

高导热树脂基复合材料的研究进展

杨坤好 居建国 王晓蕾 左龙彦 谢钟清

(上海复合材料科技有限公司,上海 201112)

文 摘 综述了树脂基导热复合材料的导热机理及模型、种类以及影响因素,列举了金属、陶瓷、碳质以及混杂填料 4 种树脂基导热复合材料,分析探讨了树脂基体种类,导热填料种类、形状和用量,导热填料/树脂基体界面以及制备工艺等对复合材料导热性能的影响,并对高导热树脂基复合材料的应用前景和发展趋势进行了展望。

关键词 高导热,树脂基复合材料,导热机理,模型

中图分类号:V258

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.001

Recent Advance of Resin-Based Composites With High Thermal Conductivity

YANG Kunhao JU Jianguo WANG Xiaolei ZUO Longyan XIE Zhongqing

(Shanghai Composites Science & Technology Co., Ltd, Shanghai 201112)

Abstract Recent advance of resin-based composites with high thermal conductivity is reviewed through three sections: mechanism and model of thermal conductivity, materials classification and the influencing factors. According to the type of fillers, metal fillers, ceramic fillers, carbon fillers and hybrid fillers reinforced resin-based composites are listed respectively. In addition, the effects of matrix, fillers, interface and fabrication method on the thermal conductivity of composites are discussed. Finally, we look to the bright future of high thermal conductive resin-based composites.

Key words High thermal conductivity, Resin-based composite, Thermal conductive mechanism, Model

0 引言

随着电路板大规模集成化和微封装技术的发展,集成电路封装的高功率化、高密度化和高集成化使电子元器件热量迅速增加和积累。为了保障电子元器件在使用环境温度下运行的可靠性,需使用高散热界面材料,迅速有效地将发热元器件积聚的热量传递和释放出去,延长电子元器件的使用寿命^[1-3]。

现有的导热材料主要有金属材料、陶瓷材料、碳质材料和复合材料。其中,复合材料按基体的不同可以分为金属基、陶瓷基、碳基和树脂基。树脂基导热复合材料具有低密度、耐腐蚀、力学性能可设计和热膨胀系数低等优点而具有一定的优势^[4]。

目前国际范围内制备聚合物基导热复合材料的途径主要有以下 2 个方面:一是合成具有高热导率的结构型(本征型)导热聚合物,通过电子或声子实现导热,但制备技术和工艺难度大;二是在聚合物中填充高导热的金属或无机导热填料,经共混复合制备导热复合材料,该法比较常用,制备成本低且易成型加工。常见的填料有金属、陶瓷、碳质和混杂填料。本文综述了树脂基导热复合材料的导热机理及模型、种类以及影响因素。

1 导热机理及模型

树脂基体的导热性能差,热量的传输主要依靠高导热填料在树脂基体中形成的导热网络。其中,树脂

主要依靠声子(一种量化的晶格振动)进行导热,热导率可以通过 Debye 方程进行预测。

$$k = \frac{1}{3} c_p \bar{v} l \quad (1)$$

式中, k 为聚合物热导率; c_p 为单位体积声子热容; \bar{v} 为声子平均速度; l 为声子平均自由程。聚合物内部呈无规线团状, 大大降低了声子的平均自由程, 因此聚合物的热导率普遍较低(表 1)。

表 1 部分聚合物室温热导率^[2]

Tab. 1 Thermal conductivity of polymers at RT

聚合物	热导率 / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	聚合物	热导率 / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
LDPE	0.30	HDPE	0.44
PP	0.11	PS	0.14
PMMA	0.21	PA6	0.25
PA66	0.26	PET	0.15
PBT	0.29	PC	0.20
ABS	0.33	PEEK	0.25
PPS	0.30	PSU	0.22
PPSU	0.35	PVC	0.19
PTFE	0.27	EVA	0.34
PI	0.11	PDMS	0.25
Epoxy resin	0.19	PA(聚乙炔)	7.5
PPy(聚吡咯)	5.0	聚对苯撑	4.0
聚噻吩	3.8		

建立复合材料导热模型是实现导热性能量化计算的主要途径, 常见的导热模型有 Series, Parallel, Y. Agari, Maxwell-Eucken, Nielsen-Lewis 等^[5-6](图 1)。

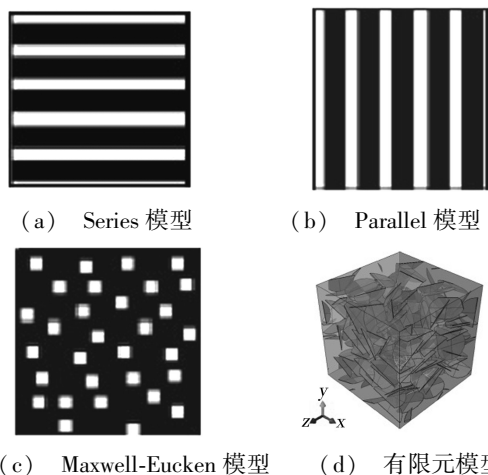


图 1 典型导热模型^[6-7]

Fig. 1 Typical thermal conductive model of composites

Series 和 Parallel 模型[图 1(a)和(c)]由复合材料传统的混合定律推导而来, 多用于拟合连续纤维增强复合材料的导热性能; Maxwell-Eucken 模型[图 1(b)]对球形填料在树脂中随机分布形成的低填料量

复合材料的热导率具有较准确的估算; Y. Agari 模型适用于高填充复杂填料体系导热性能模拟。利用有限元分析和分子动态模拟技术^[7-8]可以更准确地计算材料的导热性能, 图 1(d)为有限元分析与分子动态模拟联用生成的复合材料代表体积元。

2 树脂基导热复合材料

按照导热填料种类的不同, 可将树脂基导热复合材料分为金属填料型、碳质填料型、陶瓷填料型以及混杂填料型。表 2 为常见导热填料的室温热导率。

表 2 常见导热填料的室温热导率^[2,9]

Tab. 2 Thermal conductivity of typical thermal conductive fillers at RT

种类	材料	热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
金属填料	Cu	398
	Ag	450
	Au	345
	Al	247
	Ni	158
	碳质填料	石墨
炭黑		6 ~ 174
碳纳米管		2000 ~ 6000
石墨烯		5300(面内)
金刚石		2000
聚丙烯腈基碳纤维		8 ~ 70(纤维轴向)
气相生长碳纤维		1950(纤维轴向)
沥青基碳纤维		530 ~ 1100(纤维轴向)
陶瓷填料	BN	250 ~ 300
	AlN	200
	SiC	270
	Al ₂ O ₃	20 ~ 29

2.1 金属填料型

金属具有优良的导热性能, 常见的金属填料有 Cu^[10]、Al^[11]、Ag^[12]、Ni^[13]等。Pashayi 等^[12]通过在环氧树脂中均匀分散纳米尺度的银粉, 纳米银粉在环氧树脂固化的同时发生原位烧结并自发形成连续的导热网络。采用此法制备的复合材料的热导率约为微米银粉/环氧树脂复合材料导热性能的 50 倍。

金属填料密度大, 与树脂结合能力弱, 电绝缘性差, 不适宜制备有轻质和绝缘要求的复合材料。

2.2 陶瓷填料型

陶瓷类填料如 BN^[14]、AlN^[15]、Al₂O₃^[16]、SiO₂^[17]、ZnO^[18]等不仅具有较高的热导率, 而且具有相当优异的电绝缘性能, 是电子封装材料的最佳选择。

BN 可以在提高复合材料导热性能的同时保持材料优异的介电性能, 并在较低含量下使得复合材料导热性能有较大提高。Zhang 等^[3]以未经处理的 BN 为宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 5 期

填料,采用拉挤成型方法提高 PE 的导热性能,当加入 30wt% 的 BN 时,PE 的导热性能提高到 $1.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

陶瓷填料较金属填料密度有所降低,绝缘性能提高明显,但制备的复合材料导热和力学性能并未有较大幅度的提高,目前主要用于力学性能要求不高的电子封装领域。

2.3 碳质填料型

石墨^[19]、金刚石^[20]、炭黑^[21]、石墨烯^[22-24]、碳纳米管^[25-26]以及碳纤维^[27-30]等碳质填料具有高热导率(表 2)、低密度、低热胀系数和良好的高温机械性能等优点,是目前导热填料的理想选择。

石墨烯(Graphene,图 2)是由单层碳原子紧密排列而成的二维蜂窝状材料^[31],单层石墨烯的面内热导率超过 $5 \text{ kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是现有热导率最高的薄膜材料。因此,将片状石墨烯均匀分散在树脂基体中,可在低填料量下获得较高的热导率。Guo 等^[32]采用球磨法使得石墨烯纳米片(GNP)颗粒在环氧树脂中均匀分散,当 GNP 为 25wt% 时,复合材料导热性能达到 $2.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而且球磨法制备的导热复合材料可在较低含量(5wt%)下出现逾渗现象。

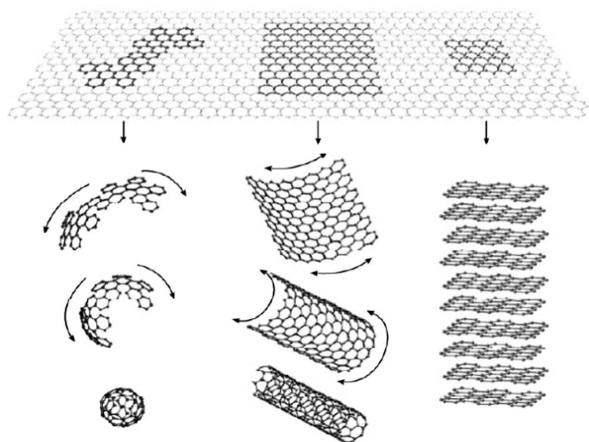
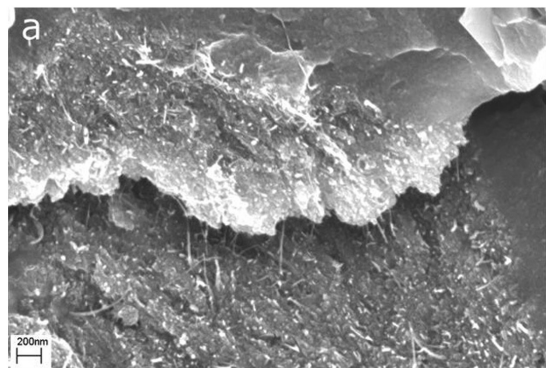


图 2 石墨烯组成其他石墨类材料示意图

Fig. 2 Graphene and the graphite materials

碳纳米管(CNT)的热导率在 $2 \sim 3 \text{ kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。



现有碳纳米管的宏观形态有颗粒、膜、纳米线^[26]和阵列^[33]等,通过溶液共混、机械搅拌、“喷丝缠绕”^[25]和树脂浸渍^[34]等方法可以制备碳纳米管/树脂复合材料。其中溶液混合和机械搅拌法对材料导热性能的提高幅度不大。树脂浸渍和“喷丝缠绕”法可以通过 CNT 的定向排布使得材料某一方向上导热性能得到大幅度提高。Wang 等^[25]以不同长度的多壁碳纳米管(MWCNT)为填料,采用“喷丝缠绕”法制备 MWCNT/BMI 复合材料。当 MWCNT 长度在 $0.65 \sim 1.3 \text{ nm}$ 变化且 MWCNT 含量均为 35wt%,复合材料沿 MWCNT 取向方向的热导率为 $33 \sim 70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

普通的碳纤维导热性能不佳,无法实现复合材料的高导热。中间相沥青基碳纤维(MPCF)^[27]和气相生长碳纤维(VGCF)^[35]具有优异的导热性能,可以用来制备结构/功能一体化的导热复合材料。但是,碳纤维的轴向热导率远高于径向热导率,造成复合材料厚度方向导热性能依然不佳^[36]。三维编织技术可以通过在厚度方向引入纤维,提高复合材料厚度方向导热性能。Schuster 等^[37]分别以铜丝和沥青基碳纤维(YS80)为 z 向填料提高碳纤维复合材料厚度方向导热性能,当铜丝和 YS80 含量分别为 4.3vol% 和 5.5vol% 时,材料厚度方向热导率分别达到 14.53 和 $14.93 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

2.4 混杂填料型

以两种或两种以上的导热填料填充树脂基体,更容易在树脂基体内部形成连续的导热网络,常见的杂化填料有 CF/Ag^[1]、CF/Graphene^[22]、CF/Cu^[37]、CNT/Graphite^[38]、CNT/Graphene^[39]、CNT/CF^[40]、ZnO 晶须/BN^[41]等。图 3 为 CNT 和 Graphene 在环氧树脂中的扫描电镜图,可以看出中间的 CNT 将三片孤立的 Graphene 桥接在一起,两者协同作用更容易在环氧树脂基体内部形成连续的导热网络,有效提高复合材料的导热性能。

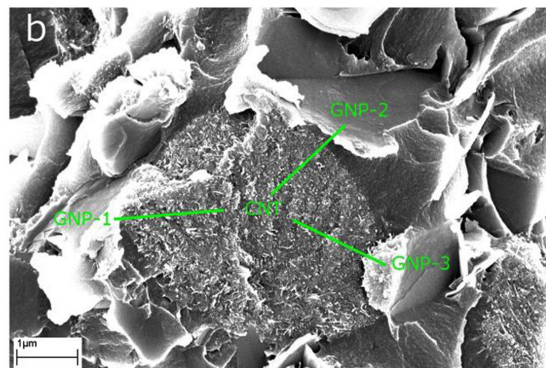


图 3 石墨烯/CNT-环氧树脂复合材料扫描电镜图^[42]

Fig. 3 SEM of graphene/CNT-epoxy composites

以上4种材料中,碳质填料和混杂填料不仅具有较高的导热性能,而且具有密度低、力学性能优的特点,是导热填料的理想选择。

3 影响因素

树脂基复合材料导热性能的影响因素主要包括4个方面:树脂基体,导热填料,导热填料/树脂基体界面和制备工艺。

3.1 树脂基体

树脂基体的结构组成直接影响着复合材料的导热性能。然而,树脂基体多处于无序状态,声子的平均自由程较短,热导率多低于 $0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,对复合材料导热性能贡献较小^[2]。具有有序结构的结晶型聚合物和液晶型聚合物则具有相对较大的导热性能^[43]。对于具有 $p-\pi$ 共轭结构的高分子,其链上含有自由移动的电子,导热介质由声子转变为电子,可大幅度提高导热性能。

3.2 导热填料

导热填料是影响复合材料导热性能的主要因素,其种类、形状、尺寸、含量和表面处理等均会对复合材料的导热性能有较大影响。Fu等^[44]分别以8种不同的导热填料改性环氧树脂的导热性能,发现较球形和尖角型填料而言,片状填料能更有效地提高材料导热性能。当片状天然石墨为44.3wt%,环氧树脂复合材料的热导率提高到 $1.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。采用偶联剂对导热填料进行表面处理可以进一步提高复合材料的导热性能^[14]。

3.3 导热填料/树脂基体界面

由于基体树脂与导热填料之间存在着界面热阻(Kapitza热阻),阻碍了热量在复合材料中的有效传输。偶联剂的加入有助于进一步提升导热填料在树脂基体中均匀分散性和降低导热填料和树脂基体的界面热阻。Zhou^[11]分别采用四种偶联剂(KH-550, KH-560, NDZ-201, NDZ-102)改性的Al粉填充制备环氧树脂,用以提高复合材料的导热性能。Zhao等^[14]以硅烷偶联剂改性BN粉末为填料,当改性BN为23.6vol%时,氰酸酯的导热性能提高到 $1.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,为纯氰酸酯树脂的4.6倍。Li等^[16]将自制的片状 $\alpha-\text{Al}_2\text{O}_3$ 加入到环氧树脂中,研究了 $\alpha-\text{Al}_2\text{O}_3$ 的酸处理对复合材料导热性能的影响。结果表明,当 $\alpha-\text{Al}_2\text{O}_3$ 为60wt%时,表面处理可使复合材料的导热性能由 $0.72 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到 $0.84 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

3.4 制备工艺

导热填料多为微纳米级尺寸,纳米颗粒的团聚是混合过程中的常见难题,选取合适的制备工艺是解决该问题的主要途径。常见的混合方法有溶液混合、机械搅拌和行星式搅拌等。溶液混合中所引入的溶剂

不易彻底去除,在材料制备过程中会形成气泡影响材料的导热性能;传统的机械搅拌(超声处理,双螺杆挤出,离心搅拌等)的剪切力会对填料产生破坏,影响填料的性能;行星式搅拌技术不仅能够实现填料在基体树脂中的快速分散,而且不会影响填料性能,是比较理想的混合方法^[45]。Zhou等^[46]通过流延法工艺使得天然结晶石墨在聚合物中定向排布,改变石墨含量可以得到单一方向热导率在 $60 \sim 490 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的复合材料。

聚合物树脂基体、导热填料、导热填料/树脂基体界面和制备工艺四种因素对复合材料导热性能的影响并不是孤立的,综合考虑四种影响因素是有效提高复合材料导热性能的关键。

4 结语

树脂基导热复合材料较其他导热材料具有轻质、耐腐蚀、力学性能可设计等优点,在航空航天、微电子以及光电领域具有广阔的应用前景,特别是航空航天领域,迫切需求轻质高强高导热的复合材料。碳质填料和混杂填料型复合材料表现出低密度、高导热、力学性能优的特点,具有更加优异的应用前景。综合考虑聚合物树脂基体、导热填料、导热填料/树脂基体界面和制备工艺四种因素是制备出高导热树脂基复合材料的关键。今后的研究重点将放在高导热填料(石墨烯、MWCNT等)的制备、纯化和表面功能化改性,混杂填料的选择、复配和调控,以及导热填料/增强纤维/树脂基导热复合材料的制备与工艺优化方面。

参考文献

- [1] Wang Shaokai, Haldane D, Gallagher P et al. Heterogeneously structured conductive carbon fiber composites by using multi-scale silver particles [J]. *Composites: Part B*, 2014, 61: 172-180
- [2] Han Z D, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review [J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36: 914 - 944
- [3] Zhang Xianlong, Shen Liyuan, Wu Hong, et al. Enhanced thermally conductivity and mechanical properties of polyethylene (PE)/boron nitride (BN) composites through multistage stretching extrusion [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 89:24-28
- [4] Wang Shiren, Qiu Jingjing. Enhancing thermal conductivity of glass fiber/polymer composites through carbon nanotubes incorporation [J]. *Composites: Part B*, 2010, 41:533-536
- [5] Zhou Shaoxin, Chiang S, Xu Jinzao, et al. Modeling the in-plane thermal conductivity of a graphite/polymer composite sheet with a very high content of natural flake graphite [J]. *Carbon*, 2012, 50:5052-5061
- [6] Wang Jianfeng, Carson J K, North M F, et al. A new 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第5期

- approach to modeling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49:3075–3083
- [7] Mortazavi B, Benzerara O, Meyer H, et al. Combined molecular dynamics-finite element multiscale modeling of thermal conduction in grapheme epoxy nanocomposites [J]. *Carbon*, 2013, 60:356–365
- [8] Clancy T C, Frankland S J V, Hinkley J A, et al. Multi-scale modeling of thermal conductivity of polymer/carbon nanocomposites [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49:1555–1560
- [9] Balandin A A, Ghosh S, Bao Wenzhong, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3):902–907
- [10] Eom Y S, Choi K S, Moon S H, et al. Characterization of hybrid Cu paste as an isotropic conductive adhesive [J]. *RTRI*, 2011, 33(6):864–870
- [11] Zhou Wenying. Effect of coupling agents on the thermal conductivity of aluminum particle/epoxy resin composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46:3883–3889
- [12] Pashayi K, Fard H R, Lai Fengyuan, et al. High thermal conductivity epoxy-silver composites based on self-structured metallic networks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(10):1–6
- [13] Lee H G, Paik K W. Vertically aligned nickel nanowire/epoxy composite for electrical and thermal conducting material [C]. 2012 IEEE 62nd electronic components and technology conference, San Diego; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012:2087–2090
- [14] Zhao C B, Xu S C, Qin Y F, et al. Thermal conductivity cyanate resin composites filled with boron nitride [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 893:259–262
- [15] Zhou Yongchun, Wang Hong, Wang Lu et al. Fabrication and characterization of aluminum nitride polymer matrix composites with high thermal conductivity and low dielectric constant for electronic packaging [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2012, 177:892–896
- [16] Li Yanhui, Li Lianglong, Peng Cheng, et al. A decomposition route for synthesis of Al₂O₃ crystal and its applications as thermal conductivity filler [J]. *Rapid Communication of the American Ceramic Society*, 2014, 97(3):695–699
- [17] Kochetov R, Korobko A V, Andritsch T, et al. Modeling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44:1–12
- [18] Igamberdiev K, Yuldashev S, Cho H D, et al. Thermal conductivity of ZnO nanowires embedded in poly(methyl methacrylate) matrix [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(1):1–3
- [19] Corcione C E, Maffezzoli. Transport properties of graphite/epoxy composites; thermal, permeability and dielectric 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第5期
- characterization [J]. *Polymer Testing*, 2013, 32:880–888
- [20] Cho H B, Konno A, Fujihara T, et al. Self-assemblies of linearly aligned diamond fillers in polysiloxane/diamond composite films with enhanced thermal conductivity [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 72:112–118
- [21] Socher R, Krause B, Hermasch S, et al. Electrical and thermal properties of polyamide 12 composites with hybrid fillers systems of multiwalled carbon nanotubes and carbon black [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71:1053–1059
- [22] Wu Huang, Drzal L T. Graphene nanoplatelet paper as a light-weight composite with excellent electrical and thermal conductivity and good gas barrier properties [J]. *Carbon*, 2012, 50:1135–1145
- [23] 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 functionalization [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25:732–737
- [24] Ding Peng, Su Shuangshuang, Song Na, et al. Highly thermal conductive composites with polyamide-6-covalently-grafted grapheme by an in situ polymerization and thermal reduction process [J]. *Carbon*, 2014, 65:576–584
- [25] Wang Xin, Jiang Qian, Xu Weizong, et al. Effect of carbon nanotube length on thermal, electrical and mechanical properties of CNT/bismaleimide composites [J]. *Carbon*, 2013, 53:145–152
- [26] Lionetto F, Calo E, Benedetto F D, et al. A methodology to orient carbon nanotubes in a thermosetting matrix [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 96:47–55
- [27] Glowania M, Lindner D, Linke M, et al. Influence of the pitch fiber reinforcement of CFRP on the mechanical and thermal conductivity properties [C]. 18th International Conference on Composite Materials, 2011
- [28] Villiere M, Lecoite D, Sobotka V, et al. Experimental determination and modeling of thermal conductivity tensor of carbon/epoxy composite [J]. *Composites: Part A*, 2013, 46:60–68
- [29] Wu Gangping, Li Denghua, Yang Yang, et al. Carbon layer structures and thermal conductivity of graphitized carbon fibers [J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47:2882–2890
- [30] Han S, Lin J T, Yamada Y, et al. Enhancing the thermal conductivity and compressive modulus of carbon fiber polymer-matrix composites in the through thickness direction by nanostructuring the interlaminar interface with carbon black [J]. *Carbon*, 2008, 46:1060–1071
- [31] Geim A K, Novoselov K S. The rise of grapheme [J]. *Nature Materials*, 2007(6):183–191
- [32] Guo Wenman, Chen Guohua. Fabrication of graphene/epoxy resin composites with much enhanced thermal conductivity via ball milling technique [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(15):1–5
- [33] Sihn S, Ganguli S, Roy A K, et al. Enhancement of

through-thickness thermal conductivity in adhesively bonded joints using aligned carbon nanotubes [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(3/4): 658-665

[34] Cheng Q F, Wang J P, Wen J J, et al. Carbon nanotube/epoxy composites fabricated by resin transfer molding [J]. Carbon, 2010, 48:260-266

[35] Chin S Y, Hsiang S J, Chen Y T, et al. Study on thermal conductive BN/VGCF/polyimide resin composites [C]. International Microsystems, Packing, Assembly and Circuits Technology conference, 2013

[36] Tian Tian, Cole K D. Anisotropic thermal conductivity measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55:6530-6537

[37] Schuster J, Heider D, Sharp K, et al. Thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68:2085-2091

[38] Wu Xuelei, Qiu Jianhui, Liu Peng, et al. Synergistic effect of MWCNTs and graphite powder on the properties of polymer nanocomposites [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 246: 211-216

[39] Yu Lan, Paeker J S, Lim Y S, et al. Carbon hybrid fillers composed of carbon nanotubes directly grown on graphene-platelets for effective thermal conductivity in epoxy composites [J]. Nanotechnology 2013, 24:1-7

[40] Kundalwal S I, Ray M C. Estimation of thermal conductivities of a novel fuzzy fiber reinforced composite [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76:90-100

[41] Yuan Fangyuan, Zhang Haobin, Li Xiaofeng, et al. Synergistic effect of boron nitride flakes and tetrapod-shaped ZnO whiskers on the thermal conductivity of electrically insulating phenol formaldehyde composites [J]. Composites: Part A, 2013, 53:137-144

[42] Safdari M, Al-Haik M S. Synergistic electrical and thermal transport properties of hybrid polymeric nanocomposites based on carbon nanotubes and graphite nanoplatelets [J]. Carbon, 2013, 64: 111-121

[43] Harada M, Hamaura N, Ochi M, et al. Thermal conductivity of liquid crystalline epoxy/BN filler composites having ordered network structure [J]. Composites: Part B, 2013, 55: 306-313

[44] Fu Yuanxiang, He Zhuoxian, Mo Dongchuan, et al. Thermal conductivity enhancement with different fillers for epoxy resin adhesives [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66: 493-498

[45] Tsuchiya K, Sakai A, Nagaoka T, et al. High electrical performance of carbon nanotubes/rubber composites with low percolation threshold prepared with a rotation-revolution mixing technique [J]. Composites Sciences and Technology, 2011, 71: 1098-1104

[46] Zhou Shaoxin, Zhu Yuan, Du Hongda, et al. Preparation of oriented graphite/polymer composite sheets with high thermal conductivities by tape casting [J]. New Carbon Materials, 2012, 27(4), 241-249

(编辑 李洪泉)

《宇航材料工艺》征订启事

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于1971年,是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊,中国科技论文统计源用刊,中国中文核心期刊,已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADEX》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002年在第二届国家期刊奖评比活动中,《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践,内容丰富,信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外,还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号 $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$

国内订价:120元/年

国外订价:120美元/年

帐户名称:航天材料及工艺研究所 开户银行:北京市工商银行东高地支行 帐号:0200006509008800374

邮汇:北京9200信箱73分箱《宇航材料工艺》编辑部 邮编:100076

联系电话:(010)68383269

联系人:任涛 E-mail:rtao703@163.com

(未收到订单的读者可直接邮汇至编辑部,留言务必注明开发票单位名称及邮寄地址)