

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.024

润滑剂对 PP/IFR 复合材料性能的影响

叶淑英^{1,2}

(1. 重庆科聚孚工程塑料有限责任公司, 重庆 401332; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:以聚丙烯(PP)为基体树脂、FR-1420为无卤膨胀型阻燃剂,分别加入乙撑双硬脂酰胺(EBS)、聚乙烯(PE)蜡、硬脂酸锌(硬锌)、硅酮及聚偏氟乙烯(PVDF)等五种润滑剂来制备阻燃PP复合材料(PP/IFR),考察了润滑剂及其含量对PP/IFR的阻燃性能和力学性能的影响,并对材料的热分解行为及炭层结构进行了表征和分析。结果表明,FR-1420含量为21%,五种润滑剂含量在0.5%~2%范围内变化时,对PP/IFR复合材料的力学性能影响不大,而对阻燃性能产生了明显影响;EBS与阻燃剂产生对抗作用,不论添加量多少,都显著降低PP/IFR的阻燃性,垂直燃烧等级由V-0级降低至无级;PE蜡、硬锌、硅酮及PVDF的添加量都存在一个最大值,当低于最大值时,不会影响PP/IFR的阻燃性,垂直燃烧等级均为V-0级,而高于最大值时,则会降低PP/IFR的阻燃性;PE蜡、硬锌、硅酮及PVDF均会不同程度延后PP/IFR的起始分解温度,略微降低其成炭率。

关键词:聚丙烯;无卤阻燃;润滑剂;炭层

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)04-0113-05

Effect of Lubricants on Properties of PP/IFR Composites

Ye Shuying^{1,2}

(1. Chongqing Copolyforce Engineering Plastics Co., Ltd., Chongqing 401332, China;

2. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: The flame retardant PP resin was prepared by adding the halogen-free intumescent flame retardant (FR-1420) and five kinds of lubricants, such as EBS, PE wax, zinc stearate, silicone and PVDF. The effects of lubricants on the flame retardancy and mechanical properties of PP/IFR were studied, and the thermal behavior and char layer structure of PP/IFR were evaluated. The results show that the content of the five kinds of lubricants in the range of 0.5% to 2% has little effect on the mechanical properties of PP/IFR, but has a significant effect on the flame retardancy when the content of FR-1420 is 21%. EBS plays antagonistic effect on flame retardant, which will significantly reduce the flame retardancy of PP/IFR; there is a maximum addition amount of PE wax, zinc stearate, silicone and PVDF, when less than it, the flame retardancy of PP/IFR will not be affected, otherwise, it will be reduced; PE wax, zinc stearate, silicone and PVDF have different degree to delay the PP/IFR initial decomposition temperature, slightly to reduce its char yield.

Keywords: polypropylene; halogen-free flame retardant; lubricant; char layer

传统溴系阻燃剂燃烧时释放有毒有害气体^[1],危害人体健康且污染环境,将被逐渐淘汰和禁止使用^[2-3]。随着人们生活品质和环保意识的提高,对“无卤化”阻燃剂的呼声越来越强烈,膨胀型阻燃剂(IFR)以其无卤、低烟、低毒、不产生腐蚀性气体的优点^[4],得到了人们的普遍青睐,广泛应用于聚丙烯(PP)阻燃改性中。当PP阻燃等级达到UL94 V-0级时,IFR添加量高达20%及以上。IFR添加量越高,阻燃PP材料的流动性越差,不仅会引起IFR在基体中团聚而不易均匀分散,还会引起加工过程中熔体之间或熔体与设备之间摩擦力增大而使材料出现降解现象。因此,需要加入润滑剂来改善IFR的

分散性和润滑性,使阻燃PP的加工性能满足应用要求。

润滑剂按作用方式分为内润滑剂和外润滑剂两类^[5]。内润滑剂能降低聚合物分子链间的内聚力,改善流动性、加速材料熔融、降低熔体黏度、延长加工寿命及提高透明性;外润滑剂可降低聚合物熔体与加工设备表面的粘附力,提高外观光泽度、降低摩擦力及改善脱模性。PP常用润滑剂有烃类、硬脂酸酰胺类、金属皂类、有机硅类等^[6],其中烃类属于内

润滑剂,硬脂酸酰胺类、金属皂类、有机硅类等属于外润滑剂。

很多学者研究了润滑剂在 PP、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料、尼龙等材料中的应用及其对材料性能的影响,但主要局限于非阻燃材料方面^[7-11]。目前关于润滑剂对 PP/IFR 复合材料性能影响的研究报道非常少见。笔者选择乙撑双硬脂酰胺(EBS)、聚乙烯(PE)蜡、硬脂酸锌(硬锌)、硅酮和聚偏氟乙烯(PVDF)5种润滑剂为研究对象(其中 PE 蜡为内润滑剂,其余为外润滑剂),系统对比了这几种润滑剂对 PP/IFR 阻燃性能和力学性能的影响,并对材料的热分解行为及炭层结构进行了表征和分析。

1 实验部分

1.1 原材料

PP: K7926,上海赛科石油化工有限公司;

无卤膨胀型阻燃剂: FR-1420,自制;

PE 蜡: 市售;

EBS: 市售;

硬锌: 四川法拉盛化工有限公司;

硅酮: GTM-100,中蓝晨光化工研究院;

PVDF: F906,成都中氟化学品有限公司;

其它助剂: 市售。

1.2 仪器与设备

电子万能实验机: CMT4204 型,深圳新三思材料检测有限公司;

悬臂梁冲击实验机: ZBC1400-B 型,深圳新三思材料检测有限公司;

熔体流动速率(MFR)测试仪: ZRZ1452 型,深圳新三思材料检测有限公司;

垂直燃烧仪: CZF-2 型,南京江宁分析仪器有限公司;

热重(TG)分析仪: TA-Q600 型,美国 TA 仪器公司;

扫描电子显微镜(SEM): S-3700N 型,日本 Hitachi 公司;

同向双螺杆挤出机: TE-65 型,江苏科亚化工装备有限公司;

高速混合机: SHR-200 型,张家港亿利机械有限公司;

干燥机: SD-9 型,广州佳银塑机公司;

注塑机: SZ-90 型,广东东华塑料机械公司。

1.3 试样制备

各物料按表 1 配方比例,投入高速混合机混合

均匀,再通过双螺杆挤出机挤出造粒,挤出机从加料口到机头各段温度设置为 180,190,210,210,200,200,190℃,螺杆转速 360 r/min。粒料在干燥机中 95℃烘烤 4 h,通过注塑机成型测试样条,成型温度 180~210℃。

表 1 试样配方

试样编号	PP	FR-1420	EBS	PE 蜡	硬锌	硅酮	PVDF	其他助剂
0 [#]	78	21						1
1 [#]	77.5	21	0.5					1
2 [#]	77	21	1					1
3 [#]	76.5	21	1.5					1
4 [#]	76	21	2					1
5 [#]	77.5	21		0.5				1
6 [#]	77	21		1				1
7 [#]	76.5	21		1.5				1
8 [#]	76	21		2				1
9 [#]	77.5	21			0.5			1
10 [#]	77	21			1			1
11 [#]	76.5	21			1.5			1
12 [#]	76	21			2			1
13 [#]	77.5	21				0.5		1
14 [#]	77	21				1		1
15 [#]	76.5	21				1.5		1
16 [#]	76	21				2		1
17 [#]	77.5	21					0.5	1
18 [#]	77	21					1	1
19 [#]	76.5	21					1.5	1
20 [#]	76	21					2	1

1.4 测试与表征

垂直燃烧性能按 GB/T 2408-2008 测试,样品厚度为 3.2 mm;

拉伸强度按 GB/T 1040-2006 测试,拉伸速率为 50 mm/min;

冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试;

MFR 按 GB/T 3682-2000 测试;

TG 分析: 氮气气氛,以 10℃/min 速率升温,测定温度范围为 35~530℃;

形貌观察: 垂直燃烧测试残留的炭层制样,并将其表面喷金后采用 SEM 观察,加速电压 15 kV。

2 结果与讨论

2.1 润滑剂对 PP/IFR 阻燃性的影响

表 2 列出各种润滑剂对 PP/IFR 复合材料阻燃性能的影响。由表 2 可看出,润滑剂加入后对 PP/IFR 复合材料的阻燃性影响不同。不加润滑剂时第一次施加火焰后样条离火自熄,总燃烧时间为 20 s,垂直燃烧等级为 V-0 级。加入 EBS 则大幅降低了 PP/IFR 复合材料的阻燃性,垂直燃烧等级降为无级,说明它与阻燃剂产生了对抗作用;PE 蜡、硬锌、硅酮、PVDF 加入后,第一次施加火焰后样条均

离火自熄,总燃烧时间分别为 30,25,20,32 s,垂直燃烧等级均为 V-0 级,说明 1% 的 PE 蜡、硬锌、硅酮、PVDF 对阻燃剂没有产生明显负面影响。

表 2 润滑剂对 PP/IFR 阻燃性的影响

项目	0 [#]	2 [#]	6 [#]	10 [#]	14 [#]	18 [#]
单个试样余焰时间 (t_1 或 t_2)/s	≤ 10		≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
5 个试样总余焰时间 (t_1+t_2)/s	20		30	25	20	32
等级	V-0	NR	V-0	V-0	V-0	V-0

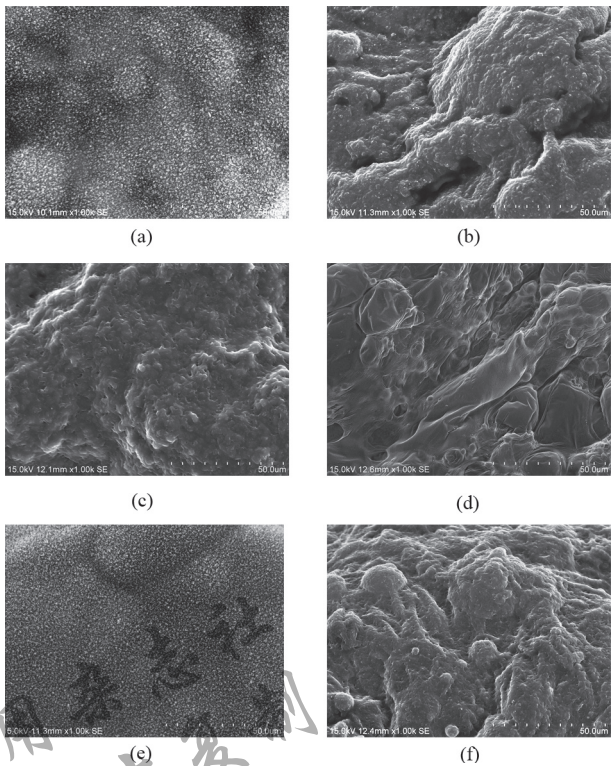
低含量时,不同润滑剂对 PP/IFR 复合材料的阻燃性能影响不同,这可能因润滑剂分子结构不同而在燃烧过程中与阻燃剂发生的反应不同,导致最终形成残炭量有差异而引起的。EBS 在 250℃ 开始分解^[12],其分解产物之一——胺类物质会中和阻燃剂的酸源;分解产物之二——NO、小分子气态烃等气体破坏炭层致密性,因此降低了阻燃效率。PE 蜡为低分子量的聚烯烃,在燃烧过程与 PP 的表现相似,不会对阻燃剂及炭层带来影响;硬锌中含有少量氧化锌,有文献研究发现氧化锌与阻燃剂有协同作用^[13],燃烧时氧化锌迁移至炭层外表面,提高炭层的稳定性。硅酮与阻燃剂反应在炭层表面形成 Si—O—P—C 结构的保护膜^[14],有利于炭层的致密性。PVDF 分解温度较高 477℃^[15],燃烧过程与阻燃剂发生反应可能性较低,不影响阻燃性及炭层。

图 1 为样条燃烧后残留的炭层表面形貌 SEM 照片(放大 500 倍)。图 1a 炭层比较平整、致密,覆盖在材料表面,起到隔热、隔氧和保护内部材料不被燃烧的作用。加入 EBS(图 1b)燃烧后表面有球状鼓包,说明材料在燃烧过程中内部产生了气泡^[16],形成的炭层蓬松且有大量孔洞、凹凸不平,不能阻隔热和氧的传递,因此降低了阻燃效果。分别加入 PE 蜡(图 1c)、硬锌(图 1d)和 PVDF(图 1f),燃烧后表面也有球状鼓包,说明材料在燃烧过程中内部也产生了气泡,但表面炭层致密;表明这几种润滑剂在燃烧中均能促使阻燃剂分解产生气体^[17],但又能使表面炭层致密,不影响阻燃效果。加入硅酮(图 1e),炭层平整、致密,也有利于材料的阻燃性。

2.2 润滑剂含量对 PP/IFR 复合材料性能的影响

表 3 为 EBS、PE 蜡、硬锌、硅酮和 PVDF 五种润滑剂含量对 PP/IFR 复合材料阻燃性能、力学性能和 MFR 的影响。

从表 3 可看出,润滑剂含量变化对 PP/IFR 复合材料的阻燃效果产生不同程度的影响,除 EBS 和



a—0[#]; b—2[#]; c—6[#]; d—10[#]; e—14[#]; f—18[#]

图 1 PP/IFR 复合材料的炭层 SEM 照片

表 3 润滑剂含量对 PP/IFR 复合材料性能的影响

试样编号	单个试样余焰时间/s	总余焰时间/s	垂直燃烧等级	拉伸强度/MPa	悬臂梁冲击强度/(kJ·m ⁻²)	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
0 [#]	≤ 10	20	V-0	20.4	52.8	18
1 [#]			NR	19.8	51.5	18.4
2 [#]			NR	18.7	50.2	18.6
3 [#]			NR	18.4	48.1	19.2
4 [#]			NR	17.2	46.5	20.1
5 [#]	≤ 10	22	V-0	19.9	48.0	18.4
6 [#]	≤ 10	30	V-0	19.9	46.3	19.6
7 [#]	≤ 10	35	V-0	19.9	44.8	20.7
8 [#]	≤ 10		NR	19.7	43.2	21.3
9 [#]	≤ 10	19	V-0	20.2	71.9	18.2
10 [#]	≤ 10	25	V-0	19.4	67.1	19.3
11 [#]	≤ 10	15	V-0	19.1	52.2	20.5
12 [#]	≤ 10	21	V-0	18.7	48.2	21.2
13 [#]	≤ 10	10	V-0	20.4	53.0	17.5
14 [#]	≤ 10	20	V-0	19.8	48.2	18.0
15 [#]	≤ 10	30	V-0	19.3	46.2	18.3
16 [#]	≤ 10	115	V-1	18.4	44.9	18.8
17 [#]	≤ 10	25	V-0	20.2	53.1	17.6
18 [#]	≤ 10	32	V-0	20.0	52.5	18.0
19 [#]	≤ 30	70	V-1	19.9	47.8	19.4
20 [#]			NR	19.8	46.8	20.0

硬锌外, PE 蜡、硅酮和 PVDF 都存在适合的添加范围。一旦加入 EBS, PP/IFR 的垂直燃烧等级均由 V-0 级变为无级,明显降低了材料的阻燃性,无论添

加量如何变化, EBS 都与阻燃剂产生对抗作用。PE 蜡含量在 0.5%~1.5% 之间变化时,随含量增加,总燃烧时间稍有延长,但垂直燃烧等级仍为 V-0 级;当含量为 2% 时,复合材料的阻燃性迅速下降,垂直燃烧等级降至无级;其适合添加量应不超过 1.5%。硬锌在 0.5%~2% 范围内变化时, PP/IFR 复合材料的垂直燃烧等级均为 V-0 级,未对阻燃效果产生明显影响。硅酮在 0.5%~1.5% 间变化时,总燃烧时间逐渐延长,垂直燃烧等级为 V-0 级;当含量增至 2% 时,垂直燃烧等级下降为 V-1 级;其合适添加量应不超过 1.5%。PVDF 随含量增加,阻燃性不断下降,含量为 1.5% 时,垂直燃烧等级降为 V-1 级;含量为 2% 时,垂直燃烧等级则降至无级;其合适添加量应不超过 1%。除 EBS 和硬锌外,几种润滑剂均有合适的用量范围,过量的润滑剂会加快阻燃剂的酯化作用,体系黏度的增加与发泡速率匹配不好,从而使燃烧产生的炭层质量变差,炭层更松软、缺乏支撑和包覆作用,对隔热隔氧不利^[18]。

由表 3 还可看出, EBS、PE 蜡、硬锌、硅酮、PVDF 的含量在 0.5%~2% 之间变化时,随着润滑剂含量的增加,拉伸强度和冲击强度略微下降, MFR 略微上升;但由于添加量较低,对 PP/IFR 复合材料的拉伸强度、冲击强度和 MFR 影响不大。

2.3 TG 测试

图 2 是润滑剂添加前后 PP/IFR 复合材料的 TG 和微分热重 (DTG) 曲线,表 4 为相关数据。因 EBS 对复合材料的阻燃性有负面影响,故不再对其进行讨论。

从图 2 可见,与未加润滑剂的 PP/IFR 复合材料相比,添加润滑剂后对材料的初始分解温度和最大分解温度带来了一定程度的影响,但 TG 曲线和 DTG 曲线趋势相似。0[#] 试样起始分解温度为 367℃,最大分解温度为 473℃,残炭率为 12.9%;6[#],10[#],14[#] 及 18[#] 的初始分解温度分别为 371,369,375,381℃,最大分解温度分别为 470,468,470,473℃,残炭率分别为 8.2%,11.3%,11.0%,9.0%。对比发现,加入润滑剂后,起始分解温度稍有延后,最大分解温度略有提前,残炭率略微下降。这可能是因为润滑剂对阻燃剂酯化分解形成炭层产生了抑制作用,从而使起始分解温度延后;同时,可能由于燃烧过程中热量增加,IFR 在酯化反应的过程中会熔融,炭层表面的润滑剂因自重而落入炭层内部^[19]形成小通孔,释放出体系内的热量、气体及微细炭颗粒

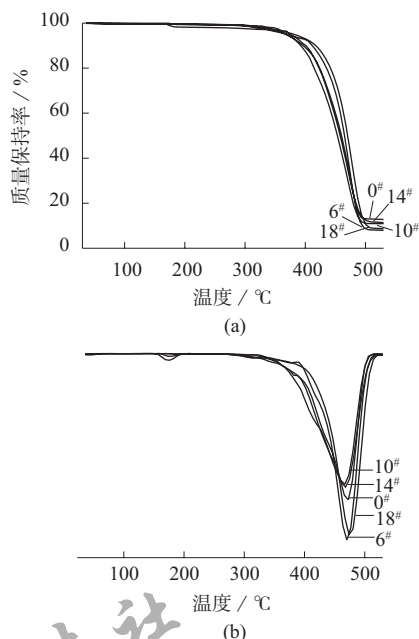


图 2 阻燃 PP 的 TG 和 DTG 曲线
a—TG 曲线; b—DTG 曲线

表 4 不同材料的热失重数据

试样编号	初始分解温度 / ℃	最大分解温度 / ℃	530℃残炭率 / %
0 [#]	367	473	12.9
6 [#]	371	470	8.2
10 [#]	369	468	11.3
14 [#]	375	470	11.0
18 [#]	381	473	9.0

等,使形成的炭层结构产生缺陷并造成一定程度的破坏,从而导致残炭率降低,但下降幅度不大^[20]。

3 结论

(1) EBS、PE 蜡、硬锌、硅酮及 PVDF 对 PP/IFR 复合材料的阻燃性影响不同。质量百分比均为 1% 时, EBS 与阻燃剂产生对抗作用,而 PE 蜡、硬锌、硅酮、PVDF 未对阻燃剂带来负面影响。PP/IFR 复合材料的阻燃效果好坏与炭层是否致密、是否完全覆盖在材料表面紧密相关。

(2) 当润滑剂质量百分比在 0.5%~2% 范围内变化时,对 PP/IFR 复合材料的拉伸强度、冲击强度及 MFR 影响不大,而对阻燃性有非常明显的影响。EBS 无论添加多少,均与阻燃剂产生对抗作用;硬锌的含量变化均不影响 PP/IFR 复合材料的阻燃性,垂直燃烧等级均为 V-0 级;PE 蜡、硅酮及 PVDF 在适合的添加量范围内不会影响 PP/IFR 复合材料的阻燃性,其添加质量百分比分别不超过 1.5%, 1.5%, 1%。

(3) TG 测试表明,加入 PE 蜡、硬锌、硅酮及

PVDF 后, PP/IFR 复合材料的起始分解温度稍有延迟, 成炭率略有下降, 但下降幅度不大。

参考文献

- [1] Camino G, Costa L, Martinasso G. Intumescent fire-retardant systems[J]. *Polym Degrad Stab*, 1989, 23:359–376.
- [2] Camino G, Costa L, Luda di Cortemiglia M P. Overview of fire retardant mechanisms[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1991, 33(2):131–154.
- [3] Li Chen, Wang Yuzhong. A review on flame retardant technology in China: Part I. Development of flame retardants[J]. *Polymer for Advanced Technologies*, 2010, 21(1):1–26.
- [4] 危加丽, 尹波, 杨鸣波, 等. 无卤阻燃 PP 的制备[J]. *合成树脂及塑料*, 2011, 28(3):10–12.
Wei Jiali, Yin Bo, Yang Mingbo, et al. Preparation of halogen-free flame retardant PP[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2011, 28(3):10–12.
- [5] 李杰, 刘芳, 夏飞, 等. 润滑剂的极性及对润滑作用的影响[J]. *聚氯乙烯*, 2005(3):26–28.
Li Jie, Liu Fang, Xia Fei, et al. The influences of polarity of lubricant on the lubricant effect[J]. *Polyvinyl Chloride*, 2005(3):26–28.
- [6] 杨士亮, 杨宏伟, 马玉红, 等. 塑料润滑剂的发展现状及应用[J]. *广州化工*, 2013, 41(2):20–21, 25.
Yang Shiliang, Yang Hongwei, Ma Yuhong, et al. Development and application of plastic lubricants[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(2):20–21, 25.
- [7] 李明, 袁茂全, 张勇, 等. 不同润滑剂对 PP/POE 性能的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2006, 18(5):35–38.
Li Ming, Yuan Maoquan, Zhang Yong, et al. Effect of lubricants on the properties of PP/POE blends[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2006, 18(5):35–38.
- [8] 阳范文, 杨清华, 谭绍浩, 等. 几种润滑剂性能比较及其对 ABS 熔融加工的影响[J]. *合成材料老化与应用*, 2014, 43(3):16–20.
Yang Fanwen, Yang Qinghua, Tan Minghao, et al. Comparison of lubricants performance and effect of them on ABS melt process[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2014, 43(3):16–20.
- [9] 付晓. 四种润滑剂对碳酸钙在塑料中的分散性的改善效果[J]. *塑料助剂*, 2013(6):45–49, 53.
Fu Xiao. Research of the effect of four lubricants on improvement of calcium carbonate dispersity in plastics[J]. *Plastics Additives*, 2013(6):45–49, 53.
- [10] 宋月华, 李文刚. 微量润滑剂对聚丙烯性能的影响[J]. *塑料*, 2012, 41(2):44–47.
Song Yuehua, Li Wengang. Properties of polypropylene with a minor addition of lubricants[J]. *Plastics*, 2012, 41(2):44–47.
- [11] 葛铁军, 于文强, 李越. 润滑剂对玻纤增强 PA66 的机械性能影响[J]. *沈阳化工学院学报*, 2008, 22(4):320–323.
Ge Tiejun, Yu Wenqiang, Li Yue. Study on influence of lubricant on properties of glass fiber reinforced PA66[J]. *Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology*, 2008, 22(4):320–323.
- [12] 鄯晶伟, 李文俐, 周彩荣. *N, N'*-乙撑双脂酰胺的热分解动力学研究[J]. *高校化学工程学报*, 2016, 30(5):1112–1118.
Qie Jingwei, Li Wenli, Zhou Cairong. Research on thermal decomposition kinetics of *N, N'*-ethylenebis(stearamide)[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2016, 30(5):1112–1118.
- [13] 孙杰, 焦传梅. 氧化锌与膨胀型阻燃剂对聚丙烯的协效阻燃[J]. *青岛科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(2):172–176.
Sun Jie, Jiao Chuanmei. Synergistic flame resistant effect of Zinc oxide and intumescent flame retardant in polypropylene[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 33(2):172–176.
- [14] 尹巧, 蒋涛, 张群朝. 硅酮粉与复合膨胀阻燃剂协同作用对聚丙烯阻燃性能的影响[J]. *胶体与聚合物*, 2015, 33(2):68–70.
Yin Qiao, Jiang Tao, Zhang Qunchao. Synergistic effect of silicone powder and composite expansion flame retardant on the properties of flame retardant of polypropylene[J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2015, 33(2):68–70.
- [15] 赵薇. 太阳能电池用氟塑料背膜的制备[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
Zhao Wei. Preparation of polyvinylidene fluoride film used as solar cell cashing film[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [16] 于宝刚, 卢林刚, 董希琳, 等. 膨胀型阻燃 PP 纳米复合材料的燃烧性能[J]. *塑料*, 2009, 38(5):89–91.
Yu Baogang, Lu Lingang, Dong Xilin, et al. Flammability of intumescent flame-retarded nanocomposites of polypropylene[J]. *Plastics*, 2009, 38(5):89–91.
- [17] 俞纪贤. 膨胀阻燃聚丙烯的增韧改性[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
Yu Jixian. Toughening of intumescent flame retardants polypropylene[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [18] 冯才敏, 刘洪波, 黄健光. MnO_2 对 MPP/PEPA 阻燃 PP 性能的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2009, 21(6):16–19.
Feng Caimin, Liu Hongbo, Huang Jianguang. Effect of MnO_2 on properties of PP retardant by MPP/PEPA[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2009, 21(6):16–19.
- [19] Camino G, Costa L. Intumescent fire-retardant systems[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1989, 23(4):359.
- [20] 黄承焕, 赵崇裕, 栗明, 等. 白炭黑改性膨胀阻燃剂对 PP/POE 燃烧及力学性能的影响[J]. *塑料科技*, 2011, 39(11):46–50.
Huang Chenghuan, Zhao Chongyu, Su Ming, et al. Effect of SiO_2 modified intumescent flame retardant on fire retardancy and mechanical properties of PP/POE[J]. *Plastics Science and Technology*, 2011, 39(11):46–50.