



纳米科学与技术

纳米碳催化

苏党生 等 编著

 科学出版社



纳米科学与技术

纳米碳催化

苏党生 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

纳米催化是催化科学的一个重要分支。纳米碳催化是 21 世纪发展起来的一个新的学科,有别于传统的金属或者金属氧化物催化,其反应基础和应用前景都有待于进一步探讨。本书从纳米碳材料的结构、性质及其调控入手,首先介绍纳米碳在脱氢、选择氧化等方面的应用和基础研究,然后阐述纳米碳材料在液相反应、电化学及环境化学的催化性质,最后比较了纳米碳催化与金属氧化物催化的差异并初步探索了纳米碳催化的工业化前景和存在的问题。

本书适合化学、化工、材料、纳米科技领域的广大科研、教学、专业技术人员以及研究生和本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米碳催化/苏党生等编著. —北京:科学出版社, 2014. 8

(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-041826-5

I. ①纳… II. ①苏… III. ①碳-纳米材料-催化-研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 206427 号

丛书策划: 杨 震 / 责任编辑: 张淑晓 刘 冉 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张: 26

字数: 530 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明	封松林	傅小锋	顾 宁	汲培文	李述汤
李亚栋	梁 伟	梁文平	刘 明	卢秉恒	强伯勤
任咏华	万立骏	王 琛	王中林	薛其坤	薛增泉
姚建年	张先恩	张幼怡	赵宇亮	郑厚植	郑兰荪
周兆英	朱 星				

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中，及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著，一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段，是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用，离不开知识的传播：我们从事科学研究，得到了“数据”(论文)，这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析，使之形成体系并付诸实践，才变成“知识”。信息和知识如果不能交流，就没有用处，所以需要“传播”(出版)，这样才能被更多的人“应用”，被更有效地应用，被更准确地应用，知识才能产生更大的社会效益，国家才能在越来越高的水平上发展。所以，数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展，这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中，知识的传播，无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪，我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面，已经大大地落后于科技发达国家，其中的原因有许多，我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同：中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识，将其变成具有系统性的知识结构。所以，很多学科领域的第一本原创性“教科书”，大都来自欧美国家。当然，真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力，更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一，其对经济和社会发展所产生的潜在影响，已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论：“现在的发达国家如果不发展纳米科技，今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此，世界各国，尤其是科技强国，都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技，给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前，各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国，纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此，国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》，力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性，全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标，将涵盖纳米科学技术的所有领域，全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识；并长期组织专家撰写、编辑

出版下去,为我国纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

序

催化过程，是在化学反应过程中借助催化剂，对化学反应进行选择、调控的化学过程。作为关键和核心技术，催化在合成氨工业、石油炼制、精细化学的合成、高分子材料的制备以及环境保护工程中起了非常重要的作用。随着公众对国民经济可持续发展和保护人类生存环境要求的日益提高，与能源、环境、农业以及人类健康密切相关的化学工业正在经历着一场重大的革新，作为主导和关键技术的催化科学，也必将面临一场重大的技术革命。纳米碳特有的结构、形貌及表面性质为研究其催化性能提供了一个很好的平台。最近十几年来，纳米碳的研究取得了很大的进展，实验和理论研究已经从初始的(氧化)脱氢反应扩展到选择氧化、加氢、卤化、脱硫乃至电催化等等多个反应体系。纳米结构碳材料，如富勒烯、碳纳米管和石墨烯等的研究进展大大地推进了纳米碳在均相和多相催化中的应用，一些以纳米碳为基础的催化剂已经在诸多重要反应过程中显示出很好的潜力。

本书的主要编著者苏党生研究员长期从事纳米碳催化相关的研究。2009年中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室催化材料研究部成立后，苏党生研究员及其团队经过5年的努力，在纳米碳的结构调控、表面修饰和纳米金刚石的改性，以及纳米碳催化乙苯脱氢和烷烃($C_1 \sim C_5$)反应过程和机理方面取得了非常出色的研究成果。这部《纳米碳催化》专著概括了苏党生团队这5年的研究成果和国内其他兄弟单位的杰出贡献。

本书的出版将为涉足纳米材料、纳米科学和催化化学的科研人员和研究生提供很好的参考，相信读者一定会从中得到很好的启发。我在此也祝贺中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室催化材料研究部成立5周年并预祝取得更大的进步。



中国科学院院士

中国科学院大连化学物理研究所研究员

2014年7月24日于大连

前 言

纳米碳催化是建立在纳米碳材料科学和纳米催化科学基础上的一个交叉学科,是专门研究以纳米碳材料(包括介孔碳)为催化剂的催化反应的一门科学,是21世纪成长起来的一个较新的学科。纳米碳催化是非金属催化,尤其是非贵金属催化这一新的发展方向的一个重要组成部分,是研究和探索可持续性发展和绿色、环境友好化学的一个重要分支。

自20世纪90年代以来,以碳纳米管为代表的纳米科学,包括纳米材料的制备和表征,有了巨大的发展,使人们对纳米尺度上的材料性能,包括物理、化学、力学性能等,都有了很系统的了解和认识。许多纳米材料已经在我们的日常生活中获得应用。纳米催化也是20世纪90年代伴随纳米科学发展起来的新学科,主要研究纳米粒子,即纳米金属或金属氧化物的催化性能及其催化反应的特殊性,最典型的例子是纳米金粒子在极低温条件下催化一氧化碳的氧化反应。研究发现纳米催化具有区别于传统催化的优势。

纳米碳催化综合了纳米碳材料研究和纳米催化科学的优势,但又有其独特的特点。21世纪以来,国内外纳米碳催化领域的研究开始活跃起来,人们开展了系统深入的研究工作,并陆续发表了大量的研究论文。中国科学院金属研究所催化材料研究部在纳米碳催化领域的研究一直处于国际领先地位,为了促进国内纳米科学的发展,尤其是促进纳米碳的催化研究,我们协同国内的同行整理归纳了目前纳米碳催化研究方向的重要成果并撰写了本书。

我们以纳米碳的结构、物理化学性质为出发点,分析和综述了纳米碳在气相、液相、电化学及环境保护中的反应机理和潜在应用,以促进我国纳米科学,尤其是纳米碳科学和纳米碳催化的研究和应用发展,同时探讨纳米碳催化的工业应用前景,为纳米碳催化的实际应用提供基础和思路。

中国科学院金属研究所催化材料研究部自2009年成立以来一直致力于纳米碳催化的探索研究,在纳米碳,尤其是纳米碳管和纳米金刚石催化脱氢、选择氧化等方面取得了很多有意义的成果,受到国内外同行的关注。参与本书写作的华南理工大学化学与化工学院、华东理工大学化工学院、清华大学化学工程系、中国科学院宁波材料技术与工程研究所等单位都在纳米碳催化的相关领域做出了重要的研究成果。在此基础上,作者参阅了大量国内外科技文献,就纳米碳材料的结构和表征、物理化学性质、量子化学计算、表面改性等方向都进行了较为全面的归纳和综述,作为纳米碳催化研究的基础。本书最后还简要地叙述了纳米碳催

化走向工业化的研究和其中存在的问题。

本书的第1章由中国科学院金属研究所苏党生撰写,第2章由张炳森、苏党生撰写,第3章由温国栋、谢在来(德国马普学会 Fritz Haber 研究所)、苏党生撰写,第4章由中国科学院宁波材料技术与工程研究所张业新、张建撰写,第5章由李波、孙晓颖、苏党生撰写,第6章由齐伟、苏党生撰写,第7章由钟炳伟、苏党生撰写,第8章由清华大学周凯、张强、罗国华、魏飞及中国科学院金属研究所李波撰写,第9章由华南理工大学彭峰撰写,第10章由澳大利亚悉尼大学王大伟与中国科学院金属研究所朱延松撰写,第11章由华东理工大学龙东辉撰写,第12章由孙晓岩、吴树昌、苏党生撰写,第13章由孙晓颖、苏党生撰写,第14章由刘洪阳、苏党生撰写,第15章由苏党生撰写。本书的主要内容是作者近年来的研究成果总结,这些成果是在国家自然科学基金委员会、科技部“973”计划、中国科学院等的支持下取得的。科学出版社的同志在本书的编审、校对等方面做了大量的工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,而且纳米科学和纳米催化的研究日新月异,这可能导致本书的部分内容与最新研究成果有些差异,敬请读者批评指正。

苏党生

2014年4月于沈阳

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米碳材料	1
1.2 催化与纳米催化	3
1.3 纳米碳催化	6
参考文献	7
第 2 章 纳米碳材料基础及结构表征	9
2.1 纳米碳材料基础	9
2.1.1 纳米碳的存在形式	9
2.1.2 纳米碳的结构	10
2.1.3 纳米碳的性质	16
2.2 纳米碳材料结构的表征方法	19
2.2.1 X 射线衍射	19
2.2.2 拉曼光谱分析	20
2.2.3 电子显微术	22
2.2.4 扫描隧道显微镜	28
2.2.5 原子力显微镜	29
参考文献	31
第 3 章 纳米碳材料的表面化学与表征	35
3.1 纳米碳材料的表面化学性质	35
3.1.1 纳米碳材料的表面缺陷	35
3.1.2 纳米碳材料的表面功能基团	37
3.1.3 纳米碳材料的表面掺杂原子	38
3.2 纳米碳材料的表面酸碱性	39
3.2.1 纳米碳材料的表面酸性	40
3.2.2 纳米碳材料的表面碱性	40
3.3 纳米碳材料表面含氧基团和氮物种的定性定量研究	42
3.3.1 X 射线光电子能谱技术	42

3.3.2	红外光谱技术	45
3.3.3	程序升温脱附技术	49
3.3.4	Boehm 滴定技术	51
3.3.5	电化学方法	53
3.4	研究纳米碳材料表面基团的新方法	54
3.4.1	X 射线吸收谱	55
3.4.2	化学滴定法	60
3.5	结论	62
	参考文献	62
第 4 章	纳米碳材料的修饰改性	65
4.1	缺陷位修饰改性	65
4.1.1	拓扑缺陷位	65
4.1.2	结构缺陷位	66
4.1.3	缺陷位的催化作用	67
4.2	氧修饰改性	67
4.2.1	氧修饰改性的方法	67
4.2.2	氧修饰的催化作用	71
4.3	氮修饰改性	71
4.3.1	富氮碳材料及其合成方法	71
4.3.2	富氮碳材料在催化中的应用	72
4.3.3	氮掺杂碳材料	75
4.3.4	氮掺杂碳材料的合成	76
4.3.5	氮掺杂在催化中的作用	79
4.4	硼修饰改性	82
4.4.1	硼掺杂碳材料及其合成方法	82
4.4.2	硼掺杂在催化中的作用	85
4.5	磷修饰改性	86
4.6	硫修饰改性	89
4.7	小结	92
	参考文献	92
第 5 章	纳米碳催化的理论计算	101
5.1	纳米碳材料 π 电子性质	101
5.2	纳米碳材料缺陷位的化学性质	105
5.3	纳米碳材料上氧官能团的化学活性	106
5.4	纳米碳材料催化剂上碳氢化合物氧化脱氢反应的理论计算	112

5.4.1 活性位的确定和乙烷的物理吸附	112
5.4.2 氧化脱氢的反应路径	114
5.5 杂原子的作用	119
5.5.1 在氧化脱氢反应中杂原子(氮、硼)对于乙烯选择性的调控	119
5.5.2 硼掺杂碳纳米管作为甲烷部分氧化反应催化剂	122
5.5.3 掺杂改性的碳纳米管在燃料电池氧还原反应中的催化性质和作用 ...	127
5.5.4 杂原子在氧化脱氢反应中的作用	130
5.6 总结和展望	132
参考文献.....	134
第6章 纳米碳材料催化脱氢反应	138
6.1 脱氢反应	138
6.2 纳米碳材料催化氧化脱氢反应	140
6.2.1 纳米碳材料催化烷基芳烃氧化脱氢反应	141
6.2.2 纳米碳材料催化低碳链烷烃氧化脱氢反应	149
6.2.3 纳米碳材料催化的其他类型氧化脱氢反应	155
6.2.4 纳米碳材料催化烷烃氧化脱氢反应过程和机理	156
6.3 纳米碳材料催化直接脱氢反应	159
6.3.1 纳米碳材料催化直接脱氢反应类型	159
6.3.2 纳米碳材料催化直接脱氢反应的活性位点和催化反应过程	163
6.4 小结	165
参考文献.....	166
第7章 纳米碳材料催化选择氧化反应	169
7.1 碳纳米管催化丙烯醛选择氧化制丙烯酸	169
7.1.1 碳纳米管催化剂在丙烯醛选择氧化反应中的性能	170
7.1.2 碳纳米管表面官能团的性质	171
7.1.3 氧化处理对碳纳米管催化活性的影响	172
7.1.4 氧化 CNT 催化选择氧化丙烯醛的活性位探讨	174
7.1.5 碳纳米管催化氧化丙烯醛的机理	177
7.2 掺氮碳纳米管催化丙烯醇选择氧化	177
7.2.1 掺氮碳纳米管在丙烯醇选择氧化反应中的优异性能	178
7.2.2 不同掺氮量对催化丙烯醇选择氧化反应的影响	179
7.2.3 掺氮碳纳米管催化丙烯醇选择氧化机理	180
7.3 掺氮碳纳米管催化硫化氢选择氧化	180
7.3.1 掺杂氮原子对硫化氢选择氧化催化活性影响	181
7.3.2 反应温度和空速对硫化氢选择氧化催化活性影响	181

7.3.3 掺氮碳纳米管催化硫化氢选择氧化机理	183
7.4 应用前景	183
参考文献	184
第8章 纳米碳催化卤化反应	188
8.1 氯乙烯和聚氯乙烯	188
8.1.1 氯乙烯	188
8.1.2 乙炔法和乙烯氧氯化法的比较	189
8.1.3 聚氯乙烯	190
8.1.4 汞对环境的污染	191
8.2 金属催化乙炔氢氯化	192
8.2.1 金属活性规律	192
8.2.2 无汞催化剂的研发	195
8.3 非金属无汞催化	201
8.3.1 氮掺杂碳纳米管的制备	201
8.3.2 氮掺杂碳纳米管表征与分析	203
8.3.3 碳催化剂乙炔氢氯化的活性	208
8.3.4 密度泛函理论研究	214
8.4 结语	219
参考文献	219
第9章 纳米碳材料液相催化作用	224
9.1 纳米碳材料液相催化反应概述	224
9.2 纳米碳材料催化烃类的液相选择氧化	228
9.2.1 碳材料催化环己烷的液相选择氧化	228
9.2.2 碳材料催化芳香烃的液相选择氧化	234
9.2.3 烃类液相催化机理的原位光谱研究	240
9.3 纳米碳材料催化醇的液相选择氧化	243
9.3.1 碳纳米壳催化醇液相选择氧化	244
9.3.2 碳纳米管催化醇液相选择氧化	245
9.3.3 氧化石墨催化醇液相选择氧化	247
9.3.4 石墨烯催化醇液相选择氧化	249
9.4 纳米碳材料催化湿空气氧化反应	250
9.5 纳米碳材料催化 H_2O_2 的液相氧化和羟基化	253
9.5.1 纳米碳材料催化 H_2O_2 的液相氧化	253
9.5.2 纳米碳材料液相羟基化	254
参考文献	257

第 10 章 纳米碳电催化作用	265
10.1 燃料电池及纳米碳电催化	265
10.1.1 氧还原电催化剂的常用评价方法	265
10.1.2 纳米孔碳基电催化剂	267
10.1.3 碳纳米管基电催化剂	271
10.1.4 石墨烯基电催化剂	273
10.2 纳米碳材料在锂-空电池中的应用	275
10.2.1 金属-空气电池	275
10.2.2 锂-空电池	276
10.3 纳米碳材料在电催化氧化处理有机污水中的应用	277
10.3.1 电催化氧化处理有机污水的基本原理	277
10.3.2 纳米碳材料在阴极间接氧化中的应用	278
10.4 问题与展望	280
参考文献	281
第 11 章 纳米碳材料环境催化作用	285
11.1 概述	285
11.2 纳米孔碳材料催化氧化 NO	285
11.2.1 纳米孔碳催化氧化 NO 机理	286
11.2.2 纳米孔碳催化氧化 NO 影响因素	287
11.3 纳米孔碳材料催化氧化 H ₂ S	293
11.3.1 纳米孔碳物理/化学吸附 H ₂ S	293
11.3.2 纳米孔碳材料催化氧化 H ₂ S 的机理	295
11.3.3 催化氧化反应的活性位	297
11.3.4 纳米孔碳材料催化氧化 H ₂ S 的影响因素	299
11.4 展望	303
参考文献	304
第 12 章 纳米金刚石与石墨烯的催化作用	308
12.1 纳米金刚石的催化作用	308
12.1.1 纳米金刚石的合成	308
12.1.2 纳米金刚石的微观结构	310
12.1.3 纳米金刚石的表面化学性质	312
12.2 纳米金刚石的表面功能化及结构调控	313
12.3 纳米金刚石的催化性能	316
12.3.1 甲烷裂解反应活性	317
12.3.2 烃类氧化脱氢反应活性	319

12.3.3 烃类直接脱氢反应活性研究	323
12.3.4 电催化	326
12.4 石墨烯简介	326
12.5 石墨烯材料的边缘结构与含氧官能团	327
12.6 石墨烯材料作为催化剂	329
12.6.1 石墨烯催化	329
12.6.2 掺杂石墨烯催化	330
12.6.3 氧化石墨或氧化石墨烯催化	332
12.7 小分子模型催化剂的应用	335
12.8 石墨烯材料催化与其他碳材料催化之间的关系	337
12.9 发展方向和展望	337
参考文献	338
第 13 章 纳米碳催化与金属氧化物催化的比较	346
13.1 钒氧化物在氧化脱氢反应中的研究现状	347
13.1.1 活性位的判定和研究	347
13.1.2 反应路径和反应机理	349
13.1.3 载体的作用	353
13.1.4 反应活性指标: 氧空穴形成能	355
13.2 纳米碳材料催化剂和金属氧化物催化剂的比较	356
13.2.1 活性中心的几何结构和电子结构	357
13.2.2 反应路径的比较	359
13.2.3 反应机理的比较	360
13.2.4 钒原子和碳原子的比较	361
13.3 总结和展望	363
参考文献	364
第 14 章 纳米碳催化的工业应用探索	368
14.1 纳米碳材料的宏量制备	368
14.1.1 碳纳米管和纳米金刚石的宏量制备	368
14.1.2 纳米金刚石	370
14.1.3 石墨烯	371
14.2 碳纳米管的规模功能化	373
14.3 纳米碳材料作为工业催化剂的独特特点	374
14.4 纳米碳材料的工业成型研究	375
14.4.1 传统成型方法	375
14.4.2 整体式碳纳米材料催化剂	376

14.5	纳米碳催化剂在烷烃脱氢反应中的放大应用探索	381
14.5.1	反应条件对纳米碳催化剂催化烷烃脱氢反应活性和选择性的影响	381
14.5.2	CO ₂ 和N ₂ O作为氧化剂催化乙苯脱氢	382
14.5.3	纳米碳催化及在烷烃脱氢反应中的稳定性能测试	383
14.6	结束语	384
	参考文献	385
第15章	展望	388
	索引	391

第 1 章 绪 论

1.1 纳米碳材料

自从 20 世纪 90 年代日本科学家关于碳纳米管的文章在《自然》杂志发表以来, 纳米碳材料, 以及以纳米碳为主体的纳米科学和技术已经取得了巨大的发展^[1,2]。纳米科学和技术正在走向我们的日常生活, 而对纳米尺度材料及物理现象的研究改变了我们对很多物理及化学现象的认识。为了在原子、分子尺度进行更深入的研究, 人们研制和开发了包括扫描隧道显微镜、高分辨电子显微镜等一系列先进的、高分辨率的科研方法和仪器, 这些新的研究方法和手段促进了纳米科学和技术的发展。纳米科学的研究, 逐步从刚开始的纳米材料的合成(如量子点、纳米带、纳米管等)及相应的物理化学性质表征走向宏量可控合成及其在各个领域的应用研究。

纳米碳材料是纳米材料的典型代表。如本书第 2 章所述, 纳米碳材料可以以各种各样的形态出现, 包括富勒烯(C_{60})、碳纳米管(carbon nanotube)、纳米金刚石(nanodiamond)及其他各种形貌的纳米碳材料。近几年成为纳米碳研究热点的石墨烯(graphene)是纳米碳材料家族中一个古老而又年轻的成员。整体上看, 纳米碳材料构成了一个具有零维、一维、二维及多维形态的体系, 而以 sp^3 杂化形式存在的纳米金刚石则是纳米碳材料体系中一个独特的成员。纳米碳材料有很多奇特的物理性质, 有些是因其形貌决定的, 有些是因其原子排列方式(比如手性)决定的, 有些则是因其弯曲或者缺陷所决定的。这些丰富而奇特的性质吸引了人们的研究兴趣, 如图 1-1 所示。虽然十多年过去了, 各国科学家对纳米碳的研究还一直是有增无减。

传统的炭材料, 例如活性炭(activated carbon)、工业炭黑(carbon black)在催化工业已经具有广泛的应用, 其主要是用作吸附剂(adsorbent)和金属粒子的载体。这些传统的炭材料具有高的比表面、微小的孔道, 有时还具有良好的石墨化程度(进而有优良的导电性)。这些炭材料还具有很好的化学惰性(但在高温有氧条件下却容易燃烧)、可调控的表面化学性质, 例如可以改变亲疏水性, 掺杂杂原子和附加各种官能团(functional groups), 实现对这些炭材料有针对性的改性^[3]。当然这些传统炭材料的最大优势是制造工艺成熟, 价格合理, 全球每年都有上千万吨的产品。那么相对这些价格便宜且生产制备技术成熟的传统炭材料, 纳米碳又有什么样的优势呢?