

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

化工过程强化

国家自然科学基金委员会
中国科学院

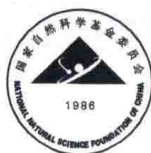


科学出版社

非外借



国家科学思想库



中国学科发展战略

化工过程强化

国家自然科学基金委员会
中国科学院

科学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

化工过程强化 / 国家自然科学基金委员会, 中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2018.1

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-054406-3

I. ①化… II. ①国… ②中… III. ①化工过程—学科发展—发展战略—中国 IV. ①TQ02-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第218364号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 朱萍萍 宁 倩 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 张欣秀 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

联系电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018年1月第一次印刷 印张: 30 5/8

字数: 550 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国学科发展战略

联合领导小组

组 长：陈宜瑜 张 涛
副 组 长：秦大河 姚建年
成 员：王恩哥 朱道本 傅伯杰 李树深 杨 卫
武维华 曹效业 李 婷 苏荣辉 高瑞平
王常锐 韩 宇 郑永和 孟庆国 陈拥军
杜生明 柴育成 黎 明 秦玉文 李一军
董尔丹

联合工作组

组 长：李 婷 郑永和
成 员：龚 旭 孟庆峰 吴善超 李铭禄 董 超
孙 粒 苏荣辉 王振宇 钱莹洁 薛 淮
冯 霞 赵剑峰

中国学科发展战略·化工过程强化

联合领导小组

张 涛 段 雪 何鸣元 田 禾 张锁江
陈建峰 孙宏伟 张国俊

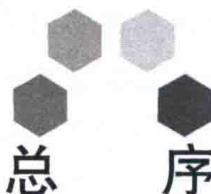
联合工作组

徐春明 高金森 陈光文 骆广生 贺高红
刘植昌 刘卫锋

项目组

(以姓氏汉语拼音为序)

鲍晓军	程 易	初广文	董正亚	冯连芳
龚俊波	巩金龙	郭美锦	纪红兵	姜晓滨
姜忠义	李 春	李 军	李 韡	李伯耿
李殿卿	李鑫钢	梁向峰	刘昌俊	刘会洲
卢春喜	钱 宇	任其龙	苏海佳	孙公权
汪华林	魏子栋	吴雪梅	邢卫红	杨 超
应汉杰	袁方利	张述伟	张香平	张永春
赵锁奇	朱庆山	庄英萍	宗保宁	邹海魁



白春礼 杨 卫

17 世纪的科学革命使科学从普适的自然哲学走向分科深入，如今已发展成为一幅由众多彼此独立又相互关联的学科汇就的壮丽画卷。在人类不断深化对自然认识的过程中，学科不仅仅是现代社会中科学知识的组成单元，同时也逐渐成为人类认知活动的组织分工，决定了知识生产的社会形态特征，推动和促进了科学技术和各种学术形态的蓬勃发展。从历史上看，学科的发展体现了知识生产及其传播、传承的过程，学科之间的相互交叉、融合与分化成为科学发展的重要特征。只有了解各学科演变的基本规律，完善学科布局，促进学科协调发展，才能推进科学的整体发展，形成促进前沿科学突破的科研布局和创新环境。

我国引入近代科学后几经曲折，及至上世纪初开始逐步同西方科学接轨，建立了以学科教育与学科科研互为支撑的学科体系。新中国建立后，逐步形成完整的学科体系，为国家科学技术进步和经济社会发展提供了大量优秀人才，部分学科已进入世界前列，有的学科取得了令世界瞩目的突出成就。当前，我国正处在从科学大国向科学强国转变的关键时期，经济发展新常态下要求科学技术为国家经济增长提供更强劲的动力，创新成为引领我国经济发展的新引擎。与此同时，改革开放 30 多年来，特别是 21 世纪以来，我国迅猛发展的科学事业蓄积了巨大的内能，不仅重大创新成果源源不断产生，而且一些学科正在孕育新的生长点，有可能引领世界学科发展的新方向。因此，开展学科发展战略研究是提高我国自主创新能力、实现我国科学由“跟跑者”向“并行者”和“领跑者”转变的

一项基础工程，对于更好把握世界科技创新发展趋势，发挥科技创新在全面创新中的引领作用，具有重要的现实意义。

学科发展战略研究的核心是结合科学技术和经济社会的发展需求，在分析科学前沿发展趋势的基础上，寻找新的学科生长点和方向。在这个过程中，战略科学家的前瞻引领作用十分重要。科学史上这样的例子比比皆是。在 1900 年 8 月巴黎国际数学家代表大会上，德国数学家戴维·希尔伯特发表了题为“数学问题”的著名讲演，他根据过去特别是 19 世纪数学研究的成果和发展趋势，提出了 23 个最重要的数学问题，即“希尔伯特问题”。这些“问题”后来成为许多数学家力图攻克的难关，对现代数学的研究和发展产生了深刻的影响。1959 年 12 月，美国物理学家、诺贝尔奖得主理查德·费曼在加利福尼亚理工学院举行的美国物理学会年会上发表了题为“物质底层大有空间——一张进入物理新领域的请柬”的经典讲话，对后来出现的纳米技术作出了天才的预见。

学科生长点并不完全等同于科学前沿，其产生和形成不仅取决于科学前沿的成果，还决定于社会生产和科学发展的需要。1841 年，佩利戈特用钾还原四氯化铀，成功地获得了金属铀，可在很长一段时间并未能发展成为学科生长点。直到 1939 年，哈恩和斯特拉斯曼发现了铀的核裂变现象后，人们认识到它有可能成为巨大的能源，这才形成了以铀为主要对象的核燃料科学的学科生长点。而基本粒子物理学作为一门理论性很强的学科，它的新生长点之所以能不断形成，不仅在于它有揭示物质的深层结构秘密的作用，而且在于其成果有助于认识宇宙的起源和演化。上述事实说明，科学在从理论到应用又从应用到理论的转化过程中，会有新的学科生长点不断地产生和形成。

不同学科交叉集成，特别是理论研究与实验科学相结合，往往也是新的学科生长点的重要来源。新的实验方法和实验手段的发明，大科学装置的建立，如离子加速器、中子反应堆、核磁共振仪等技术方法，都促进了相对独立的新学科的形成。自 20 世纪 80 年代以来，具有费曼 1959 年所预见的性能、微观表征和操纵技术的

仪器——扫描隧道显微镜和原子力显微镜终于相继问世，为纳米结构的测量和操纵提供了“眼睛”和“手指”，使得人类能更进一步认识纳米世界，极大地推动了纳米技术的发展。

作为国家科学思想库，中国科学院（以下简称中科院）学部的基本职责和优势是为国家科学选择和优化布局重大科学技术发展方向提供科学依据、发挥学术引领作用，国家自然科学基金委员会（以下简称基金委）则承担着协调学科发展、夯实学科基础、促进学科交叉、加强学科建设的重大责任。继基金委和中科院于2012年成功地联合发布“未来10年中国学科发展战略研究”报告之后，双方签署了共同开展学科发展战略研究的长期合作协议，通过联合开展学科发展战略研究的长效机制，共建共享国家科学思想库的研究咨询能力，切实担当起服务国家科学领域决策咨询的核心作用。

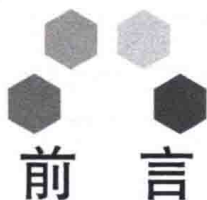
基金委和中科院共同组织的学科发展战略研究既分析相关学科领域的发展趋势与应用前景，又提出与学科发展相关的人才队伍布局、环境条件建设、资助机制创新等方面的政策建议，还针对某一类学科发展所面临的共性政策问题，开展专题学科战略与政策研究。自2012年开始，平均每年部署10项左右学科发展战略研究项目，其中既有传统学科中的新增长点或交叉学科，如物理学中的软凝聚态物理、化学中的能源化学、生物学中生命组学等，也有面向具有重大应用背景的新兴战略研究领域，如再生医学、冰冻圈科学、高功率、高光束质量半导体激光发展战略研究等，还有以具体学科为例开展的关于依托重大科学设施与平台发展的学科政策研究。

学科发展战略研究工作沿袭了由中科院院士牵头的方式，并凝聚相关领域专家学者共同开展研究。他们秉承“知行合一”的理念，将深刻的洞察力和严谨的工作作风结合起来，潜心研究，求真唯实，“知之真切笃实处即是行，行之明觉精察处即是知”。他们精益求精，“止于至善”，“皆当至于至善之地而不迁”，力求尽善尽美，以获取最大的集体智慧。他们在中国基础研究从与发达国家“总量并行”到“贡献并行”再到“源头并行”的升级发展过程中，

脚踏实地，拾级而上，纵观全局，极目迥望。他们站在巨人肩上，立于科学前沿，为中国乃至世界的学科发展指出可能的生长点和新方向。

各学科发展战略研究组从学科的科学意义与战略价值、发展规律和研究特点、发展现状与发展态势、未来5~10年学科发展的关键科学问题、发展思路、发展目标和重要研究方向、学科发展的有效资助机制与政策建议等方面进行分析阐述。既强调学科生长点的科学意义，也考虑其重要的社会价值；既着眼于学科生长点的前沿性，也兼顾其可能利用的资源条件；既立足于国内的现状，又注重基础研究的国际化趋势；既肯定已取得的成绩，又不回避发展中面临的困难和问题。主要研究成果以“国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略”丛书的形式，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。

基金委和中科院在学科发展战略研究方面的合作是一项长期的任务。在报告付梓之际，我们衷心地感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家，还要感谢在咨询、审读和支撑方面做出贡献的同志，也要感谢科学出版社在编辑出版工作中付出的辛勤劳动，更要感谢基金委和中科院学科发展战略研究联合工作组各位成员的辛勤工作。我们诚挚希望更多的院士、专家能够加入到学科发展战略研究的行列中来，搭建我国科技规划和科技政策咨询平台，为推动促进我国学科均衡、协调、可持续发展发挥更大的积极作用。



前言

化学工程作为“揭示物质转化过程中质量传递、能量传递、动量传递以及分离和反应之间的内在关系，创建高效、清洁、节能、安全、经济的物质转化工艺和相关系统”的一门工程科学与技术学科，在一个多世纪的发展历程中，为人类社会的经济发展做出了巨大贡献！但随着“资源、环境、安全”等共性问题逐渐被社会普遍关注，以化学工程学科为主要支撑的化学与过程工业被贴上了“污染重”、“能耗高”、“危险大”等标签。因此，无论是节能减排，还是环境安全都急需化学工程学科新理论、新方法、新工艺、新装备、新技术的出现，变传统化工为“绿色”化工，在新的经济社会发展阶段，继续做出不可替代的重大贡献！

化工过程强化就是提高单位体积的反应、传热和传质的速率，最大限度发挥化学工艺系统（催化剂、工艺、装备等）全部潜能，实现化工过程的“更小、更快速、更安全、更便宜”，从而适应资源（原料）多样化、产品高值化、能量节约化、环境绿色化、过程安全化。因此，深入研究化工过程强化的科学内涵、系统分析化工过程强化的国内外研究现状以及强化途径和发展趋势、明确化工过程强化学科面临的主要问题与发展方向，不仅对化学工程学科的自身发展意义重大，而且对破解目前化学与过程工业发展面临的具体难题具有重要意义。

正是在这一重大需求背景下，国家自然科学基金委员会与中国科学院于2014年7月联合立项资助了“化工过程强化学科发展战略研究”项目。项目工作组在联合领导小组（张涛、段雪、何鸣元、田禾、张锁江、陈建峰院士）以及国家自然科学基金委员会化

学科学部五处孙宏伟、张国俊处长的直接领导下,先后于2014年9月18日、2014年11月26日、2015年10月28日、2016年2月26日、2016年9月10日分别在中国石油大学(北京)(3次)、中国科学院大连化学物理研究所、华南理工大学、天津大学召开了6次化工过程强化学科发展战略研究研讨会。明确了化工过程强化学科发展战略研究策略及工作进程;多次讨论并最终确定了化工过程强化学科的重点领域与方向;归纳总结出化工过程强化的四个重要途径和方法;提出了化工过程强化学科发展的具体建议与措施。研究的核心部分内容以“中英文摘要”形式集中呈现给广大读者,方便读者快速地从宏观层面对化工过程强化学科领域有一个相对全面的了解,对其总体把握学科发展全局方向有所裨益。

此外,本书还进一步提供了化工过程强化的四个重点领域方向——新材料(介质)强化、外场强化、核心反应器(装备)强化和过程耦合强化划分的具体过程强化的科学问题、强化方法与原理、强化应用实例等相关最新进展情况,以便从事具体相关研究和工作的读者更加深入系统了解化工过程强化的详细内容。

尽管尽量全面征求并尽可能反映化工学科主要研究专家学者的相关意见和思想,但由于学识及精力等限制,尚有不全面或不准确之处,望广大读者见谅。

感谢国家自然科学基金委员会给予的支持!感谢项目联合领导小组的具体指导和项目组全体成员的辛勤付出!感谢所有参与章节编写及会议研讨的专家学者给予的意见与建议!感谢科学出版社的帮助与支持!

张 涛

2017年8月



摘 要

本书围绕化工过程强化学科领域，阐述了化工过程强化的学科内涵及其重要性；梳理了化工过程强化的国内外研究现状、过程强化主要方法以及发展趋势；明确了化工过程强化面临的主要问题与挑战，并提出了今后发展的建议与措施。

一、化工过程强化的内涵与重要性

（一）化学工程学科的重要作用与新挑战

化学工程学科是运用自然或实验科学（如化学、物理）、生命科学（如生物学、生物化学）以及数学、经济学知识，实现化学品、原材料、能量的生产、转化、输运和合理使用的一门工程科学和技术学科。其核心内涵是揭示物质转化过程中质量传递、能量传递、动量传递以及分离和反应之间的内在关系，创建高效、清洁、节能、安全、经济的物质转化工艺和相关系统。其主要研究对象包括：能源和资源开发及高效利用、生物和制药过程、新材料开发和应用、物质合成与转化过程对环境影响以及减轻和消除环境污染的化学工程与技术等。

化学工程发展至今，对人类社会的工业发展做出了重大贡献。其服务领域也从传统的化学工业扩展到能源、材料、冶金、环境、生物、医药、食品等诸多进行物质与能量转化的过程工业，并不断与其他学科进行交叉融合，在满足国民经济发展的重大需求方面，所占据的地位和担当的角色举足轻重。目前，全国石油和化工行业有规模以上企业 28 652 家，全行业从业人数 600 余万人。2014 年我国石油和化学工业主营业务收入达 14.06 万亿元，其中，化学工业

主营业务收入达 8.76 万亿元，超过美国（美国化学品主营业务收入折合人民币 4.94 万亿元），居世界第一。目前，我国石油化工行业中有 20 多种产品的产量已经排名世界第一，如合成氨、化肥、纯碱、烧碱、电池硫酸、磷肥、农药和合成纤维等。

化学工业是以石油、煤炭、天然气、天然矿物、生物质等为原料生产农用化学品、有机和无机基本原料、合成材料、精细与专用化学品等多类产品的重要工业基础和支柱产业。化学工业的发展体现着一个国家的经济实力和整体技术水平。从国际上看，凡是化学工业实力强、技术水平高的国家基本是经济发达的国家，如美国、德国、日本、法国、英国、韩国；从国内来看，凡是化学工业强的地区大多是经济强省，如江苏、广东、山东、上海等。化工产品广泛用于工业、农业、人民生活等各个领域。它为农业生产提供化肥、农药和塑料薄膜等农用化学品；为能源工业（电力、交通、冶金和居民生活）提供天然气、液化气等燃料；为机械工业（航天、汽车、船舶、机械等）提供合成材料、涂料和胶黏剂等配套产品；为建筑业提供保温材料、建筑涂料、防火材料等建筑原材料；为军事工业提供军用化工产品；为人民生活提供各种相关的日用化学品等。据统计化肥对农业的增收大于 30%，化工材料特别是高性能材料为国家重大工程（大飞机、高速列车、嫦娥探月）以及电子工业、汽车工业、建筑领域等提供了不可替代的配套材料。化学工业还与七大战略新兴产业关系密切，节能环保、新材料、生物、新能源与化学工业也直接相关，新一代信息技术、高端装备制造、新能源汽车都离不开化学工业为其提供高性能材料。

化学工业在世界经济发展中也发挥着重要作用。例如，美国的化学工业是最大贸易盈余行业之一，是美国第三大制造业，其营业额占美国制造业营业额的 10% 左右，并成为全球最大的制造业部门之一。德国的化学工业是第四大工业部门，其营业额占整个加工工业的 10%，仅次于汽车制造业（20%）、机械制造业（13%）和电子工业（12%）。在世界贸易总额中，化工贸易是仅次于汽车贸易的第二大贸易领域。从一些发达国家的国际贸易情况看，化学工业的国际竞争力更强，占举足轻重的地位。例如，美国的化学品贸易

额在国家整体出口中仍维持领先地位，其出口额仅排在机械类产品之后，位于第2位；加拿大化学工业销售额中的3/4是靠出口获得；自2006年以来，德国化学产品出口额已经高于国内营业额；荷兰化工产品出口额占出口总额的20%，化工行业研发投入占研发总投入的25%；法国化学品（包括医药产品）出口额占化学工业销售额的60%。

经过多年快速发展，当前我国经济已经进入发展的新常态。经济增速换挡、发展方式转型、产业结构调整也造成企业发展中的阵痛，资源环境约束、产能供给过剩、成本上涨过快、产品价格下降等形成了市场倒逼机制，行业发展面临着一系列突出矛盾和挑战。此外，传统化学工业由于往往被贴上了“污染”“排放”“耗能”等标签，甚至出现了“谈化色变”的情况，发展遇到了前所未有的困难局面。总之，我国化学工业“大而不强”，国际竞争能力较弱，与世界化学工业强国相比还有较大差距。

1. 技术创新能力不足、科技竞争力不强

行业主要依靠劳动力成本优势获得市场竞争力，企业研发投入强度普遍不高，技术创新人才缺乏，以企业为主体的产学研协同创新体系尚未完全建立，造成技术创新能力不足，面临国外技术封锁和壁垒等制约。例如，我国40%以上的聚乙烯、聚丙烯等大宗高端合成树脂产品依赖进口，而普通树脂却产能过剩。因此，迫切需要由规模发展转向创新驱动发展，通过创新形成行业发展的新动力，取得新优势，加快“转方式、调结构”，转变以高投入、高消耗、低效率为主要特征的传统发展方式，努力走出一条资源节约型、环境友好型、绿色低碳的新型工业化路子，推动行业经济运行更有效率、更可持续发展。

2. 节能减排任务艰巨

化学工业能源消耗和污染物排放大，居工业部门前列。目前尽管部分行业的技术、装备有了很大的提高，但整体水平仍然较低，全行业达到国际先进水平的技术装备仅占1/3，能源利用率比发达国家平均低15%，一些产品单位能耗比发达国家高20%~30%。而

其中化工分离过程能耗约占产品加工总能耗的 70%。我国政府承诺到 2020 年, 单位 GDP 二氧化碳排放降低 40%~45%。因此, 只有加大技术创新力度, 大力开发和推广节能新工艺、新技术, 降低能源消耗和提高能量利用率, 充分利用高新技术提升改造传统石化工业, 才能提高生产效率, 推进节能减排, 促进产业升级。

3. 资源、环境、安全的压力骤增

化学工业是典型的资源约束性产业。90% 以上的原料来自于矿产资源, 2014 年原油、硫黄、钾肥、天然橡胶的进口依存度分别达到 59%、48%、42% 和 80%。此外, 环境、安全也越来越成为化学工业发展的重要制约因素, “三废排放” 中废水排放占工业领域第三位、废气与废渣排放占第四位。安全问题也日益凸显, 备受民众关注, 严重制约了化学工业发展。因此, 必须加快发展循环经济, 大力推进清洁生产, 实施化工过程的本质安全, 促进绿色低碳循环发展。

综上, 无论是节能减排, 还是环境安全都急需化工学科新理论、新方法、新工艺、新装备、新技术的出现, 需要化工过程强化新途径与方法, 提升技术创新能力。变传统化工为“绿色”化工, 为化学工业的发展与变革提供支撑。

(二) 化工过程强化的内涵与重要性

化工过程强化就是提高单位体积的反应、传热和传质的速率, 实现传递速率与反应速率匹配、传热性能与产热速率匹配、停留时间与反应速率匹配、反应器形式与反应类型匹配, 最大限度地发挥化学系统或催化剂全部潜能, 实现化工过程的“更小、更快速、更安全、更持续、更便宜”。

化学工程学科发展的一个多世纪过程中, 尤其是在 20 世纪中后期, 过程工业在市场和工厂规模方面极度扩张, 带来了资源、能源过度消费, 安全、环保问题也日益突出, 功能新产品需求快速增加。与此同时, 化工学科经历百年发展, 在第一阶段“单元操作”和第二阶段“三传一反”的里程碑式发展后, 20 世纪后期出现了“产品工程”“三传一反+X”“多(介)尺度理论与方法”等新范

式，但在解决过程工业面临的各种新的问题面前，也出现了明显瓶颈。而冒险采用各种新的工艺技术并不是市场和企业的首选。过程模拟、优化控制、设备强化等受到化学及过程工业的青睐。此外，20 世纪后半叶出现的环境工程，在很大程度上推动了过程强化作为化工学科发展的重要目标。

化工过程的核心内容可用图 1 表示。在该化工过程构架中，人们重点关心如下几方面的问题。

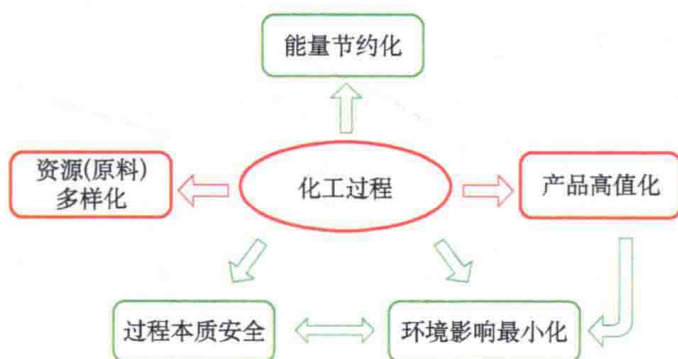


图 1 化工过程核心内涵示意图

1. 资源（原料）的更高效利用

过程强化可以使得设备紧凑（加工单元集成化）且外形尺寸大幅度缩小，从而大大降低设备投资成本；生产能力提高，单位加工面积可以加工多种产品并大幅度减少土地成本；较高的产率和选择性可以显著降低原材料成本等。

2. 产品高值化

通过新的催化剂和工艺的强化，实现定向催化转化，显著提高反应的选择性，与分离纯化技术耦合强化，从而低成本制备高附加值产品。

3. 能源消耗最少

高的产品选择性和收率可使能量效率显著增加，过程能耗大大降低；过程产生的排放物减少从而大大降低废物处理能耗与成本。

4. 化工过程的本质安全

过程强化不但可以使用更小、更安全的设备,而且使过程得到更好的控制。例如,通过反应热的超高效移除或控制气液在规整催化剂内的流动,从而避免液体分布不均和热点的形成;通过减少有害物质的存量或过程中的能量,从而大大减少有害物质或能量失控引起的安全隐患。

5. 环境影响最小化

过程强化通过新型装备与技术的开发,可以显著改进制造和加工过程,大幅度提高设备产能,降低能耗或废物的产生,最终形成更廉价、更可持续发展的技术。过程强化带来的物质和能量强度的减少应该能够按比例减少环境的影响;过程强化借助于功能集成可以使得能量需求降低,从而降低 CO_2 等废物排放量,减少过程工业对全球变暖的影响。

二、化工过程强化现状

(一) 国内外化工过程强化研究现状

过程强化作为化学工程学科诞生于英国,以 1983 年帝国化学工业有限公司 (ICI) 的 Ramshaw 教授发表的《HIGEE (离心场) 在传统精馏过程中的应用》的论文为标志。同年,世界首次过程强化年会在英国的曼彻斯特大学召开。直到 20 世纪 90 年代初期,过程强化仍然只是限于英国,主要涉及离心场的应用、紧凑高效换热、强化混合和集成技术。很快过程强化成为国际热点,很多国家的研究机构开始涉足该领域。例如,荷兰的 Delft 大学和 DSM 公司合作开展了结构化反应器的研究以及离心吸附技术;法国原子能中心 (CEA) 对紧凑换热设备开展了广泛研究;德国美因茨微技术研究所在微技术研究方面相当活跃;北京化工大学率先在我国开展了超重力方面的研发活动;美国的西北太平洋国家实验室 (PNNL) 在微通道换热器、MIT 在微反应器等方面开展了研究工作。许多化