

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.023

协效阻燃剂和增韧剂对卤素阻燃玻纤增强 PBT 材料性能的影响

徐星驰, 王时远, 陈锐, 陈金伟, 刘亚辉

(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: 使用溴化环氧树脂作为主阻燃剂, 采用熔融共混法制备了玻璃纤维增强阻燃聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)复合材料。分析讨论了五种协效阻燃剂(三氧化二锑、无水硼酸锌、锑酸钠、水合铝酸碳酸镁、水合铝酸碳酸钙)和增韧剂对材料物理力学性能、阻燃性能和热稳定性的影响。结果表明, 三氧化二锑的协效阻燃效果最好, 但是使得材料的力学性能和热稳定性降低, 锑酸钠的阻燃效果略低于三氧化二锑但是对材料的力学性能和热稳定性影响较小。选择锑酸钠作为协效阻燃剂, 加入少量的水合铝酸碳酸钙有利于提高材料的拉伸和弯曲强度、热变形温度及阻燃性能。丙烯酸酯-有机硅共聚物对材料的增韧效果较弱但是不会影响材料的阻燃等级, 乙烯-丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物的增韧效果最优, 但是会降低材料的阻燃等级。

关键词: 聚对苯二甲酸丁二酯; 阻燃; 三氧化二锑; 锑酸钠; 增韧剂

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0153-05

Effects of Different Synergistic Flame Retardants and Toughening Agents on Properties of Halogen Retardant Glass Fiber Reinforced PBT Composites

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

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

Abstract : Glass fiber reinforced flame retardant polybutylene terephthalate (PBT) composite materials were prepared by melt blending with the brominated epoxy resin as the main flame retardant. The effects of five different synergistic retardants (antimony trioxide, zinc borate, sodium antimonate, magnesium aluminate carbonate hydrate and calcium aluminate carbonate hydrate) and toughening agents on the physical and mechanical properties, flame retardancy and thermal stability of the materials were discussed and analyzed. The results show that the flame retardant effect of antimony trioxide is the best, but the mechanical properties and thermal stability of the materials are reduced. The flame retardant effect of sodium antimonate is lower than antimony trioxide, but it has slight effect on the mechanical properties and thermal stability of the materials. Choosing sodium antimonate as synergistic flame retardant and adding small amount of hydrated calcium aluminate carbonate can improve the tensile and flexural strength, heat deflection temperature and flame retardancy. The toughening effect of acrylate-silicone copolymer on the materials is weak, but it no affects the flame retardance of the materials. The toughening effect of ethylene-methyl acrylate-glycidyl methacrylate copolymer is the best, but it reduces the flame retardant grade of the materials.

Keywords : polybutylene terephthalate ; flame retardant ; antimony trioxide ; sodium antimonate ; toughening agent

聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)作为五大通用工程塑料之一,其是一种线性的饱和聚酯,其分子主链上具有刚性较大的苯环结构,所以材料具有较高的刚性以及耐蠕变性能。同时主链上还含有四个亚甲基,增加了分子链的柔性,所以 PBT 相较于聚对

苯二甲酸乙二酯更容易结晶,是一种半结晶性塑料^[1-2]。总体来说 PBT 具有较高的力学性能、电绝缘性能以及耐化学腐蚀性等优点,这些优点使得其在电子电器、家用电器、汽车制造等行业具有广泛的应用^[3-4]。

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: 2022-11-14

引用格式: 徐星驰, 王时远, 陈锐, 等. 协效阻燃剂和增韧剂对卤素阻燃玻纤增强 PBT 材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 153-157.

Xu Xingchi, Wang Shiyuan, Chen Rui, et al. Effects of different synergistic flame retardants and toughening agents on properties of halogen retardant glass fiber reinforced PBT composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 153-157.

纯PBT树脂的极限氧指数(LOI)在20%左右,UL 94阻燃等级仅能达到HB级别。现今电子电器及电动汽车等领域对材料的阻燃要求越来越高,所以必须对PBT材料进行阻燃改性^[5]。适用于PBT的阻燃体系主要分为两大类:一类是卤素阻燃体系,主要的阻燃剂有溴化聚苯乙烯、溴化环氧树脂、十溴二苯乙烷等^[6-7],一般会添加一定量的三氧化二锑作为协效阻燃剂使用,并且三氧化二锑的粒径大小会对材料性能产生显著影响^[8-9];另一类是无卤阻燃体系,主要的阻燃剂有二乙基次膦酸铝、三聚氰胺聚磷酸盐、红磷等^[10-11]。

何伟壮等^[12]在PBT树脂中加入了质量分数20%的超细氢氧化镁载体的有机硅阻燃剂和质量分数10%的磷酸硼,使得材料的LOI提升至36%。王鲁静等^[13]使用三聚氰胺氰尿酸盐对次磷酸铝进行表面包覆,再对其表面用氢氧化铝和偶联剂处理制得无卤阻燃剂,在质量分数30%玻纤增强PBT材料中加入质量分数为12%的阻燃剂即可达到UL 94 V-0阻燃等级。李积德等^[14]研究发现,二丙基次磷酸铝单独使用即可使得玻纤增强PBT的LOI大幅提高,并且三聚氰胺聚磷酸盐和二丙基次磷酸铝具有一定的协效作用。

无卤阻燃体系虽然具有环保、烟密度低、价格低等优势但是相比于溴系阻燃剂其添加量高,对材料力学性能特别是冲击强能影响较大,并且阻燃效率低于溴系阻燃剂^[15]。所以在一些对材料综合性能要求较高的领域,卤素阻燃剂依然处于不可替代的位置。冯健等^[16]对比了溴化环氧、溴化聚苯乙烯、溴化聚碳酸酯、十溴二苯乙烷四种阻燃剂对PBT树脂性能的影响,发现溴化环氧的综合性能最优。王良民等^[17]在质量分数15%玻纤增强PBT材料体系中加入质量分数为14%的溴化聚碳酸酯和2.4%的三氧化二锑,材料可以达到UL 94 V-0阻燃等级,并且溴化聚碳酸酯相比于溴代三嗪、十溴二苯乙烷等具有更加优异的抗黄变性能。

先前对卤素阻燃PBT材料的研究大多关注溴系阻燃剂的种类和添加量对材料性能的影响,而忽视了协效阻燃剂依然会对材料的综合性能产生较大影响的因素。故笔者系统地研究了协效阻燃剂和增韧剂对卤素阻燃玻纤增强PBT材料耐热、阻燃和力学性能的影响,为制备高性能阻燃玻纤增强PBT材料提供数据参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBT:XW-321,中国石化仪征化纤有限责任公司;

短切玻纤:ECS11-3.0-T436H,泰山玻璃纤维有限公司;

溴化环氧树脂:KBE-2025K,开美化学(南通)科技有限公司;

三氧化二锑:益阳市华昌锑业有限公司;

无水硼酸锌:ST-FS-2300FB,上海星贝达化工材料有限公司;

季戊四醇硬脂酸酯(PETS):意大利法基有限公司;

乙烯-丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(E-MA-GMA):AX-8900,SK化工株式会社;

丙烯酸酯-有机硅共聚物:S-2030,日本三菱化学公司;

沙林树脂:Surlyn 9910,美国杜邦公司;

锡酸钠、水合铝酸碳酸镁、水合铝酸碳酸钙、抗氧剂1076、抗氧剂168均为市售。

1.2 主要仪器及设备

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,震雄机械(深圳)有限公司;

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:PIT550 J型,深圳万测试验机设备有限公司;

水平垂直燃烧测定仪:50 W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;

差示扫描量热仪:Pyris1 DSC型,美国Perkin Elemer公司。

1.3 试样制备

将PBT在90℃鼓风干燥箱中干燥4 h,然后将各原材料按照表1中的比例加入高速搅拌机中混合,再加入双螺杆挤出机中挤出、冷却、造粒,玻纤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200,235,235,240,240,230,220,220,230℃,机头温度230℃,真空度-0.05 MPa。粒料在110℃烘箱中干燥4 h然后经注塑机注塑成标准

表1 卤素阻燃玻纤增强PBT材料各组分质量分数

试样编号	PBT	短切玻纤	溴化环氧 树脂	三氧化 二锑	无水硼 酸锌	锑酸钠	水合铝酸 碳酸镁	水合铝酸 碳酸钙	丙烯酸酯-有 机硅共聚物	E-MA- GMA	沙林树脂
1 [#]	53.2	30	16								
2 [#]	47.2	30	22								
3 [#]	41.2	30	28								
4 [#]	53.2	30	12	4							
5 [#]	53.2	30	12		4						
6 [#]	53.2	30	12			4					
7 [#]	53.2	30	12				4				
8 [#]	53.2	30	12					4			
9 [#]	51.2	30	14			4					
10 [#]	50.2	30	14			4		1			
11 [#]	48.2	30	14			4		1	2		
12 [#]	48.2	30	14			4		1		2	
13 [#]	48.2	30	14			4		1			2

注:固定抗氧剂 1076、抗氧剂 168 和 PETS 的质量分数分别为 0.1%、0.2%、0.5%。

试样,注塑温度 225 ~ 245 ℃。

1.4 性能测试

拉伸性能和弯曲性能分别按 ISO 527-2012 和 ISO 178-2010 测试,拉伸速率为 5 mm/min,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 8 mm;

垂直燃烧测试按 UL 94 标准测试,测试试样厚度为 3.2, 1.6 mm;

热重(TG)测试:样品以 20 ℃/min 速率升温至 700 ℃;

热变形温度按 ISO 75-2013 测试,选用负载 1.80 MPa,升温速率 2 ℃/min。

2 结果与讨论

2.1 协效阻燃剂对材料性能的影响

表 2 列出了不同协效阻燃剂对卤素阻燃玻纤增强 PBT 材料阻燃性能的影响。1[#], 2[#], 3[#] 试样仅添加了不同含量的溴化环氧树脂,从表 2 数据可以看出溴化环氧树脂质量分数为 22% 时,材料在试样厚度 3.2 mm 下的 UL 94 阻燃等级可以达到 V-0 等级,质量分数达到 28% 时 1.6 mm 厚度下的 UL 94 阻燃等级才能达到 V-0 等级。在 1[#] 试样的基础上,将其中质量分数 4% 的溴化环氧树脂替换成三氧化二锑,材料即可达到 1.6 mm 下的 V-0 阻燃等级,燃烧时材料有滴落现象,但是并未引燃脱脂棉,所以三氧化二锑具有良好的协效阻燃作用。当替换成质量分数 4% 的锑酸钠时,材料可以达到 1.6 mm 下的 V-2 阻燃等级,并且余焰燃烧时间相比于 1[#] 试样减少了近一半,所以锑酸钠也具有一定的协效阻燃作用。用质量分数 4% 硼酸锌、水合铝酸碳酸镁、水合铝酸

碳酸钙替换等量溴化环氧树脂时,材料的阻燃等级低于 V-2。这并不意味着这三种阻燃剂没有阻燃效果,这三种协效剂加入之后抑制了材料的滴落现象,但余焰燃烧时间延长,所以阻燃等级反而下降。总体来说三氧化二锑协效阻燃效果最优,锑酸钠次之。当 9[#] 试样选用锑酸钠作为协效阻燃剂时,溴化环氧树脂质量分数提高至 14%,材料在 1.6 mm 下达到 V-0 阻燃等级。在 9[#] 试样的基础上向体系中再加入质量分数 1% 的水合铝酸碳酸钙,材料的余焰燃烧时间进一步缩短,阻燃性能提升。

表2 不同协效阻燃剂下卤素阻燃玻纤增强PBT材料的阻燃性能

试样编号	试样厚度 3.2 mm		试样厚度 1.6 mm	
	UL 94 阻燃等级	余焰时间/s	UL 94 阻燃等级	余焰时间/s
1 [#]	NG	>250	V-2	240
2 [#]	V-0	41	V-2	61
3 [#]	V-0	3	V-0	17
4 [#]	V-0	4	V-0	5
5 [#]	NG	>250	NG	>250
6 [#]	V-2	80	V-2	104
7 [#]	NG	>260	NG	>250
8 [#]	NG	>250	NG	>250
9 [#]	V-0	16	V-0	8
10 [#]	V-0	12	V-0	6

注:NG 表示 UL 94 阻燃等级低于 V-2 级。

表 3 列出了添加不同协效阻燃剂时卤素阻燃玻纤增强 PBT 材料的物理力学性能数据。从 1[#], 2[#], 3[#] 试样可以看出,随着溴化环氧树脂添加量的增加,材料的拉伸强度、缺口冲击强度以及热变形温度单调下降。对比 1[#] 和 4[#] 试样看出,三氧化二锑的加入使材料的拉伸强度从 142.2 MPa 降低至 127.3 MPa,热变形温度从 197.7 ℃降低至 176.1 ℃。引起这一现象的原因是一方面三氧化二锑作为无机填料加

入到体系中会引发应力集中进而发展成裂纹造成力学性能的下降,另一方面三氧化二锑会引发聚酯的催化降解,造成材料的热稳定性变差以及热变形温度的降低。对比1[#]和6[#]可以发现,锑酸钠对材料的力学性能和热变形温度的影响较小。水合铝酸碳酸镁和无水硼酸锌对材料的性能影响相对更大,不适合作为PBT的协效阻燃剂使用。

表3 不同协效阻燃剂下卤素阻燃玻纤增强PBT材料的

物理力学性能

试样编号	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲弹性模量/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	热变形温度/℃
1 [#]	142.2	184.9	8 401	6.72	197.7
2 [#]	139.2	186.9	8 902	6.61	194.9
3 [#]	137.7	186.9	9 032	6.20	191.4
4 [#]	127.3	174.4	8 940	5.84	176.1
5 [#]	122.9	174.0	8 440	4.27	169.1
6 [#]	135.3	185.7	8 731	6.58	185.7
7 [#]	94.6	152.9	8 953	6.13	189.7
8 [#]	125.5	185.3	8 327	6.24	189.0
9 [#]	132.2	183.1	9 003	6.55	185.3
10 [#]	136.5	185.8	9 030	6.34	189.0

对比9[#]和10[#]试样的数据可以发现,在材料中加入1%的水合铝酸碳酸钙材料的拉伸强度、弯曲强度和热变形温度略有上升。这是由于溴系阻燃剂在双螺杆中经过高温剪切,部分游离溴会反应生成HBr,降低材料性能;弱碱性的水合铝酸碳酸钙可以与HBr反应,起到吸酸剂的作用,对材料形成保护。

图1是添加不同协效阻燃剂时材料在空气氛围下的TG曲线,相关数据列于表4。

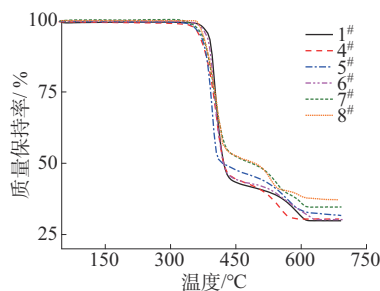


图1 添加不同协效阻燃剂的卤素阻燃玻纤增强PBT材料不同试样编号的TG曲线

表4 不同协效阻燃剂下卤素阻燃玻纤增强PBT材料的TG数据/℃

试样编号	5%热失重温度	10%热失重温度	50%热失重温度
1 [#]	388.7	394.5	423.0
4 [#]	360.0	379.9	424.2
5 [#]	369.8	380.3	424.1
6 [#]	382.5	390.7	422.0
7 [#]	361.2	382.6	482.1
8 [#]	375.3	384.9	458.3

从表4中的数据可以看出,仅用溴化环氧树脂作为阻燃剂时,材料质量损失5%时的温度(5%热失重温度)最高,为388.7℃,材料的稳定性最高。加入锑酸钠的试样5%热失重温度略低为382.5℃。添加三氧化二锑试样的5%热失重温度最低为360℃,热稳定性最差;其次为添加水合铝酸碳酸镁试样,温度为361.2℃。这一结果正好与前文力学性能的结果相互印证。三氧化二锑、硼酸锌和水合铝酸碳酸镁都显著降低材料的热稳定性。

2.2 增韧剂对材料性能的影响

表5列出了添加不同增韧剂时卤素阻燃玻纤增强PBT材料的阻燃性能。对比表5中10[#]和11[#]两组试样的阻燃性能可以发现,加入了质量分数2%的丙烯酸酯-有机硅共聚物之后,材料的阻燃等级没有变化,依然可以达到1.6 mm厚度下的V-0级。虽然丙烯酸酯组分的LOI较低,容易燃烧,但是有机硅组分燃烧时生成硅-碳阻隔层,阻止火焰的蔓延,所以材料的阻燃性能没有明显的下降。

表5 不同增韧剂下卤素阻燃玻纤增强PBT材料的阻燃性能

项 目	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]
UL 94阻燃等级(3.2 mm)	V-0	V-0	V-0	V-0
余焰时间(3.2 mm)/s	12	11	14	12
UL 94阻燃等级(1.6 mm)	V-0	V-0	V-2	V-2
余焰时间(1.6 mm)/s	6	11	17	26

表6列出了添加不同增韧剂时卤素阻燃玻纤增强PBT材料的物理力学性能。对比表6中10[#]和11[#]两组试样的数据可以发现,加入丙烯酸酯-有机硅共聚物后,材料的拉伸强度从136.5 MPa降低至127.1 MPa,弯曲强度从185.5 MPa降低至178.9 MPa,材料的刚性降低,缺口冲击强度从6.34 kJ/m²提升至7.62 kJ/m²,韧性略有提升。当选用E-MA-GMA为增韧剂时,此时材料的拉伸强度不仅没有降低反而升高至138.7 MPa,产生这一现象的原因是E-MA-GMA中含有8%的甲基丙烯酸缩水甘油酯基团,其具有较高的极性与玻纤表面的浸渍物如偶联剂等相容性好,并且和PBT树脂的端羧基和端羟基有较高的反应活性,所以在体系中增加了玻纤和PBT树

表6 不同增韧剂下卤素阻燃玻纤增强PBT材料的物理力学性能

项 目	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]
拉伸强度/MPa	136.5	127.1	138.7	136.9
弯曲强度/MPa	185.8	178.9	183.6	186.4
弯曲弹性模量/MPa	9 030	8 560	8 717	8 835
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	6.34	7.62	9.44	7.73
热变形温度/℃	189.0	185.3	186.3	188.3

脂的黏结力,在拉伸测试过程中玻纤更难从基体树脂中抽出,使得材料的拉伸强度升高。并且由于和PBT树脂的相容性好,E-MA-GMA在体系中分散均匀度也会提高,所以增韧效果优于丙烯酸酯-有机硅共聚物,缺口冲击强度达到 9.44 kJ/m^2 。加入质量分数2%的沙林树脂9910,材料的拉伸强度也略有上升,这是因为沙林树脂中含有的锌离聚物对PBT树脂的结晶有促进作用,材料的结晶提高,拉伸强度、弯曲强度和热变形温度也会相应提升。

总体来说,E-MA-GMA虽然增韧效果最优,并且不会显著降低材料的强度但是对材料的阻燃性能影响较大。对于阻燃要求较高的场合,丙烯酸酯-有机硅共聚物增韧剂优势较为明显。

3 结论

(1)选用溴化环氧树脂作为主阻燃剂时,三氧化二锑的协效阻燃性能最佳,但是对PBT树脂具有催化作用使得材料分解温度降低和力学性能降低。锑酸钠的协效阻燃效果仅次于三氧化二锑,但是对材料的分解温度和力学性能影响较小。

(2)在溴化环氧树脂/锑酸钠阻燃体系中,加入少量的水合铝酸碳酸钙可以提升卤素阻燃玻纤增强PBT材料的拉伸、弯曲强度及阻燃性能。

(3)丙烯酸酯-有机硅共聚物在增韧卤素阻燃玻纤增强PBT材料的同时不会降低材料的阻燃等级,E-MA-GMA的增韧效果最好,同时能提升材料的强度但是会使材料的阻燃等级降低。

参考文献

- [1] 刘伟,曹冰.无卤阻燃PBT的研究进展及其在汽车部件中的应用[J].合成树脂及塑料,2021,38(5):80-82.
Liu Wei, Cao Bing. Research progress of halogen-free flame retardant PBT and its application in automobile parts[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2021, 38(5):80-82.
- [2] Jiang L, Huang Z G, Wang X K, et al. Influence of reactive compatibilization on the mechanical, thermal and rheological properties of highly filled PBT/ Al_2O_3 composites[J]. Materials & Design, 2020, 196:196-205.
- [3] Zhang W Z, Zheng C, Zhang Y H, et al. Preparation and Characterization of flame-retarded poly (butylene terephthalate)/poly (ethylene terephthalate) blends: Effect of content and type of flame retardant[J]. Polymers, 2019, 11(11):1 784-1 802.
- [4] 李登辉,贾义军,张宜鹏,等.不同增韧剂对PBT非增强及增强体系性能的影响[J].塑料工业,2020,48(S1):166-169.
Li Denghui, Jia Yijun, Zhang Yipeng, et al. Effect of different tougheners on the performance of PBT non-reinforced and reinforced systems[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(S1):166-169.
- [5] Vothi H, Nguyen C, Pham L H, et al. Degradation mechanism and flame retardancy of aluminum phosphonate in glass fiber-reinforced poly(butylene terephthalate)[J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(12):6 761-6 776.
- [6] Ma M, Niu L, Ma J M, et al. Fabrication and thermal degradation kinetics of PBT/BEO/nano- Sb_2O_3 composites[J]. Journal of Nanomaterials, 2020, 2020(1). DOI:10.1155/2020/6641702.
- [7] 张宜鹏,曹金波,严欢焕,等.不同阻燃体系PBT工程塑料的热稳定性研究[J].塑料工业,2019,47(3):26-28.
Zhang Yipeng, Cao Jinbo, Yan Huanhuan, et al. Thermal stability study of the different flame retardant using in PBT[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(3):26-28.
- [8] Cai Y, Meng C M, Yang T. Study on flame retardant, toughness and anti-yellow of PBT composites in energy saving lamp[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(4):9-12.
- [9] Xu J, Ma B, Niu L, et al. Study on the flame retardancy of nano- Sb_2O_3 /BPS-PBT composites[J]. Advanced Composites Letters, 2019, 28(5):965-981.
- [10] Ma C, Wang J L, Yuan Y, et al. An insight into gas phase flame retardant mechanisms of AHP versus AlPi in PBT: Online pyrolysis vacuum ultraviolet photoionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Combustion and Flame, 2019, 209:467-477.
- [11] Chen L, Luo Y, Hu Z, et al. An efficient halogen-free flame retardant for glass-fibre-reinforced poly (butylene terephthalate) [J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(2):158-165.
- [12] 何伟壮,周文君,徐存进,等.新型有机硅阻燃PBT的研究[J].杭州师范大学学报:自然科学版,2017,16(2):123-129.
He Weizhuang, Zhou Wenjun, Xu Cunjin, et al. On novel organosilicon flame retardant PBT[J]. Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition, 2017, 16(2):123-129.
- [13] 王鲁静,王艳辉,段金凤,等.玻纤增强阻燃PBT的性能[J].工程塑料应用,2021,49(12):142-146.
Wang Lujing, Wang Yanhui, Duan Jinfeng, et al. Performance of glass fiber reinforced flame retardant PBT[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12):142-146.
- [14] 李积德,柴生勇,卢昌利,等.基于ADPP的无卤阻燃PBT/GF复合材料阻燃性能研究[J].塑料科技,2017,45(8):26-30.
Li Jide, Chai Shengyong, Lu Changli, et al. Study on the flame retardancy of halogen-free PBT/GF composites based on ADPP [J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(8):26-30.
- [15] Ramani A, Dahoe A E. On the performance and mechanism of brominated and halogen free flame retardants in formulations of glass fibre reinforced poly (butylene terephthalate) [J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 104:71-86.
- [16] 冯健,陈伟,付学俊,等.溴系阻燃PBT韧性-阻燃-流动性研究[J].广东化工,2020,47(15):41-42.
Feng Jian, Chen Wei, Fu Xuejun, et al. Study on toughness, flame retardant and flowability of brominated flame retardant PBT materials[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(15):41-42.
- [17] 王良民,王龙礼,刘文哲,等.含溴阻燃PBT的阻燃性及紫外光稳定性[J].塑料工业,2020,48(8):47-51.
Wang Liangmin, Wang Longli, Liu Wenzhe, et al. Flame retardancy and ultraviolet stability of bromine flame retarded PBT composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(8):47-51.