

# 石墨烯在强化传热领域的研究进展

于伟, 谢华清, 陈立飞, 汪明珠, 齐玉

上海第二工业大学工学部环境与材料工程学院, 上海 201209

**摘要** 石墨烯是一种单原子层厚度的二维平面碳纳米材料, 具有超高的载流子迁移率、高热导率等特性。本文综述目前石墨烯在强化传热领域的研究进展, 包括石墨烯热导率的测试方法, 以及石墨烯在纳米流体、热界面材料、高导热复合高分子材料方面的应用, 并对未来石墨烯的研究方向进行展望。

**关键词** 石墨烯; 热导率; 纳米流体; 热界面材料; 高导热复合高分子材料

**中图分类号** TK124

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.005

## Recent progress of graphene researches in enhanced heat transfer fields

YU Wei, XIE Huaqing, CHEN Lifei, WANG Mingzhu, QI Yu

College of Engineering, School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China

**Abstract** The graphene is a new type of two-dimensional carbon nanomaterials with a single atomic layer, and it has an ultra high carrier mobility, a high thermal conductivity and other good properties. This paper reviews the current research progress of the graphene in enhanced heat transfer fields, including the measurement method for the thermal conductivity of the graphene, and the applications of the graphene in nanofluids, thermal interface materials, and polymer composites with high thermal conductivity. Some research directions in the future are suggested.

**Keywords** graphene; thermal conductivity; nanofluids; thermal interface materials; polymer composite with high thermal conductivity

石墨烯是一种单原子层厚度的二维平面碳纳米材料, 由  $sp^2$  杂化碳原子连接而成, 该特殊结构赋予了石墨烯独特的物理和化学特性。自 Novoselov 和 Geim<sup>[1]</sup> 于 2004 年发现至今, 石墨烯以超高载流子迁移率、高热导率、高强度、高比表面积等优点引起了科技界的广泛关注。2008 年, Balandin 等<sup>[2]</sup> 通过实验得到了单层石墨烯的热导率, 其值高达  $5300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。该研究结果引起了传热学界的强烈兴趣, 大大推动了石墨烯在强化传热领域的研究。本文介绍目前石墨烯在强化传热领域的研究进展, 包括石墨烯热导率的测试方法, 以及石墨烯在纳米流体、热界面材料和高导热复合高分子材料方面的研究, 并对未来石墨烯的研究方向进行展望。

### 1 石墨烯及氧化石墨烯薄膜(纸)的热导率

石墨烯是一种具有蜂窝状晶体结构的二维碳材料, 理论

研究表明, 这种结构能够加速电子和声子传输, 使其具有优异的热传导特性<sup>[3]</sup>。美国加州大学河滨分校 Balandin 领导的纳米仪器实验室采用共焦显微拉曼光谱通过实验得到了单层石墨烯的热导率。由于石墨烯的拉曼光谱 G 带具有很强的温度敏感性, 通过测试石墨烯 G 带拉曼位移的改变, 可以计算得到石墨烯的热导率, 其测试原理示意图如图 1 所示<sup>[2]</sup>。随后, 他们分析了不同层数石墨烯拉曼光谱随温度变化的系数, 得到了石墨烯的热导率与层数间的关系, 发现其热导率随层数的增加迅速降低(图 2)<sup>[4]</sup>。

Chen 等<sup>[5]</sup> 通过化学气相沉积法制备了单层石墨烯, 研究结果表明石墨烯拉曼光谱 2D 带的温度敏感性优于 G 带。基于此, 他们通过测试 2D 带的变化, 研究了石墨烯尺寸和气体环境对石墨烯热导率测试的影响。结果表明单层石墨烯的尺寸对热导率测试有较大影响, 其在真空中的最大热导率达

收稿日期: 2015-01-07; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106093, 51176106, 51306109); 上海市基础研究重点项目(12JC1404300); 上海市第二工业大学优势学科项目(XXKYS1401)

作者简介: 于伟, 副教授, 研究方向为热功能材料, 电子信箱: yuwei@sspu.edu.cn; 谢华清(通信作者), 教授, 研究方向为热功能材料、低维材料热物理、能源材料等, 电子信箱: hqxie@sspu.edu.cn

引用格式: 于伟, 谢华清, 陈立飞, 等. 石墨烯在强化传热领域的研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 39-45.

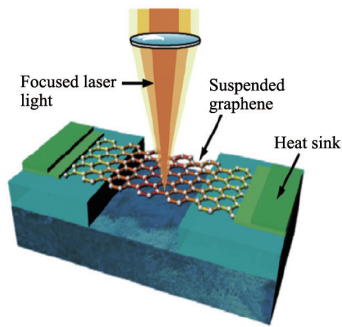


图1 共焦显微拉曼光谱测量石墨烯热导率示意  
Fig. 1 Thermal conductivity measurement using optothermal Raman technique

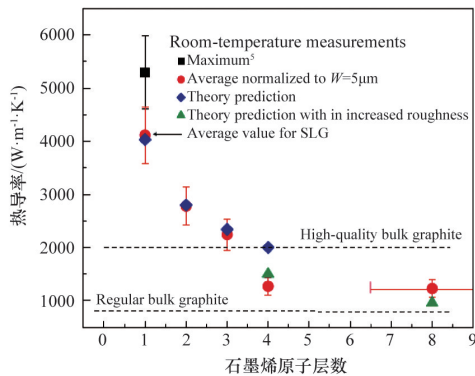


图2 石墨烯热导率与层数间的关系  
Fig. 2 Relationship between graphene thermal conductivity and layer numbers

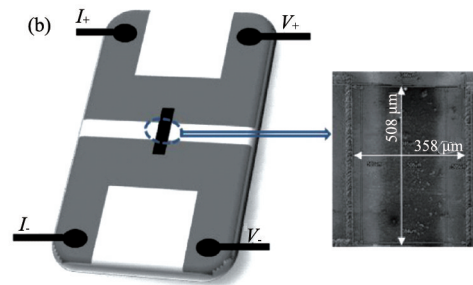
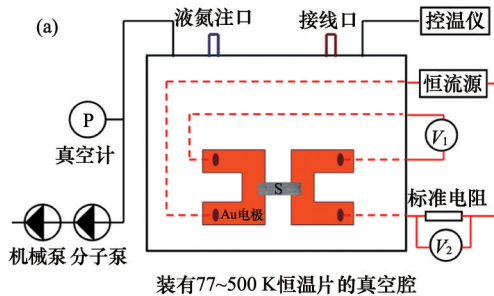


图3 低维材料热导率稳态自加热法测量系统(a)及自由悬架石墨烯纳米带(b)  
Fig. 3 Steady state self heating system for thermal conductivity measurement of low-dimensional materials (a), and schematic diagram of suspended GNR (b)

氧化石墨烯膜又称为氧化石墨烯纸,是一类新型的层状材料,与其他纸类材料相比,具有很多突出的优点。于伟等<sup>[10]</sup>采用定向流自组装的方法制备了氧化石墨烯薄膜,并分别采用瞬态热电技术和激光脉冲法测试了氧化石墨烯薄膜的面内和垂直方向的热导率。结果表明,氧化石墨烯薄膜热传输特性具有各向异性,面内的热扩散系数和热导率分别为 $1.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,垂直方向的热扩散系数为 $1.68 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见,氧化石墨烯薄膜面内热导率远大于垂直方向的热导率,这是由于氧化石墨烯薄膜由氧化石

到 $3100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;在其他气氛中的热导率值低于在真空中的值。而Lee等<sup>[9]</sup>采用机械剥离法制备的单层石墨烯,采用类似的测试方法得到的热导率分别为 $1800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (325 K)和 $710 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (500 K)。在实际使用中,石墨烯通常负载在基体上,测试具有支撑的石墨烯的热导率同样重要。Cai等<sup>[7]</sup>测试了悬架的石墨烯和有支撑的石墨烯的热导率,分别为2500和 $370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。Schwamb等<sup>[8]</sup>采用四点测量方法,得到了还原氧化石墨烯的热导率,发现其热传输特性强烈依赖于石墨烯的氧化水平。谢华清等<sup>[9]</sup>采用稳态自加热法研究了自由悬架的石墨烯纳米带的热传输特性,测试系统如图3<sup>[9]</sup>所示。石墨烯纳米带同时作为加热源和电阻温度计,通过恒流自加热,石墨烯纳米带的温度分布在几微秒内达到平衡,改变电流得到温度改变值,通过式(1)计算得到不同温度下的石墨烯纳米带热导率

$$k = \left( \frac{l}{12wd} \right) / \left( \frac{\Delta T_l}{IV} \right) \quad (1)$$

其中, $l$ 、 $w$ 、 $d$ 分别为石墨烯纳米带的长、宽和厚度; $\Delta T_l$ 为平均温度增量; $I$ 为加热电流; $V$ 为电压。结果表明,石墨烯纳米带的热导率和温度具有很强的相关性,其随着温度的升高而增大。当温度从 $-75^\circ\text{C}$ 升高至 $100^\circ\text{C}$ 时,其热导率从 $126.21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 增大至 $877.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,但在 $50^\circ\text{C}$ 时,石墨烯纳米带的热导率突增至 $1044.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。该方法得到的石墨烯纳米带的热导率值的误差小于5%,这是一种可靠的测试石墨烯或其他低维材料(如纳米线、纳米薄膜)热导率的方法。

墨烯堆叠而成,热量很容易沿着氧化石墨烯平面传输,而垂直方向热量传输需要克服片层之间的热阻。于伟等<sup>[11]</sup>进一步采用碱土金属离子改性的方法,制备了改性的氧化石墨烯纸(图4<sup>[10]</sup>),通过激光闪射法测试了改性前后的氧化石墨烯纸的热导率。结果表明,碱土金属离子改性的氧化石墨烯纸的热导率达到 $61.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,远大于未改性的氧化石墨烯纸,这归因于碱土金属离子作为交联剂能够使氧化石墨烯连接在一起,同时使氧化石墨烯更规整地排列,这样降低了界面热阻,从而提高了热导率。

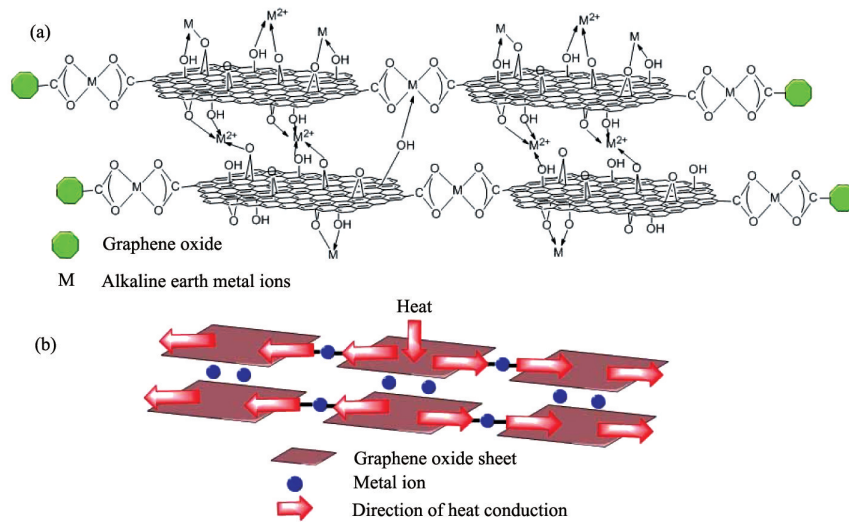


图4 氧化石墨烯和碱土金属离子的相互作用(a)及改性氧化石墨烯纸热传输(b)示意

Fig. 4 Schematic model of the reaction between graphene oxide sheet and  $MCl_2$  (M: Mg and Ca) (a), and the proposed model for the enhanced thermal conductivity of graphene oxide paper observed after metal ions modification (b)

## 2 石墨烯基纳米流体

Choi等<sup>[12]</sup>在1995年率先提出了纳米流体的概念。纳米流体是指以一定方式在液体介质中添加纳米粒子或是纳米管而形成均匀、稳定、高效的新型换热介质。石墨烯作为一种碳纳米材料,超高的热导率,使其在热管理领域具有很大潜能。根据Hamilton和Crosser的预测<sup>[13]</sup>,当粒子和液体的热导率比值大于100时,粒子形状对纳米流体的热导率具有决定性的影响。石墨烯是二维纳米材料,相较于零维纳米颗粒和一维纳米管,其热传输特性和传热机制有很大不同。

Yu等<sup>[14-17]</sup>系统研究并报道了石墨烯基纳米流体方面的研究成果。首先,他们尝试了乙二醇基含氧化石墨烯的纳米流体。因为氧化石墨烯表面有丰富的极性基团,有良好的亲水性,可在乙二醇得到很好的分散,具有良好的长期稳定性。该纳米流体的热导率随着氧化石墨烯的添加量的增加而增大。当氧化石墨烯的添加量为5%(体积分数)时,其热导率增加比达到61%,远高于其他金属氧化物(图5<sup>[14]</sup>)。在10~60℃的温度范围内,该纳米流体的热导率随着温度升高而稍微增大,但热导率增加比几乎不变。

氧化石墨烯具有很强的亲水性,能够均匀稳定地分散在极性溶剂中,但是很难分散在非极性溶剂中。于伟等<sup>[15,16]</sup>采用相转移方法制备了均匀稳定的含有氧化石墨烯的非极性溶剂的悬浮液。研究表明,纳米流体的热导率增加比随着氧化石墨烯的添加量的增加而近似线性增大,当氧化石墨烯的添加量为5%(体积分数)时,以去离子水、丙二醇和液体石蜡为基质的纳米流体的热导率增加比分别为30.2%、62.3%和76.8%;纳米流体的热导率增加比随着基体热导率的增加而降低。这是由于两者的热导率相差越大,纳米流体热导率增加效果越明显。虽然氧化石墨烯能够有效地增加纳

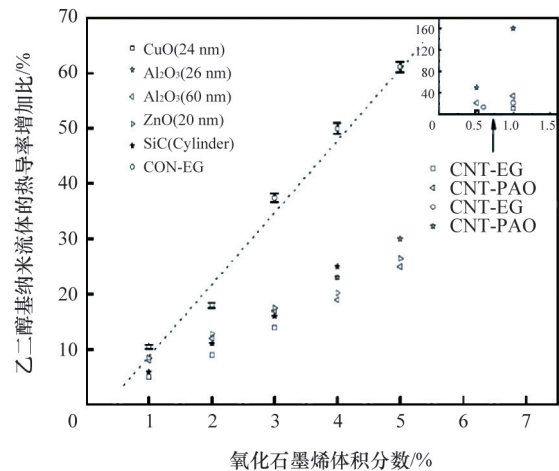


图5 乙二醇基纳米流体的热导率增加比随氧化石墨烯体积分数的变化趋势

Fig. 5 Relation between the thermal conductivity enhanced ratio and the volume fractions for EG based nanofluids containing graphene oxide

米流体的热导率,但是其热导率增加比远小于预期值,这是由于氧化石墨烯的本身热导率小于石墨烯,而且氧化过程产生的结构缺陷,直接影响了热量沿着二维平面的传输。因而,将氧化石墨烯还原,是进一步提高纳米流体热导率的有效途径。于伟等<sup>[17]</sup>采用化学氧化还原的方法制备了亲水性的石墨烯,即在还原过程中加入表面活性剂,阻止石墨烯的团聚,得到易在极性溶剂中分散的石墨烯。如图6<sup>[16]</sup>所示,超声分散制备的石墨烯-乙二醇纳米流体的热导率增加比随着石墨烯添加量的增加而增大,当添加量为5%(体积分数)时,其热导率增加比达到86%,高于氧化石墨烯基纳米流体。这是

由于石墨烯的高比表面积能够显著增加固液接触面积,降低界面接触热阻;另外石墨烯的热导率高于氧化石墨烯,面内缺陷少,能够有效降低声子散射,从而提高纳米流体的热导率。通过 Nan 等<sup>[17]</sup>的理论模型预测得到石墨烯的热导率仅为  $6.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 远低于理论值。一方面,由于采用改性 Hummer 法制备的石墨烯尺寸较小,当尺寸小于声子平均自由程,热导率受尺寸的限制;另一方面,化学还原不能完全修复石墨烯被破坏的晶体结构,残留的缺陷作为声子散射的中心,降低了石墨烯的热导率。

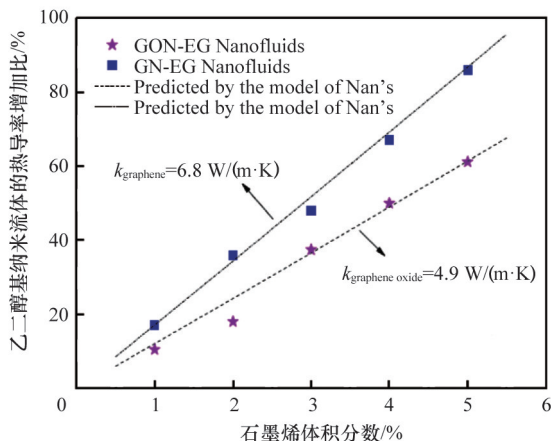


图6 乙二醇基纳米流体的热导率增加比随着石墨烯体积分数的变化趋势

Fig. 6 Relation between the thermal conductivity enhanced ratio and the volume fractions for EG based nanofluids containing graphene

氧化石墨烯纳米流体可有效提高核冷却化学环境中池沸腾中临界热流密度<sup>[18]</sup>,在垂直方向可提高40%,而水平方向提高了约200%。Mehrali 等<sup>[19]</sup>采用高能超分散技术制备了稳定均一含石墨烯纳米片(比表面积  $750 \text{ m}^2/\text{g}$ )的纳米流体,发现质量分数仅为0.1%时,热导率的提高达到27.64%。石墨烯对流传热系数的提高取决于流量。在石墨烯质量分数为0.1%时,对流传热系数提高了35.6%(38℃)<sup>[20]</sup>。采用  $\text{SiO}_2$  对石墨烯的表面包覆,可实现石墨烯的亲水化改性,该方法在提高纳米流体热导率方面比表面活性剂更加有效<sup>[21]</sup>。Park 等<sup>[22]</sup>研究了氧化处理和石墨烯粒径对纳米流体热导率的影响,发现石墨烯平均粒径较小有助于纳米流体导热性能的提升。Lee 等<sup>[23]</sup>研究表明,超声辐射有助于石墨烯基纳米流体导热系数的提高,其提高值依赖于石墨烯质量分数,温度对提高值影响不大。

元素掺杂石墨烯纳米流体的传热特性也引起了科学家的关注。如, Merali 等<sup>[24]</sup>制备了含氮掺杂石墨烯纳米流体,发现在负载量仅0.06%(质量分数)时,其热导率提高达到了36.78%。该纳米流体呈现牛顿型纳米流体的特性。Sudeep 等<sup>[25]</sup>研究了含氟化氧化石墨烯的纳米流体,发现与氧化石墨烯相比,氟化氧化石墨烯提高基体热导率更加有效,且氟含

量越高提高值越大。

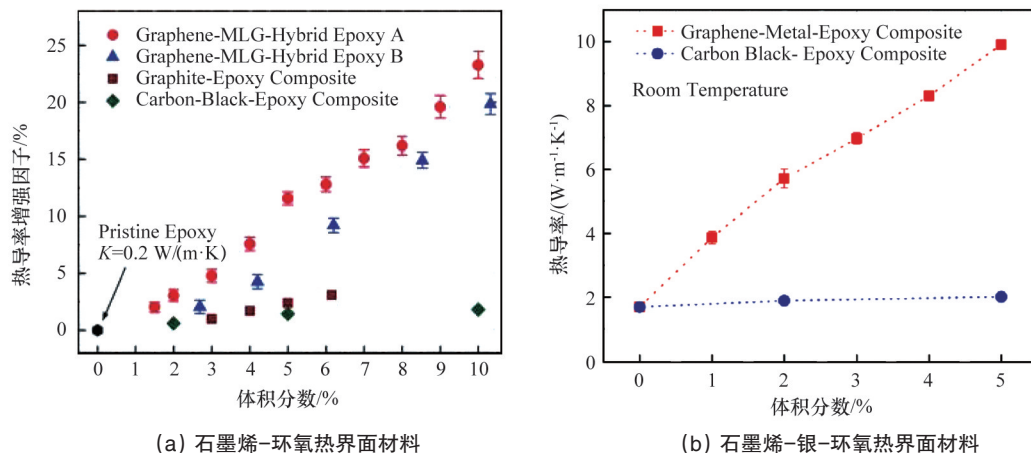
### 3 石墨烯热界面材料

热界面材料是指在固体表面接触时(通常指发热源和散热器件),用于补充和填充因固体接触表面不匹配而产生的缝隙的材料<sup>[26]</sup>。通常需要具备优良的导热能力和良好的浸润性。典型的热界面材料可以分为导热硅脂、导热凝胶、相变材料和金属热界面材料等<sup>[26]</sup>。石墨烯以其优异的热导率可以广泛应用各种类型的热界面材料,如作为填料用于导热硅脂、导热凝胶、相变材料等。

于伟等<sup>[27]</sup>采用高温热还原的方法制备了还原的氧化石墨烯(RGO),采用插层—膨胀—剥离的方法制备了石墨烯纳米片(GNP),并分别以RGO、GNP和天然鳞片石墨(NFG)为填料制备了导热硅脂。研究表明,不同制备方法得到的石墨烯产品的性质相差较大,具体表现在热导率、比表面积和与基体的相容性均不同。当体积分量为1%时,含RGO导热硅脂的热导率增加比最大,达到103.8%,这说明RGO在低添加量时是提高导热硅脂热导率最有效的填料。然而RGO的比表面积达  $600 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,当体积分数超过1.25%时,在显著毛细效应的作用下,导热硅脂丧失其流动性,限制了导热硅脂的实际应用。GNP基导热硅脂的热导率增加比随着填料的增加而线性增大,当体积分量为4.25%时,其热导率增加比达到668%,远高于以NFG为填料的导热硅脂。这是由于GNP的二维平面结构、高热导率和超大的纵横比,降低了尺寸效应对声子散射的贡献;另一方面其比表面积较大,增加了填料与基质的接触面积,降低了界面热阻,从而加快了热量传输。

Baladin 课题组在石墨烯基热界面材料方面有许多重要进展<sup>[28-30]</sup>。例如,发现不同层数石墨烯的复合更有助于提高界面材料的热传输性能。通过优化,石墨烯在体积分量为10%时,热导率的提高可达基体材料的23倍(图7(a))<sup>[28]</sup>。在目前商用导热硅脂中添加2%(体积分数)的石墨烯,可将热脂的热导率由目前的  $5.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  提高到  $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[28]</sup>。石墨烯与银的复合效果远高于碳黑与银的复合,在石墨烯的体积分量为5%时,其热导率相比传统的银环氧树脂热界面材料提高了近5倍(图7(b))<sup>[29,30]</sup>。

二维的石墨烯与一维的碳纳米管(CNT)可协同提高复合体系的热导率。Yang 等<sup>[31]</sup>研究了环氧树脂/CNT/GNP复合物,当填料量为1%(质量分数)时复合物热导率表现出较强的协同增强效应,相对于基体热导率提高了46.9%。Yu 等<sup>[32]</sup>发现 GNP/CNT 混合填料量低于30%(质量分数)时存在对热导率提升的协同效应,当混合填料量为10%(质量分数)(Yu 等研究中的最佳填料量)时,可获得热导率为  $1.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  的复合物,高于只添加CNT或者GNP时复合物的热导率。Im 等<sup>[33]</sup>研究表明,0.36%(质量分数)CNT的添加,可协同提高含氧化石墨烯环氧树脂复合材料的热导率,CNT的进一步添加会增加声子散射,反而不利于热传输性能的提高。Huang 等<sup>[34]</sup>研究了高体积分数下,GNP与CNT协同效应,发现当GNP与



(a) 石墨烯-环氧热界面材料

(b) 石墨烯-银-环氧热界面材料

图7 环氧树脂热界面材料热导率

Fig. 7 Thermal conductivity of epoxy thermal interface materials

CNT体积分数各20%时,其提高值甚至超过了单独含50%的GNP或CNT。最终,他们获得了热导率达 $7.30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的环氧树脂复合材料,与基体材料相比提高了38倍。

#### 4 石墨烯导热复合材料

导热高分子复合材料是一种极具应用前景的功能材料,由于其具有热导率高、易加工、耐腐蚀等优点,因而在微电子、航空航天、军事装备、电机电器等领域发挥着非常重要的作用。一般来说,对于填充型的高导热高分子复合材料,其优异的传热特性很大程度上取决于填料的性能。石墨烯以其超高的载流子迁移率、优异的热导率、高比表面积和高强度等优点,在高导热高分子复合物材料领域具有广泛应用潜力。

于伟等<sup>[35]</sup>采用机械共混法制备了以石墨烯纳米片为填料的高导热尼龙6复合材料。该复合物的热导率随着石墨烯纳米片的含量的增加而线性增大,当体积含量为20%时,其热导率达到 $4.11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,是尼龙6复合材料热导率的15倍。研究表明,填充型复合材料的导热性能受到导热填料的热导率、种类、粒径、结构形态和表面润湿程度等因素的影响。而石墨烯导热复合材料表现出的优异导热性能主要是由于石墨烯自身热导率非常高,界面声子散射和传输阻力小;其二维平面结构更容易形成导热网络;其比表面积大、密度低,有利于充分发挥其优异的传热性能。Xie等<sup>[36]</sup>比较了含石墨烯和碳纳米管复合材料的有效电导率,发现石墨烯具有更低的导电渗值。

经典的Hummer法可制备出较高比表面积的石墨烯,但由于制备过程中使用大量的强氧化剂,会对石墨烯的完美晶体结构造成不可逆转的破坏,因而非氧化或共键改性石墨烯在提高复合材料热导率方面具有明显的优势。如Song等<sup>[37]</sup>发现茈丁酸改性的非氧化石墨烯片可提高石墨烯在聚合物基体中的分散,且其在具有高的机械性能时(1.03 GPa),热导

率达到 $1.53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。Teng等<sup>[38]</sup>利用茈与石墨烯间的 $\pi-\pi$ 共轭效应,实现了对石墨烯纳米片的非共价键改性功能化。该方法制备的石墨烯环氧树脂复合材料热导率比未改性的提高20%,也高于多壁碳纳米管复合体系的热导率。

石墨烯作为二维材料与一维材料、零维纳米材料可协同提高复合体系的热导率。石墨烯与碳纳米管的协同效应是研究较多的体系。如长的卷曲多壁碳纳米管可将石墨烯桥联起来,阻止了石墨烯的团聚,在提高环氧树脂复合材料的机械性能和热导率方面具有显著的协同效应<sup>[31]</sup>。Yang等<sup>[39]</sup>发现极性的氨基官能团可引入碳纳米管或石墨烯纳米片表面,两者在提高聚(亚芳基醚腈)的机械、热学性能方面也有类似的结论。最近的研究结果表明,石墨烯与零维的球形氧化铝在提高导热硅脂热导率方面具有明显的协同效应<sup>[40]</sup>。石墨烯在添加量较少的情况下(质量分数<1%)即具有明显的协同强化传热效果,氧化铝在复合体系中的含量越高,协同效果越明显,其研究结果和模型分别如图8和图9所示<sup>[40]</sup>。

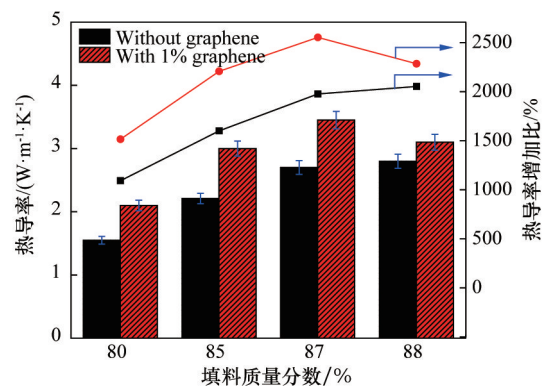


图8 导热硅脂热导率和热导率增加比随着填料质量分数的变化

Fig. 8 Thermal conductivity and thermal conductivity enhancement of thermal greases as a function of total mass fraction

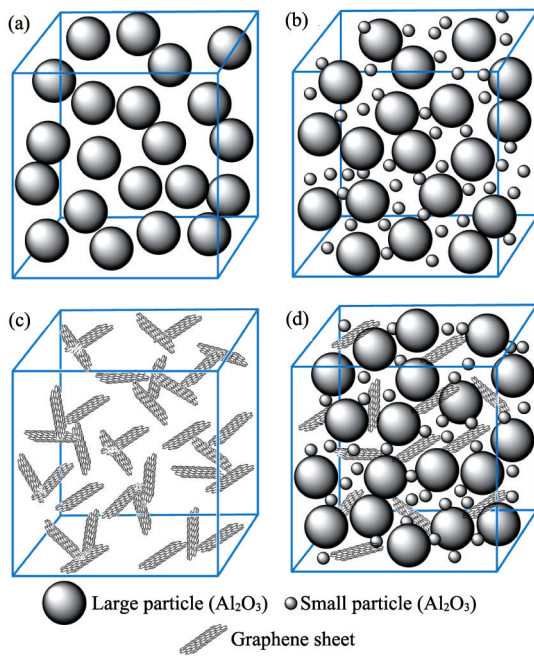


图9 大尺寸氧化铝(a),混合尺寸氧化铝(b),石墨烯(c)及石墨烯和氧化铝混合填料(d)在硅脂中的分布示意

Fig. 9 Schematics of the distribution of large alumina particles (a), hybrid size alumina particles (b), graphene sheets (c) and hybrid filler of alumina and graphene (d) in silicone base

## 5 展望

石墨烯在强化传热领域取得了重要的研究进展,展示了巨大的潜力,主要归因于高的载流子迁移率和二维平面结构和大的比表面积两大因素。在下一阶段研究中,以下方面仍需重点关注:

- 1) 实现高质量石墨烯的规模化生产,解决目前石墨烯成本过高的问题。
- 2) 解决石墨烯与基体材料间的相容性问题,降低微观界面热阻和应力。
- 3) 低维材料协同强化复合体系热传输特性研究,实现多尺度材料间的结构互补。
- 4) 类石墨烯材料在高导热绝缘复合体系中具有很大的潜力,相关研究尚处于起步阶段。

### 参考文献 (References)

[1] 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.  
 [2] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3): 902-907.  
 [3] Saito K, Nakamura J, Natori A. Ballistic thermal conductance of a graphene sheet[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(11): 115409.  
 [4] Ghosh S, Bao W, Subrina S, et al. Dimensional crossover of thermal transport in few-layer graphene[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(7): 555-

558.

[5] Chen S, Moore A L, Cai W, et al. Raman measurements of thermal transport in suspended monolayer graphene of variable sizes in vacuum and gaseous environments[J]. *ACS Nano*, 2010, 5(1): 321-328.  
 [6] Lee J U, Yoon D, Kim H, et al. Thermal conductivity of suspended pristine graphene measured by Raman spectroscopy[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(8): 081419.  
 [7] Cai W, Moore A L, Zhu Y, et al. Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1645-1651.  
 [8] Schwamb T, Burg B R, Schirmer N C, et al. An electrical method for the measurement of the thermal and electrical conductivity of reduced graphene oxide nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(40): 405704.  
 [9] Xie H, Chen L, Yu W, et al. Temperature dependent thermal conductivity of a free-standing graphene nanoribbon[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(11): 111911.  
 [10] Yu W, Liu G, Wang J, et al. Significantly reduced anisotropic phonon thermal transport in graphene oxide films[J]. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry*, 2013, 43(9): 1197-1205.  
 [11] Yu W, Xie H, Li F, et al. Significant thermal conductivity enhancement in graphene oxide papers modified with alkaline earth metal ions[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 141913.  
 [12] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. *ASME-Publications-Fed*, 1995, 231: 99-106.  
 [13] Hamilton R L, Crosser O K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1962, 1(3): 187-191.  
 [14] Yu W, Xie H Q, Bao D. Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(5): 055705.  
 [15] Yu W, Xie H Q, Wang X, et al. Highly efficient method for preparing homogeneous and stable colloids containing graphene oxide[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6(1): 1-7.  
 [16] Yu W, Xie H Q, Chen W. Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing graphene oxide nanosheets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(9): 094317.  
 [17] Yu W, Xie H Q, Wang X, et al. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets[J]. *Physics Letters A*, 2011, 375(10): 1323-1328.  
 [18] Park S D, Lee S W, Kang S, et al. Pool boiling CHF enhancement by graphene-oxide nanofluid under nuclear coolant chemical environments [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 252: 184-191.  
 [19] Mehrali M, Sadeghinezhad E, Latibari S T, et al. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 15.  
 [20] Ghozatloo A, Rashidi A, Shariaty-Niassar M. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 53:136-141.  
 [21] Li X, Chen Y, Mo S, et al. Effect of surface modification on the stability and thermal conductivity of water-based SiO<sub>2</sub>-coated graphene nanofluid [J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 595: 6-10.  
 [22] Park S S, Kim N J. Influence of the oxidation treatment and the average particle diameter of graphene for thermal conductivity enhancement[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, 20(4): 1911-1915.

- [23] Lee G, Rhee C K. Enhanced thermal conductivity of nanofluids containing graphene nanoplatelets prepared by ultrasound irradiation[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(4): 1506–1511.
- [24] Mehrali M, Sadeghinezhad E, Latibari S T, et al. Preparation, characterization, viscosity, and thermal conductivity of nitrogen-doped graphene aqueous nanofluids[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(20): 7156–7171.
- [25] Sudeep P M, Taha-Tijerina J, Ajayan P M, et al. Nanofluids based on fluorinated graphene oxide for efficient thermal management[J]. RSC Advances, 2014, 4(47): 24887–24892.
- [26] Prasher R. Thermal interface materials: historical perspective, status, and future directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(8): 1571–1586.
- [27] Yu W, Xie H, Chen L. Graphene based silicone thermal greases[J]. Physics Letters A, 2014, 378(3): 207–211.
- [28] Shahil K M F, Balandin A A. Graphene-multilayer graphene nanocomposites as highly efficient thermal interface materials[J]. Nano Letters, 2012, 12(2): 861–867.
- [29] Goyal V, Balandin A A. Thermal properties of the hybrid graphene-metal nano-micro-composites: Applications in thermal interface materials [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(7): 073113.
- [30] Shahil K M F, Balandin A A. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials[J]. Solid State Communications, 2012, 152(15): 1311–1340.
- [31] Yang S Y, Lin W N, Huang Y L, et al. Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites [J]. Carbon, 2011, 49: 793–803.
- [32] Yu A P, Ramesh P, Sun X B, et al. Enhanced thermal conductivity in a hybrid graphite nanoplatelet-carbon nanotube filler for epoxy composites [J]. Advanced Materials, 2008, 20: 4740–4744.
- [33] Im H, Kim J. Thermal conductivity of a graphene oxide-carbon nanotube hybrid/epoxy composite[J]. Carbon, 2012, 50(15): 5429–5440.
- [34] Huang X, Zhi C, Jiang P. Toward effective synergetic effects from graphene nanoplatelets and carbon nanotubes on thermal conductivity of ultrahigh volume fraction nanocarbon epoxy composites[J]. Journal of Physics Chemistry C, 2012, 116(44): 23812–23820.
- [35] 于伟, 谢华清, 陈立飞, 等. 高导热含石墨烯纳米片尼龙6复合材料 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(9): 1749–1751.  
Yu Wei, Xie Huaqing, Chen Lifei, et al. The high thermal conductivity of graphene nanoplatelets with nylon 6 composites[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1749–1751.
- [36] Xie S H, Liu Y Y, Li J Y. Comparison of the effective conductivity between composites reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(24): 243121.
- [37] Song S H, Park K H, Kim B H, et al. Enhanced thermal conductivity of epoxy-graphene composites by using non-oxidized graphene flakes with non-covalent fictionalization[J]. Advanced Materials, 2013, 25(5): 732–737.
- [38] Teng C, Ma C, Lu C, et al. Thermal conductivity and structure of non-covalent functionalized graphene/epoxy composites[J]. Carbon, 2011, 49(15): 5107–5116.
- [39] Yang X, Zhan Y, Yang J, et al. Synergetic effect of cyanogens functionalized carbon nanotube and graphene on the mechanical and thermal properties of poly (arylene ether nitrile) [J]. Journal of Polymer Research, 2011, 19: 9806.
- [40] Yu W, Xie H Q, Yin L, et al. Exceptionally high thermal conductivity of thermal grease: Synergistic effects of graphene and alumina [J]. International Journal of Thermal Science, 2015, 91: 76–82.

(责任编辑 刘志远)

## ·学术动态·



中国科学技术协会

## 6位中国科学家当选IUGG首批会士

在国际大地测量与地球物理学联合会中国委员会(IUGG中国委员会)支持下,中国科学院院士、国家测绘局地理信息科学技术委员会主任陈俊勇,中国科学院院士、中国地震局地球物理研究所研究员陈运泰,中国科学院院士、中国科学院大气物理研究所研究员吴国雄,中国地震局地球物理研究所研究员吴忠良,北京师范大学教授李建平,中国科技大学教授陈晓非6位中国科学家当选国际大地测量与地球物理学联合会(IUGG)首批会士。

IUGG会士由IUGG于2013年设立,旨在表彰在大地测量学或地球物理学国际合作中做出特殊贡献,并在地球和空间科学领域取得卓越成就的科学家。为了充分做好首批会士的遴选工作,国际IUGG专门成立了遴选委员会,经过IUGG下属8个协会和各国家委员会广泛推荐,遴选委员会严格评议,最终评选出首批79位IUGG会士。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16194776.html>。