

WILEY

氧化石墨烯 基本原理与应用

Graphene Oxide:
Fundamentals and Applications

[俄罗斯] 艾拉特·M.迪米夫 (Ayrat M.Dimiev)

主编

[瑞典] 齐格弗里德·艾格勒 (Siegfried Eigler)

张强强 何平鸽 俞祎康 杨凯淳 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

氧化石墨烯基本原理与应用

[俄罗斯] 艾拉特·M. 迪米夫 (Ayrat M. Dimiev)

主编

[瑞典] 齐格弗里德·艾格勒 (Siegfried Eigler)

张强强 何平鸽 俞祎康 杨凯淳 译



机械工业出版社

本书系统地介绍了氧化石墨烯自 19 世纪起的历史发展沿革, 不仅涵盖了氧化石墨烯合成过程机理、结构模型、成分组成、化学性质、能谱表征结果以及功能化修饰等相关内容, 同时也介绍了氧化石墨烯在电子传感器件、能源收集存储、薄膜宏观体、复合材料、生物医学、化学催化以及工业化生产方面应用的最新研究进展。本书内容全面详尽, 内容深度和机理解释客观, 是一本学习氧化石墨烯基本原理与相关应用研究的经典著作。

本书很适合石墨烯功能材料领域化学、材料、物理、生物等学科师生以及研究者参阅。

Copyright © 2017 John Wiley and Sons, Ltd

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Graphene Oxide: Fundamentals and Applications, ISBN: 978 - 1 - 119 - 06940 - 9, by Ayrat M. Dimiev and Siegfried Eigler, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2017 - 2498 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

氧化石墨烯基本原理与应用/ (俄罗斯) 艾拉特·M. 迪米夫 (Ayrat M. Dimiev), (瑞典) 齐格弗里德·艾格勒 (Siegfried Eigler) 主编; 张强强等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 8

书名原文: Graphene Oxide: Fundamentals and Applications

ISBN 978-7-111-60623-9

I. ①氧… II. ①艾… ②齐… ③张… III. ①石墨-纳米材料-研究
IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 179757 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 闫洪庆

责任校对: 王明欣 封面设计: 马精明

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 26 印张 · 526 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-60623-9

定价: 119.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010 - 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010 - 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010 - 88379203

金 书 网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

高新科技是推动经济发展和产业升级转化的重要动能，以石墨烯为代表的新型材料被列为未来重点发展的领域之一。作为一种革命性的新型碳纳米材料，石墨烯受到了国家、地方政府以及各界科技人士的广泛关注，国家“十三五”规划也将其列为重点发展的战略前沿之一。在石墨烯材料研究领域，我国目前已成为国际上发展规模最大的几个国家之一，其中发表论文和专利申请数量位居前列。但是，完整追溯所有本领域最近发表的英文文章，即使是业内专家人员也都是比较困难的。而对于国内非专业人员，通常是没办法去逐一阅读这些浩瀚如海的外文出版物。本书译者经过大量查阅石墨烯和氧化石墨烯相关文献资料，发现国内除了中科院刘云圻院士等编著的《石墨烯：从基础到应用》、南开大学陈永胜教授等编著的《石墨烯：新型二维纳米材料》以及清华大学朱宏伟教授等编著的《石墨烯——结构、制备方法与性能表征》等介绍石墨烯相关内容的中文著作之外，几乎没有具体工作来系统化所有发表的氧化石墨烯基础与应用相关的研究成果，为本领域感兴趣的专业研究者和非专业读者提供参考。因此，为指导我国石墨烯资源优化整合和相关发展政策制定，快速推进产业升级和成果转化，抢占石墨烯相关新型高性能功能材料研究领域的前沿制高点，开展石墨烯新材料外文专著资料编译工作将具有重要的意义。经 Ayrat M. Dimiev 博士和 Siegfried Eigler 博士许可，得到 Wiley 出版社授权同意，将本书的中文翻译版权授权给机械工业出版社。本书是政府产业发展政策研究制定者、科研人员、企业管理者等了解氧化石墨烯基础知识与相关应用研究的重要著作之一。

本书由俄罗斯喀山联邦大学碳纳米结构实验室 Ayrat M. Dimiev 博士以及瑞典查尔姆斯理工大学化学和化工学院 Siegfried Eigler 博士主编，2017 年由 Wiley 出版社出版。本书系统地介绍了氧化石墨烯自 19 世纪起的历史发展沿革，不仅涵盖了氧化石墨烯合成过程机理、结构模型、成分组成、化学性质、能谱表征结果以及功能化修饰等相关内容，同时也介绍了氧化石墨烯在电子传感器件、能源收集存储、薄膜宏观体、复合材料、生物医学、化学催化以及工业化生产方面应用的最新研究进展。本书内容全面详尽，内容深度和机理解释客观，是一本学习氧化石墨烯基本原理与相关应用研究的经典著作，很适合石墨烯功能材料领域化学、材料、物理、生物等学科师生以及研究者参阅。

本书的文前部分、术语、第 1~6 章翻译，以及本书译稿汇总和校对由张强强

完成，第7~9章由何平鸽翻译，第10、11章由杨凯淳翻译，第12、13章由俞祎康翻译。

本书在翻译过程中，得到了机械工业出版社、翻译小组成员、研究团队成员的支持和协助，以及“兰州大学‘一带一路’专项项目资助”（Supported by Belt and Road Special Project of Lanzhou University）（项目编号：20181dbrhq001），一并表示感谢。

此外，本书的翻译受限于时间和译者自身能力，存在诸多的不足，敬请读者不吝批评指正。

张强强

2018年5月于兰州大学

原 书 序

本书展示了有关氧化石墨烯研究的最新综述，氧化石墨烯是通过剥离石墨氧化物得到的单片层物质的术语。

虽然氧化石墨是在 19 世纪 50 年代首次合成的，但它仅仅在过去 10 年重新引起了人们的浓厚兴趣，因为它通过在水中相对简单的剥离提供了一种材料产物，即单层功能化石墨烯。石墨烯的功能化由羟基和环氧基等组成，由术语“氧化石墨烯”表示的单层物质因此具有亲水性，使得它们在诸如水一类的溶剂中形成稳定的分散液。这使得化学改性石墨烯（特定类型）的稳定分散液可以容易地被制备，然后以有趣的方式来使用。

幸运的是，可以通过过去 10 年的“早期贡献”给予帮助，包括氧化石墨烯的使用或通过其改性来制备导电聚合物复合材料、由片堆叠组成的薄“纸状”材料以及超级电容器的电极。现在看到关于氧化石墨烯及其衍生物的化学和性质的基本方面，以及应用或潜在应用的相关大量文献的增长令人欣慰。氧化石墨烯及其相关产物或衍生物材料已被证明具有很高的通用性，并已应用于广泛的研究中。

本书很好地涵盖了基本原理和应用两方面内容，有益于了解石墨烯氧化物和相关材料，因此也为思考新的可能性提供了基础。

推测未来可能是有意义的，我在这里只简单地做一些推测。对于氧化石墨烯，以及通常化学改性的石墨烯，存在许多令人兴奋的可能性。随着对官能团的具体位置和分布的更精确控制得以实现，并且在需要时从“石墨烯晶格”有目的地除去碳原子，包括更好的传感器和材料例如复合材料和过滤器等更广泛的应用将出现。还有通过热力学控制折叠或“褶皱”这种吸引人的可能性，以及巧妙设计官能团被“放置”的位置和它们如何相互作用：片内“固定”某些形貌，或者可能是片层间，也可能是与它们周围的环境（这可能是一种折叠，但不限于特定类型的折叠）。

Rodney S. Ruoff

多维碳材料 IBS 中心

韩国蔚山国家科学技术研究院

2016 年 3 月

原 书 前 言

氧化石墨烯 (GO) 已成为近 10 年来研究最广泛的材料之一。它促进了化学/物理和材料科学领域的大规模跨学科研究。由于其独特的性能, GO 已成功通过多种应用测试。这一富有成果的研究领域已经产生了大量的出版物。一些综述文章总结了最新进展。然而截至目前, 将所有已发表的研究进行系统化, 并且帮助对这一领域感兴趣的非专家读者方面只做了少量工作。本书旨在完成这项任务, 每章的内容和本书总体上都是从基础到复杂, 以经典科学领域中典型的类别呈现。这使得本书与众不同, 有别于其他文献。

今天, 即使是专家也很难跟踪该领域最近的所有出版物。对于非专业人员, 通常是不可能去浏览这些浩瀚如海的出版物。由于现代 GO 领域普遍存在混淆, 使得这一任务进一步复杂化。这种混淆主要源于基本概念的滥用, 以及对 GO 化学结构的过度简化和误解。很难确定可信赖的高质量出版物, 这些出版物正确使用基本化学术语, 并正确解释实验数据。识别出正确采用基本化学术语, 以及正确解释实验数据的可信的高质量论文是非常困难的。在本书中, 打算基于可信赖的出版物表示 GO 真实的化学结构, 并正确使用主要的基本概念, 因为它们至今已被确定。

自 2004 年石墨烯时代开始以来, GO 与石墨烯密切相关。那时, GO 主要被认为是石墨烯的前驱体。术语“化学转化的石墨烯”(CCG) 被引入用于还原的氧化石墨烯 (RGO), 以突出 RGO 具有石墨烯相似的性质。在文献中滥用术语“石墨烯”被错误地用来代替 RGO, 会造成非专家读者之间的重大混淆。本书的目标是通过在石墨烯和 RGO 之间划清界限, 并通过展示它们的相似之处, 以及它们的不同之处来帮助读者区分两者。更多的混淆源自于术语 RGO 被错误地用于通过热处理 GO 得到的材料。本书强调这两种材料是截然不同的, 为后者引入术语“热处理氧化石墨烯”(tpGO)。

由于 RGO 的电学特性低于真实石墨烯的电学特性, GO 通常被认为是石墨烯的“弟弟”, 或者是低等级的石墨烯。直到 2011 年左右, 这个观点才占据主导地位。后来证明, 从基础科学的角度和实际应用来看, GO 本身都是一种独特而有价值的材料。GO 超越石墨烯的主要优点是其在水中和几种有机溶剂中的溶解性和可加工性好。GO 的另一个好处是它具有多种化学改性功能, 可以改变其性能。与石墨烯相比, 以 t 为单位进行大规模生产的能力使得 GO 特别适用于应用。在本书中将展示 GO 的所有优点和独特之处。

本书分为两部分：第1部分重点介绍GO的基础知识；第2部分介绍GO的应用。

第1部分以GO的研究开始，它有一个非常漫长的历史。它并不是以2006年GO还原的研究工作开始，因为可以通过查看该时期某些出版物的引用指数来思考。整个20世纪在GO化学特性方面进行了非常严肃和深入的研究。与一些现代出版物相比，这些研究中大部分都是以最好的老派传统进行的，在很多方面具有优势。科学思维的基本原理、研究的方法论以及重要的报告数据的可信度都处于现代GO领域相当罕见的水平。在设计自己的实验之前，通过研究那些早期的作品，可以很容易地避免对实验结果的误解。由于早期研究的重要性以及试图使这两个时代之间的联系成为可能，以20世纪所开展的GO研究的历史回顾作为本书开始（第1章）。这一章是由本领域长期开展研究的专家，即著名的Lerf-Klinowski结构模型建立者之一的Anton Lerf教授编写。

在现代文献中，GO的结构极其简单。这导致误解涉及GO的化学反应。第2章由Ayrat M. Dimiev撰写，旨在阐明GO结构的某些方面。在典型的教科书形式中，GO的形成机理、在水溶液处理过程中的转变以及GO的精细化学结构在方法学上都有描述。就其固有的化学性质如水溶液的酸度来讨论GO的结构。

用于GO表征的方法在第3章中以教程方式给予了综述。这一章对进入该领域的研究人员特别重要，强调了不同方法的优缺点，讨论了几种不同方法有助于理解GO结构的例子。这一章由Siegfried Eigler和Ayrat M. Dimiev共同编写。

在水溶液中，GO剥离为单层片材并形成胶体溶液。从水溶液中，GO薄片可以转移到低分子量醇的相中；酒精的溶液和水溶液一样稳定不沉淀。在一定浓度下，GO溶液形成液晶。第4章由Cristina Vallés综述了GO溶液的流变学。这一章将讨论GO的胶体化学、表面科学、流变学和液体化学。

由于其电子排布配置，GO具有许多显著的光学特性。与原始石墨烯相反，GO在紫外、可见和近红外区域显示出光致发光，这取决于其结构。这个发光的起源和其他相关问题在第5章中由Anton V. Naumov讨论。

GO的化学特性是最大、最难和最有争议的话题。在Siegfried Eigler和Ayrat M. Dimiev撰写的第6章中，讨论了以下主题。首先回顾GO的热稳定性和化学稳定性，然后介绍湿化学非共价功能化方案。接下来讨论的GO的共价功能化是一个非常具有争议的话题。当众所周知的有机化学原理应用于GO时，通过分析经过修饰的GO产物，来证明成功完成反应仍然具有挑战性。本书为一些选定实例的实验结果，提供了另一种解释来证明这一挑战。接下来，总结了化学还原方法，特别强调将真正的化学还原与所谓的“热还原”区分开来。在讨论GO化学性质时，与典型的GO平行，讨论了氧化功能化石墨烯(oxo-G₁)的这些性质，这是一种具有非常低结构缺陷密度的GO。这进一步阐明了GO化学中缺陷的作用。最后，介绍了oxo-G₁的其他性质。oxo-G₁可作为一种化合物，在设计 and 合成功能材料与器件

方面能够控制化学特性。

第2部分对使用还原和非还原形式的GO的应用分别做了综述。还原形式的GO在导电性能需要的地方是非常重要的。这些应用利用RGO和tpGO的类石墨烯特性。

由于其二维特性,根据定义,真正的石墨烯不可用于批量生产。它作为一种基底支撑的材料,只有通过微机械剥离石墨,或者通过在活性催化金属表面化学气相沉积生长来获得。由于前者中存在许多缺陷或散射中心,因此RGO和tpGO的电导率比实际石墨烯低3或4个数量级。尽管如此,在需要大量石墨烯的应用中,GO衍生物是唯一的选择。目前,使用RGO和tpGO进行的研究中,约90%在标题和摘要中都使用了术语“石墨烯”。本书强调,GO衍生物,而不是真正的石墨烯,用于第7章和第8章中综述的应用。

场效应晶体管和传感器是利用GO独特电子特性的两个最有前景的应用。由于它的电学和力学性质、良好的载流子迁移率,以及可见范围透光性,RGO也被认为是制造具有许多应用的透明导电膜的最佳候选者之一。第7章由Samuele Porro和Ignazio Roppolo撰写,总结了GO在上述领域应用的巨大潜力。

tpGO的导电性和高比表面积为其与先进能源系统的整合做出了巨大推动。在第8章中,讨论了将GO集成到两类主要的能量存储系统——锂离子电池和超级电容器中。对于可以实现最佳性能的重要物化性质,以及用于获得这些独特益处的合成方法,给予特别的关注来理解和强调。本章由斯诺迪系统有限公司的首席技术官Cary Michael Hayner撰写,该公司是一家初创公司,开发基于GO新型电极材料的新一代锂离子电池。

由于GO薄片的二维特性及其在水中的溶解性,GO可以通过简单的滴铸或过滤构筑成薄膜。如此形成的GO膜对水分子表现出无阻碍的渗透性,对其他分子和原子是绝对不可渗透的。GO和RGO在选择性膜中的应用在第9章中由Ho Bum Park、Hee Wook Yoon和Young Hoon Cho综述。

由于GO在水和有机溶剂中的可加工性,GO已经被尝试作为一种组分应用到许多复合材料中。将GO掺入聚合物会改变导电性和导热性、降低渗透性并改善力学性能。第10章由Mohsen Moazzami Gudarzi、Seyed Hamed Aboutaleb和Farhad Sharif介绍了这一主题。

GO的生物学应用和毒性研究对于GO在实际应用中的使用至关重要。其他材料,如碳纳米管,被怀疑是有毒或致癌的。因此,目前在分析GO的医学特性和生物学应用方面取得的进展由Larisa Kovbasyuk和Andriy Mokhir在第11章中介绍。

GO及其衍生物具有独特的性质,使它们成为氧化反应、Friedel-Crafts和Michael加成、聚合反应、氧还原反应和光催化作用的催化剂。这种性质由Ioannis V. Pavlidis在第12章中给予综述。

GO 的大规模生产仍然是它商业化的关键。GO 在商业上可行的最关键因素是其成本效益。这不是一个简单的任务，因为 GO 生产涉及产生大量酸性废物和冗长的纯化程序。商业 GO 生产面临的挑战将在第 13 章由 Sean E. Lowe 和 Yu Lin Zhong 讨论。

本书由各领域的专业人士编写，旨在为更广阔的群体提供帮助，包括拓宽其研究领域的专家。

Ayrat M. Dimiev

俄罗斯

Siegfried Eigler

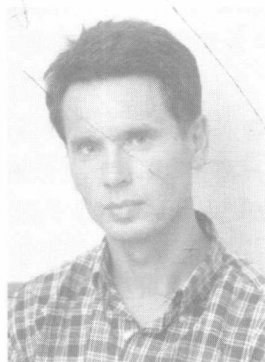
瑞典

本书主编

Ayrat M. Dimiev 博士

先进碳纳米结构实验室，喀山联邦大学，喀山，俄罗斯

Ayrat M. Dimiev 在位于俄罗斯喀山市的喀山联邦大学获得物理化学专业博士学位。在喀山农业大学任助理教授三年后，他移居到美国教授国际高中毕业考试化学课程。在 2018 年，他加入莱斯大学 James M. Tour 教授课题组，在这里他开始在碳领域的研究。他的探究涵盖领域有碳纳米管剪开、碳基介电复合材料、石墨插层化合物以及氧化石墨烯化学特性等。他在相关领域最终的贡献是揭示了石墨插层混合物中阶段转化机理，以及发展了氧化石墨烯的动力学结构模型。2013 年，Dimiev 博士接受来自 AZ 电子材料（现在是美国 EMD 功能材料有限公司，是德国达姆施塔特市 Merck KGaA 企业的业务）的个人邀请，去帮助发展他们新启动的碳项目。在美国 EMD 功能材料有限公司期间，他将自己领域里的专长用于建立和商业化由氧化石墨烯和其他碳纳米结构组成的新产品。2016 年 5 月，Dimiev 博士作为喀山联邦大学先进碳纳米结构实验室的负责人回到他在喀山的母校。Dimiev 博士在碳领域发表了 18 篇论文，引用累计超过 2000 次，同时他拥有 5 项最新发明专利应用。



Siegfried Eigler 博士

化学和化工学院，查尔姆斯理工大学，哥德堡，瑞典

Siegfried Eigler 于 2016 年在 Friedrich - Alexander 大学 Norbert Jux 教授指导下获得有机化学专业博士学位。随后，他在日本 DIC 有限公司分部 DIC - 柏林股份有限公司开展工业研究。相关研究集中在导电高分子和新型半导体单体上。2009 年，他开始关于氧化石墨烯合成和应用的研究工作。两年后，他成为 Friedrich - Alexander 大学讲师和研究助理。在那里，他开展关于氧化石墨烯



合成的深入研究，并且他通过控制合成方法实现了避免碳晶格缺陷。基于这个发现，他可以研究氧化石墨烯可控的化学特性，并且合成了几种新的石墨烯衍生物和复合材料。目前，他的研究集中在石墨烯化学特性的先进控制上。Eigler 博士已发表 27 篇碳研究相关的文章，并且申请湿化学合成石墨烯相关专利一项，该专利技术可以实现缺陷密度控制。他接受了瑞典哥德堡市查尔姆斯理工大学提供的职位，在 2016 年开始成为副教授。

本书参编

Seyed Hamed Aboutalebi 凝聚态国家重点实验室, 基础科学研究所 (IPM), 德黑兰, 伊朗

Young Hoon Cho 能源工程学院, 汉阳大学, 首尔, 韩国

Mohsen Moazzami Gudarzi 无机和分析化学学院, 日内瓦大学, 日内瓦, 瑞士

Cary Michael Hayner 首席技术官, 斯诺迪系统有限公司, 芝加哥, 伊利诺伊州, 美国

Larisa Kovbasyuk 化学与药学学院, 无机化学 II, Friedrich - Alexander 大学, 埃尔朗根, 德国

Anton Lerf 瓦尔特 - 巴法力亚科学院迈斯纳研究所, 加尔兴, 德国

Sean E. Lowe 材料科学与工程学院, 莫纳什大学, 克莱顿, 澳大利亚

Andriy Mokhir 化学与药学学院, 无机化学 II, Friedrich - Alexander 大学, 埃尔朗根, 德国

Anton V. Naumov 物理与天文学学院, 得克萨斯基督大学, 沃思堡市, 美国

Ho Bum Park 能源工程学院, 汉阳大学, 首尔, 韩国

Ioannis V. Pavlidis 生物化学学院, 卡塞尔大学, 卡塞尔, 德国

Samuele Porro 应用科学与技术学院, 都灵理工大学, 都灵, 意大利

Ignazio Roppolo 太空人类机器人中心, 意大利理工学院, 都灵, 意大利

Farhad Sharif 高分子工程与色彩技术学院, 阿米尔卡比尔理工大学, 德黑兰, 伊朗

Cristina Vallés 材料学院, 曼彻斯特大学, 曼彻斯特, 英国

Hee Wook Yoon 能源工程学院, 汉阳大学, 首尔, 韩国

Yu Lin Zhong 材料科学与工程学院, 莫纳什大学, 克莱顿, 澳大利亚

目 录

译者序
原书序
原书前言
本书主编
本书参编

第 1 部分 基本原理

第 1 章 氧化石墨烯的沿革——从起源到石墨烯热潮	2	参考文献	27
1.1 引言	2	第 2 章 氧化石墨烯的形成机理和化学结构	33
1.2 氧化石墨烯制备	4	2.1 引言	33
1.2.1 改进和简化氧化石墨烯制备的试验	4	2.2 结构的基本概念	34
1.2.2 石墨的过氧化	6	2.3 制备方法	35
1.2.3 形成机理——首次近似	7	2.4 形成机理	37
1.3 重要含氧官能团的发现以及相关结构模型的发展	9	2.4.1 理论研究和系统复杂性	37
1.3.1 石墨氧化物成分解析	9	2.4.2 第一步：阶段 1 $H_2SO_4 - GIC$ 的形成	38
1.3.2 1930 ~ 2006 年结构模型的创造	10	2.4.3 第二步：阶段 1 $H_2SO_4 - GIC$ 转化为 PGO	39
1.3.3 形成机理的考虑——第二次近似	14	2.4.4 PGO 结构	41
1.4 氧化石墨烯性质	16	2.4.5 第三步：PGO 的剥离	43
1.4.1 热降解和它的产物	16	2.5 与水接触时 PGO 化学结构的转变	44
1.4.2 化学还原反应	17	2.6 化学结构和酸性的起源	46
1.4.3 与酸和碱的反应	19	2.6.1 结构模型和真实的结构	46
1.4.4 “渗透膨胀”：水合作用和胶体形成	19	2.6.2 酸性的来源和动态结构模型	52
1.4.5 氧化石墨烯的酸性	21	2.7 缺陷密度和含氧功能化石墨烯	59
1.4.6 插层和功能化反应	24	2.7.1 通过 Charpy - Hummers 方法含氧功能化石墨烯	59
1.4.7 官能团以及它们对氧化石墨烯形成和破坏的反应与关系	25	2.7.2 从石墨硫酸含氧功能化石墨烯	63
1.5 总结	26	2.8 应对两组分结构模型的挑战	66

2.9 块状氧化石墨的结构	70	4.3 与其他体系的比较	127
2.10 总结	74	4.3.1 与含水聚合物基 质体系比较	127
参考文献	74	4.3.2 GO 和氧化碳纳米管水分散体的 比较: 维度的作用	129
第3章 表征技术	78	4.4 总结和展望	130
3.1 氧化石墨烯核磁共振谱	78	参考文献	131
3.1.1 固态核磁共振谱	78	第5章 氧化石墨烯的光学性质	135
3.1.2 氧化石墨烯的核磁共振谱	79	5.1 引言	135
3.1.3 讨论	85	5.2 吸收特性	135
3.2 红外谱	86	5.3 拉曼散射	140
3.3 X 射线光电子能谱	89	5.4 光致发光	142
3.4 拉曼谱	92	5.5 氧化石墨烯的量子点	153
3.4.1 概述	92	5.6 应用	154
3.4.2 分子的拉曼谱	93	参考文献	155
3.4.3 石墨烯、GO 和 RGO 的 拉曼谱	93	第6章 氧化石墨烯的功能化与 还原	160
3.4.4 石墨烯的缺陷	95	6.1 引言	160
3.4.5 GO 和 RGO 的拉曼谱	98	6.2 氧化石墨烯的结构	161
3.4.6 统计拉曼显微镜 (SRM)	100	6.3 氧化石墨烯的稳定性	163
3.4.7 展望	103	6.3.1 氧化石墨烯的热稳定性	163
3.5 显微镜方法	103	6.3.2 氧化石墨烯在水溶液中的 稳定性及化学性质	163
3.5.1 扫描电子显微镜	103	6.3.3 含氧功能化石墨烯的 稳定性	166
3.5.2 原子力显微镜	104	6.4 非共价化学反应	168
3.5.3 透射电子显微镜	106	6.5 共价键化学反应	170
3.5.4 高分辨率透射电子显微镜	107	6.5.1 主要在平面上发生的反应	171
参考文献	110	6.5.2 平面上 C-C 键形成的 认识	174
第4章 氧化石墨烯分散体的 流变性	112	6.5.3 边缘处的反应	175
4.1 氧化石墨烯分散体的液晶特性	112	6.6 氧化石墨烯的还原与歧化	182
4.1.1 液晶和 Onsager 理论	112	6.6.1 还原	182
4.1.2 向列相碳纳米材料	112	6.6.2 歧化作用	185
4.2 GO 液晶水系分散体的 流变特性	114	6.6.3 还原方法	188
4.2.1 动态剪切特性	115	6.6.4 含氧功能化石墨烯的 还原	190
4.2.2 均匀剪切特性	118		
4.2.3 结构的恢复	122		
4.2.4 调整 GO 分散体的流变性以 实现可控制备	123		
4.2.5 具有极大 Kerr 系数的 电光开关	125		

6.7 与还原氧化石墨烯的反应	193	酯——热重分析	197
6.8 氧化石墨烯可控的化学性质	195	6.8.3 含氧功能化石墨烯的 合成修饰	197
6.8.1 多分散以及功能化石墨烯的 命名	196	6.9 讨论	203
6.8.2 氧化石墨烯中的硫酸		参考文献	204
第2部分 应用			
第7章 场效应晶体管、传感器与 透明导电膜	212	9.2 氧化石墨烯膜: 基于结构概述 ...	272
7.1 场效应晶体管	212	9.3 氧化石墨烯膜应用于分子筛	274
7.2 传感器	216	9.4 氧化石墨烯膜应用于水净化和 海水淡化领域	278
7.2.1 气体传感器	217	9.5 膜的其他应用	283
7.2.2 湿度传感器	217	9.5.1 燃料电池膜	283
7.2.3 生物传感器	220	9.5.2 新一代电池的离子 选择性膜	284
7.3 还原氧化石墨烯透明导电膜	221	9.5.3 脱水应用	284
7.4 基于氧化石墨烯的忆阻器	224	9.6 总结及研究展望	284
7.4.1 器件的制备	225	参考文献	285
7.4.2 转换机理	226	第10章 氧化石墨烯基复合材料 ...	287
参考文献	228	10.1 引言	287
第8章 能量收集及存储	235	10.1.1 石墨与聚合物	288
8.1 太阳电池	235	10.1.2 氧化石墨基复合材料	290
8.2 锂离子电池	236	10.1.3 碳纳米管与石墨烯 (氧化石墨烯)	291
8.2.1 概述	236	10.2 将氧化石墨烯与聚合物混合的 原因	295
8.2.2 电化学原理	236	10.2.1 制备高强聚合物: 机械性能	296
8.2.3 负极应用	239	10.2.2 电学性能	303
8.2.4 正极应用	247	10.2.3 热传导性	308
8.2.5 新兴应用	251	10.2.4 阻隔性能	310
8.3 超级电容器	255	10.3 石墨烯与氧化石墨烯	312
8.3.1 概述	255	10.3.1 尺寸效应	313
8.3.2 电化学基础	255	10.3.2 介质对氧化石墨烯结构的 影响	313
8.3.3 纯碳电极	256	10.3.3 提纯工艺	316
8.3.4 赝电容特性的氧化石墨烯基 复合电极	263	10.3.4 热不稳定性	317
8.4 研究展望及发展机会	266	10.3.5 健康问题	317
参考文献	267	10.3.6 环境影响	319
第9章 氧化石墨烯膜应用于 分子筛	271		
9.1 氧化石墨烯膜的出现: 两种方式	271		

10.4 总结	320	12.4 聚合反应	359
参考文献	320	12.5 氧化还原反应	360
第 11 章 氧化石墨烯毒理学研究与 生物学应用	332	12.6 Friedel - Crafts 和 Michael 加成 ...	363
11.1 引言	332	12.7 光催化	364
11.2 氧化石墨烯毒理性	333	12.8 其他层状碳基材料和 GO 复合材料的 催化活性	364
11.3 毒理机制	334	12.8.1 未功能化碳基纳米材料	364
11.3.1 膜目标	334	12.8.2 混合催化剂和选择性的 应用	364
11.3.2 氧化应激	335	12.9 展望	368
11.3.3 其他因素	337	参考文献	368
11.4 氧化石墨烯生物学应用	337	第 13 章 工业化生产氧化石墨烯的 挑战	373
11.4.1 氧化石墨烯在癌症和细菌感染 治疗中的应用	337	13.1 引言	373
11.4.2 光热疗法	337	13.2 石墨烯市场的范围和规模	373
11.4.3 氧化石墨烯作为药物载体 ...	339	13.3 氧化石墨烯合成	376
11.5 生物分析应用	342	13.4 氧化石墨烯生产中的问题	377
致谢	344	13.4.1 石墨来源	377
参考文献	345	13.4.2 反应条件	379
第 12 章 催化	348	13.4.3 处理及提纯	382
12.1 引言	348	13.4.4 存储、处理及质量控制	385
12.2 氧化石墨烯性质	348	13.5 现有成就及未来发展方向	386
12.3 氧化活性	350	参考文献	387
12.3.1 氧化石墨烯的氧化反应	350	术语	391
12.3.2 硫化物氧化	356		
12.3.3 功能化材料	358		