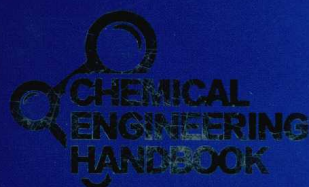


“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

化学工程手册

袁渭康 王静康 费维扬 欧阳平凯 主编

第三版



第 4 卷



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

化学工程手册

袁渭康 王静康 费维扬 欧阳平凯 主编

第三版



第 4 卷



化学工业出版社

· 北 京 ·

作为化学工程领域标志性的工具书，本次修订秉承“继承与创新相结合”的编写宗旨，分5卷共30篇全面阐述了当前化学工程学科领域的基础理论、单元操作、反应器与反应工程以及相关交叉学科及其所体现的发展与研究新成果、新技术。在前版的基础上，各篇在内容上均有较大幅度的更新，特别是加强了信息技术、多尺度理论、微化工技术、离子液体、新材料、催化工程、新能源等方面的介绍。本手册立足学科基础，着眼学术前沿，紧密关联工程应用，全面反映了化工领域在新世纪以来的理论创新与技术应用成果。

本手册可供化学工程、石油化工等领域的工程技术人员使用，也可供相关高等院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化学工程手册. 第4卷/袁渭康等主编.—3版.

—北京: 化学工业出版社, 2019.6

ISBN 978-7-122-34807-4

I. ①化… II. ①袁… III. ①化学工程-手册

IV. ①TQ02-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 136452 号

责任编辑: 张艳 傅聪智 刘军 陈丽 文字编辑: 向东 孙凤英
责任校对: 宋夏 王素芹 装帧设计: 尹琳琳
责任印制: 朱希振

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: 北京新华印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张82 $\frac{3}{4}$ 字数2108千字 2019年10月北京第3版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888

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: 388.00 元

版权所有 违者必究

《化学工程手册》（第三版）

编写指导委员会

- 顾 问 余国琮 中国科学院院士，天津大学教授
陈学俊 中国科学院院士，西安交通大学教授
陈家镛 中国科学院院士，中国科学院过程工程研究所研究员
胡 英 中国科学院院士，华东理工大学教授
袁 权 中国科学院院士，中国科学院大连化学物理研究所研究员
陈俊武 中国科学院院士，中国石油化工集团公司教授级高级工程师
陈丙珍 中国工程院院士，清华大学教授
金 涌 中国工程院院士，清华大学教授
陈敏恒 华东理工大学教授
朱自强 浙江大学教授
李成岳 北京化工大学教授
- 名誉主任 王江平 工业和信息化部副部长
- 主 任 李静海 中国科学院院士，中国科学院过程工程研究所研究员
- 副 主 任 袁渭康 中国工程院院士，华东理工大学教授
王静康 中国工程院院士，天津大学教授
费维扬 中国科学院院士，清华大学教授
欧阳平凯 中国工程院院士，南京工业大学教授
戴猷元 清华大学教授
- 秘 书 长 戴猷元 清华大学教授
- 委 员 (按姓氏笔画排序)
- 于才渊 大连理工大学教授
马沛生 天津大学教授
王静康 中国工程院院士，天津大学教授
邓麦村 中国科学院大连化学物理研究所研究员
田 禾 中国科学院院士，华东理工大学教授
史晓平 河北工业大学副教授
冯 霄 西安交通大学教授
邢子文 西安交通大学教授
朱企新 天津大学教授
朱庆山 中国科学院过程工程研究所研究员
任其龙 浙江大学教授
刘会洲 中国科学院过程工程研究所研究员

刘洪来 华东理工大学教授
孙国刚 中国石油大学（北京）教授
孙宝国 中国工程院院士，北京工商大学教授
杜文莉 华东理工大学教授
李 忠 华南理工大学教授
李伯耿 浙江大学教授
李洪钟 中国科学院院士，中国科学院过程工程研究所研究员
李静海 中国科学院院士，中国科学院过程工程研究所研究员
何鸣元 中国科学院院士，华东师范大学教授
邹志毅 飞翼股份有限公司高级工程师
张锁江 中国科学院院士，中国科学院过程工程研究所研究员
陈建峰 中国工程院院士，北京化工大学教授
欧阳平凯 中国工程院院士，南京工业大学教授
岳国君 中国工程院院士，国家开发投资集团有限公司教授级高级工程师
周兴贵 华东理工大学教授
周伟斌 化学工业出版社社长，编审
周芳德 西安交通大学教授
周国庆 化学工业出版社副总编辑，编审
赵劲松 清华大学教授
段 雪 中国科学院院士，北京化工大学教授
侯 予 西安交通大学教授
费维扬 中国科学院院士，清华大学教授
骆广生 清华大学教授
袁希钢 天津大学教授
袁晴棠 中国工程院院士，中国石油化工集团公司教授级高级工程师
袁渭康 中国工程院院士，华东理工大学教授
都 健 大连理工大学教授
都丽红 上海化工研究院教授级高级工程师
钱 锋 中国工程院院士，华东理工大学教授
钱旭红 中国工程院院士，华东师范大学教授
徐炎华 南京工业大学教授
徐南平 中国工程院院士，南京工业大学教授
高正明 北京化工大学教授
郭烈锦 中国科学院院士，西安交通大学教授
席 光 西安交通大学教授
曹义鸣 中国科学院大连化学物理研究所研究员
曹湘洪 中国工程院院士，中国石油化工集团公司教授级高级工程师
龚俊波 天津大学教授
蒋军成 常州大学教授

鲁习文 华东理工大学教授
谢在库 中国科学院院士，中国石油化工集团公司教授级高级工程师
管国锋 南京工业大学教授
谭天伟 中国工程院院士，北京化工大学教授
潘爱华 工业和信息化部高级工程师
戴干策 华东理工大学教授
戴猷元 清华大学教授

本版编写人员名单

(按姓氏笔画排序)

主稿人

于才渊	马沛生	王静康	邓麦村	史晓平	冯 霄
邢子文	朱企新	朱庆山	任其龙	刘会洲	刘洪来
江佳佳	孙国刚	杜文莉	李 忠	李伯耿	李洪钟
余国琮	邹志毅	周兴贵	周芳德	侯 予	骆广生
袁希钢	都 健	都丽红	钱 锋	徐炎华	高正明
席 光	曹义鸣	蒋军成	鲁习文	谢 闯	管国锋
谭天伟	戴干策				

编写人员

马友光	马光辉	马沛生	王 志	王 维	王 睿
王文俊	王玉军	王正宝	王宇新	王军武	王如君
王运东	王志荣	王志恒	王利民	王宝和	王彦富
王炳武	王振雷	王彧斐	王海军	王辅臣	王勤辉
王靖岱	王静康	王慧锋	元英进	邓 利	邓 春
邓麦村	邓淑芳	卢春喜	史晓平	白博峰	包雨云
冯 霄	冯连芳	邢子文	邢华斌	邢志祥	尧超群
吕永琴	朱 焱	朱卡克	朱永平	朱企新	朱贻安
朱慧铭	任其龙	华蕾娜	庄英萍	刘 珞	刘 磊
刘会洲	刘良宏	刘春江	刘洪来	刘晓星	刘琳琳
刘新华	江志松	江佳佳	许 莉	许建良	许春建
许鹏凯	孙东亮	孙自强	孙国刚	孙京浩	孙津生
阳永荣	苏志国	苏宏业	苏纯洁	李 云	李 军
李 忠	李伟锋	李志鹏	李伯耿	李建明	李建奎
李春忠	李秋萍	李炳志	李继定	李鑫钢	杨立荣
杨良嵘	杨勤民	肖文海	肖文德	肖泽仪	肖静华
吴文平	吴绵斌	邹志毅	邹海魁	宋恭华	初广文
张 栩	张 楠	张 鹏	张永军	张早校	张香平
张新发	张新胜	陈 健	陈飞国	陈光文	陈国华
陈标华	罗英武	罗祎青	侍洪波	岳国君	金万勤

周俊	周光正	周兴贵	周芳德	周迟骏	宗原
赵亮	赵贤广	赵建丛	赵雪娥	胡彦杰	钟伟民
侯予	施从南	姜海波	骆广生	秦炜	秦衍
秦培勇	袁希钢	袁佩青	都健	都丽红	贾红华
夏宁茂	夏良志	夏启斌	夏建业	顾幸生	钱夕元
徐虹	徐骥	徐炎华	徐建鸿	徐铜文	奚红霞
高士秋	高正明	高秀峰	郭烈锦	郭锦标	唐忠利
姬超	姬忠礼	黄昆	黄雄斌	黄德先	曹义鸣
曹子栋	龚俊波	崔现宝	康勇	彭延庆	葛蔚
蒋军成	韩振为	喻健良	程振民	鲁习文	鲁波娜
曾爱武	谢闯	谢福海	鲍亮	解惠青	蹇伟中
蔡子琦	管国锋	廖杰	谭天伟	颜学峰	潘勇
潘旭海	戴干策	戴义平	魏飞	魏峰	魏无际

审稿人

马兴华	王世昌	王尚锦	王树楹	王喜忠	朱企新
朱家骅	任其龙	许莉	苏海佳	李希	李佑楚
杨志才	张跃军	陈光明	欧阳平凯	罗保林	赵劲松
胡英	胡修慈	俞金寿	施力田	姚平经	姚虎卿
姚建中	袁孝竞	都丽红	夏国栋	夏淑倩	姬忠礼
黄洁	鲍晓军	潘勤敏	戴猷元		

参加编辑工作人员名单

(按姓氏笔画排序)

王金生	仇志刚	冉海滢	向东	孙凤英	刘军
李玥	张艳	陈丽	周国庆	周伟斌	赵怡
咎景岩	袁海燕	郭乃铎	傅聪智	戴燕红	

第一版编写人员名单

(按姓氏笔画排序)

编写人员

于鸿寿	于静芬	马兴华	马克承	马继舜	王 楚
王世昌	王永安	王抚华	王明星	王迪生	王彩凤
王喜忠	尤大钺	邓冠云	叶振华	朱才铨	朱长乐
朱企新	朱守一	任德树	刘茉娥	刘隽人	刘淑娟
刘静芳	孙志发	孙启才	麦本熙	劳家仁	李 洲
李 儒	李以圭	李佑楚	李昌文	李金钊	李洪钟
杨守诚	杨志才	时 钧	时铭显	吴乙申	吴志泉
吴锦元	吴鹤峰	邱宣振	余国琮	应燮堂	汪云瑛
沃德邦	沈 复	沈忠耀	沈祖钧	宋 彬	宋 清
张有衡	张茂文	张建初	张迺卿	陈书鑫	陈甘棠
陈彦萼	陈朝瑜	邵惠鹤	林纪方	岳得隆	金鼎五
周肇义	赵士杭	赵纪堂	胡秀华	胡金榜	胡荣泽
侯虞钧	俞电儿	俞金寿	施力才	施从南	费维扬
姚虎卿	夏宁茂	夏诚意	钱家麟	徐功仁	徐自新
徐明善	徐家鼎	郭宜祐	黄长雄	黄延章	黄祖祺
黄鸿鼎	萧成基	盛展武	崔秉懿	章寿华	章思规
梁玉衡	蒋慰孙	傅焯街	蔡振业	谭盈科	樊丽秋
潘积远	戴家幸				

审校人

区灿棋	卢焕章	朱自强	苏元复	时 钧	时铭显
余国琮	汪家鼎	沈 复	张剑秋	张洪沅	陈树功
陈家鏞	陈敏恒	林纪方	金鼎五	周春晖	郑 焯
施亚钧	洪国宝	郭宜祐	郭慕孙	萧成基	蔡振业
魏立藩					

第二版编写人员名单

(按姓氏笔画排序)

主稿人

王绍堂	王喜忠	王静康	叶振华	朱有庭	任德树
许晋源	麦本熙	时 钧	时铭显	余国琮	沈忠耀
张祉祐	陆德民	陈学俊	陈家镛	金鼎五	胡 英
胡修慈	施力田	姚虎卿	袁 一	袁 权	袁渭康
郭慕孙	麻德贤	谢国瑞	戴干策	魏立藩	

编写人员

马兴华	王 凯	王宇新	王英琛	王凯军	王学松
王树楹	王喜忠	王静康	方图南	邓 忠	叶振华
申立贤	戎顺熙	吕德伟	朱开宏	朱有庭	朱慧铭
刘会洲	刘淑娟	许晋源	孙启才	麦本熙	李佑楚
李金钊	李洪钟	李静海	李鑫钢	杨守志	杨志才
杨忠高	肖人卓	时 钧	时铭显	吴锦元	吴德钧
沈忠耀	宋海华	张成芳	张祉祐	陆德民	陈丙辰
陈昕宽	林猛流	欧阳平凯	欧阳藩	罗北辰	罗保林
金鼎五	金彰礼	周 瑾	周芳德	郑领英	胡 英
胡金榜	胡修慈	柯家骏	俞金寿	俞俊棠	俞裕国
施力田	施从南	姚平经	姚虎卿	贺世群	袁 一
袁 权	袁渭康	耿孝正	徐国光	郭 铨	郭烈锦
黄 洁	麻德贤	董伟志	韩振为	谢国瑞	虞星矩
鲍晓军	蔡志武	阚丹峰	樊丽秋	戴干策	

审稿人

万学达	马沛生	王 楚	冯朴荪	朱自强	劳家仁
李 楨	李绍芬	杨友麒	时 钧	余国琮	汪家鼎
沈 复	张有衡	陈家镛	俞芷青	姚公弼	秦裕珩
萧成基	蒋维钧	潘新章	戴干策	戴猷元	

前 言

化学工业是一类重要的基础工业，在资源、能源、环保、国防、新材料、生物制药等领域都有着广泛的应用，对我国可持续发展具有重要意义。改革开放以来，我国化学工业得到长足的发展，作为国民经济的支柱性产业，总量已达世界第一，但产品结构有待改善，质量和效益有待提高，环保和安全有待加强。面对产业转型升级和节能减排的严峻挑战，人们在努力思考和探索化学工业绿色低碳发展的途径，加强化学工程研究和应用成为一个重要的选项。作为一门重要的工程科学，化学工程内容非常丰富，从学科基础（如化工热力学、反应动力学、传递过程原理和化工数学等）到工程内涵（如反应工程、分离工程、系统工程、安全工程、环境工程等）再到学科前沿（如产品工程、过程强化、多尺度和介尺度理论、微化工、离子液体、超临界流体等）对化学工业和国民经济相关领域起着重要的作用。由于化学工程的重要性和浩瀚艰深的内容，手册就成为教学、科研、设计和生产运行的必备工具书。

《化学工程手册》（第一版）在冯伯华、苏元复和张洪沅等先生的指导下，从1978年开始组稿到1980年开始分册出版，共26篇1000余万字。《化学工程手册》（第二版）在时钧、汪家鼎、余国琮、陈敏恒等先生主持下，对各个篇章都有不同程度的增补，并增列了生物化工和污染治理等篇章，全书共计29篇，于1996年出版。前两版手册都充分展现了当时我国化学工程学科的基础理论水平和技术应用进展情况。出版后，在石油化工及其相关的过程工程行业得到了普遍的使用，为广大工程技术人员、设计工作者和科技工作者提供了很大的帮助，对我国化学工程学科的发展和进步起到了积极的推动作用。《化学工程手册》（第二版）出版至今已历经20余年，随着科学技术和化工产业的飞速发展，作为一本基础性的工具书，内容亟待更新。基础理论的进展和工业应用的实践也都为手册的修订提出了新的要求和增添了新的内容。

《化学工程手册》（第三版）的编写秉承继承与创新相结合的理念，立足学科基础，着眼学术前沿，紧密关联工程应用，致力于促进我国化学工程学科的发展，推动石油化工及其相关的过程工业的提质增效，以及新技术、新产品、新业态的发展。《化学工程手册》（第三版）共分30篇，总篇幅在第二版基础上进行

了适度扩充。“化工数学”由第二版中的附录转为第二篇；新增了过程安全篇，树立本质更安全的化工过程设计理念，突出体现以事故预防为主的化工过程风险管控的思想。同时，根据行业发展情况，调整了个别篇章，例如，将工业炉篇并入传热及传热设备篇。另外，各篇均有较大幅度的内容更新，相关篇章加强了信息技术、多尺度理论、微化工技术、离子液体、新材料、催化工程、新能源等新技术的介绍，以全面反映化工领域在新世纪的发展成果。

《化学工程手册》（第三版）的编写得到了工业和信息化部、中国石油和化学工业联合会及化学工业出版社等相关单位的大力支持，在此表示衷心的感谢！同时，对参与本手册组织、编写、审稿等工作的高校、研究院、设计院和企事业单位的所有专家和学者表达我们最诚挚的谢意！尽管我们已尽全力，但限于时间和水平，手册中难免有疏漏及不当之处，恳请读者批评指正！

袁渭康 王静康
费维扬 欧阳平凯

2019年5月

第一版序言

化学工程是以物理、化学、数学的原理为基础，研究化学工业和其他化学类型工业生产中物质的转化，改变物质的组成、性质和状态的一门工程学科。它出现于 19 世纪下半叶，至本世纪二十年代，从理论上分析和归纳了化学类型（化工、冶金、轻工、医药、核能……）工业生产的物理和化学变化过程，把复杂的工业生产过程归纳成为数不多的若干个单元操作，从而奠定了其科学基础。在以后的发展历程中，进而相继出现了化工热力学、化学反应工程、传递过程、化工系统工程、化工过程动态学和过程控制等新的分支，使化学工程这门工程学科具备更完整的系统性、统一性，成为化学类型工业生产发展的理论基础，是本世纪化学工业持续进展的重要因素。

工业的发展，只有建立在技术进步的基础上，才能有速度、有质量和水平。四十年代初，流态化技术应用于石油催化裂化过程，促使石油工业的面貌发生了划时代的变化。用气体扩散法提取铀 235，从核燃料中提取钚，用精密蒸馏方法从普通水中提取重水；用发酵罐深层培养法大规模生产青霉素；建立在现代化工技术基础上的石油化学工业的兴起等等，——这些使人类生活面貌发生了重大变化。六十年代以来，化工系统工程的形成，系统优化数学模型的建立和电子计算机的应用，为化工装置实现大型化和高度自动化，最合理地利用原料和能源创造了条件，使化学工业的科研、设计、设备制造、生产发展踏上了一个技术上的新台阶。化学工程在发展过程中，既不断丰富本学科的内容，又开发了相关的交叉学科。近年来，生物化学工程分支的发展，为重要的高科技部门生物工程的兴起创造了必要的条件。可见，化学工程学科对于化学类型工业和应用化工技术的部门的技术进步与发展，有着至为重要的作用。

由于化学工程学科对于化工类型生产、科研、设计和教育的普遍重要性，在案头备有一部这一领域得心应手的工具书，是广大化工技术人员众望所趋。1901 年，世界上第一部《化学工程手册》在英国问世，引起了人们普遍关注。1934 年，美国出版了《化学工程师手册》，此后屡次修订，至 1984 年已出版第六版，这是一部化学工程学科最有代表性的手册。我国从事化学工程的科技、教育专家们，在五十年代，就曾共商组织编纂我国化学工程手册大计，但由于种种原因，

迁延至七十年代末中国化工学会重新恢复活动后方始着手。值得庆幸的是，荟集我国化学工程界专家共同编纂的这部重要巨著终于问世了。手册共分 26 篇，先分篇陆续印行，为方便读者使用，现合订成六卷出版。这部手册总结了我国化学工程学科在科研、设计和生产领域的成果，向读者提供理论知识、实用方法和数据，也介绍了国外先进技术和发展趋势。希望这部手册对广大化学工程界科技人员的工作和学习有所裨益，能成为读者的良师益友。我相信，该书在配合当前化学工业尽快克服工艺和工程放大设计方面的薄弱环节，尽快消化引进的先进技术，缩短科研成果转化为生产力的时间等方面将会起积极作用，促进化工的发展。

我作为这部手册编纂工作的主要支持者和组织者，谨向《手册》编委会的编委、承担编写和审校任务的专家、化学工程设计技术中心站、出版社工作人员以及对《手册》编审、出版工作做出贡献的所有同志，致以衷心的感谢，并欢迎广大读者对《手册》的内容和编排提出意见和建议，供将来再版时参考。

冯伯华
1989 年 5 月

第二版前言

《化学工程手册》(第一版)于1978年开始组稿,1980年出版第一册(气液传质设备),以后分册出版,不按篇次,至1989年最后一册出版发行,共26篇,合计1000余万字,卷帙浩繁,堪称巨著。出版之后,因系国内第一次有此手册,深受各方读者欢迎。特别是在装订成六个分册后,传播较广。

手册是一种参考用书,内容须不断更新,方能满足读者需要。最近十几年来,化学工程学科在过程理论和设备设计两方面,都有不少重要进展。计算机的广泛应用,新材料的不断出现,能量的有效利用,以及环境治理的严峻形势,对化工工艺设计提出更为严格的和创新的要求。化工实践的成功与否,取决于理论和实际两个方面。也就在这两方面,在第一版出版之后,有了许多充实和发展。手册的第二版是在这种形势下进行修订的。

第二版对于各个篇章都有不同程度的增补,不少篇章还是完全重写的。除此而外,还有几个主要的变动:①增列了生物化工和污染治理两篇,这是适应化学工程学科的发展需要的。②将冷冻内容单独列篇。③将化工应用数学改为化工应用数学方法,编入附录,便于查阅。④增加化工用材料的内容,用列表的方式,排在附录内。

这次再版的总字数,经过反复斟酌,压缩到不超过600万字,仅为第一版的二分之一左右,分订两册,便于查阅。

本手册的每一篇都是由高等院校和研究单位的有关专家编写而成,重点在于化工过程的基本理论及其应用。有关化工设备及机器的设计计算,化工出版社正在酝酿另外编写一部专用手册。

本手册的编委会成员、撰稿人及审稿人,对于本书的写成,在全过程中都给予了极大的关怀、具体的指导和积极的参与,在此谨致谢忱。化工出版社领导的关心,有关编辑同志的辛勤劳动,对于本书的出版起了重要的作用。

化学工业部科技司、清华大学化工系、天津大学化学工程研究所、华东理工大学(原华东化工学院),在这本手册编写过程中从各个方面包括经费上给予大力的支持,使本书得以较快的速度出版,特向他们表示深深的谢意。

本手册的第一版得到了冯伯华、苏元复、张洪沅三位同志的关心和指导,

冯伯华同志和张洪沅同志还参加了第二版的组织工作，可惜他们未能看到第二版的出版，在此我们谨表示深深的悼念。

时 钧 汪家鼎
余国琮 陈敏恒

第 22 篇 液固分离

1 液固分离过程综述	22-2
1.1 相关流体力学及计算	22-2
1.2 过程分类	22-2
1.3 完整的液固分离过程	22-4
参考文献	22-5
2 沉降分离基本原理	22-6
2.1 沉降分离法分类	22-6
2.2 液体中单个固体颗粒的运动	22-6
2.2.1 单个球形颗粒在静止的无限液体中的沉降运动	22-7
2.2.2 单个球形颗粒在有限静止液体中的沉降运动	22-8
2.2.3 非球形颗粒的沉降速度	22-8
2.3 流体中颗粒群的运动	22-9
2.3.1 干涉沉降	22-9
2.3.2 压缩沉降	22-10
2.3.3 最大通量密度	22-10
2.3.4 临界颗粒直径	22-11
2.4 总分离效率和部分分离效率	22-11
2.4.1 总分离效率	22-11
2.4.2 综合分离效率	22-12
2.4.3 部分分离效率	22-13
参考文献	22-14
3 分级与旋流器	22-15
3.1 分级装置的类型与性能	22-15
3.1.1 沉降分级器	22-15
3.1.2 水力分级器	22-16
3.1.3 机械分级器	22-16
3.1.4 离心分级器	22-17
3.1.5 分级装置的性能与用途	22-17