

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.03.005

聚苯乙烯阻燃复合材料的制备及性能

王雅珍¹, 孟爽², 肖添远¹, 朱猛¹, 祖立武¹, 兰天宇¹

(1. 齐齐哈尔大学材料科学与工程学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006; 2. 齐齐哈尔大学化学与化学工程学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006)

摘要:以聚苯乙烯(PS)接枝的改性氧化石墨烯[(GO-KH570)-g-PS]、聚磷酸铵(APP)为阻燃剂,添加到PS中制备阻燃复合材料。对阻燃复合材料进行扫描电子显微镜(SEM)、热失重(TG)、极限氧指数(LOI)、垂直燃烧等级、熔体流动速率(MFR)测试。结果表明,(GO-KH570)-g-PS与PS有较好的相容性,在添加量较低时其阻燃作用显著且能明显改善阻燃剂与聚合物相容性差的问题,(GO-KH570)-g-PS不仅具有阻燃作用而且具有增容作用。当(GO-KH570)-g-PS质量分数为7.5%,APP质量分数为2.5%时,阻燃复合材料的LOI可达到27.8%,垂直燃烧等级达到V-1级别,在700℃时的残炭率达9.30%,在250℃时的MFR为31.27 g/(10 min),并且阻燃复合材料力学性能得到改善,其缺口冲击强度为2.71 kJ/m²,拉伸强度为34.643 MPa。

关键词:聚苯乙烯接枝的改性氧化石墨烯;聚磷酸铵;阻燃剂;聚苯乙烯;阻燃复合材料

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)03-0025-05

Preparation and Properties of Polystyrene Flame Retardant Composites

Wang Yazhen¹, Meng Shuang², Xiao Tianyuan¹, Zhu Meng¹, Zu Liwu¹, Lan Tianyu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China;

2. College of Chemical and Chemical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Flame retardant composites were prepared by adding modified graphene oxide (GO-KH570) grafted polystyrene (PS) [(GO-KH570)-g-PS] and ammonium polyphosphate (APP) as flame retardants to PS. The flame retardant composites were characterized by scanning electron microscopy (SEM), thermal gravimetric (TG) analysis, limiting oxygen index (LOI) analysis, vertical combustion grade and melt flow rate (MFR) analysis. The results show that (GO-KH570)-g-PS has good compatibility with PS. Not only the effect of flame retardancy but also the poor compatibility between the flame retardants and polymer has improved obviously when the amount of addition is low. When the mass fraction of (GO-KH570)-g-PS is 7.5% and the mass fraction of APP is 2.5%, LOI reaches 27.8%, the vertical combustion grade reaches V-1 grade, the carbon residue rate is 9.30% at 700℃ and MFR is 31.27 g/(10 min) at 250℃. The mechanical properties of the flame retardant composites can be improved, the notched impact strength is 2.71 kJ/m² and the tensile strength is 34.643 MPa.

Keywords: modified graphene oxide grafted polystyrene; ammonium polyphosphate; flame retardant; polystyrene; flame retardant composite

聚苯乙烯(PS)因耐热性好、密度低、力学性能良好、耐化学药品性、易于加工成型等优异的性能,而广泛用于汽车、家电、建筑等行业^[1]。但是由于PS极易燃烧,且燃烧发热量大,火焰极易传播,产生大量熔滴,极大地限制了它在某些领域中的应用^[2]。近年来火灾事故的频频发生,给人们的生命安全和财产造成巨大损害。因此,具有阻燃性能的PS对

于防止火灾的发生显得尤为重要^[3]。

无卤阻燃剂以其生烟量低、毒性较小、环境友好等优势,发展前景越来越受到人们的关注。现应用较广泛的无卤阻燃剂可分为磷系阻燃剂、膨胀型阻燃剂、无机阻燃剂等^[4],这些阻燃剂大多以共混方式添加到聚合物基体中,因此阻燃剂与聚合物基材存在相容性的问题。Wang Zhengzhou等^[5]使

基金项目:国家自然科学基金项目(21376127、U1162123),齐齐哈尔科技计划项目(GYGG-201601),齐齐哈尔市科技局面上项目(GYGG-201210)

通讯作者:王雅珍,教授,研究方向为高分子材料 E-mail: wyz6166@163.com

收稿日期: 2017-12-25

引用格式:王雅珍,孟爽,肖添远,等.聚苯乙烯阻燃复合材料的制备及性能[J].工程塑料应用,2018,46(3):25-29.

Wang Yazhen, Meng Shuang, Xiao Tianyuan, et al. Preparation and properties of polystyrene flame retardant composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):25-29.

用 SiO₂ 纳米微球 / 氧化石墨烯 (GO) (SNGO) 和含磷阻燃剂甲基膦酸二甲酯 (DMMP) 制备无卤阻燃聚氨酯泡沫,当 SNGO 添加量为 4%, DMMP 添加量为 16% 时,极限氧指数 (LOI) 为 24%。A. Edenharter 等^[6] 使用层状双氢氧化物 (LDH) 和 GO 制备阻燃 PS 复合材料,当 LDH 用量为 5%, GO 用量为 1% 时,LOI 达到 20%。阻燃剂添加量较大时,阻燃剂与聚合物的相容性问题更加显著,与此同时,添加量较少时阻燃效果又不显著,因此制备较低添加量且阻燃效果明显的阻燃剂显得尤为重要。

笔者用苯乙烯接枝改性制备了聚苯乙烯接枝的改性氧化石墨烯 [(GO-KH570)-g-PS] 阻燃剂,在 PS 中加入 (GO-KH570)-g-PS 和聚磷酸铵 (APP),制备阻燃复合材料,研究阻燃剂对复合材料阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PS: Bycolene[®] 158K, 扬子石化-巴斯夫有限责任公司;

APP: 聚合度为 1000, 结晶 II 型, 济南上善精细化工有限公司;

(GO-KH570)-g-PS: 自制^[7]。

1.2 主要设备与仪器

高速混合机: GRH-10 型, 阜新市热源设备厂;

双螺杆挤出机: SHJ-20B 型, 南京杰恩特机电有限公司;

注塑机: SSF380-K5 型, 宁波圣特龙塑料机械有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400 型, 日本日立公司;

热重 (TG) 分析仪: STA 449C 型, 德国耐驰仪器制造有限公司;

LOI 仪: JF-3 型, 承德市大加仪器有限公司;

水平 / 垂直燃烧试验机: M607 型, 山东山纺仪器有限公司;

冲击试验机: JJ-20 型, 长春市智能仪器设备有限公司;

万能试验机: WSM-20KN 型, 长春市智能仪器设备有限公司;

熔体流动速率 (MFR) 仪: SRZ-400E 型, 长春市智能仪器设备有限公司。

1.3 样品制备

将阻燃剂 (GO-KH570)-g-PS, APP 与 PS 按照

表 1 配方分别加入高速混合机中混合均匀, 待用。开启双螺杆挤出机并设定工艺参数: 转速为 11.6 r/min, 机头温度为 190℃, 喂料速度为 4.9 r/min。将纯 PS 加入储料桶, 清洗设备残留的无关杂质, 防止杂质影响待测样品纯度。然后加入混合好的物料, 同时开启切粒机用双螺杆挤出机熔融挤出、冷却、造粒, 再将制得的粒料放入烘箱中, 在 50℃ 下烘干 2 h。开启注塑机, 并设定工艺参数: 熔体温度为 200℃, 注塑压力为 65 MPa, 用纯 PS 清洗注塑机中的残留杂质。取出经烘干后的粒料, 将其加入注塑机中, 注射成型得到阻燃复合材料标准样条。

表 1 纯 PS 及其阻燃复合材料配方

样品编号	PS	(GO-KH570)-g-PS	APP	%
1 [#]	100	0	0	
2 [#]	90	5	5	
3 [#]	90	10	0	
4 [#]	90	0	10	
5 [#]	90	2.5	7.5	
6 [#]	90	7.5	2.5	

1.4 性能测试与结构表征

SEM 分析: 取阻燃复合材料样条, 使用液氮脆断, 并对断面进行喷金处理, 用 SEM 进行观察。

TG 分析: 取样品 5 mg, 高纯氮气保护, 升温速率为 10℃/min, 测试温度范围为 0~800℃。

LOI 按照 GB/T 2046-2009 测试, 气流速率为 10 L/min, 试样尺寸为 130 mm × 10 mm × 4 mm。

垂直燃烧性能按照 GB/T 2408-2008 测试, 试样尺寸为 130 mm × 10 mm × 4 mm。

拉伸强度按照 GB/T 1040.1-2006 测试, 拉伸速率为 20 mm/min。

缺口冲击强度按照 GB/T 1043-2008 测试, V 型缺口, 冲击能量为 1 J。

MFR 按照 GB/T 3682-2000 测试。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图 1 为阻燃复合材料的 SEM 照片。

从图 1a 可以看出, 单独添加 (GO-KH570)-g-PS 时, 阻燃复合材料 (3[#] 样品) 表面平整, 无断层, 界面连续性好, 表明 (GO-KH570)-g-PS 与 PS 有较好的相容性, 在 PS 中没有发生团聚现象且分散均匀; 从图 1b 可以看出, 仅添加 APP 时, 阻燃复合材料 (4[#] 样品) 有较大的突起与凹陷并且存在深而宽的断层, 界面连续性不好, 表明 APP 作为无机阻燃剂添加到聚合物中时, 与聚合物的相容性不好, 在聚合物

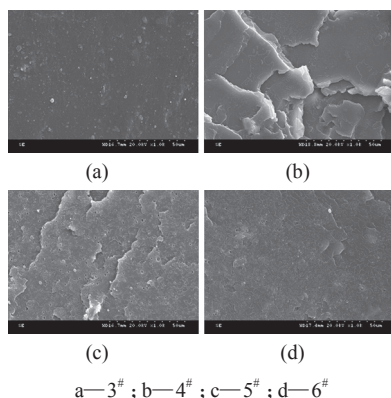


图1 阻燃复合材料的SEM照片(放大1000倍)

中易发生团聚与分布不均的状况。通过对比图1c和图1d可以发现,图1c中阻燃复合材料(5[#]样品)表面虽然存在界面不连续现象,但较仅添加APP的阻燃复合材料(见图1b)已经有所改善,断层明显减小,进一步增加(GO-KH570)-g-PS用量而减少APP用量时,阻燃复合材料(6[#]样品)的界面连续性明显改善(见图1d)。由此表明,GO经KH570改性再在其表面接枝PS后,能够很好地改善其与聚合物的相容性。因此(GO-KH570)-g-PS在复合材料中不但充当阻燃剂,而且可以作为增容剂来改善APP与PS基材的相容性。

2.2 TG分析

图2为纯PS及其阻燃复合材料的TG曲线。

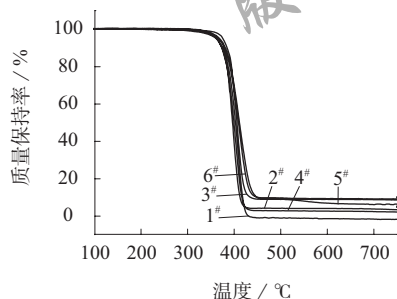


图2 纯PS及其阻燃复合材料的TG曲线

聚合物的热稳定性与阻燃性能有着密不可分的关系。从图2可以看出,纯PS(1[#]样品)在320℃开始逐渐分解,当温度达到420℃就已经完全分解;而阻燃复合材料的开始分解温度提高到340℃,完全分解温度提高到450℃。与纯PS的TG曲线相比,添加了阻燃剂的复合材料的残炭率更高。阻燃剂的添加量不同,复合材料的残炭率也不同。对比添加不同阻燃剂的复合材料TG曲线可以看出,添加10%的APP的阻燃复合材料(4[#]样品)在700℃时的残炭率仅为2.25%,而添加等量的(GO-KH570)-g-PS阻燃剂制得的阻燃复合材料(3[#]样品)在

700℃的残炭率为8.36%。另外,对照图1中相应阻燃复合材料断面的SEM照片可以得出,阻燃剂添加量相同时阻燃剂与聚合物基体相容性好的复合材料具有更高的质量保持率^[8]。当组成复配阻燃剂,即(GO-KH570)-g-PS的质量分数为2.5%,APP质量分数为7.5%时,阻燃复合材料(5[#]样品)在700℃的残炭率为6.34%,较添加等量单一(GO-KH570)-g-PS阻燃剂时的复合材料(3[#]样品)的残炭率有所降低。这是由于APP属无机阻燃剂,添加量过多会导致其在聚合物基体中的分布不均甚至团聚,因此不能起到很好地抑制聚合物分解的效果。而当(GO-KH570)-g-PS质量分数为7.5%,APP质量分数为2.5%时,阻燃复合材料(6[#]样品)在700℃时的残炭率最高,达到9.30%。这是由于APP添加量较低而且(GO-KH570)-g-PS具有增容作用,能够提高阻燃剂与聚合物的相容性,在温度较高时阻燃剂分解能够阻隔聚合物分解所释放的热量传递,抑制聚合物的分解。

2.3 阻燃性能及力学性能分析

(1) 阻燃性能分析

阻燃复合材料的阻燃测试结果列于表2。

表2 纯PS及其阻燃复合材料阻燃及力学性能测试结果

样品 编号	垂直燃 烧等级	是否 滴落	LOI/ %	缺口冲击强 度/(kJ·m ⁻²)	拉伸强度/ MPa
1 [#]			18.1	2.39	33.258
2 [#]	V-2	是	26.5	2.32	33.736
3 [#]	V-2	是	22.9	3.13	35.410
4 [#]	V-2	是	23.7	1.77	31.342
5 [#]	V-2	是	24.2	2.06	32.137
6 [#]	V-1	否	27.8	2.71	34.643

由表2可以看出,当(GO-KH570)-g-PS与APP添加量分别为10%时,所制备的两种阻燃复合材料的垂直燃烧等级仅达到V-2级别,燃烧过程中伴有严重的滴落现象;仅添加(GO-KH570)-g-PS的阻燃复合材料的LOI略低于仅添加APP的阻燃复合材料。这是由于(GO-KH570)-g-PS中起阻燃作用的GO含量较低,而APP则完全起阻燃作用。对比图1中的SEM照片可见,APP在添加量较高时其与PS基体的相容性差,不能均匀分散在聚合物中,因此其阻燃复合材料的LOI并不比单独添加等量(GO-KH570)-g-PS的阻燃复合材料高多少。由于添加单一阻燃剂的阻燃效果不好,为此将(GO-KH570)-g-PS与APP组成复配体系添加到PS中,对比表2中数据可知,当(GO-KH570)-g-PS添加量为7.5%,APP添加量为2.5%时,复合材料(6[#]

样品)垂直燃烧等级达到V-1,且无滴落现象,LOI值为27.8%,达到难燃级别,此时复合材料的残炭率为9.30%。(GO-KH570)-g-PS中含有大量的炭源,APP中含有炭源和炭源,在受热分解过程中会产生磷酸、偏磷酸和水,分解产生的磷酸、偏磷酸能够促进(GO-KH570)-g-PS形成稳定的炭层覆盖在材料表面,隔绝氧气与材料受热分解所产生的可燃气体接触,达到固相阻燃与气相阻燃的双重阻燃作用,使复合材料的阻燃性能显著提高^[9]。以上分析结果表明,(GO-KH570)-g-PS与APP具有协同阻燃作用。一般来说,很多人认为阻燃级别越高越好,但是实际情况并非如此。在某些应用领域,阻燃等级低的塑料反而更有优势。例如,在某些电器制品上,要求材料具有抗电弧点燃性,此时如果使用V-2级别的阻燃塑料将会优于V-0等级的塑料。这是因为V-2级别的塑料不会在电作用下形成导电的结焦,从而降低了着火的可能性,而V-0等级的塑料反而存在着着火的可能性。笔者制备的阻燃复合材料的垂直燃烧等级在阻燃剂添加量较低时能够达到V-1级别,垂直燃烧等级介于V-2与V-0级别之间,因此在电器制品中的应用会更有优势^[10-11]。

(2) 力学性能分析。

阻燃复合材料的缺口冲击强度与拉伸强度列于表2。对比表2中的数据可知,仅添加10%的APP时,复合材料的冲击强度和拉伸强度较纯PS均有所降低。这是由于APP与PS基体相容性差、界面连续性不好导致的;而添加10%的(GO-KH570)-g-PS时,阻燃复合材料的缺口冲击强度和拉伸强度均有明显提高。这是由于(GO-KH570)-g-PS与PS相容性好,而且(GO-KH570)-g-PS是由GO有机改性而制得,保留了GO原有的六角型蜂巢二维网状结构,使其在复合材料受到拉伸或冲击时能够分散和吸收相应的能量,从而使复合材料的力学性能有所提高^[12]。当(GO-KH570)-g-PS添加量为7.5%,APP添加量为2.5%时,阻燃复合材料冲击强度和拉伸强度分别为2.71 kJ/m²和34.643 MPa,均较纯PS的高,而且阻燃性能优异。

2.4 MFR分析

聚合物材料的熔体黏度是影响炭层形成的重要因素之一。由于熔体黏度与MFR成反比,因此通过测定MFR可以反映复合材料的熔体黏度^[13]。纯PS及其阻燃复合材料在不同温度下的MFR曲线如图3所示。

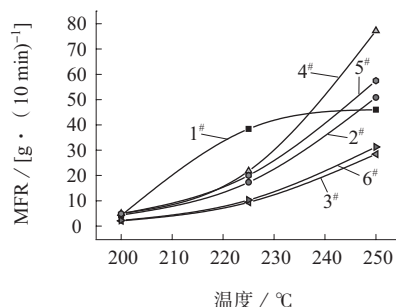


图3 纯PS及阻燃复合材料在不同温度下的MFR曲线

由图3可以看出,纯PS在250℃时的MFR为4.14 g/(10 min),在250℃时的MFR为45.98 g/(10 min);而添加10%的(GO-KH570)-g-PS后,阻燃复合材料的MFR在250℃时为28.42 g/(10 min),较纯PS显著降低,表明(GO-KH570)-g-PS具有增容作用^[14]。随着温度的升高,MFR逐渐增加,表明熔体流动性增加,熔体黏度降低。由此可以推测,当阻燃复合材料燃烧受热分解时熔体黏度较低会产生滴落现象。这与表1中的测试结果一致(除达到V-1等级的6#阻燃复合材料外,其它阻燃复合材料在燃烧过程中都伴有滴落现象)。由于GO具有网状结构,随着阻燃复合材料中(GO-KH570)-g-PS添加量的增加,MFR逐渐降低,熔体黏度逐渐升高^[15]。一方面,熔体黏度越高,越有利于阻燃复合材料燃烧之后炭层的形成;另一方面,熔体黏度越高,阻燃复合材料燃烧时抗滴落能力越强。当(GO-KH570)-g-PS添加量为7.5%,APP添加量为2.5%时,其阻燃复合材料(6#样品)在250℃时的MFR为31.27 g/(10 min),较纯PS材料明显降低。因此在高温下熔体黏度高,能够形成稳定的炭层,从而不产生滴落现象。

3 结论

(1) (GO-KH570)-g-PS与PS相容性良好,不但具有阻燃作用而且具有增容作用,能够提高阻燃复合材料的力学性能。

(2) (GO-KH570)-g-PS复配APP阻燃体系具有协效阻燃效应,能明显提高阻燃复合材料的LOI。

(3) 当添加7.5%的(GO-KH570)-g-PS,2.5%的APP时,阻燃复合材料的LOI达27.8%,并且垂直燃烧等级达到V-1级,在700℃时的残炭率达9.30%,此时缺口冲击强度为2.71 kJ/m²,拉伸强度为34.643 MPa,较纯PS均有所提高。

参考文献

[1] Levchik S V, Weil E D. New developments in flame retardancy of

- styrene thermoplastics and foams[J]. Polym Int, 2008, 57:431-448.
- [2] 王保正. 聚丙烯用阻燃剂及阻燃聚丙烯[J]. 塑料, 2004, 33(1):54-59.
- Wang Baozheng. Flame retardant used in pp and fire retardant PP[J]. Plastics, 2004, 33(1):54-59.
- [3] 陈浩然, 李晓丹. 阻燃剂的研究发展现状[J]. 纤维复合材料, 2012(1):18-21.
- Chen Haoran, Li Xiaodan. The recent progress of flame-retardants[J]. Fiber Composites, 2012(1):18-21.
- [4] 王雅珍, 孟爽, 王凤超. 聚苯乙烯用阻燃剂研究进展[J]. 广州化工, 2016, 44(22):1-2, 11.
- Wang Yazhen, Meng Shuang, Wang Fengchao. Research progress on flame retardant for polystyrene[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(22):1-2, 11.
- [5] Wang Zhengzhou, Li Xiaoyan. Mechanical properties and flame retardancy of rigid polyurethane foams containing a SiO₂ nanospheres / graphene oxide hybrid and dimethyl methylphosphonate[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, doi:10.1080/03602559.2017.1354251.
- [6] Edenharter A, Feicht P, Diar-Bakerly B, et al. Superior flame retardant by combining high aspect ratio layered double hydroxide and graphene oxide[J]. Polymer, 2016, 91:41-49.
- [7] 王雅珍, 孟爽, 肖添远, 等. 苯乙烯在改性氧化石墨烯表面的接枝聚合[J]. 中国塑料, 2017, 31(9):81-85.
- Wang Yazhen, Meng Shuang, Xiao Tianyuan, et al. Grafting polymerization of styrene on surface of modified graphene oxide[J]. China Plastics, 2017, 31(9):81-85.
- [8] Han Yongqin, Wu Ying, Shen Mingxia, et al. Preparation and properties of polystyrene nanocomposites with graphite oxide and graphene as flame retardants[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(12):4214-4222.
- [9] Feng Caimin, Zhang Yi, Liu Siwei, et al. Synthesis of novel triazine charring agent and its effect in intumescent flame-retardant polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(6):3208-3216.
- [10] 马林泉. 低压电器用电工模塑料的现状与发展趋势[J]. 电器工业, 2015(11):12-14.
- Ma Linquan. Current situation and development trend of electrical mould plastics for low voltage electrical appliances[J]. China Electrical Equipment Industry, 2015(11):12-14.
- [11] 梁亚东, 吕建. 电工用热固性模塑料的应用与发展[J]. 绝缘材料, 2000(4):25-29.
- Liang Yadong, Lyu Jian. Application and development of thermosetting moulded plastics for electricians[J]. Insulating Materials, 2000(4):25-29.
- [12] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6:183-191.
- [13] Yuan Bihe, Fan Ao, Man Yang, et al. The effects of graphene on the flammability and fire behavior of intumescent flame retardant polypropylene composites at different flame scenarios[J]. Polymer Degradation & Stability, 2017, 143:42-56.
- [14] Wang Xin, Song Lei, Yang Hongyu, et al. Synergistic effect of graphene on antidripping and fire resistance of intumescent flame retardant poly(butylene succinate)composites[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(9):5376-5383.
- [15] Li Bin, Zhong Weihong. Review on polymer / graphite nanoplatelet nanocomposites[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(17):5595-5614.
-
- (上接第 24 页)
- 用[J]. 中国塑料, 2014, 28(10):52-55.
- Lan Hao, Yin Yunshan, Xue Gang, et al. Research and application of high glow wire flame retardant enhance PET / PA6 alloy material[J]. China Plastics, 2014, 28(10):52-55.
- [10] 陈哲, 张志丹, 费建新, 等. 高灼热丝引燃温度高漏电起痕指数的阻燃 PA6 / GF[J]. 合成树脂及塑料, 2014(5):62-64.
- Chen Zhe, Zhang Zhidan, Fei Jianxin, et al. Flame-retardant glass fiber PA6 with high glow wire ignition temperature and comparative tracking index[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2014(5):62-64.
- [11] 陈超, 郭建鹏, 孟成铭, 等. 耐刮擦高灼热丝温度 HIPS 研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(10):37-40.
- Chen Chao, Guo Jianpeng, Meng Chengming, et al. Study on anti-scratch high glow wire temperature HIPS[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(10):37-40.
- [12] 王保续, 兰浩, 李娜, 等. 高灼热丝阻燃增强 PA / PBT 合金材料[J]. 塑料工业, 2012, 40(11):99-102.
- Wang Baoxu, Lan Hao, Li Na, et al. High glow wire flame retardant reinforced PA / PBT alloy[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(11):99-102.
- [13] 贾义军, 唐帅, 郭争光, 等. 满足苛刻阻燃要求的环保阻燃增强 PBT 的研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(3):21-25.
- Jia Yijun, Tang Shuai, Guo Zhengguang, et al. Study on environment friendly flame-retardant glass fiber reinforced polybutylene terephthalate (PBT) meeting the strict requirements of flame-retardant[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(3):21-25.
- [14] 陈力, 杨荣, 王玉忠, 等. 同时实现阻燃与增强的高分子材料的阻燃方法[J]. 高分子通报, 2013(9):134-139.
- Chen Li, Yang Rong, Wang Yuzhong, et al. An efficient method for flame retardation of polymeric materials with improved mechanical properties[J]. Polymer Bulletin, 2013(9):134-139.
- [15] 欧育湘. 阻燃剂—制造、性能及应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.
- Ou Yuxiang. Flam Retardant—manufacturing, performance and application[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1997.