

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.04.004

载体包裹填料提高 PE/PP/EPDM/BN 材料导热性

常磊,李迎春,王文生,崔煜,畅贝哲,安超,蔡迪

(中北大学材料科学与工程学院,太原 030051)

摘要:以三元乙丙橡胶 (EPDM)/ 氮化硼 (BN) 复合材料为母料,通过熔融共混 EPDM/BN 复合材料与聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP),制备 PE/PP/EPDM/BN 复合材料。采用 PE:PP 的比例为 5:5,以使复合材料形成共连续结构;通过 EPDM 包裹 BN 的方法,实现 BN 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构的相界面处分布,以形成导热通路,从而提高 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的导热性能。通过接触角测试和扩散系数公式计算预测了 EPDM 会选择性分布在 PE/PP/EPDM 复合材料共连续结构的相界面处。通过连续度计算结果得出,EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时,EPDM 的连续度为 85.3%。由扫描电子显微镜分析表明 EPDM 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料中连续贯通。由导热测试分析知,随着 BN 含量的增加,PE/PP/EPDM/BN 复合材料的热导率逐渐增加。这项研究提高了 PE/PP 复合材料的热导率,此材料在电子工业中可能具有潜在应用。

关键词:氮化硼;相界面处;选择性分布;导热复合材料

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)04-0020-05

Carrier Wrapped Filler Improves the Thermal Conductivity of PE/PP/EPDM/BN Composites

Chang Lei, Li Yingchun, Wang Wensheng, Cui Yu, Chang Beizhe, An Chao, Cai Di

(School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Polyethylene (PE) / polypropylene (PP) / ethylene propylene diene monomer (EPDM) / BN composites were prepared by melt blending EPDM / BN composites with PE and PP by using EPDM / BN composites as masterbatch. In this experiment, the ratio of PE : PP is 5 : 5 to make the composite material form a co-continuous structure. Through the method of EPDM wrapping BN, BN is distributed at the phase interface of the PE / PP / EPDM / BN composite co-continuous structure to form a thermal path, thereby improving the thermal conductivity of the PE / PP / EPDM / BN composite material. The contact angle test and the calculation of the diffusion coefficient formula predict that EPDM will be selectively distributed at the phase interface of the PE / PP / EPDM composite co-continuous structure. According to the results of continuity calculation, when EPDM is 15% of the total mass of PE and PP, the continuity of EPDM is 85.3%. Scanning electron microscopy analysis shows that EPDM is continuous in the PE / PP / EPDM / BN composite. According to the analysis of thermal conductivity, with the increase of BN content, the thermal conductivity of PE / PP / EPDM / BN composites gradually increases. This research improves the thermal conductivity of PE / PP composites, which may have potential applications in the electronics industry.

Keywords: boron nitride ; phase interface ; selective distribution ; thermally conductive composite material

随着现代电子产业微型化的迅速发展,导热材料的需求也日益增加。尤其是电子、电器产品的微型化、轻便化、功能集中化,使得市场上对导热材料的性能要求更为苛刻^[1]。导热复合材料作为一种新兴导热材料渐渐被科研人员所关注。其具有的质轻、耐化学腐蚀、热导率高和电绝缘的优异性被人们有

效地利用了起来,同时也是争相研究的热点。

杜伯学等^[2]研究发现,复合材料的导热性能不仅与复合材料基体的热导率和填料类型有关,填料的尺寸、含量以及填料在基体相的分布也会对复合材料的导热性能产生影响。因此,笔者研究填料分布在共连续结构的相界面处对复合材料导热性能的

通信作者: 李迎春,博士,教授,主要从事塑料功能化和高性能化研究 E-mail: liyingchun@nuc.edu.cn

收稿日期: 2021-01-20

引用格式: 常磊,李迎春,王文生,等. 载体包裹填料提高 PE/PP/EPDM/BN 材料导热性 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(4):20-24.

Chang Lei, Li Yingchun, Wang Wensheng, et al. Carrier wrapped filler improves the thermal conductivity of PE / PP / EPDM / BN composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4):20-24.

影响。有研究发现^[3-4],不同的加工方法对填料在基体中的分布影响很大,从而会影响复合材料的热导率。Y. Agari 等^[5]以石墨填充改性聚乙烯(PE),探讨了不同的加工方法对复合材料导热性能的影响。结果发现,四种加工方法制备的复合材料的导热性能由高到低分别为,粉末混合法、溶液混合法、辊炼混合法、熔融混合法。笔者采用二步法来制备 PE/聚丙烯(PP)/三元乙丙橡胶(EPDM)/氮化硼(BN)复合材料,通过载体包裹填料的方法来调控填料的分布。Jiang Kun 等^[6]研究了在高密度聚乙烯/等规 PP 复合材料的多层结构。结果表明,两相的黏度比、界面相互作用、体积比、加工条件很大程度上都会对复合材料的相形态造成影响。计算了基体的界面张力,采用基体材料的比例为 5 : 5,以形成共连续结构,再通过二步法来制备了 PE/PP/EPDM/BN 复合材料。

PP, PE 的使用广泛,且加工简便、原料便宜,是合适的基体选择。BN 有很多优异的性能如高耐热性、优异的绝缘性能、化学性质稳定,是理想的导热绝缘填料之一^[7]。在本实验中,采用 PE 与 PP 的质量比为 50 : 50,以获得具有共连续结构的 PE/PP 复合材料^[8]。

笔者采用 PE 和 PP 为基体材料,EPDM 为载体,BN 为导热填料,先制备 EPDM/BN 复合材料,然后以 EPDM/BN 复合材料为母料,通过熔融共混 EPDM/BN 复合材料与 PE 及 PP,制备 PE/PP/EPDM/BN 复合材料,从而制备出导热良好、力学性能较好的复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE : 2911,辽宁抚顺石油天然气股份有限公司;

PP : T30S,甘肃七里河石油天然气股份有限公司;

BN : 阿拉丁试剂(上海)有限公司;

EPDM : 3745P,山东优索化工科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

微型锥型双螺杆挤出机:JSZS-10B 型,武汉瑞鸣实验仪器有限公司;

微型注塑机:SZS-20 型,武汉瑞鸣实验仪器有限公司;

全自动显微接触角测量仪:OCA 20 型,德国 Dataphysics 公司;

扫描电子显微镜(SEM):H800 型,日本日立公

司;

便携式热导率仪:TC3000E 型,陕西夏溪电子科技有限公司;

万能拉伸试验机:CMT6104 型,台湾高铁仪器检测有限公司。

1.3 试样制备

(1) PE/PP/EPDM 复合材料的制备:首先对 PE、PP 进行干燥,在真空下于 80℃干燥 8 h 以除去水分,EPDM 以 PE 和 PP 总质量的 10%,12.5%,15%,17.5%,20% 称取,其中 PE : PP 的质量比为 50 : 50。将 PE,PP 和 EPDM 在微型锥型双螺杆挤出机上在 180℃和 90 r/min 下挤出,将这些挤出物用微型注塑机注射成型为标准样条。通过改变 EPDM 的含量制备了 PE/PP/EPDM 复合材料,以备后续 EPDM 连续度的计算,选取本实验 EPDM 的最适含量。

(2) EPDM/BN 复合材料的制备:在使用前,将 BN 在真空下于 80℃干燥 8 h 以除去水分。EPDM 以 PE 和 PP 总质量的 15% 称取,其中 PE : PP 的质量比为 50 : 50。BN 以 PE 和 PP 总质量的 1%,3%,5%,7%,10% 称取,将 EPDM 和 BN 在微型锥型双螺杆挤出机上在 180℃和 90 r/min 下混合 10 min,通过改变 BN 含量制备 EPDM/BN 复合材料。

(3) PE/PP/EPDM/BN 复合材料的制备:首先对 PE、PP 进行干燥,在真空下于 80℃干燥 8 h 以除去水分,在微型锥型双螺杆挤出机上在 180℃和 90 r/min 下挤出,将这些挤出物用微型注塑机注射成型为标准样条,以备后续性能测试。

1.4 性能测试

(1) 接触角测试和扩散系数公式计算。

在复合材料中,各组分之间的界面张力可以通过测量各组分的接触角后通过公式计算得到。本实验中各组分的接触角采用悬滴法在室温下进行测量,所用测试样品 PP,PE,EPDM 是由偏光显微镜热台热压而成的轻薄圆片。通过扩散系数等公式计算,预测了 EPDM 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的分布情况。

(2) 连续度计算。

通过刻蚀掉复合材料的一相,计算刻蚀前后的质量,可以得到被刻蚀相在复合材料中的连续度。将 PE/PP/EPDM 复合材料制成边长为 2 mm 的正方体样品,浸泡在二甲苯中数天,直至样品恒重。通过连续度公式计算了 PE/PP/EPDM 复合材料中

EPDM 的连续度。

(3) SEM 观察。

使用 H800 场发射扫描式电子显微镜对不同样品的断裂表面进行形态研究。为了产生更好的对比度,将样品在液氮中脆断。通过二甲苯刻蚀样品表面半小时,以刻蚀掉样品表面的 EPDM。样品镀金后,于 20 kV 加速电压下观察其微观形貌。

(4) 热导率测试。

采用热导率测试仪测量复合材料的热导率,导热试样通过微型注塑机注塑成标准试样。测试结果取 3 个样品的平均值。

(5) 力学性能测试。

在拉伸样条室温下放置 24 h 后,测试试样为注塑出的哑铃型样条,在万能拉伸试验机上进行测试,拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 进行测试,测试结果取 5 个样条的平均值。

2 结果与讨论

2.1 接触角测试和扩散系数公式计算

单组分的界面张力需要测量接触角计算得到。通过接触角测试,可以得到单组分的极性张力和色散张力,分别用 γ^p 和 γ^d 表示。单组分的界面张力等于单组分的极性张力和色散张力的和。由 Fowkes 方程计算得到,方程如下:

$$\gamma = \gamma^p + \gamma^d \quad (1)$$

表 1 为单组分的界面张力,通过接触角测试和公式 (1) 计算可以直接得到。

表 1 PE、PP 和 EPDM 的界面张力

实验组分	γ^d	γ^p	γ
PP	54.5	0	54.5
PE	30.2	4.1	34.3
EPDM	42.38	0	42.38

通过计算单组分的界面张力可以得到组分间的界面张力^[9-12],计算公式主要有调和平均公式和几何平均公式两种,公式如下:

$$\gamma_{1-2} = \gamma_1 + \gamma_2 - 4 \left[\frac{\gamma_1^d \times \gamma_2^d}{\gamma_1^d + \gamma_2^d} + \frac{\gamma_1^p \times \gamma_2^p}{\gamma_1^p + \gamma_2^p} \right] \quad (2)$$

$$\gamma_{1-2} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2(\sqrt{\gamma_1^d \times \gamma_2^d} + \sqrt{\gamma_1^p \times \gamma_2^p}) \quad (3)$$

式中 γ_i 表示 i 组分的界面张力, γ^p 和 γ^d 分别表示单组分的极性张力和色散张力。其中公式 (2) 为调和平均公式常用于非极性体系,公式 (3) 为几何平均公式常用于极性体系,因而笔者采用调和平均公式计算两组分间的界面张力。

表 2 为组分间的界面张力。通过表 1 的数据和

公式 (2) 计算可以直接得到。

表 2 各组分间的界面张力

组分对	界面张力 (γ)
PP/PE	11.03
PE/EPDM	6.16
PP/EPDM	1.52

Nick Virgilio^[13] 提出了扩散系数的概念,通过计算两相间的界面张力,代入下列公式,可计算出扩散系数。如图 1 所示,通过比较三个扩散系数与 0 的大小关系,可以预测载体在相界面处的定位,从而找寻到合适的载体^[14]。

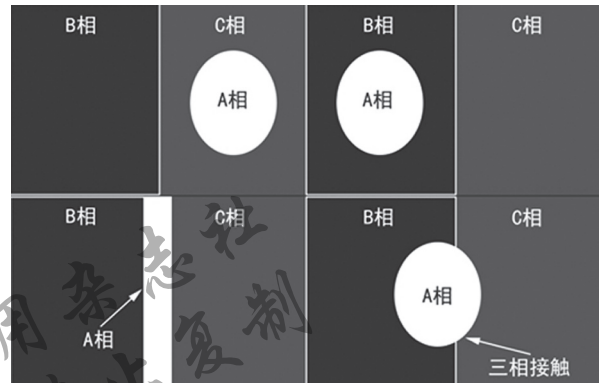


图 1 由扩散系数预测的由两个主要相位 B 和 C (白色和灰色) 和一个微小相位 A (黑色) 组成的三元系统的可能形貌

表 3 扩散系数计算公式

A 相的定位	条件
A 相定位在 C 相	$\lambda_{BAC} = \gamma_{BC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{AC}) < 0$
	$\lambda_{ABC} = \gamma_{AC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{BC}) < 0$
	$\lambda_{ACB} = \gamma_{AB} - (\gamma_{AC} + \gamma_{BC}) > 0$
A 相定位在 B 相	$\lambda_{BAC} = \gamma_{BC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{AC}) < 0$
	$\lambda_{ABC} = \gamma_{AC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{BC}) > 0$
	$\lambda_{ACB} = \gamma_{AB} - (\gamma_{AC} + \gamma_{BC}) < 0$
A 相定位在 B 相和 C 相界面处	$\lambda_{BAC} = \gamma_{BC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{AC}) > 0$
	$\lambda_{ABC} = \gamma_{AC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{BC}) < 0$
	$\lambda_{ACB} = \gamma_{AB} - (\gamma_{AC} + \gamma_{BC}) < 0$
A 相、B 相、C 相三相接触	$\lambda_{BAC} = \gamma_{BC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{AC}) < 0$
	$\lambda_{ABC} = \gamma_{AC} - (\gamma_{AB} + \gamma_{BC}) < 0$
	$\lambda_{ACB} = \gamma_{AB} - (\gamma_{AC} + \gamma_{BC}) < 0$

计算得知:

$$\lambda_{PE-EPDM-PP} > 0, \lambda_{EPDM-PE-PP} < 0, \lambda_{EPDM-PP-PE} < 0 \quad (4)$$

由扩散系数理论预测知, EPDM 将分布在 PE/PP/EPDM 复合材料共连续结构的相界面处。因而采用 EPDM 包裹 BN 的方法,通过 EPDM 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构相界面处的分布,实现 BN 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构相界面处的分布。

所以首先采用熔融共混法制备了 EPDM/BN 复合材料,然后以 EPDM/BN 复合材料为母料,通过熔融共混 EPDM/BN 复合材料与 PE, PP, 制备 PE/PP/EPDM/BN 复合材料。

2.2 连续度计算

通过刻蚀掉复合材料的一相,计算刻蚀前后的质量,可以得到被刻蚀相在复合材料中连续度。通过下列公式可以计算复合材料的连续度:

$$\text{连续度} = (W_{\text{刻蚀前}} - W_{\text{刻蚀后}}) / (W_{\text{刻蚀前}} \times C) \times 100\% \quad (5)$$

式中, $W_{\text{刻蚀前}}$ 和 $W_{\text{刻蚀后}}$ 分别代表样品刻蚀前后的质量。 C 是复合材料中刻蚀相的质量分数(在本实验中 C 是确定的)。

为研究 EPDM 的最佳含量,制备了 EPDM 含量为 PE 和 PP 总质量的 10%,12.5%,15%,17.5%,20% 的 PE/PP/EPDM 复合材料,其中 PE : PP 的质量比为 50 : 50。将 PE/PP/EPDM 复合材料制成边长为 2 mm 的正方体样品,浸泡在二甲苯中数天,直至样品恒重。通过公式 (5) 计算了 PE/PP/EPDM 复合材料中 EPDM 的连续度,数据如表 3 所示。添加 EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时,EPDM 连续度最高,所以在制备 PE/PP/EPDM/BN 复合材料中,EPDM 的质量采用为 PE 和 PP 总质量的 15%。

表 3 PE/PP/EPDM 材料中 EPDM 不同含量时的连续度

项目	EPDM 不同含量 / %				
	10	12.5	15	17.5	20
EPDM 连续度 / %	63.4	77.6	85.3	72.4	60.4

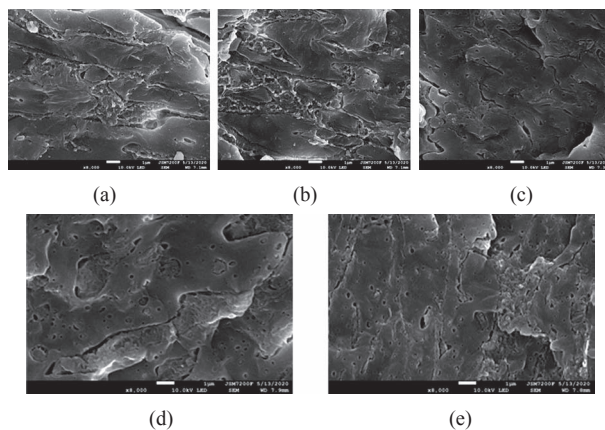
通过添加 EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时,EPDM 的连续度为 85.3%,通过 EPDM 为 15% 时的高连续度结合接触角测试表明 EPDM 分布在 PE/PP/EPDM 复合材料共连续结构的相界面处。

为研究 BN 的分布情况,将 PE/PP/EPDM/BN 复合材料制成边长为 2 mm 的正方体样品,浸泡在二甲苯中数天,直至样品恒重。当 EPDM 的质量为 PE 和 PP 总质量的 15%,BN 的质量为 PE 和 PP 总质量的 10% 时,通过连续度计算公式计算了 PE/PP/EPDM/BN 复合材料中 EPDM 和 BN 的连续度为 83.2%,表明 BN 大部分分布在 EPDM 中。

2.3 SEM 分析

图 2 为 PE/PP/EPDM/BN 复合材料在场发射 SEM 下,用二甲苯刻蚀样品表面 0.5 h 后观察到的图像。其中 PE/PP 的比例为 50 / 50,EPDM 的质量为 PE 和 PP 总质量的 15%,图 2a~图 2e 分别是 BN 质量为 PE 和 PP 总质量的 1%,3%,5%,7%,10% 所测的 SEM 图像。由 SEM 图分析可以清晰地看出 EPDM 的分布,EPDM 在样品的表面分布连续贯通,结合接触角测试和连续度计算表明,EPDM 分布在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构

的相界面处。由 a~e 图分析可知,改变 BN 的含量,对 EPDM 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料中的连续度影响不大。



BN 含量: a—1%; b—3%; c—5%; d—7%; e—10%

图 2 PE/PP/EPDM/BN 复合材料微观形貌

2.4 导热性能

图 3 为 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的导热性能。其中 PE/PP 的比例为 50 / 50,EPDM 的质量为 PE 和 PP 总质量的 15%,BN 的质量为 PE 和 PP 总质量的 1%,3%,5%,7%,10%。

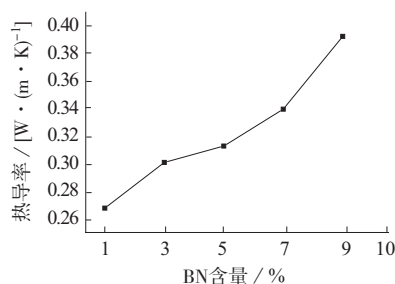


图 3 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的导热性能

由热导率测试知,PE/PP/EPDM/BN 复合材料的热导率随 BN 含量的提高而提高。PE/PP/EPDM/BN 复合材料热导率在 BN 含量为 10% 时,热导率最高,达到了 0.3925 W / (m · K),相对于 PE/PP 复合材料的热导率提高了 56.3%。原因是 PE 与 PP 的质量比为 50 : 50 时,PE/PP 复合材料会形成共连续结构^[8],结合接触角测试和连续度计算表明,由于在制备 PE/PP/EPDM/BN 复合材料时,EPDM 与 BN 先熔融共混,BN 大部分分布在 EPDM 中,而 EPDM 大部分分布在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构的相界面处,所以 BN 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构的相界面处形成了导热通路。

2.5 力学性能

图 4 为 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的拉伸

强度。其中 PE/PP 的比例为 50/50, EPDM 的质量为 PE 和 PP 总质量的 15%, BN 的质量为 PE 和 PP 总质量的 1%, 3%, 5%, 7%, 10%。

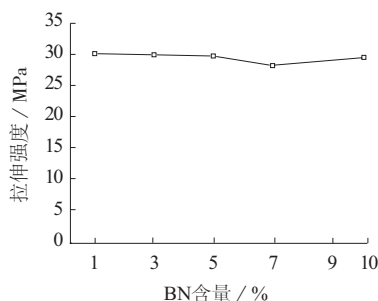


图4 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的拉伸强度

由力学性能测试表明,随着 BN 含量的增加,对 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的拉伸强度影响不大。这是由于通过二步法制备的 PE/PP/EPDM/BN 复合材料中, BN 大部分分布在 EPDM 相中,而 EPDM 大部分分布在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构的相界面处。当受到外力的作用时,材料倾向于在两相界面处断裂,由于 EPDM 对 BN 的包裹方法,位于界面处的 BN 承担了大部分的应力,减小了 EPDM 对拉伸强度的影响,故对整个体系影响不大。

3 结论

(1) 通过 SEM 分析表明,当 EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时, EPDM 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料分布连续贯通。

(2) 通过连续度计算结果得出, EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时, EPDM 的连续度为 85.3%; EPDM 的质量为 PE 和 PP 总质量的 15%, BN 的质量为 PE 和 PP 总质量的 10% 时, EPDM 和 BN 的连续度为 83.2%。

(3) 通过热导率测试表明,随着 BN 含量增加, PE/PP/EPDM/BN 复合材料导热性能逐渐提高。

(4) 当 EPDM 为 PE 和 PP 总质量的 15% 时, EPDM 的连续度最高;通过 EPDM 包裹 BN 的方法可以使 BN 在 PE/PP/EPDM/BN 复合材料共连续结构的相界面处分布,来使 BN 形成导热通路,以提高 PE/PP/EPDM/BN 复合材料的导热性能。

参考文献

- [1] Siu N, Leung. Thermally conductive polymer composites and nanocomposites: Processing-structure-property relationships[J]. *Composites*, 2018, 150B(10): 78–92.
- [2] 杜伯学,孔晓晓,肖萌,等. 高导热聚合物基复合材料研究进展[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(14): 3 149–3 159.
- [3] Yu Suzhu, Hing Peter, Hu Xiao. Thermal conductivity of polystyrene-aluminum nitride composite[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2002, 33(2): 289–292.
- [4] 陈金梅. 尼龙 6 导热复合材料制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [5] Agari Y, Ueda A, Nagai S. Thermal conductivities of composites in several types of dispersion systems[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 42(6): 1 665–1 669.
- [6] Jiang Kun, Yu Feilong, Bai Hongwei, et al. Alternating multilayer structure of polyethylene / polypropylene blends obtained through injection molding[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124(6): 4 452–4 456.
- [7] 石倩. 氮化硼 / 环氧树脂导热复合材料的制备与性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [8] Shi Qian. Preparation and properties of boron nitride / epoxy resin thermal conductive composites[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [9] Tan Lirong, Gao Yongjuan, Huang Shilin, et al. Factors influencing the resistivity-temperature behavior of carbon black filled isotactic polypropylene / high density polyethylene composites[J]. *Polymer Bulletin*, 2014, 71(6): 1 403–1 419.
- [10] Xu Ling, Zhang Boyuan, Xiong Zhuoyue, et al. Preparation of conductive polyphenylene sulfide / polyamide 6 / multiwalled carbon nanotube composites using the slow migration rate of multiwalled carbon nanotubes from polyphenylene sulfide to polyamide 6[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015. doi: 10.1002/app.42353.
- [11] Fenouillot F, Cassagnau P, Majesté J C. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends[J]. *Polymer*, 2009, 50(6): 1 333–1 350.
- [12] Nikoo Ghahramani, Seyed Armin Seyed Esfahani, Milad Mehranpour, et al. The effect of filler localization on morphology and thermal conductivity of the polyamide / cyclic olefin copolymer blends filled with boron nitride[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(23): 16 146–16 159.
- [13] Lin Chaoying, Zuo Min, Li Huihui, et al. Morphology evolution, conductive and viscoelastic behaviors of chemically reduced graphene oxide filled poly(methyl methacrylate) / poly(styrene-co-acrylonitrile) nanocomposites during annealing[J]. *Polymer Science*, 2015, 33(8): 1 162–1 175.
- [14] Virgilio N, Marc-Aurele C, Favis B D. Novel self-assembling close-packed droplet array at the interface in ternary polymer blends[J]. *Macromolecules*, 2009, 42(9): 3 405–3 416.
- [15] Cohen E, Zonder L, Ophir A, et al. Hierarchical structures composed of confined carbon nanotubes in cocontinuous ternary polymer blends[J]. *Macromolecules*, 2013, 46(5): 1 851–1 859.
- [16] Du Boxue, Kong Xiaoxiao, Xiao Meng, et al. Advances in thermal performance of polymer-based composites[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(14): 3 149–3 159.