

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.025

水滑石 / 硼酸锌对低密度聚乙烯热性能的影响

张红霞¹, 刘昌伟¹, 苏桂仙¹, 闫莉²

(1. 唐山师范学院化学系, 河北唐山 063000; 2. 华北理工大学材料科学与工程学院, 河北省无机非金属材料重点实验室, 河北唐山 063000)

摘要:为提高低密度聚乙烯(PE-LD)的热性能,引入少量的无机阻燃剂水滑石(LDH)和硼酸锌(ZB)作为添加剂制备复合材料,考察了不同添加量的LDH、ZB及二者协同对PE-LD热降解性能和阻燃性能的影响。通过热重分析仪和极限氧指数仪研究复合材料的热降解性能和阻燃性能。探讨了LDH和ZB对PE-LD的热降解性能和阻燃性能的影响规律,并对其原因进行了分析。结果表明,单一添加LDH,可以提升PE-LD/LDH复合材料的热稳定性;单一添加ZB,可以降低PE-LD热降解的速率,提高了聚乙烯主链的高温热稳定性;LDH/ZB同时作用于PE-LD时热稳定性和阻燃性能的改善效果要好于单一加入LDH或ZB,当LDH/ZB质量比为8:2时,协同效果最佳,最大分解速率时的温度为486.7℃,600℃时的质量保持率约为7.8%,极限氧指数为21.2%。

关键词:水滑石; 硼酸锌; 低密度聚乙烯; 热性能

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0128-04

Effects of Layered Double Hydroxide / Zinc Borate on Thermal Properties of Low Density Polyethylene

Zhang Hongxia¹, Liu Changwei¹, Su Guixian¹, Yan Li²

(1. Department of Chemistry, Tangshan Normal College, Tangshan 063000, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Inorganic Nonmetallic Materials, College of Materials Science and Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China)

Abstract: In order to improve the thermal performance of low density polyethylene (PE-LD), a small amount of inorganic flame retardant layered double hydroxide (LDH) and zinc borate (ZB) were used as additives to prepare composite materials. The effects of LDH content, ZB content and their synergistic effects on thermal degradation and flame retardant property of PE-LD were investigated. The thermal degradation performance and flame-retardant property of composite material were determined by thermal gravimetric analyzer and limiting oxygen index analyzer respectively. The law of LDH and ZB affecting on thermal degradation performance of PE-LD was discussed. The affecting reasons were analyzed. The results show that the thermal stability of PE-LD/LDH composite can be improved by adding LDH alone. The thermal degradation rate of PE-LD can be reduced and the high temperature thermal stability of PE main chain can be improved by adding ZB alone. LDH/ZB complex can better improve the thermal stability property of the composite material than only adding LDH or ZB. The synergistic effects are best when the mass ratio of LDH and ZB is 8:2 respectively. The temperature at which the maximum decomposition rate is 486.7℃, the carbon residue rate is 7.8% at 600℃ and the limiting oxygen index is 21.2%.

Keywords: layered double hydroxide; zinc borate; low density polyethylene; thermal performance

低密度聚乙烯(PE-LD)因其具有良好的加工性能,稳定的化学性质,电绝缘性能好等特点,是一种当前社会上生产较多、价格便宜、使用广泛的热塑性塑料^[1-2]。然而,PE-LD在加工应用过程中也存在一些缺点,例如耐热性较差、极易燃烧等。为了提

高PE-LD的热性能,可添加水滑石(LDH)、硼酸锌(ZB)等助剂制备PE-LD复合材料,拓展其应用范围。

LDH^[3-4]或ZB^[5-6]的加入对聚合物的某些性能有较大改变。韩志东等^[7]研究发现LDH的加入促

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(Z2017144),唐山师范学院博士基金项目(2014A03)

通讯作者: 张红霞,讲师,主要从事高分子材料的改性研究 E-mail: hxzhang2008@163.com

收稿日期: 2018-07-28

引用格式: 张红霞,刘昌伟,苏桂仙,等. 水滑石 / 硼酸锌对低密度聚乙烯热性能的影响[J]. 工程塑料应用,2018,46(10):128-131.

Zhang Hongxia, Liu Changwei, Su Guixian, et al. Effects of layered double hydroxide / zinc borate on thermal properties of low density polyethylene[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):128-131.

进了聚乙烯 (PE) 在热降解过程的成炭。张凯等^[8]研究发现在 PE-HD/IFR 复合体系中加入 LDH, 材料的阻燃性能和热稳定性能有很大改善。陈文华等^[9]研究发现, ZB 的加入提高了阻燃尼龙 66 的热稳定性。吴志平等^[10,11]研究发现, ZB 在 PE-LD/IFR 体系中, 体系的热稳定性增强, 热降解时质量保持率也增大。赵伟等^[12]研究了 ZB 在 PE-LD 阻燃中的协效作用, 少量添加 ZB 能达到良好的阻燃效果, ZB 与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃体系有良好的协同作用, 但其没有研究 ZB 与 LDH 的协同阻燃效果。范惠琳等^[13]研究了软质 PVC 体系中, 在相同的添加量下, 硼酸根插层 LDH 可有效地发挥 LDH 与硼系阻燃剂的协同效应, 优于碳酸根水滑石前体的阻燃性能。李超等^[14]研究了 LDH 和 ZB 二者的复配阻燃纸的用途, 但对二者复配的热性能方面没有进行研究。

笔者采用熔融共混法制备 PE-LD/LDH/ZB 复合材料。通过热重 (TG) 分析考察 LDH 和 ZB 配比对复合材料的热降解性能影响, 通过极限氧指数 (LOI) 试验考察 LDH 和 ZB 配比对复合材料阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-LD: Tomskneftekhim LLC 公司;

LDH: 阻燃型, 上海纽唯丝化工有限公司;

ZB: 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂。

1.2 主要仪器和设备

TG 分析仪: TGA4000 型, Perkin Elmer 公司;

双辊混炼机: SK-16 型, 苏州科晟泰机械设备有限公司;

平板硫化机: QLB350 型, 苏州科晟泰机械设备有限公司;

万能制样机: WZY-240 型, 苏州科晟泰机械设备有限公司;

智能氧指数测定仪: ZR-01 型, 青岛山纺仪器有限公司。

1.3 试样制备

PE-LD, LDH, ZB 按照表 1 配方比例混合, 在双辊混炼机上塑化均匀, 再移至 $220\text{ mm} \times 170\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的模具中在平板硫化机上压片 (温度为 170°C), 而后采用万能制样机裁制成长条形样条。

表 1 PE-LD/LDH/ZB 复合材料配方 份

编号	PE-LD	LDH	ZB
1 [#]	100	0	0
2 [#]	100	0	10
3 [#]	100	5	5
4 [#]	100	6	4
5 [#]	100	8	2
6 [#]	100	10	0

1.4 性能测试

TG 表征: 采用 TG 仪, 氮气气氛, 升温速率 $20^\circ\text{C}/\text{min}$, 温度范围为 $30 \sim 800^\circ\text{C}$ 。

LOI 的测定: 按 GB/T2406.2-2009 测定, 样品尺寸为 $100\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 热降解性能

(1) LDH 的热降解性能。

LDH 的 TG 和 DTG 曲线如图 1 所示。由图 1 可知, LDH 的热降解过程主要可分为三个阶段: 在 $50 \sim 230^\circ\text{C}$ 为脱除物理吸附水, 失重约 0.7%; $230 \sim 550^\circ\text{C}$ 存在两个强度较小热失重峰, 是由于 CO_3^{2-} 受热降解成 CO_2 气体脱离层间和部分层板羟基脱水造成的, 失重约 2.9%; 在 $550 \sim 650^\circ\text{C}$ 存在一个强度大的热失重峰, 是由于层板羟基进一步脱水和层间阴离子与层板上羟基的反应产物的受热降解所导致的, 此范围失重约 8.0%; 650°C 后 LDH 热失重较少。

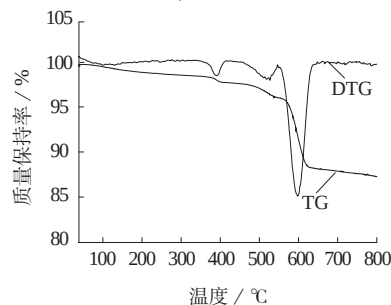


图 1 LDH 的 TG 与 DTG 曲线

(2) ZB 的热降解性能。

ZB 的 TG 和 DTG 曲线如图 2 所示。由图 2 可知, ZB 在 260°C 以下, 基本不存在热降解, 在 260°C

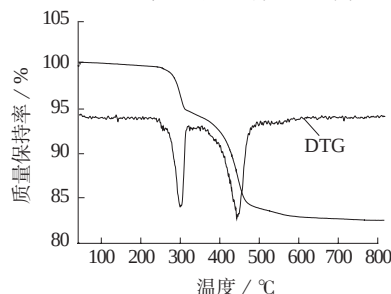


图 2 ZB 的 TG 与 DTG 曲线

以上,ZB受热陆续释放结晶水,失重约20%。

(3) 复合材料的热降解性能。

对纯PE-LD(1[#])和熔融共混法制备的PE-LD/LDH复合材料(6[#])进行TG分析,结果如图3所示。对纯PE-LD(1[#])和熔融共混法制备的PE-LD/ZB复合材料(2[#])进行TG分析,结果如图4所示。对熔融共混法制备的PE-LD/LDH/ZB复合材料(3[#],4[#]和5[#])进行TG分析,结果如图5所示,并将所有复合材料的TG结果数据列于表2。

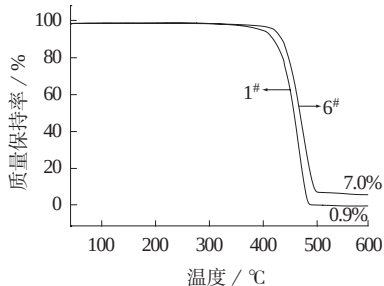


图3 纯PE-LD和PE-LD/LDH复合材料的TG曲线

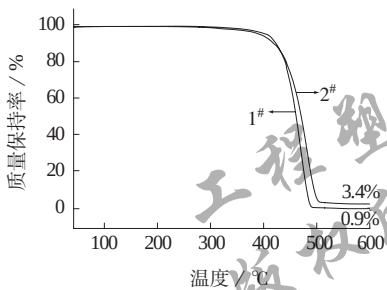


图4 纯PE-LD和PE-LD/ZB复合材料的TG曲线

由图3和表2可知,纯PE-LD和PE-LD/LDH复合材料的初始降解温度($T_{0.01}$)分别为365.2℃和395.4℃,添加了LDH后,PE-LD/LDH复合材料的 $T_{0.01}$ 提高了30℃,最大分解速率时的温度(T_f)也提高了10.3℃,最大分解速率(R_{max})有所减缓,600℃的质量保持率也提高到7.0%,添加LDH可以提升PE-LD/LDH复合材料的热稳定性。分散在炭化层中的LDH片层可起到阻隔传质和传热的作用^[8]。

由图4和表2可以看出,纯PE-LD和PE-LD/ZB复合材料的 $T_{0.01}$,分别为365.2℃和338.0℃,添加了ZB后,复合材料的 $T_{0.01}$ 降低了27℃,这是由于ZB的 $T_{0.01}$ 较低所导致的,失重50%的温度($T_{0.5}$)提高了约10℃, T_f 由469.0℃提高到484.4℃,提高了约16℃, R_{max} 有所减缓,600℃的质量保持率也提高到3.4%。考虑到添加了ZB的PE-LD/ZB复合材料的 $T_{0.01}$ 偏低,说明ZB的添加降低了PE-LD热降解的速率,提高了聚乙烯主链的高温热稳定性。

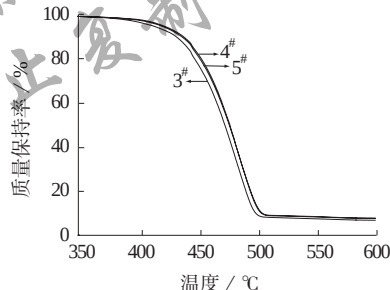


图5 不同LDH/ZB配比时PE-LD/LDH/ZB的TG曲线

表2 复合材料的热重结果

编号	$T_{0.01}/^{\circ}\text{C}$	$T_{0.05}/^{\circ}\text{C}$	$T_{0.1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{0.5}/^{\circ}\text{C}$	$T_f/^{\circ}\text{C}$	$R_{max}/(\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	$C_{600}/\%$
1 [#]	365.2	415.0	428.5	463.7	469.0	2.176	0.9
2 [#]	338.0	404.8	426.1	473.3	484.7	1.831	3.4
3 [#]	362.8	412.6	432.2	473.0	480.0	1.735	6.8
4 [#]	364.5	421.4	438.6	477.3	482.0	1.813	7.7
5 [#]	367.2	419.7	436.9	476.6	486.7	1.712	7.8
6 [#]	395.4	432.5	443.9	475.0	479.3	1.773	7.0

注: $T_{0.01}$, $T_{0.05}$, $T_{0.1}$, $T_{0.5}$, T_f , R_{max} , C_{600} 分别为失重1%,5%,10%,50%的温度、最大分解速率时的温度、最大分解速率和600℃的质量保持率。

由图5和表2可知,3[#],4[#],5[#]复合材料的 $T_{0.01}$ 分别为362.8,364.5℃和367.2℃,与纯PE-LD(1[#])的 $T_{0.01}$ 为365.2℃相比,略有降低或升高,说明相同总添加量10份,LDH/ZB的配比对复合材料的 $T_{0.01}$ 有一定的影响;600℃时的质量保持率(除3[#]外)均高于单加LDH(6[#])、单加ZB(2[#])或纯PE-LD(1[#])的质量保持率,其中5[#]试样的600℃时质量保持率最大,为7.8%,与纯PE-LD的600℃时质量保持率0.9%相比有显著的提高,说明LDH和ZB均对复合材料的热降解成炭有促进作用;单加LDH

(6[#])、单加ZB(2[#])和二者复配添加的复合材料的 T_f 均比纯PE-LD的 T_f 有显著的提高,且以5[#]试样的 T_f 达到了最大值486.7℃,提高了17.7℃;单加LDH(6[#])、单加ZB(2[#])和二者复配添加的复合材料的 R_{max} 均比纯PE-LD的 R_{max} 有所降低,以5[#]试样的 R_{max} 达到了最小值1.712%/℃,说明LDH和ZB对复合材料高温热稳定性提升明显,且配比对复合材料高温热稳定性提升有一定的影响。

2.2 复合材料的阻燃性能

图6给出了所有试样的LOI数据。由图6可

知,单一加入 10 份 LDH 或 ZB 后,复合材料的 LOI 有一定的升高,提高了复合材料的阻燃性能,说明了 LDH 和 ZB 都具有一定的阻燃性能。LDH 与 ZB 二者复配比例对复合材料的 LOI 有一定影响,当 LDH 与 ZB 的配比为 8 : 2 时,复合材料的 LOI 达到了最大值 21.2%。这与复合材料 TG 分析数据得到的结果一致。

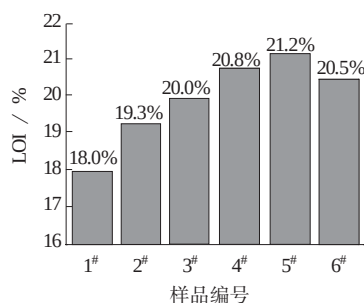


图6 不同 LDH 和 ZB 配比时 PE-LD/LDH/ZB 的 LOI

3 结论

(1) 通过 TG 考察了 LDH 对 PE-LD/LDH 复合材料的热降解性能影响,添加 LDH 后,PE-LD/LDH 复合材料的 $T_{0.01}$ 提高了 30.2℃, T_f 也提高了 10.3℃, R_{max} 有所减缓,600℃的质量保持率也提高到 7.0%,添加 LDH 可以提升 PE-LD/LDH 复合材料的热稳定性。

(2) 通过 TG 考察了 ZB 对 PE-LD/ZB 复合材料的热降解性能影响,添加 10 份 ZB 后,PE-LD/ZB 复合材料的 $T_{0.01}$ 降低了 27.2℃,这是由于 ZB 的 $T_{0.01}$ 较低所导致的, T_f 由 469.0℃提高到 484.4℃,提高了约 16℃, R_{max} 有所减缓,600℃的质量保持率也提高到 3.4%。说明 ZB 的添加降低了 PE-LD 热降解的速率,提高了聚乙烯主链的高温热稳定性。

(3) 对熔融共混法制备的 PE-LD/LDH/ZB 复合材料(3#,4#和5#)、PE-LD/ZB 复合材料(2#)和 PE-LD/LDH 复合材料(6#)进行 TG 分析可知,LDH 和 ZB 复配有一定的协同作用,在总添加量为 10 份时,当 LDH 为 8 份,ZB 为 2 份,5# PE-LD/LDH/ZB 复合材料的 $T_{0.01}$ 为 367.2℃比纯 PE-LD 的 $T_{0.01}$ 略高, T_f 达到了最大值 486.7℃,比纯 PE-LD 提高了 17.7℃, R_{max} 也达到了最小值 1.712%·℃⁻¹,600℃时的质量保持率也达到最大值 7.8%。

(4) 通过 LOI 试验考察 LDH 和 ZB 配比对复合材料阻燃性能的影响,单一加入 10 份 LDH 或 ZB 后,复合材料的 LOI 有一定的升高,说明了 LDH 和 ZB 都具有一定的阻燃性能。LDH 与 ZB 二者复配

比例对复合材料的 LOI 有一定影响,当 LDH 与 ZB 的配比为 8 : 2 时,复合材料的 LOI 达到了最大值 21.2%。

参考文献

- [1] 崔小明. 世界聚乙烯工业现状及生产工艺新进展 [J]. 工程塑料应用, 2005(8):72-75.
Cui Xiaoming. Production status and new progress of global polyethylene production processes[J]. Engineering Plastics Application, 2005(8):72-75.
- [2] 杨成兵,贾国仙,阮艳军. 国内 LDPE 生产工艺技术与应用现状 [J]. 辽宁化工, 2016, 45(8):1 099-1 101, 1 111.
Yang Chenbing, Jia Guoxian, Ruan Yanjun. Domestic LDPE production technologies and application situation[J]. Liaoning Chemical Industry, 2016, 45(8):1 099-1 101, 1 111.
- [3] Basu D, Das A, Stöckelhuber K W, et al. Advances in layered double hydroxide (LDH)-based elastomer composites[J]. Progress in Polymer Science, 2013, 594-626.
- [4] 张骅佼,田森林,周键. 镁铝水滑石的合成与应用研究进展 [J]. 材料导报, 2013, 27 (4):144-148.
Zhang Jiaojiao, Tian Senlin, Zhou Jian. Study on synthesis and application of Mg-Al hydrotalcite[J]. Materials Review, 2013, 27 (4):144-148.
- [5] Yildiz B, Seydibeyoglu M O, Guner F S. Polyurethane-zinc borate Composites with high oxidative stability and flame retardancy[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(7):1072-1075.
- [6] 李胜利. 硼酸锌的可控合成及阻燃性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Li Shengli. Controllable synthesis of zinc borate and the research performance of its flame retardant[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [7] 韩志东,王玥,赖文伟,等. 聚乙烯/水滑石复合材料的结构及其热降解行为 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(5):1-5.
Han Zhidong, Wang Yue, Lai Wenwei, et al. Structure and thermal degradation behaviors of PE/LDH composites[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2013, 18(5):1-5.
- [8] 张凯,秦军,谢普,等. 水滑石对 IFR/HDPE 复合材料的协效作用 [J]. 塑料科技, 2010, 38(10):50-54.
Zhang Kai, Qin Jun, Xie Pu, et al. Synergistic effect of LDH on IFR/HDPE composite[J]. Plastics Science and Technology, 2010, 38(10):50-54.
- [9] 陈文华,闵力珍,华正坤,等. 硼酸锌对氮磷协效阻燃玻纤增强尼龙 66 性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(5):14-18+39.
Chen Wenhua, Min Lizhen, Hua Zhengkun, et al. Influences of ZB on properties of nitrogen-phosphorus synergistic flame retardant GF reinforced PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5):14-18+39.

透性能增大,分离选择性降低。

参考文献

- [1] Matsumoto K, Xu P, Nishikimi T. Gas permeation of aromatic polyimides. I. Relationship between gas permeabilities and dielectric constants[J]. Journal of Membrane Science, 1993, 81(1-2):15-22.
- [2] Stern S A, Mi Y, Yamamoto H, et al. Structure / permeability relationships of polyimide membranes. Applications to the separation of gas mixture[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1989, 27(9):1 887-1 909.
- [3] O'Brien K C, Koros W J, Husk G R. Polyimide materials based on pyromellitic dianhydride for the separation of carbon dioxide and methane gas mixtures[J]. Journal of Membrane Science, 1988, 35(2):217-230.
- [4] 祁喜旺, 陈翠仙. PI 气体分离膜 [J]. 膜科学与技术, 1996(2):1-7.
Qi Xi Wang, Chen Cuixian. Polyimide membrane for gas separation[J]. Membrane Science and Technology, 1996(2):1-7.
- [5] Kzuhiro T, Islam M N, Masayoshi K, et al. Gas permeation and separation properties of sulfonated polyimide membranes[J]. Polymer, 2006, 47:4 370-4 377.
- [6] 王茂功, 钟顺和. 6FDA-TMPDA-DABA / TiO₂ 杂化膜的制备、表征和气体渗透性能 [J]. 功能材料, 2006, 10(37):1 609-1 616.
Wang Maogong, Zhong Shunhe. Preparation, characterization, and gas separation properties of 6FDA-TMPDA-DABA / TiO₂ hybrid membranes[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 10(37):1 609-1 616.
- [7] Shao L, Chung T S, Goh S H, et al. Transport properties of cross-linked polyimide membranes induced by different generations of diaminobutane (DAB) dendrimers[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 238(1-2):153-163.
- [8] 吴军. 含硅聚酰亚胺的合成与性能研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2011.
Wu Jun. Synthesis and performance study of silicon containing polyimide[D]. Wuhan: Hubei University, 2011.
- [9] 张丽丽. 聚酰亚胺 / 梯形聚倍半硅氧烷杂化薄膜的微观结构和性能的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
Zhang Lili. Microstructure and properties of polyimide / ladder-like polysilsesquioxane hybrid films[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [10] 王茂功, 钟顺和. 聚酰亚胺 / TiO₂ 复合膜的制备、表征和气体渗透性测定 [J]. 无机材料学报, 2007, 22(1):148-152.
Wang Maogong, Zhong Shunhe. Preparation, characterization, and gas separation properties of polyimide / TiO₂ composite membranes[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(1):148-152.
- [11] 宋芳芳, 郭兴忠, 程本军, 等. 锆溶胶的制备、稳定及氧化锆粉体的特性 [J]. 机械工程材料, 2006, 30(7):72-74.
Song Fangfang, Guo Xingzhong, Cheng Benjun, et al. The preparation, stability of zirconium sol and characteristics of ZrO₂ powder[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(7): 72-74.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.com,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账号汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)

(上接第 131 页)

- [10] 吴志平, 胡楚云, 陈美琴, 等. 超细硼酸锌对 LDPE / IFR 体系热稳定性的影响 [J]. 塑料科技, 2008, 36(11):86-89.
Wu Zhiping, Hu Yunchu, Chen Meiqin, et al. Effects of ultrafine zinc borate on the thermal stability of LDPE / IFR system[J]. Plastics Science and Technology, 2008, 36(11):86-89.
- [11] Wu Zhiping, Shu Wanyin, Hu Yunchu. Synergist flame retarding effect of ultrafine zinc borate on LDPE / IFR system[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(6):3 667-3 674.
- [12] 赵伟, 王丽. 硼酸锌在 LDPE 阻燃中的协效作用 [J]. 塑料科技, 2006(1):40-43.
Zhao Wei, Wang Li. The synergism effect of the zinc borate on fire retardancy of low density polyethylene[J]. Plastics Science and Technology, 2006(1):40-43.
- [13] 范惠琳, 何伟, 姜莹莹, 等. 硼酸根插层水滑石对软质 PVC 性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2011, 39(4):10-14.
Fan Huilin, He Wei, Jiang Yingying, et al. Effect of the borate-intercalation LDHs on property of soft PVC[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(4):10-14.
- [14] 李超, 刘忠, 惠岚峰. 镁铝水滑石制备阻燃纸的研究 [J]. 中华纸业, 2011, 32(2):39-42.
Li Chao, Liu Zhong, Hui Lanfeng. Studies on preparation of fire-retardant paper with Mg-Al hydrotalcites as a flame retardant[J]. China Pulp & Paper Industry, 2011, 32(2):39-42.
- [15] 杨芳, 杨晶, 杨瑞霞, 等. LDPE / 剑麻纤维素微晶复合材料性能研究 [J]. 塑料科技, 2016, 44(6):23-27.
Yang Fang, Yang Jing, Yang Ruixia, et al. Study on properties of LDPE / SFCM composites[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(6):23-27.