http://pmse.scu.edu.cn

O-SEBS/PPO复合材料的炭化效应和阻燃性能

黄兆阁，修雪颖，郑雨欣，夏 琳
(青岛科技大学 高分子科学与工程学院，山东 青岛 266042)

摘要：以三聚氰胺尿酸盐(MCA)和二乙基次磷酸铝(ADP)2种具有协效作用的为阻燃剂、氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物接枝马来酸酐(SEBS-g-MA)为相容剂，制备了充油-氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物/聚苯醚(O-SEBS/PPO)复合材料，并研究了其阻燃性能和力学性能。结果表明，当SEBS-g-MA用量为5.6%、ADP/MCA质量比为1/3、ADP/MCA总添加量为30%时，阻燃复合材料的UL94垂直燃烧级别达到V-0、极限氧指数为29%、断裂伸长率为(525±23)%、硬度为(69±1)A、拉伸强度为(6.80±0.1) MPa。热失重分析和锥形量热仪测试发现，ADP/MCA和SEBS-g-MA的加入提高了材料的初始分解温度和残炭量，降低了材料的峰值放热率(PHRR)、总放热率(THR)、生烟量(SPR)和总生烟量(TSP)。

关键词：三聚氰胺尿酸盐；二乙基次磷酸铝；阻燃；氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物
中图分类号： **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2022）06-000

氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SEBS)作为一种具有广泛用途的新型热塑性弹性体，软段和硬段的双重结构使其同时具有塑料与橡胶的性质。SEBS的电绝缘性能优异、无毒安全、耐候及耐老化性能好，是制造电线电缆包皮和绝缘带的优异材料[1]。但SEBS材料作为烷烃聚合物，其含碳量高，易燃烧，并释放大量的烟雾，在暴露于火焰时熔化滴，存在严重的火灾隐患，不适合用在有阻燃要求的场合，这些缺点限制了它的进一步应用[2]。因此，为了提高其安全性能,使用高效阻燃剂对SEBS进行处理十分重要和迫切[3~7]。

在TPEs中加入阻燃添加剂是提高其阻燃性最常用的方法。一般来说，阻燃(FR)添加剂主要是基于卤素、磷和氮。卤素添加剂是一种非常有效的阻燃剂，但由于在燃烧过程中会产生许多腐蚀性和有毒气体，在火灾中对人体危害极大，因此已禁止了其进一步应用[8]。近年来，无卤环保型阻燃剂受到了工业界和科学界的广泛关注。例如，膨胀型阻燃剂(IFR)因其环保、高效、防滴、低烟等特点被认为是最有希望取代含卤素阻燃剂的阻燃剂之一[9~11]。通常，IFR由3种成分组成，包括酸源、炭化剂和发泡剂。最常报道的IFR之一是聚磷酸铵/季戊四醇/三聚氰胺(APP/PER/ME)，已被Bourbigot和Camino的团队对其进行了系统研究[12~14]，当温度超过临界温度时，IFR可以在聚合物表面形成多细胞膨胀炭，从而保护基底不燃烧。然而，传统的IFR对水分敏感，容易被水侵蚀并从混合物中渗出，导致阻燃性严重恶化[15]。Pal等[16]在乙烯-丙烯二橡胶(EPDM)/聚丙烯(PP)二元共混体系中，将APP和磷酸乙二胺作为膨胀化合物，与碳、泡沫剂进行混合发现，IFR聚合物体系具有良好的阻燃性能，同时具有最佳的力学性能、电气性能、抑烟性能和流动性。

对充油-氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(O-SEBS)的阻燃性能研究虽然较多，但对O-SEBS/PPO材料阻燃性能的研究依然较少，而找到一种适用于O-SEBS/PPO材料的无卤阻燃剂十分必要。由于聚苯醚(PPO)本身具有良好的阻燃性能，成炭性好，可以作为炭源，而三聚氰胺尿酸盐(MCA)和二乙基次磷酸铝(ADP)2种具有协效作用的阻燃剂可以作为气源和酸源，ADP/MCA/PPO可以形成IFR体系，因此本文先制备了O-SEBS/PPO复合材料，使PPO与SEBS能更好地相容，之后加入ADP和MCA，以氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物接枝马来酸酐(SEBS-g-MA)为相容剂，制备了阻燃O-SEBS/PPO复合材

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0131
收稿日期：2021-11-19
基金项目：山东省自然科学基金资助项目（ZR2020QE079）
通讯联系人：夏琳，主要从事功能性橡塑材料加工工艺及配方设计研究，E-mail：xialin@qust.edu.cn

料，并通过UL94垂直燃烧、氧指数、热失重分析、锥形量热分析和力学性能等检测方法，研究了阻燃剂MCA和ADP的配比和总添加量及相容剂用量对复合材料的阻燃性能和力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

SEBS：6151，台橡（南通）实业有限公司；PPO：Grade.LXR35,蓝星化工新材料有限公司；石蜡油：市售；SEBS-g-MA：8803，华创塑化；ADP和MCA：青岛艾迪科。

同向双螺杆挤出机：SHJ-20型，南京杰恩特机电有限公司；注塑成型机：SZ-SM1335型，时资科技；橡塑邵尔A硬度计：LX-A型，江都市明珠试验机械厂；电子拉力试验机：GT-CS-2000型，中国台湾高铁科技股份有限公司；氧指数测定仪：HC-2型，南京市江宁区分析仪器厂；水平垂直燃烧测定仪：CZF-3型，高铁检测仪器有限公司；锥形量热仪：6810型，苏州阳屹沃尔奇检测技术有限公司；热失重仪（TGA）：TG209F1，德国NETZSCH型；数码照相机：华为P30。

1.2 试样制备

基本配方为SEBS，石蜡油和PPO的质量比10/7/3，阻燃剂ADP和MCA的量为变量，相容剂SEBS-g-MA的量为变量。将SEBS、石蜡油、PPO、MCA、ADP、SEBS-g-MA等按量混合均匀后，在双螺杆挤出机中220~250 ℃熔融挤出。螺杆转速为120 r/min、喂料速度为35 r/min，混合料经熔融共混，水冷切粒得到O-SEBS/PPO无卤阻燃材料。粒料经90 ℃，3 h烘干后，用注塑机注塑制备用于力学性能、氧指数和垂直燃烧测试的标准试样，注塑机3段温度分别为230 ℃，260 ℃和270 ℃，喷嘴温度为265 ℃；锥形量热仪实验用标准样条采用压制成型方法制备，热板温度230 ℃，压力10 MPa，预热10 min，排气2次，热压3 min后常温冷压5 min。

1.3 测试与表征

氧指数按GB/T 2406.2-2009进行；垂直燃烧性能按照UL-94的标准进行，试样厚度3.2 mm；拉伸性能按照GB/T 528-2009进行测试，选用Ⅱ型试样，试验速度为500 mm/min；邵尔A硬度按照GB/T531.1-2008进行；热失重分析(TGA)的试样质量为5~10 mg左右，氮气氛围，升温速率10 ℃/min；扫描电镜分析(SEM)的试样在四氢呋喃溶液中刻蚀5 min，去掉部分SEBS相，干燥后喷金处理，采用扫描电镜观察微观形貌；锥形量热分析(CONE)按照ISO 5660标准测试，试样尺寸100 mm×100 mm×4 mm，热流密度为35 kW/m^2。

Tab.1 Effect of ADP/MCA mass ratio on properties of O-SEBS/PPO/FR composites

m(ADP)/*m*(MCA)	Hardness(shore A)	Tensile strength /MPa	Elongation at break /%	LOI/%	UL-94
1:1	74±2	4.56±0.1	349±18	27	V-1
1:2	73±2	4.79±0.1	314±16	27	V-1
1:3	73±2	5.22±0.2	309±20	28	V-1
1:4	72±2	4.80±0.2	293±17	28	V-1
1:5	72±2	4.46±0.1	275±16	27	V-1

2 结果与讨论

2.1 ADP/MCA 配比对O-SEBS/PPO/FR材料性能的影响

阻燃剂的复配都有一个最佳的复配比例[17]，为了得到最佳的复配比，控制O-SEBS/PPO基体占70%，阻燃剂的总添加量为30%，改变ADP和MCA的配比，研究二者用量对O-SEBS/PPO/FR材料阻燃性能的影响，结果如Tab.1所示。

从Tab.1可以看出，随着MCA含量的增加，复合材料的氧指数呈现出先增加后降低的趋势，这表明MCA含量较少时，与ADP具有良好的协同作用，MCA含量过多时，可能会出现与基体材料相容性差及阻燃剂分散不均匀的情况，导致阻燃性能略有下降，UL-94均为V-1。

同时从Tab.1可以看出，随着ADP含量的减少，MCA含量的增加，O-SEBS/PPO/FR材料的硬度从(74±2)A逐渐下降到(72±2)A，变化不大；材料的拉断伸长率呈明显的下降趋势，由(349±18)%逐渐下降到(275±16)%，说明材料的韧性变差，拉伸强度呈现先增加后降低的趋势，当ADP/MCA质量比为1/3时，

材料的综合力学性能最好，拉伸强度为(5.22±0.2) MPa，拉断伸长率为(309±20)%。

2.2 SEBS-g-MA 用量对 O-SEBS/PPO 材料性能的影响

吉祥[18]经过一系列的实验发现，加入各个类型的阻燃剂都会造成材料力学性能的下降，通过 Tab.1 的实验结果也发现，未添加相容剂的 O-SEBS/PPO 复合材料的力学性能和阻燃性能都不太理想，这说明基体与阻燃剂之间的相容性不好，各个组分之间的界面力大[19]，在造成力学性能下降的同时也造成了阻燃性能的下降。因此，为了改善阻燃体系与基体的相容性，相容剂就起到了至关重要的作用。

控制 ADP 和 MCA 质量比为 1:3，总添加量为 40%，以 SEBS-g-MA 为相容剂，探究其用量对 O-SEBS/PPO 复合材料性能的影响，结果如 Tab.2 所示。未添加 SEBS-g-MA 时，O-SEBS/PPO/FR 复合材料的氧指数为 29%，UL-94 达到 V-0 级别；随着 SEBS-g-MA 用量的增加，O-SEBS/PPO/FR 复合材料的氧指数有不同程度的增加，由 29%增加到 31%，UL-94 均达到 V-0 级别，表现出良好的阻燃效果。

其次，由 Tab.2 可以看出，随着相容剂的增加，共混体系的硬度略有下降。未添加 SEBS-g-MA 时，添加了 40%阻燃剂的 O-SEBS/PPO/FR 材料，力学性能较差，拉伸强度为(4.20±0.1) MPa、拉断伸长率为(258±18)%。随着 SEBS-g-MA 用量的增加，材料力学性能明显上升，当 SEBS-g-MA 为 5.6%时，拉伸强度为(5.93±0.2) MPa、拉断伸长率为(521±24)%，与未添加 SEBS-g-MA 相比分别增加了 41.2%和 101.9%。

Fig.1(a)和 Fig.1(b)分别为未添加 SEBS-g-MA 和添加了 5.6%的 SEBS-g-MA 的阻燃复合材料的 SEM 图。可以看出，未添加 SEBS-g-MA 时，各组分分散不均匀，粒径较大，发生了团聚现象；而加入 SEBS-g-MA 之后，相与相之间的分布更加均匀，相界面也变得模糊。这说明 SEBS-g-MA 相容剂的加入增加了各组分之间的相容性，使相界面之间的黏着力增强，从而使 O-SEBS/PPO 材料的力学性能和阻燃性能都得到提升。

2.3 ADP/MCA 用量对 O-SEBS/PPO/FR 材料性能的影响

确定 ADP 和 MCA 质量比为 1:3、SEBS-g-MA 用量为 5.6%，探究了 ADP/MCA 用量对 O-SEBS/PPO/FR 材料阻燃性能的影响，结果如 Tab.3 所示，当阻燃剂总添加量为 20%时，O-SEBS/PPO/FR 材料的氧指数为 26%，没有达到难燃材料的要求，UL-94(3 mm)只达到 V-1，当 ADP/MCA 含量为 30%时，UL-94(3 mm)就达到 V-0、氧指数为 29%；ADP/MCA 含量为 40%时，氧指数高达 31%。这主要原因是 PPO 在体系燃烧的时候，可以作为碳源[20,21]，具有良好的成炭效果，ADP 分解产生的 PO 和 PO_2 自由基可以捕捉气相中的活泼自由基，从而终止燃烧反应，而 MCA 在

Tab.2 Effect of SEBS-g-MA contents on properties of O-SEBS/PPO/FR composites

w(SEBS-g-MA)/%	Hardness(shore A)	Tensile strength /MPa	Elongation at break /%	LOI/%	UL-94
0	78±1	4.20±0.1	258±18	29	V-0
2.0	76±2	4.64±0.1	450±21	30	V-0
3.8	74±2	4.73±0.2	513±23	30	V-0
5.6	72±2	5.93±0.2	521±24	31	V-0
7.4	71±2	5.28±0.1	451±19	31	V-0

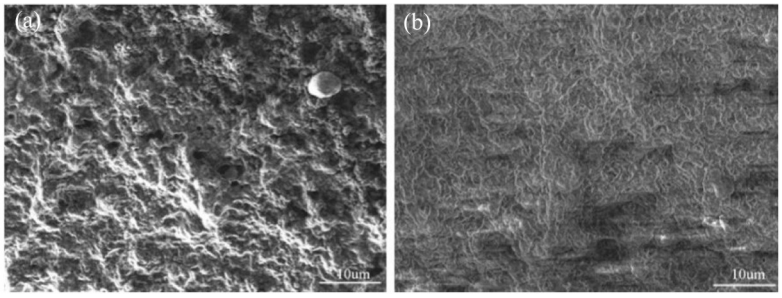


Fig.1 SEM of (a) O-SEBS/PPO/FR blends and (b)O-SEBS/PPO/SEBS-g-MA/FR blends

受热分解时不仅会吸收并带走大量的热量，而且产生的大量惰性气体起到了稀释隔绝氧气的作用[17]，因此，ADP/MCA/PPO 在 O-SEBS/PPO/FR 材料中起到了良好的协同作用，使阻燃效果大幅提升。

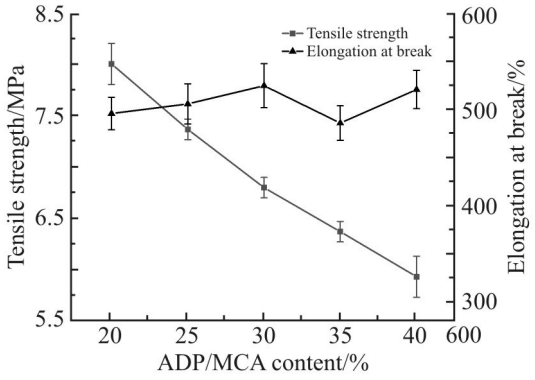


Fig.2 Effect of ADP/MCA contents on tensile strength and elongation at break of O-SEBS/PPO/FR composites

从 Tab.3 还能发现，随着阻燃剂总添加量的增加，硬度逐渐增加，从(67±1) A 增加到(72±2) A。Fig.2 为 ADP/MCA 用量对 O-SEBS/PPO/FR 材料的拉伸强度和拉断伸长率的影响，由 Fig.2 可以看出，随着阻燃剂总添加量的增加，拉伸强度从(8.01±0.1) MPa 逐渐下降到(5.93±0.2) MPa，而拉断伸长率围绕在 500%左右上下波动，相差不大；当阻燃剂总添加量为 30%时，材料的拉断伸长率为(525±23)%，结合 Tab.3 的阻燃结果，综合性能最好。

2.4 热失重分析

TGA 是阻燃材料研究领域的常用表征方法。与锥形量热仪相比，它是一种小热流，通常被用来分析 FR 聚合物复合材料的热降解行为。Fig.3 给出了 O-SEBS/PPO 和 O-SEBS/PPO/FR 材料的质量保留率随温度变化的 TG 曲线，其中，Fig.2(b) 和

Tab.3 Effect of ADP/MCA contents on flame retardant properties of O-SEBS/PPO/FR composites

(ADP/MCA)/%	Hardness(shore A)	LOI/%	UL-94(3 mm)
20	67±1	26	V-1
25	68±2	27	V-1
30	69±1	29	V-0
35	71±2	30	V-0
40	72±2	31	V-0

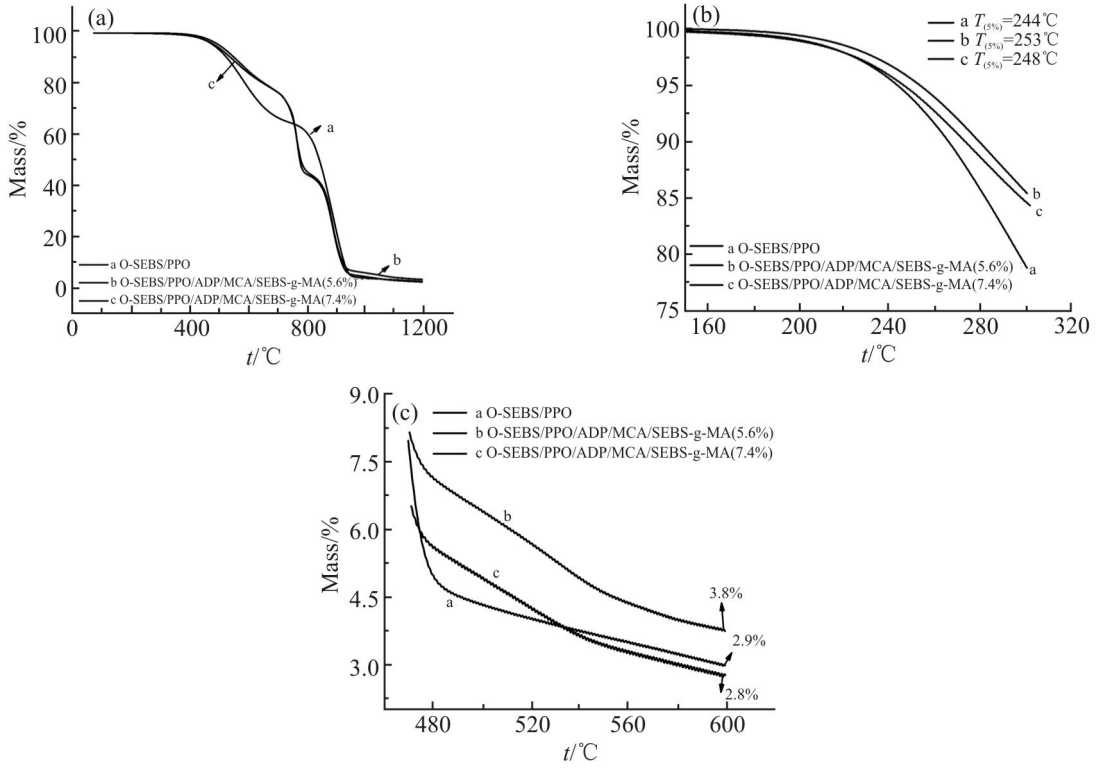


Fig.3 TG curves of blends with different SEBS-g-MA contents

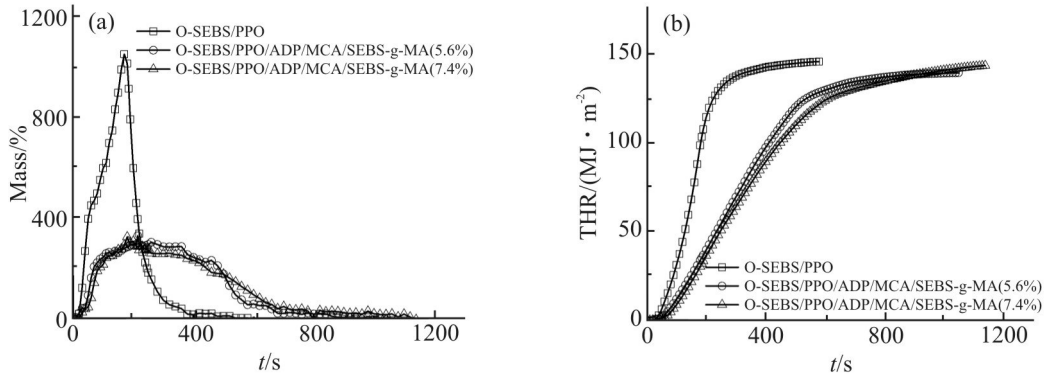


Fig.4 (a)Heat release rate and (b)total heat release curves of O-SEBS/PPO and O-SEBS/PPO/FR composites

Fig.2(c)分别是150~300 ℃和470~600 ℃的局部放大图。从Fig.3(a)可以看出，纯的O-SEBS/PPO主要表现为2段分解，是非炭化材料的典型分解特征，第1步主要是石蜡油的热解，第2步主要是碳骨链的分解。而以ADP/MCA质量比为1/3、总添加量同为30%，SEBS-g-MA含量不同的2种O-SEBS/PPO/FR材料，都呈现出3段分解，并且曲线极为相似。此外，从Fig.3(b)还可以发现，添加5.6%和7.4%相容剂的2种阻燃材料相较于纯O-SESB/PPO材料在质量损失率为5%时的温度从244 ℃分别提高到253 ℃和248 ℃，Fig.3(c)可以发现，纯的O-SEBS/PPO残留量为2.9%，而相容剂含量为5.6%的阻燃材料的残留量增加到3.8%。这可能是由于ADP分解时主要以磷挥发物的形式在气相中起作用[22]，会轻微地抑制分解，而MCA也主要在气相中起作用，因此，ADP/MCA的加入对提高残留量帮助不大，但对材料分解过程有很重要的影响，使材料的燃烧行为从非炭化材料的特征转变为炭化材料的特征，对于阻燃具有重要作用。

2.5 锥形量热分析

基于耗氧原理的锥形量热计试验已被广泛用于评价材料的燃烧特性，该测试提供了着火时间、放热率、总放热量、烟雾释放率、总烟雾释放率、残留率等详细信息，它们与大规模火灾试验得到的结果有很好的相关性，通常可以用来预测材料在真实火灾中的燃烧行为[23~25]。在本研究中，锥形量热计在35 kW/m^{2}流量下的实验结果显示在Fig.4~Fig.7和Tab.4中。

Fig.4(a)和Fig.4(b)分别表示了O-SEBS/PPO和O-SEBS/PPO/FR复合材料的热释放率及总放热量。Fig.4(a)的结果表明，未添加阻燃剂的材料着火后燃烧非常地迅速，在50~250 s范围内出现1个很陡峭的峰，结合Tab.4的结果，峰值放热率(HRR)为1067 kW/m^2，样品在400 s内基本燃烧完毕。而对于添加5.6%和7.4%相容剂的O-SEBS/PPO/FR复合材料，峰值放热率明显降低，分别为334 kW/m^{2}和329 kW/m^2，相比于纯O-SEBS/PPO材料的1067 kW/m^2，峰值放热率分别降低了68.7%和69.1%，整个曲线的走势比较平缓，燃烧时间也延长了很多。结合Fig.4(b)和Tab.4的结果发现，O-SEBS/PPO/FR的总放热量有不同程度的下降，由146 MJ/m^{2}分别下降到139 MJ/m^{2}和143 MJ/m^2。同时，通过Tab.4还可以看出，阻燃

Tab.4 Cone calorimeter results of O-SEBS/PPO and O-SEBS/PPO/FR composites

Formula	O-SEBS/PPO	O-SEBS/PPO/FR(5.6%)	O-SEBS/PPO/FR(7.4%)
TTI/s	20	22	22
PHRR/(kW· m^{-2})	1067	334	329
THR/(MJ· m^{-2})	146	139	143
FPI/(m2· s· kW^{-1})	0.019	0.066	0.067
PSPR/(m2· s^{-1})	0.076	0.033	0.031
Residual/%	5.1	6.5	5.8

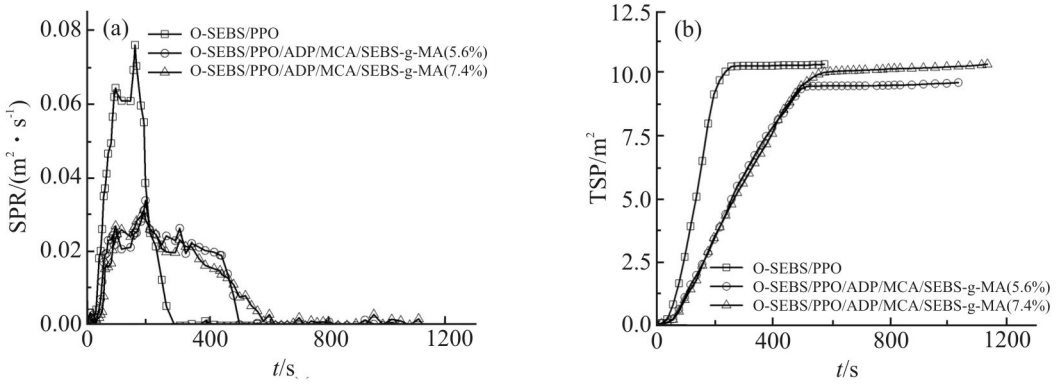


Fig.5 (a)Smoke production rate and (b) total smoke production curves of O-SEBS/PPO and O-SEBS/PPO/FR composites

剂的加入提高了着火时间(TTI)和火灾性能指数(FPI)，着火时间从20 s延长到22 s，火灾性能指数从0.019分别提高到0.066和0.067，TTI和FPI越高，材料的阻燃性能越好。通常意味着在真正的火灾中减少损失和伤亡的机会更大。结果表明，ADP/MCA阻燃剂和SEBS-g-MA相容剂的加入对于改善材料火灾的强度和热量释放有明显的作用。

除了火焰和热量外，烟雾和有毒物质的释放也是造成火灾伤亡的重要因素。在火灾性能评价中，生烟率(SPR)通常是量化烟气产生量的重要参数。Fig.5(a)和Fig.5(b)分别表示了O-SEBS/PPO和O-SEBS/PPO/FR复合材料的SPR随燃烧时间的变化曲线及总生烟量(TSP)曲线。结合Fig.5(a)和Tab.4可以看出，纯O-SEBS/PPO材料的生烟率短时间内极速上升，峰值生烟率为0.076 m^2/s，而添加5.6%和7.4%相容剂的2种O-SEBS/PPO/FR阻燃材料的峰值生烟率分别为0.033 m^2/s和0.031 m^2/s，明显减缓了烟雾的释放，相比于纯O-SEBS/PPO材料分别降低了56.6%和59.2%。从Fig.5(b)中还可以看出，2种O-SEBS/PPO/FR阻燃材料的总生烟量比纯O-SEBS/PPO材料也有不同程度的下降。ADP/MCA的加入明显抑制了烟雾的释放速度和释放量，这可能与材料中PPO与ADP/MCA的协同作用有关。

Fig.6为O-SEBS/PPO和O-SEBS/PPO/FR复合材



Fig.6 Residual photographs of O-SEBS/PPOandO-SEBS/PPO/FR composites after cone calorimeter test
(a):O-SEBS/PPO; (b): O-SEBS/PPO/FR(5%); (c): O-SEBS/PPO/FR(7.4%)

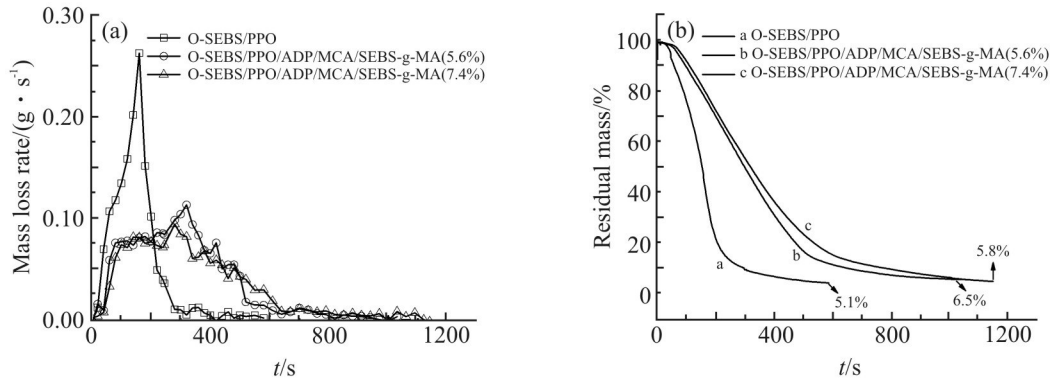


Fig.7 (a)Mass loss rate and (b)residual mass curves of O-SEBS/PPO and O-SEBS/PPO/FR composites

料锥形量热仪后残留物的原始图片。从图中可以看出，未添加阻燃剂的复合材料，燃烧之后几乎未剩下残留物；而添加阻燃剂之后的阻燃材料，残留物有不同程度的增加。Fig.7 显示了 O-SEBS/PPO 和 O-SEBS/PPO/FR 复合材料的质量损失率(MLR)及残余量曲线。MLR 的变化往往与固态阻燃机理有关。由 Fig.7 可以看出，在主燃烧阶段(前 200 s)，于纯 O-SEBS/PPO 相比，添加了阻燃剂的 2 种阻燃材料的 MLR 大幅度降低，Fig.7(b)中纯 O-SEBS/PPO 燃烧后残留率为 5.1%，而添加 5.6%和 7.4%相容剂的 2 种阻燃材料的残留率分别增加到 6.5%和 5.8%。

O-SEBS/PPO/FR 的良好阻燃效果，主要归因于 ADP/MCA 的协同作用，二者协同机理如下：ADP 分解产生的磷挥发物大部分挥发到气相中，其中 PO 和 PO_2 自由基可以捕捉气相中的活泼自由基，从而终止燃烧反应，而 MCA 在受热分解时不仅会吸收并带走大量的热量，而且产生的大量的水蒸气和 NH_3 等惰性气体在气相中起到了隔离层的作用，与 ADP 分解产生的 PO 和 PO_2 自由基在气相中协同阻燃，ADP/MCA 在气相中的双重阻燃效果终止了链燃烧反应、减缓了热量和烟雾的释放，表现出良好的协同阻燃效果。而残留物主要与固态阻燃机理有关，由于 ADP 和 MCA 均在气相中起作用，PPO 虽然是良好的成炭剂，但因含量相对较少，且固相中留下的含磷物质也很少，这也解释了 ADP/MCA 的加入对残留物的增加贡献并不大。

3 结论

(1)当 SEBS-g-MA 用量为 5.6%、ADP/MCA 质量比为 1/3、ADP/MCA 总添加量为 30%时，阻燃复合材料的综合性能最好，UL94(3 mm)垂直燃烧级别达到 V-0、氧指数为 29%、拉断伸长率为 506%、硬度为 69 A、拉伸强度为 6.80 MPa。

(2)热重分析表明，ADP/MCA 及 SEBS-g-MA 的加入提高了材料的初始分解温度，但由于 ADP 分解产生的磷挥发物在气相中起到抑制分解的作用，而 MCA 分解带走热量，产生的惰性气体也主要在气相中起作用。因此，ADP/MCA 的加入对残炭量的增加改善并不明显。

(3)锥形量热结果表明，ADP/MCA 及 SEBS-g-MA 的加入对于降低材料的峰值放热率、总放热率、生烟量及总生烟量有着显著效果，并且质量损失率也进一步降低，残留量有不同程度的提高。

参考文献

[1] 杨君胜,黄兴溢,汪根林,等.SEBS 对交联聚乙烯的电性能及水树抑制的影响[J].高电压技术,2010,36(4)：946-951.
Yang J S,Huang X Y,Wang G L,*et al*. Effects of styrene-B-(ethylene-co-butylene)-B-styrene on electrical properties and water tree resistance of cross-linked polyethylene[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(4)：946-951.

[2] Pawlowski K H,Schartel B.Flame retardancy mechanisms of aryl phosphates in combination with boehmite in bisphenol A polycarbonate /acrylonitrile-butadiene-styrene blends[J]. Polymer Degradation and Stability,2008,93:657 -667.

[3] Shi Y Q,Fu L B,Chen X L,*et al*.Hypophosphite/graphitic carbon nitride hybrids:preparation and flame retardant application in thermoplastic polyurethane[J].Nanomaterials,2017,7:259-273.

[4] Xu D W,Lu H C,Huang Q,*et al.* Flame-retardant effect and mechanism of melamine phosphate on silicone thermoplastic elastomer[J].RSC Advances,2018,8:5034-5041.

[5] Jia D K,Tong Y,Hu J.The effects of N,N-(pyromellitoyl)-bis-l-phenylalanine diacid ester glycol on the flame retardancy and physical–mechanical properties of rigid polyurethane foams[J]. Journal of Fire Sciences,2018,36:535-545.

[6] Zhong Y,Wu W,Lin X,*et al*.Flame-retarding mechanism of organically modified montmorillonite and phos-phorous-nitrogen flame retardants for the preparation of a halogen-free, flame-retarding thermoplastic poly (ester ether) elastomer[J]. Journal of Applied Polymer Science,2015,131:547-557.

[7] 谷慧敏.SEBS 熔融插层蒙脱复合材阻燃性的研究[D].青岛：青岛科技大学,2008.
Gu H M. Study on flame retardancy of SEBS melt intercalated montmorillonite composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,2008.

[8] Covaci A,Harrad S,Abdallah MAE,*et al*.Novel brominated flame retardants:a review of their analysis, environmental fate and behaviour[J]. Environment International, 2011,37:532-556.

[9] Dai J F,Li B.Synthesis,thermal degradation,and flame retardance of novel triazine ring-containing macromolecules for intumescent flame retardant polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science,2010,116:2157-2165.

[10] Bourbigot S,Lebras M,Duquesne S,*et al*.Recent advances for intumescent polymers[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2004,289:499-511.

[11] Sarannya V, Sivasamy P, Mathan N D, *et al*. Study of thermal properties of intumescent additive: pentaerythritol phosphate alcohol[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2010, 102: 1071-1077.

[12] Bourbigot S,Lebras M,Delobel R.Carbonization mechanisms resulting from intumescence association with the ammonium polyphosphate pentaerythritol fire retardant system[J].Carbon,

1993,31:1219-1230.

[13] Camino G,Costa L,Luda di Cortemiglia M P.Overview of fire retardant mechanisms[J]. Polymer Degradation and Stability, 1991,33:131-154.

[14] Camino G,Costa L,Martinasso G.Intumescent fire retardant systems[J].Polymer Degradation and Stability, 1989,23:359-376.

[15] Wang Q,Chen Y H,Liu Y,*et al*.Performance of an intumescent-flame- retardant master batch synthesized by twin- screw reactive extrusion:effect of the polypropylene carrier resin[J]. Polymer International,2004,53:439-448.

[16] Pal K,Rastogi J N.Development of halogen-free flame retardant thermoplastic elastomer polymer blend[J]. Journal of Applied Polymer Science,2004,94:407-415.

[17] 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.
Li H L. Study of halogen- free flame- retarded polyphenylene oxide elastomer[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43 (16): 1-2.

[18] 吉祥.SEBS /PP 热塑性弹性体无卤阻燃改性及性能研究[D].上海:华东理工大学, 2012.
Ji X. Study on halogen- free flame retardant modification and properties of SEBS /PP thermoplastic elastomers[D].Shanghai: East China University Of Science and Technology,2012.

[19] 阳范文,谭铭浩,张良,等.YY-503 在无卤阻燃 PPE/SEBS 共混体系中的应用[J].工程塑料应用,2015, 43(4):109-113.
Yang F W.Tang M H,Zhang L,*et al*. Applications of YY-503 in halogen-free flame retardant PPE/SEBS blends[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):109-113.

[20] 臧充光,陈华华,胡洋成.RDP 与 APP/MC/PPO 复配膨胀阻燃聚乙烯的研究[J].材料工程,2014(12):44-49.
Zang C G,Chen H H,Hu Y C. RDP and APP/MC/PPO compound intumescent flame retardant of polyethylene[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(12):44-49.

[21] 程宪涛,姜宏伟.次磷酸铝协效 MCA 阻燃三元乙丙橡胶的研究[J].弹性体,2011,21(3):59-63.
Cheng X T,Jiang H W. Study on the flame retardancy of aluminium phosphinate in combination with melamine cyanurate in EPDM rubber[J]. China Elastomerics, 2011,21(3): 59-63.

[22] Aleksandra S,Sebastian G,Christian J,*et al*. Interactions in multicomponent flame- retardant polymers:solid- state NMR identifying the chemistry behind it[J].Polymer Degradation and Stability,2015,121:86-93

[23] Enright P A,Fleischmann C M.Uncertainty of heatrelease rate calculation of the ISO5660 - 1 cone calorimeter standardtestmethod[J]. Fire Technology, 999,35:153-169.

[24] Flecknoe- Brown K W,Hees P V.Sensitivityanalysis onthe microscale combustion calorimeter for polyurethane foam using a full factorial design methodology[J]. Journal of Fire Sciences,,2018,36:453-471.

[25] Nazare S,Kandola B,Horrocks A R.Use of cone calorimetry to quantify the burning hazard of apparel fabrics[J]. Fire and Materials,2002,26:191-199.

Carbonization Effect and Flame Retardancy of O-SEBS/PPO Composites

Zhaoge Huang, Xueying Xiu, Yuxin Zheng, Lin Xia

（*School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China*）

ABSTRACT: The O-SEBS/PPO composites were prepared by using SEBS- g -MA as compatibilizer and melamine cyanurate (MCA) and aluminum diethylphosphite (ADP) as co- flame retardant, and its flame retardancy and mechanical properties were studied. The results show that when the amount of SEBS-g-MA is 5.6%, the mass ratio of ADP/MCA is 1/3, and the total amount of ADP/MCA is 30%, the vertical combustion grade of UL94(3 mm) reaches V-0, the limiting oxygen index (LOI) is 29%, the elongation at break is (525±23)%, the hardness is (69±1)A, and the tensile strength is (6.80±0.1) MPa. Thermogravimetric analysis (TGA) and cone calorimeter test(CONE) show that the addition of ADP/MCA and SEBS-g-MA increases the initial decomposition temperature and amount of carbon residue, and decrease the peak heat release rate (PHRR), total heat release rate (THR), smoke generation capacity (SPR) and total smoke generation capacity (TSP).

Keywords: melamine cyanurate;aluminium diethylhypophosphate;flame retardant; styrene-ethylene-butylene-styrene