

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.005

高灼热丝阻燃玻纤增强聚丙烯的研究

刘莉莉^{1,2,3,4}, 马小丰^{1,2,3,4}, 李建华^{1,2,3,4}

(1. 开滦煤化工研发中心, 河北唐山 063611; 2. 河北省煤基材料与化学品工程技术研究中心, 河北唐山 063018; 3. 石油和化工行业聚甲醛制备及加工应用工程实验室, 河北唐山 063018; 4. 唐山市工程塑料开发及应用技术创新团队, 河北唐山 063018)

摘要:采用双螺杆挤出机共混的方法分别制备了氮-磷膨胀型阻燃聚丙烯(PP)、溴-锑阻燃 PP、氮-磷-溴-锑复配阻燃 PP 和氮-磷-溴-锑复配阻燃玻纤(GF)增强 PP, 通过力学性能测试、垂直燃烧测试、灼热丝燃烧测试、扫描电子显微镜和热重分析研究了阻燃 PP 的力学性能、阻燃性能和热性能。结果表明, 不同阻燃体系阻燃 PP 的垂直燃烧等级均达到 V-0 级, 灼热丝引燃温度均高于 790℃; 氮-磷-溴-锑复配阻燃剂的阻燃效果最优, 其阻燃 PP 的灼热丝引燃温度可达 850℃以上; 添加 10% 的 GF 可有效提高氮-磷-溴-锑复配阻燃 PP 的力学性能, 其拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别为纯 PP 的 1.59 倍、1.56 倍、1.93 倍和 1.88 倍, 同时灼热丝引燃温度仍在 850℃以上, 残炭率为 23.6%。

关键词: 聚丙烯; 氮-磷膨胀型阻燃剂; 溴-锑阻燃剂; 灼热丝; 力学性能

中图分类号: : TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0026-05

Study of High Glow Wire Flame Retardant Glass Fiber Reinforced Polypropylene

Liu Lili^{1, 2, 3, 4}, Ma Xiaofeng^{1, 2, 3, 4}, Li Jianhua^{1, 2, 3, 4}

(1. Coal Chemical R & D Center of Kailuan Group, Tangshan 063611, China;

2. Hebei Provincial Engineering Technology Research Center of Coal-based Chemicals and Materials, Tangshan 063018, China;

3. Engineering Laboratory of Preparation, Processing and Application of Polyoxymethylene for Petro and Chemical Industries, Tangshan 063018, China;

4. Engineering Plastics Development and Application Technology Innovation Team of Tangshan, Tangshan 063018, China)

Abstract : The nitrogen-phosphorus intumescent flame retardant polypropylene (PP), bromine-antimony flame retardant PP, nitrogen-phosphorus-bromine-antimony complex flame retardant PP and nitrogen-phosphorus-bromine-antimony complex flame retardant glass fiber (GF) reinforced PP were prepared by methods of blending in twin screw extruder separately. Mechanical properties and flame retardant properties and thermal properties of the flame retardant PP were studied through mechanical property test, vertical combustion test, glow wire combustion test, scanning electron microscope and thermogravimetric analysis. The results show that the vertical combustion levels of different flame retardant PP all reach V-0 and the glow wire ignition temperature are all above 790℃. The flame retardant effect of nitrogen-phosphorus-bromine-antimony complex flame retardant is the best, the glow wire ignition temperature of flame retardant PP can reach above 850℃. When 10% GF using as reinforcer are added, the mechanical properties of the nitrogen-phosphorus-bromine-antimony complex flame retardant PP are improved significantly, compared with the pure PP, the tensile strength, Izod notched impact strength, flexural strength and flexural modulus of elasticity are 1.59 times, 1.56 times, 1.93 times and 1.88 times of that of pure PP, respectively, and the glow wire ignition temperature is still above 850℃, the carbon residue rate is 23.6%.

Keywords : polypropylene ; nitrogen-phosphorus intumescent flame retardant ; bromine-antimony flame retardant ; glow wire ; mechanical property

聚丙烯(PP)具有良好的耐热性、化学稳定性好、质量轻、无毒、无味、易于加工,被广泛应用于生产和生活中^[1]。通过对 PP 进行增强改性,可进一步扩大其在家用电器、化工、建材等领域的应用,同时

通讯作者: 李建华,高级工程师,博士在读,现从事聚合物合成、改性及下游应用产品开发研究工作 E-mail : ecljh@kailuan.com.cn

收稿日期: 2018-10-23

引用格式: 刘莉莉,马小丰,李建华. 高灼热丝阻燃玻纤增强聚丙烯的研究[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1): 26-30, 37.

Liu Lili, Ma Xiaofeng, Li Jianhua. Study of high glow wire flame retardant glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 26-30, 37.

取代部分工程塑料。但是 PP 非常容易燃烧,其极限氧指数 (LOI) 只有 17.4%~18.5%,在燃烧过程中释放出大量的热,同时火焰传播的速度非常快,并有发烟、滴落的现象,很容易引起大面积火灾的发生。因此对 PP 进行阻燃改性,增加其热稳定性,降低燃烧速率显得尤为重要^[2-4]。

由于 PP 分子链上没有活性基团,其阻燃剂一般以添加型为主,主要分为卤系阻燃剂、膨胀型阻燃剂、无机填充型阻燃剂等^[5-7]。近年来,PP 的阻燃改性研究一直受到人们的重视,白洁等^[8]将壳聚糖 (CS) 作为膨胀型阻燃剂的碳源、聚磷酸铵 (APP) 作为膨胀型阻燃剂的酸源和气源,通过熔融共混的方法制备了 PP/CS/APP 复合材料,结果表明 CS/APP 添加量为 30% 时,复合材料的 LOI 达到 28.1%,且烟气释放总量、CO 和 CO₂ 排放明显降低,复合材料的阻燃性能大幅度提升。王娜等^[9]通过共混的方法制备了勃姆石阻燃改性 PP 复合材料,研究结果表明,添加勃姆石后,复合材料的 LOI 提高,抑制了熔滴的滴落,垂直燃烧级别达到 UL94 V-0 级。李丽英等^[10]采用双螺杆挤出机共混的方法制备了磷-氮系膨胀型阻燃剂与玻璃纤维 (GF) 改性 PP 共混物,垂直燃烧等级达到 UL94 V-0 级。鲍文波等^[11]研究了 Orient 系列膨胀阻燃剂在 PP 中的阻燃性能,结果表明, Orient 系列阻燃剂具有良好的耐燃性,其阻燃 PP 通过了 850℃灼热丝试验。赵杰等^[12]研究了磷-氮膨胀型阻燃剂 (NPR) 对 PP 阻燃性能的影响,当 NPR 添加量为 40% 时, LOI 为 23.3%,材料无法点燃,垂直燃烧等级达到 UL94 V-0 级。郭建鹏等^[13]研制了一种新型轻质环保阻燃 PP 材料,当溴盐阻燃剂、聚磷酸盐、三聚氰胺氰尿酸盐、抗氧剂、抗铜剂、聚丙烯用量分别为 1%,1.5%,3%,0.3%,0.2%,94% 时,可使 PP 的阻燃等级达到 UL94 V-2 级 (1.6 mm), LOI 达到 36%,750℃不起燃。孔伟等^[14]通过熔融共挤出法制备了阻燃连续长玻璃纤维增强 PP 复合材料,研究发现,当连续长玻璃纤维含量为 40%,自制复配无卤阻燃剂含量为 17% 时,材料的力学性能最优,且灼热丝引燃温度达到 960℃。

有关 PP 阻燃的研究虽然很多,但关于采用熔融共混制备法同时实现增强及灼热丝阻燃 PP 的研究却较少。由于阻燃剂的添加往往会使 PP 的力学性能劣化,影响其部分应用,因此,开发同时具有优异的灼热丝阻燃性能和力学性能的 PP 具有重要意

义,可在汽车、家用电器等领域获得广泛应用。笔者研究对比了氮-磷膨胀型阻燃剂、溴-锑阻燃剂、氮-磷-溴-锑复配型阻燃剂对 PP 耐灼热丝阻燃的性能,并通过添加 GF 制备出了高灼热丝阻燃 GF 增强 PP。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP: R370Y, 韩国 SK 集团;

三氧化二锑 (Sb₂O₃): 纯度 99.8%, 上海君颂阻燃材料有限公司;

聚四氟乙烯 (PTFE): MP1400, 美国杜邦公司;

十溴二苯乙烷: 纯度 99%, 济南豪邦化工有限公司;

GF: ER5308, 重庆国际复合材料有限公司;

三聚氰胺聚磷酸盐 (MPP): 深圳市宏泰基实业有限公司;

抗氧剂: 1010, 苏州市集信商贸有限公司。

1.2 主要仪器与设备

注塑机: MA2000II/700 型, 海天塑机集团有限公司;

电热式真空干燥箱: ZK1S 型, 天津中环实验电炉有限公司;

双螺杆挤出机: SHJ-30 型, 兰州天华设计研究院;

万能材料试验机: 5966 型, 美国 INSTRON 公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC7750-B 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

切口机: 6898 型, 意大利 CEAST 公司;

垂直燃烧测试仪: Byes94 型, 邦亿精密量仪 (上海) 有限公司;

灼热丝燃烧试验机: Byes200 型, 邦亿精密量仪 (上海) 有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-4700 型, 株式会社日立制作所;

热重 (TG) 分析仪: TGA4000 型, 美国 PE 公司。

1.3 试样制备

经过大量实验优化,筛选确定了 4 种阻燃 PP 配方,1[#]样品为氮-磷膨胀型阻燃 PP,2[#]样品为溴-锑阻燃 PP,3[#]样品为氮-磷-溴-锑复配阻燃 PP,4[#]样品为氮-磷-溴-锑复配阻燃 GF 增强 PP,各组分具体比例列于表 1。

表1 阻燃PP配方

编号	PP	MPP	抗氧剂	十溴二苯乙烷	Sb ₂ O ₃	GF
1 [#]	75	24	1	0	0	0
2 [#]	75	0	1	20	4	0
3 [#]	75	12	1	10	2	0
4 [#]	65	12	1	10	2	10

分别将 MPP、抗氧剂、十溴二苯乙烷、Sb₂O₃ 与干燥后的 PP 按表 1 中配方称取,放入高速混合机内混合均匀,GF 从侧喂料口加入,混合的物料经过双螺杆挤出机共混、造粒,干燥后制备出阻燃 PP 专用料,再用注塑机制得标准试样。加工工艺参数为:双螺杆挤出机机筒温度:第一区 175℃、第二区 180℃、第三区 185℃、第四区~第六区 195℃、第七区 193℃、第八区 193℃;机头温度:195℃;螺杆转速:150~200 r/min;喂料转速:12~15 r/min;注塑温度:第一区 175℃、第二区 188℃、第三区 200℃、第四区 200℃。

1.4 性能测试

(1) 力学性能。

拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 测试,试样尺寸为 170 mm×10 mm×4 mm,测试速率为 50 mm/min;

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,测试速率为 2 mm/min,试样支点跨度为 64 mm;

悬臂梁缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试,A 型缺口,缺口底部半径为 (0.25±0.05) mm,摆锤能量为 2.75 J,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。

(2) 垂直燃烧性能。

按 GB/T 2408-2008 测试,测试条件:火焰高度 20 mm,室温 25℃。

(3) 灼热丝燃烧性能。

按 GB/T 5169.13-2013 测试,样品厚度为 3 mm。

(4) SEM 分析。

对经垂直燃烧测试后的残炭结构通过制样喷金处理后进行扫描。

(5) TG 分析。

在氮气气氛下,将样品以 10℃/min 的升温速率从室温加热至 650℃,记录样品的 TG 曲线。

2 结果与讨论

2.1 阻燃体系对 PP 力学性能的影响

表 2 为 4 种样品的力学性能。

表2 阻燃PP的力学性能

项目	纯 PP	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
拉伸强度 / MPa	24.3	20.6	21.3	22.0	38.6
悬臂梁缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	3.6	2.8	3.0	3.2	5.6
弯曲强度 / MPa	28.5	22.3	25.4	26.6	55.1
弯曲弹性模量 / MPa	1057	1170	1260	1218	1984

由表 2 可知,1[#],2[#],3[#] 样品的拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度和弯曲强度接近,与纯 PP 相比,均有所下降,但弯曲弹性模量与纯 PP 相比有所增加。这是由于加入阻燃剂后,阻燃剂与 PP 的相容性差,界面结合弱,当阻燃剂粉体加入量较大时容易产生团聚,进而在材料的内部形成缺陷,当受到外力时,在缺陷处先发生断裂,因而致使材料的拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度和弯曲强度下降;此外,由于阻燃剂粉体有一定的刚性,分散在塑料基体内能起到减小变形和提高模量的作用,因而其弯曲弹性模量有所增加。4[#] 样品是在 3[#] 样品的基础上加入了 10% 的 GF,从表 2 中可以看出,材料的拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度、弯曲强度和弯曲弹性模量与纯 PP 相比都明显提高,分别为纯 PP 的 1.59 倍、1.56 倍、1.93 倍和 1.88 倍。这是由于加入适量的 GF,使其在 PP 基体内实现均匀分散,形成有效的界面层,界面的粘结性使 PP 基体与 GF 之间实现应力的有效传递,GF 成为应力集中点,起到增强的作用,在一定程度上弥补了阻燃剂恶化体系力学性能的缺陷。由于基体内同时加入阻燃剂和 GF 会使 PP 的加工性能变差,因此,在满足改性效果,并保证材料加工性能的前提下,选取了加入 10% 的 GF。

2.2 阻燃体系对 PP 阻燃性能的影响

表 3 为 4 种样品的阻燃性能。

表3 阻燃PP的阻燃性能

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
垂直燃烧等级	V-0	V-0	V-0	V-0
灼热丝引燃温度 / ℃	790	800	> 850	> 850

由表 3 可以看出,1[#] 样品和 2[#] 样品的灼热丝引燃温度分别为 790℃和 800℃;3[#] 样品和 4[#] 样品与 850℃灼热丝接触未燃烧,表明其灼热丝引燃温度达到了 850℃以上,具有优异的阻燃性能。说明氮-磷膨胀型阻燃剂和溴-锑阻燃剂复配具有良好的协同作用,850℃温度下阻燃剂分解形成的残炭及分解物将灼热丝包覆,阻碍热量传递,从而使火苗熄灭,起到阻燃的作用。

由表 3 还可以看出,4 种样品的垂直燃烧等级均达到了 V-0 级。1[#] 样品为氮-磷膨胀型阻燃 PP,因加入了氮-磷膨胀型阻燃剂,氮-磷起到协

同阻燃的效果,在燃烧受热时生成强脱水剂聚偏磷酸或聚磷酸,熔融覆盖在 PP 的表面,使 PP 表面脱水形成炭膜,起到阻隔热量传递的作用,达到阻燃效果。另一方面,含氮阻燃剂在炭层形成的过程中分解产生氨气等不燃性气体,这些气体在经过炭层时使炭层发生膨胀,最终形成蓬松的多孔炭层,阻隔氧气和可燃性气体,并且阻止热量在 PP 基体中进一步释放和扩散,减缓 PP 产生熔滴以阻止燃烧^[15]。

2[#] 样品为溴-锑阻燃 PP,由于在燃烧过程中产生了挥发性的气体 HBr 和 SbBr₃,HBr 能捕捉燃烧反应中的活性自由基,中断链反应,使 PP 的燃烧速度减慢,同时 SbBr₃ 能够覆盖在火焰上,隔绝氧气和可燃物,从而有效改善 PP 的阻燃性能^[16]。

3[#] 样品为氮-磷-溴-锑复配型阻燃 PP,采用氮-磷膨胀型阻燃剂与溴-锑阻燃剂复配,两种阻燃体系同时起到阻燃效果,并产生协同阻燃的作用,使阻燃 PP 的燃烧等级达到 V-0 级,同时灼热丝引燃温度高于 850℃^[17]。

4[#] 样品是在 3[#] 样品的基础上加入了 10% 的 GF,对阻燃 PP 进行增强。实验结果显示,加入 GF 后,PP 的垂直燃烧等级仍达到 V-0 级,850℃灼热丝下不被引燃,实现了对 PP 的增强、阻燃改性。因为 GF 为无机纤维,自身不燃烧,且导热系数较低,可起到隔热的作用,因此,加入 GF 未对 PP 的阻燃性能产生不利的影响;另一方面,GF 作为增强材料,具有优异的力学性能,在基体内通过拔出、断裂等形式吸收能量,进而起到增强的作用。

2.3 垂直燃烧样品表面结构分析

4 种阻燃 PP 垂直燃烧后样品的外观图如图 1 所示。

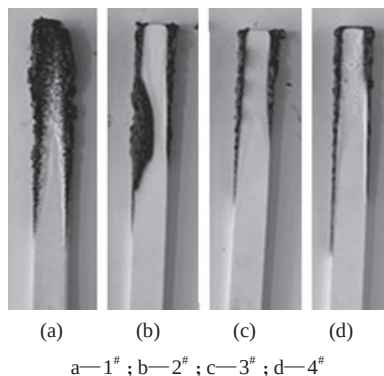


图 1 垂直燃烧后样品的外观图

由图 1 可观察出,1[#] 样品燃烧后表面形成了大量膨胀炭层,这主要是氮-磷阻燃剂在燃烧过程产生的;2[#] 样品的表面形成少量由无数封闭孔洞

构成的蜂窝状蓬松的焦化炭层,为十溴二苯乙烷和 Sb₂O₃ 在燃烧过程中产生的 SbBr₃ 包覆在样品表面;3[#] 样品和 4[#] 样品的外围仅有很少量的炭层。结果表明,3[#] 样品和 4[#] 样品的阻燃效果最佳,这与灼热丝燃烧试验结果一致。

为对燃烧后样品的表面结构进一步分析,分别对垂直燃烧后的 4 种样品的表面残炭进行 SEM 观察,结果如图 2 所示。

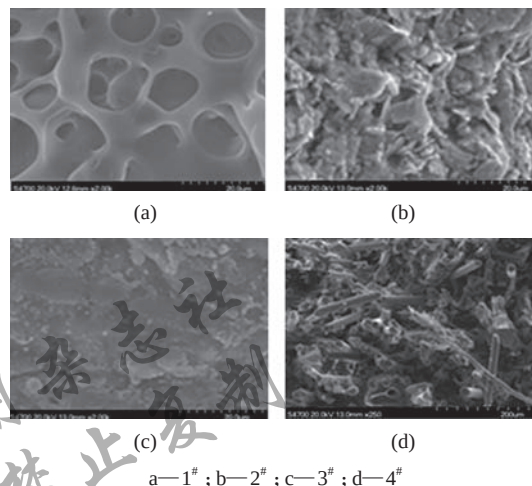


图 2 垂直燃烧后样品表面残炭的 SEM 照片

由图 2 可以看出,1[#] 样品垂直燃烧后的表面炭层有分布均匀的孔隙,这是由于含氮阻燃剂在炭层形成过程中分解产生氨气等不燃性气体,这些气体在经过炭层时使炭层发生膨胀,从而形成多孔的发泡膨胀炭层。2[#] 样品垂直燃烧后的表面炭层比较致密且连续,呈现褶皱状,能够有效抑制燃烧过程中热量的逸散和气体的交换,充分发挥阻燃作用。与 1[#] 和 2[#] 样品垂直燃烧后的表面炭层相比,3[#] 样品垂直燃烧后的表面炭层更加致密连续,均一性和封闭性更好,这种炭层结构不但能有效地减少 PP 暴露于火焰中的面积,更进一步抑制燃烧过程中气体的交换和热量的逸散,从而达到更好的阻燃效果^[17]。由图 2d 可观察出,GF 均匀分散在 4[#] 样品垂直燃烧后的表面炭层中,与炭层融合在一起,在炭层的破裂处,因相互搭接而形成支撑骨架,在燃烧过程中这种结构使炭层不容易出现大面积塌陷,并且减少了燃烧物的滴落,GF 在起到增强作用的同时,保持了复配阻燃剂的阻燃效果^[10]。

2.4 TG 分析

对纯 PP 和 3[#],4[#] 样品进行 TG 分析,研究氮-磷-溴-锑复配型阻燃剂对 PP 热分解过程的影响,结果如图 3 所示。

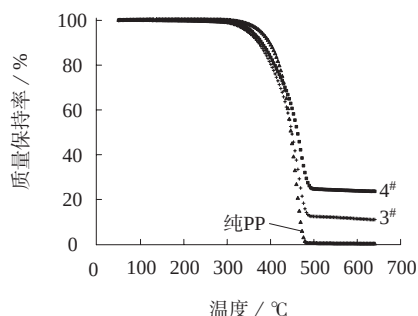


图3 纯PP和3[#],4[#]样品的TG曲线

从图3可以看出,纯PP的初始热分解温度在355℃左右,475℃时完全分解,几乎没残炭存在。3[#]样品的初始热分解温度较纯PP有了明显降低,为330℃左右,490℃左右分解曲线趋于平稳,至650℃时样品的残炭率为11%。3[#]样品的初始热分解温度降低是由于阻燃剂率先分解,而后逐渐形成焦炭层和SbBr₃等残留物,起到阻隔传热的作用,进而延缓PP的分解速率,且最终有残炭存留。4[#]样品的TG曲线与3[#]样品的趋势基本一致,但初始热分解温度和终止分解温度略高于3[#]样品,650℃时样品的残炭率为23.6%。说明GF的加入未影响阻燃体系的阻燃过程,分解温度和残炭率的提高是由于在此温度范围内GF未产生分解,存留于残余样品中,且GF的导热系数低,在加热过程中可起到一定的隔热作用。

3 结论

(1) 氮-磷膨胀型阻燃PP、溴-锑阻燃PP、氮-磷-溴-锑复配阻燃PP和氮-磷-溴-锑复配阻燃GF增强PP的垂直燃烧级别均为V-0级,灼热丝引燃温度分别为790℃,800℃,>850℃,>850℃。氮-磷膨胀型阻燃剂与溴-锑阻燃剂复配产生协同阻燃的作用,形成致密连续的炭层,阻燃效果更佳。

(2) GF的增强作用弥补了阻燃剂对PP力学性能的影响,添加10%的GF时,氮-磷-溴-锑复配阻燃GF增强PP的拉伸强度、悬臂梁缺口冲击强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别为纯PP的1.59倍,1.56倍,1.93倍和1.88倍,且灼热丝引燃温度仍在850℃以上。

(3) TG分析结果显示,氮-磷-溴-锑复配阻燃体系的加入使PP的初始热分解温度降低,650℃时,氮-磷-溴-锑复配阻燃PP的残炭率为11%,氮-磷-溴-锑复配阻燃GF增强PP的残炭率为23.6%。

参考文献

- [1] 刘建超,许苗军,李斌.聚磷酸铵的疏水改性及聚丙烯阻燃性能[J].高等学校化学学报,2015,36(6):1228-1235.
Liu Jianchao, Xu Miaojun, Li Bin. Hydrophobic modification of ammonium polyphosphate and its application in flame retardant polypropylene composite[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2015, 36(6):1228-1235.
- [2] 沈叶龙,孟成铭,孙凯.无卤阻燃增强聚丙烯的制备[J].塑料工业,2014,42(6):42-45.
Shen Yelong, Meng Chengming, Sun Kai. Preparation of halogen-free flame retardant and reinforced polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(6):42-45.
- [3] 秦兆鲁,李定华,杨荣杰.钛酸酯偶联剂改性聚磷酸铵及其在阻燃聚丙烯中的应用[J].高分子材料科学与工程,2015,31(12):84-91.
Qin Zhaolu, Li Dinghua, Yang Rongjie. Surface modification of ammonium polyphosphate with titanate coupling agent and its application on flame retardant polypropylene[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015, 31(12):84-91.
- [4] 王宇,许苗军,李斌.三嗪膨胀阻燃剂/聚苯醚阻燃聚丙烯的性能研究[J].塑料科技,2016,44(5):83-86.
Wang Yu, Xu Miaojun, Li Bin. Study on properties of polypropylene with triazine intumescent flame retardant/polyphenylene oxide system[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(5):83-86.
- [5] Pappalardo S, Russo P, Acierno D, et al. The synergistic effect of organically modified sepiolite in intumescent flame retardant polypropylene[J]. European Polymer Journal, 2016, 76:196-207.
- [6] 叶淑英.几种无卤膨胀型阻燃剂对聚丙烯性能的影响[J].塑料工业,2017,45(7):120-124.
Ye Shuying. The influence of several halogen-free intumescent flame retardants on properties of polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):120-124.
- [7] Feng Caimin, Liang Minyi, Jiang Jiali, et al. Synergism effect of CeO₂ on the flame retardant performance of intumescent flame retardant polypropylene composites and its mechanism[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2016, 122:405-414.
- [8] 白洁,薛宝霞,杨雅茹,等.壳聚糖/聚磷酸铵膨胀阻燃PP的阻燃及抑烟性能[J].工程塑料应用,2017,45(7):119-123.
Bai Jie, Xue Baoxia, Yang Yaru, et al. Flame retardancy and smoke suppression of intumescent flame retardant PP with chitosan/ammonium phosphate[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):119-123.
- [9] 王娜,赵莹,朱明,等.勃姆石阻燃改性PP复合材料的制备及其性能研究[J].塑料科技,2017,45(11):36-40.
Wang Na, Zhao Ying, Zhu Ming, et al. Study on properties of boehmite flame retardant modified PP composites and its preparation[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(11):36-40.
- [10] 李丽英,杨玮婧,孟永智,等.磷-氮系膨胀型阻燃剂改性玻纤

- and application of foamed polypropylene[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(2):22–25.
- [5] 张伟. 高熔体强度聚丙烯发泡材料的制备及性能研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- Zhang Wei. Preparation and properties of high melt strength polypropylene foam[D]. Hefei: Anhui University, 2016.
- [6] Xu Zhimei, Jiang Xiulei, Liu Tao, et al. Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide[J]. Polymer, 2007, 41:299–310.
- [7] 郭鹏, 吕明福, 吕芸, 等. 聚丙烯发泡材料的研究进展[J]. 石油化工, 2011(6):679–684.
- Guo Peng, Lu Mingfu, Lyu Yun, et al. Research progress in polypropylene foams[J]. Petrochemical Technology, 2011(6):679–684.
- [8] 周吓星, 陈礼辉, 林巧佳. 竹粉/聚丙烯发泡复合材料的增韧效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2):266–272.
- Zhou Xiaxing, Chen Lihui, Lin Qiaojia. Toughening effect of bamboo flour /polypropylene foamed composite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (2):266–272.
- [9] 王朝, 李姜, 郭少云. 超临界 CO₂ 下聚丙烯/乙烯-辛烯共聚物共混物微孔发泡材料的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(10):108–113.
- Wang Chao, Li Jiang, Guo Shaoyun. Preparation of microcellular polypropylene / poly(octene-ethylene) foams by using supercritical carbon dioxide[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(10):108–113.
- [10] Kumar V, Suh N P. A process for making microcellular thermoplastic parts[J]. Polymer Engineering & Science, 1990, 30(20):1 323–1 329.
- [11] Kokta B V, Maldas D, Daneault C, et al. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers. III: Effect of Silane as Coupling Agent[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 1990, 12(3):146–153.
- [12] 胡文涛, 郝长印, 严正. 成型工艺对超临界二氧化碳发泡 HMSPP 结构与性能的影响[J]. 塑料工业, 2017(6):74–79.
- Hu Wentao, Hao Changyin, Yan Zheng. Influence of molding process on structure and properties of HMSPP foams by supercritical carbon dioxide[J]. China Plastics Industry, 2017(6):74–79.
- [13] 杨明警, 严正, 苏旺, 等. 成型工艺对超临界 CO₂ 发泡 PP 结构与性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(1):62–67.
- Yang Mingjing, Yan Zheng, Su Wang, et al. Influence of molding process on structure and properties of polypropylene foams in supercritical CO₂[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):62–67.
- [14] 熊业志, 王学林, 张荣, 等. 聚丙烯/木粉釜压珠粒发泡研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(5):62–65.
- Xiong Yezhi, Wang Xuelin, Zhang Rong, et al. Study on bead foaming of polypropylene/wood flour composites with autoclave method[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(5):62–65.
- [15] 王霞, 李浩, 宋永明, 等. 木粉/聚丙烯复合材料的流变性能研究[J]. 西南林业大学学报, 2016(4):145–151.
- Wang Xia, Li Hao, Song Yongming, et al. Research on rheological properties of wood flour/polypropylene composites[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016(4):145–151.
- [16] 钟亚林, 黄汉雄. 基于相形态的微孔发泡 PP/POE 共混物泡孔结构调控[J]. 高分子学报, 2015(6):720–726.
- Zhong Yalin, Huang Hanxiong. Cellular structure manipulation of microcellular pp/poe blends based on phase morphology[J]. Acta Polymerica Sinica, 2015(6):720–726.
- (上接第 30 页)
- 增强聚丙烯[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):115–119.
- Li Liying, Yang Weijing, Meng Yongzhi, et al. Phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant modified glass fiber reinforced polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9) : 115–119.
- [11] 鲍文波, 季洋, 高苏亮, 等. Orient 系列膨胀阻燃剂在聚丙烯中的应用[J]. 塑料工业, 2013, 41(2):111–114.
- Bao Wenbo, Ji Yang, Gao Suliang, et al. Application of orient intumescent flame retardants on PP[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(2) : 111–114.
- [12] 赵杰, 解田. 一种膨胀型阻燃剂阻燃聚丙烯性能的研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(6):114–117.
- Zhao Jie, Xie Tian. Study on properties of polypropylene flame retarded by intumescent flame retardant[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(6) : 114–117.
- [13] 郭建鹏, 孔伟, 杨涛, 等. 新型轻质环保阻燃聚丙烯材料研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(6):129–131.
- Guo Jianpeng, Kong Wei, Yang Tao, et al. Study on new lightweight and environmental flame retardant polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(6) : 129–131.
- [14] 孔伟, 郭建鹏, 朱晓龙, 等. 无卤阻燃连续长玻璃纤维增强 PP 的性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(5):30–33.
- Kong Wei, Guo Jianpeng, Zhu Xiaolong, et al. Though properties of halogen-free flame-retardant long-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. China Plastics, 2015, 29(5) : 30–33.
- [15] 冯坤豪, 吴樊, 陈美玲, 等. 无卤阻燃聚丙烯的研究进展[J]. 中国塑料, 2015, 29(6):7–12.
- Feng Kunhao, Wu Fan, Chen Meiling, et al. Research advance in halogen-free flame retardant polypropylene[J]. China Plastics, 2015, 29(6) : 7–12.
- [16] 颜龙, 徐志胜. 溴系协效阻燃体系对 PP 阻燃和生烟性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7):114–117.
- Yan Long, Xu Zhisheng. Effect of TBAB-Sb₂O₃ and TBAB-Bi₂O₃ on flame retardancy and smoke properties of polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(7) : 114–117.
- [17] 李豪, 何园, 吴燕鹏, 等. 磷-氮膨胀型阻燃剂和溴系阻燃剂复配阻燃聚丙烯的研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(7):63–69.
- Li Hao, He Yuan, Wu Yanpeng, et al. Study of flame-retardant polypropylene based on phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant and brominated flame retardant[J]. China Plastics, 2017, 31(7) : 63–69.