

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.004

PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的制备及性能

王瑛¹,郝冬冬²,刘婷²,李纪鹏²,陈以传²,赵忠贤¹,江平开³,吴新锋¹

(1. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海航天特种环境高分子功能材料工程技术研究中心, 上海 200245; 3. 上海交通大学, 上海市电气绝缘与热老化重点实验室, 上海 200240)

摘要: 通过哈克密炼-模压成型法制备了线型低密度聚乙烯 (PE-LLD)/ Al_2O_3 复合材料, 并在不同温度条件下对复合材料的导热性能进行研究。通过扫描电子显微镜、热失重分析仪、差示扫描量热仪、激光导热仪和精密阻抗分析仪研究了复合材料中 Al_2O_3 的分散性及复合材料的热稳定性、熔融行为、导热性能和介电性能。结果表明, Al_2O_3 均匀分散在 PE-LLD 基体中; 添加微米级 Al_2O_3 后, 复合材料的熔点和熔融焓变化不大, 热稳定性有所提高; 当 Al_2O_3 添加量为 100 份时, 复合材料的热导率为 $1.426 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比纯 PE-LLD 的热导率提高 218.0%; 随着温度的升高, Al_2O_3 的添加量越多, 复合材料的热导率降低越明显; 随着 Al_2O_3 添加量的增加, 复合材料的介电常数和介电损耗增大, 在低频时增加更明显。

关键词: 线型低密度聚乙烯; Al_2O_3 ; 复合材料; 热导率; 介电性能**中图分类号:** TQ325.1+2, TB33, O482.2+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0020-06

Preparation and Properties of PE-LLD/ Al_2O_3 Thermal Conductive Composites

Wang Ying¹, Hao Dongdong², Liu Ting², Li Jipeng², Chen Yichuan², Zhao Zhongxian¹, Jiang Pingkai³, Wu Xinfeng¹

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Special Environmental Polymer Functional Materials, Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Electrical Insulation and Thermal Aging, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Linear low density polyethylene (PE-LLD)/ Al_2O_3 thermal conductive composites were made by Haake mixing-hot pressing method. The thermal conductivity of the composites at different temperatures were also studied. The dispersion, thermal stabilities and melting behaviors, thermal conductivity and dielectric properties of the composites were measured by SEM, TG, DSC, laser thermal conductivity analyzer and precision impedance analyzer. The results show that the Al_2O_3 particles are uniformly dispersed in PE-LLD matrix. The melting point and melting enthalpy of the composites change little with the addition of micro- Al_2O_3 , the thermal stability of the composite increases after adding micro- Al_2O_3 . When the amount of micro- Al_2O_3 added is 100 phr, thermal conductivity of the composite is $1.426 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 218.0% higher than that of the PE-LLD matrix. The higher the content of micro- Al_2O_3 , the more obvious the thermal conductivity of the composites decreases with the increasing temperature. The dielectric constant and dielectric loss of the composite increases with the increasing micro- Al_2O_3 , especially at low frequency.

Keywords: linear low density polyethylene; Al_2O_3 ; composite; thermal conductivity; dielectric property

随着信息产业的快速发展,电子元器件的应用逐渐向高功率、高集成化、高密度方向发展,绝缘散热问题成为制约集成电路、大功率电子元器件、大功率照明器件、大功率电力机车、混合动力机车行业发展的瓶颈^[1-2]。聚乙烯 (PE) 以其优越的绝缘性能

和加工性能成为导热绝缘复合材料基体的选择对象。现阶段导热绝缘复合材料的制备方法主要包括本征导热和填料填充导热两种方法。填料填充法比较容易实现而被广泛采纳,常用填料填充型导热高分子材料主要是通过添加高导热金属材料、碳材料

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2017M611757), 上海市工程技术研究中心项目 (18DZ2253500), 2017 年度江苏省博士后科研计划项目 (B), 2017 年连云港市“港城英才计划”项目

通讯作者: 吴新锋, 副教授, 主要从事高分子复合材料的研究 E-mail: coolwu1234@163.com

收稿日期: 2018-10-31

引用格式: 王瑛, 郝冬冬, 刘婷, 等. PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1): 20-25.

Wang Ying, Hao Dongdong, Liu Ting, et al. Preparation and properties of PE-LLD/ Al_2O_3 thermal conductive composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 20-25.

和高导热无机填料如氮化铝(AlN)^[3]、氮化硼(BN)^[4-7]、氧化铝(Al_2O_3)^[8]等高导热填料的方法来制备。祁蓉等^[9]采用球磨法将氮化硅(Si_3N_4)和高密度聚乙烯(PE-HD)粉末混合,采用热压成型法制得复合材料,并研究了粉末大小及含量对材料热导率的影响,随着填料用量的增加,材料的热导率得到明显提高。杜伯学等^[10]分别以微米BN和微纳米混合BN颗粒作为填料,制备了不同填料质量分数的PE导热材料,并研究了其耐电弧性和介电性能。Zhao Tianbao等^[11]制备了PE/ BN 复合材料,通过控制PE基体的结晶来提高材料的热导率。张玉凤等^[12]使用密炼机采用熔融混炼法制备了低密度聚乙烯(PE-LD)/纳米二氧化硅(SiO_2)复合材料和PE-LD/纳米 Al_2O_3 复合材料,并采用平板硫化机模压成型,研究了复合材料的导热性能和耐直流高压击穿性能。Yang Shuya等^[13]通过退火处理制备了PE/六方氮化硼(h-BN)复合材料,当h-BN体积分数为5.97%时,热导率达到 $1.37\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比常规法提高180%。Nie Shengqiang等^[14]制备了PE-HD/ ZnO/BN 杂化复合材料,并对其导热性能和电性能进行了研究。笔者在本课题组前期复合材料研究的基础上^[15-17],通过哈克密炼-模压成型法将线型低密度聚乙烯(PE-LLD)粉体与 Al_2O_3 粉体复合在一起,制备出PE-LLD/ Al_2O_3 复合材料,研究了复合材料的微观形貌、热稳定性、结晶性能、导热性能和介电性能,以期对绝缘导热聚烯烃复合材料的制备提供一定理论借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-LLD粉体:218W,沙特基础工业公司;

Al_2O_3 粉体:片状微米级颗粒,大小约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,中国铝业郑州研究院;

无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

哈克密炼机:XSS-300型,上海科创橡塑机械设备有限公司;

热压机:YX-25型,上海西玛伟力橡塑机械有限公司;

小型离子溅射仪:SBC-12型,北京中科科仪股份有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JEM-4701型,日本电子株式会社;

热失重(TG)分析仪: TG 209 F3型,德国NETZSCH公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC 200 F3型,德国NETZSCH公司;

激光导热分析仪: LFA 447 Nanoflash型,德国NETZSCH公司;

精密阻抗分析仪: 4294A型,安捷伦科技(中国)有限公司。

1.3 试样制备

通过哈克密炼-模压成型法制备PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料。以100份PE-LLD为基体,添加到PE-LLD中 Al_2O_3 的量分别为20,40,60,80,100份。将PE-LLD和 Al_2O_3 两种粉体手工混合后,放入预热好的密炼腔(160°C)中,密炼搅拌5 min后出料,转速为 $60\text{ r}/\text{min}$ 。

称取一定质量密炼好的PE-LLD/ Al_2O_3 复合材料放入预热好的热压机模具(厚 1 mm)中压制成型,压制时间10 min,放气至少3次,然后转至冷压机中冷却5 min,脱模即可得到片状PE-LLD/ Al_2O_3 复合材料。

1.4 性能测试与表征

SEM表征:将样品在液氮中脆断后喷金处理,然后进行断面形貌表征。

TG分析:温度区间为 $50\sim 800^\circ\text{C}$,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气气氛。

DSC分析:温度区间为 $20\sim 200^\circ\text{C}$,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气气氛。

热导率测试:根据ASTM E1461-2013测试,样品为 $\text{O}12.6\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 圆片。

介电频谱测试:片状样品两面喷金后,夹在两电极之间,形成一个平行板电容器,然后进行介电性能测试,测试频率范围为 $10^{-1}\sim 10^6\text{ Hz}$ 。

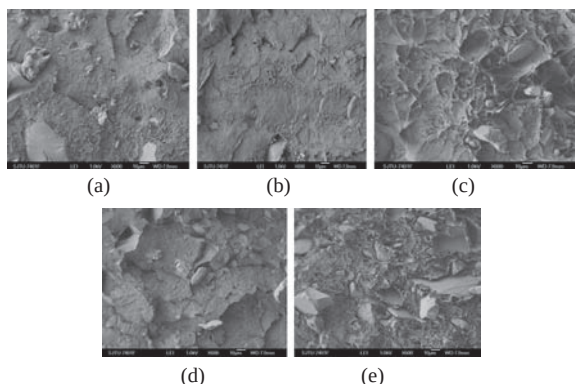
2 结果与讨论

2.1 SEM分析

图1是PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的SEM照片。由图1可以看出,当 Al_2O_3 添加量为20,40,60,80,100份时, Al_2O_3 均能够均匀分散在PE-LLD中,特别是在 Al_2O_3 添加量为100份时分散最均匀,同样面积中, Al_2O_3 的添加量也最多,说明哈克密炼-模压成型法可以把 Al_2O_3 分散在PE-LLD基体中,在模压过程中, Al_2O_3 也没有明显地发生沉降现象。

2.2 TG分析

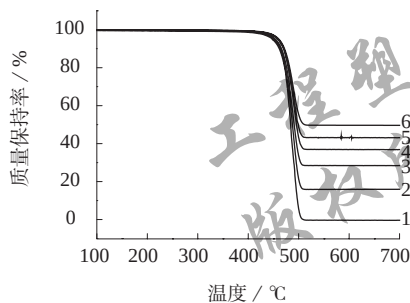
图2是PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的TG曲



Al₂O₃ 添加量: a—20 份; b—40 份; c—60 份; d—80 份; e—100 份

图1 PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料的 SEM 照片

线。从图2可以看出,当 Al₂O₃ 添加量为 0,20,40,60,80,100 份时,在温度升至 520℃ 后,复合材料的 TG 曲线都保持在一条水平线上,说明 PE-LLD 在 520℃ 后已经完全分解掉,样品中只剩下了 Al₂O₃ 填料。当 Al₂O₃ 添加量分别为 20,40,60,80,100 份时,直接测得的质量保持率依次为 15.97%,28.38%,36.81%,43.39% 和 49.59%。



Al₂O₃ 添加量: 1—0 份; 2—20 份; 3—40 份;
4—60 份; 5—80 份; 6—100 份

图2 PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料的 TG 曲线

表1是 PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料 TG 曲线的残炭率(520℃)与 Al₂O₃ 添加量的数据对比。从表1可以看出,复合材料 TG 曲线的残炭率和 Al₂O₃ 的理论质量分数的误差在 1.05% 以内,说明 Al₂O₃ 在宏观上均匀分散在 PE-LLD 基体树脂中^[17]。

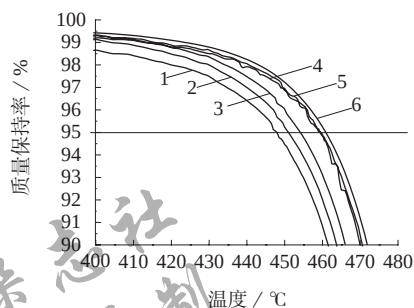
表1 PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料 TG 曲线的残炭率(520℃)与 Al₂O₃ 添加量的数据对比

项目	数据				
Al ₂ O ₃ 添加量 / 份	20	40	60	80	100
Al ₂ O ₃ 理论质量分数 / %	16.67	28.57	37.50	44.44	50.00
TG 曲线残炭率(520℃) / %	15.97	28.38	36.81	43.39	49.59
误差 / %	-0.70	-0.19	-0.69	-1.05	-0.41

注: Al₂O₃ 理论质量分数是根据 Al₂O₃ 添加量换算求得。

PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料热失重在 10% 以内的 TG 曲线如图3所示。从图3可以看出,当 Al₂O₃ 添加量分别为 20,40,60,80,100 份时,PE-

LLD/Al₂O₃ 复合材料热失重 5% 时的温度分别为 451.0℃,454.0℃,459.5℃,459.5℃ 和 461℃,比纯 PE-LLD 的 448℃ 分别高出 3℃,6℃,11.5℃,11.5℃ 和 13℃。说明 Al₂O₃ 的加入一定程度上可以提高复合材料的热稳定性,且 Al₂O₃ 添加量越多,热分解温度提高得越多。由于 PE-LLD 是一种线型结构高分子材料,Al₂O₃ 的加入阻碍了复合材料中 PE-LLD 基体的分子链段运动,Al₂O₃ 越多,颗粒与 PE-LLD 分子链段接触面越多,阻碍 PE-LLD 分子运动越明显,热稳定性相应有所提高。



Al₂O₃ 添加量: 1—0 份; 2—20 份; 3—40 份;
4—60 份; 5—80 份; 6—100 份

图3 PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料热失重 10% 以内的 TG 曲线

2.3 DSC 分析

PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料的 DSC 数据列于表2。

表2 不同 Al₂O₃ 添加量下 PE-LLD/Al₂O₃ 导热

复合材料的 DSC 数据						
项目	数据					
Al ₂ O ₃ 添加量 / 份	0	20	40	60	80	100
复合材料的熔点 / °C	124.7	124.8	124.9	124.5	124.5	124.2
复合材料的熔融焓 / (J·g ⁻¹)	127.6	106.1	88.0	80.1	68.9	64.6
复合材料中 PE-LLD 的实际熔融焓 / (J·g ⁻¹)	127.6	127.3	123.2	128.2	124.0	129.2

从表2可以看出,当 Al₂O₃ 添加量分别为 0,20,40,60,80,100 份时,复合材料的熔点在 124~125℃ 之间,说明加入 Al₂O₃ 后复合材料的熔点变化不大,不会影响 PE-LLD 的微观结晶结构。

从表2可以看出,随着 Al₂O₃ 添加量的增加,PE-LLD/Al₂O₃ 复合材料的熔融焓逐渐减少。PE-LLD/Al₂O₃ 复合材料中 PE-LLD 基体的实际熔融焓按式(1)计算得到^[17]:

$$\Delta H_{\text{PE-LLD}} = \frac{\Delta H}{100\% - w} \quad (1)$$

式中: $\Delta H_{\text{PE-LLD}}$ ——PE-LLD/Al₂O₃ 导热复合材料中

PE-LLD 的实际熔融焓;

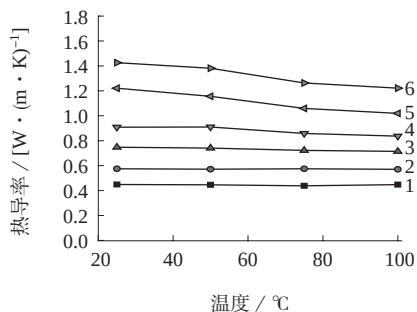
ΔH ——PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的熔融焓;

w ——PE-LLD/ Al_2O_3 复合材料中 Al_2O_3 的质量分数。

通过式 (1) 计算得到的 PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料中 PE-LLD 基体的实际熔融焓列入表 2。从表 2 可以看出,复合材料中 PE-LLD 的熔融焓在 123.2~129.2 J/g 之间, PE-LLD 的熔融焓变化不大,即 Al_2O_3 的加入对 PE-LLD 结晶度没有太大影响。 Al_2O_3 的加入可以提高复合材料在高温条件下的热稳定性,但它的加入并没有改变 PE-LLD 的熔点和熔融热。这是由于大尺寸的 Al_2O_3 要远远大于 PE-LLD 结晶颗粒的大小(结晶颗粒是由 PE-LLD 分子有序折叠而成),因此 Al_2O_3 的加入不会对复合材料结晶性能产生影响,这和文献 [17] 中 Al_2O_3 对超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 结晶性能的影响结果是一致的。

2.4 导热性能分析

不同温度下 PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料热导率如图 4 所示。由图 4 可以看出,当温度分别为 25, 50, 75, 100℃ 时,纯 PE-LLD 的热导率依次为 0.449, 0.446, 0.437, 0.447 W/(m·K), 在材料熔融之前, PE-LLD 基体的热导率变化不大。随着温度的升高, Al_2O_3 添加量越多,复合材料的热导率曲线倾斜越明显,即随着温度升高,热导率降低越明显,如 Al_2O_3 添加量为 100 份的复合材料,其 25, 50, 75, 100℃ 时的热导率分别为 1.43, 1.38, 1.26, 1.22 W/(m·K), 100℃ 时的热导率只有 25℃ 时的 85.3%。说明在复合材料中导热填料的加入会与树脂基体之间产生界面热阻,添加量越多界面热阻越大,且在高温条件下显现得越明显。



Al_2O_3 添加量: 1—0 份; 2—20 份; 3—40 份;
4—60 份; 5—80 份; 6—100 份

图 4 不同温度下 PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的热导率

Al_2O_3 的热导率约为 30 W/(m·K), 所用 PE-LLD 的热导率为 0.449 W/(m·K), 因此 Al_2O_3 加入 PE-LLD 中后, 复合材料的热导率必然比 PE-LLD 的热导率有所提高, 且 Al_2O_3 添加量越多, 复合材料的热导率越高。但是同时也应该注意到, Al_2O_3 加入到 PE-LLD 中形成复合材料后, Al_2O_3 和 PE-LLD 之间存在着界面热阻, 存在界面越多, 界面热阻越大, 温度越高显现得越明显。

由图 4 可以看出, 在 25℃ 下, 当添加 0, 20, 40, 80, 100 份 Al_2O_3 时, PE-LLD/ Al_2O_3 复合材料热导率分别为 0.449, 0.575, 0.748, 0.909, 1.221, 1.426 W/(m·K), 复合材料的热导率随着 Al_2O_3 的增加而逐渐增大, 其中, 添加 100 份 Al_2O_3 时复合材料的热导率比纯 PE-LLD 的热导率提高了 218.0%, 极大地提高了材料的热导率。复合材料的热导率提高, 说明材料中高导热 Al_2O_3 已经形成通路, 随着 Al_2O_3 添加量的继续增加, Al_2O_3 接触的几率越来越大, 导热通路越来越多, 热导率增加越来越大。在实际应用中, 高导热材料可以把热量快速传出, 降低材料的老化及其它性能变化, 提高材料的综合性能。

2.5 介电性能分析

图 5 是不同频率下 PE-LLD/ Al_2O_3 导热复合材料的介电常数。观察图 5 可以得出以下几个结论: (1) 纯 PE-LLD 在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz 范围内的介电常数几乎没有变化, 其介电常数约为 2.63; (2) 复合材料的介电常数均随着频率的增加而逐渐减少, 如当 Al_2O_3 添加量为 100 份时, 复合材料的介电常数从高频 10^6 Hz 时的 3.62 逐渐提高到低频 10^{-1} Hz 时的 6.15, 提高了 69.9%; (3) 在同一测试频率条件下, 不管是高频还是低频, 在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz 范围内, 复合材料的介电常数均随着 Al_2O_3 添加量的增加而逐渐增大。纯 PE-LLD 的介电常数为 2.63, 当 Al_2O_3 添加量分别为 0, 20, 40, 60, 80, 100 份时, 在高频 10^6 Hz 时复合材料的介电常数依次增加到 2.84, 3.00, 3.35, 3.51, 3.62; 在低频 10^{-1} Hz 时复合材料的介电常数依次增加到 2.98, 3.51, 4.20, 4.57, 6.15, 其增大趋势比在高频 10^6 Hz 时更加明显。

上述现象可以从极化现象进行解释。极化现象发生在所有的绝缘高分子材料中, 绝缘高分子材料中通常包含四种极化现象: 界面极化、偶极极化、离子极化和电子极化。PE-LLD 绝缘材料中几乎不存在离子和偶极子, 所以离子极化和偶极极化可以忽略, 在纯 PE 中, 界面极化可以忽略, 所以在 PE-LLD

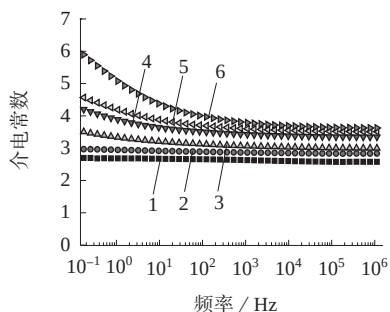


图5 不同频率下 PE-LLD / Al₂O₃ 复合材料的介电常数
Al₂O₃ 添加量: 1—0 份; 2—20 份; 3—40 份;
4—60 份; 5—80 份; 6—100 份

图5 不同频率下 PE-LLD / Al₂O₃ 复合材料的介电常数

中主要是电子极化现象,而电子极化现象非常快速,所以纯 PE-LLD 在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz 范围内,其介电常数几乎没有变化。添加 Al₂O₃ 后, Al₂O₃ 与 PE-LLD 之间产生界面极化,在高频条件下,界面极化响应时间高于频率变化,所以界面极化变化不明显,而在低频条件下,界面极化响应时间低于频率变化,界面极化明显,介电常数增大。Al₂O₃ 添加量越多,界面越大,界面极化现象越明显,介电常数变化也就越大。界面极化主要有两个原因:一是界面结合不好;另外一个界面接触力差不多,但是结合界面较多。Al₂O₃ 加入 PE-LLD 中后,介电常数增大主要是结合界面增多引起的。

图6是不同频率下 PE-LLD / Al₂O₃ 导热复合材料的介电损耗。由图6可以看出,纯 PE-LLD 和 Al₂O₃ 添加量为 20 份时复合材料的介电损耗处在 0.02 以下,几乎不随着频率变化,这是由于界面极化不太明显的缘故。当 Al₂O₃ 添加量高于 40 份时,由于界面极化的原因,复合材料的介电损耗增加比较明显,但介电损耗主要在 0.10 以下。另外介电损耗和介电常数一样,均随着频率的降低而升高。

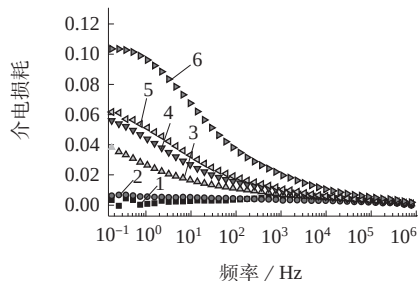


图6 一定频率范围内 LLDPE / Al₂O₃ 复合材料的介电损耗
Al₂O₃ 添加量: 1—0 份; 2—20 份; 3—40 份;
4—60 份; 5—80 份; 6—100 份

图6 一定频率范围内 LLDPE / Al₂O₃ 复合材料的介电损耗

3 结论

(1) 哈克密炼-模压成型法制备的复合材料中 Al₂O₃ 分散均匀,说明该方法制备微米级热塑性复

合材料是可行的。

(2) 加入 Al₂O₃ 对 PE-LLD 的熔点、熔融焓和结晶度影响不大,但是可以提高高温时的热稳定性。

(3) 加入 Al₂O₃ 可提高复合材料的热导率,但 Al₂O₃ 添加量越多,界面热阻越大,在高温下热导率降低越明显,在实际应用中应该注意。

(4) 加入 Al₂O₃ 可提高复合材料的介电常数和介电损耗,随着 Al₂O₃ 添加量的增加,复合材料的介电常数和介电损耗增大,介电常数和介电损耗在低频条件下增加得更加明显。

参考文献

- [1] Gao Shan, Yuki S, Osanai H, et al. Effect of surface roughening of temperature-cycled ceramic-metal-bonded substrates on thermomechanical reliability of sintered-silver joints[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2018, 18(2):291-297.
- [2] Yim B S, Kim J M. Effect of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) concentration on thermomechanical reliability of MWCNT-reinforced solderable isotropic polymer nanocomposites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016, 27(9):1-13.
- [3] Xu Yonggang, Yang Chi, Li Jun, et al. Development of AlN / epoxy composites with enhanced thermal conductivity[J]. Materials, 2017, 10(12):doi:10.3390/ma10121442.
- [4] Chen Jin, Huang Xingyi, Zhu Yingke, et al. Cellulose nanofiber supported 3D interconnected BN nanosheets for epoxy nanocomposites with ultrahigh thermal management capability[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(5):doi:10.1002/adfm.201604754.
- [5] Huang Xingyi, Wang Xin, Yang Ke, et al. Thermally conductive, electrically insulating and melt-processable polystyrene / boron nitride nanocomposites prepared by in situ reversible addition fragmentation chain transfer polymerization[J]. Nanotechnology, 2015, 26:doi:10.1088/0957-4484/26/1/015705.
- [6] Zeng Xiaoliang, Sun Jiajia, Yao Yimin, et al. A combination of boron nitride nanotubes and cellulose nanofibers for the preparation of a nanocomposite with high thermal conductivity[J]. ACS Nano, 2017, 11(5):5 167-5 178.
- [7] Sun Jiajia, Yao Yimin, Zeng Xiaoliang, et al. Preparation of boron nitride nanosheet / nanofibrillated cellulose nanocomposites with ultrahigh thermal conductivity via engineering interfacial thermal resistance[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(17):doi:10.1109/ICEPT.2017.8046443.
- [8] Abad B, Ruizclavijo A, Caballeroalero O, et al. Tailoring thermal conductivity via three-dimensional porous alumina[J]. Scientific Reports, 2016, 6:doi:10.1038/srep38595.
- [9] 祁蓉, 齐晔华, 王兆福, 等. 高导热绝缘聚乙烯复合材料 [J]. 粘接, 2015(5):37-42.
- Qi Rong, Qi Shuhua, Wang Zhaofu, et al. Polyethylene insulation composites with high thermal conductivity[J]. Adhesion, 2015(5):37-42.

- [10] 杜伯学,崔彬,徐航,等. 聚乙烯/氮化硼高复合材料的耐电弧性和介电性能[J]. 高电压技术,2018,44(5):1 412–1 420.
Du Boxue, Cui Bin, Xu Hang, et al. Arc resistance and dielectric properties of polyethylene / boron nitride composites with high thermal conductivity[J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1 412–1 420.
- [11] Zhao Tianbao, Zhang Xianlong. Enhanced thermal conductivity of PE / BN composites through controlling crystallization behavior of PE matrix [J]. Polymer Composites,2015,38(12):2 806–2 813.
- [12] 张玉凤,辛萌,苏明,等. 高绝缘性良好导热性低密度聚乙烯电缆绝缘材料的制备与性能[J]. 青岛科技大学学报:自然科学版,2015,36(6):655–659.
Zhang Yufeng, Xin Meng, Su Ming, et al. Preparation and performance of high insulativity and good thermal conductivity LDPE insulated cable material[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology:Natural Science Edition,2015,36(6):655–659.
- [13] Yang Shuya, Huang Feiyan, Lei Jun, et al. Enhanced thermal conductivity of polyethylene / boron nitride multilayer sheets through annealing[J]. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing,2018,107:135–143.
- [14] Nie Shengqiang, Zhang Xianlong, Luo Jun, et al. Synergistic effect of boron nitride and tetrapod - shaped zinc oxide whisker hybrid fillers on filler networks in thermal conductive HDPE composites[J]. Polymer Composites,2015,38(9):1 902–1 907.
- [15] Gao Jian, Yu Jinhong, Wu Xinfeng, et al. Enhanced thermal properties for epoxy composites with a three-dimensional graphene oxide filler[J]. Fibers and Polymers,2015,16(12):2 617–2 626.
- [16] Shen Dianyu, Wang Mengjie, Wu Yuming, et al. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites with core-shell SiC@SiO₂ nanowires[J]. High Voltage,2017,2(3):154–160.
- [17] Wu Xinfeng, Jiang Pingkai, Zhou Yun, et al. Influence of alumina content and thermal treatment on the thermal conductivity of UPE / Al_2O_3 composite[J]. Journal of Applied Polymer Science,2014,131:doi:10.1002/app.40528.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200 ~ 300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3 ~ 8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 *.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 10 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.com),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。