

“十二五”
国家重点图书

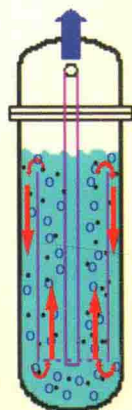
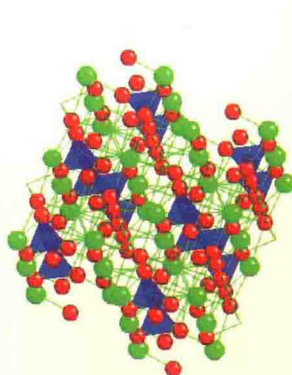
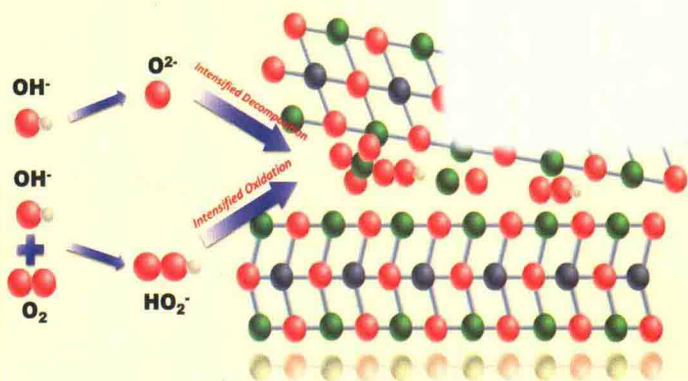


国家科学技术学术著作出版基金资助项目

亚熔盐 清洁生产技术与 资源高效利用

张懿 等著

Sub-molten Salt
Technology-Cleaner Production
and
Efficient Resource Utilization



化学工业出版社

“十二五”
国家重点图书



国家科学技术学术著作出版基金资助项目

亚熔盐 清洁生产技术^与 资源高效利用

张懿 等著

Sub-molten Salt
Technology-Cleaner Production
and
Efficient Resource Utilization



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书展示了我国清洁生产与资源优化循环的理念、目标、内涵、研究方法和技术创新特色；涵盖了我国化工冶金基础制造业绿色化升级与清洁生产技术创新的国家需求，绿色制造/清洁生产从化学分子尺度到设备放大系统集成多尺度的设计原理、科学内涵和方法，绿色过程模拟、集成与优化；着重介绍了亚熔盐化工冶金新原理与清洁生产关键共性技术，铬化工行业、氧化铝行业、钛白行业、稀有金属铌和钽的清洁生产技术与工艺，钒渣亚熔盐法钒铬高效提取分离技术，工业固废资源化利用；最后提出了过程制造业绿色化的升级转型技术路线图。

本书可供环境工程、化学工程、能源工程等领域的科研人员、工程技术人员和管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

亚熔盐清洁生产技术与资源高效利用/张懿等著. —北京:
化学工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-122-25940-0

I. ①亚… 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 (2015) 第 315994 号

责任编辑: 刘兴春 左晨燕 刘 婧
责任校对: 王 静

装帧设计: 尹琳琳

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: 三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 33½ 字数 795 千字 2016 年 8 月北京第 1 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: 180.00 元

版权所有 违者必究

《亚熔盐清洁生产技术与资源高效利用》 著者委员会

按汉语拼音排序：

曹绍涛	杜 浩	李会泉	马淑花	齐 涛
王少娜	王晓辉	徐红彬	薛天艳	阎文艺
张亦飞	张 懿	郑诗礼		

我国工业化中期产业转型升级的核心是制造业的绿色化技术升级和产品高端化。我国在基础制造业特别是战略性原材料制造的资源、能源、环境全生命周期效率和成本上与发达国家仍有较大差距,我国钢铁、有色金属总量与化工基础产品产量连续多年居世界首位,未来十年资源环境问题将更加突出,低端产品产能过剩,产业急待转型升级。尽快突破高效清洁合理利用重大矿产资源的关键技术,是转变经济增长方式、引导原始科技创新的重大任务。

本书作者们是我国最早开展重化工业清洁生产技术与资源综合利用研发的中国科学院过程工程所创新团队成员。积 20 年的实验室基础研究与产业化示范工程应用开发研究实践经验,从面向国家需求的科研一线人员视角,系统展示了我国清洁生产与资源优化循环的理念、目标、内涵、研究方法和技术创新特色,为我国制造业的绿色化升级提供引领性技术支撑。

本书共 8 章。第 1 章由张懿执笔,内容包括我国化工冶金制造业绿色化升级与清洁生产技术创新的国家需求,绿色制造/清洁生产技术设计原理、科学内涵和方法,亚熔盐绿色过程模拟、集成与优化,着重介绍了亚熔盐化工冶金新原理与清洁生产关键共性技术,其中活性氧理论的量化研究主要是由杜浩研究员和郑诗礼研究员直接带领研究生们完成的工作。第 2~第 7 章分别介绍了团队多年研发的亚熔盐清洁生产与资源综合利用技术创新体系案例,其中,第 2~第 6 章分别介绍了铬化工行业(徐红彬研究员、郑诗礼研究员执笔)、氧化铝行业(张亦飞研究员、郑诗礼研究员、马淑花、曹绍涛执笔)、钒渣亚熔盐法钒铬高效提取分离技术(杜浩研究员、郑诗礼研究员、王少娜执笔)、钛白行业(齐涛研究员、薛天艳执笔)以及铌、钽稀有金属行业(郑诗礼研究员、王晓辉执笔)的亚熔盐清洁替代性技术原始性创新及应用示范工程,第 7 章为工业固废资源化利用(李会泉研究员、马淑花执笔),包括亚熔盐法处理高铝粉煤灰联产硅酸钙保温材料利用技术、高铝粉煤灰制备莫来石联产白炭黑综合利用技术。第 8 章提出了过程制造业绿色化的转型升级技术路线图(张懿执笔)。全书最后由张懿、郑诗礼统稿、定稿。

本书向我国科技界同行忠实奉献了中国科学院过程工程研究所“资源清洁转化绿色过程工程团队”20 年的工作积累,为国家可持续发展进一步提供技术支撑。20 年来,本书作者们的团队持续创新,艰苦拼搏,团结合作,曾获 2002 年国家人事部、中国科学院“先进集体”荣誉称号。团队首席已由张懿院士转给齐涛博士接任,创新团队核心骨干成员张懿、齐涛、郑诗礼、李会泉、徐红彬、杜浩、张亦飞、曲景奎等对科技成果的产业化已有重大推进,亚熔盐基础理论又

有新的拓展。感谢我国湿法冶金创建人陈家镛院士悉心指导，感谢中国科学院过程工程研究所资深教授李佐虎研究员对本领域的开创性贡献。感谢示范工程企业技术人员多年坚持不懈的信任、支持和奉献。也用此书向困境中支持我们工作的当年中国科学院路甬祥、杨伯龄、李静海，国家 21 世纪议程中心郭日生等交一份汇报。向示范工程企业和所在地人民交一份答卷。期望所展示的学术成果经得起历史的考验。

张懿

2015 年 8 月于中国科学院过程工程研究所

目录

CONTENTS



总论

- 1.1 化工冶金制造业绿色化升级与清洁生产技术创新的国家需求 2
- 1.2 绿色制造/清洁生产技术设计原理、科学内涵和方法 3
- 1.3 亚熔盐化工冶金新原理与清洁生产关键共性技术 7
 - 1.3.1 两性金属资源转化传统流程解析 7
 - 1.3.2 熔盐/亚熔盐液相氧化取代高温钠化氧化焙烧新工艺主体思路 8
 - 1.3.3 亚熔盐非常规介质的优异物理化学特性和计算分析 9
 - 1.3.4 亚熔盐介质中活性氧生成机理与研究方法 12
 - 1.3.5 亚熔盐铬盐清洁工艺典型案例解析 15
 - 1.3.6 亚熔盐非常规介质活化机理 17
 - 1.3.7 亚熔盐铬、铝、钒、钛、铌、钽、锆化工冶金共性技术平台 19
- 1.4 亚熔盐绿色过程模拟、集成与优化 21
- 参考文献 22



铬化工清洁生产工艺与集成技术

- 2.1 行业背景和现状 28
 - 2.1.1 铬化合物产品概况 28
 - 2.1.2 铬化合物生产方法 28
- 2.2 铬铁矿高效清洁转化的反应分离工艺创新 34
 - 2.2.1 NaOH 及 NaOH-NaNO₃ 熔盐体系铬化合物清洁生产技术 34
 - 2.2.2 KOH 亚熔盐体系铬化合物清洁生产技术 68
- 2.3 绿色产品工程 104
 - 2.3.1 铬酸钾碳酸化法制备重铬酸钾 104
 - 2.3.2 铬酸钾氢还原法制备氧化铬 108
 - 2.3.3 高纯铬酸酐与硝酸钾联产工艺 116
 - 2.3.4 电催化合成铬酸酐工艺 125
 - 2.3.5 氨基酸铬螯合物的合成 129
 - 2.3.6 三价铬高速电镀液的制备 135
- 2.4 铬化工清洁工艺富铁渣的资源化利用 139
- 2.5 过程设备量化放大与系统集成 143
 - 2.5.1 钾系亚熔盐法铬盐清洁生产工艺全流程 143

- 2.5.2 典型过程装备设计、选型与应用 145
- 2.6 万吨/年铬化工清洁生产产业化示范工程及推广应用 148
 - 2.6.1 示范工程概况 148
 - 2.6.2 装置生产运行情况 149
- 参考文献 152



氧化铝行业清洁生产技术与资源综合利用

- 3.1 氧化铝行业清洁生产技术研究背景和意义 160
- 3.2 我国特色大宗难处理铝土矿资源转化的亚熔盐清洁工艺创新 162
 - 3.2.1 集成工艺创新原理 162
 - 3.2.2 亚熔盐介质强化溶出低品位一水硬铝石矿技术 164
 - 3.2.3 中间产品高效结晶技术 173
 - 3.2.4 高浓度铝酸钠溶液蒸发技术 176
 - 3.2.5 亚熔盐处理铝土矿生产氧化铝万吨级示范工程 180
- 3.3 大宗赤泥固废的源头污染控制集成技术 187
 - 3.3.1 拜耳法赤泥中物相的转化规律 187
 - 3.3.2 铝硅高效分离技术 192
 - 3.3.3 碱高效回收技术 199
 - 3.3.4 赤泥综合利用技术 200
- 3.4 高铝粉煤灰亚熔盐高活性介质低温溶出关键技术 203
 - 3.4.1 高铝粉煤灰提取氧化铝技术研究进展 205
 - 3.4.2 高铝粉煤灰提铝及多组分综合利用技术介绍 209
 - 3.4.3 亚熔盐法处理高铝粉煤灰的反应热力学分析 211
 - 3.4.4 亚熔盐法处理高铝粉煤灰稀碱预脱硅工艺 215
 - 3.4.5 亚熔盐法处理高铝粉煤灰溶出工艺 219
 - 3.4.6 亚熔盐法处理高铝粉煤灰铝酸钠结晶工艺 227
 - 3.4.7 亚熔盐法处理高铝粉煤灰脱硫排盐工艺 232
 - 3.4.8 核心反应器的研制与优化设计 239
 - 3.4.9 粉煤灰提取氧化铝万吨级示范工程 246
- 参考文献 251



钛白行业的清洁生产技术

- 4.1 钛白行业的技术发展现状分析 260

- 4.1.1 硫酸法 260
- 4.1.2 氯化法 260
- 4.1.3 盐酸法 261
- 4.2 亚熔盐分解钛资源的高效反应技术 263
 - 4.2.1 KOH 亚熔盐-钛铁矿/二氧化钛反应体系 264
 - 4.2.2 NaOH 亚熔盐-钛渣反应体系 270
- 4.3 分离纯化及钛白产品工程 279
 - 4.3.1 分离纯化 279
 - 4.3.2 煅烧 285
 - 4.3.3 包覆 290
- 4.4 酸/碱介质循环回用技术 293
 - 4.4.1 碱介质循环回用技术 293
 - 4.4.2 酸介质循环 295
- 4.5 千吨级示范工程放大及系统集成 298
 - 4.5.1 亚熔盐反应工序 298
 - 4.5.2 离子交换、洗涤工序 299
 - 4.5.3 钛液制备、精制及水解工序 300
 - 4.5.4 偏钛酸洗涤、盐处理、煅烧工序 301
 - 4.5.5 碱介质循环工序 302
- 4.6 小结 303
- 参考文献 303



5 稀有金属铌、钽的清洁工艺技术

- 5.1 铌钽行业的技术发展现状分析 308
 - 5.1.1 铌和钽的性质与应用 308
 - 5.1.2 铌钽资源状况 309
 - 5.1.3 铌钽资源主要分解方法 311
 - 5.1.4 铌和钽的主要分离方法 315
 - 5.1.5 未来发展趋势 317
- 5.2 铌钽资源亚熔盐高效清洁分解反应技术 318
 - 5.2.1 Nb_2O_5 和 Ta_2O_5 在氢氧化钾亚熔盐中的溶解行为 319
 - 5.2.2 铌钽原料在氢氧化钾亚熔盐中的宏观浸出动力学 325
 - 5.2.3 铌钽铁矿氢氧化钾亚熔盐浸出工艺研究 334
 - 5.2.4 机械活化强化铌钽矿氢氧化钾亚熔盐浸出工艺 335
 - 5.2.5 结论 341
- 5.3 铌钽酸盐低酸度转型与分离技术 341
 - 5.3.1 六铌(钽)酸钾结晶分离工艺 342

5.3.2	低浓度氢氟酸体系中 MIBK 萃取分离铌钽研究	346
5.3.3	结论	354
5.4	铌钽资源伴生组分综合利用	355
5.4.1	实验原料与方法	358
5.4.2	实验结果	359
5.4.3	结论	367
5.5	铌钽亚熔盐清洁工艺系统集成与应用前景	367
5.5.1	铌钽资源 KOH 亚熔盐清洁分解工艺流程	367
5.5.2	水合铌钽氧化物低酸萃取分离工艺流程	369
5.5.3	铌钽亚熔盐清洁生产工艺应用前景	370
	参考文献	370



钒渣亚熔盐法钒铬高效提取分离技术

6.1	概述	378
6.1.1	传统钒渣提钒技术	379
6.1.2	亚熔盐介质强化溶出技术	382
6.2	亚熔盐法钒渣钒铬高效同步提取技术	383
6.2.1	钒渣颗粒矿物解析	383
6.2.2	钾系亚熔盐法钒渣处理新技术	384
6.2.3	钠系亚熔盐法钒渣提钒技术	390
6.2.4	钠系和钾系亚熔盐钒渣生产技术对比	394
6.3	钠系亚熔盐外场强化技术	394
6.3.1	化学场强化	394
6.3.2	电化学场强化	401
6.3.3	流场强化	407
6.3.4	添加活性剂强化	409
6.3.5	不同强化方法的比较	412
6.4	钒铬清洁相分离技术	413
6.4.1	钒酸钾的分离	413
6.4.2	钒酸钠的分离	427
6.4.3	铬酸钠的分离	442
6.5	钒酸盐的阳离子解离及碱介质循环	447
6.5.1	阳离子解离方法	447
6.5.2	钒酸盐钙化工艺	448
6.5.3	钒酸钙碳酸化	457
6.5.4	钒酸盐电解还原制备钒氧化物	464
6.5.5	两种阳离子解离方法比较	466

6.6 钒渣亚熔盐法钒铬共提千吨级示范工程 467

6.6.1 钒渣亚熔盐法钒铬共提工艺流程 467

6.6.2 千吨级示范工程现场 467

参考文献 469



工业固废资源化利用

7.1 亚熔盐法处理高铝粉煤灰联产硅酸钙保温材料利用技术 472

7.1.1 硅酸钠钙结构研究 472

7.1.2 硅酸钙类物质 473

7.1.3 硅酸钠钙分解影响因素研究 475

7.1.4 硅酸钙保温材料综合利用 484

7.2 高铝粉煤灰制备莫来石联产白炭黑综合利用技术 487

7.2.1 高铝粉煤灰制备铝硅耐火材料技术进展 488

7.2.2 高铝粉煤灰的矿相构成与组成分析研究 490

7.2.3 预脱硅反应过程工艺优化与机理研究 492

7.2.4 深度脱硅工艺研究与机理分析 500

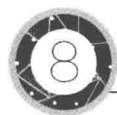
7.2.5 莫来石制备与物性调控过程 505

7.2.6 高铝粉煤灰脱硅溶液制备白炭黑工艺 509

7.2.7 高铝粉煤灰制备莫来石联产白炭黑过程集成与工程示范 513

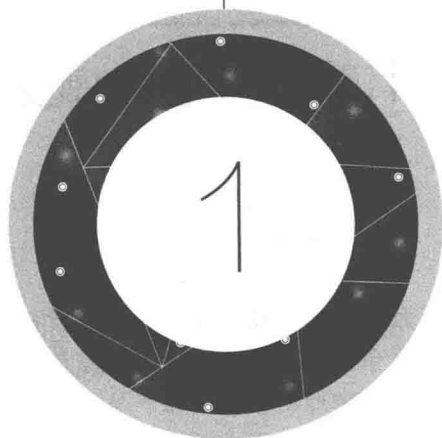
7.2.8 总结 514

参考文献 514



过程制造业绿色化升级转型技术路线图预测

参考文献 523



总论

1.1 化工冶金制造业绿色化升级与清洁生产技术创新的国家需求

绿色发展已成为世界各国的共同选择。支撑实体经济的过程制造业——钢铁、有色、化工、煤炭、石油石化等行业是我国大宗难处理资源加工的制造业龙头，是资源能源消耗和环境污染物产生的主体（>70%）。随着资源、能源、环境约束的凸显，特别是对矿产、油气、生物质资源进行大规模物理、化学、生物加工的过程制造业绿色化技术创新，核心竞争力的培育将上升为国家战略^[1~3]。我国作为世界制造业大国，为世界提供了高份额的基础原材料和低端产品。在经济高速增长的同时，也付出了沉重的资源环境代价，对制造业绿色化需求更为急迫^[4,5]。产业转型升级的核心是制造业的绿色化技术升级和产品高端化。我国在基础制造业特别是战略性原材料制造的资源、能源、环境全生命周期效率和成本上与发达国家仍有较大差距，应在5~10年内大大缩短。我国科技界应在解决重大特色资源绿色加工利用技术难题上培植出国内外领先的原创性成果，引领制造业的绿色化升级，破解我国可持续发展的资源环境瓶颈^[6,7]。

本书重点讨论矿产资源的高效清洁循环利用问题，对矿物资源进行大规模物理、化学、生物加工的钢铁、有色、化工等重化工业生产过程物流、能流密集，是我国经济增长受资源、能源、环境约束矛盾的焦点。我国主要矿物优质资源相对匮乏，45种主要矿产人均占有量不到世界平均水平的1/2，自给率逐年降低，且以低品位、难处理、多组分的复杂矿为主，我国一次矿物资源中复合型贫矿占97.8%，分离回收处理难度大^[8~13]。由于传统产业技术更新速度相对缓慢，科技支撑不足，缺乏针对我国特色资源的原创性技术和成果产业化转化平台，致使作为我国重大特色资源代表的钒钛磁铁矿、一水硬铝石矿等资源综合利用至今未能取得根本性突破。我国矿物资源总体利用率低，废弃物产生量大，共伴生矿产资源综合利用率比国际先进水平低30个百分点，工业固废产生量是发达国家的10倍，能耗高，环境污染严重，已超出环境承载力。国内外矿产资源加工能源利用率部分比较见表1-1。矿物资源加工利用技术的绿色化升级是目前我国重大紧迫的战略需求。

■ 表 1-1 国内外矿产资源加工资源能源利用率部分比较

指标比较			国内水平	国际先进水平
资源 利用率	有色金属矿产资源综合利用率/%		60	80
	共伴生矿产资源综合利用率/%		30	60
	钒钛磁铁矿综合 利用率	钛回收率/%	20	80
		钒回收率/%	45	
		铬回收率/%	0	
	二次金属资源循环利用率	铜铝铅锌均计/%	25	>50

续表

指标比较		国内水平	国际先进水平
能耗	钢铁冶炼	比国外高 20 %	
	粗铜综合能耗(平均)	1tce(比国外高 40 %)	
	氧化铝综合能耗	比国外高 50 %~300 %	
	湿法炼锌	比国外高 39 %	
	铅冶炼(平均)	比国外高 84 %	

我国已成为世界矿业加工的化工冶金基础原材料生产第一大国。钢铁、有色金属总量与化工基础产品连续多年居世界首位。未来 5~10 年资源环境问题将更加突出，低端产品产能过剩，产业亟待转型升级。尽快突破高效清洁合理利用重大矿产资源的关键技术，是转变经济增长方式、引导原始科技创新的重大任务。

未来 5~10 年，在新反应介质的全新化学新反应路径设计、绿色催化技术、过程强化技术、化学场和物理场强化耦合的先进反应分离设备、资源循环与环境核心技术集成等方向研究开发新理论、新方法，建立大幅度提高资源利用率、降低能耗、源头削减废弃物的绿色过程工程基础与清洁生产集成技术示范应用平台，加速新技术产业化进程，催生战略性新兴产业，是符合我国国情的战略选择。

1.2 绿色制造/清洁生产技术设计原理、科学内涵和方法

本书作者们是我国最早起步从事清洁生产技术/绿色过程工程研究的创新团队，20 年来一直坚持不懈地研究探求我国绿色/循环/低碳发展的技术战略与路径创新及示范工程验证。运用环境优先的绿色过程工程理论与方法，综合交叉化学、冶金、化工、环境、能源、计算信息等多学科的知识，从事资源物质转化绿色过程基础与清洁生产技术创新研发与示范实施^[14,15]。

(1) 污染物控制等级与国际绿色经济发展

重点突破源头减量的资源物质转化原子经济性反应新系统的构建，从源头大幅度提高资源利用率，减少废弃物产生，国内外实践证明这是污染控制最高效的方法。

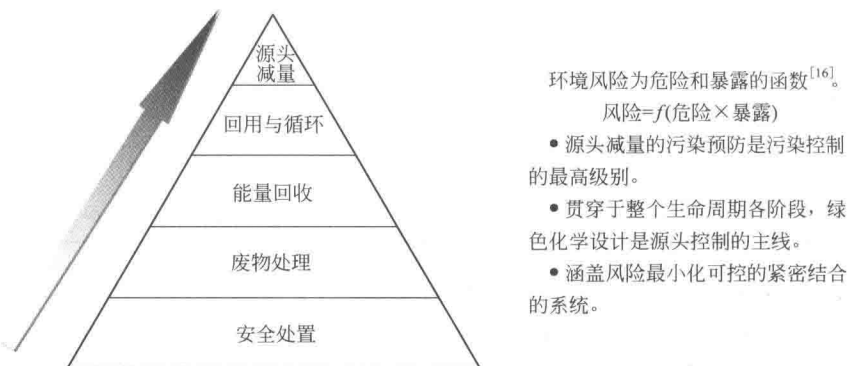
① 20 世纪 80 年代，美国污染预防战略推进“清洁生产”，重点行业清洁生产技术研发/实施/立法。

② 美国制订了 2020 年化学工程、矿物加工等科技发展路线图，加大绿色技术研发投入，提出未来 20 年将资源加工原料损失率减少 90 %。

③ 日本制订全面物质循环社会建设科技计划，2025 年规划“全部清洁化”战略，单位产值能耗下降 1/2，化学风险趋于零，建立环境导向技术的替代性新工艺/新过程/新材

料及污染防治和资源循环体系。

污染控制等级具体见图 1-1。



■ 图 1-1 污染控制等级与国际绿色经济发展

顶级的源头污染预防是原料高效转化为产品的反应分离新系统构建的绿色化学原始性创新，以不产生或少产生废弃物为主要目标。美国斯坦福大学教授 Barry Trost^[17]于 1991 年首次提出了原子经济性概念，引导人们如何去设计最大限度地利用原料中原子的新反应途径，从源头实现资源节约。Trost^[18]理论在过渡金属催化的有机分子环化和加成反应中得到了成功运用，获得了美国绿色化学理论奖，并得到国际学术界认同。一些提高资源利用原子经济性的新成果不断被推出^[19]，对苯二酚的合成是典型实例。本书将有机合成中原子经济性概念首次引入矿物资源利用领域，设计出矿物资源原子经济性高效转化新系统，以实现资源节约-高效利用的绿色化过程。理想的原子经济性反应追求的目标为： $A+B$ （原料） $\rightarrow C$ （产物） $+D$ （有毒有害副产物）， $D \rightarrow 0$ ，而不仅是产率。本书的典型案例是对亚熔盐反应介质、原料、反应条件、转化路径、过程强化与设备进行了全新设计。绿色化学框架 3 个要点可概括为：a. 贯穿于整个化学化工冶金全过程生命周期各个阶段的绿色化学设计；b. 绿色化学的目的是设计化工产品的固有性质和工艺过程，以减少其固有危险；c. 绿色化学是涵盖许多原则和设计标准的紧密结合的系统，如面向化工产业的不同化学领域，提出环境因子 E 值^[20]（见表 1-2）。

■ 表 1-2 不同化学领域的 E 值

工业分支	产量/(t/a)	E 值
大宗化工产品	104~106	$<1\sim5$
精细化工	102~104	$5\sim>50$
制药工业	10~103	$25\sim>100$

注：1. 相对于每一种化工产品而言，目标产物以外的任何物质都是废物。

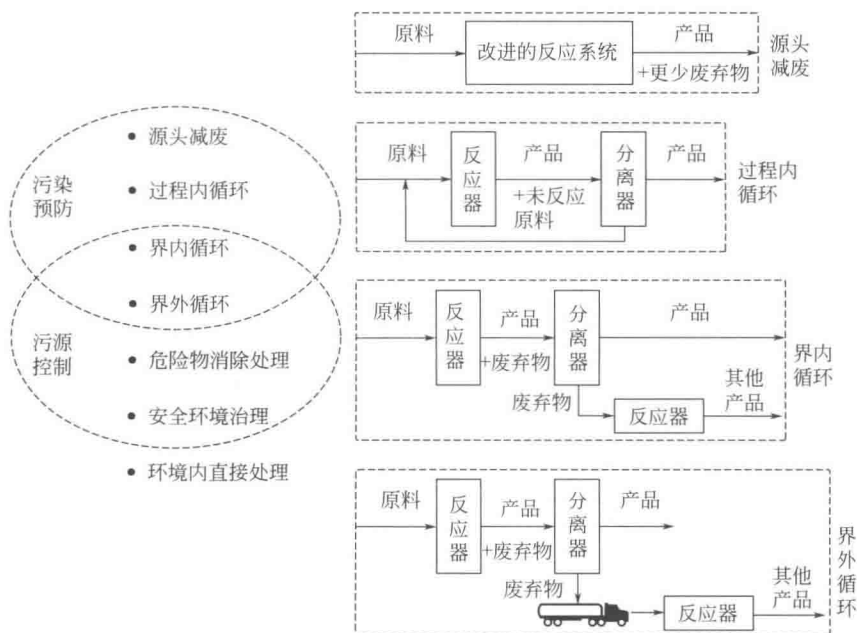
2. 环境因子越大，则过程产生的废物越多，造成的资源浪费和环境污染也越大。

3. 对于原子利用率为 100% 的原子经济性反应， E 因子为零。

(2) 源头污染预防与污染控制的界定

关于过程的资源循环回用，在物质元素和能量传递与利用过程中，未反应原料的过程内循环和界内循环是耗散代价较小的短程循环，还需设计废弃物与过程物流的质量交换集成网络。而界外循环相对耗散代价较大，危险物末端治理与安全处置是下策。源头污染预

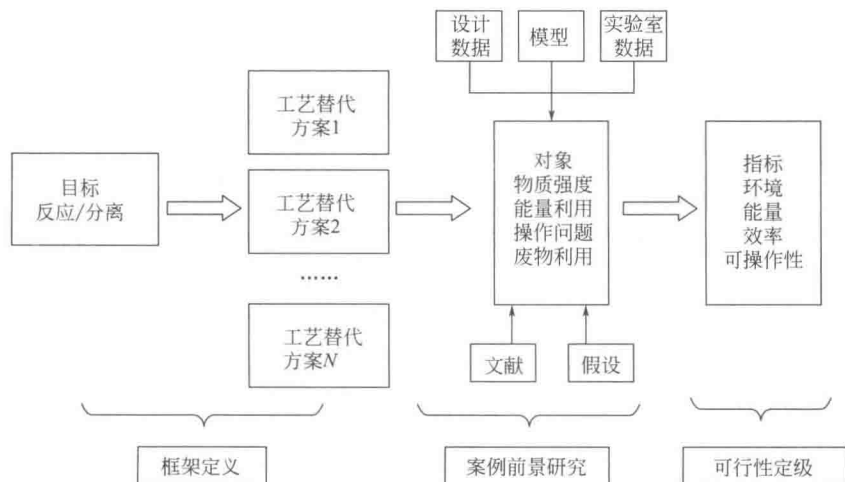
防与污染控制的界定具体见图 1-2。



■ 图 1-2 源头污染预防与污染控制界定

(3) 基于资源节约和废弃物最小化的清洁工艺研究目标与方法

如图 1-3 所示，通过文献和社会调研产生可供选择的 N 个工艺替代方案，提出简化假设，综合热力学方法、单元操作原理，建立工艺过程仿真的数学模型，进行过程物料衡算、热量衡算、设备尺寸估算和能量分析，结合实验数据对各方案的物质强度、能量利用、“三废”产生、操作问题进行系统分析，并做出环境和经济评价，就环境、能量、资源效率、可操作性指标进行方案可行性定级。清洁工艺的核心是资源转化的绿色化学创

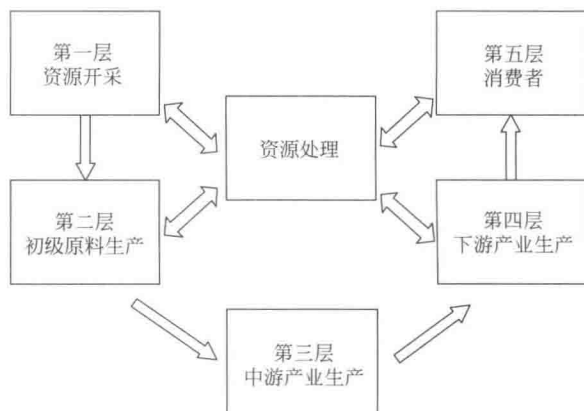


■ 图 1-3 清洁工艺方法学

新,在原子经济性反应/温和转化条件下,绿色催化/良性溶剂和介质的使用/毒性原料的可替代性/副产物向产物的转化/最小的废弃物排放量等成为主要研究目标^[21,22]。具体包括原子经济性反应、温和转化条件、绿色催化、良性溶剂和介质的使用、毒性原料的可替代性、副产物向产物转化、废弃物的最小排放量等。

(4) 资源循环与工业生态循环网络设计

工业生态循环追求物质元素和能量传递与利用过程中最低的耗散代价,即综合实现资源利用的最大化、环境影响的最小化和企业经济效益与社会效益的协调优化,如图 1-4 所示。



■ 图 1-4 全生命周期的工业生态循环

(5) 工业生态/循环经济系统集成与区域示范

在生态工业系统尺度上研究元素代谢与物质外循环运行机制与产业共生的柔性链接技术,建立资源利用的物质流程/能量流程/信息流程的整体优化集成方法和评价体系,突破高能耗、重污染行业密集区域的工业生态与循环经济构建技术,建立节能减排与循环经济区域示范,并形成过程工业绿色化升级的科学量化评价方法和国家技术标准,为最终构建物质循环利用的低碳经济社会提供科技支撑。在本书重点阐述的亚熔盐清洁生产技术案例中,钒、铬、铝都是通过相关行业工业生态循环网络链接设计实施的,具体内容将另行展开。

资源循环回用要付出耗散代价,通过预测模型的建立预测二次资源回收的环境经济重要性、处理技术难度和回收成本,可以直观判断某一类废弃物处理的重要性及技术可行性是很必要的。

(6) 绿色过程工程设计原则及内容框架

绿色过程工程设计原则^[23]如下。

- 1) 整体考虑工艺过程和产品,使用系统分析与集成的方法评估对环境的影响,环境影响应涵盖了生态因子、原料生命周期、能量生命周期、用水生命周期、原料消耗量、能量消耗量、土地征用。
- 2) 保障所有的物质和能量的输入及输出是安全的和环境友好的。
- 3) 尽可能减少自然资源、能源的消耗。
- 4) 通过革新、创新和技术发明实现可持续发展,在传统和主流工艺之上,创造性地