

Graphene
Nanocomposites

石墨烯 纳米复合材料

杨序纲 吴琪琳 编著

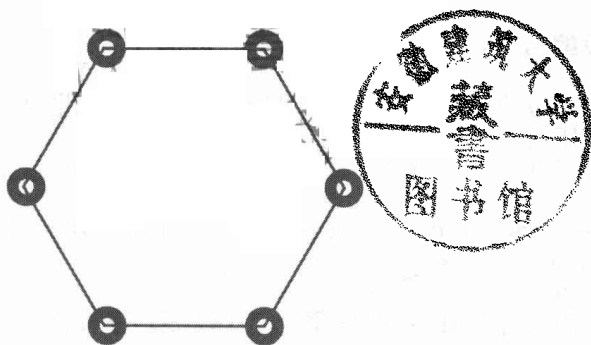


化学工业出版社

石墨烯

纳米复合材料

杨序纲 吴琪琳 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书涉及聚合物基、陶瓷基和金属基石墨烯增强纳米复合材料,阐述它们的主要制备方法、宏观力学和微观力学性能,热学、燃烧学、屏蔽和电学等物理性质。这类复合材料结构和性质的各种表征方法技术是本书的重要内容,包含在各不同章节中。本书着重于对聚合物基复合材料的描述,并将潜在应用广泛的柔性(可穿戴)复合材料单列一章。书中各章节都列出大量参考文献,可供读者作延伸阅读。

本书读者对象为从事纳米碳复合材料研究、生产和应用的科技工作者和高等院校相关专业的师生。

图书在版编目(CIP)数据

石墨烯纳米复合材料/杨序纲,吴琪琳编著. —北京:
化学工业出版社, 2018.5
ISBN 978-7-122-31823-7

I. ①石… II. ①杨…②吴… 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 058408 号

责任编辑: 赵卫娟

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 边 涛

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: 三河市延风印装有限公司

装 订: 三河市胜利装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 24½ 字数 493 千字 2018 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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

前 言

Preface

石墨烯由于具有优异力学、热学、电学和其他物理、化学性质,加上它的二维平面形态学结构以及相对较低的制备成本,使其成为纳米复合材料的理想增强体。对聚合物基、陶瓷基和金属基石墨烯纳米复合材料的研究已经表明,石墨烯比起其他纳米碳,例如碳纳米管和纳米碳纤维,对复合材料的增强和功能性以及经济成本降低等方面都具有更强的优势。尽管研究历史仅仅只有短短的10余年,当前,石墨烯纳米复合材料已经成为材料研究领域的热点之一。国内外相关研究论文和专利逐年增长,丰硕的研究成果大都分散发表于众多的学术期刊中。显然,一本包含这类复合材料制备、性质、结构和表征等方面的综合评述的书籍对已经和试图从事该领域研究、生产的科技工作者和相关管理人员是有益的。

本书内容主要有关于聚合物基石墨烯纳米复合材料,也涉及部分陶瓷基和金属基复合材料。

本书共分8章。第1章简述石墨烯的结构、性质、制备和表征方法。基于成本和复合材料制备技术的要求,用于石墨烯纳米复合材料制备的增强材料大都使用氧化石墨烯或功能化石墨烯,而不是纯石墨烯。第2章阐述有关氧化石墨烯和功能化石墨烯的制备、性质、结构和相关的表征方法。聚合物基石墨烯纳米复合材料是本书的主要内容,安排在第3~7章。第3章涉及这类复合材料的制备、结构和表征。第4章和第5章分述聚合物基复合材料的宏观和微观力学性能(界面力学行为)。这类复合材料的其他物理性质,包括热学、电学、阻燃和屏蔽性质,安排在第6章。柔性(可穿戴)复合材料是聚合物基复合材料中具有特殊性能的一类,具有巨大的应用价值,第7章阐述了这类复合材料的基本概念,制备方法(包括石墨烯纤维的制备),柔性及可穿戴传感器的传感机制和应用等。主要由于制备方面的困难,对陶瓷基和金属基石墨烯纳米复合材料的研究相对起步较晚,第8章包含了对这类复合材料研究的最新成果。本书第7章由吴琪琳撰写,其余各章由杨序纲完成。

各章节都列出重要的参考文献,可供读者对相关课题作延伸阅读。

本书内容涉及广泛的学科领域,由于编著者学识有限,书中不当之处,恳请读者批评指正。

本书得到了国家重点研发计划项目 2016YFB0303201、纤维材料改性国家重点实验室重点项目（碳材料）的支持。程朝歌、姜可茂、冉敏、宋芸佳、苏晗、夏铭、贾立双等研究生参与了资料搜集、图表设计等方面的工作，在此一并表示感谢。

编著者

2017 年 12 月于上海

目 录

Contents

第 1 章 石墨烯	001
1.1 概述	001
1.2 石墨烯的结构和基本性质	004
1.2.1 石墨烯的结构	004
1.2.2 石墨烯的物理性质	006
1.2.3 石墨烯的化学性质	008
1.3 石墨烯的制备	008
1.3.1 剥离法	008
1.3.2 外延生长法	009
1.3.3 化学气相沉积法	011
1.3.4 氧化还原法	013
1.4 石墨烯的表征	015
1.4.1 拉曼光谱术	015
1.4.2 电子显微术、电子衍射花样和电子能量损失谱	023
1.4.3 原子力显微术和扫描隧道显微术	026
1.4.4 光学显微术	029
1.4.5 成分分析	030
参考文献	034
第 2 章 氧化石墨烯和功能化石墨烯	040
2.1 概述	040
2.2 氧化石墨烯	040
2.2.1 氧化石墨烯的制备	041
2.2.2 氧化石墨烯的表征	042
2.2.3 氧化石墨烯的性质	048
2.3 功能化石墨烯	051
2.3.1 共价键功能化	051
2.3.2 非共价键功能化	057
2.3.3 无机纳米颗粒功能化	059
2.3.4 纳米碳功能化	060
2.3.5 功能化石墨烯的表征	067

参考文献	082
第 3 章 石墨烯/聚合物纳米复合材料的制备与表征	087
3.1 概述	087
3.2 熔融共混法	089
3.2.1 概述	089
3.2.2 典型流程和增容剂的作用	090
3.2.3 橡胶基纳米复合材料	092
3.3 溶液共混法	101
3.3.1 概述	101
3.3.2 溶液共混	102
3.3.3 胶乳共混	107
3.3.4 功能化石墨烯的使用	108
3.4 原位聚合法	110
3.4.1 概述	110
3.4.2 环氧树脂基纳米复合材料	111
3.4.3 聚氨酯基纳米复合材料	112
3.4.4 聚酰胺 6 基纳米复合材料	116
3.4.5 聚苯乙烯基纳米复合材料	121
3.4.6 聚甲基丙烯酸甲酯基纳米复合材料	124
参考文献	128
第 4 章 石墨烯/聚合物纳米复合材料的力学性能	133
4.1 概述	133
4.2 拉伸力学性能	134
4.2.1 拉伸力学性能的表征	134
4.2.2 应力-应变曲线	134
4.2.3 石墨烯片大小对复合材料力学性能的影响	139
4.2.4 石墨烯片取向对复合材料力学性能的影响	141
4.3 力学性能的理论预测	147
4.3.1 Halpin-Tsai 模型	147
4.3.2 均匀应力-均匀应变模型	150
4.3.3 Mori-Tanaka 模型	150
4.4 动态力学性能	151
4.5 抗压曲性能	153
4.6 断裂韧性	155
4.6.1 韧性的定量描述	155
4.6.2 环氧树脂基纳米复合材料	157

4.6.3	聚酰胺基纳米复合材料	161
4.6.4	石墨烯/碳纳米管/PVA 纳米复合材料	163
4.6.5	高强度、高韧性纳米复合材料	164
4.7	增韧机制	167
4.7.1	裂纹转向	167
4.7.2	裂纹钉扎	168
4.7.3	脱结合和拉出	169
4.7.4	裂纹搭桥	172
4.7.5	微开裂和塑性区分支	174
4.7.6	裂纹尖端的钝化	174
4.7.7	断裂机制的表征	174
4.8	疲劳阻抗	176
4.8.1	疲劳阻抗的表征	176
4.8.2	环氧树脂基纳米复合材料的抗疲劳性能	177
4.9	抗磨损性能	178
	参考文献	180
第 5 章	石墨烯/聚合物纳米复合材料的界面行为	185
5.1	概述	185
5.2	界面行为的表征技术	186
5.2.1	界面微结构的表征技术	186
5.2.2	界面力学行为的表征技术	191
5.3	石墨烯的拉曼峰行为对应变的响应	198
5.3.1	实验方法	198
5.3.2	峰频移与应变的函数关系	199
5.4	界面应力传递	202
5.4.1	Cox 模型剪切-滞后理论的有效性	202
5.4.2	应变分布和界面剪切应力	203
5.4.3	最佳石墨烯尺寸	206
5.4.4	应变图	206
5.4.5	压缩负荷下的界面应力传递	207
5.4.6	最佳石墨烯片层数	209
5.5	PDMS 基纳米复合材料的界面应力传递	215
5.6	氧化石墨烯纳米复合材料的界面应力传递	218
	参考文献	220
第 6 章	石墨烯/聚合物纳米复合材料的物理性质	224
6.1	热学性质	224

6.1.1	导热性质	224
6.1.2	热稳定性	230
6.1.3	尺寸稳定性	240
6.1.4	阻燃性	240
6.2	电学性质	247
6.2.1	导电性质	247
6.2.2	介电性质	262
6.3	屏蔽性质	264
6.3.1	气体屏蔽	265
6.3.2	液体屏蔽	271
6.3.3	电磁屏蔽	271
	参考文献	271
第 7 章	石墨烯基柔性可穿戴材料	277
7.1	引言	277
7.2	柔性传感器	277
7.2.1	测量原理及传感器形式	277
7.2.2	柔性传感器结构组成	278
7.2.3	柔性电子应变传感器的传感机制	280
7.3	石墨烯膜柔性材料的制备方法	281
7.3.1	石墨烯溶液成膜	282
7.3.2	CVD 法成膜	284
7.4	石墨烯纤维	285
7.4.1	石墨烯纤维制备	286
7.4.2	石墨烯纤维的性能	291
7.5	应用	297
7.5.1	触觉传感	297
7.5.2	电子皮肤及人造肌肉	298
7.5.3	人体健康监测和医疗	302
7.5.4	表情识别	304
7.5.5	语音识别	304
7.5.6	智能服装	306
	参考文献	310
第 8 章	陶瓷基和金属基纳米复合材料	315
8.1	概述	315
8.2	石墨烯在陶瓷基体中的分散	316
8.2.1	分散剂及其作用	316

8.2.2 超声波分散	317
8.2.3 球磨分散	319
8.2.4 搅拌分散	322
8.3 石墨烯/陶瓷复合材料粉体的制备方法	323
8.3.1 粉末工艺	323
8.3.2 胶体工艺	326
8.3.3 溶胶-凝胶工艺	326
8.3.4 聚合物衍生陶瓷	328
8.3.5 分子层级混合	330
8.4 石墨烯/陶瓷复合材料的烧结	332
8.4.1 概述	332
8.4.2 放电等离子体烧结	332
8.4.3 高频感应加热烧结	336
8.4.4 快速烧结	337
8.5 几种典型的制备方法	337
8.6 石墨烯/陶瓷复合材料的力学性能	339
8.6.1 概述	339
8.6.2 断裂韧性的表征方法	341
8.6.3 断裂韧性和增韧机制	343
8.6.4 摩擦行为	354
8.7 石墨烯/陶瓷复合材料的电学性质	358
8.8 金属基复合材料	360
8.8.1 概述	360
8.8.2 石墨烯/铜复合材料	361
8.8.3 石墨烯/铝复合材料	364
8.9 微观结构的表征方法	368
8.9.1 SEM	368
8.9.2 TEM	370
8.9.3 拉曼光谱术	372
参考文献	375

第 1 章 石墨烯

1.1 概述

21 世纪初,能够单独存在、有史以来最薄的二维晶体——单层石墨烯的研制成功^[1],在物理学上具有突破性意义,其研究人员也因此获得了诺贝尔奖。此后,在科学领域和应用领域,石墨烯都得到极为广泛和深入的研究。这可以从这几年来全球有关石墨烯研究的出版物(研究论文)数量的增长情况得到证实。图 1.1 显示了 2000~2015 年有关石墨烯研究出版物数量^[2]。可以看到,出版物的数量几乎以指数的速度增长。与之相应,与石墨烯相关的应用也得到快速发展。据有关机构预测,石墨烯市场在 2015~2020 年的 5 年期间将以约 60% 的年增长率(compound annual growth rate, CAGR)增长^[2,3]。另外,全球石墨烯产量从 2010 年的约 28t 增长到 2017 年的约 570t^[4]。

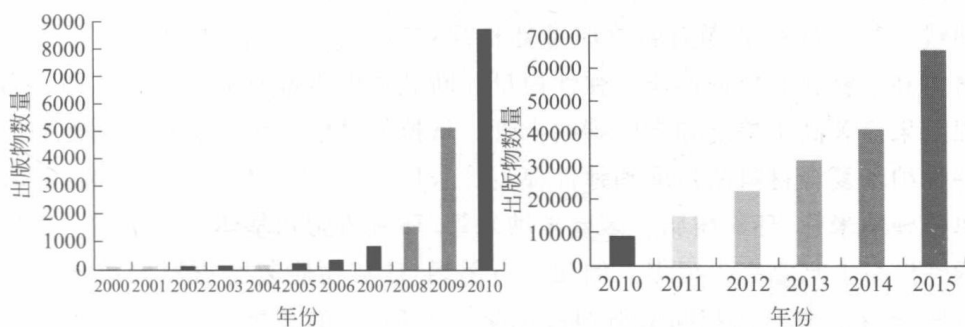


图 1.1 2000~2015 年有关石墨烯研究出版物的数量

石墨烯研究和应用快速发展的主要原因是石墨烯具有优异的力学、热学、电学等性能以及低价格的原料。这些性能使得它在广泛的领域,例如航天航空、电子学、能源、结构和力学工程、环境、医学和包装等,有着巨大的潜在应用价值。石墨烯的应用常通过制成石墨烯纳米复合材料实现。因此,与之相关的研究在整个石墨烯研究领域占有相当大的分量。研究表明,少量石墨烯的添加能显著改善基体材料的许多重要性能或赋予新的特定功能。

纤维是长期以来改善材料性能的主要增强材料。目前,纤维增强复合材料已在各个领域得到广泛应用^[5]。科学家们在使用纳米颗粒作为增强材料改善各种材料(包括聚合物、陶瓷和金属)性能的研究也已取得了很大进展。碳纳米管和蒙脱土

(MMT) 是典型的一类纳米颗粒添加剂，能显著增强许多材料的力学和其他物理性能。研究表明，在许多方面纳米颗粒优于常用的纤维。石墨烯的出现使得纳米颗粒增强材料中有了个强有力的竞争者，而且具有明显的优势。

碳纳米管具有与石墨烯相近的力学和某些物理性质，然而，迄今为止的研究表明，在许多性能的增强效果上，石墨烯更为有效。

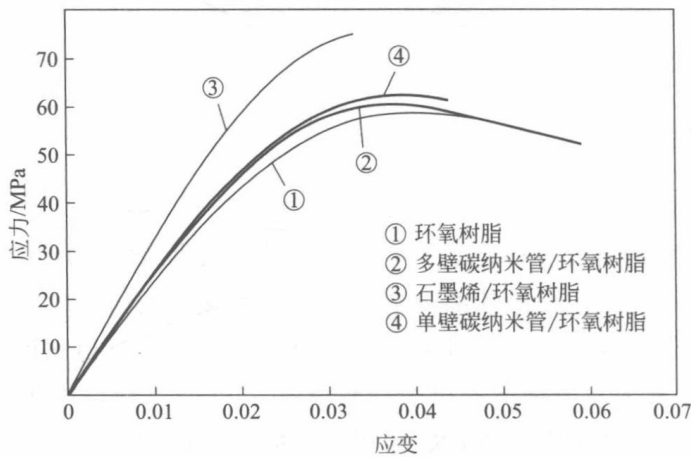


图 1.2 石墨烯/环氧树脂、碳纳米管/环氧树脂和基体环氧树脂的拉伸应力/应变曲线

一般而言，石墨烯的添加能显著增强聚合物的力学性能，其效果明显高于碳纳米管。图 1.2 是石墨烯/环氧树脂、碳纳米管/环氧树脂和基体环氧树脂的拉伸应力/应变曲线，复合材料增强剂的添加量都相同 (0.1%)^[6]。图中显示，石墨烯的添加显著提高了材料的拉伸性能，弹性模量和断裂强度也都有显著增大，而且石墨烯的增强效果显著高于单壁和多壁碳纳米管。从拉伸试验的统计资料得到如图 1.3 所示的各种纳米复合材料的强度和弹性模量比较图^[7]。可以看到，石墨烯/环氧树脂比起单壁碳纳米管/环氧树脂、多壁碳纳米管/环氧树脂和基体环氧树脂，在拉伸强度和弹性模量上都要高出很多。例如，石墨烯/环氧树脂复合材料的拉伸强度比基体环氧树脂高 40%，而相同增强剂添加量 (0.1%) 的单壁碳纳米管/环氧树脂和多壁碳纳米管/环氧树脂仅比基体材料分别增大 11% 和 14% [图 1.3(a)]。0.1% 石墨烯的添加量使得弹性模量增大 31%，而相同添加量的单壁碳纳米管或多壁碳纳米管则只有小于 3% 的增大 [图 1.3(b)]。图中弹性模量的理论值由 Halpin-Tsai 方程计算得到^[8]。石墨烯的添加还显著增强环氧树脂的抗压和抗疲劳性能，而且比起添加碳纳米管有更佳的效果。图 1.4 显示几种纳米复合材料和纯净环氧树脂抗压试验的结果^[6]。图中可见，石墨烯的增强作用显著优于一维纳米材料。在相同添加量的情况下，相对基体环氧树脂，石墨烯的添加使抗压强度增加约 52%，而对单壁碳纳米管和多壁碳纳米管，仅分别增大约 15% 和 6%。图 1.5 显示几种复合材料和纯净环氧树脂抗疲劳试验得出的应力强度因子 ΔK 与裂纹增大率 da/dN 之间的关系曲线^[9]。显而易见，石墨烯的加入显著增强了材料的抗疲劳性能，其效

果也明显高于一维碳纳米管的作用。

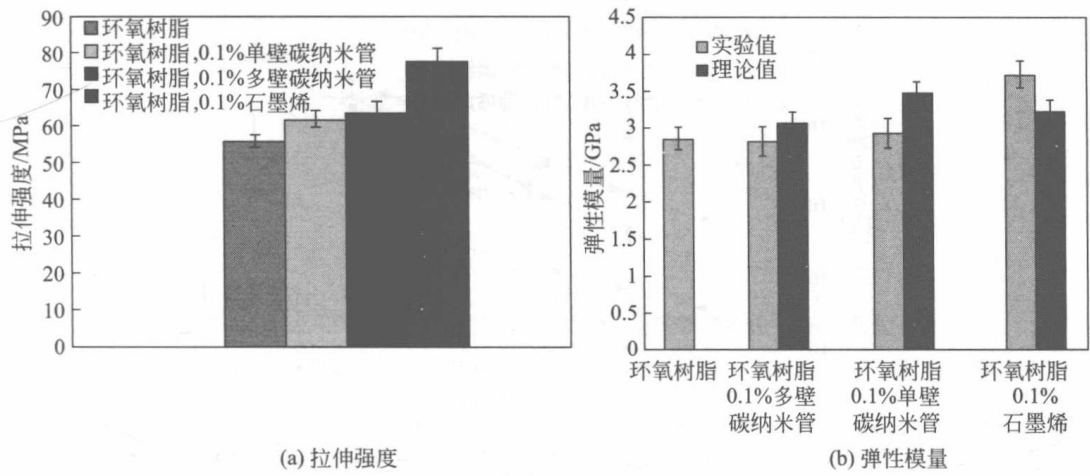


图 1.3 石墨烯/环氧树脂、碳纳米管/环氧树脂和（基体）环氧树脂力学性能的比较

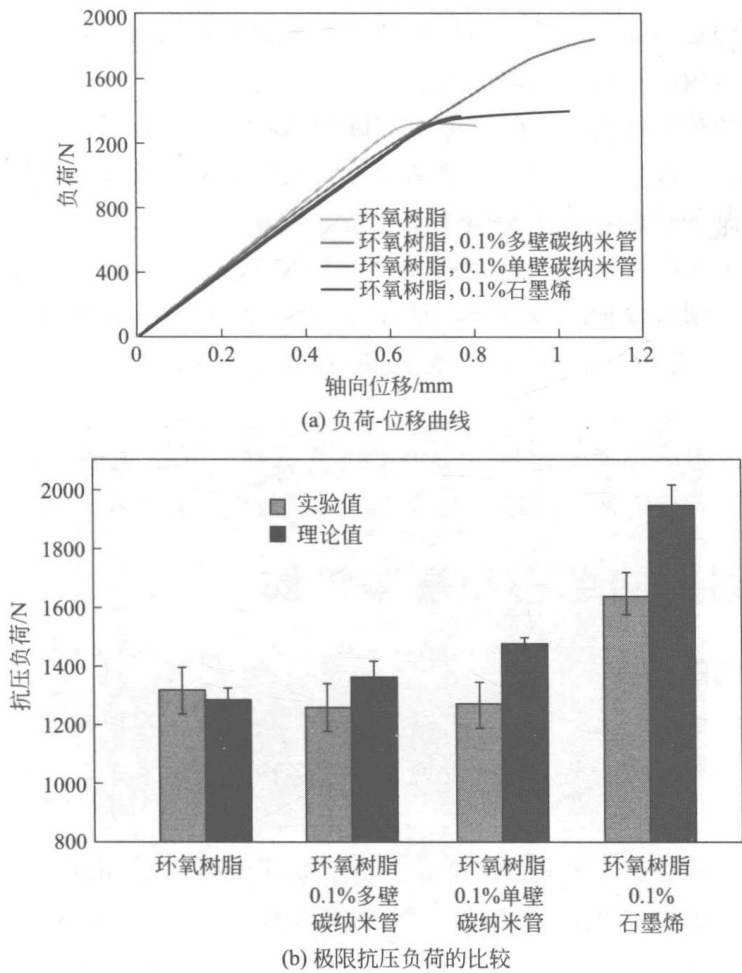


图 1.4 石墨烯/环氧树脂、碳纳米管/环氧树脂和基体环氧树脂的抗压试验

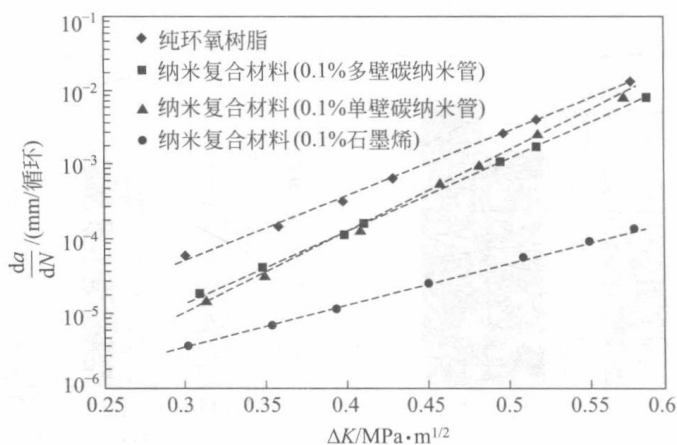


图 1.5 石墨烯/环氧树脂、碳纳米管/环氧树脂和纯净环氧树脂的疲劳裂纹传播试验：
裂纹增大率与应力强度因子之间的关系

对聚合物材料，石墨烯比一维的碳纳米管有更强的力学性能增强效果，原因可归结为石墨烯的超高比表面积、粗糙和波形的表面形态结构以及其固有的片状结构而不要求在基体内的任何择优取向。

对聚合物的热学性能和电学性能，与碳纳米管相比，石墨烯的添加有相近似或者有更佳的增强（改善）效果。石墨烯的片状几何结构，易于在基体内形成连通网络，被认为是改善聚合物这些物理性能的关键因素。

研究指出，与碳纳米管相比，石墨烯在陶瓷基体内更易于达到均匀分散的状态，而碳纳米管则常常形成聚集态，难以达到良好的分散。在相同实验条件下，石墨烯增强陶瓷复合材料的力学性能比碳纳米管增强复合材料要高出 10%~50%^[10]。

除了性能改善的不同效果外，一个不可忽视的差异是碳纳米管的制备成本很高，难以形成产业化，而石墨烯的制备成本明显较低，较易于形成规模化生产。

1.2 石墨烯的结构和基本性质

1.2.1 石墨烯的结构

碳有多种同素异形体，传统上可分为三类：金刚石、石墨和无定形碳。有争议的卡宾可另作一类，第四类。近代发现的则有多种类型纳米碳，可作为第五类，如图 1.6 所示^[11]。

纳米碳是指具有纳米尺度、能够单独存在的各种碳同素异形体，包括石墨烯、富勒烯、碳量子点和碳纳米管以及大量其他形式^[11,12]，如纳米锥（nanocone or nanohorn）^[13]、竹样纳米管（bamboo nanotube）^[14]、人字形纳米管（herringbone nanotube）^[12]、螺旋纳米管（helical nanotube）^[15]、纳米钟或项链管（nanobell or

necklace)^[16]和纳米碳洋葱 (carbon onion)^[16]等。其中，石墨烯可视为构成其他异形体的基本单元。

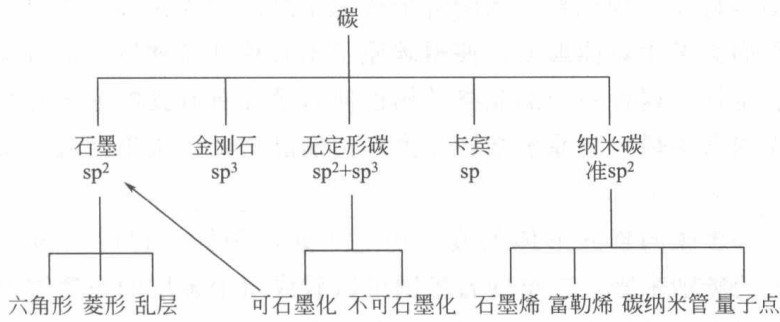


图 1.6 碳的同素异形体

石墨烯是迄今为止人们发现的最薄的物质，它由碳原子排列形成的单原子层六边形晶格结构所构成，厚度仅为一个原子的尺度，约为 0.36nm。

碳原子在周期表中处于第 6 位。每个碳原子含有 6 个电子，构成 $1s^2$ 、 $2s^2$ 和 $2p^2$ 原子轨道，其中 2 个电子位在内壳层 ($1s$)，它们紧靠原子核，与碳原子的化学活性无关，而其余 4 个电子则分别位于 $2s$ 和 $2p$ 轨道的外壳层。由于碳原子中 $2s$ 与 $2p$ 的能级相差不大，这 4 个电子的波函数能够相互混合，这些轨道称为杂化轨道。在碳物质中， $2s$ 与 $2p$ 轨道的混杂导致形成 3 个可能的杂化轨道，即 sp 、 sp^2 和 sp^3 。通常标记为 sp^n 杂化， $n=1, 2, 3$ 。

石墨烯是碳原子以 sp^2 杂化轨道排列构成的单层二维晶体，其晶格呈六边形蜂巢状结构，如图 1.7 所示^[17]。每个碳原子与周围 3 个相邻碳原子以 sp^2 杂化轨道形成 3 个 σ 键。碳-碳键的长度约为 0.142nm，键与键之间的夹角为 120° 。每个碳原子贡献剩下的一个 p 轨道电子形成大 π 键。可见，构成六边形晶格结构的碳-碳

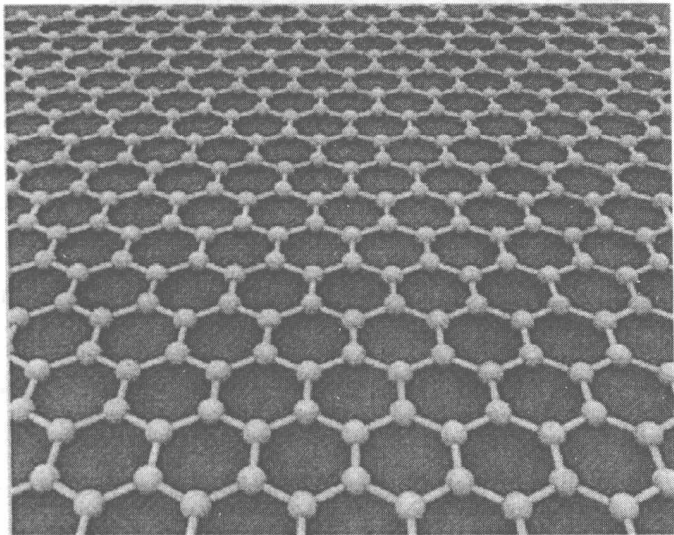


图 1.7 石墨烯的结构模型

键骨架由 σ 键参与构成，连接稳固，而形成 π 键的 p 轨道电子可以自由移动，赋予石墨烯优良的导电性。

石墨烯结构稳定。构成石墨烯的各个碳原子之间的连接强而柔韧。当承受外力时，碳原子平面会发生弯曲形变，使得碳原子不必重新排列以适应外应力，保持了自身的结构稳定性。这种稳定的晶格结构也使石墨烯具有良好的导热性。

存在缺陷的石墨烯，其原子结构除去六边形晶格外，也出现五边形或七边形的晶格。

石墨烯是许多碳同素异形体的基本构造单元，例如，它可以构成零维的富勒烯，卷成一维的碳纳米管，三维的石墨则看成由很多层的石墨烯堆垛而成。

高分辨透射电子显微术（HRTEM）和扫描隧道显微术（STM）都可用于直接观察石墨烯的原子结构。图 1.8 显示高质量石墨烯的 HRTEM 像^[18]。图中白色单元代表碳原子。图像使用 MacTeMPas 软件通过电子通道波函数从 15 幅晶格像中获得。

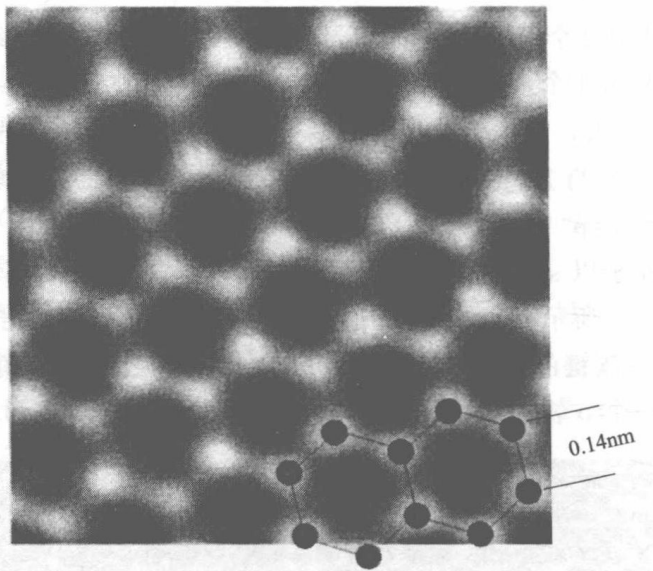


图 1.8 高质量石墨烯的 HRTEM 像

1.2.2 石墨烯的物理性质

石墨烯是一种超轻物质。经推算，石墨烯的面密度仅为 0.77mg/m^2 ^[19]。

石墨烯是目前已知物质中强度和硬度最高的物质。实验测得石墨烯的弹性模量高达 $(1.0 \pm 0.1)\text{TPa}$ ，断裂强度为 $(42 \pm 4)\text{N/m}$ （约合 130GPa ）^[20,21]。石墨烯的强度为钢的 100 倍以上。

需要指出，上述测得的力学参数是石墨烯面内的值。实际上，石墨烯的力学性能有着显著的各向异性，在面内的弹性模量与面外的值和剪切模量相差甚大。这是因为石墨烯层间的联系是弱相互作用（范德华力相互作用或者 π 电子之间的耦合作

用), 与面内碳原子之间的 σ 结合键相比要弱得多。

石墨烯既轻(低密度)又强, 是理想的增强材料, 比起其他无机或有机材料有明显的优势。可以预见, 它在复合材料中的应用有着很好的前景。

石墨烯氧化物是一种石墨烯的衍生物, 目前已能低成本大规模制备, 用作复合材料增强剂比纯石墨烯似乎更为合适。这种材料由于存在结构缺陷, 力学性能有所降低, 但仍然保持很高的力学参数值, 例如, 石墨烯氧化物薄膜的弹性模量仍高达 0.25 TPa。比起纯石墨烯, 这种材料的优点还在于: 首先, 石墨烯氧化物在溶剂中较易分散, 克服了纯石墨烯易于聚集难以分散的难题; 其次, 由于石墨烯氧化物的边缘和面上存在许多化学官能团, 有利于与复合材料的基体物质发生强相互作用, 从而形成强结合界面, 有利于从基体到增强剂的力传递, 充分发挥增强剂的增强作用。

通常使用原子力显微术的压入技术(indentation)测定石墨烯的力学性能^[22]。

石墨烯是一种完美的热导体, 有很高的热导率。实验测得石墨烯的室温热导率约为 $5000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[23], 理论值则更是高达 $6000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。这个值是室温下优良导电金属铜热导率的 10 倍多。碳的几种同素异构体都有很高的热导率, 而石墨烯在已知材料中为最高。例如单壁碳纳米管的理论热导率约为石墨烯的 7/10。石墨烯的热导率比目前已知天然材料中热导率最高的金刚石还要高 1.5 倍^[24]。石墨是石墨烯的三维形式, 其热导率 $[1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 比石墨烯小 5 倍。预期石墨烯由于高热导率而在微电子器件方面具有重大的应用前景。

石墨烯具有优异的光学性质。实验测得, 单层石墨烯对白色光的不透过率为 $(2.3 \pm 0.1)\%$, 亦即有 97.7% 的透过率^[25], 而反射率小到可以忽略不计, 小于 0.1%。石墨烯的优良透光性和低反射率、高导电性和化学稳定性等综合性能显著优于传统的透明电极材料(例如氧化铟锡 ITO), 使得它成为未来光学器件中透明电极材料的强有力候选者。

非线性光学行为是石墨烯的另一个重要光学特性。当入射光强度达到某一临界值时, 石墨烯对入射光的吸收会达到饱和, 称为吸收饱和。石墨烯对光波具有较低的饱和通量。这一特性使石墨烯在许多光电领域, 如激光开关, 有良好的应用前景。

石墨烯固有的原子结构使其具有十分特殊的电学(电子学)性质。石墨烯的每个碳原子都贡献一个 p 轨道电子, 形成大 π 键, π 电子可以自由移动。石墨烯还具有特殊的导带结构, 这使得石墨烯具有极佳的电荷传输性能^[26]。电荷迁移率可达 $200000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 相应的电阻率为 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。石墨烯是目前已知物质中电阻率最低的材料。

石墨烯具有的特殊的电子学和电荷传输性质, 文献[27]有详细论述。这些特性使其在电子学相关器件上的应用有着巨大的潜力, 是当前石墨烯研究及其产业应用的热点。