

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.004

快速成型高光耐热阻燃 PP 制备及性能

陈超,秦凡,陈东

(上海日之升科技有限公司,上海 201109)

摘要:通过差示扫描量热仪、力学性能和阻燃性能测试仪器、老化试验设备及光学显微镜等测试手段评价了聚丙烯(PP)原料、阻燃剂和抗氧化剂分别对 PP 结晶速率、光泽度、阻燃性能和老化性能等的影响,制备了结晶快速、耐高温较好的高光耐热阻燃 PP。研究结果显示,添加 4 份磷氮溴复配阻燃剂(Br-N-P),0.3 份硫醚类辅助抗氧化剂(S-2),PP 的光泽度达到 73、阻燃级别达到 V-2 级并通过灼热丝可燃性指数 750℃测试。由于分子结构的差别,所选 PP 原料的半结晶速率为 24.3 s;氮磷膨胀阻燃剂对 PP 光泽度的影响最大,使光泽度降低 41.2%;八溴醚和 Br-N-P 阻燃剂对 PP 光泽度的影响较小,其光泽度分别达到 76,73,S-2 可以大大提高阻燃 PP 的抗粉化性,150℃时的热氧粉化开始时间为 37 d,而受阻胺类抗氧化剂的抗粉化效果较差;制备的快速成型高光耐热阻燃 PP 在 140℃长期热氧老化条件下,拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度呈现了不同的衰减幅度,缺口冲击强度下降最大,为 35.6%,拉伸强度、弯曲强度分别降低了 8.7%,3.7%。

关键词:阻燃;聚丙烯;热老化;高光;快速成型

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0019-05

Preparation and Properties of Rapid Molding High-gloss Flame-retardant PP with Heat-resistant

Chen Chao, Qin Fan, Chen Dong

(Shanghai Sunny Technology Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract : The effects of the polypropylene (PP) raw material, flame retardant, and antioxidant on the crystallization rate, gloss, flame retardant and aging properties of PP were evaluated by differential scanning calorimeter, mechanical and flame retardant properties tester, aging test equipment and optical microscope. High-gloss heat-resistant flame-retardant PP with rapid crystallization was prepared. The research results show that phosphorus nitrogen bromine compound flame retardant (Br-N-P) adding 4 phr, thioether auxiliary antioxidant adding 0.3 phr, PP can achieve gloss 73, flame retardant grade V-2, and pass the glow wire flammability index at 750℃. Due to the difference in molecular structure, the semi-crystallization rate of PP is 24.3 s, the effect of nitrogen phosphorus intumescent flame retardant has the greatest influence on gloss, and the gloss is reduced by 41.2%, octabromoether and Br-N-P flame retardant have little effect on the gloss of PP, with the gloss of 76, 73, respectively, S-2 can greatly extend the time of powdering, 150℃ hot oxygen pulverization time is 37 d, while the effect of hindered amine antioxidant is poor. Under long-term 140℃ thermal oxygen aging, the tensile strength, flexural strength, and notched impact strength show different attenuation amplitudes, the notched impact strength decreases by a maximum of 35.6%, and the tensile strength and flexural strength decrease by 8.7% and 3.7%, respectively.

Keywords : flame retardant ; polypropylene ; heat aging ; high gloss ; rapid molding

聚丙烯(PP)是一种综合性能优良的材料,具有质轻、易加工、耐溶剂和耐热性好等特点,广泛用于小家电的外壳材料^[1-3]。随着消费者审美能力的提高,对 PP 提出了高光外观要求。在小家电应用中,

PP 常用作与载流部件接触的部件,因此,需要有一定耐灼热丝或阻燃要求^[4],而阻燃往往会材料的光泽度;在某些特殊电器应用中往往伴随着间歇性的高温,如短时间的 130~140℃;材料经受高温

通讯作者: 陈超,工程师,主要从事高分子材料的加工和改性研究 E-mail : chencho@shsunny.com

收稿日期: 2020-06-23

引用格式: 陈超,秦凡,陈东. 快速成型高光耐热阻燃 PP 制备及性能[J]. 工程塑料应用,2020,48(9): 19-23.

Chen Chao, Qin Fan, Chen Dong. Preparation and properties of rapid molding high-gloss flame-retardant PP with heat-resistant[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 19-23.

的累积粉化可能导致一些质量问题产生,以上因素综合作用,进一步推高了材料配方的设计难度以及需要考虑的影响因素。小家电行业产品更新换代较快、产量大、生产效率高、对注塑时间控制严格,因此相关 PP 原料在满足一定的冲击性能下需要较高的结晶速率。

目前,有关耐热、阻燃、高光、高结晶速率等综合因素对 PP 的影响研究相对较少^[5-8],高光阻燃的研究主要集中在丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二酯等材料的应用上,如谢洪涛等^[9-11]分别在高光 ABS 或 ABS 合金领域进行了相关研究或综述工作。而 PP 高光的研究也常常聚焦在原料应用上,很少考虑阻燃、成型周期等多种因素的综合影响,如封水彬等^[12-13]进行了高光 PP 的研究,并分别关注冲击性能和气味。

笔者以行业需求为着眼点,综合研究了耐热、阻燃、高光、快速成型等相关因素对 PP 的影响,选取了几种常用的冲击性能接近的 PP,考察了其结晶参数的区别,选取了结晶速度较快的种类,在此基础上比较了几种常用的阻燃剂、抗氧剂对 PP 光泽度及耐粉化时间的影响,最后以优选的 PP 原料、高光阻燃剂、抗氧剂制备了结晶较快、高光、耐粉化的阻燃 PP,并评价了其实际使用温度下的性能衰减情况,希望为相关的产品研究开发提供一定的参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

均聚 PP: PP-1, PP-2, PP-3, PP-4, 缺口冲击强度在 55 J/m 左右,市售;

十溴二苯乙烷(DBDPE): 溴含量为 81%, 山东润科化工股份有限公司;

八溴醚(BDDP): 溴含量 81%, 山东寿光神润发海洋化工有限公司;

三氧化二锑(Sb_2O_3): 有效含量为 99.5%, 上海湖盟化工有限公司;

氮磷膨胀阻燃剂(IFR): 氮、磷含量分别约为 21%, 22%, 市售;

磷氮溴复配阻燃剂(Br-N-P): 磷、氮、溴含量分别约为 3%, 20%, 5%, 市售;

亚磷酸酯抗氧剂(AO-1): 主含量 $\geq 99\%$, 熔点为 183 ~ 185℃, 市售;

受阻酚型抗氧剂(AO-2): 熔点为 110 ~ 125℃, 市售;

硫代酯类辅助抗氧剂(S-1): 熔点为 64 ~

67℃, 分子量为 683, 市售;

硫醚类辅助抗氧剂(S-2): 熔点为 46 ~ 52℃, 分子量为 1162, 市售;

大分子受阻胺类抗氧剂(HA-1): 分子量为 681, 市售。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机: PM-1000U 型, 杭州恒力塑料机械有限公司;

双螺杆挤出机: KS36 型, 昆山科信机械设备有限公司;

注塑机: HTF80X1 型, 宁波海天塑机集团有限公司;

电子万能试验机: CMT6104 型, 深圳新三思集团有限公司;

摆锤冲击试验机: ZBC850 型, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

垂直燃烧测定仪: CZF-3 型, 南京上元分析仪器有限公司;

灼热丝试验仪: ZRS-2 型, 上海埃微电子科技有限公司;

热氧加速老化设备: GPH-20 型, 爱斯佩克环境仪器(上海)有限公司;

光泽度仪: JFL-BZ60 型, 天津市金孚伦科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC214 型, 耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

光学显微镜: BM-8 型, 上海光学仪器厂。

1.3 试样制备

将 PP 与阻燃剂以及其它助剂按配方称量, 在高速混合机中混合 5 ~ 6 min, 出料, 将混合物料在 200℃下经双螺杆挤出机挤出、冷却、切粒, 转速 450 r/min。于 80℃烘料 1 h, 然后注塑成标准试样, 注塑温度 220℃, 注塑压力 4.5 MPa, 保压时间 20 s, 冷却时间 15 s。

1.4 性能测试

拉伸强度按 ASTM D638-2014 测试, 测试速度 50 mm/min;

缺口冲击强度按 ASTM D256-2010 测试, V 型缺口;

弯曲强度按 ASTM D790-2017 测试, 测试速度 2 mm/min;

灼热丝可燃性指数(GWFI)按 GB/T 5169.12-2013 测试, 试样厚度 2.0 mm;

阻燃性能按 GB/T 2408-2008 测试,试样厚度 1.6 mm;

光泽度按 GB/T 8807-1988 测试,60° 模式;

结晶参数测试:用 DSC 仪测试试样的结晶参数,设置温度范围 30~220℃,升降温速率 20℃/min,氮气气氛;

热氧加速老化性能按 GB/T 7141-2008 测试,温度选择 150℃和 140℃,观察 150℃时材料开始粉化的时间以及 140℃时不同老化时间下力学性能衰减状况。

2 结果与讨论

2.1 PP 原料的 DSC 分析

4 种 PP 原料的 DSC 曲线如图 1 所示,相应的结晶参数列于表 1。

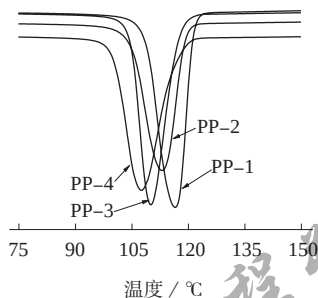


图 1 PP 原料的 DSC 曲线

表 1 PP 原料的结晶参数

PP 原料	$T_{\text{onset}} / ^\circ\text{C}$	$T_p / ^\circ\text{C}$	$T_{\text{onset}} - T_p / ^\circ\text{C}$	$T_{1/2} / \text{s}$	$\Delta W / ^\circ\text{C}$	$\Delta H / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
PP-1	121.3	116.4	4.9	24.3	8.1	123.4
PP-2	119.4	113.5	5.9	27.9	9.3	123.7
PP-3	116.5	107.6	8.9	23.2	7.7	121.3
PP-4	117.4	110.0	7.4	33.0	11.0	115.6

T_{onset} 为结晶起始温度, T_p 为结晶峰温度, $T_{1/2}$ 为半结晶时间, ΔW 为结晶半峰宽, ΔH 为结晶过程焓变。

从图 1 可以看出,4 种 PP 原料的结晶温度和结晶峰的尖锐程度不同,从表 1 可以看出,虽同为 PP 原料,但其结晶参数差别较大。PP-1 在 121.3℃就开始结晶,说明其成核速率及稳定性较好,同时其 ΔW 为 8.1℃,在几种原料中较小,说明其分子链规整排列速度快^[13]。PP-3 的 ΔW 为 7.7℃,比 PP-1 更低,但其 $T_{\text{onset}} - T_p$ 很大,这可能是因为 PP-3 的成核速率以及稳定性较差。PP-4 的 ΔW 为 11.0℃, $T_{1/2}$ 为 33 s,均为 4 种 PP 原料中最大值,说明其结晶速率较慢,同时反映结晶度的 ΔH 最低,综合结晶性能较差。PP-2 的 ΔW 为 9.3℃, $T_{1/2}$ 为 27.9 s,介于 PP-4 和 PP-1 之间,综合结晶性能无优势。PP-1 的 $T_{1/2}$ 比 PP-4 短 8.7 s,前者的 ΔH 也较后者高 7.8 J/g,无论是结晶速率还是结晶度,

PP-1 综合表现较好,选择 PP-1 作为基体树脂进行研究。

2.2 阻燃剂对 PP 光泽度、阻燃性能的影响

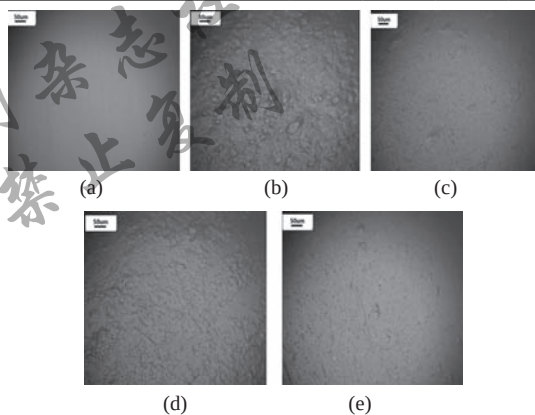
添加不同阻燃剂的 PP 配方列于表 2,相应的性能列于表 3,添加不同阻燃剂的 PP 表面的光学显微镜照片如图 2 所示。

表 2 添加不同阻燃剂的 PP 配方

配方体系	配方组分	各组分含量
R-1 体系	PP-1 / IFR	75 / 25
R-2 体系	PP-1 / BDDP / Sb_2O_3	82 / 15 / 3
R-3 体系	PP-1 / DBDPE / Sb_2O_3	82 / 15 / 3
R-4 体系	PP-1 / Br-N-P	96 / 4

表 3 添加不同阻燃剂的 PP 性能

项目	PP-1 原料	R-1 体系	R-2 体系	R-3 体系	R-4 体系
光泽度	85	50	76	63	73
阻燃等级	HB	V-2	V-2	V-2	V-2
GWFI 750℃ 试验	未通过	通过	通过	通过	通过



a—PP-1 原料; b—R-1 体系; c—R-2 体系; d—R-3 体系; e—R-4 体系

图 2 添加不同阻燃剂的 PP 表面的光学显微镜照片

从表 2、表 3 可以看出,阻燃 PP 达到 V-2 级别并通过 GWFI 750℃试验,需要添加 IFR 25 份,添加量最大;Br-N-P 的添加量最小,4 份 Br-N-P 即可达到 V-2 级别, BDDP / Sb_2O_3 和 DBDPE / Sb_2O_3 体系处于两者之间。R-1 体系的光泽度为 50,光泽度下降 41.2%,这主要是因为 IFR 的成分主要是氮磷类无机成分,与 PP 的相容性较差,同时在相应的制备温度下也不会熔融,导致其对 PP 表面粗糙度影响较大,光泽度下降较大^[14];添加 Br-N-P 的 R-4 体系虽然也含磷氮组分,但其添加量较少,因此对光泽度影响较小,光泽度为 73,下降 14.1%;R-2 体系所用的 BDDP 熔点为 110℃左右,低于 PP 的加工制备温度,因此其能很好地熔融,降低了对材料表面光泽度的影响,因此其在 4 种体系中的光泽度衰减最小,光泽度为 76,下降 10.6%;R-3 体系的光泽度为 63,下降了 25.9%,这是因为 DBDPE 的熔融温度大

于 300℃,因此其影响大于 BDDP。从图 2 也可以看出,添加 IFR 的 R-1 体系的表面粗糙度较大,具有很多凸起,添加 DBDPE/SB₂O₃ 的 R-3 体系的表面粗糙度也较大,而添加 BDDP/SB₂O₃ 和 Br-N-P 的 R-2、R-4 体系的表面粗糙度都较小,与光泽度数据相匹配。综合考虑成本、添加量以及最终的光泽度和阻燃性能,R-4 体系比较适合 PP 的应用。

2.3 抗氧剂对阻燃 PP 老化性能的影响

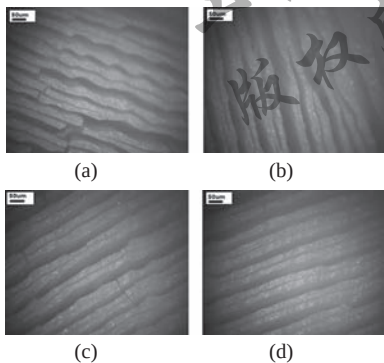
添加不同抗氧剂的阻燃 PP 配方列于表 4,相应的性能列于表 5,添加不同抗氧剂体系的阻燃 PP 老化后表面龟裂状况光学显微镜照片如图 3 所示。

表 4 添加不同抗氧剂的阻燃 PP 配方

组分	HO-1 体系	HO-2 体系	HO-3 体系	HO-4 体系
PP-1	96	96	96	96
Br-N-P	4	4	4	4
AO-1	0.3	0.3	0.3	0.3
AO-2	0.3	0.3	0.3	0.3
S-1		0.3		
S-2			0.3	
HA-1				0.3

表 5 添加不同抗氧剂的阻燃 PP 性能

项目	HO-1 体系	HO-2 体系	HO-3 体系	HO-4 体系
光泽度	73	74	75	73
150℃热氧粉化开始时间/d	21	30	37	26



a—HO-1 体系; b—HO-2 体系; c—HO-3 体系; d—HO-4 体系

图 3 添加不同抗氧的阻燃 PP 老化后表面龟裂状况光学显微镜照片

从表 5 可以看出,4 种体系的光泽度相差不大。虽然硫类抗氧剂会因相容性问题长时间析出而造成喷霜,但在本实验范围内,抗氧剂对材料表面光泽度影响不大,可能是添加量较少以及时间短的原因。从表 5 还可以看出,不同抗氧剂在 150℃的热氧粉化开始时间差异很大,HO-1 体系的热氧粉化开始时间最短,为 21 d;S-1 的加入延长了热氧粉化开始时间,HO-2 体系的热氧粉化开始时间为 30 天,提高了 42.8%,HO-3 体系的热氧粉化开始时间为 37 d,提高了 76.2%,可以看出,硫类辅助抗氧剂具有良好的作用,这主要是因为硫类助剂分子量相

对较大,具有良好的耐析出性及高效的氢过氧化物分解作用,S-1 与 S-2 的区别在于其分解效率及耐高温析出效率不同导致其热氧粉化开始时间不同。HO-4 体系也对热氧粉化开始时间的提高产生了一定的作用,可能是因为受阻胺也有一定的自由基清除作用,同时硝酰基自由基可能会提高过氧基自由基的稳定性^[15]。需要注意的是,受阻胺作为高温抗氧助剂的作用效果差别较大,由于其分子结构的差别,某些受阻胺助剂并不能改善长期耐粉化性能。从图 3 可以看出,材料老化一定时间后都出现裂纹,抗氧剂的作用在于延缓相应的老化进程。

2.4 老化时间对高光阻燃 PP 力学性能的影响

采用 HO-3 体系,在 140℃、不同热氧老化时间下,阻燃 PP 的力学性能列于表 6。

表 6 140℃、不同热氧老化时间下 PP 的力学性能

老化时间 / d	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	缺口冲击强度 / (J·m ⁻¹)
0	23	27	45
14	24	29	41
28	22	28	34
42	21	26	29

由表 6 可以看出,随着老化时间的增加,老化 42 d,PP 的拉伸强度变化不大,从 23 MPa 下降到 21 MPa,下降 8.7%;弯曲强度从 27 MPa 下降到 26 MPa,下降 3.7%;老化时间对材料缺口冲击强度的影响较大,从 45 J/m 下降到 29 J/m,下降 35.6%,这主要是因为随着老化时间的延长,虽然有抗氧剂的防护作用,但自由基反应还是逐渐破坏了 PP 中的分子链长度,从而导致缺口冲击强度下降较大。另外,从老化时间可以简单计算,对于经受 20~30 min/(d·次)的 130~140℃高温的应用,以目前老化 42 天计算,保守预计,实际制品可以应用 5.5 年不会出现性能失效的状况。

3 结论

(1) 所选 4 种 PP 原料的结晶速率差别较大,PP-1 的半结晶速率为 24.3 s 与 PP-4 相比,提高 8.7 s,前者的结晶焓变较后者高 7.8 J/g。

(2) 阻燃 PP 达到 V-2 级别并通过 GWFI 750℃试验,需要添加 IFR 25 份,添加量最大;Br-N-P 的添加量最小,为 4 份,BDDP/SB₂O₃ 和 DBDPE/SB₂O₃ 体系处于两者之间。不同阻燃剂对 PP-1 光泽度的影响差别较大,低熔点阻燃剂 BDDP 对 PP 的光泽度影响最小,其光泽度为 76,下降 10.6%;添加 IFR 的影响最大,其光泽度为 50,下降 41.2%;添加 Br-N-P 时,其光泽度为 73,下降 14.1%。

(3) 硫类辅助抗氧剂可以大幅延长高温 150 °C 热氧粉化开始时间,同样添加量下,添加大分子硫醚类辅助抗氧剂 (S-2) 时,阻燃 PP 的热氧粉化开始时间最长,为 37 d,提高 76.2%。

(4) 老化时间对材料的缺口冲击强度有较大影响。在 140 °C 高温条件下,老化 42 d,阻燃 PP 的缺口冲击强度从 45 J/m 降低为 29 J/m,下降 35.6%,而拉伸强度从 23 MPa 降低为 21 MPa,下降 8.7%;弯曲强度从 27 MPa 下降到 26 MPa,下降 3.7%。

参考文献

- [1] 韩晓昱,姜飞,徐人威,等.耐热聚丙烯专用树脂的结构与性能研究[J].能源化工,2018,39(1):20-23.
Han Xiaoyu, Jiang Fei, Xu Renwei, et al. Study on structure and properties of heat resistance polypropylene special resin[J]. Energy Chemical Industry, 2018, 39(1):20-23.
- [2] 王芳,黄河.三种无规共聚聚丙烯热性能及力学性能对比研究[J].合成材料老化与应用,2019,48(6):42-44,140.
Wang Fang, Huang He. Comparative study on thermal and mechanical property of three kinds of polypropylene random copolymer[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(6):42-44, 140.
- [3] 徐建林,刘晓琦,陈林,等.阻燃聚丙烯复合材料的研究进展[J].塑料工业,2017,45(10):9-13.
Xu Jianlin, Liu Xiaoqi, Chen Lin, et al. Research progress of flame retardant polypropylene composites[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):9-13.
- [4] 贾园,张鹏,刘振,等.阻燃高分子材料的开发及其应用研究进展[J].中国塑料,2019,33(10):120-127.
Jia Yuan, Zhang Peng, Liu Zhen, et al. Development, application and research progress in flame-retardant polymeric materials[J]. China Plastics, 2019, 33(10):120-127.
- [5] 张晓萌,宋文波,邹发生.高光聚聚丙烯技术进展[J].石油化工,2018,47(7):758-762.
Zhang Xiaomeng, Song Wenbo, Zou Fasheng. Progress in high gloss polypropylene technology[J]. Petrochemical Technology, 2018, 47(7):758-762.
- [6] 张跃飞,贺哲,毛静静,等.成核剂癸二酸二苯基二酰肼的合成及对 PP 结晶熔融行为的影响[J].工程塑料应用,2019,47(12):121-124,138.
Zhang Yuefei, He Zhe, Mao Jingjing, et al. Synthesis of N, N'-bis(benzoyl) sebacic acid dihydrazide and its effects on crystallization and melting behaviors of polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12):121-124, 138.
- [7] Vuillequez A, Lebrun M, Ion R M, et al. Effect of phosphorus-nitrogen intumescent flame retardant on structure and properties of poly(propylene)[J]. Macromolecular Symposia, 2010, 290(1):146-155.
- [8] 蒋婷.聚丙烯/有机磷酸锆复合材料的制备及其阻燃性能研究[D].重庆:西南大学,2017.
Jiang Ting. Study on the preparation of organic zirconium phosphonate composite and its flame retardant properties in polypropylene [D]. Chongqing:Southwest University, 2017.
- [9] 谢洪涛,郝刚,尹大雨,等.免漆高光黑色 ABS 树脂的制备[J].弹性体,2018,28(6):35-38.
Xie Hongtao, Hao Gang, Yin Dayu, et al. Development of black ABS resin with high gloss and free-painting[J]. China Elastomerics, 2018, 28(6):35-38.
- [10] 孟征,孙兆懿,贺芳,等.高光免喷涂 ABS/PMMA 合金研究进展[J].工程塑料应用,2016,44(2):134-139.
Meng Zheng, Sun Zhaoyi, He Fang, et al. Advance in research of ABS/PMMA alloy with high-gloss and free-spraying[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):134-139.
- [11] 李湘,孙钊.超高流动阻燃高光 ABS 的制备及其应用[J].塑料工业,2016,44(12):108-110,74.
Li Xiang, Sun Zhao. Preparation and application of ultrahigh melt flow rate and high gloss flame-retardant ABS[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(12):108-110, 74.
- [12] 封水彬,吴志军,车有造,等.高光泽耐冲击聚丙烯树脂研究及工业化[J].现代塑料加工应用,2019,31(5):39-41.
Feng Shuibin, Wu Zhijun, Che Youzao, et al. Research and industrialization of high gloss & impact resistant polypropylene[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(5):39-41.
- [13] 董莉.高光泽低气味聚丙烯的结构与性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.
Dong Li. Study on the structure and properties of high gloss and low odor polypropylene[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [14] 杨娇娥.透明高韧 PP 制备及结晶动力学的研究[D].北京:北京化工大学,2018.
Yang Jiaoe. Study on the preparation and crystallization kinetics of transparent and high toughened PP[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [15] 朱长江.新型无卤膨胀型阻燃剂的制备及其阻燃聚丙烯性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
Zhu Changjiang. Synthesis of novel intumescent flame retardant and properties investigation of flame retardant polypropylene[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [16] 程相峰,何苗,曲敏杰,等.抗氧剂对聚丙烯热氧老化性能的影响[J].大连工业大学学报,2017,36(4):276-278.
Cheng Xiangfeng, He Miao, Qu Minjie, et al. Effects of antioxidant on thermal oxidative degradation properties of polypropylene[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2017, 36(4):276-278.