

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.004

# 无卤阻燃 PPE/PA66 合金的制备及性能

孟成铭, 李鹏

(上海日之升科技有限公司, 上海 201109)

**摘要:**以多聚芳基磷酸酯和硼酸锌作为阻燃剂制备无卤阻燃聚苯醚(PPE)/尼龙66(PA66)合金材料。分别讨论了PPE/PA66配比、阻燃剂多聚芳基磷酸酯用量及增容剂马来酸酐接枝聚苯醚(PPE-g-MAH)和增韧剂马来酸酐接枝苯乙烯-乙烯/丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS-g-MAH)用量对PPE/PA66合金体系力学、耐热性能和阻燃性能的影响,并通过扫描电子显微镜观察了增容剂对合金表面形貌的影响。结果表明,PPE/PA66最佳配比为1/1(质量比),阻燃剂的加入会影响合金材料的力学性能和耐热性,添加多聚芳基磷酸酯和硼酸锌的最优质量分数分别为15%和2%;PPE-g-MAH的加入有效改善了PPE与PA66之间的相容性,但添加量不宜过大,以质量分数6%为宜;SEBS-g-MAH可以有效改善合金的韧性,但会降低合金的阻燃性能,以质量分数5%为宜;最终制备的阻燃PPE/PA66合金材料的阻燃性能可达到V-0级(1.6 mm),热变形温度达95.2℃,拉伸强度为61.9 MPa,缺口冲击强度为108.4 J/m。

**关键词:**聚苯醚;尼龙66;合金;无卤阻燃;力学性能;热性能

**中图分类号:** TQ326.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)08-0018-05

## Preparation and Properties of Halogen Free Flame Retardant PPE/PA66 Alloys

Meng Chengming, Li Peng

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

**Abstract:** Halogen free flame retardant polyphenylene ether (PPE)/nylon 66 (PA66) alloy were prepared by using polyaryl phosphate and zinc borate as flame retardants. The effects of ratio of PPE and PA66, contents of polyaryl phosphate, compatibilizer maleic anhydride grafted polyphenylene ether (PPE-g-MAH) and toughening agent maleic anhydride grafted styrene-ethylene/butylene-styrene block copolymer (SEBS-g-MAH) on the mechanical properties, heat resistance and flame retardance of PPE/PA66 alloy were discussed. The influences of the compatibilizer on the surface morphology of the alloys were observed by scanning electron microscopy. The results show that the best ratio of PPE/PA66 is 1/1 (mass ratio), the mechanical properties and heat resistance of the alloys are reduced by addition of flame retardants, the optimum mass fraction of polyaryl phosphate and zinc borate are 15% and 2% respectively. The addition of PPE-g-MAH can effectively improve the compatibility between PPE and PA66, but the addition amount should not be too large, the mass fraction of 6% is appropriate. SEBS-g-MAH can effectively improve the toughness of the alloy, but it will reduce the flame retardancy of the alloys, with a mass fraction of 5%. The flame retardancy of the final flame retardant PPE/PA66 alloy can reach V-0 grade (1.6 mm), the thermal deformation temperature is 95.2℃, the tensile strength is 61.9 MPa, the notch impact strength is 108.4 J/m.

**Keywords:** polyphenylene ether; nylon 66; alloy; halogen free flame retardance; mechanical property; heat resistance

聚苯醚(PPE)的分子结构赋予PPE自熄性、良好尺寸稳定性的同时,也使其具有较高的熔体黏度,极差的加工性能<sup>[1-2]</sup>,导致目前已经商用化的PPE均为合金化材料。尼龙(PA)由于其分子结构中的

酰胺键,易形成氢键,具有优异的力学性能、热性能及加工性能,也正是因为氢键的存在使其吸水率高、制品极易变形<sup>[3-4]</sup>。PA和PPE性能上的互补性使PPE/PA合金成为综合性能最优良的高分子合金

通讯作者:孟成铭,工程师,主要从事高分子材料改性工作 E-mail: mcm2010@shsunny.com

收稿日期:2018-05-31

引用格式:孟成铭,李鹏. 无卤阻燃PPE/PA66合金的制备及性能[J]. 工程塑料应用,2018,46(8):18-22.

Meng Chengming, Li Peng. Preparation and properties of halogen free flame retardant PPE/PA66 alloys[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8): 18-22.

材料,也成为高分子合金领域的研究热点<sup>[5]</sup>,但 PPE 和 PA 合金化后,其阻燃性能大幅度降低,而在电子电器领域对所用材料的阻燃性能要求较高,因此,PPE/PA 合金材料的应用受到极大的限制<sup>[6]</sup>。磷酸酯类阻燃剂极佳的耐温性使其在 PPE 阻燃改性中得到广泛应用<sup>[7-8]</sup>。为满足实际生产的需要,笔者选择多聚芳基磷酸酯和硼酸锌协同阻燃 PPE/PA66 合金,制备出综合性能优异的无卤阻燃 PPE/PA66 合金。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPE : 630,美国沙伯基础创新塑料有限公司;  
PA66 : EPR2.7,河南神马实业股份有限公司;  
多聚芳基磷酸酯: PX220,浙江万盛化工有限公司;  
硼酸锌: ZB2335,山东优索化工科技有限公司;  
马来酸酐接枝聚苯醚 (PPE-g-MAH) : CX-1,日本出光兴产株式会社;  
马来酸酐接枝苯乙烯-乙烯/丁烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS-g-MAH) : FG1901,美国科腾聚合物公司;  
抗滴落剂: SN3300B3,广州瀚能新材料股份有限公司;  
抗氧剂: P-EPQ,瑞士科莱恩化工集团;  
润滑剂: PETS,美国龙沙集团。

1.2 主要仪器和设备

双螺杆挤出机: TSB-52 型,江苏诚盟装备有限公司;  
注塑机: JM128 型,深圳市震雄注塑机有限公司;  
扫描电子显微镜 (SEM) : S-4800 型,日本日立株式会社;  
万能电子拉力试验机: SHAED-4000 型,上海亚野实业有限公司;  
悬臂梁冲击试验仪: RESIL P/N 6957.00 型,意大利 CEAST 公司;  
数显式热变形维卡温度测定仪: CZ-6005 型,扬州昌哲试验机械有限公司;  
水平垂直燃烧测定仪: CZF-3 型,深圳方测精密仪器科技有限公司。

1.3 试样制备

将 PPE 和 PA66 分别在 100℃ 下于鼓风干燥箱中干燥 6 h 后,按表 1 阻燃 PPE/PA66 合金配方混合均匀,由双螺杆挤出机挤出造粒,挤出工艺为:第一区至八区温度依次为 250,260,275,275,265,265,260,260℃,机头温度为 250℃,螺杆转速为 500 r/min。将造粒粒子在 100℃ 下于鼓风干燥箱中干燥 4 h 后注塑测试样条,注塑温度依次设定为 280,290,290,300℃。将样条于 23℃ 下放置 24 h 后测试。

表 1 阻燃 PPE/PA66 合金配方

| 编号              | PPE  | PA66 | 多聚芳基磷酸酯 | 硼酸锌 | PPE-g-MAH | SEBS-g-MAH | 抗滴落剂 | 抗氧剂 | 润滑剂 |
|-----------------|------|------|---------|-----|-----------|------------|------|-----|-----|
| 1 <sup>#</sup>  | 24.6 | 57.4 | 15      | 2   | 0         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 2 <sup>#</sup>  | 32.8 | 49.2 | 15      | 2   | 0         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 3 <sup>#</sup>  | 41   | 41   | 15      | 2   | 0         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 4 <sup>#</sup>  | 49.2 | 32.8 | 15      | 2   | 0         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 5 <sup>#</sup>  | 57.4 | 24.6 | 15      | 2   | 0         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 6 <sup>#</sup>  | 40   | 40   | 15      | 2   | 2         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 7 <sup>#</sup>  | 39   | 39   | 15      | 2   | 4         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 8 <sup>#</sup>  | 38   | 38   | 15      | 2   | 6         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 9 <sup>#</sup>  | 37   | 37   | 15      | 2   | 8         | 0          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 10 <sup>#</sup> | 36.5 | 36.5 | 15      | 2   | 6         | 3          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 11 <sup>#</sup> | 35.5 | 35.5 | 15      | 2   | 6         | 5          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 12 <sup>#</sup> | 34.5 | 34.5 | 15      | 2   | 6         | 7          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |
| 13 <sup>#</sup> | 33.5 | 33.5 | 15      | 2   | 6         | 9          | 0.3  | 0.3 | 0.4 |

1.4 性能测试

拉伸强度按 ASTM D638-2014 测试,拉伸速率为 5 mm/min ;  
缺口冲击强度按 ASTM D256-2010 测试,缺口为 45° 角 V 型缺口;  
热变形温度 (HDT) 按 ASTM D648-2007 测试,负荷为 1.82 MPa,升温速率为 2℃ /min,样条尺寸为 127 mm×12.7 mm×3.2 mm ;

SEM 分析:拉伸样条经液氮冷却后脆断并表面喷金,测试加速电压为 10 kV ;

阻燃性能按 UL 94-2003 测试,样条尺寸为 127 mm×12.7 mm×1.6 mm。

2 结果与讨论

2.1 阻燃剂用量对阻燃 PPE/PA66 合金性能的影响  
在固定 PPE/PA66 的配比为 1 / 1(质量比)条件下,研究了不同阻燃剂 (多聚芳基磷酸酯和硼酸

锌)用量下阻燃 PPE/PA66 合金的性能,结果如表 2 所示。

表 2 不同阻燃剂用量下阻燃 PPE/PA66 合金的性能

| 多聚芳基<br>磷酸酯质<br>量分数/% | 硼酸锌<br>质量分<br>数/% | 拉伸<br>强度/<br>MPa | 缺口冲<br>击强度/<br>(J·m <sup>-1</sup> ) | 热变形<br>温度/℃ | UL 94<br>阻燃等级 |
|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------|---------------|
| 0                     | 0                 | 64.2             | 75.6                                | 152.2       | HB            |
| 10                    | 0                 | 56.7             | 68.5                                | 120.5       | V-2           |
| 10                    | 2                 | 56.4             | 67.2                                | 121.2       | V-2           |
| 10                    | 4                 | 54.8             | 65.4                                | 121.3       | V-2           |
| 15                    | 0                 | 52.5             | 64.5                                | 100.5       | V-1           |
| 15                    | 2                 | 53.8             | 63.2                                | 103.4       | V-0           |
| 15                    | 4                 | 53.1             | 60.5                                | 105.1       | V-0           |
| 18                    | 0                 | 47.2             | 62.5                                | 90.3        | V-1           |
| 18                    | 2                 | 46.7             | 60.1                                | 91.5        | V-0           |
| 18                    | 4                 | 48.8             | 58.2                                | 91.1        | V-0           |
| 20                    | 0                 | 40.8             | 50.5                                | 81.7        | V-0           |
| 20                    | 2                 | 39.9             | 48.6                                | 82.4        | V-0           |
| 20                    | 4                 | 41.2             | 43.2                                | 82.5        | V-0           |

由表 2 数据可以看出,随着多聚芳基磷酸酯用量的增加,阻燃 PPE/PA66 合金的力学性能和耐热性都显著下降,其中缺口冲击强度和热变形温度下降较为明显。单独添加质量分数 20% 的多聚芳基磷酸酯时,阻燃 PPE/PA66 合金可达到 V-0 级别,但此时合金的热变形温度由未加入多聚芳基磷酸酯时的 152.2℃ 降至 81.7℃,下降 46.3%。原因在于添加的磷系阻燃剂多聚芳基磷酸酯与 PPE 及 PA66 大分子链之间的界面作用较差,极易成为应力集中点,同时,磷系阻燃剂会起到一定增塑剂的作用,削弱了分子链间的作用力,增加了分子链活动能力,所以合金的力学性能和耐热性受到明显削弱<sup>[9]</sup>。随着硼酸锌含量的增加,合金的缺口冲击强度小幅下降,而热变形温度小幅升高。这可能是因为硼酸锌在合金体系中对 PA66 起到了一定的异相成核剂的作用,从而小幅提高了热变形温度<sup>[10]</sup>。而硼酸锌作为非极性分子存在于 PPE 和 PA66 的分子链中,减少了分子间作用力,破坏了 PA66 分子链柔顺性,故使合金的韧性下降。当多聚芳基磷酸酯用量达到 15%、硼酸锌用量为 2% 时,阻燃 PPE/PA66 合金的阻燃性能可达到 V-0 级别,热变形温度维持在 100℃ 以上,其综合性能最优,故后续研究中,聚磷酸铵和硼酸锌的添加量分别选用 15% 和 2%。

## 2.2 PPE/PA66 配比下阻燃 PPE/PA66 合金性能的影响

在聚磷酸铵和硼酸锌的添加量分别为 15% 和 2% 条件下,研究了不同 PPE 与 PA66 配比下阻燃 PPE/PA66 合金的性能,结果列于表 3。

由表 3 可以看出,随着 PPE 用量的逐渐增加,

表 3 不同 PPE/PA66 配比下 PPE/PA66 合金的性能

| 编号             | 拉伸强<br>度/MPa | 缺口冲击<br>强度/(J·m <sup>-1</sup> ) | 热变形<br>温度/℃ | UL 94<br>阻燃等级 |
|----------------|--------------|---------------------------------|-------------|---------------|
| 1 <sup>#</sup> | 63.2         | 68.4                            | 86.5        | V-2           |
| 2 <sup>#</sup> | 58.7         | 63.5                            | 94.4        | V-1           |
| 3 <sup>#</sup> | 53.8         | 63.2                            | 103.4       | V-0           |
| 4 <sup>#</sup> | 51.2         | 48.2                            | 118.6       | V-0           |
| 5 <sup>#</sup> | 50.4         | 41.6                            | 136.2       | V-0           |

阻燃 PPE/PA66 合金的拉伸强度和缺口冲击强度缓慢下降,但当 PPE 占比达到一半(3<sup>#</sup> 样品)及以上(4<sup>#</sup> 样品和 5<sup>#</sup> 样品)时,拉伸强度变化不明显;相反,阻燃 PPE/PA 合金的耐热性能随着 PPE 用量的增加大幅升高。其原因可能是:PPE 本身为一种含有大量刚性链段的聚合物,具有较高的玻璃化转变温度,但刚性链段赋予其极佳耐热性的同时又使其具有一定的脆性,PPE 的加入对 PA66 柔性链段产生了一定的破坏和切断作用<sup>[11]</sup>,再加上 PA66 和 PPE 本身不相容,故随着 PPE 用量的增加,合金的热变形温度显著上升,拉伸强度和缺口冲击强度下降<sup>[12]</sup>。由于 PPE 结构中含有的大量苯环决定了 PPE 具有优良的成炭性,故其阻燃性能优异,而 PA66 成炭性较差,极易燃烧,随着 PA66 用量的增加,合金的阻燃性能逐步下降。只有当 PPE/PA66  $\geq 1/1$  (3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 样品)时,合金的阻燃性能才可以达到 V-0 级别。故后续增容剂和增韧剂研究中,PPE/PA66 的比例设定为 1/1,多聚芳基磷酸酯和硼酸锌添加量分别为 15% 和 2%。

## 2.3 增容剂用量对阻燃 PPE/PA66 合金性能的影响

PPE 与 PA66 是不相容的,未增容的合金性能较差,故需添加增容剂进行增容改性。故在固定多聚芳基磷酸酯和硼酸锌的添加量分别为 15% 和 2%,PPE 和 PA66 配比为 1/1 时,研究了不同反应型增容剂 PPE-g-MAH 用量下阻燃 PPE/PA66 合金的性能,结果列于表 4。

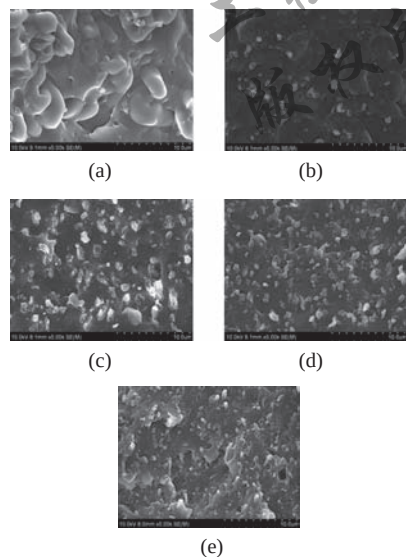
表 4 不同 PPE-g-MAH 用量下 PPE/PA66 合金的性能

| 编号             | 拉伸强<br>度/MPa | 缺口冲击<br>强度/(J·m <sup>-1</sup> ) | 热变形<br>温度/℃ | UL 94<br>阻燃等级 |
|----------------|--------------|---------------------------------|-------------|---------------|
| 3 <sup>#</sup> | 53.8         | 63.2                            | 103.4       | V-0           |
| 6 <sup>#</sup> | 60.1         | 73.5                            | 102.9       | V-0           |
| 7 <sup>#</sup> | 64.8         | 84.5                            | 101.2       | V-0           |
| 8 <sup>#</sup> | 70.1         | 90.2                            | 100.4       | V-0           |
| 9 <sup>#</sup> | 68.1         | 88.6                            | 99.1        | V-0           |

由表 4 可看出,随着 PPE-g-MAH 用量的增加,阻燃 PPE/PA 合金的力学性能呈现先上升后下降的趋势,当 PPE-g-MAH 用量为 6% 时,阻燃 PPE/PA66 合金(8<sup>#</sup> 样品)的力学性能达到最大值,其拉

伸强度达到 70.1 MPa,缺口冲击强度达到 90.2 J/m,但热变形温度随着 PPE-g-MAH 用量的增加小幅下降,阻燃性能维持不变。其原因在于:加入 PPE-g-MAH 可有效地改善阻燃 PPE/PA66 合金的相容性,PPE-g-MAH 的用量较少时,其作用不显著,大相畴尺寸的 PPE 与 PA66 间的界面结合力较弱,但随着 PPE-g-MAH 用量的增加,PPE 与 PA66 间的相容性得到改善,PPE 相畴尺寸变小,PPE 相与 PA66 相在界面的结合力逐步提高,外加应力能有效地在两相界面处传递和分散,使合金的力学性能逐步提高<sup>[13]</sup>;但随着合金相容性的改善,PA66 的分子链运动能力减弱,结晶性能下降,导致合金的热变形温度小幅下降;当 PPE-g-MAH 用量过多时,分布于两相界面层的 PPE-g-MAH 逐渐增多,界面层变厚,未反应的 PPE-g-MAH 亦会聚集在界面层,使界面层韧性下降,易在界面层出现滑移,致使合金的拉伸强度下降,合金材料变脆,缺口冲击强度降低。当 PPE-g-MAH 用量为 6% (8<sup>#</sup> 样品) 时,阻燃 PPE/PA66 合金的综合性能最为优异。

通过 SEM 观察不同 PPE-g-MAH 用量下阻燃 PPE/PA66 合金的断面形貌,结果如图 1 所示。



PPE-g-MAH 用量: a—0%; b—2%; c—4%; d—6%; e—8%

图 1 不同 PPE-g-MAH 用量下阻燃 PPE/PA66 合金断面 SEM 照片

由图 1 可以看出,未添加增容剂 PPE-g-MAH 的阻燃 PPE/PA66 合金(图 1a)的 PPE 和 PA66 之间有较明显相分离;加入 PPE-g-MAH 后(图 1b~图 1d),阻燃 PPE/PA66 合金呈现出海岛相结构,且随着 PPE-g-MAH 含量的增加,岛相 PPE 分散更加均匀,PPE 相畴尺寸变小。这是因为 PPE-g-MAH 的

酸酐基团与 PA66 中的酰胺基团发生反应,形成接枝共聚物,降低了两相间的界面张力,促进了 PPE 岛相在 PA66 连续相中的分散,使得 PPE 分散相尺寸变小,改善了二者之间的相容性;但当 PPE-g-MAH 含量达 8% 时,阻燃 PPE/PA66 合金(图 1e)中的 PPE 相大量聚集,脆性增加,合金的力学性能也随之降低。。

## 2.4 增韧剂用量对阻燃 PPE/PA66 合金性能的影响

加入增容剂可改善阻燃 PPE/PA66 合金的相容性,提高了合金的力学性能,但合金的韧性仍不足以满足实际应用需求。为了获得韧性更为优异的阻燃 PPE/PA66 合金,以 SEBS-g-MAH 为增韧剂,研究了不同 SEBS-g-MAH 用量下阻燃 PPE/PA66 合金的性能,结果列于表 5。

表 5 不同 SEBS-g-MAH 用量下阻燃 PPE/PA66 合金的性能

| 编号              | 拉伸强度 / MPa | 缺口冲击强度 / (J·m <sup>-1</sup> ) | 热变形温度 / °C | UL 94 阻燃等级 |
|-----------------|------------|-------------------------------|------------|------------|
| 8 <sup>#</sup>  | 70.1       | 90.2                          | 100.4      | V-0        |
| 10 <sup>#</sup> | 65.3       | 99.5                          | 98.7       | V-0        |
| 11 <sup>#</sup> | 61.9       | 108.4                         | 95.2       | V-0        |
| 12 <sup>#</sup> | 53.2       | 116.2                         | 90.6       | V-1        |
| 13 <sup>#</sup> | 45.8       | 125.1                         | 81.4       | V-2        |

由表 5 可以看出,随着增韧剂 SEBS-g-MAH 的用量的逐步增加,阻燃 PPE/PA66 合金的韧性大幅度提高,但其拉伸强度和热变形温度不断下降。主要原因为:首先,增韧剂 SEBS-g-MAH 自身存在大量的橡胶相结构,且与 PPE 的相容性较好,增韧剂用量的增加意味着合金中的橡胶相的含量逐步提高,能够产生大量银纹和剪切带的应力集中点逐渐增多,在受到冲击时可以更有效地消耗和分散冲击能量,从而达到增韧的效果<sup>[14-15]</sup>;另外,所用的 SEBS-g-MAH 中的 MAH 基团会与 PA66 中的酰胺基团发生反应,改善合金的相容性,降低 PPE 的相畴尺寸,改善合金的韧性。但橡胶相结构的耐热性和拉伸强度较低,增韧剂用量的逐步增加会导致合金材料的耐热性和拉伸强度的下降<sup>[16]</sup>。当增韧剂用量达到 7% 时,阻燃 PPE/PA66 合金(12<sup>#</sup> 样品)的阻燃性达不到 V-0 级,因为增韧剂属于易燃材料,阻燃性较差,故增韧剂 SEBS-g-MAH 的添加量不易过多,以 5% 为宜,此时合金材料(11<sup>#</sup> 样品)可达到阻燃 V-0 级,热变形温度达 95.2 °C,拉伸强度为 61.9 MPa,缺口冲击强度为 108.4 J/m。

## 3 结论

PPE 与 PA66 的配比会影响阻燃 PPE/PA66 合

金的耐热性、力学性能和阻燃性能,其最佳配比为 PPE/PA66=1/1;增加多聚芳基磷酸酯用量会降低合金材料的力学性能和耐热性,当多聚芳基磷酸酯用量为 15%、协同阻燃剂硼酸锌用量为 2% 时,阻燃 PPE/PA66 合金的阻燃性能可达 V-0 级;增容剂 PPE-g-MAH 的加入有效改善了 PPE 与 PA66 之间的相容性,但添加量不宜过大,以 6% 为宜;增韧剂 SEBS-g-MAH 可以改善合金的韧性,但会降低合金的阻燃性能,以 5% 为宜。最终制备的阻燃 PPE/PA66 合金的阻燃性能可达到 V-0 级,热变形温度达 95.2℃,拉伸强度为 61.9 MPa,缺口冲击强度为 108.4 J/m。

### 参考文献

- [1] Wu Yijia, Zhang Hui, Shentu Baoqing, et al. Preparation of poly(phenylene oxide)/polyamide-6 nanocomposites with high tensile strength and excellent impact performance[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(22):5870-5875.
- [2] 王宏华,梅启林,夏雪,等.芳纶纤维增强聚苯醚/尼龙 6 合金的性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2017(6):75-79.  
Wang Honghua, Mei Qilin, Xia Xue, et al. Improved properties for polyphenylene oxide/nylon 6 alloy reinforced by aramid fiber[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(6):75-79.
- [3] 付杰辉,陈晓东,徐群杰,等.聚苯醚/聚酰胺合金的增容及增韧改性研究[J].塑料工业,2014,42(10):36-39.  
Fu Jiehui, Chen Xiaodong, Xu Qunjie, et al. The Compatibilization and Toughening Modification of PPO/PA Alloy[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(10):36-39.
- [4] 姚睿翔,谢磊,李文斐,等.聚苯醚接枝马来酸酐/聚酰胺 66 共混物的制备与性能[J].工程塑料应用,2016,44(8):41-45.  
Yao Ruixiang, Xie Lei, Li Wenfei, et al. Preparation and properties of PPE-g-MAH/PA66 blends[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8):41-45.
- [5] 杨昆晓.基于三螺杆挤出机的聚苯醚/聚酰胺 66 合金共混改性研究[D].北京:北京化工大学,2017.  
Yang Kunxiao. Study on blending modification of poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)/polyamide 66 with triangle-arrayed triple-screw extruder[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [6] 任洛卿,张永刚,周柏杰.高压绝缘用 PA66 复合材料的性能研究[J].塑料科技,2015,43(8):55-59.  
Ren Luoqing, Zhang Yonggang, Zhou Baijie. Study on properties of high-voltage insulation pa66 composite materials[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(8):55-59.
- [7] 李华亮.无卤阻燃聚苯醚弹性体的研究[J].广东化工,2016, 43(16):1-2,24.  
Li Hualiang. Study of halogen-free flame-retarded polyphenylene oxide elastomer[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(16):1-2,24.
- [8] 曾永斌.玻纤增强阻燃 MPPO 的研究[J].现代塑料加工应用, 2017, 29(5):45-48.  
Zeng Yongbin. Study on flame retardant MPPO reinforced by glass fiber[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(5):45-48.
- [9] 李萌.阻燃技术在尼龙 6 中的研究应用[J].盐业与化工,2015, 44(10):11-13.  
Li Meng. Research and application of flame retardant technology in nylon 6[J]. Salt and Chemical Industry, 2015, 44(10):11-13.
- [10] 曹凯凯,陈智军,陈林飞,等.无卤阻燃增强半芳香尼龙的制备与性能研究[J].塑料工业,2015,43(10):59-62.  
Cao Kaikai, Chen Zhijun, Chen Linfei, et al. Preparation and properties of the halogen-free flame retardant reinforced semi-aromatic polyamide[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(10):59-62.
- [11] 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.
- [12] 姚睿翔,谢磊,李文斐,等.聚苯醚接枝马来酸酐/聚酰胺 66 共混物的制备与性能[J].工程塑料应用,2016,44(8):41-45.  
Yao Ruixiang, Xie Lei, Li Wenfei, et al. Preparation and properties of PPE-g-MAH/PA66 blends[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8):41-45.
- [13] 朱延潭,朱从山,刘志强,等.苯乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物对 PA66/PPO/SEBS 体系的增容作用研究[J].塑料工业,2018(1):33-36.  
Zhu Yantan, Zhu Congshan, Liu Zhiqiang, et al. Study on the compatibilization of styrene-glycidyl methacrylate copolymer on PA66/PPO/SEBS system[J]. China Plastics Industry, 2018(1):33-36.
- [14] 杨菁菁,王琛,周健. SEBS 增韧 PPO/PA6 合金结构与性能研究[J].塑料科技,2014,42(8):48-52.  
Yang Jingjing, Wang Chen, Zhou Jian. Study on structure and properties of SEBS toughening PPO/PA6 alloy[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(8):48-52.
- [15] 吴亦建,戴连奇,申屠宝卿.“核壳结构”粒子对 PA6/SEBS-g-MA/PPO 共混物的增韧作用[J].高校化学工程学报, 2017(6):1327-1332.  
Wu Yijian, Dai Lianqi, Shentu Baoqing. Toughening effects of “core-shell” particles in PA6/SEBS-g-MA/PPO blends[J]. Chemical Engineering of Chinese Universities, 2017(6):1327-1332.
- [16] 张勇,徐日炜,罗道友.增韧 PA/PPO 合金的制备技术[J].塑料, 2016(6):5-8.  
Zhang Yong, Xu Riwei, Luo Daoyou. The technology for the preparation of toughened PA/PPO alloys[J]. Plastics, 2016(6):5-8.