



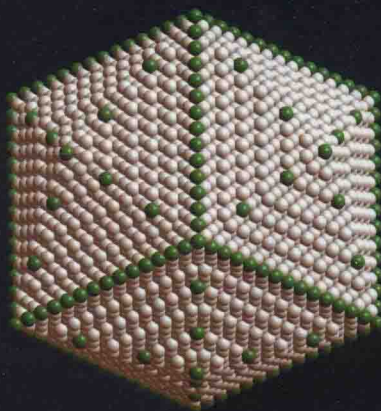
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

纳米材料前沿 >

Nanostructured Electrocatalysts

电催化纳米材料

孙世刚 主编



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

纳米材料前沿 >

Nanostructured Electrocatalysts

电催化纳米材料

孙世刚 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书依据作者研究团队以及国内外电催化纳米材料的最新研究进展,系统介绍了铂基和非铂基氧还原催化剂纳米材料、碳基非贵金属氧还原催化剂纳米材料、质子交换膜氢氧燃料电池阳极催化剂纳米材料、直接醇类燃料电池阳极电催化纳米材料、锂-空气电池碳基催化剂纳米材料、锂-空气电池正极催化剂纳米材料、环境污染物电催化处理纳米材料、光电解水电催化纳米材料、生物燃料电池电催化纳米材料、微生物制备纳米材料的电子传递机制及其应用、有机分子合成电催化纳米材料、CO₂还原电催化纳米材料、水电催化纳米材料。

本书可供从事电化学、电催化、催化化学、表面科学、材料科学等领域的研究人员及高等院校相关专业学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电催化纳米材料/孙世刚主编. —北京: 化学工业出版社, 2017.12

(纳米材料前沿)

ISBN 978-7-122-30579-4

I. ①电… II. ①孙… III. ①电催化-纳米材料-研究 IV. ①O643.3②TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第220990号

责任编辑: 韩霄翠 仇志刚

责任校对: 王素芹

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: 北京瑞禾彩色印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张37 字数635千字

2018年6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: 198.00元

版权所有 违者必究

NANOMATERIALS

纳米材料前沿

编委会

主 任 万立骏

副主任 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

刘云圻 孙世刚 张洪杰

周伟斌

委 员 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

顾忠泽 刘 畅 刘云圻

孙世刚 唐智勇 万立骏

王春儒 王 树 王 训

杨俊林 杨卫民 张洪杰

张立群 周伟斌

NANOMATERIALS

电催化纳米材料

编写人员名单

(按姓氏汉语拼音排序)

- | | |
|-----|---------------------|
| 陈 驰 | 厦门大学 |
| 何 平 | 南京大学 |
| 胡吉明 | 浙江大学 |
| 贾法龙 | 华中师范大学 |
| 姜艳霞 | 厦门大学 |
| 廖世军 | 华南理工大学 |
| 陆嘉星 | 华东师范大学 |
| 申 燕 | 华中科技大学 |
| 孙世刚 | 厦门大学 |
| 王 欢 | 华东师范大学 |
| 王鸣魁 | 华中科技大学 |
| 王宇成 | 厦门大学 |
| 吴雪娥 | 厦门大学 |
| 魏子栋 | 重庆大学 |
| 伍廉奎 | 浙江大学 |
| 杨 辉 | 中国科学院上海高等研究院 |
| 杨晓冬 | 厦门大学 |
| 张新波 | 中国科学院长春应用化学研究所 |
| 赵 峰 | 中国科学院城市环境研究所 |
| 周豪慎 | 南京大学 |
| 周明华 | 南开大学 |
| 周小春 | 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 |
| 周志有 | 厦门大学 |
| 朱俊杰 | 南京大学 |

纳米材料是国家战略前沿重要研究领域。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中明确要求：“推动战略前沿领域创新突破，加快突破新一代信息通信、新能源、新材料、航空航天、生物医药、智能制造等领域核心技术”。发展纳米材料对上述领域具有重要推动作用。从“十五”期间开始，我国纳米材料研究呈现出快速发展的势头，尤其是近年来，我国对纳米材料的研究一直保持高速发展，应用研究屡见报道，基础研究成果精彩纷呈，其中若干成果处于国际领先水平。例如，作为基础研究成果的重要标志之一，我国自2013年开始，在纳米科技研究领域发表的SCI论文数量超过美国，跃居世界第一。

在此背景下，我受化学工业出版社的邀请，组织纳米材料研究领域的有关专家编写了“纳米材料前沿”丛书。编写此丛书的目的是为了及时总结纳米材料领域的最新研究工作，反映国内外学术界尤其是我国从事纳米材料研究的科学家们近年来有关纳米材料的最新研究进展，展示和传播重要研究成果，促进学术交流，推动基础研究和应用基础研究，为引导广大科技工作者开展纳米材料的创新性工作，起到一定的借鉴和参考作用。

类似有关纳米材料研究的丛书其他出版社也有出版发行，本丛书与其他丛书的不同之处是，选题尽量集中系统，内容偏重近年来有影响、有特色的新颖研究成果，聚焦在纳米材料研究的前沿和热点，同时关注纳米新材料的产业战略需求。丛书共计十二分册，每一分册均较全面、系统地介绍了相关纳米材料的研究现状和学科前沿，纳米材料制备的方法学，材料形貌、结构和性质的调控技术，常用研究特定纳米材料的结构和性质的手段与典型研究结果，以及结构和性质的优化策略等，并介绍了相关纳米材料在信息、生物医药、环境、能源等领域的前期探索性应用研究。

丛书的编写，得到化学及材料研究领域的多位著名学者的大力支持和积极响应，陈小明、成会明、刘云圻、孙世刚、张洪杰、顾忠泽、王训、杨卫民、张立群、唐智勇、王春儒、王树等专家欣然应允分别

担任分册组织人员，各位作者不懈努力、齐心协力，才使丛书得以问世。因此，丛书的出版是各分册作者辛勤劳动的结果，是大家智慧的结晶。另外，丛书的出版得益于化学工业出版社的支持，得益于国家出版基金对丛书出版的资助，在此一并致以谢意。

众所周知，纳米材料研究范围所涉甚广，精彩研究成果层出不穷。愿本丛书的出版，对纳米材料研究领域能够起到锦上添花的作用，并期待推进战略性新兴产业的发展。

万立骏

识于北京中关村

2017年7月18日

随着能源短缺和环境污染等问题日益突出,发展化石能源清洁、高效利用技术,开发太阳能、风能等可再生能源,以及实现新物质绿色合成等成为当前社会发展的重大需求和科学技术的前沿。电化学能源转换不受热机卡诺循环的限制,清洁高效;电化学物质转化以电子为氧化剂或还原剂、绿色环保;电化学能量储存一方面为移动电器和电动车提供电源,另一方面则为间歇性、可再生能源的大规模开发利用提供有力的支撑。电催化是电化学能源转换、能量储存和物质转化的核心科学和技术,在解决当今能源和环境问题中扮演着关键的角色。同时,电催化还在太阳能、生物质能等的综合利用,氢能源,纳米材料和功能材料制备,液体燃料合成和转化,电解、水处理和有机电化学等工业,以及生物传感等领域中发挥着重要的作用。

电催化的关键是电催化剂。在电催化体系中,可以在温和条件下(常温、常压)调变界面电场,控制化学反应朝着希望的方向进行。高性能的电催化剂通过改变反应途径降低反应的活化能,具有高催化活性、高选择性和耐久性。电催化涉及反应分子与电催化剂表面的相互作用,电荷转移,反应分子吸附、解离、转化等关键步骤都发生在电极表面。因此,电催化剂的性能主要取决于表面结构,即化学结构(组成)、几何结构(原子排列结构)、电子结构和纳米结构。近年来纳米科技迅速发展,促进了电催化纳米材料的研究和应用,原始创新和应用成果不断涌现。从纳米尺度和纳米结构设计高性能电催化剂,发展纳米材料形貌和结构控制合成方法,并应用于各种实际电催化体系,不仅丰富了电催化剂的内涵,而且拓展了电催化的基础理论和应用。

本书邀请活跃于电催化研究第一线的中青年科学家撰写,内容涵盖燃料电池电催化纳米材料、锂-空气电池电催化纳米材料、环境和光电转换电催化纳米材料、生物电催化纳米材料以及绿色合成电催化纳米材料五个方面。全书一共13章,分别由重庆大学魏子栋(第1章 铂基和非铂基氧还原催化剂纳米材料),厦门大学周志有等(第2章 碳基非贵金属氧还原催化剂纳米材料),中国科学院上海高等研究院杨辉等(第3章 质子交换膜氢氧燃料电池阳极催化剂纳米材料),

华南理工大学廖世军(第4章 直接醇类燃料电池阳极电催化纳米材料),中国科学院长春应用化学研究所张新波(第5章 锂-空气电池碳基催化剂纳米材料),南京大学周豪慎等(第6章 锂-空气电池正极催化剂纳米材料),南开大学周明华(第7章 环境污染物电催化处理纳米材料),华中科技大学王鸣魁等(第8章 光电解水电催化纳米材料),南京大学朱俊杰(第9章 生物燃料电池电催化纳米材料),中国科学院城市环境研究所赵峰等(第10章 微生物制备纳米材料的电子传递机制及其应用),华东师范大学陆嘉星等(第11章 有机分子合成电催化纳米材料),华中师范大学贾法龙(第12章 CO_2 还原电催化纳米材料)和浙江大学胡吉明等(第13章 水电催化纳米材料)撰写。

本书的内容包含各章作者长期在电催化领域各个方面的科学研究中取得的重要成果,代表了我国近年来在电催化纳米材料科学和技术研究中的最新进展。在本书各章的撰写中,作者们既注重基础知识和研究方法的介绍,又紧紧围绕学科发展的前沿方向。因此,本书既适合电化学、电催化、催化化学、表面科学、材料科学等研究方向的研究生,也适合从事电催化及相关领域科学研究和技术开发的科技工作者参考,同时也可作为物理化学教学和相关工作人员的参考书。

本书得以顺利出版,离不开“纳米材料前沿”丛书编委会主任万立骏院士在选题、内容布局和全书风格诸方面给予的指导性建议及其严格把关,离不开全体作者的辛勤劳动,在此一并致以衷心的感谢。

孙世刚

中国科学院院士

厦门大学化学系教授

2017年5月于厦大芙蓉园



NANOMATERIALS

电催化纳米材料

1.1 概述	002
1.2 氧还原催化机理	003
1.3 铂基催化剂	008
1.3.1 晶面调控	010
1.3.2 构建双金属或多金属体系	012
1.3.3 表面修饰	021
1.3.4 载体增强	025
1.4 非铂基催化剂	031
1.4.1 Pd基催化剂	031
1.4.2 非贵金属催化剂	034
1.4.3 非金属催化剂	038
1.5 总结与展望	046
参考文献	046

2.1 概述	066
2.2 碳基非贵金属氧还原催化剂的发展历程	067
2.3 碳基非贵金属催化剂的制备技术	068
2.3.1 高温热解法	068
2.3.2 高温热解催化剂的结构设计	072
2.3.3 非热解法	078

Chapter 1

第1章

铂基和非铂基氧还原催化剂纳米材料

001

魏子栋
(重庆大学化学化工学院)

Chapter 2

第2章

碳基非贵金属氧还原催化剂纳米材料

065

杨晓冬, 周志有, 陈驰, 王宇成,
孙世刚
(厦门大学能源材料化学协同创新中心, 厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室, 厦门大学化学化工学院)

Chapter 3

第3章

质子交换膜氢氧燃料电池阳极催化剂 纳米材料

103

周小春, 杨辉
(中国科学院苏州纳米技术与纳米
仿生研究所, 中国科学院上海高等
研究院)

2.4 碳基非贵金属催化剂的活性位结构研究	080
2.4.1 碳缺陷活性位	080
2.4.2 氮掺杂碳活性位	081
2.4.3 Fe/N/C活性位	083
2.5 碳基非贵金属催化剂在燃料电池中的应用	089
2.5.1 在质子交换膜燃料电池中的应用	090
2.5.2 在阴离子交换膜燃料电池中的应用	092
2.5.3 在甲醇燃料电池中的应用	093
2.5.4 碳基非贵金属催化剂的传质	094
2.6 总结与展望	095
参考文献	096

3.1 概述	104
3.2 基本原理和表征方法	105
3.2.1 氢的电氧化原理	105
3.2.2 阳极纳米催化剂的表征方法	106
3.3 阳极纳米催化剂的主要研究进展	110
3.3.1 自增湿催化剂	110
3.3.2 超低载量方法	115
3.3.3 非铂催化剂	120
3.4 总结与展望	124
参考文献	124

4.1 概述	132
4.2 直接醇类燃料电池阳极反应及其一般机理	133
4.3 直接甲醇燃料电池阳极催化剂纳米材料	135
4.3.1 PtRu 二元合金纳米粒子催化剂	135
4.3.2 PtRu/氧化物催化剂	138
4.3.3 PtRuX 三元催化剂	139
4.4 直接乙醇燃料电池阳极催化剂纳米材料	141
4.4.1 单组分贵金属催化剂	141
4.4.2 双组分贵金属催化剂	142
4.4.3 三组分金属催化剂	145
4.4.4 非贵金属催化剂体系	146
4.5 其他醇类燃料电池阳极催化剂纳米材料	147
4.6 总结与展望	149
参考文献	150

5.1 概述	158
5.1.1 锂-空气电池发展背景	158
5.1.2 锂-空气电池的工作原理和分类	159
5.1.3 锂-空气电池的基本组成及关键材料	161
5.2 碳电催化纳米材料	162
5.2.1 分类及电化学性能	163
5.2.2 在锂-空气电池中的反应机理	169

Chapter 4

第4章

直接醇类燃料电池阳极电催化纳米材料

131

廖世军

(华南理工大学化学与化工学院)

Chapter 5

第5章

锂-空气电池碳基催化剂纳米材料

157

张新波

(中国科学院长春应用化学研究所)

Chapter 6

第6章

锂-空气电池正极 催化剂纳米材料

193

何平, 周豪慎
(南京大学现代工程与应用科学
学院)

5.3 碳载金属/金属氧化物复合电催化 纳米材料	170
5.3.1 制备方法	171
5.3.2 在锂-空气电池中的催化机理及电 化学性能	177
5.3.3 选择、设计与开发	181
5.4 杂原子掺杂碳基电催化纳米材料	183
5.4.1 杂原子掺杂碳基电催化纳米材料的制备	183
5.4.2 催化机理及电化学性能	184
5.5 总结与展望	188
参考文献	188
6.1 概述	194
6.1.1 研究背景和基本原理	194
6.1.2 有机体系	195
6.1.3 组合电解液	199
6.1.4 全固态电解质	202
6.1.5 小结	203
6.2 碳基纳米催化材料	205
6.2.1 多孔碳	205
6.2.2 碳纳米线/管	207
6.2.3 石墨烯	209
6.2.4 三维结构碳基材料	211
6.2.5 碳基掺杂材料	213

6.3 贵金属	215
6.3.1 金、铂、钯	215
6.3.2 钌与氧化钌	217
6.3.3 贵金属基复合材料	219
6.4 纳米结构过渡金属氧化物	220
6.4.1 锰氧化物	221
6.4.2 钴氧化物	222
6.4.3 镍氧化物	224
6.4.4 复合氧化物	225
6.5 可溶性催化剂	226
6.5.1 多环类氧化还原电对	227
6.5.2 碘化物	228
6.5.3 水	229
6.6 总结与展望	230
参考文献	230
7.1 概述	238
7.1.1 环境电化学的发展	238
7.1.2 环境电催化	239
7.1.3 环境电催化纳米材料	240
7.2 阳极氧化	241
7.2.1 概述	241
7.2.2 过程影响因素和特征参数	244

Chapter 7

第7章

环境污染电催化 处理纳米材料

237

周明华
(南开大学环境科学与工程学院)

Chapter 8

第8章

光电解水电催化纳米材料

275

申燕, 王鸣魁
(武汉光电国家研究中心, 华中科技大学光学与电子信息学院)

7.2.3 金属阳极及其环境应用	247
7.2.4 金属氧化物阳极及其环境应用	248
7.2.5 碳材料阳极及其环境应用	253
7.3 阴极电化学还原	256
7.3.1 概述	256
7.3.2 电芬顿	258
7.4 总结与展望	268
参考文献	269
8.1 概述	276
8.1.1 光电解水的原理	278
8.1.2 光电化学池	279
8.1.3 光电解水效率	280
8.1.4 太阳能-化学能转换效率	281
8.2 半导体光电化学	282
8.2.1 半导体/液体接触物理	282
8.2.2 光电解水体系界面能级优化	283
8.2.3 光照条件下半导体/液体界面体动力学	284
8.3 光阴极析氢过程	285
8.3.1 光电解水析氢反应机理	286
8.3.2 光阴极材料	287
8.4 光阳极材料	291
8.4.1 过渡金属氧化物光阳极材料	291

8.4.2	染料敏化半导体光阳极材料	296
8.4.3	影响光阳极性能的因素	301
8.5	电催化剂对光电极的影响	302
8.5.1	析氢催化剂材料	303
8.5.2	析氧催化剂材料	303
8.5.3	催化剂微纳结构对光电极效率的影响	304
8.6	总结与展望	305
	参考文献	306

9.1	概述	318
9.1.1	酶生物燃料电池	319
9.1.2	微生物燃料电池	320
9.2	酶生物燃料电池电催化纳米材料	322
9.2.1	碳材料	322
9.2.2	金属纳米粒子	329
9.2.3	纳米结构导电聚合物	331
9.2.4	复合材料	332
9.3	微生物燃料电池电催化纳米材料	339
9.3.1	MFC 阳极电催化纳米材料	339
9.3.2	MFC 阴极电催化纳米材料	345
9.4	总结与展望	349
	参考文献	351

Chapter 9

第9章

生物燃料电池电催化纳米材料

317

朱俊杰
(南京大学化学化工学院)