



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十四五”时期国家重点
出版物出版专项规划项目

化学前瞻性基础研究
分子科学前沿丛书
总主编 席振峰 张德清

Frontier of Nano Carbon Materials

纳米碳材料前沿

王春儒 张 锦
李玉良 彭海琳 编著



Frontier of Nano Carbon Materials



華東理工大學出版社



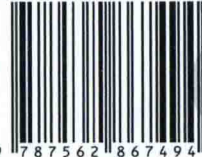
扫描关注官方微信

華東理工大學出版社



华理能源与环境出版中心

ISBN 978-7-5628-6749-4



9 787562 867494 >

定价: 368.00元



“十四五”时期国家重点
出版物出版专项规划项目

化学前瞻性基础研究
分子科学前沿丛书
总主编 席振峰 张德清

Frontier of Nano Carbon Materials

纳米碳材料前沿

王春儒 张 锦
李玉良 彭海琳 编著



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

纳米碳材料前沿 / 王春儒等编著. --上海: 华东理工大学出版社, 2024.7. -- ISBN 978-7-5628-6749-4
I. TB383
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024PT4521 号

内容提要

“制备决定未来”, 纳米碳材料的发展应立足于结构可控制备, 发展放量制备及产业化装备研制等核心技术, 明确纳米碳材料的市场需求, 建立并规范材料的标准, 进一步开拓纳米碳材料的应用领域。本书即在此背景下编著出版, 内容涵盖目前纳米碳材料的四大领域, 按照发现的时间顺序, 系统讨论了富勒烯、碳纳米管、石墨烯和石墨炔的过去、现在和将来。

我国纳米碳材料的研究已经处于全球材料研究领域的第一方阵, 从材料制备、性质到应用研究、产业化推进等方面, 都处于世界领先水平。富勒烯是我国科学家较早关注的纳米碳材料, 目前已经从制备技术和性质研究走向了太阳能电池、疾病治疗、量子材料等应用领域; 在碳纳米管研究领域, 我国科学家在手性控制制备、纳电子器件应用、锂电池导电浆料工业应用等方面都取得了重大进展; 在石墨烯领域的研究已经走在世界前列, 大面积超洁净石墨烯薄膜的制备展示了石墨烯玻璃等撒手铜级应用; 石墨炔是具有中国标签的新型纳米碳材料, 具有优异的电学性质和独特的结构特性, 目前我国科学家已经实现从石墨炔的结构控制制备到能源和催化应用等方面的重要突破。

项目统筹 / 马夫娇 韩 婷

责任编辑 / 马夫娇

责任校对 / 陈婉毓

装帧设计 / 周伟伟

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: 021-64250306

网址: www.ecustpress.cn

邮箱: zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 上海雅昌艺术印刷有限公司

开 本 / 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 / 30.75

字 数 / 658 千字

版 次 / 2024 年 7 月第 1 版

印 次 / 2024 年 7 月第 1 次

定 价 / 368.00 元

版权所有 侵权必究

MOLECULAR SCIENCES

化学前瞻性基础研究·分子科学前沿丛书

丛书编委会

学术顾问 包信和 中国科学院院士

丁奎岭 中国科学院院士

总主编 席振峰 中国科学院院士

张德清 中国科学院化学研究所,研究员

执行主编 王 树 中国科学院化学研究所,研究员

编委 (按姓氏笔画排列)

王春儒 毛兰群 朱道本 刘春立 严纯华 李玉良 吴海臣

宋卫国 张文雄 张 锦 陈 鹏 邵元华 范青华 郑卫军

郑俊荣 宛新华 赵 江 侯小琳 骆智训 郭治军 彭海琳

葛茂发 谢金川 裴 坚 戴雄新

总序一

分子科学是化学科学的基础和核心,是与材料、生命、信息、环境、能源等密切交叉和相互渗透的中心科学。当前,分子科学一方面攻坚惰性化学键的选择性活化和精准转化、多层次分子的可控组装、功能体系的精准构筑等重大科学问题,催生新领域和新方向,推动物质科学的跨越发展;另一方面,通过发展物质和能量的绿色转化新方法不断创造新分子和新物质等,为解决卡脖子技术提供创新概念和关键技术,助力解决粮食、资源和环境问题,支撑碳达峰、碳中和国家战略,保障人民生命健康,在满足国家重大战略需求、推动产业变革方面发挥源头发动机的作用。因此,持续加强对分子科学研究的支持,是建设创新型国家的重大战略需求,具有重大战略意义。

2017年11月,科技部发布“关于批准组建北京分子科学等6个国家研究中心”的通知,依托北京大学和中国科学院化学研究所的北京分子科学国家研究中心就是其中之一。北京分子科学国家研究中心成立以来,围绕分子科学领域的重大科学问题,开展了系列创新性研究,在资源分子高效转化、低维碳材料、稀土功能分子、共轭分子材料与光电器件、可控组装软物质、活体分子探针与化学修饰等重要领域上形成了国际领先的集群优势,极大地推动了我国分子科学领域的发展。同时,该中心发挥基础研究的优势,积极面向国家重大战略需求,加强研究成果的转移转化,为相关产业变革提供了重要的支撑。

北京分子科学国家研究中心主任、北京大学席振峰院士和中国科学院化学研究所张德清研究员组织中心及兄弟高校、科研院所多位专家学者策划、撰写了“分子科学前沿丛书”。丛书紧密围绕分子体系的精准合成与制备、分子的可控组装、分子功能体系的构筑与应用三大领域方向,共9分册,其中“分子科学前沿”部分有5分册,“学科交叉前沿”部分有4分册。丛书系统总结了北京分子科学国家研究中心在分子科学前沿交叉领域取得的系列创新研究成果,内容系统、全面,代表了国内分子科学前沿交叉研究领域最高水平,具有很高

的学术价值。丛书各分册负责人以严谨的治学精神梳理总结研究成果,积极总结和提炼科学规律,极大提升了丛书的学术水平和科学意义。该套丛书被列入“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目,并得到了国家出版基金的大力支持。

我相信,这套丛书的出版必将促进我国分子科学研究取得更多引领性原创研究成果。

包信和

中国科学院院士

中国科学技术大学

总序二

化学是创造新物质的科学,是自然科学的中心学科。作为化学科学发展的新形式与新阶段,分子科学是研究分子的结构、合成、转化与功能的科学。分子科学打破化学二级学科壁垒,促进化学学科内的融合发展,更加强调和促进与材料、生命、能源、环境等学科的深度交叉。

分子科学研究正处于世界科技发展的前沿。近二十年的诺贝尔化学奖既涵盖了催化合成、理论计算、实验表征等化学的核心内容,又涉及生命、能源、材料等领域中的分子科学问题。这充分说明作为传统的基础学科,化学正通过分子科学的形式,从深度上攻坚重大共性基础科学问题,从广度上不断催生新领域和新方向。

分子科学研究直接面向国家重大需求。分子科学通过创造新分子和新物质,为社会可持续发展提供新知识、新技术、新保障,在解决能源与资源的有效开发利用、环境保护与治理、生命健康、国防安全等一系列重大问题中发挥着不可替代的关键作用,助力实现碳达峰碳中和目标。多年来的实践表明,分子科学更是新材料的源泉,是信息技术的物质基础,是人类解决赖以生存的粮食和生活资源问题的重要学科之一,为根本解决环境问题提供方法和手段。

分子科学是我国基础研究的优势领域,而依托北京大学和中国科学院化学研究所的北京分子科学国家研究中心(下文简称“中心”)是我国分子科学研究的中坚力量。近年来,中心围绕分子科学领域的重大科学问题,开展基础性、前瞻性、多学科交叉融合的创新研究,组织和承担了一批国家重要科研任务,面向分子科学国际前沿,取得了一批具有原创性意义的研究成果,创新引领作用凸显。

北京分子科学国家研究中心主任、北京大学席振峰院士和中国科学院化学研究所张德清研究员组织编写了这套“分子科学前沿丛书”。丛书紧密围绕分子体系的精准合成与制

备、分子的可控组装、分子功能体系的构筑与应用三大领域方向,立足分子科学及其学科交叉前沿,包括9个分册:《物质结构与分子动态学研究进展》《分子合成与组装前沿》《无机稀土功能材料进展》《高分子科学前沿》《纳米碳材料前沿》《化学生物学前沿》《有机固体功能材料前沿与进展》《环境放射化学前沿》《化学测量学进展》。该套丛书梳理总结了北京分子科学国家研究中心自成立以来取得的重大创新研究成果,阐述了分子科学及其交叉领域的发展趋势,是国内第一套系统总结分子科学领域最新进展的专业丛书。

该套丛书依托高水平的编写团队,成员均为国内分子科学领域各专业方向上的一流专家,他们以严谨的治学精神,对研究成果进行了系统整理、归纳与总结,保证了编写质量和内容水平。相信该套丛书将对我国分子科学和相关领域的发展起到积极的推动作用,成为分子科学及相关领域的广大科技工作者和学生获取相关知识的重要参考书。

得益于参与丛书编写工作的所有同仁和华东理工大学出版社的共同努力,这套丛书被列入“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目,并得到了国家出版基金的大力支持。正是有了大家在各自专业领域中的倾情奉献和互相配合,才使得这套高水准的学术专著能够顺利出版问世。在此,我向广大读者推荐这套前沿精品著作“分子科学前沿丛书”。



中国科学院院士

上海交通大学/中国科学院上海有机化学研究所

丛书前言

作为化学科学的核心,分子科学是研究分子的结构、合成、转化与功能的科学,是化学科学发展的新形式与新阶段。可以说,20 世纪末期化学的主旋律是在分子层次上展开的,化学也开启了以分子科学为核心的发展时代。分子科学为物质科学、生命科学、材料科学等提供了研究对象、理论基础和研究方法,与其他学科密切交叉、相互渗透,极大地促进了其他学科领域的发展。分子科学同时具有显著的应用特征,在满足国家重大需求、推动产业变革等方面发挥源头发动机的作用。分子科学创造的功能分子是新一代材料、信息、能源的物质基础,在航空、航天等领域关键核心技术中不可或缺;分子科学发展高效、绿色物质转化方法,助力解决粮食、资源和环境问题,支撑碳达峰、碳中和国家战略;分子科学为生命过程调控、疾病诊疗提供关键技术和工具,保障人民生命健康。当前,分子科学研究呈现出精准化、多尺度、功能化、绿色化、新范式等特点,从深度上攻坚重大科学问题,从广度上催生新领域和新方向,孕育着推动物质科学跨越发展的重大机遇。

北京大学和中国科学院化学研究所均是我国化学科学研究的优势单位,共同为我国化学事业的发展做出过重要贡献,双方研究领域互补性强,具有多年合作交流的历史渊源,校园和研究所园区仅一墙之隔,具备“天时、地利、人和”的独特合作优势。本世纪初,双方前瞻性、战略性地将研究聚焦于分子科学这一前沿领域,共同筹建了北京分子科学国家实验室。在此基础上,2017 年 11 月科技部批准双方组建北京分子科学国家研究中心。该中心瞄准分子科学前沿交叉领域的重大科学问题,汇聚了众多分子科学研究的杰出和优秀人才,充分发挥综合性和多学科的优势,不断优化校所合作机制,取得了一批创新研究成果,并有力促进了材料、能源、健康、环境等相关领域关键核心技术中的重大科学问题突破和新兴产业发展。

基于上述研究背景,我们组织中心及兄弟高校、科研院所多位专家学者撰写了“分子科

学前沿丛书”。丛书从分子体系的合成与制备、分子体系的可控组装和分子体系的功能与应用三个方面,梳理总结中心取得的研究成果,分析分子科学相关领域的发展趋势,计划出版9个分册,包括《物质结构与分子动态学研究进展》《分子合成与组装前沿》《无机稀土功能材料进展》《高分子科学前沿》《纳米碳材料前沿》《化学生物学前沿》《有机固体功能材料前沿与进展》《环境放射化学前沿》《化学测量学进展》。我们希望该套丛书的出版将有力促进我国分子科学领域和相关交叉领域的发展,充分体现北京分子科学国家研究中心在科学理论和知识传播方面的国家功能。

本套丛书是“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目“化学前瞻性基础研究丛书”的系列之一。丛书既涵盖了分子科学领域的基本原理、方法和技术,也总结了分子科学领域的最新研究进展和成果,具有系统性、引领性、前沿性等特点,希望能为分子科学及相关领域的广大科技工作者和学生,以及企业界和政府管理部门提供参考,有力推动我国分子科学及相关交叉领域的发展。

最后,我们衷心感谢积极支持并参加本套丛书编审工作的专家学者、华东理工大学出版社各级领导和编辑,正是大家的认真负责、无私奉献保证了丛书的顺利出版。由于时间、水平等因素限制,丛书难免存在诸多不足,恳请广大读者批评指正!



北京分子科学国家研究中心

前言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。材料技术的每一次进步,几乎都会推进生产力的发展,甚至会促进人类社会的进步与飞跃。时至今日,人们对材料的探索也从未停歇。纳米碳材料是过去三十年来材料科学领域最重要的科学发现,其发现者已获得诺贝尔物理学奖和化学奖,而目前人们对纳米碳材料的探索热度不减,甚至犹有过之。以碳纳米管和石墨烯为代表的纳米碳材料具有远高于半导体硅材料的载流子迁移率、超高的热导率和力学强度,有望在未来半导体、微纳电子、能源和轻质高强材料等领域发挥核心作用,成为主导未来高科技产业竞争的战略材料之一。发展具有中国标签的新型纳米碳材料和新兴纳米碳材料产业是目前面临的重要机遇。

人类历史上第一次获得的纳米碳材料是以 C_{60} 为代表的富勒烯。1985 年,英国科学家 Harold W. Kroto 和美国科学家 Robert F. Curl、Richard E. Smalley 在美国莱斯大学首次制备出富勒烯,即“ C_{60} 分子”,并推测其类似于足球的中空笼子结构,他们为其取名“富勒烯”(Buckminster fullerene),以此向 1967 年设计蒙特利尔世界博览会短程线拱顶的美国馆建筑师 Richard B. Fuller 致敬。富勒烯也以“足球烯”“巴基球”等别称闻名于世。富勒烯开创了人类合成纳米碳材料的先河,为人类打开了纳米碳材料世界的大门。1996 年,三位科学家也因发现富勒烯荣获诺贝尔化学奖。经过 30 多年的探索与发展,现在富勒烯被广泛应用于结构材料、润滑油、化妆品和生物医药等领域。

在富勒烯研究推动下,1991 年一种更加奇特的碳结构——碳纳米管被日本电子公司(NEC)的 Sumio Iijima 发现,两年后,直径为 1 nm 的单壁碳纳米管也被正式报道。单壁碳纳米管为中空의管状结构,管身由一系列六元碳环组成,管一端可以看作“半个”富勒烯结构,多壁碳纳米管则可看作由一系列单壁管同轴嵌套组成。观察其结构可以发现,碳纳米管可以分为三种类型:轴对称的锯齿型(zigzag)、扶手椅型(armchair)和不具有轴对称与反演中心的手性碳管。分析其成键,可以发现碳原子呈 sp^2 杂化,彼此成键,并且也具有离

域共轭 π 电子,这与石墨层内原子排列和成键规律非常类似,因此碳纳米管也是热和电的良导体,并且其力学强度极高,单根碳纳米管拉伸强度可达 100 GPa。而由于其是一维管状纳米结构,因此也有独特的性质,即呈现一维电子气特性,碳纳米管的能带结构中存在范霍夫奇点,并且碳纳米管也有金属性与半导体性之分,若不特殊控制,随机合成的单壁碳纳米管中半导体性碳纳米管占 2/3。研究发现,碳纳米管的迁移率高达 $10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,远强于硅。基于这种特性,人们非常期待碳纳米管可以取代硅,作为下一代半导体的沟道材料。目前,5 nm 沟道宽度碳纳米管场效应晶体管已经成功制备;而在 2019 年,碳基微处理器 RV16X - NANO 被麻省理工学院(MIT)成功制造出来,其由 14000 多个碳纳米管 CMOS 晶体管组成,可执行 32 位指令。可以说,场效应晶体管及集成芯片一直是碳纳米管最受人们期待的应用方向之一。除此之外,碳纳米管还被期待应用于导电薄膜、热管理材料、增强剂等其他多种门类。目前,碳纳米管产业化也已经在逐步推进,人们已经可以获取商品化的碳纳米管,但是其撒手铜级应用仍有待进一步突破。

石墨烯是人类材料发展史上的又一里程碑式的发现。石墨烯最初是由英国曼彻斯特大学的两位科学家 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 于 2004 年通过石墨晶体机械剥离得到的。石墨烯的发现打破了朗道等人预言的“二维晶体不会存在”的规律,而利用胶带等机械剥离范德瓦耳斯材料获得较大面积的少层或单层二维材料的方法非常具有普适性,石墨烯本身与其被发现的过程共同为人们推开了二维材料世界的大门。六年之后,2010 年,两位科学家也因此荣获诺贝尔物理学奖,这是碳材料领域获得的第二个诺贝尔奖。石墨烯的结构可以看作单层石墨,其成键方式与石墨完全相同,但是只有一个原子层厚度。石墨烯具有优异的力学、电学、热学、光学性质。石墨烯是已知强度最高的材料之一,同时还具有很好的韧性,理论杨氏模量达 1.0 TPa,固有的拉伸强度为 130 GPa;石墨烯没有带隙,是典型的狄拉克材料,其能带结构中存在线性色散特性曲线,迁移率达 $10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;石墨烯的热导率为 $5300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,是迄今为止导热系数最高的碳材料;石墨烯具有非常良好的光学特性,在较宽波长范围内吸收率约为 2.3%。目前石墨烯是纳米碳材料领域最热门的研究内容之一,并且也已经逐步推广到产业界。学术界和产业界通力合作,已经研发了许多产品,诸如石墨烯粉体、石墨烯薄膜、烯碳光纤、石墨烯玻璃等,不一而足。但是,与碳纳米管类似,实现石墨烯撒手铜级应用、制备生产拳头产品,仍是目前行业内共同面临的挑战。

石墨烯等材料的成功制备也鼓舞着人们进一步去探索新型纳米碳材料,特别是从碳的

多样杂化态入手,去开发符合人们需要的新材料。实际上,早在1987年就有人沿着这一思路进行过思考:著名理论科学家 R. H. Baughman 等首次提出了一种由 sp 和 sp^2 杂化碳原子共同构成的二维碳材料,该结构被认为与其他以炔基结构为主要骨架结构的碳材料相比更稳定,是最有可能被人工合成的、非天然的碳同素异形体之一。而后,理论计算表明,石墨炔同样具有十分优异的电子学性质,甚至在某些方面可能超过现有的石墨烯(这部分内容将在文中详细讨论)。2010年,中国科学院化学研究所李玉良院士团队首次以六炔基苯为前驱体,通过铜催化的分子间端炔偶联反应在铜箔表面成功制备了大面积的石墨炔薄膜,为石墨炔从理论研究向实验研究的转变奠定了基础。许多纳米碳材料,如碳纳米管、石墨烯等均具有独特的电子学性质,石墨炔也不例外,甚至可以说是最具有吸引力的独特性质。对石墨炔电子学性质研究的结果表明,具有六方对称性的石墨炔的能带结构中也出现了狄拉克锥,并且石墨炔具有本征带隙,是高迁移率的直接带隙半导体,这意味着石墨炔在电子器件领域的应用将非常有吸引力。另外,石墨炔含有共轭二炔键,使得材料在保持一定的结构稳定性之余,还保持一定的化学活性,其为富电子体系,非常有研究价值。目前,石墨炔在能源、催化等领域正发挥着日益重要的作用。

我国对纳米碳材料的研究已经处于全球材料研究领域的第一方阵,在材料制备、性质和应用的研究、产业化推进等方面,都处于世界领先水平。富勒烯是我国科学家较早关注的纳米碳材料,目前其制备技术和性质研究已经应用于太阳能电池、疾病治疗、量子材料等应用领域,中国科学院化学研究所王春儒研究员团队实现了富勒烯在肿瘤等重大疾病治疗方面的应用。在碳纳米管研究领域,我国科学家在手性控制制备、纳电子器件应用、锂电池导电浆料工业应用等方面都取得了重大进展,北京大学张锦院士和李彦教授分别实现了单一手性单壁碳纳米管的可控制备,北京大学彭练矛院士实现了5 nm单壁碳纳米管CMOS器件,这些工作产生了重要的国际影响,发表在 *Nature*、*Science* 等期刊上;产业化方面,北京天奈科技有限公司建成了产能达1000吨/年的定向碳纳米管生产线,并形成了万吨级动力电池碳浆生产线,制定了碳纳米管导电浆料国家标准。我国在石墨烯领域的研究已经走在世界前列,北京大学刘忠范院士、彭海琳教授团队实现了大面积超洁净石墨烯薄膜的制备,展示了石墨烯玻璃等撒手铜级应用;中国科学院金属研究所成会明院士团队发展了基于电解水的氧化石墨烯的连续化规模制备方法,并通过专利转让,成立深圳烯材科技有限公司。石墨炔是具有中国标签的新型纳米碳材料,具有优异的电学性质和独特的结构特性,由中国科学院化学研究所李玉良院士团队于2010年首次成功制备,目前我国科学家已

经实现了从石墨炔的结构控制制备到能源和催化应用等方面的重要突破。

“制备决定未来”，纳米碳材料的发展应立足于结构可控制备，发展放量制备及产业化装备研制等核心技术，明确纳米碳材料的市场需求，建立并规范材料的标准，进一步开拓纳米碳材料的撒手锏级应用领域。

本书就是在以上这个背景下组织编写的，其内容涵盖目前纳米碳材料的四大领域，按照发现的时间顺序，分为四部分，系统讨论了富勒烯、碳纳米管、石墨烯和石墨炔的过去、现在和将来。在编撰时力争做到系统性、专业性和即时性，本书可供不同层次的读者参考使用，并衷心希望广大读者朋友能开卷有益，对行业的研究工作也有益处。本书中，富勒烯部分由中国科学院化学研究所王春儒研究员、王太山研究员、甄明明、蒋礼、李杰共同完成，卢羽茜和张捷参与了文献整理；碳纳米管部分由北京大学张锦院士编写，北京大学于跃、刘伟铭、孙丹萍、林德武、钱柳、张树辰和焦琨参与了资料的收集和整理，其中林德武负责了整章的修订工作；石墨烯部分由北京大学彭海琳教授编撰，马子腾、王可心、刘晓婷、孙禄钊、李杨立志、杨皓、张金灿、陈恒、竺叶澍、郑黎明、贾开诚和唐际琳参与了资料的收集和整理，其中贾开诚负责了整章的修订工作；石墨炔部分由中国科学院化学研究所李玉良院士、李勇军和刘辉彪研究员共同完成。本书的编者长期工作于纳米碳材料科研一线，在百忙中抽出宝贵时间倾力参与并出色完成了本书的编撰工作，对各位作者的付出，笔者在此深表谢意。华东理工大学出版社的朋友们为本书投入了大量的心血，在此一并感谢！

纳米碳材料的研究纷繁复杂，受限于时间、水平等因素，本书难免存在诸多不足和谬误，恳请广大读者朋友批评指正。

编 者

2024 年 5 月

Chapter 1

第 1 章
来自宇宙星云的
礼物——富勒烯

王春儒, 王太山, 蒋礼, 甄明明,
李杰

Chapter 2

第 2 章
逐渐走向应用的纳米
碳材料——碳纳米管

张锦

1.1	富勒烯概述	004
1.2	富勒烯的制备	009
1.3	富勒烯光电材料	017
1.3.1	富勒烯作为受体材料的应用	017
1.3.2	富勒烯作为修饰层材料的应用	029
1.3.3	富勒烯材料在钙钛矿太阳能电池中的应用	033
1.4	富勒烯生物应用	035
1.4.1	富勒烯的抗自由基功能	036
1.4.2	富勒烯的光动力学治疗功能	041
1.4.3	富勒烯的抗菌抗病功能	043
1.4.4	金属富勒烯的磁共振成像应用	044
1.4.5	金属富勒烯的肿瘤治疗功能	046
1.4.6	富勒烯、金属富勒烯的毒性和组织分布研究	050
1.5	内嵌富勒烯结构与功能	051
1.5.1	内嵌金属富勒烯结构与性质	052
1.5.2	内嵌金属富勒烯的磁性与应用	056
1.5.3	内嵌金属富勒烯的电子学性质与应用	068
1.5.4	内嵌原子富勒烯性质与功能	074
1.5.5	内嵌小分子富勒烯性质与功能	077
	参考文献	082

2.1	碳纳米管的结构	107
2.1.1	几何结构	108
2.1.2	电子结构	109
2.1.3	声子结构	111
2.2	碳纳米管的性质	111

2.2.1	电学性质	111
2.2.2	力学性质	112
2.2.3	光学性质	114
2.2.4	热学性质	114
2.2.5	其他性质	115
2.3	碳纳米管的结构控制制备	116
2.3.1	碳纳米管的化学气相沉积制备	116
2.3.2	碳纳米管的管径控制生长	119
2.3.3	碳纳米管的导电属性控制制备	120
2.3.4	碳纳米管的手性结构控制生长	126
2.4	碳纳米管聚集体的控制制备	134
2.4.1	碳纳米管聚集体	134
2.4.2	碳纳米管水平阵列	135
2.4.3	碳纳米管竖直阵列	139
2.4.4	碳纳米管气凝胶	143
2.4.5	碳纳米管薄膜	145
2.4.6	碳纳米管纤维	146
2.4.7	碳纳米管的宏量制备	148
2.5	碳纳米管复合材料	149
2.5.1	碳纳米管复合材料简介	149
2.5.2	碳纳米管的预处理	150
2.5.3	碳纳米管复合材料的制备方法	153
2.5.4	碳纳米管复合材料的力学性能	156
2.5.5	碳纳米管复合材料的电学性能	159
2.5.6	碳纳米管复合材料的热学性能	161
2.5.7	碳纳米管复合材料其他性能	163
2.5.8	碳纳米管复合材料的难点和展望	165
2.6	碳纳米管的能带工程与电学器件	166
2.6.1	碳纳米管的能带工程	167
2.6.2	碳纳米管电子器件	172
2.6.3	碳纳米管光电子器件	178
2.6.4	其他碳纳米管器件	181
2.6.5	碳纳米管电学应用的展望	183
2.7	碳纳米管储能材料	184