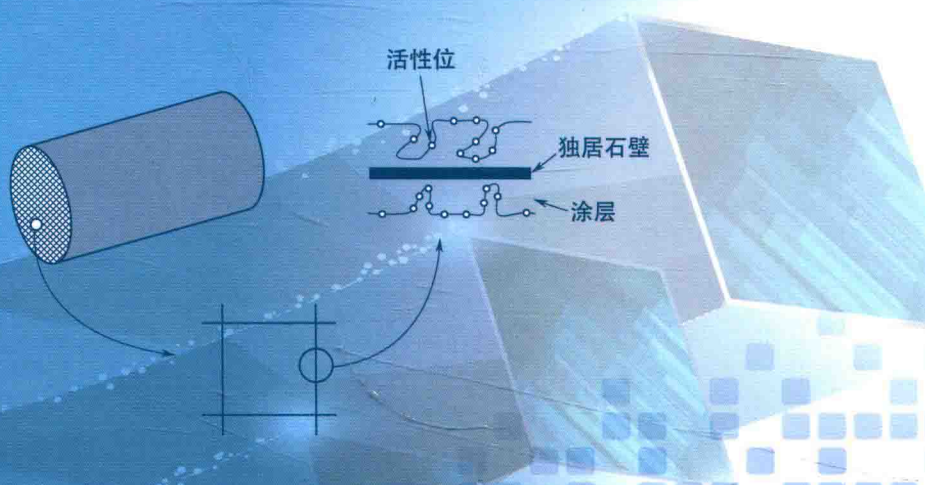
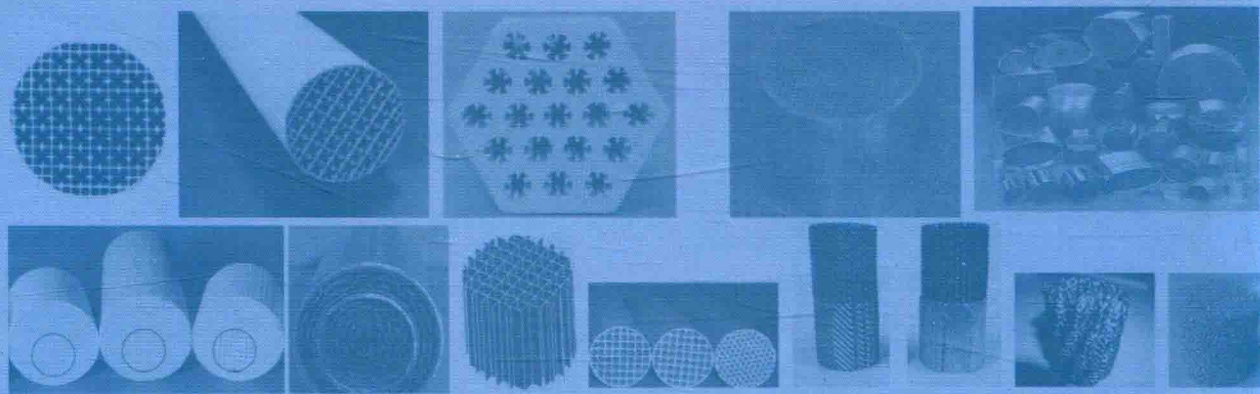


Structured Catalysts and
Environment Cleaning

结构催化剂 与环境治理

陈诵英 郑经堂 王琴 编著



化学工业出版社

Structured Catalysts and
Environment Cleaning

结构催化剂 与环境治理

陈涌英 郑经堂 王琴 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分为 11 章，内容主要包括绪论，结构基体、结构催化剂和结构反应器，结构催化剂和反应器中的传递现象，结构催化剂的制备，汽车尾气污染物的消除，柴油机尾气的净化，固定源 VOCs 污染物的催化氧化分解，固定源氮氧化物的脱除，低 NO_x 排放的催化燃料燃烧，催化结构过滤器净化炉气，结构催化剂和反应器的其他应用。

本书可以作为高等学校化学、化工、环境等相关专业本科高年级学生、研究生的教材，也是环境催化相关工业和设备制造领域的技术人员、管理人员的重要参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

结构催化剂与环境治理/陈诵英, 郑经堂, 王琴编
著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-122-23927-3

I. ①结… II. ①陈…②郑…③王… III. ①催化
剂—关系—环境管理—研究 IV. ①TQ426

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 097151 号

责任编辑: 成荣霞
责任校对: 边 涛

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 王晓宇

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: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 字数 626 千字 2016 年 2 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: 128.00 元

版权所有 违者必究



随着社会快速发展和人们生活水平的提高以及人口的日益增长，人类对能源的需求和消耗大幅增加，且总量越来越大。能源的大量消耗意味着向环境排放的各类污染物，即废气、废水和废弃固体的数量越来越多。人们极其渴望在洁净健康的环境中生活，对环境被污染非常厌恶。人类不断提高的环境意识促使其强烈地要求对污染物排放进行极为严格的控制，要求对污染物进行很好的治理，以快速改善人们赖以生活和生存的环境。世界各国政府为应答人们对环境问题的诉求，相继颁布越来越多的环境保护法律和法规，排放标准越来越高，要求越来越严格，并不断增大法律法规的执行力度。因此，排放污染物的治理不仅对企业来说责无旁贷，也是政府和个人的巨大责任。

几乎所有能源消耗，不管是部门的还是个人的，都会产生和向环境排放包含污染物的废物。由于舆论和媒体（不完全正确）的导向，使老百姓误认为所有污染都是来自化学及其相关工业的。实际上，大量统计数据表明，虽然化学品的生产一般总是会产生废物，但是化学相关工业产生的废气、废水和废弃固体污染物所占比例是不高的。然而，对于已经被排放入环境的污染物的治理，化学化工过程是不可或缺的，特别是关键的环境催化技术。

环境催化与其他领域对比，其显著不同的特征有：①环境催化的应用条件通常由上游排放污染物的单元确定；②应用环境催化的领域涵盖排放污染物的广泛领域，除炼制和化学工业外，涉及电子、农业/食品、纸浆和造纸、皮革和制革、金属整理等一般工业生产，以及日常生活领域，包括家居或室内应用，如自净化催化炉、屋内燃烧炉、水净化器等和车辆、船舶、航空器等；③环境催化剂的操作条件有时是非常极端的，如很低或很高的温度、进料组成范围快速变化、含无法移去的毒物、极高的空速和超低浓度等。因此，环境催化为解决这类特殊问题，需要使用特殊结构的结构催化剂和反应器。另一个方面是，对污染物的处理绝对不能够影响上游单元的性能，因此在高空速的同时要求极低的压力降。对此，环境催化剂的解决办法也是使催化剂和反应器结构化，因此所有成功应用的环境催化剂都是结构催化剂。这是笔者撰写《结构催化剂与环境治理》一书的引发点之一。笔者在1997年到杭州大学催化研究所工作后发现，该所研究的重点是环境催化技术，第一次真实接触到独居石结构催化剂。鉴于对环境催化的认识，希望推动全国环境催化技术的发展，搭建交流平台，笔者向杭州大学校长郑小明教授以及从事独居石催化剂研究的周仁贤教授建议，共同发起举办全国环境催化学术研讨会，并于当年在杭州召开了首届研讨会。这是笔者写《结构催化剂与环境治理》的另一个引发点，试图总结笔者在催化基础和环境催化实践中积累的知识和经验。

笔者在进入古稀之年的退休阶段，有时间和精力来实现自己长期的催化梦，靠着尚属健康的身体，已经完成有关催化基础的五本书：《吸附与催化》、《催化反应动力学》、《催化反应工程基础》、《催化反应器工程》、《固体催化剂制备原理与技术》。这些书涵盖了催化科学技术几个重要的基础领域。但催化是一门实用科学，催化技术的应用更为重要。在完成《精细化学品催化合成技术》（上、下册）后，接着要写的是催化技术在环境治理中的应用。虽然国内有关环境催化的著作和文章不少，但系统介绍结构催化剂和结构反应器及其在各种污染物治理中（包括移动源和固定源污染物治理）的成功应用和发展，在国内仍然极为鲜见。为了突出结构反应器在环境催化中的特殊地位，把环境领域中应用的催化剂结构化和污染物治理中结构催化剂和反应器的成果结合起来，笔者在参考2006年再版的“Structured

Catalysts and Reactors”的基础上，结合大量文献，在介绍结构催化剂及其性质、传递特性和制备技术后，再较详细介绍结构催化剂和反应器在各领域排放污染治理中所取得的巨大成功，这样就形成了本书自己的特色。

全书共分为 11 章。第 1 章绪论介绍化学和催化在国民经济发展和人们生活质量提高中的关键作用。而环境催化技术的最大支柱是结构催化剂和结构反应器技术。结构催化剂和结构反应器主要包括三类：独居石结构、有序排列催化剂反应器和膜反应器。接着在第 2 章～第 4 章中，较详细地介绍每类结构催化剂和反应器的构型、基本性质和特征，以及在各类结构材料中的传递现象和结构催化剂的制备技术。重点突出独居石结构，以及结构催化剂的低压力降和短扩散距离的特点。其余 7 章分别详细介绍结构催化剂和反应器在治理和净化来自移动源和固定源的各种污染物中的具体应用及技术的发展状态。第 5 章介绍汽车尾气催化转化器，特别是三效催化剂的设计、操作和影响参数，包括活性组分、独居石基体和有氧存储功能载体等。重点放在了对独居石池形状、大小和几何性质以及热和机械性质的设计和改进，也强调了催化转化器包装设计、机械和热耐用性以及车载诊断、贫燃脱氮氧化物催化剂和数学模型等问题。第 6 章介绍净化柴油机尾气的催化过滤器。在叙述柴油机操作原理的同时介绍其尾气烟雾的生成及净化要求标准和控制排放可采用的各种策略。包括氧化消除烟雾的直接接触、燃料承载和间接接触催化剂，以及连续再生阱技术和 NO_x 移去技术。然后介绍如何设计柴油尾气处理的催化过滤器及其应用和进展。第 7 章介绍独居石催化剂在挥发性有机污染物 (VOCs) 控制中的应用。内容包括 VOCs 污染物的来源和可应用的净化技术，特别是最好的催化氧化技术。包括独居石载体、催化活性组分、催化剂失活以及 VOCs 催化氧化工艺。第 8 章介绍固定源氮氧化物的脱除。内容包括选择催化还原 (SCR) 过程化学、稳态和非稳态动力学、整体型和涂层型独居石催化剂的活性组分和失活原因、实际 SCR 过程设计以及工艺操作参数、SCR 反应器模型、脱 NO_x 和 SO_2 氧化反应间的相互作用、催化吸附工艺 (SCONO_x)。第 9 章介绍低 NO_x 排放的催化燃料燃烧。主要内容包括氮氧化物的生成机理，气体透平独居石燃烧器中的催化燃烧技术及其机理、动力学和模型，低温、中温和高温型燃烧催化剂及其基体独居石材料、载体和活性组分，最后对催化燃烧发展现状和前景进行了分析。第 10 章介绍净化炉气催化结构过滤器的概念、多功能反应器、催化过滤器及其制备和应用，以及偶合 NO_x 还原、移去二噁英和 VOCs 技术。最后第 11 章介绍结构催化剂和反应器的其他应用。内容包括平行流反应器 (PPR) 和横流反应器 (LFR) 的工业应用、室内污染移去技术、独居石光催化技术在净化空气和废水中的应用、气体传感器、燃料电池电极、催化湿式氧化 (CWAO)、水补救和饮用水处理技术、化学品合成和无机膜 (如离子传输膜、致密钯膜和沸石膜) 的应用。

衷心感谢浙江大学催化研究所和浙江新和成股份有限公司的朋友在本书写作过程中给予的关心、帮助和支持，同时也感谢在资料收集和写作过程中家人和两个女儿的帮助、支持和理解。

由于笔者的时间和水平有限，在书中肯定会存在一些不足之处，敬请同行的专家学者以及广大读者批评指正，不胜感谢。

陈诵英

2015 年 10 月于杭州

第 1 章 绪论

1.1 我国的废物排放现实	001
1.1.1 1999—2003 年我国污染物排放的数字统计摘录	002
1.1.2 2005 年、2008 年或 2010 年我国三废污染物统计数据	003
1.1.3 2011 年我国各个部门排放三废及其比例	004
1.2 污染物的催化治理——环境催化	009
1.2.1 引言	009
1.2.2 污染治理的催化技术——环境催化	010
1.2.3 环境催化的非标准应用	012
1.2.4 环境催化的特征	013
1.2.5 环境催化作为新发明的推动力	014
1.2.6 环境催化促进可持续工业化学的发展	015
1.2.7 固体废物转化领域中的环境催化	016
1.2.8 室内空气质量改进中的环境催化	017
1.2.9 减少温室气体排放	017
1.2.10 用于水补救的环境催化技术	018
1.2.11 环境有害催化剂的替代	018
1.3 催化剂和反应器的结构化	019
1.3.1 催化反应工程的要求	019
1.3.2 环境催化反应特点和要求	020
1.3.3 结构催化剂和结构反应器的发展	021
1.3.4 结构催化剂和结构反应器的基本类型	024
1.3.5 独居石催化剂	025
1.3.6 有序排列催化剂	028
1.3.7 膜反应器	029
1.3.8 结构催化剂的未来	031
1.4 本书的写作思路和特色	032

第 2 章 结构基体、结构催化剂和结构反应器

2.1 引言	034
2.2 结构填料	034
2.2.1 多相催化反应器的结构内构件	034
2.2.2 分离过程用结构填料	035
2.2.3 催化反应用结构填料	036
2.3 独居石结构(催化剂或反应器)	037
2.3.1 基本定义和分类	037
2.3.2 独居石的构型和基本性质	039

2.3.3	独居石结构催化剂的优缺点	041
2.4	金属结构填料	045
2.4.1	波纹填料——开放错流结构	045
2.4.2	波纹填料——封闭错流结构 (CCFS)	047
2.4.3	反应蒸馏用结构填料	047
2.4.4	编织线结构填料	049
2.4.5	发泡体	049
2.5	纤维结构催化剂和反应器	049
2.5.1	引言	049
2.5.2	金属纤维	052
2.5.3	玻璃纤维	053
2.5.4	碳纤维	054
2.5.5	纤维结构的几何性质	055
2.5.6	纤维和布催化剂的应用	056
2.6	有序排列催化剂反应器	057
2.6.1	前言	057
2.6.2	平行通道和横向流动反应器的原理和特征	057
2.7	膜反应器	059

第 3 章 结构催化剂和反应器中的传递现象

3.1	气固独居石反应器中的热量和质量传递	063
3.1.1	影响热量传递的因素	063
3.1.2	蜂窝独居石中的热导率	064
3.1.3	独居石通道中的对流传热关联	066
3.1.4	独居石催化剂的有效因子	067
3.1.5	独居石反应器最佳几何体选择	069
3.1.6	独居石反应器中的气固传质	071
3.1.7	管道中气体流动的压力降	073
3.2	平行通道反应器 (PPR) 中的流动和传递现象	074
3.2.1	压力降	074
3.2.2	PPR 中的传质阻力	075
3.2.3	颗粒内传质	075
3.2.4	有效床层内扩散率	076
3.2.5	横向流动对传质的贡献	077
3.2.6	催化剂床层的利用率	078
3.2.7	对 PPR 的讨论	079
3.3	横向流动反应器 (LFR) 中的流动和传递现象	080
3.3.1	压力降	080
3.3.2	停留时间分布	080
3.3.3	PPR 结构反应器床层中的结垢行为	082
3.3.4	横向流动反应器 (LFR) 中的结垢	083
3.4	多相独居石反应器的水力学特征	084

3.4.1	流区	084
3.4.2	压力降	089
3.4.3	液体滞留	091
3.4.4	停留时间分布 (RTD)	092
3.4.5	轴向和径向离散	093
3.5	多相独居石反应器中的传质和传热	094
3.5.1	液固传质	094
3.5.2	气液传质	096
3.5.3	气固传质	099
3.6	从传递角度讨论独居石反应器性能	099
3.6.1	引言	099
3.6.2	独居石反应器模型	099
3.6.3	蜂窝独居石反应器和常用反应器的比较	100
3.7	其他多相结构填料中的传递现象介绍	102
3.7.1	流区	102
3.7.2	压力降和液体滞留	103
3.7.3	气-液传质和界面面积	103
3.7.4	液-固传质速率	103
3.7.5	停留时间分布 (RTD)	104
3.7.6	热传输	104
3.7.7	不同结构填料间的比较	104
3.8	其他结构填料的水力学和传递	106
3.8.1	波纹填料: 开放错流结构 (OCFS)	106
3.8.2	封闭错流结构波纹填料 (CCFS) 及其流体力学特性	109
3.8.3	编织线结构填料及其流体力学特性	110
3.8.4	金属、陶瓷和石墨发泡体	111
3.8.5	纤维材料上的传质和流体力学	113

第 4 章 结构催化剂的制备

4.1	陶瓷蜂窝独居石基体的制造	115
4.1.1	引言	115
4.1.2	挤压技术生产陶瓷蜂窝独居石	117
4.1.3	低表面积独居石基体的制造	118
4.1.4	高表面积独居石基体的制造	120
4.1.5	整体独居石催化剂	122
4.2	金属独居石基体的制造	122
4.2.1	金属基质	123
4.2.2	金属独居石设计和制造	125
4.3	陶瓷蜂窝独居石基体上载体和催化活性组分的沉积	126
4.3.1	陶瓷独居石结构上载体层的沉积	126
4.3.2	浆液浸泡 (洗涤涂层) 陶瓷独居石	127
4.3.3	陶瓷独居石载体上催化活性组分的沉积	129

4.4	金属结构填料基体上的载体涂层	131
4.4.1	金属表面处理和载体涂层	131
4.4.2	金属基体上涂层的黏结性	132
4.4.3	阳极氧化制备技术	132
4.5	金属结构填料载体表面催化活性组分涂渍	133
4.5.1	催化活性组分的悬浮涂渍	133
4.5.2	溶胶-凝胶沉积	134
4.5.3	电泳沉积 (EPD)	135
4.5.4	电化学沉积和化学镀	135
4.5.5	浸渍	136
4.5.6	催化活性组分沉积的组合技术	136
4.6	碳蜂窝独居石的制造	139
4.6.1	集成或整体碳蜂窝独居石的制备	139
4.6.2	碳涂层蜂窝独居石	141
4.6.3	在金属表面沉积碳层	144
4.7	多孔膜制备技术	144
4.7.1	无机微孔薄膜	144
4.7.2	溶胶-凝胶制备技术	145
4.7.3	沸石膜的制备	147
4.7.4	其他微孔无机膜	153
4.7.5	沸石膜和溶胶-凝胶膜的比较	154
4.8	平行流动和横向流动结构反应器的制造	154

第 5 章 汽车尾气污染物的消除

5.1	背景	156
5.1.1	汽油机引擎的排放	156
5.1.2	影响汽车尾气的因素和可能采取的策略	157
5.1.3	法规要求	159
5.2	汽车尾气转化催化剂	162
5.2.1	引言	162
5.2.2	TWCs 中的活性组分	162
5.2.3	TWCs 中的氧化铝载体	163
5.2.4	TWCs 中的 CeO_2 - ZrO_2 混合氧化物	165
5.2.5	TWCs 的失活	167
5.2.6	催化剂涂层涂渍工艺	168
5.3	汽车转化催化剂的基体	169
5.3.1	引言	169
5.3.2	汽车催化剂基体的要求	169
5.3.3	汽车催化剂蜂窝独居石载体的设计	170
5.3.4	催化剂基体的大小	170
5.3.5	汽车催化剂载体物理性质	171
5.4	汽车催化剂基体进展	177

5.4.1	陶瓷蜂窝独居石	177
5.4.2	基体小结	181
5.5	汽车尾气催化转换器包装	182
5.5.1	包装设计	182
5.5.2	机械耐用性	185
5.5.3	热耐用性	186
5.6	催化转换器操作和不同类型催化剂	188
5.6.1	操作对催化转换器效率和排放的影响	188
5.6.2	毒物效应	190
5.6.3	汽车引擎的启动排放	190
5.6.4	电加热催化剂	191
5.6.5	耐高温 TWC 催化剂的发展	192
5.6.6	低温度点火催化剂	192
5.6.7	天然气引擎尾气净化催化剂	193
5.6.8	摩托车辆尾气净化催化剂	193
5.7	车载诊断和贫燃脱 NO _x 催化剂	194
5.7.1	车载诊断	194
5.7.2	贫燃操作脱 NO _x 催化剂	195
5.7.3	NO _x 存储和释放	198
5.7.4	NSR 催化剂	199
5.7.5	使用尿素的选择性催化 NO _x 的还原催化剂	200
5.7.6	其他贫燃 DeNO _x 催化剂	202
5.7.7	双功能贫燃 DeNO _x 催化剂	202
5.8	汽车尾气催化转换器的数学模型	204
5.8.1	独居石反应器模型层次的选择	204
5.8.2	单一通道层次数学模型	205
5.8.3	1D, 2D 和 3D 模型	207
5.8.4	动态/瞬态行为模拟	210
5.8.5	催化转换器的点火和累积排放	210

第 6 章 柴油机尾气的净化

6.1	引言	212
6.1.1	柴油烟雾生成	212
6.1.2	柴油机颗粒排放物的环境和健康效应	213
6.1.3	控制柴油机排放物的策略	215
6.2	干柴油机烟雾氧化催化剂	217
6.2.1	除烟雾的非催化方法	217
6.2.2	柴油尾气氧化催化剂	218
6.2.3	直接接触柴油机烟雾氧化催化剂	220
6.2.4	燃料-承载催化剂	221
6.3	柴油烟雾氧化的间接接触催化剂	222
6.3.1	引言	222

6.3.2	连续再生阱 (continuous regeneration trap, CRT) 技术	223
6.3.3	在柴油引擎中 NO_x 的控制	224
6.4	柴油尾气颗粒过滤器的设计/大小	226
6.4.1	引言	226
6.4.2	性能要求	226
6.4.3	过滤器组成和微结构	227
6.4.4	池构型和阻塞方式	227
6.4.5	过滤器大小和外廓	229
6.4.6	压力降	229
6.5	物理性质和耐用性	232
6.5.1	物理性质	232
6.5.2	热耐用性	233
6.5.3	机械耐用性	234
6.6	柴油机过滤器进展	234
6.6.1	改进堇青石 "RC 200/19" 过滤器	234
6.6.2	SiC 过滤器	235
6.6.3	新过滤器设计	236
6.7	应用	237
6.7.1	催化诱导再生阱	237
6.7.2	连续再生阱	237
6.7.3	组合连续再生阱和催化再生阱	238
6.8	总结	239

第 7 章 固定源 VOCs 污染物的催化氧化分解

7.1	引言	240
7.1.1	挥发性有机碳 VOCs 对环境和健康的危害	240
7.1.2	VOCs 排放物的潜在源头	240
7.2	VOCs 净化技术	241
7.2.1	热焚烧	242
7.2.2	化学淋洗 (吸收)	242
7.2.3	吸附	242
7.2.4	挥发性有机化合物的气相催化氧化	242
7.2.5	挥发性有机化合物的凝聚	243
7.2.6	挥发性有机化合物的光氧化	243
7.2.7	对各种净化技术的思考比较	243
7.3	挥发性有机化合物氧化催化剂和载体	243
7.3.1	引言	243
7.3.2	挥发性有机化合物的催化氧化	243
7.3.3	VOCs 氧化催化剂的活性组分	245
7.3.4	VOCs 氧化催化剂的载体及其结构	245
7.3.5	催化剂的失活	246
7.4	VOCs 气相催化氧化工艺	246

7.4.1	引言	246
7.4.2	带预热交换器的单一床层	247
7.4.3	带再生热交换的多床层循环操作	248
7.4.4	反应器模型	248
7.4.5	正常操作期间	249
7.4.6	启动期间	249
7.4.7	温度均匀性和热剪应力	249
7.4.8	保护床层	250
7.5	VOCs 催化氧化单元操作中的一些事情	250
7.5.1	环境和安全	250
7.5.2	在爆炸低限 (LEL) 以下操作	250
7.5.3	燃烧器的安全系统	250
7.5.4	操作压力	250
7.5.5	气流卷流和床层堆束出口速度	251
7.5.6	催化剂分散处理	251
7.5.7	催化氧化器的残留排放	251
7.5.8	中间工厂试验	252
7.6	挥发性有机化合物排放物的吸附: 催化氧化前的浓缩步骤	252
7.6.1	固定床吸附器	252
7.6.2	旋转吸附器和其他移动床构型	252
7.6.3	吸附和焚烧组合于单一个固定床中	253
7.6.4	VOCs 氧化的吸附-催化流向转换工艺	253
7.7	VOCs 催化氧化技术的实例研究	254
7.7.1	含氯挥发性有机物的催化氧化分解	254
7.7.2	纤维催化剂应用	254
7.7.3	在憎水锰钾矿型八面分子筛上的苯氧化	256
7.7.4	邻二甲苯在铂-和钨-沸石催化剂上的氧化	256
7.7.5	使用钙钛矿作为 VOCs 的氧化催化剂	256
7.7.6	高温短接触时间 VOCs 催化焚烧器	257
7.7.7	VOCs 脱结构的整体催化/吸附过程	257
7.7.8	在金/铈氧化物催化剂上的 VOCs 氧化	257
7.7.9	贵金属/天然丝光沸石上的 VOCs 氧化	258

第 8 章 固定源氮氧化物的脱除

8.1	引言	262
8.2	SCR 过程	263
8.2.1	SCR 化学-氮氧化物的选择性催化还原	263
8.2.2	SCR 催化剂活性组分	264
8.2.3	发电厂烟道气净化 SCR 反应器的构型	265
8.2.4	气体透平应用的 SCR 过程(GTNO _x)	266
8.3	商业独居石型 SCR 催化剂	268
8.3.1	本体和涂层蜂窝型催化剂	268

8.3.2	板型催化剂	269
8.3.3	其他催化剂	270
8.3.4	SCR 催化剂的失活	270
8.4	独居石催化剂的催化行为和 SCR 反应的动力学	271
8.4.1	操作变量的影响	271
8.4.2	SCR 反应的机理	272
8.4.3	SCR 反应的稳态动力学	273
8.4.4	脱 NO ₂ 反应的非稳态动力学	274
8.4.5	独居石催化剂中 SCR 反应的内外传质限制	275
8.5	SCR 独居石反应器的模型	276
8.5.1	SCR 独居石反应器的稳定态模型	277
8.5.2	脱 NO _x 反应和 SO ₂ 氧化间的相互作用	279
8.6	SCR 催化剂和反应器设计	279
8.6.1	催化剂形貌的影响	279
8.6.2	独居石通道几何形状的影响	280
8.6.3	氨入口浓度不均匀性的影响	281
8.7	SCR 催化剂的非稳定态操作	281
8.7.1	非稳定态条件下的 SCR 独居石反应器模型	282
8.7.2	逆流 SCR	284
8.7.3	使用 Ljungstroem 空气加热器的 SCR	285
8.8	SCONO _x 工艺	285

第 9 章 低 NO_x 排放的催化燃料燃烧

9.1	引言	289
9.1.1	燃烧产生排放	289
9.1.2	排放物消除策略	290
9.1.3	气体透平	291
9.1.4	低 NO _x 燃烧器	292
9.2	催化燃烧	292
9.2.1	机理和动力学	293
9.2.2	独居石催化燃烧器模型	294
9.2.3	燃料效应	295
9.2.4	催化燃烧的其他应用	296
9.3	催化燃烧器	297
9.3.1	催化燃烧室	297
9.3.2	要求	297
9.3.3	系统构型	298
9.4	催化材料	300
9.4.1	引言	300
9.4.2	独居石基体	301
9.4.3	涂层材料	302
9.4.4	活性组分	303

9.5 商业状态和未来趋势	303
9.5.1 商业状态	303
9.5.2 未来趋势	304

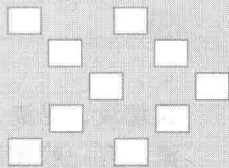
第 10 章 催化结构过滤器净化炉气

10.1 引言	305
10.1.1 多功能反应器	305
10.1.2 催化过滤器：基本概念	305
10.2 高温无机过滤器市场	306
10.3 催化过滤器的制备	308
10.4 催化过滤器的应用机遇	310
10.4.1 耦合 NO _x 还原和飞灰过滤	310
10.4.2 同时滤去飞灰、移去二噁英和其他 VOCs	313
10.4.3 合成气净化	315
10.4.4 柴油尾气处理和其他潜在应用	316
10.5 工程和模型	318

第 11 章 结构催化剂和反应器的其他应用

11.1 平行流反应器 (PPR) 和横流反应器 (LFR) 的工业应用	320
11.1.1 Shell 炉气脱硫过程 (SFGD)	320
11.1.2 硫和氮氧化物同时移去	321
11.1.3 低温 NO _x 还原过程	321
11.2 结构催化剂应用于改进室内空气质量	322
11.2.1 室内空气的污染源	322
11.2.2 室温分解臭氧的散热器催化剂	322
11.2.3 独居石光催化剂	323
11.3 结构催化剂应用于催化传感器	328
11.4 质子交换膜燃料电池中的结构催化剂	329
11.5 催化湿式氧化 (CWAO) 降解水污染物	329
11.5.1 引言	329
11.5.2 催化剂	331
11.5.3 CWAO 工艺过程	333
11.5.4 独居石催化剂和反应器在 CWAO 过程中的应用	334
11.5.5 水补救技术	336
11.6 光催化降解水中污染物	339
11.6.1 半导体光催化基础	339
11.6.2 光催化降解催化剂	341
11.6.3 光化学反应器	342
11.7 结构催化剂的合成应用	344
11.7.1 引言	344
11.7.2 独居石催化剂在短接触时间反应器中的应用	344
11.7.3 独居石催化剂在需求低压力降反应中的应用	345

11.7.4	独居石催化剂在粒内传质控制反应中的应用	347
11.7.5	有良好热传导的独居石催化剂	348
11.7.6	独居石催化剂在三相催化过程中的应用	350
11.7.7	独居石反应器在生物技术中的应用	352
11.8	无机膜的应用	354
11.8.1	离子传输膜的应用	354
11.8.2	致密 Pd 膜和合金膜的应用	358
11.8.3	沸石膜的应用	359
参考文献.....		360



第1章 绪论

化学是有活力的、创造性的基础科学之一，作为“中心”、“创造性”和“实用性”的科学，化学在绝大多数技术成就中做出了直接或间接的贡献。而化学品和化工产品是每个有活力国家的经济基础。化学和化工在社会的发展中，过去、现在并且也将在未来起着非常重要的作用。首先是人类寿命的延长，由于化学药品的功劳，使人类的平均寿命从40~50岁延长到现在的70多岁，足足延长近30岁；由于使用了极重要的化学肥料，不仅使谷物（单位面积产量和总产量）大大增产和丰收，而且也使经济作物如棉花和油料作物大大地增产和丰收。于是大量劳动力能够从第一产业中解放出来，促进第二和第三产业快速大发展，结果使人们的生活质量得以显著改善。

但是，随着社会的快速发展和人们生活水平的提高以及人口的日益增多，各种工业部门包括化学工业对能源的需求和消耗越来越大。能源的大量消耗意味着产生的废物数量越来越多，废物中所含化学品种类也越来越多。显而易见，产生的后果是对环境的污染越来越严重。随着人们环境意识的不断提高，对越来越糟糕的环境非常厌恶，极其强烈地要求对污染物进行很好的治理，快速改善人们赖以生活和生存的环境。为此世界上各个国家的政府颁布了越来越多和要求越来越严格的环境保护法律和法规，并加大法律法规的执行力度。因此，废物包括废气、废液和固体废物（通常所称的三废）的治理不仅成为企业的沉重负担，而且也成为令政府相当头痛的问题。

几乎所有环境污染物都是化学品，由于舆论和媒体（不完全正确）的导向，使老百姓总认为所有污染都来自化学及其相关工业。这是相当片面的，后面将要叙述的污染物数量和比例统计表明，化学工业产生的三废所占比例是不高的。当然，化学品生产一般总是会产生废物的，即便在化学反应选择性达到百分之百的情况下，也会有废物产生。但是，向环境排放污染物的数量，许多其他领域和产业企业所占份额要比化学相关工业多得多。而对污染物的治理，化学化工过程是不可或缺的。

1.1 我国的废物排放现实

在我国，随着国民经济的快速发展，环境也受到了严重的污染，而我国的生态环境更加不容乐观。不完全的统计资料指出，在1990年，全国废水排放总量为 3.54×10^{10} t，工业废水为 2.49×10^{10} t，废水的处理率很低。到2000年工业废水排放量增加到 4.8×10^9 t，化学工业排放的废水为 1.0×10^{10} t，仅占1/5。2009年的国家统计报告指出，七大水系的408个水质监测断面中，Ⅰ~Ⅲ类水质断面比例占57.1%，劣Ⅴ类水质断面比例占18.4%，虽然比上年有所下降，七大水系水质总体上持续好转，但是部分流域污染仍然严重。近岸海域299个海水水质监测点中，三类海水占6.0%，四类、劣四类海水占21.1%。

我国工业固体废物产生量平均以每年 2×10^7 t的速度增长，而且大多露天堆放，对土壤、空气和周围水体环境造成严重的污染。工业固体废物的种类多、成分杂、数量大，有建

筑垃圾、泥渣、煤渣、矿渣、碱渣、酸渣、磷渣、铬渣等无机废渣；还有数量庞杂的有机废渣；有一般废渣，也有有毒废渣，数量巨大。不仅破坏植被，也影响绿化，侵占农田，影响农业生产，而且废渣中的有毒可溶性物质会随雨水流入池塘江河，影响水体生态环境和污染水域，使水生物种群发生变化（如某些藻类的畸形生长），导致水生物生存环境的破坏甚至生态失衡、鱼虾绝迹；有毒物质渗入土壤造成大面积土壤污染，严重杀害土壤中的细菌微生物，土壤失去腐解自净功能。固体废渣日积月累，腐烂变质，产生臭气，污染大气，影响人体健康。

相对于对水污染和固体污染，空气污染也是很严重的。1995年的全国调查结果表明，62.3%的重点城市的二氧化硫和氮氧化物含量超标，2013年我国东部地区出现了大面积连续多日的雾霾天气，城市空气的达标率不高，这可能与空气中大量的微细颗粒物（PM_{2.5}）有关，也说明了空气污染的严重程度。在长江以南，青藏高原以东，出现酸雨区的范围不小，约占国土面积的20%。干旱加重、水灾频繁、沙漠蔓延、海平面升高、极地冰雪消融、臭氧空洞的出现等问题的产生也与大气污染密切相关，这对人类和大地生物圈的生存和发展形成巨大威胁。癌症的发病率与有毒污染物密切相关，人类癌症的60%~90%是因环境污染引起的。在环境中的污染物是彼此相互联系的，污染物在水中、大气中和土壤中是能够相互转移和循环的。粉末固体废物随风飘扬进入水体和大气中；水中的污染物进入土壤，部分逸入大气；大气中的污染物通过雨雪或自然沉降进入水体或土壤中；土壤中的污染物随水渗入地下水中。而且污染物可以通过水、空气和食物等进入动植物体内和/或进入人体，导致人体器官受到毒害而产生功能性障碍，对人体健康造成严重危害。人类癌症等恶性疾病发病率逐年升高与环境污染是密切相关的。

我国政府早已经针对资源和能源未能得到合理利用、缺乏有效的资源综合管理和经济发展过度依赖资源能源投入、忽视资源过度开发利用与自然环境退化之间的关系两个主要问题，提出逐年加大对“三废”（废水、废气和固体废物）治理的投入，积极调整产业结构，推广资源和能源有效和洁净利用的措施，提倡大力节约资源和能源，推动循环经济。人们也逐步认识到发展绿色低碳技术和保护环境的重要性和紧迫性。例如，我国单位GDP能耗已经从2005年的1.43吨标准煤/万元降低到2009年的1.077吨标准煤/万元。

1.1.1 1999—2003年我国污染物排放的数字统计摘录

1999—2003年我国废气、固体废物和废水排放的统计数据见表1-1~表1-3。

表 1-1 我国近年废气中主要污染物排放量

单位：万吨

项目 年度	二氧化硫排放量			烟尘排放量			工业粉尘 排放量
	合计	工业	生活	合计	工业	生活	
1999年	1857.5	1460.1	397.4	1159	953.4	205.6	1175.3
2000年	1995.1	1612.5	382.6	1165.4	953.3	212.1	1092
2001年	1947.8	1566.6	381.2	1069.8	851.9	217.9	990.6
2002年	1926.6	1562	364.6	1012.7	804.2	208.5	941
2003年	2158.7	1791.4	367.3	1048.7	846.2	202.5	1021
年度增减率/%	12	14.7	0.6	3.5	5.2	-2.9	8.5