

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.006

无卤阻燃 GF 增强 PET 的制备与性能

徐星驰,陈锐,陈金伟,刘亚辉,王时远

(中钢集团马鞍山矿院新材料科技有限公司,安徽马鞍山 243000)

摘要:采用熔融共混法制备无卤阻燃玻纤增强聚对苯二甲酸乙二酯 (PET),研究了成核剂、PET 树脂和增韧剂对材料力学性能、阻燃性能和热变形温度的影响。结果表明,成核剂的加入显著提高了材料的热变形温度和刚性,并且成核剂对材料的阻燃性能没有影响。选用纤维级 PET 基体的材料的热变形温度和刚性均高于选用吹瓶级 PET 基体的材料。乙烯-丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯三元共聚物的极性基团含量较高,对材料的增韧效果最好,当添加质量分数为 2% 时,同时提高了材料的悬臂梁缺口冲击强度和拉伸强度,并且垂直燃烧阻燃等级可以达到 UL94 V-0 级;当添加质量分数提高到 4% 时,材料的悬臂梁缺口冲击强度提升至 7.0 kJ/m²,但是垂直阻燃等级仅能达到 UL94 V-1 等级。丙烯酸甲酯-有机硅共聚物的增韧效果最差,但是对材料的阻燃性能和热变形温度影响最小,添加质量分数为 4% 时,材料的垂直燃烧阻燃等级能依然达到 UL94 V-0 等级。

关键词:聚对苯二甲酸乙二酯;阻燃;成核剂;增韧剂

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)04-0031-05

Preparation and Properties of Halogen-free Flame Retardant GF Reinforced PET

Xu Xingchi, Chen Rui, Chen Jingwei, Liu Yahui, Wang Shiyuan

(Sinosteel Maanshan New Materials Technology Co., Ltd., Maanshan 243000, China)

Abstract : The halogen-free flame retardant glass fiber reinforced polyethylene terephthalate (PET) was prepared by melt blending. The effects of nucleating agents, PET resins and toughening agents on the mechanical properties, flame retardancy and heat deflection temperature of materials were studied. The results show that the addition of nucleating agent improves the heat deflection temperature and rigidity of material, but has no effect on the flame retardancy. The heat deflection temperature and rigidity of material used fiber grade PET resin are higher than the material used bottle blowing grade PET resin. Ethylene-methyl acrylate-glycidyl methacrylate terpolymer has a high content of polar groups so it has best toughening effects. When add 2wt% it in the material, the Izod notched impact strength and tensile strength of material is improved, and the flame retardant grade of vertical combustion can reach UL94 V-0 grade. When the addition amount is increases to 4wt%, the Izod notched impact strength of material is increased to 7.0 kJ/m², but the flame retardant grade of vertical combustion can only reach UL94 V-1 grade. The toughening effect of methyl acrylate-silicone copolymer is the worst, but it has least effect on the flame retardancy and heat deflection temperature of material. When the addition amount is 4wt%, the flame retardant grade of vertical combustion of material still reaches UL94 V-0 grade.

Keywords : polyethylene terephthalate ; flame retardant ; nucleating agent ; toughening agent

聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 是一种常用的结晶性热塑性工程塑料。其分子主链上含有刚性较大的苯环,所以 PET 树脂具有较高的弹性模量和玻璃化转变温度。同时 PET 也具有很好的电绝缘性、耐老化性、耐溶剂性和耐摩擦性^[1-2]。但是 PET 分子主链中的酯基与苯环形成共轭体系,分子链的刚性高,主链中链柔性较高的烷基部分较短,总体来

看分子链的柔性极差,所以纯 PET 树脂脆性大、结晶困难、结晶速率慢^[3-4]。这一特性导致 PET 材料作为工程塑料使用时虽然力学性能好,但是成型困难、成型周期长,严重限制其广泛应用^[5]。为了解决结晶慢的问题,人们研究了各种成核剂来提高材料的结晶速率。如姜璨等^[6]研究发现,杜邦公司的 Surlyn 树脂可明显提高 PET 树脂的结晶性能;李珊

通信作者:徐星驰,硕士,工程师,主要从事工程塑料改性和加工工作

收稿日期:2022-02-06

引用格式:徐星驰,陈锐,陈金伟,等.无卤阻燃 GF 增强 PET 的制备与性能[J].工程塑料应用,2022,50(4):31-35.

Xu Xingchi, Chen Rui, Chen Jingwei, et al. Preparation and properties of halogen-free flame retardant GF reinforced PET[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):31-35.

珊等^[7]研究表明,酞青蓝可促进 PET 的结晶,但不会改变 PET 的晶型;王迪然等^[8]发现,在 PET 中加入质量分数 0.6% 的柠檬酸钠可以使其结晶速率提高一倍。为了提高 PET 树脂的韧性,通常的做法是加入一定量的增韧剂, PET 树脂的增韧剂主要是马来酞酐 (MAH) 或者甲基丙烯酸缩水甘油酯 (GMA) 接枝的聚烯烃弹性体,如 MAH 接枝乙烯-辛烯共聚物 (POE) (POE-g-MAH)、MAH 接枝三元乙丙橡胶 (EPDM-g-MAH)、GMA 接枝 POE (POE-g-GMA) 等^[9-11]。纯 PET 树脂的极限氧指数为 20.6%,属于易燃材料,在不添加阻燃剂的情况下只能达到 UL94 V-2 等级。随着社会的发展,汽车、电子电器等领域对材料的阻燃要求越来越高,一般都要达到 V-0 级,甚至更高的等级,所以 PET 材料需要进行阻燃改性。在卤素阻燃体系中溴化聚苯乙烯在 PET 中使用较多,柴晨泽等^[12]发现,在阻燃 PET 中,当溴质量分数达到 8%~9% 时,就能达到 UL94 V-0 等级。在无卤阻燃体系中使用较多的是磷系阻燃剂,如二乙基次磷酸铝 (ADP)、三聚氰胺焦磷酸盐 (MPP) 等^[13-14],贾宁等^[15]发现, MPP/ 硼酸锌的质量质量比为 1:3 时阻燃效果最好,材料达到 V-1 等级^[15]。

在前人研究基础上,结合工业化生产实际条件,笔者选用方便投料的 ADP 阻燃母粒作为阻燃剂,制备无卤阻燃玻璃纤维 (GF) 增强 PET,研究了成核剂、PET 树脂和增韧剂对材料力学性能、阻燃性能和热性能的影响,得到了力学性能优异、阻燃达到 V-0 等级的无卤阻燃 GF 增强 PET 材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

PET: BG-85, FG-600, 中国石化仪征化纤有限责任公司;

短切 GF: ECS11-3.0-T436H, 泰山玻璃纤维有限公司;

乙烯-丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯三元共聚物 (E-MA-GMA): AX-8900, 阿科玛集团;

丙烯酸酯-有机硅共聚物: S-2001, 日本三菱化学株式会社;

POE-g-GMA: E-516, 宁波能之光新材料科技有限公司;

ADP 阻燃母粒: MB-960, PBT 为载体, ADP 质量分数为 70%, 江苏蔚观新材料科技有限公司;

有机和无机混合物成核剂: P250, 德国布吕格

曼公司;

有机成核剂: PW-50B, 意大利 Polichem 公司;

抗氧剂 1076、抗氧剂 168、润滑剂 PETS、无水硼酸锌: 市售。

1.2 主要仪器与设备

同向双螺杆挤出机: SHJ-40 型, 南京广达化工装备有限公司;

注塑机: EM12-V 型, 震雄集团;

万能电子拉力试验机: ETM503C 型, 深圳万测试验机设备有限公司;

悬臂梁冲击试验仪: PIT550J 型, 深圳万测试验机设备有限公司;

水平垂直燃烧测定仪: 50W 型, 南京江宁分析仪器有限公司;

热变形测试仪: HDT/V-100 型, 承德市金建检测仪器有限公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: Pyris1 DSC 型, 美国 Perkin Elmer 公司。

1.3 试样制备

无卤阻燃 GF 增强 PET 材料配方见表 1。

表 1 无卤阻燃 GF 增强 PET 材料配方 %

原材料	试样编号									
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
PET-1	49	48.5	48.5							
PET-2				48.5	46.5	44.5	46.5	44.5	46.5	44.5
短切 GF	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
ADP 阻燃母粒	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
成核剂-1		0.5								
成核剂-2			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
E-MA-GMA					2	4				
POE-g-GMA							2	4		
丙烯酸酯-有机硅共聚物									2	4

注: 1) 配方中固定抗氧剂 1076, 168, PETS 及无水硼酸锌质量分数分别为 0.1%, 0.2%, 0.2%, 0.5%; 2) PET-1, PET-2 分别表示 BG-85, FG-600 PET; 3) 成核剂-1、成核剂-2 分别表示 P250, PW-50B 成核剂。

将 PET 和 ADP 阻燃母粒在 90℃ 鼓风干燥箱中干燥 4 h, 再将各原料按照表 1 中的配比在高速混合机中混合均匀, 然后加入双螺杆挤出机中挤出、冷却、造粒, GF 在挤出机均化段由侧喂料口加入。挤出加工温度分别设置为 200, 265, 265, 260, 250, 240, 240, 240, 240℃, 机头温度为 260℃, 真空度为 0.03 MPa。将粒料在 110℃ 烘箱中干燥 4 h, 然后用注塑机注塑成标准试样, 注塑温度为 265~275℃。

1.4 性能测试

拉伸性能按 ISO 527-2012 测试, 拉伸速率为

5 mm/min;

弯曲性能按 ISO 178-2010 测试,弯曲速率为 2 mm/min;

悬臂梁缺口冲击强度按 ISO 180-2000 测试,选用 2.75 J 摆锤, A 型缺口,缺口保留宽度为 8 mm;

垂直燃烧测试按 UL94-2009 测试,测试厚度为 1.6 mm;

DSC 测试:将样品以 20 °C/min 速率升温至 290 °C,保温 3 min,消除热历史;再以 10 °C/min 速率降温至 40 °C,得到降温结晶曲线,然后再以 10 °C/min 速率升温至 290 °C,得到升温熔融曲线;

热变形温度按 ISO 75-2004 测试,选用负载为 1.80 MPa,升温速率为 2 °C/min。

2 结果与讨论

2.1 成核剂对无卤阻燃 GF 增强 PET 性能的影响

选用不同成核剂制备的无卤阻燃 GF 增强 PET 的性能见表 2。

表 2 添加不同成核剂的无卤阻燃 GF 增强 PET 的性能

项目	试样编号		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]
拉伸强度 /MPa	110.9	115.2	120.9
悬臂梁缺口冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	5.7	5.9	6.0
弯曲强度 /MPa	144.9	146.3	156.6
弯曲弹性模量 /MPa	7642	7910	8236
垂直燃烧阻燃等级	V-0	V-0	V-0
两次燃烧总时间 /s	5.5	5.9	5.3
热变形温度 /°C	150.3	194.7	200.6

从表 2 数据可以看出,无卤阻燃 GF 增强 PET 的悬臂梁缺口冲击强度和阻燃性能与成核剂的关系不大,而拉伸强度、弯曲强度、弯曲弹性模量及热变形温度受成核剂的影响较大。成核剂的加入使得材料的拉伸强度、弯曲强度及弯曲弹性模量得到提升,加入成核剂 -2 的 3[#] 试样的拉伸强度、弯曲强度及弯曲弹性模量的提升更明显,分别由原来的 110.9, 144.9, 7642 MPa 提升至 120.9, 156.6, 8236 MPa。未加成核剂的 1[#] 试样的热变形温度仅为 150.3 °C,加入成核剂 -1 的 2[#] 试样提升至 194.7 °C,加入成核剂 -2 的 3[#] 试样的热变形温度最高,为 200.6 °C。这一变化趋势和拉伸强度和弯曲性能的变化趋势相同。这一现象出现的原因可能是成核剂 -2 的成核成核效果优于成核剂 -1。

为了验证上述猜测,将三组试样进行 DSC 测试,结果如图 1 和图 2 所示。从图 1 可以看出,无卤阻燃 GF 增强 PET 出现两个吸热峰,第一个吸热峰在 200 °C 附近,这是 ADP 阻燃母粒中 PBT 树脂

基材的熔融吸热峰;第二个吸热峰在 250 °C 附近,这是 PET 树脂的熔融吸热峰。根据表 3 中的数据可以看出,添加成核剂 -2 的 3[#] 试样的熔点最高,为 245.5 °C。从图 2 可以看出,相比于未加入成核剂的 1[#] 试样,加入成核剂的 2[#] 和 3[#] 试样的结晶峰值温度向高温方向移动,熔融峰形变得尖锐。说明材料的结晶能力增强,成核剂的加入使得材料在较高的温度下就可以开始结晶。2[#] 试样的峰值结晶温度为 203.4 °C, 3[#] 试样的峰值结晶温度为 209.3 °C。未加成核剂的 1[#] 试样中 PET 树脂的结晶度最低,为 35.1%, 2[#] 试样的结晶度为 37.5%, 3[#] 试样的结晶度最高,为 41.1%。这一结果说明,成核剂的加入有利于提高 PET 树脂的结晶度,且成核剂 -2 的效果优于成核剂 -1。

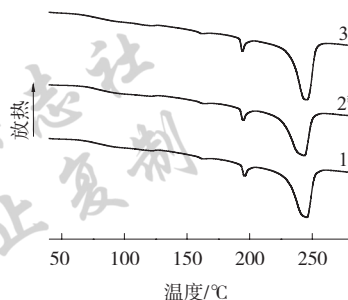


图 1 添加不同成核剂的无卤阻燃 GF 增强 PET 的 DSC 升温曲线

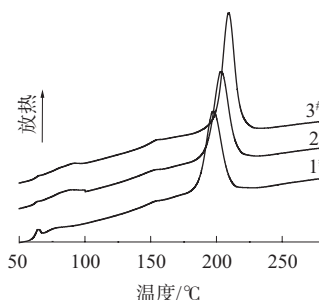


图 2 添加不同成核剂的无卤阻燃 GF 增强 PET 的 DSC 降温曲线

表 3 添加不同成核剂的无卤阻燃 GF 增强 PET 的 DSC 数据

试样编号	T_c /°C	T_m /°C	ΔH_m /(J·g ⁻¹)	X_c %
1 [#]	197.5	245.0	20.2	35.1
2 [#]	203.4	244.6	21.4	37.5
3 [#]	209.3	245.5	23.6	41.4

注: 1) T_c 为结晶峰值温度, T_m 为熔点, ΔH_m 为结晶熔融焓, X_c 为结晶度。

2.2 PET 对无卤阻燃 GF 增强 PET 性能的影响

材料的性能除了受成核剂的影响外,也会受到基体树脂的影响,选用两种不同 PET 树脂制备的无卤阻燃 GF 增强 PET 性能见表 4。

从表 4 可以看出,选用 FG-600 的 4[#] 试样的拉伸强度为 127.2 MPa,高于选用 BG-85 基体的 3[#] 试样的 120.9 MPa,并且 4[#] 试样的热变形温度为

表4 不同PET基体制备的无卤阻燃GF增强PET的性能

项目	试样编号	
	3 [#]	4 [#]
拉伸强度/MPa	120.9	127.2
悬臂梁缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	6.0	5.4
弯曲强度/MPa	156.6	160.3
弯曲弹性模量/MPa	8 236	8 710
垂直燃烧阻燃等级	V-0	V-0
两次燃烧总时间/s	5.3	6.0
热变形温度/℃	200.6	212.7

212.7℃,远高于3[#]试样的200.6℃。弯曲强度和弯曲弹性模量也是4[#]试样略高。引起这一现象的原因可能是由于4[#]试样的结晶度更高,结晶更为完善。3[#]试样的PET基体是吹瓶级的BG-85,特性黏度为0.87 dL/g,4[#]试样的PET基体是纤维级的FG-600,特性黏度为0.6 dL/g。为了保证吹瓶时瓶体的透明性,吹瓶级PET在合成过程中会加入少量间二苯甲酸单体,以降低材料的结晶度,而纤维级的PET则不会添加,所以4[#]试样的结晶度可能高于3[#]试样。材料的阻燃性能不受基体树脂的影响。3[#]试样的悬臂梁缺口冲击强度强度高于4[#]试样,一方面可能是因为4[#]试样的结晶度高,另一方面3[#]试样的PET基体树脂的分子量高。

使用不同PET基体制备的无卤阻燃GF增强PET的DSC升温曲线和降温曲线分别如图3和图4所示,相应的DSC数据见表5。

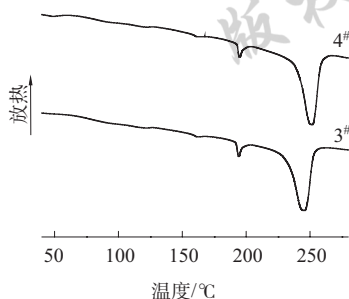


图3 不同PET基体制备的无卤阻燃GF增强PET的DSC升温曲线

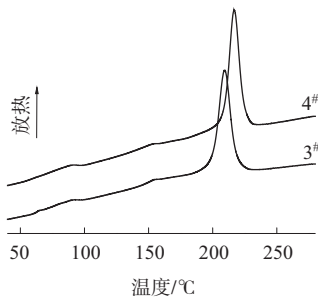


图4 不同PET基体制备的无卤阻燃GF增强PET的DSC降温曲线

表5 不同PET基体制备的无卤阻燃GF增强PET的DSC数据

试样编号	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$X_c/\%$
3 [#]	209.3	245.5	23.6	41.4
4 [#]	216.7	251.6	24.9	43.7

从图3和表5可以看出,相较于3[#]试样,4[#]试样的熔融峰向高温方向偏移,熔点从245.5℃提高至251.6℃。从图4和表5可以看出,4[#]试样的峰值结晶温度高于3[#]试样,结晶峰形变得尖锐,4[#]试样中PET的结晶度为43.7%高于3[#]试样的41.4%。根据DSC分析结果可知,选用纤维级FG-600 PET作为基体树脂的材料更容易结晶,结晶度高。

2.3 增韧剂对无卤阻燃GF增强PET性能的影响

添加不同增韧剂及其含量时制备的无卤阻燃GF增强PET的性能见表6。

表6 添加不同增韧剂及其含量时制备的无卤阻燃GF增强PET的性能

项目	试样编号						
	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
拉伸强度/MPa	127.2	130.5	125.4	127.4	120.0	120.2	112.5
悬臂梁缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	5.4	6.7	7.0	6.0	6.5	6.0	6.2
弯曲强度/MPa	160.3	158.3	147.3	156.2	140.2	153.2	143.6
弯曲弹性模量/MPa	8 710	8 410	7 638	8 314	7 219	8 512	8 100
垂直燃烧阻燃等级	V-0	V-0	V-1	V-0	V-1	V-0	V-0
两次燃烧总时间/s	6.0	8.7	14.2	9.5	18.2	7.2	9.1
热变形温度/℃	212.7	208.7	206.1	207.4	206.2	211.4	210.3

从表6可以看出,添加质量分数2%的E-MA-GMA和POE-g-GMA的5[#]和7[#]试样均会使得无卤阻燃GF增强PET的拉伸强度、弯曲强度较未加入的4[#]试样略有升高。但是添加质量分数提高到4%时,材料(6[#]和8[#]试样)的拉伸强度和弯曲强度反而会降低。一方面是因为这两种增韧剂中含有极性较高的GMA基团,与GF表面的极性基团相容性更好,提高了树脂基体和GF的相容性,二者粘结更加紧密,使得材料的刚性提高;另一方面,增韧剂本身的弹性模量低,会使得材料的刚性降低,由于这两种因素的共同作用,所以在添加质量分数为2%时,材料(5[#]和7[#]试样)的拉伸强度和弯曲强度提高,而添加质量分数提高到4%时,材料(6[#]和8[#]试样)反而降低。同时E-MA-GMA中的GMA含量高于POE-g-GMA,所以5[#]试样的力学性能高于7[#]试样。增韧剂丙烯酸酯-有机硅共聚物中不含有强极性基团,所以制备的无卤阻燃GF增强PET的刚性随着丙烯酸酯-有机硅共聚物的加入单调下降。对比无卤阻燃GF增强PET的悬臂梁缺口冲击强度可知,E-MA-GMA的增韧效果最好,添加质量分数为4%时,材料(7[#]试样)的悬臂梁缺口冲击强度由加入前的5.4 kJ/m²提升至7.0 kJ/m²,而丙烯酸酯-有机硅共聚物的增韧效果最差。

E-MA-GMA和POE-g-GMA都含有大量的烯烃类弹性体,极限氧指数低,会降低材料的阻燃性

能。添加质量分数为 2% 时,材料(5[#]和 7[#]试样)的垂直燃烧阻燃等级勉强达到 UL94 V-0 等级,但是两次引燃的总燃烧时间都在 9 s 左右,当添加质量分数提升至 4% 时只能达到 UL94 V-1 阻燃等级。丙烯酸酯-有机硅共聚物中含有有机硅组分,其本身就具有一定的阻燃性,所以即使添加质量分数达到 4%,材料(10[#]试样)依然可以达到 UL94 V-0 阻燃等级。同时丙烯酸酯-有机硅共聚物的耐热性能也优于 E-MA-GMA 和 POE-g-GMA,所以材料的热变形温度降低不多,而后两者则随着添加量的增多热变形温度显著降低。

3 结论

(1) 无卤阻燃 GM 增强 PET 在制备过程中必须加入成核剂,以提高材料的刚性及热变形温度,成核剂-2 的成核效果优于成核剂-1,材料的阻燃性能与成核剂无关。

(2) 基体 PET 树脂的种类影响材料的性能,纤维级的 PET 树脂更容易结晶,材料的刚性以及热变形温度均优于吹瓶级 PET 树脂制备的材料。

(3) E-MA-GMA 对材料的增韧效果最好,加入质量分数为 2% 时,可提高材料悬臂梁缺口冲击强度和拉伸强度,且垂直燃烧阻燃等级能达到 UL94 V-0 阻燃等级,综合性能最优。

(4) 丙烯酸酯-有机硅共聚物的增韧效果较差,但是对材料的阻燃性能及耐热性能影响较小,添加质量分数为 4% 时,材料的悬臂梁缺口冲击强度达到 6.2 kJ/m²,并且垂直燃烧阻燃等级依然达到 UL94 V-0 级别。

参考文献

- [1] Ronkay F. Influence of short glass fiber reinforcement on the morphology development and mechanical properties of PET/HDPE blends[J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(4):586-595.
- [2] 许凌峰,邵景昌,付俊祺,等. PC/PET 合金的制备及其耐溶剂机理[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(5):114-117, 128.
Xu Lingfeng, Shao Jingchang, Fu Junqi, et al. Preparation and solvent resistance mechanism of PC/PET alloy[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(5):114-117, 128.
- [3] Gooneie A, Simonetti P, Salmeia K A, et al. Enhanced PET processing with organophosphorus additive: Flame retardant products with added-value for recycling[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 160:218-228.
- [4] 胡峰,陈忠梅,陈智军,等. 复合成核剂对 PET 结晶性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(12):121-126.
Hu Feng, Chen Zhongmei, Chen Zhijun, et al. Effects of hybrid nucleating agent on crystallization behaviors of PET[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(12):121-126.
- [5] Monti M, Scrivani M T, Kociolok I, et al. Enhanced impact strength of recycled PET/glass fiber composites[J]. *Polymers*, 2021, 13(9). DOI:10.3390/polym13091471.
- [6] 姜臻,陈鹏,韩硕,等. Surlyn 对 PET 及其共混体系流变与结晶性能的影响[J]. *中国塑料*, 2020, 34(7):44-48.
Jiang Can, Chen Peng, Han Shuo, et al. Effect of Surlyn on the rheological and crystallization behaviors of PET and its composites[J]. *China Plastics*, 2020, 34(7):44-48.
- [7] 李珊珊,乔辉,丁筠,等. 酞菁蓝颜料对 PET 结晶性能的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2018, 30(2):42-44.
Li Shanshan, Qiao Hui, Ding Jun, et al. Effect of phthalocyanine on crystallization properties of PET[J]. *Modern Plastics Processing and Application*, 2018, 30(2):42-44.
- [8] 王迪然,罗发亮,赵阿龙. 柠檬酸钠对 PET 结晶性能及力学性能的调控[J]. *合成树脂及塑料*, 2018, 35(1):23-29.
Wang Diran, Luo Faliang, Zhao Along. Effect of SC on crystallization and mechanical properties of PET[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2018, 35(1):23-29.
- [9] Heino M, Kirjava J, Hietaja P, et al. Compatibilization of polyethylene terephthalate/polypropylene blends with styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS) block copolymers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1997, 65(2):241-249.
- [10] 夏胜利,聂莹,何晓春. 接枝反应条件对 POE-g-MAH 增韧 PET 性能的影响[J]. *塑料工业*, 2020, 48(12):66-70, 65.
Xia Shengli, Nie Ying, He Xiaochun. Effect of grafting condition on properties of POE-g-MAH toughened PET[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(12):66-70, 65.
- [11] Wang C, Hu Z, Zhao J, et al. Preparation and properties of PET/EPDM-g-GMA alloys via dynamic vulcanization method[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(4):141-146.
- [12] 柴晨泽,高伦巴根,赵震,等. 低分子量溴化聚苯乙烯对聚对苯二甲酸乙二醇酯的阻燃和力学性能的影响[J]. *塑料工业*, 2021, 49(10):106-110.
Chai Chenze, Gao Lunbagen, Zhao Zhen, et al. Effect of low molecular weight bromopolystyrene on flame retardancy and mechanical properties of polyethylene terephthalate[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(10):106-110.
- [13] Adner N, Helmy M, Otto T, et al. A macromolecular halogen-free flame retardant and its effect on the properties of thermoplastic polyesters[J]. *Fire and Materials*, 2019, 43(2):169-174.
- [14] 杨中文,刘西文. 聚对苯二甲酸乙二醇酯阻燃方法研究进展[J]. *塑料助剂*, 2018, 20(4):13-17.
Yang Zhongwen, Liu Xiwen. Research progress in flame retarding methods of PET [poly(ethylene terephthalate)][J]. *Plastics Additives*, 2018, 20(4):13-17.
- [15] 贾宁,杨斌,陈进,等. 无卤阻燃改性 PET 复合材料的阻燃与热力学性能[J]. *塑料工业*, 2021, 49(5):48-52.
Jia Ning, Yang Bing, Chen Jin, et al. Flame retardant and thermomechanical properties of halogen-free flame retardant modified PET composite[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(5):48-52.