

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.026

润滑剂对短切玻璃纤维及其增强 PBT 性能的影响

章建忠, 许升, 樊家澍, 费振宇, 黄建, 赵星宇, 钱权洲, 张萍

(巨石集团有限公司产品研发中心, 浙江桐乡 314500)

摘要: 为了研究浸润剂中润滑剂对短切玻璃纤维 (GF) 生产过程与其增强热塑性树脂性能的影响, 在 GF 增强聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 中常规短切 GF 534A 浸润剂基础上, 通过对浸润剂中的润滑剂种类以及含量进行优化, 对比研究了含有四种不同润滑剂的浸润剂体系对 534A 短切 GF 的生产顺畅性、产品基本物性以及 GF 增强 PBT 的力学性能的影响。通过挤出注塑制成 GF 增强 PBT 的复合材料 (PBT/GF), 对复合材料的熔体流动速率、冲击断面形貌以及力学性能进行了表征与研究。结果表明: 润滑剂的加入可以有效提高短切 GF 产品的流动性, 减少产品的毛羽量; 使用少量润滑剂处理的 GF 在增强 PBT 时对复合材料的熔体流动性不会产生明显影响, 但反应型的润滑剂可能会降低复合熔体的黏度; 利用润滑剂处理的 GF 增强 PBT 时可以提高常规复合材料的冲击性能。

关键词: 玻璃纤维; 浸润剂; 润滑剂; 聚对苯二甲酸丁二酯; 复合材料

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0154-05

Study of Lubricant on the Properties of Chopped Glass Fiber and its Reinforced PBT Composites

Zhang Jianzhong, Xu Sheng, Fan Jiashu, Fei Zhenyu, Huang Jian, Zhao Xingyu, Qian Quanzhou, Zhang Ping

(Product Research Center, Jushi Group Co., Ltd., Tongxiang 314500, China)

Abstract : In order to study the influence of lubricants in glass fiber's sizing on the production process of chopped glass fibers (GF) and the properties of their reinforced thermoplastic resins, the effects of four sizing systems containing different lubricants on the production smoothness and basic properties of chopped strands and the mechanical properties of glass fiber reinforced polybutylene terephthalate (PBT/GF) were investigated on the base of conventional chopped GF534A sizing of GF reinforced PBT. PBT/GF composites were prepared by extrusion and injection molding, and the melting index, impact fracture's section morphology and mechanical properties of the composites were characterized. The results show that the introduction of lubricants in sizing can effectively improve the fluidity and reduce the fuzz of chopped strands. GF treated with small amount of lubricants have no obvious effect on the melt flowability of the PBT/GF composites, but the reactive lubricant may reduce the viscosity of the composite melt. The impact properties of composites can be improved by using lubricant treated glass fiber reinforced PBT.

Keywords : glass fiber ; sizing ; lubricant ; polybutylene terephthalate ; composite

聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 是一类典型的结晶型热塑性工程塑料, 具有优异的耐候性、耐疲劳性、自润滑性、电绝缘性以及低吸湿性^[1-2]。然而纯 PBT 树脂本身力学性能与耐热性较低, 结晶速率较快导致成型稳定性较差, 从而限制了其广泛应用^[3]。为了解决以上问题, 通常使用玻璃纤维 (GF) 增强 PBT, 所制备的复合材料力学性能、耐热性显著提升, 且制品尺寸稳定性大大提高^[4-6]。增强 PBT 用

GF 主要有热塑性树脂用短切 GF 与长 GF^[7], 其中短切 GF 以巨石集团有限公司的 534A 为典型代表, 该产品适用于挤出注塑工艺, 制品力学性能高, 广泛应用于汽车行业、电子电器等领域^[8]。

对于 GF 增强树脂复合材料, GF 与树脂的界面结合直接影响复合材料的力学性能, 这种界面结合取决于 GF 的表面处理剂—浸润剂。浸润剂是指在 GF 生产过程中涂覆在 GF 表面的复合涂层, 利

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2021M691363)

通信作者: 许升, 博士, 产品研发工程师, 主要研究方向为功能性纤维 / 树脂复合材料

收稿日期: 2022-04-06

引用格式: 章建忠, 许升, 樊家澍, 等. 润滑剂对短切玻璃纤维及其增强 PBT 性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):154-158.

Zhang Jianzhong, Xu Sheng, Fan Jiashu, et al. Effect of lubricant on the properties of chopped glass fiber and its reinforced PBT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):154-158.

用浸润剂处理的 GF 不仅具有一定的硬挺度和集束性,还能有效提高 GF 与基体树脂的界面相容性,从而提高复合材料的力学性能^[9-11]。浸润剂组成主要包括成膜剂、偶联剂、润滑剂与其他功能性助剂如抗静电剂、pH 调节剂等,其中润滑剂是一种重要的组分,润滑剂可以有效减少 GF 原丝在生产过程的摩擦力,防止纤维损伤,并使成品 GF 保持滑爽,减少毛丝^[12]。由于 GF 表面为阴离子型,目前常用的润滑剂主要有非离子型和阳离子型润滑剂,非离子型润滑剂主要包括脂肪酸酯类、酰胺类,常见的阳离子型润滑剂主要包括季胺盐、咪唑啉类^[13]。目前国内大多数化工原料与 GF 生产厂家对成膜剂、偶联剂产品的研究应用做了大量工作,并取得了显著成果^[14]。但对于 GF 用润滑剂的研发与应用仍研究尚浅,因此研究润滑剂对 GF 产品的性能以及 GF 增强树脂复合材料的影响具有重要意义。

基于此,笔者在增强 PBT 用常规短切 GF 534A 浸润剂配方的基础上,研究添加四种不同种类的润滑剂对短切 GF 生产及性能的影响,旨在通过对比研究以提高润滑剂与 GF 浸润剂的配伍性,从而解决短切 GF 生产与使用中出现的各种问题,为开发生产稳定、使用顺畅、性能优异的 GF 及其复合材料提供思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

润滑剂 A: 硬脂酸酰胺润滑剂,化学纯,广州正浩新材料有限公司;

润滑剂 B: 苯甲基硅油润滑剂,化学纯,美国道康宁公司;

润滑剂 C: PP 蜡乳液,化学纯,南京天诗新材料科技有限公司;

润滑剂 D: 脂肪醇润滑剂,化学纯,上海麦克林生化科技有限公司;

GF 短切原丝: ECS13-03-534A,巨石集团有限公司;

PBT 料粒: GX112,中国石化仪征化纤有限公司。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机: $\Phi=35$, $L/D=40$,科倍隆(南京)机械有限公司;

注塑机: S-2000i100A 型,日本 FANUC 公司;

万能材料试验机: Z050 型,德国 Zwick 公司;

冲击试验机: 6956.000 型,意大利 CEAST 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400N 型,日本日立公司;

熔体流动速率 (MFR) 仪: RL-Z18 型,上海思尔达科学仪器有限公司。

1.3 短切 GF 的制备

短切 GF 的生产制备过程如下: 使用 534A 浸润剂作为基础配方,向浸润剂中分别添加一定比例的不同润滑剂,不同浸润剂配方所使用的润滑剂种类及含量(质量分数)见表 1,通过拉丝、短切、烘制,最终得到单纤维直径为 $13\ \mu\text{m}$,短切长度为 3 mm 的短切 GF 产品,样品名分别标记为 534A-1, 534A-2, 534A-3, 534A-4, 534A-5。

表 1 不同短切 GF 浸润剂所选用的润滑剂种类与含量 %

样品名称	534A-1	534A-2	534A-3	534A-4	534A-5
润滑剂 A	0.5	/	/	/	/
润滑剂 B	/	0.5	/	/	/
润滑剂 C	/	/	0.5	/	/
润滑剂 D	/	/	/	0.5	/
润滑剂 E	/	/	/	/	1.0

1.4 PBT/GF 复合材料的制备

将 PBT 料粒与占复合材料质量分数为 30% 的 GF 由双螺杆挤出机混合挤出,经过牵引、冷却、干燥、切粒等过程制备 GF 增强 PBT 复合料粒 PBT/GF,所得料粒通过注塑成型制成 ISO 标准拉伸、弯曲和冲击样条。使用不同润滑剂处理的短切 GF 534A-1, 534A-2, 534A-3, 534A-4, 534A-5 增强 PBT 所得复合材料分别标记为 Com-1, Com-2, Com-3, Com-4, Com-5, 对比样为常规 534A 增强 PBT 复合材料(标记为 534A/PBT 或 Com-0), PBT/GF 复合材料样品的制备工艺参数见表 2。

表 2 PP/GF 复合材料制备工艺参数

挤出温度 / 度 / $^{\circ}\text{C}$	主机频率 / Hz	注塑温度 / 度 / $^{\circ}\text{C}$	注塑压力 / MPa	注射速率 / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	模具温度 / 度 / $^{\circ}\text{C}$
240 ~ 250	16.3	235 ~ 255	850	95	90

1.5 性能测试

GF 的可燃物含量按 GB/T9914-2013 测试。

GF 产生毛羽程度评价方法: 取质量为 100 g 的不同短切 GF 用自制搅拌桨搅拌 3 min, 搅拌速率为 1 500 r/min, 使用量筒测试搅拌后产生毛羽的体积量, 毛羽程度单位为 $\text{mL}/100\ \text{g}$ 。

GF 流动性测试方法: 取一定质量的短切 GF 置于竖直于桌面放置的不锈钢漏斗中, 使 GF 自然流下, 计算 GF 质量 (m) 与 GF 流出时间 (t) 的比值, 记为 m/t , 单位为 g/s 。

复合材料的 MFR 按 GB/T3682-2018 测试, 测

试温度为 250 ℃,试验载荷为 2.16 kg。

复合材料的拉伸强度按 ISO527-2012 测试;弯曲强度按 ISO178-2019 测试;简支梁冲击强度按 ISO179-2010 测试。

形貌表征:利用 SEM 分别观察不同复合材料样条的冲击断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 短切 GF 的基本物性和使用性能

添加不同润滑剂制备的短切 GF 的基本物性和使用性能数据见表 3。

表 3 不同短切 GF 的基本物性和使用性能

性能	534A	534A-1	534A-2	534A-3	534A-4	534A-5
可燃物质量分数/%	0.70	0.67	0.63	0.66	0.68	0.70
毛羽程度 / [mL · (100g) ⁻¹]	28.82	12.24	25.20	13.26	16.83	13.26
流动性 / (g · s ⁻¹)	72.33	72.06	73.10	77.88	82.51	84.13

常规 534A 短切 GF 的可燃物质量分数为 0.7%,表明经过 GF 浸润剂涂覆、干燥后,所得到的 GF 表面的浸润剂涂层量占成品 GF 总质量的 0.7%,在该可燃物含量下,534A 具有较好的使用性能,用于增强 PBT 时能有效提高 PBT 的综合力学性能。从 534A-(1-4)GF 的可燃物含量数据可以看出:在 GF 浸润剂中添加 0.5% 润滑剂后,即使在浸润剂整体固含量提高的情况下,所得几种成品 GF 的可燃物含量值仍略低于常规 GF,这是由于润滑剂的存在屏蔽了浸润剂中分子链的氢键、静电等非共价相互作用,使得浸润剂中聚合物分子链间以及聚合物分子链在 GF 表面更易于滑动,从而浸润剂在 GF 表面的涂覆效果下降,最终可燃物含量降低。

通过搅拌毛羽和流动性可以看出,添加大部分润滑剂后的短切 GF 搅拌毛羽程度值下降,表明添加润滑剂的短切 GF 集束性能变好,这是由于润滑剂加入后降低了 GF 在生产过程中与生产设备(拉丝设备、短切设备)表面之间的摩擦作用,从而使得成品 GF 在机械搅拌后不易产生表面毛羽。此外,由于润滑剂的存在,GF 滑爽性提高,因此流动性也随之提高,较高的流动性有利于提高短切 GF 在挤出时的下料速率,减少堵料风险,提高 GF 增强 PBT 复合材料的加工与生产效率。

2.2 GF 增强 PBT 复合材料的 MFR 表征

通常在 GF 增强 PBT 树脂加工时会在挤出配方中加入润滑剂以改善复合熔体的加工流动性,具有较高流动速率的复合熔体在加工时能缩短成型周期、降低能耗,所得的复合制件外观也比较光洁;而

MFR 过高时,GF 与树脂之间粘结作用下降,GF 更倾向于脱离树脂,从而造成制品表面出现浮纤且制品力学性能也会降低^[15]。

玻纤浸润剂中添加润滑剂对 GF 增强 PBT 复合材料的 MFR 的影响结果见表 4。常规短切 534A 增强 PBT 复合材料 Com-0 的 MFR 为 16.87 g/(10 min),使用硬脂酸酰胺润滑剂处理的 GF 增强 PBT 复合材料(Com-2)的 MFR 降低,这可能是由于硬脂酸酰胺润滑剂参与了 GF 处理剂和树脂的界面反应,从而使得 GF 与树脂粘附作用增强,GF 对 PBT 分子链阻碍作用增大,MFR 降低。使用苯甲基硅油、PP 蜡、脂肪醇润滑剂处理的 GF 增强 PBT 复合材料(Com2~Com4)的 MFR 与对比样接近,说明使用少量润滑剂处理的 GF 并不会明显强化或者弱化 GF 和树脂的粘附作用强度,因此对 GF 增强 PBT 复合材料的熔体流动性影响不大。

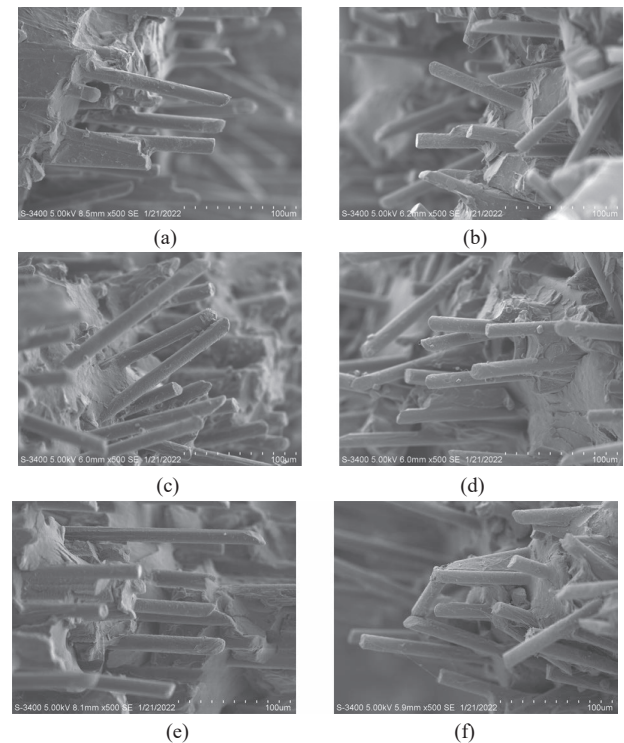
表 4 不同 GF 增强 PBT 复合料粒的 MFR

性能	Com-0	Com-1	Com-2	Com-3	Com-4	Com-5
MFR/[g · (10 min) ⁻¹]	16.87	15.18	16.55	16.70	16.96	16.80

注:料粒中 GF 质量分数均为 30%。

2.3 GF 增强 PBT 复合材料的界面表征

通过 SEM 表征 GF 增强 PBT 样条的冲击断面形貌(图 1),以研究 GF 与 PBT 树脂的界面结合情况。



a—Com-0; b—Com-1; c—Com-2; d—Com-3; e—Com-4; f—Com-5

图 1 不同 GF 增强 PBT 复合材料冲击断面 SEM 图

由图 1a 可以看出, Com-0 (对试样) 复合样条的冲击断面显示 GF 在断面分布较为均匀, GF 表面有粗糙的膜状物, GF 与树脂结合处较为紧实, 表明短切 GF 534A 与基体 PBT 树脂界面结合较强; 534A GF 与 PBT 的强界面结合主要得益于功能化处理后 GF 与 PBT 树脂之间的偶联、共价反应与氢键等相互作用。当受到外力破坏时, GF 难以从基体树脂中拔出并承受应力破坏作用, 从而提高复合材料整体力学性能。图 1b~图 1d 为浸润剂中分别添加不同润滑剂的 GF 增强 PBT 的断裂界面形貌, 图片显示添加不同润滑剂处理的 GF 与 PBT 结合处较为紧密, 且 GF 表面附着聚合物膜, 这与常规 534A 增强 PBT 的界面结合情况较为接近, 表明在 GF 中添加所选的几种润滑剂后, 不会影响 GF 与 PBT 树脂的界面结合。图 1e 与图 1f 是浸润剂中分别添加质量分数 0.5% 和 1.0% 的脂肪醇润滑剂的 GF 增强 PBT 的冲击断面图片, 二者断裂界面形貌相似, 表明继续提高脂肪醇润滑剂质量分数至 1.0%, GF 与树脂界面结合依然较为紧实, 复合材料依然可以保持较高的力学性能; 此外, 图 1f 可以看到断裂的 GF 不是直接从树脂中拔出的, 并可以明显看到撕扯的聚合物痕迹, 这是因为在受外力破坏时, GF 承受主要应力发生断裂从而强化复合材料, 进一步有力地说明该 GF 与 PBT 树脂具有较强的界面结合作用。

2.4 GF 增强 PBT 复合材料的力学性能

表 5 是 GF 增强 PBT 注塑样条的力学性能。由表 5 可以看出, 使用常规 534A 增强 PBT 复合样条 (GF 质量分数为 30%) 的拉伸强度为 121.65 MPa, 弯曲强度为 204.39 MPa。而使用不同润滑剂处理的 GF 增强 PBT (Com-2 ~ Com-4), 其拉伸强度与弯曲强度与 PBT/ 常规 534A 性能相比略有降低, 但整体来看也较为接近。结合图 1 所示的 GF- 树脂界面结合形貌图, 表明少量润滑剂分子 (尤其是苯甲基硅油或者 PP 蜡) 贯穿在界面树脂分子链间, 可能会在较小程度上屏蔽分子间共价或氢键相互作用, 但由于润滑剂含量极低, 因此不会显著降低树脂和 GF 的界面结合作用。对于简支梁无缺口冲击强度, 常规 Com-0 复合样条的冲击强度为 60.59 kJ/m², 使用不同润滑剂处理的 GF 增强 PBT 复合样条 (Com2 ~ Com4) 的冲击强度比常规 Com-0 均提高大约 5%。冲击性能的提高一方面可能是由于 GF- 树脂界面处润滑剂分子的增加了 GF 和基体树脂之

间的作用层厚度, 从而 GF 表面处的 PBT 树脂更易于发生剪切屈服, 增加了对冲击能量的吸收与耗散, 促进 GF 对基体树脂的增韧效果。另一方面, 润滑剂分子的存在阻碍了结合界面处 PBT 分子的结晶行为, 从而使体系中结晶组分降低, 非晶微区域增多吸收更多冲击能量, 从而提高 PBT 复合材料的冲击强度^[16]。

表 5 不同 GF 增强 PBT 复合材料的力学性能

性能	Com-0	Com-1	Com-2	Com-3	Com-4	Com-5
拉伸强度 /MPa	121.65	120.41	119.83	118.46	117.26	117.87
弯曲强度 /MPa	204.39	200.49	199.83	201.72	199.74	201.48
无缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	60.59	63.74	63.15	62.96	63.6	63.81

3 结论

(1) 在 GF 浸润剂中添加合适种类的润滑剂可以有效提高短切 GF 产品本身的流动性, 减少产品的毛羽量。

(2) 使用少量润滑剂处理的 GF 在增强 PBT 时对复合材料的熔体流动性不会产生明显影响, 但反应型的润滑剂会降低复合材料熔体的流动性。

(3) 使用润滑剂处理的 GF 增强 PBT 复合材料, 其拉伸强度与弯曲强度略低于 PBT/ 常规 GF 复合材料, 而无缺口冲击性能会比 PBT/ 常规 GF 有所提高。

参考文献

- [1] Liang E W, Stokes V K. Mechanical properties of injection-molded short-fiber thermoplastic composites. Part 1: The elastic moduli and strengths of glass-filled poly (butylene terephthalate)[J]. Polymer Composites, 2005, 26(4):428-447.
- [2] 王林超, 王兆亮, 黄炜. PBT 工程塑料生产应用情况及发展趋势 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4):144-147.
Wang Linchao, Wang Zhaoliang, Huang Wei. Production and application and development trend of PBT engineering plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4):144-147.
- [3] Arslan C, Dogan M. The mechanical and thermal properties of chopped basalt fiber-reinforced poly (butylene terephthalate) composites: Effect of fiber amount and length[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(17):2465-2475.
- [4] Borges C S P, Akhavan-Safar A, Marques E A S, et al. Effect of water ingress on the mechanical and chemical properties of polybutylene terephthalate reinforced with glass fibers[J]. Materials, 2021, 14(5). DOI.org/10.3390/ma14051261.
- [5] 叶士兵, 张超, 罗忠富. GF 增强 PBT/PET 合金的性能和外观 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1):8-14.
Ye Shibing, Zhang Chao, Luo Zhongfu. Properties and appearance of GF reinforced PBT/PET alloys[J]. Engineering Plastics

- Application, 2019, 47(1):8–14.
- [6] Arslan C, Dogan M. The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly (butylene terephthalate) composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 146:145–154.
- [7] 张志坚, 费振宇, 章建忠, 等. 短切玻璃纤维改性 PBT 的研究 [J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(7):12–14.
- Zhang Zhijian, Fei Zhenyu, Zhang Jianzhong, et al. Study on fiberglass chopped strands reinforced PBT composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(7):12–14.
- [8] 张志坚, 樊家澍, 章建忠, 等. 中国巨石热塑用玻璃纤维在汽车领域的应用 [J]. *上海塑料*, 2017(4):49–54.
- Zhang Zhijian, Fan Jiashu, Zhang Jianzhong, et al. Application of China Jushi fiberglass for thermoplastics in automobile[J]. *Shanghai Plastics*, 2017(4):49–54.
- [9] Thomason J L. Glass fibre sizing: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 127. DOI.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619.
- [10] 张志坚, 谢孝勋, 章建忠. 浅析浸润剂及成形工艺对玻璃纤维性能的影响 [J]. *玻璃纤维*, 2011(4):18–22.
- Zhang Zhijian, Xie Xiaoxun, Zhang Jianzhong. Influences of sizing and fiberizing technologies on glass fiber properties[J]. *Fiber Glass*, 2011(4):18–22.
- [11] Pegoretti A. Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021, 4(2):105–115.
- [12] Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings[J]. *Polymer Testing*, 2020, 85. DOI.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
- [13] 祝学城. 高效润滑剂阳离子 X 的性能和应用 [J]. *玻璃钢 / 复合材料*, 2012 (A1):221–223.
- Zhu Xuecheng. The property and application of efficient lubricant cation X[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012 (A1):221–223.
- [14] 张志坚, 陆琦, 章建忠, 等. 玻纤成膜剂种类对 SMC 制品力学性能的影响 [J]. *玻璃纤维*, 2021(6):5–7.
- Zhang Zhijian, Lu Qi, Zhang Jianzhong, et al. Influence of film former in fiberglass sizing on mechanical properties of SMC composite[J]. *Fiber Glass*, 2021(6):5–7.
- [15] Pereira G C, Rzatki F D, Mazzaferro L, et al. Mechanical and thermo-physical properties of short glass fiber reinforced polybutylene terephthalate upon aging in lubricant/refrigerant mixture[J]. *Materials Research*, 2016, 19:1 310–1 318.
- [16] 聂景辉, 戚嵘嵘, 周持兴, 等. 润滑剂 TAF 对玻璃纤维增强 PBT 复合材料性能的影响 [J]. *中国塑料*, 2004(5):75–78.
- Nie Jinghui, Qi Rongrong, Zhou Chixing, et al. Effects of lubricant TAF on properties of glass-fiber-reinforced PBT blends [J]. *China Plastics*, 2004(5):75–78.
-
- (上接第 153 页)
- [11] Richard A V, Vasudevan S, Wlodzimierz K, et al. New polymer electrolyte nanocomposites: melt intercalation of poly(ethylene oxide) in mica-type silicates[J]. *Adv Mater*, 1995, 7(2):154–156.
- [12] Chen H, Wen X, Guan Y Y, et al. Effect of particle size on the flame retardancy of poly (butylene succinate)/Mg(OH)₂ composites[J]. *Fire and Materials*, 2016, 40(8):1 090–1 096.
- [13] Liu X W, Wu W H, Qu H Q, et al. Flame-retarding and mechanical properties of flexible polyvinyl chloride with surface-treated lamellar magnesium hydroxide[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2016, 55:115–127.
- [14] Zhang Z F, Wu W H, Zhang M J, et al. Hydrothermal synthesis of 4ZnO · B₂O₃ · H₂O/RGO hybrid material and its flame retardant behavior in flexible PVC and magnesium hydroxide composites[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 425:896–904.
- [15] 赵秋萍, 杨柳, 赵胜斌, 等. 氮掺杂石墨烯的制备及阻燃性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(4):92–98.
- Zhao Qiuping, Yangliu, Zhao Shengbin, et al. Preparation of nitrogen-doped graphene and its flame retardant property[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(4):92–98.
- [16] 厉娇蕊, 武晓惠, 于晓阳, 等. 羟基锡酸三聚氰胺盐及羟基锡酸金属盐复合物阻燃 PVC 的阻燃性能及热性能研究 [J]. *塑料科技*, 2015, 43(12):91–95.
- Li Jiaorui, Wu Xiaohui, Yu Xiaoyang, et al. Study on flame retardancy and thermal properties of flexible PVC treated with melamine hydroxystannate and metal hydroxy stannate composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(12):91–95.