

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.02.005

EP/AIN/MWCNTs 导热复合材料性能研究^{*}

夏雨,焦剑,崔永红,王三三,邵雨滴

(西北工业大学理学院应用化学系,西安 710129)

摘要:采用硅烷偶联剂 KH-550 对氮化铝 (AIN) 颗粒进行表面处理,对多壁碳纳米管 (MWCNTs) 进行氧化处理。通过溶剂和超声分散法,分别制备了环氧树脂 (EP)/AIN, EP/MWCNTs 及 EP/AIN/MWCNTs 复合材料,用万能试验机测试了复合材料的冲击强度与弯曲强度,用热导率测定仪测试了其热导率,用扫描电子显微镜和透射电子显微镜测试了其微观结构。结果表明,AIN, MWCNTs 在 EP 基体中分散均匀;单独或同时加入填料 AIN 和 MWCNTs 均能够提高 EP 复合材料的力学性能和导热性能。随着 AIN, MWCNTs 含量的增加,EP/AIN, EP/MWCNTs 及 EP/AIN/MWCNTs 复合材料的冲击强度和弯曲强度均呈现先增大后减小的趋势,而热导率呈现逐渐增大的趋势;EP/AIN/MWCNTs 复合材料的热导率明显高于相同份数 AIN 的 EP/AIN 复合材料的热导率。当 MWCNTs 含量为 1.5 份、AIN 含量为 40 份时,EP/AIN/MWCNTs 复合材料的综合性能最优异,冲击强度为 22.118 kJ/m²,弯曲强度为 124.40 MPa,热导率达到 0.434 W/(m·K)。

关键词:环氧树脂;氮化铝;多壁碳纳米管;热导率;力学性能

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)02-0023-06

Study on Performances of EP/AIN/MWCNTs Thermal Conductive Composites

Xia Yu, Jiao Jian, Cui Yonghong, Wang Sansan, Shao Yudi

(Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Aluminum nitride (AIN) particles treated with silane coupling agent (KH-550) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) treated with oxidizer are used as thermal conductive filler respectively and together to prepare the epoxy resin (EP)/AIN, EP/MWCNTs, EP/AIN/MWCNTs composites which was prepared by solvent and ultrasonic dispersion. The impact strength and bending strength were analyzed by universal testing machine, the thermal conductivities were analyzed by thermal conductivity meter, the microstructure was analyzed by scanning electron microscope and transmission electron microscope. The experimental results demonstrate that AIN and MWCNTs dispersed evenly in the EP matrix. The addition of AIN and MWCNTs can respectively or together improve the mechanical performances and heat-conducting properties of EP composites. As AIN and MWCNTs loading increases, the impact strength and bending strength of the composites increase first then fall, the thermal conductivity increases constantly. The thermal conductivity of EP/AIN/MWCNTs composite is much higher than the EP/AIN composite of the same AIN loading. When AIN content is 40 phr and the MWCNTs content is 1.5 phr, the overall mechanical performances of EP/AIN/MWCNTs composite reached the top, meanwhile, the impact strength is 22.118 kJ/m², and the bending strength is 124.40 MPa, the thermal conductivity reaches 0.434 W/(m·K).

Keywords: epoxy resin; aluminum nitride; multi-walled carbon nanotubes; thermal conductivity; mechanical property

随着集成电路不断向集成化、高速化发展,微电子封装的散热问题越来越突出。事实上,芯片的散热能力不足已经成为很多产品设计、改进和创新的瓶颈。在诸多解决方案中,利用高导热填料与树脂基体复合制备的导热复合材料,以其低成本、高效率、加工方便等优势引起人们的广泛关注。

目前导热复合材料添加的高导热填料主要包括金刚石、银、铜、铝等金属粉及其氮氧化物^[1-5]。由于电子封装材料对电绝缘性的要求,制备这类高导

热复合材料时通常选用氮化硼、氮化铝 (AIN)、碳化硅、氮化硅、氧化铝、二氧化硅等无机填料^[6]。其中 AIN 以颇高的热导率、低介电常数、良好的绝缘性、成本低廉等优势而被广泛使用^[7]。S. Choi 等^[8]使用 AIN、氧化铝作为导热填料,制备了高导热环氧

^{*} 国家自然科学基金项目 (51373135)

联系人:焦剑,副教授,博士,主要从事介孔材料及复合材料的相关研究

收稿日期:2015-11-19

树脂(EP)/AlN/氧化铝复合材料,其热导率达到 $3.402\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,但其填料加入量较大,成本较高。

多壁碳纳米管(MWCNTs)的长径比高达1000以上,并且理论热导率高达 $2000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相比于其它填料,更易于形成导热通道,其作为导热填料受到了广泛的关注^[9]。Guo Peng等^[10]以超声和模压的方法制得EP/MWCNTs复合材料,其力学性能有所提升。V. Romano等^[11]在EP中加入MWCNTs和粘土制备导热EP/MWCNTs/粘土复合材料,其热导率有所提升。但在已有的报道中,以MWCNTs作为导热填料,对于复合材料导热性的改善效果并不理想^[12]。究其原因是由于MWCNTs的加入量通常小于10%,无法在整个树脂基体中形成连续的网络结构,造成了MWCNTs与树脂基体之间存在较高的热阻,声子在界面易发生散射。

传统的导热材料研究多集中在单一填料的方向上,填料的使用效率较低。笔者提出采用AlN粉体与MWCNTs复合改性EP,利用二者的协同作用,使MWCNTs能够在由AlN纳米粒子形成的导热网络中起到架桥的作用,在较少的AlN用量下,即可形成连续完善的导热通道,从而避免由于AlN用量过大在复合材料中沉淀的问题,有效地提高力学性能和导热性能。笔者分别利用AlN、MWCNTs以及AlN/MWCNTs三种填料与EP复合制备了复合材料,研究了填料的类型及含量对复合材料微观结构、导热和力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚A型EP:E-51,工业级,大连齐化化工有限公司;

浓硫酸:浓度为98%,分析纯,西安化学试剂厂;

浓硝酸:浓度为65%~68%,分析纯,西安化学试剂厂;

γ -氨丙基三乙氧基硅烷:KH-550:工业级,南京曙光有机硅化工有限公司;

三乙烯四胺(TETA):分析纯,天津市大茂化学仪器供应站;

AlN粉体:粒径 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$,秦皇岛一诺高新材料开发有限公司;

MWCNTs:长 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$,直径 $10\sim 20\text{ nm}$,纯度95%,中国科学院成都有机化学有限公司。

1.2 主要仪器和设备

冲击试验机:XCJ-40型,河北承德市材料试验

机厂;

电子万能试验机:SANS-CMT5105型,深圳市新三思材料检测有限公司;

热导率测定仪:Hot Disk 2500S型,瑞典Hot Disk有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-2700型,日本日立公司;

透射电子显微镜(TEM):H-600,日本日立公司。

1.3 填料的表面改性

(1) AlN粉体的表面改性。

首先将AlN粉体放入箱式电阻炉中加热至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持6h,待自然冷却至室温,取10g热处理过的AlN粉体溶于500mL无水乙醇中,超声处理20min,然后向AlN的乙醇溶液中加入1g的KH-550,超声处理40min,再在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下将溶液蒸干,将蒸干后的AlN于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中干燥4h,然后于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中干燥24h,最后研磨待用。

(2) 改性MWCNTs的制备。

制备体积比为3:1的浓硫酸和浓硝酸的混合溶液,将100mL溶液沿烧杯壁加入到2g MWCNTs中,然后在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超声处理3h,用去离子水稀释溶液,再用去离子水洗至中性,用丙酮洗2~3遍,抽滤,并将改性MWCNTs于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中干燥4h,最后研磨待用。

1.4 EP及其复合材料的制备

EP及其复合材料的配方如表1所示。按表1将AlN、改性MWCNTs或其一定配比的混合物分散于200份丙酮中,超声处理20min,然后向其中加入100份EP,将上述混合物超声处理40min混合均匀;将上述混合物在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下搅拌2h使丙酮挥发,然后在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下真空处理10min,使丙酮挥发完全,并冷却到室温,加入12份TETA,搅拌5min使之混合均匀,而后倒入模具中进行固化,在室温下放置24h,再在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下放置2h。按测试要求尺寸切割成相应试样。

1.5 性能测试与表征

冲击强度按GB/T 2567-2008测试。

弯曲强度按GB/T 2567-2008测试,试样厚度 $(4.0\pm 0.2)\text{ mm}$,宽度15mm,长度不小于8cm,弯曲速率 $2\text{ mm}/\text{min}$ 。

热导率按ASTM E1461-2013测试,通过热扩散系数,比热容和密度进行计算。试样密度用体积

表 1 EP 及其复合材料的配方

材料	EP	TETA	AIN	改性 MWCNTs
EP	100	12	/	
EP/AIN-10	100	12	10	
EP/AIN-20	100	12	20	
EP/AIN-30	100	12	30	
EP/AIN-40	100	12	40	
EP/AIN-50	100	12	50	
EP/AIN-60	100	12	60	
EP/MWCNTs-0.5	100	12		0.5
EP/MWCNTs-1.0	100	12		1.0
EP/MWCNTs-1.5	100	12		1.5
EP/MWCNTs-2.0	100	12		2.0
EP/MWCNTs-2.5	100	12		2.5
EP/MWCNTs-3.0	100	12		3.0
EP/MWCNTs-3.5	100	12		3.5
EP/MWCNTs/AIN-0	100	12		1.5
EP/MWCNTs/AIN-10	100	12	10	1.5
EP/MWCNTs/AIN-20	100	12	20	1.5
EP/MWCNTs/AIN-30	100	12	30	1.5
EP/MWCNTs/AIN-40	100	12	40	1.5
EP/MWCNTs/AIN-50	100	12	50	1.5
EP/MWCNTs/AIN-60	100	15	60	1.5

排除法测量。测试试样均为直径 12.6 mm 的圆柱,厚度为 0.5~0.6 mm,其两个端面平整光滑,测试前在两个端面均匀喷涂上薄石墨层。

SEM 分析:对试样冲击断裂面喷金后,用 SEM 观察试样断裂面形貌,加速电压为 20 kV。

TEM 分析:在常温下对试样进行超薄切片,切片厚度约为 80 nm,切片面积约为 1 mm²,用 TEM 观察,加速电压为 75 kV。

2 结果与讨论

2.1 EP/AIN 复合材料的性能

(1) 力学性能。

AIN 含量对 EP/AIN 复合材料力学性能的影响如图 1 所示。

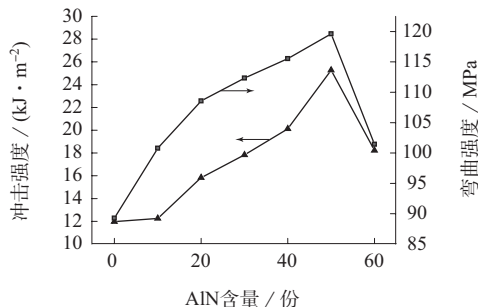


图 1 AIN 含量对 EP/AIN 复合材料力学性能的影响

由图 1 可以看出,在 EP 中加入 AIN 填料,能提高 EP/AIN 复合材料的冲击强度和弯曲强度。随着 AIN 含量的增加,复合材料的冲击强度和弯曲强度呈现先增大后减小的趋势,并且在 AIN 含量

为 50 份时,复合材料的冲击强度达到最大值,为 25.276 kJ/m²,相对于纯 EP 的 11.977 kJ/m²,冲击强度提高了 111.0%;弯曲强度也在 AIN 含量为 50 份时达到最大值,为 119.61 MPa,相对于纯 EP 的 89.28 MPa,弯曲强度提高了 34.0%。

当添加的 AIN 含量较低时,AIN 可以在 EP 树脂基体中相对均匀地分散,当受到冲击载荷时,界面能够吸收大量的能量,并且微米尺寸的 AIN 可以使银纹尖端集中的动能和应变势能大部分转化为非连续性的边界变形能,有效地阻止银纹向裂纹扩展。因此低含量的 AIN 填料可以提高复合材料的冲击强度。AIN 作为无机粒子,其强度大于基体,加入到 EP 基体中,起到复合材料增强组分的作用。当添加的 AIN 含量较低时,适量的 AIN 作为复合材料的增强体,可以弥补 EP 固化时造成的微缺陷以及应力集中,进而促使载荷有效地传递,提高复合材料的弯曲强度。随着 AIN 用量的继续增加,复合材料的黏度增大,以至失去流动性,AIN 在 EP 中的分散性变差,AIN 易发生聚集,界面变差,固化过程中易产生气泡,应力集中等缺陷,从而导致其冲击强度和弯曲强度下降。

(2) 导热性能。

AIN 含量对 EP/AIN 复合材料热导率的影响如图 2 所示。

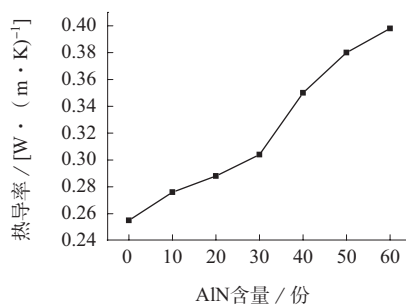


图 2 AIN 含量对 EP/AIN 复合材料热导率的影响

由图 2 可知,加入 AIN 能够提高 EP/AIN 复合材料的导热性能。随着 AIN 用量的增加,EP/AIN 复合材料的热导率不断增大,当 AIN 颗粒的添加量达到 60 份时,复合材料的热导率达到 0.398 W/(m·K),与纯 EP 的 0.255 W/(m·K) 相比,提高了 56.1%。

在 EP 树脂基体中加入高导热无机填料 AIN,声子可沿基体-填料-基体的路线传播,而不是完全穿过高热阻的树脂层。当 AIN 含量较低时,填料之间距离较远,声子传播过程中需经过较长距离的

树脂层,因此复合材料的热导率较低;当 AlN 含量继续增加时,AlN 之间距离减小,形成导热通路的概率快速增大,因此复合材料的热导率随 AlN 含量增加而快速增大。

2.2 EP/MWCNTs 复合材料的性能

(1) 力学性能。

MWCNTs 含量对 EP/MWCNTs 复合材料力学性能的影响如图 3 所示。

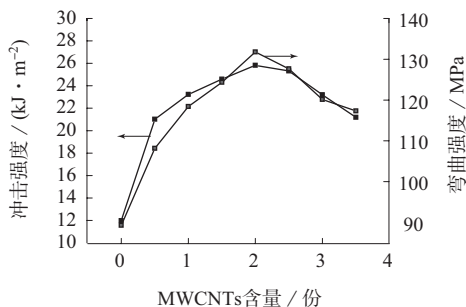


图3 MWCNTs 含量对 EP/MWCNTs 复合材料力学性能的影响

由图3可知,加入 MWCNTs 能显著提高 EP/MWCNTs 复合材料的力学性能。随着 MWCNTs 用量的增加,复合材料的力学性能呈现先增大后减小的趋势,并且在 MWCNTs 含量为 2.0 份时,EP/MWCNTs 复合材料的冲击强度和弯曲强度达到最大,分别为 25.828 kJ/m² 和 131.79 MPa,与纯 EP 的 11.977 kJ/m² 和 89.28 MPa 相比,分别提高了 115.6% 和 47.6%。

MWCNTs 自身高的长径比、比表面积及优异的力学性能在复合材料中起到了提高冲击强度的作用,当复合材料受力时产生的裂纹在遇到 MWCNTs 时会发生偏转,生成新的断裂面和次级裂纹,这个过程能消耗一部分冲击能量。同时, MWCNTs 因其大的长径比如纤维般在 EP 中起到了桥联增强的作用。如果冲击力过大,受力处发生断裂,断面处的 MWCNTs 要么被拔出要么被拉断,或者两种破坏同时发生。无论这几种情况哪一种发生,都会消耗很大的能量,进而提高复合材料的冲击强度。

MWCNTs 具有较好的分散性,由于其在 EP 基体中浸润性良好且比较疏松,即使是一些 MWCNTs 出现较小的团聚体仍可以成为 EP 的增强体。经过混酸处理后的 MWCNTs 表面生成不同种类及含量的极性基团(主要是羟基和羧基),因而 MWCNTs 与 EP 基体之间具有良好的界面结合,可以有效地将应力从树脂基体传递至 MWCNTs,提高了复合材料的弯曲强度。但是当 MWCNTs 的含量过高时,

会形成大的团聚体,无法与树脂形成有效界面结合,导致弯曲强度反而降低。

(2) 导热性能。

MWCNTs 含量对 EP/MWCNTs 复合材料热导率的影响如图 4 所示。

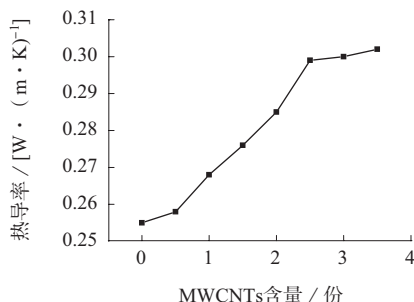


图4 MWCNTs 含量对 EP/MWCNTs 复合材料热导率的影响

从图4可知,加入 MWCNTs 能够提高 EP/MWCNTs 复合材料的导热性能。随着 MWCNTs 含量的增加,复合材料的热导率不断增大。当加入的 MWCNTs 含量较少时,EP/MWCNTs 复合材料的热导率缓慢增加;当 MWCNTs 含量超过 0.5 份时,复合材料的热导率大幅增加;当 MWCNTs 含量达到 2.5 份后,复合材料的热导率又缓慢增加。当 MWCNTs 含量为 3.5 份时,EP/MWCNTs 复合材料的热导率达到 0.302 W/(m·K),与纯 EP 的 0.255 W/(m·K) 相比,提高了 18.4%。

当 MWCNTs 含量较小时,均匀分散的 MWCNTs 被树脂基体包围,彼此间未形成有效的导热网络,随着 MWCNTs 含量的进一步增加,高长径比的 MWCNTs 之间相互作用,构成导热通路,热流能够有效传递,相互连接的 MWCNTs 管壁上的碳原子将成为声子散射中心,使复合材料的热导率有所提高。然而随着 MWCNTs 含量的继续增加,复合材料的黏度不断升高,MWCNTs 在复合材料内很难舒展开,因此 EP/MWCNTs 复合材料的热导率增加缓慢。

2.3 EP/AlN/MWCTs 复合材料的性能与结构

(1) 力学性能。

当 MWCNTs 含量为 1.5 份时,EP/MWCNTs 复合材料的力学和导热性能较好,并且成型过程中复合材料的黏度容易控制,气泡与缺陷较少,因此,选定 MWCNTs 的含量为 1.5 份。

当 MWCNTs 的含量为 1.5 份时,AlN 含量对 EP/AlN/MWCNTs 复合材料力学性能的影响如图 5 所示。

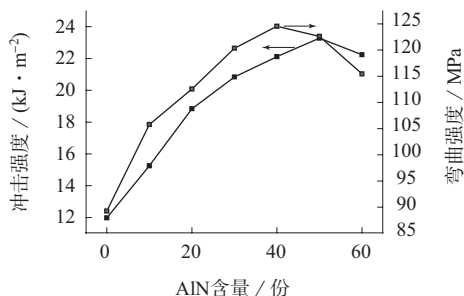


图5 MWCNTs 含量为 1.5 份时 AIN 含量对 EP/AIN/MWCNTs 复合材料力学性能的影响

从图5可以看出,当MWCNTs含量为1.5份时,随着AIN含量的增加,EP/AIN/MWCNTs复合材料的冲击强度和弯曲强度都呈现先增大后减小的趋势。当AIN含量为50份时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的冲击强度达到最大值,为23.250 kJ/m²,与纯EP的11.977 kJ/m²相比,提高了94.1%;与EP/AIN复合材料的25.276 kJ/m²相比,下降了8%。当AIN含量为40份时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的弯曲强度达到最大值,为124.40 MPa,而冲击强度为22.118 kJ/m²,与纯EP的弯曲强度89.28 MPa、冲击强度11.977 kJ/m²相比,分别提高了39.3%,84.7%;与EP/AIN复合材料的弯曲强度115.54 MPa、冲击强度20.100 kJ/m²相比,分别提高了7.7%,10.0%。综合来看,当MWCNTs含量为1.5份、AIN含量为40份时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的综合力学性能最优异。

AIN和MWCNTs两种填料作为增强组分,共同改善EP的力学性能。AIN是固体颗粒填料,在AIN含量较低时,具有超高长径比的MWCNTs能够在液态的EP中均匀分散,充分伸展,因此两种填料可以充分提高复合材料的冲击强度和弯曲强度。而随着AIN含量的增加,MWCNTs的伸展受限,并且复合材料的黏度增加,成型过程中易产生气泡、应力集中等缺陷,从而导致复合材料的冲击强度和弯曲强度下降。

(2) 导热性能。

当MWCNTs含量为1.5份时,AIN含量对EP/AIN/MWCNTs复合材料热导率的影响如图6所示。

由图6可知,EP/AIN/MWCNTs复合材料的热导率随着AIN含量的增加而不断提升。当MWCNTs含量为1.5份时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的热导率远高于添加相同份数AIN的EP/AIN复合材料。当MWCNTs含量为1.5份、AIN含

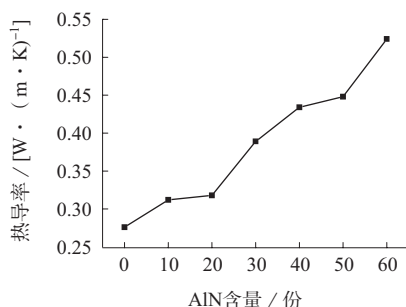


图6 MWCNTs 含量为 1.5 份时 AIN 含量对 EP/AIN/MWCNTs 复合材料热导率的影响

量为40份时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的热导率达到0.434 W/(m · K),而AIN相同含量下,EP/AIN复合材料的热导率为0.35 W/(m · K),提高了24%。

由此可见,混合填料大大提高了EP/AIN/MWCNTs复合材料的热导率。究其原因,MWCNTs是一种具有高长径比的纳米材料,并且沿径向方向具有超高的热导率,当MWCNTs相对均匀地分散在树脂基体中时,MWCNTs充当声子的“导线”,当AIN在复合材料中的含量较高时,MWCNTs可与AIN相互作用,使复合材料内产生大量的导热通路,声子可通过基体-AIN-MWCNTs-AIN-基体的路线传播,通过AIN与MWCNTs协同作用的方式,大大提高了复合材料的热导率。

(3) 微观结构。

当MWCNTs: AIN=1.5: 20时,EP/AIN/MWCNTs复合材料冲击试样断面的SEM照片如图7所示。

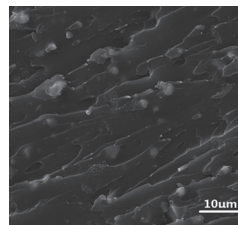


图7 MWCNTs: AIN=1.5: 20时 EP/AIN/MWCNTs 复合材料冲击试样断面的 SEM 照片

从图7可以看出,EP/AIN/MWCNTs复合材料的断面表面粗糙,呈现河流状的韧性断裂特征。AIN和MWCNTs在树脂中分散相对均匀,并未出现明显的团聚现象,保证了导热通路的形成。

当MWCNTs: AIN=1.5: 20时,EP/AIN/MWCNTs复合材料的TEM照片如图8所示。

从图8可以看到,AIN和MWCNTs在树脂中能相对均匀分散,MWCNTs从AIN间的空隙中穿

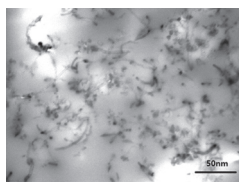


图8 MWCNTs: AlN=1.5:20时EP/AlN/MWCNTs复合材料的TEM照片

过,形成类似网格的结构,从而增加了导热通路的形成,减少了声子传播路线中树脂基体部分的比例,提高了复合材料的热导率。

3 结论

(1) 单独或同时加入填料 AlN 和 MWCNTs 均能够提高 EP 复合材料的力学性能和导热性能。随着填料含量的逐渐增加,复合材料的力学性能呈现先增大后减小的趋势,而热导率呈现逐渐增大的趋势。

(2) 当 MWCNTs 含量为 1.5 份、AlN 含量为 40 份时,EP/AlN/MWCNTs 复合材料的综合力学性能最优异,冲击强度为 22.118 kJ/m^2 ,弯曲强度为 124.40 MPa 。

(3) EP/AlN/MWCNTs 复合材料的热导率明显高于添加相同份数 AlN 的 EP/AlN 复合材料的热导率;当 MWCNTs 含量为 1.5 份、AlN 含量为 40 份时,EP/AlN/MWCNTs 复合材料的热导率达到 $0.434 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,比 AlN 相同含量下 EP/AlN 复合材料的热导率 [$0.35 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$] 提高了 24%。

(4) SEM 和 TEM 分析表明,EP/AlN/MWCNTs 复合材料的断面表面粗糙,呈现河流状的韧性断裂特征,AlN 和 MWCNTs 在树脂中能相对均匀分散,并未出现明显的团聚现象,MWCNTs 从 AlN 间的空隙中穿过,形成类似网格的结构,提高了复合材料的热导率。

参考文献

- [1] Yu Wei, Zhao Junchang, Wang Mingzhu, et al. Thermal conductivity enhancement in thermal grease containing different CuO structures [J]. *Nanoscale Res Lett*, 2015, 10 (1):1-8.
- [2] Pal H, Sharma V. Thermal conductivity of carbon nanotube-silver composite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2015, 25(1):154-161.
- [3] Julian A, Rossi S, Alomari M, et al. Thermal conductivity of ultrathin nano-crystalline diamond films determined by Raman thermography assisted by silicon nanowires[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106 (22):<http://dx.doi.org/10.1063/1.4922035>.
- [4] Wozniak M, Daneliska A, Rutkowski P, et al. Thermal conductivity of highly loaded aluminium nitride-poly(propylene glycol) dispersions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65:592-598.
- [5] Tripathi D, Dey T K. Thermal conductivity of n-aluminium nitride-added MgB_2 superconductor in normal and superconducting state[J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2014, 27(9):2011-2021.
- [6] Liu Zhuan, Zhou Yikai, Wang Yanying, et al. Enhanced oxidation and detection of toxic ractopamine using carbon nanotube film-modified electrode[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 74:139-144.
- [7] Wang Weilong, Yang Xiaoxi, Fang Yutang, et al. Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form-stable composite phase change materials by using β -Aluminum nitride[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8):1196-1200.
- [8] Choi S, Kim J. Thermal conductivity of epoxy composites with a binary-particle system of aluminum oxide and aluminum nitride fillers[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2013, 51:140-147.
- [9] Han Zhidong, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites:A review[J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(7):914-944.
- [10] Guo Peng, Chen Xiaohong, Gao Xinchun, et al. Fabrication and mechanical properties of well-dispersed multiwalled carbon nanotubes / epoxy composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(15-16):3331-3337.
- [11] Romano V, Naddeo C, Guadagno L, et al. Thermal conductivity of epoxy resins filled with MWCNT and hydrotalcite clay: Experimental data and theoretical predictive modeling[J]. *Polymer Composites*, 2015, 36(6):1118-1123.
- [12] Mamunya Y, Boudenne A, Lebovka N, et al. Electrical and thermophysical behaviour of PVC-MWCNT nanocomposites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68 (9):1981-1988.

1 克竟然能卖到 1 亿英镑的天价新材料

据美国猎奇新闻网站 2015 年 12 月 23 日报道,英国牛津大学实验室预售其 2014 年研发成功的人造碳基材料——富勒烯,每克价格近 1 亿英镑。

富勒烯又名巴基球,因其结构酷似足球,所以得此名。它和钻石、石墨烯等物质一样,都是由碳原子组成,因为碳原子数量和排列方式有所差异,所以拥有不同的特性。相

关科学家预言富勒烯的成功研发或将掀起新一轮的科技革命。因为运用富勒烯可以制造小巧、便携的原子钟。同时,便携式原子钟将会成为世界上最精确的计时系统,它还可以提高车载 GPS 导航系统的精确度,从现如今的 2 m 精确到 1 mm。

因生产技术尚不成熟,所以目前富勒烯的价格昂贵。

(中塑在线)