

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.08.008

高热导率聚丙烯/石墨复合材料的制备与性能

吴佳玮¹, 吉鑫雨¹, 杨金帝¹, 戚嵘嵘¹, 王新威², 王萍², 吴向阳²

(1. 上海交通大学化学化工学院, 上海 200240; 2. 上海化工研究院聚烯烃催化技术与高性能材料国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为了提高聚丙烯 (PP) 的导热性能, 扩大其使用范围, 采用价格低廉的商用石墨对 PP 进行改性, 利用转矩流变仪制备了 PP/石墨导热复合材料。研究了粒径为 2 μm 和 20 μm 的石墨及其复配对复合材料热导率及力学性能的影响。结果表明, 复合材料的热导率随着石墨用量的增加而显著增大, 20 μm 石墨填充的复合材料热导率高于 2 μm 石墨填充的复合材料; 由于石墨的各向异性, 层内热导率远高于层间热导率; 将两种粒径的石墨复配, 固定石墨总质量分数为 40%, 当 2 μm 石墨与 20 μm 石墨质量比为 1:5 时, 复合材料层间和层内热导率达到最大, 分别为 1.125 W/(m·K) 和 2.897 W/(m·K), 比相同用量下单一 2 μm 石墨填充 PP 分别提高了 121% 和 61%, 比单一 20 μm 石墨填充 PP 分别提高了 3.6% 和 20%。随石墨用量增加, 单一粒径石墨填充的复合材料拉伸强度和弯曲强度呈现先减小后增大的趋势, 随复配填料中 20 μm 石墨用量增加, 复配填料填充复合材料的力学性能呈下降趋势, 但弯曲强度变化不大, 拉伸强度也在 10 MPa 以上。

关键词: 聚丙烯; 石墨; 复合材料; 粒径; 复配; 热导率; 力学性能

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)08-0036-05

Preparation and Properties of Polypropylene/Graphite Composites with High Thermal Conductivity

Wu Jiawei¹, Ji Xinyu¹, Yang Jindi¹, Qi Rongrong¹, Wang Xinwei², Wang Ping², Wu Xiangyang²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Catalysis of Polyolefin, Shanghai Chemical Research Institute, Shanghai 200062, China)

Abstract: In order to improve the thermal conductivity of polypropylene (PP) and expand its applications, low cost commercial graphite was used to modify PP and the PP/graphite composites were prepared by using Haake torque rheometer. The effects of graphite fillers with particle size of 2 μm and 20 μm and their compound on the thermal conductivity and mechanical properties were researched. The results show that increasing graphite content can apparently increase the thermal conductivity of the composites and the composites with 20 μm graphite have a higher thermal conductivity. Due to anisotropy of graphite, the in-plane thermal conductivity is apparently higher than the through-plane thermal conductivity. Additionally, mixing the two graphite fillers, controlling the total mass fraction of the fillers to 40%, when the mass ratio of the 2 μm graphite and 20 μm graphite is 1:5, the through-plane and in-plane thermal conductivity value reach peak and they are 1.125 W/(m·K) and 2.897 W/(m·K), respectively, which increases by 121%, 61% than the composite filled with 2 μm graphite and by 3.6%, 20% than the composite filled with 20 μm graphite under same contents. When the graphite content increases, the tensile and bending strength of the composites filled by graphite with single particle size tend to decline firstly and then increase, and with the increase of the content of 20 μm graphite in the two graphite fillers compound, the mechanical properties of the composites decrease, but the bending strength decreases slightly and the tensile strength is also above 10 MPa.

Keywords: polypropylene; graphite; composite; particle size; compound; thermal conductivity; mechanical property

高分子材料由于其优异的耐化学药品腐蚀、耐疲劳、易加工等性能受到了人们广泛的关注^[1-2]。然而, 大多数聚合物热导率较低, 导热性能不好, 限制了其在冷却系统、热交换器和其它热领域的应用^[3]。所以, 近年来发展具有优良热导率的新型功能高分子材料替代金属散热元件已成为人们关注的热点。目前, 主要有 3 种方法来提高聚合物材料的导热能

力: ①开发自身具有高热导率的本征型聚合物材料, 如聚苯胺和聚吡咯等, 其可通过电子导热基质导热,

联系人: 戚嵘嵘, 副教授, 主要从事聚烯烃和工程塑料的高性能化和功能化研究、聚合物与无机纳米复合材料在光电领域的应用研究、高性能泡沫塑料的开发与应用以及环境可再生及生物降解材料的应用研究

收稿日期: 2016-05-25

这类材料的优点是聚合物本身在具有优良的导热性同时也具有良好的导电性能,但加工困难,只能在某些特殊场合应用;②通过研究新型的聚合物成型加工工艺及设备来制备具有高取向聚合物从而得到优异的导热性能^[4],但是该方法比较复杂,对设备要求高,可以使用的高分子材料种类少,故不适用于大规模的工业应用;③在聚合物中填充具有高热导率的填料,如 Cu, Al₂O₃, 石墨和碳纤维等,以达到改善聚合物导热性能的目的^[5-9]。这种方法成本低廉且容易加工成型,适合工业化生产,如今已成为获得高分子导热材料的重要方法。

聚丙烯 (PP) 是一种结晶度高且结构规整的通用塑料,力学性能优良,化学稳定性好,故而在日常生活中被广泛应用。但是 PP 热导率低,只有 0.2 W/(m·K) 左右,限制了其在换热器和冷凝器等化工设备上的应用^[10-12]。因此,开发良好导热性能的 PP 复合材料具有实际应用价值。导热填料中石墨是一种价格低廉且应用广泛的碳基填料,具有良好的导热导电性及化学稳定性^[13],可以作为改善 PP 导热性能的填料。为了提高 PP 的热导率且在不增加成本的情况下扩大其应用范围,笔者采用价格低廉的商用石墨对 PP 进行改性,制备了具有高热导率的 PP/石墨复合材料,研究了两种不同粒径的石墨及它们的复配比例对复合材料两个方向热导率的影响,同时对复合材料的力学性能和微观形貌也进行了研究。

1 实验部分

1.1 实验原料

PP: AW191, 熔体流动速率为 10 g/10 min, 密度 0.91 g/cm³, 聚烯烃材料(新加坡)有限公司;

石墨: P8000, 密度 2.0 g/cm³, 粒径分别为 2 μm 和 20 μm, 东莞市捷诚石墨制品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

转矩流变仪: HAAKE PolyLab OS 型, 德国热电卡尔斯鲁赫有限公司;

平板硫化机: XLB-D 型, 湖州顺利橡胶机械有限公司;

导热仪: LFA 467 Nanoflash 型, 德国 Netzsch 公司;

万能电子拉力机: Instron4465 型, 美国 Instron 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-2150 型, 日本 Hitachi 公司。

1.3 试样制备

将 PP 分别和粒径为 2, 20 μm 的石墨按照一定比例加入转矩流变仪中, 温度为 190℃, 转速为 60 r/min, 混合 20 min 后将得到的混合料于 190℃ 下模压成型, 再将压得的平板裁切成标准试样。将 2, 20 μm 的石墨按照质量比 3:1, 1:1, 1:3, 1:5 复配, 两种石墨的总质量分数为 40%, 按照相同工艺制备两种石墨复配的导热复合材料试样。

1.4 测试与表征

导热性能测试: 将试样制成直径为 12.7 μm、厚度为 1 μm 的圆形平板, 然后依据 ASTM E1461-2007 在导热仪上测得试样热扩散系数 α , 依据 ASTM E1269-2005 由差示扫描量热法测得试样的比热容 C_p , 依据 ASTM D792-2000 测得试样的密度 ρ , 最后由式 (1) 计算得到试样的热导率 λ 。考虑石墨在加工过程中的取向, 研究了复合材料层内和层间两个方向的热导率。

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho \quad (1)$$

力学性能测试: 拉伸性能依据 ASTM D638-2014 测试, 拉伸速度为 30 mm/min; 弯曲性能依据 ASTM D790-2003 测试, 试验速度为 2 mm/min。

SEM 观察: 将不同配方的试样在液氮中冷却后淬断, 对断面进行喷金处理后观察拍照。

2 结果与讨论

2.1 导热性能分析

由于石墨为片层结构, 考虑到石墨的各向异性, 在加工的过程中, 石墨会发生取向, 因此制备得到的复合材料在不同方向的热导率并不相同, 为此, 研究了复合材料两个方向的热导率即层间热导率和层内热导率。图 1 为不同粒径石墨填充 PP 复合材料的层间热导率和层内热导率。

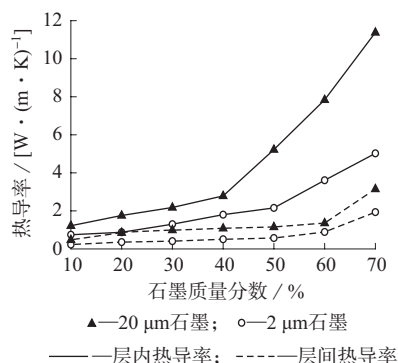


图 1 不同粒径石墨填充 PP 复合材料的层间热导率和层内热导率

由图 1 可以看出, 当石墨的用量较少时, 两种 PP/石墨复合材料的热导率增加幅度较小。纯 PP

的热导率仅为 $0.203\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,当石墨质量分数为 10% 时, $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充的 PP 复合材料的层间热导率分别为 $0.23, 0.48\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,层内热导率分别为 $0.75, 1.22\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。随着石墨用量的继续增加,两种 PP/石墨复合材料的层内和层间热导率都有显著的提升。当石墨质量分数为 70% 时, $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充的 PP 复合材料层间热导率为 $1.93\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,层内热导率为 $5.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,分别为纯 PP 的 9.5 倍和 24.8 倍; $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充 PP 复合材料的层间热导率为 $3.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,层内热导率为 $11.38\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,分别为纯 PP 的 15.5 倍和 56 倍,表明高填充石墨有利于 PP 热导率的提高。分析其原因可能是,当石墨用量较低时,其在 PP 中呈孤立的分散状态,形成的导热通路并不完善,传递的热量有限,因此热导率提高并不明显。随着石墨用量的增大,填料粒子之间的相互接触机会大大增多,石墨在 PP 中不再呈现被孤立的分散形态,彼此之间形成比较完善的导热通路。此时石墨填料传递热量的能力明显提高,宏观上表现为 PP/石墨复合材料的热导率大幅度提升。

从图 1 还可以看出, PP/石墨复合材料的层内热导率远高于层间热导率。以加入 $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨的复合材料为例,当 $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨质量分数为 40% 时,层间热导率为 $0.508\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,层内热导率可达到 $1.80\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是层间热导率的 3.5 倍。这是由于石墨的各向异性导致其在加工的过程中沿层内方向取向,因此,导热填料石墨在层内方向更容易相互紧密联系,形成更密集的导热通路,这样显著提高了复合材料的导热性能。

进一步由图 1 还可以看出,填料的粒径对复合材料的热导率存在明显的影响,在相同石墨用量下,大粒径石墨填充的复合材料的层间和层内热导率均明显高于小粒径石墨填充的复合材料。这可能是因为,小粒径石墨与大粒径石墨相比,增加了与 PP 相互接触的界面,界面的增多使得热阻增大,从而使热导率降低,因而 $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充 PP 复合材料的热导性能优于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充的 PP 复合材料。

尽管如图 1 所示,当石墨的质量分数超过 40% 时,复合材料的热导率随着石墨用量的增加明显提高,但是,石墨用量过高时,出现了加工困难、石墨难于加入等问题。因此,为了便于加工,石墨的质量分数不宜超过 40%。但是如前所述,石墨的质量分数低于 40% 时,热导率提高幅度不明显。为了解决这一问题,考虑在控制石墨用量的前提下,将不同粒径

的石墨粒子复合,这样小粒径的石墨可能会占据大粒径石墨之间的空隙,有效减少了复合材料内部的空隙,增大粒子之间相互接触的几率,有利于完善的导热通路的形成。为此,将石墨的总质量分数定为 40%,改变 $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨的质量比,得到的复合材料的层间和层内热导率如图 2 所示。

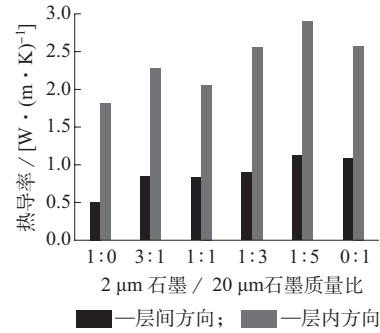


图 2 不同粒径石墨质量比的 PP/石墨复合材料层间和层内热导率

由图 2 可以看出,对比不同粒径石墨复合填料和单一石墨填料的热导率,当 $2\text{ }\mu\text{m}$ 石墨和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨质量比为 1:5 时,不同粒径的填料粒子达到最佳的堆砌状态,宏观上表现为层间和层内热导率达到最大,分别为 $1.125\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $2.897\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。这一数值相比相同用量的单一 $2\text{ }\mu\text{m}$ 粒径石墨填充 PP 的层间和层内热导率分别提升了 121% 和 61%,相比相同用量的单一 $20\text{ }\mu\text{m}$ 粒径石墨填充 PP 分别提升了 3.6% 和 20%,分别为纯 PP 的 5.5 倍和 14.3 倍。

2.2 力学性能分析

表 1 为不同粒径石墨填充 PP 复合材料的拉伸强度和弯曲强度。

表 1 不同粒径石墨填充 PP 复合材料的拉伸和弯曲强度 MPa

石墨质量 分数 / %	拉伸强度		弯曲强度	
	2 μm 石墨	20 μm 石墨	2 μm 石墨	20 μm 石墨
0	15.84	15.84	32.05	32.05
10	13.96	14.65	22.45	22.25
20	12.17	13.05	21.14	21.07
30	10.48	10.31	19.28	20.05
40	11.37	10.80	20.89	20.48
50	17.20	13.10	24.00	23.80
60	17.58	16.60	30.80	24.30
70	17.55	19.41	38.28	25.75

从表 1 看出,纯 PP 的拉伸强度为 15.84 MPa ,随着不同粒径石墨填料的加入,拉伸强度出现下降的趋势,当石墨质量分数为 30% 时, $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 石墨填充的 PP 复合材料拉伸强度均达到最小,分别为 10.48 MPa 和 10.31 MPa 。继续增加石墨填料用量,拉伸强度出现上升的趋势。可以发现,当石墨质量分数超过 50% 后,两种复合材料的

拉伸强度均超过纯 PP。综上所述,在 PP 中加入石墨,材料的拉伸强度有所降低,仅当石墨用量很高时,拉伸强度才出现小幅度提高。分析其原因,当石墨用量较少时,石墨在 PP 中可能仅起到润滑作用,使 PP 分子链间相互作用减弱,从而使拉伸强度降低。而当其用量过大时,石墨在复合材料中取代 PP 成为连续相,在拉伸过程中承受了大部分的应力,故复合材料承受应力的能力增加,拉伸强度有所提高。

观察表 1 中复合材料的弯曲强度随石墨用量的变化情况,发现随着石墨用量的增加,复合材料弯曲强度也呈现先减小后增大的趋势,当石墨质量分数为 30% 时,2 μm 和 20 μm 石墨复合材料的弯曲强度分别为 19.28, 20.05 MPa, 达到最小值。继续增大石墨用量,弯曲强度持续上升。弯曲强度的这种变化趋势与拉伸强度的变化趋势相似。

另外,可以发现,当石墨质量分数不高于 40% 时,两种粒径石墨填充的 PP 复合材料拉伸和弯曲强度相差不大。当石墨质量分数高于 40% 后,2 μm 石墨填充的复合材料弯曲强度高于 20 μm 石墨填充的复合材料,且当石墨质量分数由 40% 增加到 50% 时,其拉伸强度有一个明显的提升,但此后随着石墨用量增加,拉伸强度的变化很小;而 20 μm 石墨填充的复合材料拉伸强度在石墨质量分数大于 40% 后随着其用量增加逐渐增大,最终在石墨质量分数为 70% 时超过了 2 μm 石墨填充的复合材料。

图 3 为石墨总质量分数为 40% 时,2 μm 石墨和 20 μm 石墨的质量比对 PP/石墨复合材料力学性能的影响。

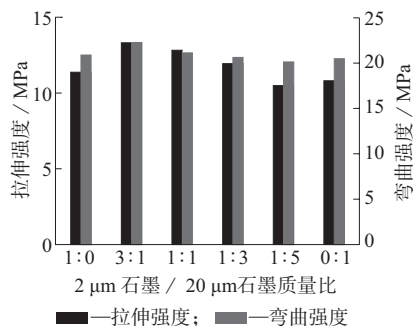


图 3 不同粒径石墨质量比的 PP/石墨复合材料的拉伸和弯曲强度

从图 3 可以看出,当 2 μm 石墨和 20 μm 石墨的质量比为 3:1 时,复合材料的拉伸强度为 13.31 MPa,相比于只加入 2 μm 或 20 μm 石墨的复合材料均有所提升。增大 20 μm 石墨的用量,拉伸强度不断降低。当两者质量比达到 1:5 时,拉伸强度达到最小值 10.48 MPa。复合材料的弯曲强

度随着 2 μm 和 20 μm 石墨质量比的变化也呈现相同的变化趋势,但可以发现,弯曲强度基本维持在 20~22.5 MPa 内,变化幅度较小。

2.3 SEM 观察

以 2 μm 石墨填料的复合材料为例,研究了石墨质量分数为 10%, 40% 和 70% 的 PP 基复合材料的微观形貌 SEM 照片,结果如图 4 所示。从图 4 可以观察到,当石墨用量较低时,石墨粒子在 PP 基体中的分散比较均匀,但多数石墨粒子被 PP 基体树脂包围,呈孤立分散状态,彼此之间难以接触,无法形成导热通路,表面热阻很大。当石墨用量较高时,石墨粒子相隔很近,之间接触的机会更多,从而形成更加完善的导热网链。这一结果和热导率的结果相一致。

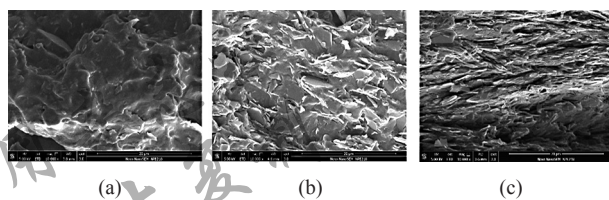


图 4 不同石墨用量下 2 μm 石墨填充 PP 复合材料的 SEM 照片

对石墨质量分数为 40%, 不同粒径石墨填充 PP 复合材料的形貌进行了 SEM 观察,如图 5 所示。由图 5 可以看出,在相同的用量下,小粒径石墨在 PP 基体中呈现孤立的分散,石墨与 PP 的界面增多,石墨粒子之间彼此难以接触,形成的导热通路较少,而大粒径石墨由于尺寸较大,与 PP 基体的界面较少,彼此之间更容易相互接触,因此有利于导热通路的形成,使材料导热能力更强。

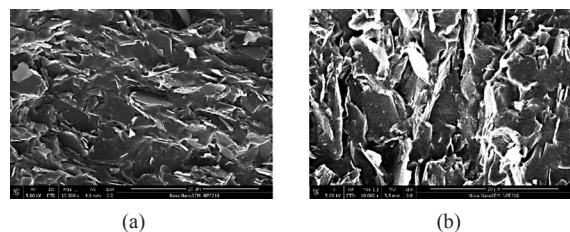
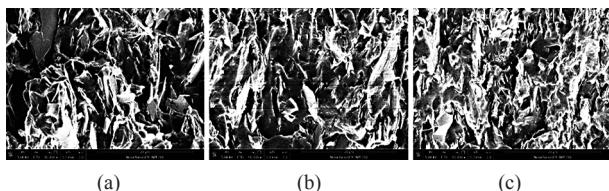


图 5 不同粒径石墨填充 PP 复合材料的 SEM 照片

图 6 示出 2 μm 石墨和 20 μm 石墨质量比分别为 1:1, 1:3, 1:5 时 PP 基复合材料的 SEM 照片。从图 6 可以看出,不同粒径的石墨复合加入 PP 后,粒径较小的石墨堆积分布在粒径较大的石墨之间的空隙,增加了导热填料之间的相互接触,使得大粒径和小粒径石墨之间相互紧密联系,更易于导热通路的形成,因此有效提升了复合材料的导热性能。



2 μm 石墨与 20 μm 石墨质量比: a—1:1; b—1:3; c—1:5

图6 不同粒径石墨质量比的 PP/石墨复合材料 SEM 照片

3 结论

(1) 随着石墨用量增加,复合材料的热导率明显增加。20 μm 石墨填充的复合材料热导率高于 2 μm 石墨填充的复合材料。不同粒径的石墨填料复配填充更有助于 PP 复合材料热导率的提高,当 2 μm 石墨和 20 μm 石墨质量比达到 1:5 时(石墨总质量分数为 40%),复合材料的层间和层内热导率达到最大,分别为 1.125 W/(m·K) 和 2.897 W/(m·K),比相同用量的单一 2 μm 石墨填充 PP 的层间和层内热导率分别提升了 121% 和 61%,比相同用量的单一 20 μm 石墨填充 PP 分别提升了 3.6% 和 20%。

(2) 由于石墨的各向异性,所有 PP/石墨复合材料的层内导热率均远高于层间导热率。

(3) 加入单一粒径石墨填料,拉伸强度和弯曲强度均先下降后上升,在石墨质量分数为 30% 时达到最小。不同粒径的石墨填料复配后,随着其中 20 μm 石墨用量的增加,复合材料的拉伸强度和弯曲强度均呈下降趋势,但弯曲强度变化不大,拉伸强度也在 10 MPa 以上。

参考文献

- [1] Xu Huagen, Zhou Haidi, Chen Xiaodong. High thermal conductive composites based on flake graphite filled in a partial compatible polyamide 6 / polypropylene[J]. Polym Sci Ser A, 2015, 57(5):644–655.
- [2] Zhou Shengtai, Lei Yanzhou, Zou Huawei. High thermally conducting composites obtained via in situ exfoliation process of expandable graphite filled polyamide 6[J]. Polymer Composites, 2013, 34(11):1816–1823.
- [3] 范伟,冯刚,赵加伟. 导热高分子复合材料的研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(12):101–104.
Fan Wei, Feng Gang, Zhao Jiawei. Research and application development of thermal conductivity polymer composites[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(12):101–104.
- [4] 刘汉. 膨胀石墨 / 聚丙烯导热高分子复合材料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Liu Han. Study on exfoliated graphite / polypropylene thermal conductive polymer composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 刘科科,汪涛,蔚永强,等. 高分子复合材料用导热填料研究进展[J]. 塑料工业, 2013, 41(4):6–9, 32.
Liu Keke, Wang Tao, Wei Yongqiang, et al. Research progress of thermal conductive fillers for polymer composites[J]. Plastics Industry, 2013, 41(4):6–9, 32.
- [6] 郭赫楠,温变英. 填充型导热塑料研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(9):106–110.
Guo Henan, Wen Bianying. Progress on research and application for filled thermal conductive polymeric composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):106–110.
- [7] 周文英,王子君,董丽娜,等. 聚合物 / BN 导热复合材料研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2015, 32(2):80–84.
Zhou Wenying, Wang Zijun, Dong Lina, et al. Research progress in polymer / BN thermal conductive composite[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2015, 32(2):80–84.
- [8] 睢雪珍,周文英,董丽娜,等. 氮化铝 / 聚合物基导热复合材料研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2015, 27(6):53–56.
Sui Xuezhen, Zhou Wenying, Dong Lina, et al. Study progress on thermal conductive AlN / polymer composites[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2015, 27(6):53–56.
- [9] 洪玉琢,朱健,冯正明,等. PBT / CF 导热复合材料的制备与研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4):92–97.
Hong Yuzhuo, Zhu Jian, Feng Zhengming, et al. Preparation and research of thermally conductive PBT / CF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):92–97.
- [10] 杜思莹,杜遥雪,付一政,等. PP / 石墨 / Al_2O_3 导热复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(11):17–22.
Du Siying, Du Yaoyue, Fu Yizheng, et al. Preparation and properties of PP / Graphite / Al_2O_3 thermal conductive composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(11):17–22.
- [11] 汪文,丁宏亮,张子宽,等. 石墨烯微片 / 聚丙烯导热复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6):14–20.
Wang Wen, Ding Hongliang, Zhang Zikuan, et al. Preparation and properties of graphene nanoplatelets / PP thermal conductive composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6):14–20.
- [12] 徐华根,彭新涛,周军杰,等. 鳞片石墨填充聚酰胺 / 聚丙烯导热复合材料的研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(9):1–6.
Xu Huagen, Peng Xintao, Zhou Junjie, et al. Research of thermally conductive composites based on flake graphite filled in polyamide 6 / polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(9):1–6.
- [13] 杜思莹,杜遥雪,徐百平,等. 同向非对称双螺杆混合石墨增强导热高分子材料性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(7):86–91.
Du Siying, Du Yaoyue, Xu Baiping, et al. Properties of thermally conductive polymers reinforced with graphite mixed in a co-rotating non-symmetric twin-screw[J]. China Plastics, 2015, 29(7):86–91.