅涉及对现有化学化工过程的改进，更要求发展新原理、新理论、新方法、新工艺、新技术和新产业。绿色化学涉及化学、化工和相关产业的融合，并与生态环境、物理、材料、生物、信息等领域交叉渗透。

绿色化学是未来最重要的领域之一，是化学工业可持续发展的科学和技术基础，是提高效益、节约资源和能源、保护环境的有效途径。绿色化学的发展将带来化学及相关学科的发展和生产方式的变革。在解决经济、资源、环境三者矛盾的过程中，绿色化学具有举足轻重的地位和作用。由于来自社会需求和学科自身发展需求两方面的巨大推动力，学术界、工业界和政府部门对绿色化学都十分重视。发展绿色化学必须解决一系列重大科学和技术问题，需要不断创造和创新，这是一项长期而艰巨的任务。通过化学工作者与社会各界的共同努力，未来的化学工业一定是无污染、可持续、与生态环境协调的产业。



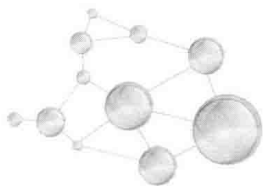
为了推动绿色化学的学科发展和优秀科研成果的总结与传播,科学出版社邀请我组织编写了“绿色化学前沿丛书”,包括《绿色化学与可持续发展》、《绿色化学基本原理》、《绿色溶剂》、《绿色催化》、《二氧化碳化学转化》、《生物质转化利用》、《绿色化学产品》、《绿色精细化工》、《绿色分离科学与技术》、《绿色介质与过程工程》十册。丛书具有综合系统性强、学术水平高、引领性强等特点,对相关领域的广大科技工作者、企业家、教师、学生、政府管理部门都有参考价值。相信本套丛书的出版对绿色化学和相关产业的发展具有积极的推动作用。

最后,衷心感谢丛书编委会成员、作者、出版社领导和编辑等对此丛书出版所作出的贡献。

中国科学院院士

2018年3月于北京

前言



随着全球性环境污染和资源严重匮乏等问题的加剧，过程工业的绿色化成为推动工业可持续发展的重要途径，其核心则是需要通过介质/材料（如催化剂、溶剂等）的原始创新、反应器创新和集成创新，形成变革性绿色技术并实现其产业化。

发展从源头消除污染的绿色技术是过程工业可持续发展的必然趋势，任何单元技术的突破对过程工业的绿色化都是不可或缺的。然而，绿色过程工程又是一个系统科学，不仅重视单个技术的创新，同时还考虑从原料替代、介质创新到单元强化及系统集成的整个链条，通过绿色材料/介质的原始创新和新工艺的集成创新，实现过程工业的绿色化。本书围绕绿色化工这一核心，结合实例，论述在绿色催化反应、分离过程、过程评价与系统集成等方面的新进展，以期为绿色过程工业理论发展和绿色化工技术创新提供重要的依据和参考。

本书的结构分成绿色过程工程的概述，以及相关的绿色催化反应、分离过程、系统集成和化工过程，其中绿色化工过程部分列出了一些实例，包括替代氢氰酸合成甲基丙烯酸甲酯、非光气法生产聚碳酸酯、碳四烷基化清洁工艺、丁烷选择氧化制顺酐、 CO_2 光电催化过程、生物质高效转化和利用技术。列出的绿色化工过程实例仅仅是一小部分，希望读者通过这些实例的介绍，理解绿色过程工程的发展理念与途径。

本书第1章由张香平撰写，第2章由徐宝华、辛加余、王红岩、董丽、苗青青、刘莹、张志博撰写，第3章由王均凤、聂毅、曾少娟、白璐、崔莉、郎海燕撰写，第4章由涂文辉、詹国雄、胡宗元、白银鸽撰写，第5章由王蕾、白银鸽、徐菲、周志茂、代飞、韩丽君、徐俊丽撰写，最后由张锁江、张香平、王均凤负责对全书统稿和定稿。

最后，诚挚感谢科学技术部国家重点研发计划项目（ CO_2 高效合成重要化学品新技术，编号：2018YFB0605800）、国家自然科学基金重大项目（离子液体功

能调控及绿色反应分离新过程研究，编号：21890760）和中国科学院洁净能源创新研究院合作基金资助项目（离子液体中 CO_2 温和电催化转化关键技术研究，编号 DNL180406）对本书出版的支持！

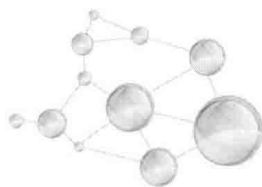
限于作者的时间和精力，书中难免存在疏漏或不足之处，敬请广大读者批评指正。

张锁江

2019年7月20日

于北京

目 录



总序

前言

第1章 绪论	1
1.1 绿色过程工程概述	1
1.2 绿色过程工程发展的现状和趋势	2
1.2.1 原料替代	3
1.2.2 工艺创新	4
1.2.3 设备强化	5
1.2.4 绿色过程系统集成	7
1.3 绿色过程工程在国民经济中的重要地位	8
1.4 绿色过程工程的国际前沿和热点	9
1.4.1 从分子设计到化工产品制造的绿色新过程	9
1.4.2 基于原子经济性反应的绿色化学新途径	9
1.4.3 纳微尺度的“三传一反”规律与过程强化及设备	10
1.4.4 绿色过程系统集成	10
参考文献	10
第2章 绿色催化反应体系	12
2.1 绿色催化反应	12
2.1.1 绿色催化加氢反应体系	12
2.1.2 绿色催化氧化反应体系	20
2.1.3 绿色催化烷基化反应体系	30
2.1.4 绿色催化 CO ₂ 与环氧化物的环加成反应体系	40
2.2 反应过程强化	49
2.2.1 光催化反应过程	49
2.2.2 微反应过程	63
2.2.3 酶催化反应过程	84
参考文献	89

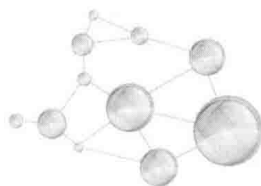


第3章 绿色分离过程	111
3.1 气体吸收	111
3.1.1 引言	111
3.1.2 SO ₂ 气体分离	112
3.1.3 CO ₂ 气体分离	120
3.1.4 H ₂ S 气体分离	127
3.1.5 NH ₃ 净化分离	133
3.1.6 其他气体分离	136
3.1.7 总结与展望	139
3.2 萃取分离	140
3.2.1 引言	140
3.2.2 离子液体液-液萃取技术	141
3.2.3 离子液体双水相萃取技术	143
3.2.4 超临界流体萃取技术	146
3.2.5 新型物理场强化萃取技术	148
3.2.6 总结与展望	151
3.3 膜分离	152
3.3.1 引言	152
3.3.2 渗透汽化膜分离技术	152
3.3.3 膜蒸馏分离技术	160
3.3.4 气体膜分离技术	166
3.4 溶解法分离	172
3.4.1 引言	172
3.4.2 离子液体溶解纤维素	174
3.4.3 离子液体溶解角蛋白	177
3.4.4 离子液体溶解壳聚糖	180
3.4.5 总结与展望	182
3.5 超重力分离	183
3.5.1 引言	183
3.5.2 超重力分离技术的原理	183
3.5.3 超重力分离技术的应用	183
参考文献	187
第4章 绿色过程系统集成	208
4.1 绿色度评价与分析	208

4.1.1	引言	208
4.1.2	绿色度的范畴与概念	209
4.1.3	绿色度评价体系解析	209
4.1.4	几种典型的绿色度评价案例分析	218
4.2	绿色化工过程的能质效率	230
4.2.1	有效能的概念	230
4.2.2	有效能的损失及其利用效率	236
4.2.3	基于有效能分析的能质效率评价方法	239
4.2.4	几种典型的有效能分析应用案例	240
4.3	原子经济性及过程的物质效率	247
4.3.1	化学反应的原子经济性	247
4.3.2	基于原子经济性的化学反应设计	248
4.3.3	基于原子经济性的物质流优化	253
4.4	全生命周期评价分析	254
4.4.1	全生命周期分析的概念	254
4.4.2	全生命周期分析的目的和范围	256
4.4.3	全生命周期分析的方法解析	258
4.4.4	几种典型化工产品的全生命周期评价案例	261
	参考文献	269
第 5 章	绿色化工过程	273
5.1	替代氢氰酸合成甲基丙烯酸甲酯	273
5.1.1	甲基丙烯酸甲酯简介	273
5.1.2	以异丁烯为原料的 MMA 清洁工艺	275
5.1.3	以乙烯为原料的 MMA 清洁工艺	279
5.1.4	其他工艺	281
5.1.5	总结与展望	284
5.2	非光气法生产聚碳酸酯	285
5.2.1	聚碳酸酯简介	285
5.2.2	聚碳酸酯生产技术现状	286
5.2.3	非光气熔融缩聚制备聚碳酸酯工艺	288
5.2.4	总结与展望	295
5.3	碳四烷基化清洁工艺	295
5.3.1	碳四烷基化工艺简介	295
5.3.2	碳四烷基化技术现状及发展趋势	296

5.3.3 离子液体烷基化清洁工艺	302
5.3.4 固体酸烷基化清洁工艺	307
5.3.5 总结与展望	308
5.4 丁烷选择氧化制顺酐	309
5.4.1 顺酐简介	309
5.4.2 顺酐生产技术	310
5.4.3 正丁烷氧化法制顺酐主要工艺技术	314
5.4.4 总结与展望	318
5.5 CO ₂ 光电催化过程	319
5.5.1 CO ₂ 光电催化过程简介	319
5.5.2 光电催化还原 CO ₂ 反应的研究现状	319
5.5.3 CO ₂ 光电催化反应体系	320
5.5.4 总结与展望	339
5.6 生物质高效转化和利用技术	340
5.6.1 生物质简介	340
5.6.2 生物质利用现状	341
5.6.3 典型的生物质高效转化和利用新工艺	343
5.6.4 总结与展望	351
参考文献	351
附录	372

第 1 章 绪 论



1.1 绿色过程工程概述

绿色过程工程是在综合考虑环境因素与社会可持续发展的前提下,通过介质/材料(如催化剂、溶剂等)的原始创新、反应器结构创新和新工艺的集成创新,形成变革性绿色原创技术并实现产业化。20 世纪 90 年代初,美国学者提出了绿色化学的基本原则,其中涉及化学过程的原料、合成路线、催化剂、溶剂、工艺、成本、产品等重要问题,迄今已被化学和化工界所普遍接受^[1]。之后,将绿色化学十二条原则重点阐述的绿色化学原理与化学工程相结合,形成了绿色化工学科,其显著特征是面向工业应用,追求高转化率、高选择性和高能源利用效率,在保证原料、介质和产品的无毒或低毒,以及可观的经济效益的前提下,实现废弃物的排放和副产物的产率最小,追求的总体目标是经济效益和环境效益的协调最优^[2]。

进入 21 世纪以来,绿色过程工程成为化工领域的重要研究方向和热点。1996 年,美国设立了美国总统绿色化学挑战奖;2004 年,欧盟创建了可持续化学欧洲技术平台(SusChem, 2004),目标是为未来的可持续化工和生物技术提供解决方案,日本也提出了绿色可持续化学的路线图(2008~2030 年)。1997 年,我国国家自然科学基金委员会和中国石油化工总公司联合资助的“九五”重大基础研究项目“环境友好石油化工催化化学与化学反应工程”正式启动,该项目面向我国石油化工的重大需求,重点开展无毒无害原料、催化剂和“原子经济”反应等新技术的基础研究,为解决现有生产工艺技术的经济和环境问题提供了科学支撑。科学技术部也围绕绿色过程设立了多个重大研发计划,如“973”计划“石油炼制和基本有机化学品合成的绿色化学”“大规模化工冶金过程的节能减排的基础”“工业生物过程高效转化与系统集成的科学基础研究”等。2016 年,《国家自然科学基金“十三五”发展规划》中明确将“可持续的绿色化工过程”列为化学科学部优先发展领域,该方向也获得多项自然科学基金项目的支持。

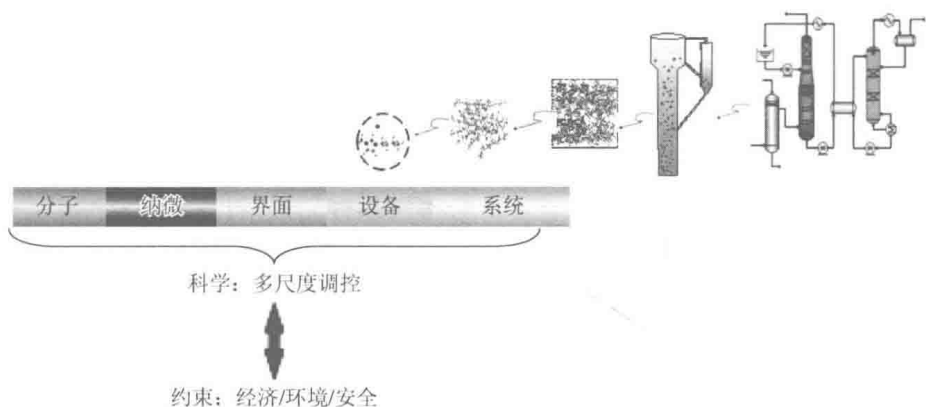


从学科发展方向来看,绿色过程工程已成为科学研究和学科布局的新热点,许多院校纷纷成立了与绿色化学化工相关的研究机构,如中国科学技术大学绿色科技研究与开发中心、上海市绿色化学与化工过程绿色化重点实验室、四川大学绿色化学与技术研究中心、中国科学院绿色过程与工程重点实验室、离子液体清洁过程北京市重点实验室等,国内外一些大学已将绿色化工列为研究生课程。在应用方面,工业界如中石油、中石化等制定和实施了明确的清洁生产机制和具体措施。对绿色化学与化工的重视也体现在新的学术期刊纷纷涌现,如 *Green Chemistry* 是较早的代表性期刊,其于 1999 年创刊后迅速成为绿色化学与化工的主流期刊。创刊于 2008 年的 *Energ & Environmental Science* 期刊,2018 年其影响因子已升至 30.0。2013 年,美国得克萨斯大学奥斯汀分校化工系的 David T. Allen 教授作为主编创办了 *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 期刊,与前述期刊相比,该期刊具有明确的“工程”特色,注重报道绿色化学和工程的国际最新研究成果。2016 年,英国皇家化学学会(Royal Society of Chemistry, RSC)创办的期刊 *Molecular Systems Design & Engineering*,则重点报道基于分子层次认识的过程系统设计,力争缩小科学和工程的差距。2015 年,中国科学院过程工程研究所创办了 *Green Energy & Environment* 期刊,旨在从能源、资源及环境等诸多领域报道基础及工程研究的最新成果。

纵观十几年的研究,绿色过程工程一个重要的特点就是二维的研究模式,维度一是从分子到系统的思路,不仅要考虑原料、溶剂和催化剂及单元设备的创新,还需要从系统的角度,通过从分子→纳微→界面→设备→系统的多尺度调控,将理论方法用于实际技术研发链,即实验室研究、工艺设计、设备优化和工程放大大过程;维度二是从传统的单一的经济目标向经济、环境和安全等的多目标的模式转变,综合两个维度的研究成果为绿色技术的创新和产业化提供重要科学基础。

1.2 绿色过程工程发展的现状和趋势

绿色过程工程的兴起主要源于化工发展所带来的严重的环境和社会问题。随着不断加剧的全球性环境生态破坏和化石资源的严重匮乏,以及工业生产活动导致的温室效应对人类生存环境的危害,化工过程的绿色化成为解决这些难题的重要途径之一,不仅要考虑原料、溶剂和催化剂及单元设备的创新和高效,还需要从系统的角度,通过从分子→纳微→界面→设备→系统的多尺度调控,实现经济、环境和安全的多目标最优^[3,4]。图 1.1 简要说明了绿色过程工程的思路,即首先要考虑环境、健康和安全对新过程或产品的影响,从而在原料筛选、溶剂/催化剂开发、过程优化设计、系统运行等全过程中体现绿色化^[5]。

图 1.1 绿色过程工程的研究思路^[5]

以大宗化学品生产这一典型的过程工业为例说明。我国目前已成为世界第一大化学品生产国，其产值占到了我国 GDP 的 1/6 左右，但我国还不是化工强国，很多工艺技术水平和产品落后于国外。我国目前大宗化学品生产技术主要是从国外引进，但通常是国外淘汰技术，生产过程排放大量废物，有些还使用了有毒有害的原料、催化剂或溶剂等。一些相对先进的绿色低碳化工生产技术或者转让费用极高，或者直接封锁，这使得我国化学品生产技术的升级换代面临巨大的挑战。因此，实现我国大宗化学品产业的跨越式发展，从化工生产大国向强国迈进，就必须重视绿色过程工程的基础研发，开发新一代技术，支撑工业过程的可持续发展。以下结合典型实例或过程，围绕绿色过程工业在原料替代、工艺创新、设备强化和系统集成四个方面的发展趋势予以简述和分析。

1.2.1 原料替代

从传统的不可再生的化石资源向可再生能源过渡，如生物质，是人类社会发展的必然趋势，同时有毒有害原料，如氢氰酸、光气等，也将被更加绿色的原料所替代，从而实现从源头消除污染的目标。石油、煤炭、天然气不仅提供了基本能源，还提供了 99% 的有机工业原料，用于生产大宗化学品。随着化石资源的枯竭和环境问题的日益突出，以可再生的生物质资源替代不可再生的化石资源制备大宗化学品成为未来发展的重要趋势，生物质既是可再生能源，又可用作生产化工产品的原料，且其主要成分为碳水化合物，在生产及使用过程中与环境友好。生物质汽化可制得富含氢气和一氧化碳的合成气，由合成气可生产系列化学品，如甲醇、烯烃等。生物质还可经预处理，通过微生物或酶将多糖转化为单糖，再经化工或生物技术转化成化学品。目前世界上 100% 的 1,3-丙二醇和 99% 的乳酸的生产用原料来自生物质。预计到 2020 年，全球可再生化学品市场有望增长至



120 亿美元^[6]。因此,用生物质原料生产生物基化学品是减轻对石油依赖和对气候影响的重要途径。

另外,在溶剂和材料绿色化方面,国外已开发出了采用无毒或低毒化学品替代剧毒的光气或氢氰酸生产许多化工产品的技术。如以异丁烯为原料生产甲基丙烯酸甲酯(MMA)的C4工艺,该工艺的原子利用率可以达到74%,是一条工业前景良好的绿色工艺技术路线,可以替代ICI公司于1937年开发的用丙酮和剧毒氢氰酸作为原料生产MMA的工艺。意大利埃尼公司开发的以CO、CH₃OH和O₂为原料制备碳酸二甲酯(DMC)的绿色工艺,可替代以光气和CH₃OH为原料生产DMC的工艺。

1.2.2 工艺创新

工艺创新包括介质、材料、反应器和工艺路线的创新,目标是开发高原子经济性反应和低能耗的高效分离过程。理想的原子经济反应是原料分子中的原子百分之百地转化成产品,资源利用率高,且不产生副产品和废物,如乙烯、丙烯、长链 α -烯烃与苯合成乙苯、异丙苯、长链烷基苯,杜邦公司以丁二烯和氢氰酸合成了己二腈、用甲醇羰基化制乙酸。但目前仍有很多大宗化学品生产过程中使用了有毒有害的溶剂或催化剂,生产过程原子利用率较低。以环己酮为例,生产每吨环己酮产生5000m³废气、50t废水和0.5t废渣,生产过程的碳原子利用率不足80%,因此亟待聚焦绿色化升级换代,通过开发新型催化材料及工艺,开发绿色新过程。

在化工过程中,约90%的反应及分离过程需要介质才能完成,因而介质创新是实现化工过程温和高效转化的重要途径。新型介质和材料的出现,常会带来重大的技术变革,同时也会对传统的理论方法、研究手段和计算模型提出挑战。一些典型化学品,如对苯二甲酸、环己酮、己内酰胺、环氧丙烷的生产过程仍然排放大量废物,有些还使用了有毒有害催化剂和溶剂等,对这些过程进行绿色化升级换代是迫切需求。与水、有机溶剂等传统溶剂相比,离子液体介质具有液态温度范围宽、不易挥发、溶解能力强、电化学窗口宽等一系列优点。更重要的是,离子液体的可设计性使其可通过修饰或调整正负离子的结构及种类来调控其物理化学性质。目前离子液体作为溶剂、催化剂、电解液等,已在石油化工、煤化工、合成材料、环境控制、电化学等方面展现了广阔的应用前景。

通过工艺路线创新,也能实现高原子经济性反应和低能耗高效分离的目标。例如,传统的主要以氯气为原料采用两步反应的氯醇法生产环氧丙烷的工艺,不仅使用了可能带来危险的氯气,而且产生了大量污染环境的含氯化钙废水,因此开发催化氧化丙烯制环氧丙烷的原子经济反应新工艺是发展趋势。对于已在工业

上应用的原子经济反应,还需要从环境保护和技术经济等方面继续研究和改进,以获得更高的反应效率。1997年,BCH公司开发了一种合成布洛芬的新工艺,传统生产工艺包括6步化学计量反应,其原子利用率低于40%,新工艺则采用3步催化反应,原子有效利用率达80%。1998年,旭化成株式会社开发了以异丁烯为原料直接氧化生产MMA的两步法,与之前使用的三步法相比,其具有生产路线短、投资低、安全稳定等优势,具有更好的经济性。目前两步法已有多套生产装置,主要分布在日本、中国、新加坡、泰国、韩国等亚洲国家,其产能约占MMA生产产能的30%。传统的乙二醇(EG)生产采用环氧乙烷(EO)直接水合工艺,存在水比高、选择性差、反应条件苛刻、能耗高等缺点,代表性的改进技术有催化水合和催化水解等技术。相对于直接水合法,催化水解法是在催化剂存在下进行反应的,是以EO和CO₂为原料,先经羰基化反应生成碳酸乙烯酯(EC),而后EC水解生产EG。催化水解法与直接水合法相比,具有反应条件温和、水比低、EG选择性高、能耗低等优势,在该工艺中,EO与CO₂反应生成EC的羰基化反应是关键。

除了催化剂/介质、合成路线的创新,工艺创新还包括反应器的创新。反应器作为物质转化的装置,是实际工艺过程重要的组成。反应器创新是以提高效率、减少污染和降低成本为目标,依据反应原理和产品的不同设计特定物理结构的反应器,而设计反应器的核心是深入认识反应器中的传递-流动耦合机制及放大规律,特别是需要从分子和纳微尺度获得其本质的规律,主要手段则是采用模拟计算和实验表征相结合的方法,而如何研发先进的表征测量传递-流动规律的科学仪器和实验方法,是当前该领域的挑战。1992年诺贝尔化学奖获得者R. R. Ernst曾指出:“现代科学的进步越来越依靠尖端仪器的发展。”人类在科学技术上的重大成就和科学研究新领域的开辟,往往是以实验仪器和技术方法的突破为先导。

总之,包括介质、材料、反应器和工艺路线的创新,是绿色过程工程的关键,也是开发绿色新技术的基础。

1.2.3 设备强化

化工设备的功能是为物质转化的“三传一反”提供场所,通过设备的强化和创新,如设计和使用微通道、超重力、旋转床、物理场强化等反应器,可达到强化传热传质的目标,实现反应过程的高转化率、选择性及高分离效率。外场强化反应器的开发和应用不仅解决了工程难题,同时也为化工学科的发展和知识更新提供了重要的支撑。

化学工业中涉及气-液-固多相复杂体系内的反应过程,通常受分子混合、传递或化学平衡的限制,对反应速率与传递过程的匹配性有严格的要求。由于对反