

# 石墨烯/聚合物导电复合材料 研究进展

孟庆实<sup>1,2</sup>, 卢少微<sup>1</sup>, 史歌<sup>2</sup>, 潘霄<sup>3</sup>, MA Jun<sup>2</sup>

1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 沈阳 110136;
2. School of Engineering, University of South Australia, Adelaide 5000;
3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 沈阳 110015)

**[摘要]** 石墨烯是新一代的纳米级碳材料, 具有优异的机械、导电性能以及其他的性能, 是制备聚合物导电复合材料的理想填充物。对石墨烯的常用制备方法进行比较并分析其优点与不足, 介绍了石墨烯及其复合材料的导电及机械性能, 并对石墨烯及其聚合物导电复合材料的应用研究进展进行了系统的综述。最后, 对该领域所存在的问题进行了总结, 并展望了其发展趋势。

**关键词:** 石墨烯; 复合材料; 制备方法; 表面改性

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.016



孟庆实

沈阳航空航天大学航空航天工程学部教授, 澳大利亚南澳大学兼职博士生导师。多年来一直从事超级功能型粘合剂的开发以及石墨烯聚合物纳米复合材料研究, 特别是在纳米高分子复合材料改性领域的研究目前已处于世界领先地位。发表学术论文及国际专利共30余篇/项, 被SCI刊物引用580多次, H指数为10。

聚合物导电复合材料是由高分子聚合物与不同的导电材料通过复合方式而制得, 具有非常广阔的市场前景和巨大的经济效益, 全球市场容量每年在万亿元人民币以上, 并以5%~10%的增长率逐年递增。聚合物导电纳米复合材料在航空航天、电子、电力以及新能源等领域具有广泛的应用潜力。然而, 在上述领域巨大应用的聚合物材料大部分是绝缘材料, 容易造成静电累积而引发灾难性的后果。因此, 全球的工业界和学术界投入了大量的人力和财力来开发高分子聚合物导电复合材料。其中一种最为经济有效的方法是在聚合物基体内添加导电材料来提高聚合物基体的导电性。这种方法不但能有效地提高材料基体本身的导电性, 也可以有效地改善其机械性能以及其他功能型性能。

目前, 制备技术成熟并得到广泛应用的导体填充物主要有金属(如不

锈钢纤维)、贵金属(如金银颗粒或金银丝)等材料。然而, 金属材料本身密度比较高, 作为导电材料添加到聚合物基体后, 会给复合材料增添超过预期的重量。此外, 金属填充物与高分子有机基体的兼容度很差, 很难形成性能稳定的界面结构, 而良好的界面结构对电子的转移和应力的传递都起着至关重要的作用。因此, 科学家们考虑选取由碳元素组成的有机类材料作为导电复合材料的填充物, 可以有效地改善填充物与聚合物基体间的兼容性。特别是密度仅为 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的石墨烯材料的出现, 为制备理想的聚合物导电材料提供了良好的基础。

自从2004年英国曼彻斯特大学物理和天文系的两位科学家首次制得独立存在的、仅一个原子厚度的石墨烯以来, 吸引了全球各领域的科技工作者对石墨烯材料的研究, 石墨烯已经成为材料、物理、化学等领

域一颗冉冉升起的新星<sup>[1]</sup>。石墨烯独特的二维晶体结构赋予其卓越的性能。经过研究发现,理论上石墨烯是迄今为止发现的最坚硬的材料,杨氏模量可达约 1TPa,其理论比表面积高达 2600m<sup>2</sup>/g;同时由于特殊的能带结构,石墨烯具有突出的电学性质(7200S/m),以及室温下较高的电子迁移率(200000cm<sup>2</sup>/(V·s))。此外,石墨烯还具有半整数的量子霍尔效应、永不消失的电导率等一系列性质,因此引起了复合材料领域科学家的极大兴趣<sup>[2]</sup>。

目前,较高结构规整度石墨烯的制备方法主要包括:微机械剥离石墨法<sup>[3]</sup>和气相沉积法<sup>[4]</sup>。然而,高质量石墨烯材料制备成本非常昂贵。由于石墨烯比表面积大以及静电作用力和范德华力的存在,使其通常以团聚体形状存在,不能溶于水并且很难分散于有机溶剂中。同时,高质量、少缺陷的石墨烯也不利于进一步表面改性,与聚合物基体结合很难形成稳定的界面结构,因此不适于制备性能稳定的功能型复合材料。由于上述原因,通过化学氧化剥离石墨片层是目前制备石墨烯及其衍生物(如 Graphene Oxide)最为普遍使用的方法,且具有低成本、易量产等特点<sup>[5]</sup>。然而,通过化学方法制得的石墨烯或氧化石墨烯,氧化的程度要求很高,否则很难实现石墨层充分剥离。此外,还需要进一步通过化学或者热还原处理来得到相对理想的石墨烯材料。虽然氧化法结合化学或热还原制备的石墨烯材料可溶于水或分散到溶剂中,但到目前为止,很难制备出碳氧比高于 6:1<sup>[6]</sup>的石墨烯材料,这会使其表面晶体结构减少以及规整度下降,造成其导电性和机械性能的部分丧失,阻碍其成为理想的导电和增强填充物制备聚合物导电复合材料。因此,开发新一代的制备可溶及高规整度的石墨烯方法是当前科学家与工业界努力的方向。

## 石墨烯研究概况

### 1 石墨烯研究背景

石墨烯的早期研究开始于 20 世纪中叶,但真正成功地从石墨中剥离出独立单层晶体则出现于 2004 年。这一年,英国曼彻斯特大学的教授和他的博士后 Novoselov 在《Science》杂志上发表了关于石墨烯的第一篇报道。他们出人意料地用普通的胶带从石墨中反复剥离得到了独立存在的、有史以来最薄的二维碳材料<sup>[3]</sup>。由此,石墨烯的研究备受瞩目。石墨烯是由 sp<sup>2</sup> 杂化的碳原子堆积而成的蜂窝状二维晶体结构材料,仅有一个原子的厚度,单层厚度仅为 0.3nm,热导率 5000W/(m·K),杨氏模量为 1TPa,断裂强度为 130GPa<sup>[1-2]</sup>。

由于石墨烯的上述优异机械以及功能型性能,将其作为增强与导电填充物加入聚合物基体中,可以有效地提高聚合物的各项性能,所以关于石墨烯的研究已成为高分子复合材料领域的热点。2006~2008 年间,Stankovich<sup>[7]</sup>和 Li<sup>[8]</sup>等陆续报道了石墨烯/聚合物导电纳米复合材料相关的研究成果。随后,石墨烯及其纳米复合材料的研究也得到了快速的发展。

### 2 石墨烯制备方法

国际上石墨烯的制备从早期的微机械剥离法<sup>[3]</sup>开始逐渐发展出了各种制备方法,如控温超声波剥离法、化学气相沉积法(CVD法)以及酸化剥离结合热还原和化学还原法等方法<sup>[9-10]</sup>。我国科学家也较早地

开展了对石墨烯制备的相关研究,尤其是近几年,石墨烯制备的研究得到了长足的发展<sup>[11]</sup>。

2004 年,Geim 教授的课题组采用微机械剥离法从石墨中成功地剥离出单层石墨烯片(图 1)<sup>[12]</sup>。虽然该法制备的石墨烯表面结构非常规整,但是效率极低,可控性差,不具备大规模制备的条件。

化学气相沉积法(CVD法)是制备大面积石墨烯材料的常用方法(图 2)<sup>[13]</sup>。多数选用烷类气体及固体碳聚体为前驱体提供碳源,2010 年 Sun 等<sup>[14]</sup>利用气相沉积法制备出了结构规整度高、层数可控的少层石墨烯材料。化学气相沉积法的基本过程包括:(1)分解前驱体,将碳渗入催化剂中,如铜箔;(2)降低温度,碳原子将会被析出到催化剂表面形成石墨烯;(3)通过蚀刻,石墨烯被从金属催化剂基体上移除。

目前用于复合材料领域的石墨烯广泛选用氧化还原法来制备(图 3)<sup>[9,10,15-16]</sup>。基本过程主要包括:(1)将石墨原料氧化为氧化石墨;(2)对氧化石墨进行进一步超声振荡处理,

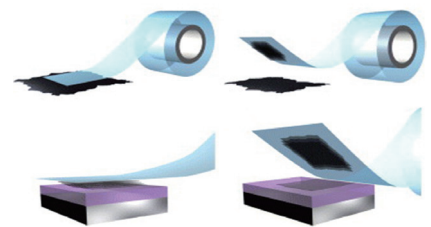


图1 石墨烯微机械剥离技术  
Fig.1 Technology on graphene micromechanical cleavage

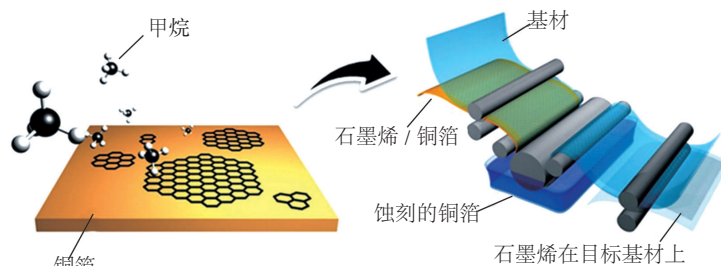


图2 CVD法制备大面积石墨烯示意图  
Fig.2 Schematic diagram of large-area graphene fabrication by using CVD method

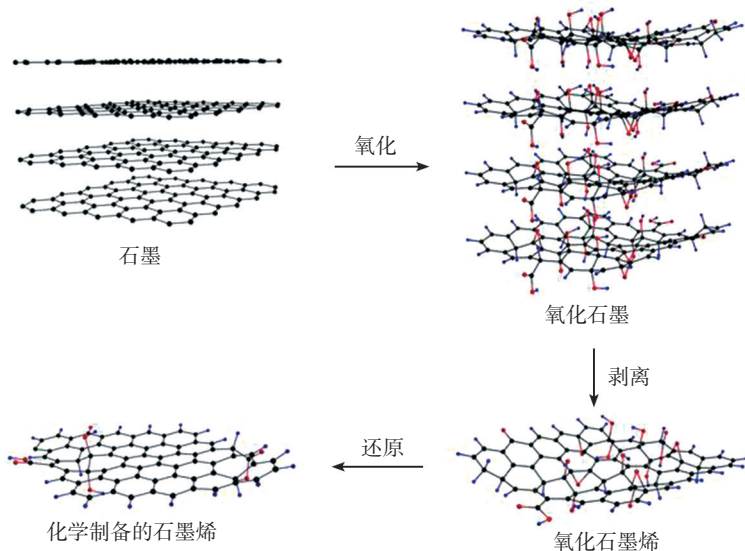


图3 石墨烯的氧化还原法制备

Fig.3 Fabrication of graphene by using oxidation-reduction method

实现深度剥离;(3)利用化学或者热处理方法进行去氧化还原。氧化还原法的工艺相对简单,且生产效率高,是目前最广泛使用的石墨烯制备方法。此外,通过氧化还原法制备的石墨烯可均匀地分散于水及有机溶剂中,可操作性强,有利于制备石墨烯/聚合物复合材料。然而,石墨在酸化氧化过程中,每个石墨层的晶体规整度遭到破坏,使其导电性能和力学性能受到非常大的影响,一定程度上限制了其在电子及能源领域的应用。

此外,科研人员还采用外延生长法、碳纳米管切割以及金刚石高温转化法等制备石墨烯材料,但由于受到生产成本以及稳定性的限制,也很难满足石墨烯低成本宏量制备的要求。

以上石墨烯的制备方法中,气相沉积法可制备大面积的、高质量的石墨烯,但是现有工艺复杂、成本高,再加上这种石墨烯不能均匀分散于水及溶剂中,限制了其在聚合物纳米复合材料领域的应用。氧化还原法虽然成本低廉、可大量制备、可溶性强,但是其晶体的结构及规整度遭到了不同程度的破坏,一定程度上影响了其导电及机械性能,进而限制了其在

能源及微电子领域的应用。因此,如何实现低成本、高品质石墨烯材料的宏量制备仍是当前研究的难点。

### 3 石墨烯的表面改性

石墨烯制备方法的不断发展,为石墨烯在复合材料领域的广泛应用与开发提供了原料保障。然而,如何提高石墨烯表面改性的可控性,仍是学术界需要解决的一个难题。石墨烯的表面状态非常稳定,总体上呈惰性,且每个单层石墨烯片被较强的层间范德华力束缚,导致其亲油性和亲水性都很差,不能有效地与聚合物基体进行复合,并且容易在聚合物基体中形成团聚体。为解决上述问题,必须对石墨烯进行表面改性,以改善其

操作性,并增强其与有机聚合物的相互作用。目前国内外广泛使用的石墨烯表面改性方法主要有两种。

(1)共价改性:目前国内外科学家们多采用建构共价键的改性方法对石墨烯表面进行改性。虽然石墨烯材料总体呈惰性,但其边缘以及缺陷部位有较高的活性,而且通过化学方法可制备氧化石墨烯。由于氧化石墨烯含有大量的羟基、羧基和环氧基等活性含氧官能团,可以利用这些官能团与其他分子链进行反应,形成以共价键为桥梁的接枝,从而实现对石墨烯表面进行共价改性(图4)<sup>[7]</sup>。Stankovich等<sup>[7]</sup>将异氰酸酯与氧化石墨烯表面的羧基和羟基反应,成功实现了石墨烯的共价改性,首次制备出完全剥离的、可在有机溶剂中分散的功能化氧化石墨烯,为石墨烯作为填充物在复合材料领域应用提供了可能性。共价改性在改善石墨烯表面的可操作性的同时,还使石墨烯本身具备了一定的功能性,但是由于还原后的石墨烯本身表面规整度不够高,因此会极大地破坏石墨烯的本征结构,并可能影响其导电性和机械强度。

(2)非共价改性:除石墨烯表面的共价改性外,还可以利用离子键、氢键以及 $\pi-\pi$ 相互作用等方法<sup>[18-19]</sup>对石墨烯进行表面非共价改性,形成稳定的分散体系。与共价改性相比,石墨烯的非共价改性工艺简单、条件

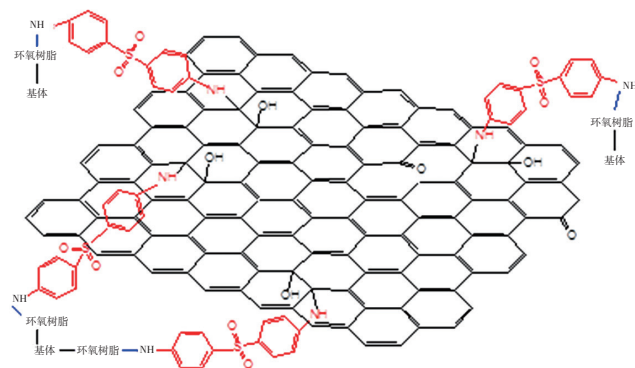


图4 利用DDS分子对石墨烯表面进行共价改性

Fig.4 Covalently modified graphene surface by using DDS

温和,同时能保持石墨烯片层的本征结构和性质。但是石墨烯的非共价改性对修饰分子的结构有较高的要求,且修饰分子与石墨烯的作用力较弱,表征有一定困难。

近年来,石墨烯的表面改性技术取得了重要的进展,为后续进一步的研究与应用提供了重要参考。但石墨烯的改性仍然面临一些问题,如:(1)如何在实现功能化的同时尽可能保持较高的规整度,保持物理和化学性能的稳定;(2)如何在改性过程中实现对官能团位置比例及改性接枝率的有效控制。由于改性石墨烯可以更好地分散于聚合物基体中,因此石墨烯的改性对于制备聚合物基复合材料以及提高其各项性能起到了至关重要的作用。

## 石墨烯 / 聚合物导电复合材料研究进展

由于石墨烯比表面积大、力学性能突出、电导率高、热性能优异,将其作为纳米导体填充物对聚合物材料进行功能化,有望得到高性能或具有特定功能的石墨烯 / 聚合物纳米复合材料,从而进一步扩大其相关聚合物材料的应用范围。

### 1 导电性能

石墨烯具有极大的比表面积、优异的导电性能,以及容易在聚合物基体中形成良好的导电网络,成为极具潜力的导电填充物。当聚合物基体中添加的石墨烯比例达到导电渗透阈值后,将形成稳定的导电网络,进而可以迅速提升复合材料的电导率。Stankovich 等<sup>[7]</sup>较早地对石墨烯 / 聚合物导电复合材料进行了研究。他们首先将共价改性的石墨烯添加到聚合物基体中,最后得到了导电性优异的石墨烯 / PS 导电复合材料。其室温下的导电渗透阈值仅为 0.1%(体积比),1% 体积比的石墨烯 / PS 导电复合材料的电导率已经高达 0.1S/m,可满足作为抗静电复合材料电导率

的要求。Lee 等<sup>[20]</sup>用原位法制备了功能化的石墨烯导电复合材料。由于改性石墨烯颗粒在聚合物基体中均匀分散,且形成了稳定的导电网络,复合材料的电导率相比纯聚合物提高了  $10^5$  倍。2011 年, Bao 等<sup>[21]</sup>研究表明,氧化石墨烯 / 环氧树脂复合材料的电导率最高可以提高 6 个数量级。2012 年以来,清华大学的石高全教授课题组<sup>[22-24]</sup>以及澳大利亚莫纳什大学的 Yang 等<sup>[25]</sup>利用石墨烯 / 聚合物复合材料的优良导电性能使其在超级电容器领域得到了应用。

### 2 机械性能

石墨烯被认为是目前世界上强度最高的物质,超高比表面积、表面粗糙和褶皱、二维平面形态使其成为制备轻质量高强度复合材料的理想填充物。将石墨烯填充到聚合物基体中,可以使树脂基体的机械性能得到显著的提高,克服了一般金属、陶瓷等无机填料使用量大且不能兼顾刚性与韧性的缺点。Zaman 等<sup>[26]</sup>的试验表明,添加石墨烯的环氧树脂的机械性能提高了 26.7%(杨氏模量),韧性提高了 297%(能量释放率),这些结果均高于碳纳米管等填料的增强效果。

石墨烯基聚合物纳米复合材料的机械性能取决于石墨烯在聚合物基体中的分散性,以及石墨烯与聚合物基体间的界面结合等因素。石墨烯在聚合物基体中均匀分散可避免因团聚而引起的应力集中,使应力均匀分布,增大界面面积,有利于应力的传递,进而提高复合材料的力学性能。同时,定向分布也有利于应力转移。化学改性的石墨烯在聚合物中分布,可以有效地阻止复合材料在应力作用下的断裂形变。此外,化学交联能在石墨烯与基体间构建一个稳定的界面结合,有利于提高复合材料的机械性能<sup>[27-30]</sup>。

2010 年,爱尔兰的 Satti 等<sup>[31]</sup>

将氧化石墨烯片与聚丙烯胺共价交联,杨氏模量和拉伸强度分别提升了 200% 和 400%。该研究使用了与聚合物基体相似的单体分子链对石墨烯表面进行共价改性,有利于提高这种改性石墨烯与聚合物基体间的兼容性。作者及团队成员<sup>[32]</sup>在 2014 年利用环氧树脂对石墨烯表面进行了改性,这种改性石墨烯与环氧基体间的兼容性有了大幅的提高,体积分数仅 1% 的石墨烯 / 环氧复合材料的杨氏模量比纯环氧树脂提高了 24%,表明改性后的石墨烯与环氧树脂的界面结合力更强,兼容性好,促进了有效的应力转移<sup>[30]</sup>。

## 石墨烯 / 聚合物导电复合材料在新能源领域的应用

由于石墨烯 / 聚合物导电复合材料具有优异的导电和机械性能,所以它在新兴能源领域有着广泛的应用。

### 1 可拉伸导电复合材料

橡胶是一种可拉伸的电绝缘材料,其电导率非常低。将石墨烯作为导电填充物及增强填料加入橡胶基体中,可以有效地提高橡胶导电性以及机械性能。这种方法是制备可拉伸导电材料的主要方法之一。基于石墨烯制备的可拉伸导电材料与传统的橡胶相比,其机械以及导电性能具有显著的提高。试验结果表明,加入体积比仅 16.7% 的石墨烯材料,橡胶的拉伸强度、杨氏模量以及拉伸长度被分别提高了 412%、782% 和 709%。与此同时,通过石墨烯在橡胶基体中形成导电网络,使复合材料的电阻降低了 9 个数量级(如图 5 所示)<sup>[33]</sup>。该可拉伸导电复合材料的导电逾渗阈值仅为 5.3%(体积比),远低于碳纳米管(8.2%)和石墨材料(10.9%)的导电逾渗阈值。此外,通过使用胶乳共混法,石墨烯橡胶的逾渗阈值甚至可以降低至 0.62%。

### 2 超级电容器

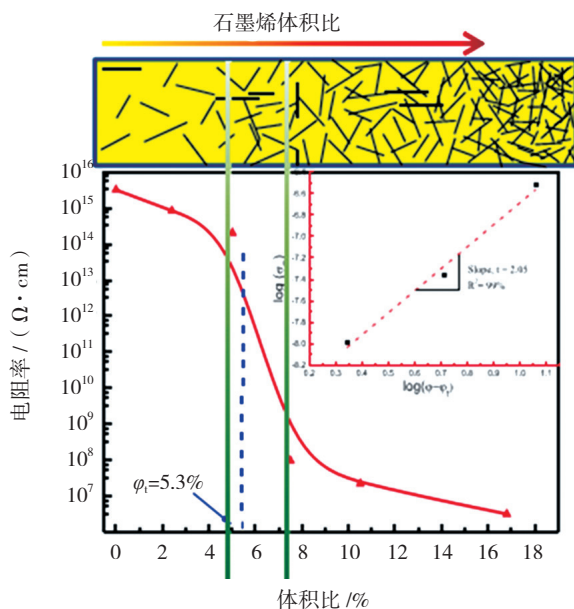


图5 石墨烯导电橡胶的电阻变化  
Fig.5 Electrical resistivity of graphene/rubber composites

由于石墨烯的优异导电性能和较大的比表面积,因此,其复合材料可被用于制备超级电容器的电极材料。通过在石墨烯表面生成聚苯胺,超级电容器就可以被制备出来。在这个系统中,石墨烯复合材料起到双电层电容(double layer capacitances)的作用,主要利用其高导电性来进行高频率的充放电;而聚苯胺起到法拉第准电容(pseudocapacitance)的作用,利用其快速且可逆的法拉第反应来实现储能。

超级电容器的大容量和高功率充放电就是将这两种功能的功效发挥到最大:(1)增大石墨烯复合材料电极的比表面积,从而增大双电层电容的容量;(2)通过形成聚苯胺纳米颗粒,增大可逆法拉第反应的机会和数量,从而提高电容容量<sup>[34]</sup>。

### 3 应变传感器

石墨烯的高电导率和片层状结构使它成为制备应变传感器的热门材料之一。在应变传感器中,石墨烯及其复合材料被铺成薄膜,通过片与片直接接触形成导电网络。之后,该薄膜被附着在柔性的复合物基材上,如硅橡胶薄膜。当该传感器接触到

应变后,柔性的基材迅速将应变传递到石墨烯薄膜上。这时,石墨烯片与片的接触情况发生变化,从而引起接触电阻的改变。这样,整个石墨烯导电网络的电阻发生变化。这就是压电阻(piezoresistivity)反应的原理。当应变被结束后,柔性基层回复到原来的状态,石墨烯片与片也随之恢复原有的接触状态,进而可以感应下一个应变。

虽然石墨烯应变传感器已经被报道出来,但在制备过程中,仍有两个问题需要解决:第一,如何把石墨烯均匀地铺设成薄膜。因为只有均匀铺设的薄膜才能准确地感受应变的强度与位置。第二,如何在石墨烯薄膜与柔性基材之间形成稳定的接触界面。这一接触界面不仅要能够快速有效地将应变传递到石墨烯薄膜,产生感应,而且要能够将石墨烯牢牢附着在基材上,使石墨烯不至于在反复多次测试后发生脱落<sup>[35]</sup>。

### 结束语

石墨烯及其聚合物导电复合材料的研究与应用将主要集中在以下几个方面:(1)改进现有的石墨烯制

备方法,实现石墨烯材料的低成本、高质量(高规整度与高电导率)、大规模制备;(2)进一步研究石墨烯所具有的独特性能,提高和完善石墨烯表面改性的方法,有效地控制可用于改性的含氧基团及位置等,并在改性后保持石墨烯良好的固有性质;(3)对石墨烯与聚合物基体间界面结构进行深入分析,了解界面结构对石墨烯复合材料导电性与机械性能的影响,构建稳定的复合材料界面结构,充分提升复合材料各项功能性能。

石墨烯/聚合物导电复合材料的优异性能使其在航空航天、微电子、电力、新能源等领域具有十分广阔的应用前景。相信随着研究的不断深入,石墨烯聚合物导电复合材料的用途将会越来越广泛。

### 参考文献

- [1] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007,6(3):183-191.
- [2] GEIM A K. Graphene: status and prospects[J]. Science, 2009,324(5934):1530-1534.
- [3] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696):666-669.
- [4] WANG Y, ZHENG Y, XU X, et al. Electrochemical delamination of CVD-grown graphene film: toward the recyclable use of copper catalyst[J]. ACS Nano, 2011, 5(12):9927-9933.
- [5] LI D, MUELLER M B, GILJE S, et al. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets[J]. Nature Nanotechnology, 2008,3(2):101-105.
- [6] KUILLA T, BHADRA S, YAO D, et al. Recent advances in graphene based polymer composites[J]. Progress in Polymer Science, 2010,35(11):1350-1375.
- [7] STANKOVICH S, DIKIN D A, DOMMETT G H, et al. Graphene-based composite materials[J]. Nature, 2006,442(7100):282-286.
- [8] LI D, KANER R B. Graphene-based materials[J]. Science, 2008,320(5880):1170-1171.
- [9] CHENG C, LI D. Solvated graphenes: an emerging class of functional soft materials[J].

- Advanced Materials, 2013,25(1):13–30.
- [10] ZHANG L, WU J, JIANG L. Graphene and its polymer nanocomposites[J]. Progress in Chemistry, 2014,26(4):560–571.
- [11] KUANG D, HU W B. Research progress of graphene composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013,28(3):235–246.
- [12] NOVOSELOV K S, NETO A H C. Two-dimensional crystals-based heterostructures: materials with tailored properties[J/OL]. Physica Scripta, 2012, 2012(T146). <http://iopscience.iop.org/1402-4896/2012/T146/014006>.
- [13] JANG H, PARK Y J, CHEN X, et al. Graphene-based flexible and stretchable electronics[J]. Advanced Materials, 2016,28(22): 4184–4202.
- [14] SUN Z, YAN Z, YAO J, et al. Growth of graphene from solid carbon sources[J]. Nature, 2010,468(7323):549–552.
- [15] CHEN J, YAO B, LI C, et al. An improved hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide[J]. Carbon, 2013,64:225–229.
- [16] 基于石墨烯-血红素复合物的氧气电催化还原研究[J/OL]. [2016-05-12]. <http://www.tiaozhanbei.net/project/16402/>.
- [17] MA J, MENG Q, ZAMAN I, et al. Development of polymer composites using modified, high-structural integrity graphene platelets[J]. Composites Science and Technology, 2014,91:82–90.
- [18] ZHANG X, FENG Y, HUANG D, et al. Investigation of optical modulated conductance effects based on a graphene oxide-azobenzene hybrid[J]. Carbon, 2010,48(11):3236–3241.
- [19] BAI H, XU Y, ZHAO L, et al. Non-covalent functionalization of graphene sheets by sulfonated polyaniline[J]. Chemical Communications, 2009, 13(13):1667–1669.
- [20] LEE Y R, RAGHU A V, JEONG H M, et al. Properties of waterborne polyurethane/functionalized graphene sheet nanocomposites prepared by an in situ method[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2009,210(15):1247–1254.
- [21] BAO C, GUO Y, SONG L, et al. In situ preparation of functionalized graphene oxide/epoxy nanocomposites with effective reinforcements[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011,21(35):13290–13298.
- [22] CHEN J, SHENG K, LUO P, et al. Graphene hydrogels deposited in nickel foams for high-rate electrochemical capacitors[J]. Advanced Materials, 2012,24(33):4569–4573.
- [23] HUANG C, LI C, SHI G. Graphene based catalysts[J]. Energy & Environmental Science, 2012,5(10):8848–8868.
- [24] YUAN W, CHEN J, SHI G. Nanoporous graphene materials[J]. Materials Today, 2014,17(2):77–85.
- [25] YANG X, CHENG C, WANG Y, et al. Liquid-mediated dense integration of graphene materials for compact capacitive energy storage[J]. Science, 2013, 341(6145):534–537.
- [26] ZAMAN I, KUAN H C, MENG Q S, et al. A facile approach to chemically modified graphene and its polymer nanocomposites[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(13): 2735–2743.
- [27] MA J, MENG Q S, MICHELMORE A, et al. Covalently bonded interfaces for polymer/graphene composites[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013,1(13): 4255–4264.
- [28] MENG Q S, ARABY S, SABER N, et al. From graphene and graphene oxide, to graphene platelets[J]. Australian Resources & Investment, 2014,8(2):134–135.
- [29] MENG Q S, WANG C H, SABER N, et al. Nanosilica-toughened polymer adhesives[J]. Materials & Design, 2014,61(9):75–86.
- [30] MENG Q S, ARABY S, MA J. Toughening mechanisms in epoxy/graphene platelets composites[M]//Qin Q, Ye J. Toughening Mechanisms in Composite Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015:73–112.
- [31] SATTI A, LARPEP P, GUN' KO Y. Improvement of mechanical properties of graphene oxide/poly(allylamine) composites by chemical crosslinking[J]. Carbon, 2010,48(12):3376–3381.
- [32] MENG Q S, JIN J, MA J, et al. Processable 3-nm thick graphene platelets of high electrical conductivity and their epoxy composites[J]. Nanotechnology, 2014, 25(12):374–379.
- [33] ARABY S, MENG Q S, ZHANG L Q, et al. Electrically and thermally conductive elastomer/graphene nanocomposites by solution mixing[J]. Polymer, 2014,55(1):201–210.
- [34] MOUSSA M, EL-KADY M F, WANG H, et al. High-performance supercapacitors using graphene/polyaniline composites deposited on kitchen sponge[J]. Nanotechnology, 2015,26(7):075702.
- [35] LI X, YANG T, YANG Y, et al. Large - area ultrathin graphene films by single - step marangoni self - assembly for highly sensitive strain sensing application[J]. Advanced Functional Materials, 2016,26(9):1322–1329.

## Research Progress on Graphene/Polymer Electrically Conductive Composites

MENG Qingshi<sup>1,2</sup>, LU Shaowei<sup>1</sup>, SHI Ge<sup>2</sup>, PAN Xiao<sup>3</sup>, MA Jun<sup>2</sup>

(1. Aerospace Engineering Division, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. School of Engineering, University of South Australia, Adelaide 5000, Australia;

3. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110015, China )

**[ABSTRACT]** Graphene is a new generation of carbon based material and has outstanding mechanical, electrical and other functional properties. Graphene is an ideal additive for fabrication of conductive polymer composites. In this review paper, a numbers of common fabrication methods of graphene are reviewed and compared. The electrical and mechanical properties of graphene and its nanocomposites are then introduced. Furthermore, the progress on the application of graphene and its conductive composites has been systematically reviewed. Finally, the challenge of this research area is summarized and its future work is prospected.

**Keywords:** Graphene; Composite material; Fabrication method; Surface modification

(责编 谷雨)