

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.05.007

PBAT/木粉复合材料的制备^{*}

刘权,胡应模,李梦灿,侯春燕,王雪

[中国地质大学(北京)材料科学与工程学院,非金属矿物和固废资源材料化利用北京市重点实验室,岩石矿物材料国家专业实验室,北京 100083]

摘要:以木粉和聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)为原料,添加硅烷偶联剂,混合均匀后,在开炼机中混炼一定时间制备PBAT/木粉复合材料,从偶联剂种类及其用量、加工温度、加工时间4个方面探讨了制备PBAT/木粉复合材料的最佳工艺条件。研究表明,加入的硅烷偶联剂KH-560用量为木粉和PBAT总质量的2%,与木粉和PBAT在130℃下混炼10 min,制备出的PBAT/木粉复合材料的相容性较好,且复合材料的拉伸性能达到最优,拉伸强度和断裂伸长率分别达到12.42 MPa和56.58%。SEM分析表明,添加KH-560后,PBAT/木粉的相容性得到了明显改善,耐水性更好,吸水率从13.04%下降到10.39%,制备出的PBAT/木粉复合材料的耐热性能较原料木粉也得到了较大的提高,在395℃时仅分解40%。

关键词:木粉;聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯;复合材料;相容性

中图分类号:TQ326.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)05-0035-05

Preparation of PBAT/Wood Flour Composites

Liu Quan, Hu Yingmo, Li Mengcan, Hou Chunyan, Wang Xue

[School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing Key Laboratory of Materials Utilization of Nonmetallic Minerals and Solid Wastes, National Laboratory of Mineral Materials, Beijing 100083, China]

Abstract: The poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT)/wood flour composites were prepared by mixing raw materials PBAT and wood flour in the open mill with additive of silane coupling agent. The optimum conditions of PBAT/wood powder were discussed from four aspects: the type of coupling agent, the dosage of coupling agent, processing temperature and processing time. The experimental results show that the wood flour and PBAT were blended 10 min at 130℃ and the content of silane coupling agent KH-560 is 2% of the PBAT and wood flour total mass, the composites have good tensile properties with tensile strength of 12.42 MPa and elongation at break 56.58%. SEM analysis shows that the compatibility of wood flour with PBAT is improved clearly and the water absorption is decreased from 13.04% to 10.39% after adding KH-560. The heat resistance of PBAT/wood flour composites is also higher than that of raw wood flour, and only 40% is decomposed at 395℃.

Keywords: wood flour; poly(butylene adipate-co-terephthalate); composite; compatibility

木塑复合材料(WPC)是一种新型复合材料,通常是指由木纤维或天然纤维增强热塑性塑料制成的复合材料。近年来,WPC主要应用于木纤维增强聚丙烯,聚乙烯和聚氯乙烯等材料的研发^[1]。随着环境问题的日益严峻和石油资源的逐渐短缺,可生物降解材料得到越来越多的专家和学者的关注。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)是己二酸丁二酯与对苯二甲酸丁二酯共聚后的产物^[2],为热塑性可生物降解材料,兼具聚对苯甲酰胺(PBA)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的特性,不仅具有优异的可完全生物降解性,且具有良好的力学性能、加工性能和热性能,具有非常好的市场应用前景^[3-6],但如何降低其高成本仍是应用领域的主要研究焦点。

聚合物共混是改善聚合物性能和成本的有效

方法^[7-8],将PBAT与一些天然可降解高分子如淀粉和大豆蛋白共混,可以降低总成本并确保复合材料的降解性^[9-11]。目前关于PBAT与淀粉和大豆蛋白等复合的研究非常多,但有关PBAT与木粉复合材料相关的报道很少。

木粉是一种丰富、廉价、可生物降解和可再生的天然材料^[12],其结构中具有大量的羟基,导致其亲水性较强,而PBAT具有较强的憎水性,简单的PBAT/木粉复合材料的界面粘合相当弱,需要添加增容剂,提高木粉与PBAT的相容性^[13-15]。笔者用

^{*} 国家自然科学基金项目(51372233)

联系人:胡应模,教授,博士生导师,主要从事矿物表面改性及其复合材料研究

收稿日期:2017-03-07

硅烷偶联剂作增容剂,对木粉与 PBAT 共混复合的工艺条件进行了探讨,考察了复合材料的微观状态,并对其力学性能、耐水性能和耐热性能进行了测试与表征。

1 实验部分

1.1 主要原材料

木粉:粒径为 1.3 μm ,成都竹木粉体厂;

PBAT: Ecoflex-F-Blend-C1200,德国巴斯夫有限公司;

硅烷偶联剂: KH-550, KH-560, KH-570,分析纯,国药集团药业股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

开炼机: X(S)K 型,上海双翼橡塑机械有限公司;

平板硫化机: QLB-7 型,上海双翼橡塑机械有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-450 型,日本日立公司;

万能试验机: CTM-2500 型,上海协强仪器制造有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-450 型,日本日立公司;

热重 (TG) 分析仪: STA 449 F5 型,德国耐驰公司。

1.3 PBAT/木粉复合材料的制备

将适量木粉和 PBAT 分别在 60℃ 的烘箱中干燥 12 h,称取质量分数为 60% 的木粉和 40% 的 PBAT,置于高速混合机中混合均匀,加入适量的硅烷偶联剂,混合均匀,在一定温度下在开炼机中混炼均匀,在平板硫化机上热压成表面平整且厚度为 1 mm 的薄膜,得到样品。

1.4 性能测试与表征

(1) 拉伸性能测试。

根据 GB/T 1040.1-2006,在万能试验机上对复合材料样品进行拉伸性能测试,拉伸速率为 50 mm/min。

(2) SEM 分析。

对复合材料样品表面进行喷金,用 SEM 观察复合材料的微观结构。

(3) 吸水率分析。

把复合材料样品制成规格为 10 mm × 10 mm × 1 mm 的薄膜片,根据 GB/T 1034-2008,对其吸水性进行测试。将样品在 70℃ 下干燥 24 h,

然后快速冷却,称重,记为 W_1 ,将干燥的样品在 (23 ± 2)℃ 的蒸馏水中浸泡 24 h,然后从蒸馏水中取出试样并用干燥的滤纸擦拭掉试样表面上的水,迅速测试湿重,记为 W_2 。复合材料的吸水率按式 (1) 计算,每组测试三个样品,取平均值。

$$\text{吸水率} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

(4) TG 分析。

在氮气氛围下,对复合材料样品进行 TG 分析,温度范围为 30 ~ 600℃,升温速率为 10℃/min。

2 结果与讨论

2.1 增容剂的选择

分别用占木粉和 PBAT 总质量 1% 的硅烷偶联剂 KH-550, KH-560, KH-570 与木粉、PBAT 进行共混,在其他条件不变的情况下,考察不同牌号偶联剂对复合材料力学性能的影响,结果列于表 1。

表 1 不同增容剂对复合材料力学性能的影响

样品	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
PBAT / 木粉复合材料	9.20	20.80
PBAT / 木粉 / KH-550 复合材料	10.90	48.50
PBAT / 木粉 / KH-560 复合材料	11.78	53.18
PBAT / 木粉 / KH-570 复合材料	9.64	29.08

由表 1 可知,三种硅烷偶联剂对 PBAT / 木粉复合材料的拉伸强度和断裂伸长率的改善均有明显的效果。这是因为木粉表面存在大量羟基,具有亲水性,而纯 PBAT 具有亲油性,当不添加偶联剂时,亲水性的木粉和亲油性的 PBAT 之间相容性较差,易出现相分离。当受外力作用时,应力不能很好地在两相之间传递,界面结合处易形成应力集中点,最终扩展为裂纹,导致复合材料的断裂,使得复合材料的拉伸强度和断裂伸长率不高^[16];加入硅烷偶联剂后,硅烷偶联剂一端的水解基团 Si—OH 能与木粉的羟基键合,另一端的烃基能与 PBAT 作用,从而使木粉和 PBAT 的相容性得以改善,当受外力作用时,不会产生应力集中,所以 PBAT / 木粉复合材料的拉伸强度和断裂伸长率得到提高^[17]。

从表 1 可以看到,使用偶联剂 KH-560 的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率最优异,分别为 11.78 MPa 和 53.18%,与不加偶联剂的复合材料相比,拉伸强度增加了 28.04%,断裂伸长率增加了 155.67%;KH-550 的效果次之,KH-570 的效果最差。这是因为 KH-560 具有高活性环氧乙烷基团,容易与木粉表面的羟基发生偶联反应,增进了木粉和 PBAT 共混的相容性,进而力学性能也得到了大

大提高^[18]; KH-550 末端氨基的活性比环氧乙烷基团低得多, 所以与 KH-560 相比, KH-550 的偶联效果差一些; 而 KH-570 既没有环氧乙烷基团, 也没有其他活性基团, 所以与 KH-560, KH-550 相比, 其偶联效果更差^[19], 因此, 本实验采用 KH-560 作偶联剂。

2.2 偶联剂用量对复合材料拉伸性能的影响

在 PBAT/木粉复合材料中分别添加占木粉和 PBAT 总质量 1%, 2%, 3%, 4% 的 KH-560 偶联剂, 探索不同用量 KH-560 对 PBAT/木粉复合材料拉伸性能的影响, 结果列于表 2。

表 2 KH-560 用量对复合材料拉伸性能的影响

KH-560 用量 / %	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
0	9.2	20.8
1	11.78	53.18
2	12.42	56.58
3	10.98	51.16

从表 2 可以看出, 随着 KH-560 用量的增加, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率不断增大, 当 KH-560 用量为 2% 时, 复合材料的拉伸性能达到最优, 拉伸强度和断裂伸长率分别为 12.42 MPa 和 56.58%; 当 KH-560 用量继续增加时, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率开始下降。原因是: 当 KH-560 用量过少时, 不能使木粉与 PBAT 充分地偶联相容, 因而复合材料的拉伸性能尚未达到最佳; 当偶联剂用量过多时, 未参与反应的 KH-560 分子游离在复合材料中, 造成了两相间结构的松散, 而导致 PBAT/木粉复合材料的拉伸强度和断裂伸长率出现下降^[20], 所以 KH-560 的最佳用量为 2%。

2.3 加工温度对复合材料拉伸性能的影响

在偶联剂 KH-560 用量为木粉和 PBAT 总质量的 2% 时, 分别设置开炼机的混炼温度为 120, 130, 140, 150℃, 考察不同加工温度下所得的 PBAT/木粉复合材料的拉伸性能, 结果列于表 3。

表 3 不同加工温度对复合材料拉伸性能的影响

混炼温度 / °C	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
120	11.33	29.12
130	12.42	56.58
140	11.04	47.83
150	10.96	43.48

从表 3 可以看出, 开始时, 随着混炼温度的不断升高, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率不断增大, 当混炼温度为 130℃ 时, 复合材料的拉伸性能最优异, 拉伸强度和断裂伸长率分别为 12.42 MPa 和 56.58%; 随着温度的继续升高, 复合材料的拉伸性能又呈下降趋势。这是因为混炼温度低时, KH-560

与木粉、PBAT 的偶联不彻底, 所以其拉伸性能不理想^[21]。此外, 当混炼温度较低时, 木粉和 PBAT 熔体的流动性差, 导致木粉在 PBAT 中分散不均匀, 也影响材料的拉伸性能^[22]。当混炼温度过高时, 会造成部分偶联剂分解, 使木粉与 PBAT 共混效果不良, 所以最佳的加工温度为 130℃。

2.4 加工时间对复合材料拉伸性能的影响

设置开炼机的混炼温度为 130℃, 用 2% 的 KH-560 偶联剂, 设置加工时间分别为 5, 10, 15, 20 min, 探讨不同加工时间下 PBAT/木粉复合材料的拉伸性能, 结果列于表 4。

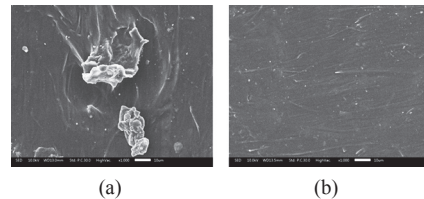
表 4 加工温度对 PBAT/木粉复合材料拉伸性能的影响

混炼时间 / min	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
5	10.65	32.75
10	12.42	56.58
15	11.9	51.27
20	10.72	37.42

从表 4 可以看出, 随着加工时间的延长, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率增大, 当加工时间为 10 min 时, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率达到最大值, 分别为 12.42 MPa 和 56.58%; 随着加工时间继续延长, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率开始不断下降。这是由于加工时间过短时, KH-560 与木粉、PBAT 反应得不彻底, 使得两相的偶联效果不好, 拉伸性能较差; 另外, 加工时间过短, 木粉与 PBAT 没有完全混容, 导致木粉在 PBAT 中分布不均匀; 当加工时间过长时, KH-560 偶联剂发生分解、挥发损耗等现象, 拉伸性能也随之下下降。所以, 最佳加工时间确定为 10 min。

2.5 SEM 分析

为考察木粉与 PBAT 的共混互容, 在开炼机工作温度为 130℃、混炼 10 min 下, 分别制备不添加 KH-560 和添加 2% KH-560 两组不同的 PBAT/木粉复合材料, 采用 SEM 观察添加 KH-560 前后 PBAT/木粉复合材料的微观结构, 结果如图 1 所示。



a—未添加 KH-560; b—添加 2% 的 KH-560

图 1 添加 KH-560 前后的 PBAT/木粉复合材料的 SEM 照片

由图 1a 可以看出, 没有添加 KH-560 的复合材料的中间出现了很多凸起, 有明显的相分离现象, 表

明木粉和 PBAT 的相容性很差;由图 1b 可以看出,添加 KH-560 的复合材料的表面光滑,相容性良好,表明 KH-560 偶联剂的添加有效地改善了木粉和 PBAT 的相容性。

2.6 吸水率测试

为了考察 PBAT/木粉复合材料的吸水率,在开炼机混炼温度为 130℃、混炼 10 min 下,分别制备不添加 KH-560 和添加 2% KH-560 两组不同的 PBAT/木粉复合材料,测试添加 KH-560 前后制得的 PBAT/木粉复合材料的吸水率,结果列于表 5。

表 5 PBAT/木粉复合材料的吸水率 %

项目	未添加 KH-560	添加 KH-560	下降百分比
吸水率	13.04	10.39	20.3

由表 5 可以看出,加入 KH-560 后,复合材料的耐水性能得到了明显改善。与不添加 KH-560 制备的 PBAT/木粉复合材料的吸水率 13.04% 相比,添加 KH-560 制备出的 PBAT/木粉复合材料的吸水率仅为 10.39%,下降了 20.3%。这是因为木粉表面有许多羟基,亲水性较强,而 PBAT 是憎水性的聚酯,偶联剂的加入可有效地改善木粉与 PBAT 之间界面的相容性,增强两相之间的界面结合力,木粉分子中暴露的亲水性羟基下降,从而降低了复合材料的吸水率^[23]。

2.7 热稳定性分析

为了考察 PBAT/木粉复合材料的热稳定性,笔者对木粉及 PBAT/木粉复合材料(开炼机工作温度为 130℃,KH-560 偶联剂用量为 2%,混炼时间为 10 min)进行 TG 分析,结果如图 2 所示。

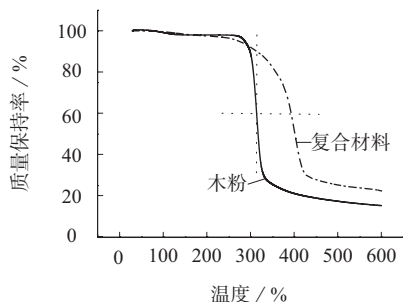


图 2 木粉和 PBAT/木粉复合材料的 TG 分析曲线

由图 2 可知,在低于 300℃时,木粉和 PBAT/木粉复合材料的失重曲线没有明显的区别,此时木粉和 PBAT/木粉复合材料只有水分和低分子量物质的损失发生^[24]。当温度继续上升时,木粉和 PBAT/木粉复合材料的失重曲线出现了明显的区别,当温度为 314℃时,木粉的质量保持率为 60%,即失重 40%,但是 PBAT/木粉复合材料的残余率

为 89.9%,即仅失重 10.1%。另一方面,当温度为 314℃时,木粉失重为 40%,而 PBAT/木粉复合材料在 395℃时才失重 40%。这些结果表明, PBAT/木粉复合材料的热稳定性能远远优于原料木粉,这也克服了单一木粉使用时不耐高温的缺点。

3 结论

通过对木粉与 PBAT 复合工艺条件的探讨,得出了制备 PBAT/木粉复合材料的最佳条件为:用 2% 的 KH-560 作偶联剂,在混炼温度 130℃下共混 10 min,制得的 PBAT/木粉复合材料的拉伸强度达到 12.42 MPa,断裂伸长率达到 56.58%。SEM 分析表明,偶联剂的加入较好地改善了木粉与 PBAT 的共混相容性,制得的 PBAT/木粉复合材料的耐水性能和热稳定性能得到了较大的提高,吸水率从 13.04% 下降到 10.39%,在 395℃时仅失重 40%,同时为天然纤维的综合利用开发了新的可行途径。

参考文献

- [1] Movahhed M K, Mohebbi M, Koocheki A, et al. The effect of different emulsifiers on the eggless cake properties containing WPC[J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(11):1-10.
- [2] Olivato J B, Marini J, Pollet E, et al. Elaboration, morphology and properties of starch / polyester nano-biocomposites based on sepiolite clay[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 118:250-256.
- [3] Moustafa H, Guizani C, Dufresne A. Sustainable biodegradable coffee grounds filler and its effect on the hydrophobicity, mechanical and thermal properties of biodegradable PBAT composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 134(8):doi: 10.1002/app.44498.
- [4] Arruda L C, Magaton M, Bretas R E S, et al. Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA / PBAT blends[J]. Polymer Testing, 2015, 43:27-37.
- [5] Mohanty S, Nayak S K. Biodegradable nanocomposites of poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT) and organically modified layered silicates[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2012, 20(1):195-207.
- [6] Girdthep S, Worajittiphon P, Leejarkpai T, et al. Effect of silver-loaded kaolinite on real ageing, hydrolytic degradation, and biodegradation of composite blown films based on poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate)[J]. European Polymer Journal, 2016, 82:244-259.
- [7] Olivato J B, Marini J, Yamashita F, et al. Sepiolite as a promising nanoclay for nano-biocomposites based on starch and biodegradable polyester[J]. Materials Science & Engineering:C, 2017, 70:296-302.
- [8] Bledzki A K, Franciszczak P, Meljon A. High performance hybrid PP and PLA biocomposites reinforced with short man-made cel-

- lulose fibres and softwood flour[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2015, 74:132–139.
- [9] Garcia P S, Grossmann M V E, Yamashita F, et al. Citric acid as multifunctional agent in blowing films of starch / PBAT[J]. *Química Nova*, 2011, 34(9):1 507–1 510.
- [10] Olivato J B, Grossmann M V E, Yamashita F, et al. Compatibilisation of starch / poly(butylene adipate co-terephthalate) blends in blown films[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(46):1 934–1 939.
- [11] Morelli C L, Belgacem M N, Branciforti M C, et al. Nanocomposites of PBAT and cellulose nanocrystals modified by in situ polymerization and melt extrusion[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2016, 56(12):1 339–1 348.
- [12] Awal A, Rana M, Sain M. Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites[J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 80:87–95.
- [13] 吴唯,王茹,何三雄,等. 聚丙烯 / 木粉复合材料的增容改性及其机理 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2011(11):81–83.
Wu Wei, Wang Ru, He Sanxiong, et al. Compatibilizing modification and mechanism of PP / WF composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2011(11):81–83.
- [14] 郭垂根,王清文. 木粉聚丙烯复合材料的等温结晶动力学 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2009(4):62–65.
Guo Chuigen, Wang Qingwen. Kinetics of isothermal crystallization for wood-flour polypropylene composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2009(4):62–65.
- [15] Csizmadia R, Faludi G, Renner K, et al. PLA / wood biocomposites: Improving composite strength by chemical treatment of the fibers[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2013, 53(19):46–53.
- [16] 生瑜,朱德钦,苏晓芬,等. 不同改性剂对 PP / 木粉复合材料性能的影响 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2012(10):51–54.
Sheng Yu, Zhu Deqin, Su Xiaofen, et al. Effects of different treatment agents on the properties of PP / wood flour composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2012(10):51–54.
- [17] Lyu Hanxiao, Song Shixin, Sun Shulin, et al. Enhanced properties of poly(lactic acid) with silica nanoparticles[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2016, 27(9):1 156–1 163.
- [18] Balaji J, Sethuraman M G. Studies on the effects of thiourea and its derivatives doped-Hybrid / zirconium nanocomposite based sol-gel coating for the corrosion behaviour of aluminum metal[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 99:463–473.
- [19] 陈静,刘爱学,杨军,等. KH-550 改性纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂ 对 PET / PBT 聚酯合金熔融过程中的性能影响 [J]. *塑料工业*, 2013, 41(10):5–8.
Chen Jing, Liu Aixue, Yang Jun, et al. Effects of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ modified by KH-550 on the properties of PET / PBT polyester alloy in melting process[J]. *China Plastics Industry*, 2013, 41(10):5–8.
- [20] 杨冰,季君晖,许颖,等. 碳酸钙高填充聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯可降解复合材料的制备及性能表征 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(4):139–142.
Yang Bing, Ji Junhui, Xu Ying, et al. Application of CaCO₃ high loaded poly butylene adipate-co-terephthalate (PBAT)[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2014, 30(4):139–142.
- [21] Hu Yingmo, Yang Xue. The surface organic modification of tourmaline powder by span-60 and its composite[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(19):7 540–7 545.
- [22] 周天睿,方立,万明,等. 连续 CF 增强 PEEK 复合材料层压板的制备工艺 [J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(7):52–56.
Zhou Tianrui, Fang Li, Wan Ming, et al. Preparation process of continuous CF reinforced PEEK composite laminates[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(7):52–56.
- [23] Lyu Shanshan, Gu Jiyou, Tan Haiyan, et al. Modification of wood flour / PLA composites by reactive extrusion with maleic anhydride[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(15):doi: 10.1002/app.43295.
- [24] Hu Yingmo, Wang Qingling, Tang Mingru. Preparation and properties of starch-g-PLA / poly(vinyl alcohol) composite film[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 96(2):384–388.
-
- (上接第 18 页)
- forced polyamide 66[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2013, 98(12):2 653–2 662.
- [11] Polat O, Kaynak C. Use of boron oxide and boric acid to improve flame retardancy of an organophosphorus compound in neat and fiber reinforced polyamide-6[J]. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2014, 22(3):300–310.
- [12] Chen Wenhua, Liu Pengju, Liu Yuansen, et al. Synergistic flame-retardant effect and mechanism of nitrogen-phosphorus containing compounds for glass fiber reinforced polyamide 66[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, doi.org/10.1080/0360 2559.2016.1253739.
- [13] 陈功,吴磊,乔允允,等. 微硅粉协效阻燃聚丙烯材料的制备与表征 [J]. *塑料工业*, 2016, 44(10):87–90.
Chen Gong, Wu Lei, Qiao Yunyun, et al. Preparation and characterization of polypropylene with micro silica as synergistic flame-retardant[J]. *China Plastics Industry*, 2016, 44(10):87–90.
- [14] Chen Xingyou, Cai Xufu. Synthesis of poly(diethylenetriamine terephthalamide) and its application as a flame retardant for ABS[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 125(1):313–320.
- [15] 慈书亭,何敏,郭建兵,等. ZnB 对 LGFP / IFR 阻燃体系性能的影响 [J]. *塑料科技*, 2014, 42(5):79–83.
Ci Shuting, He Min, Guo Jianbing, et al. Effect of ZnB on properties of LGFP / IFR flame retardant system[J]. *Plastics Science and Technology*, 2014, 42(5):79–83.