复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第4期 8月 2012年
Vol. 29 No. 4 August 2012

文章编号：1000-3851(2012)04-0075-08

三聚氰胺氰尿酸盐改性 PPO/PS 复合材料的燃烧性能和流动性能

刘继纯*，宋文生，井蒙蒙，陆 昶，潘炳力，杜西刚
（河南科技大学 化工与制药学院，高分子科学与纳米技术重点实验室，洛阳 471003）

摘 要： 以无卤阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐（MCA）为改性剂，采用熔体共混法制备了改性聚苯醚/聚苯乙烯（PPO/PS）复合材料。通过 XRD 和 SEM 对 MCA－PPO/PS 复合材料的微观结构进行了表征，重点研究了复合材料的燃烧性能和流动性能。研究发现：在复合材料的制备和加工过程中 MCA 的微观结构并没有发生任何变化，因此复合材料中 MCA 的阻燃作用不变。MCA 在复合材料中分散比较均匀，无明显团聚现象。与纯 PS 相比，质量比为 100∶100 的 PPO/PS 在燃烧时的氧指数增加 5.4%，热释放速率峰值降低 33.1%，但总烟释放量增加近 1.5 倍。在 PPO/PS 中加入 MCA 后得到的复合材料的阻燃性能随着 MCA 用量增加而逐渐增强，发烟量大幅度降低，同时熔体黏度减小，流动性增加。在 MCA－PPO/PS 复合材料中加入 5%、25%和 45%质量分数的 MCA 可分别使复合材料的总烟释放量比 PPO/PS 降低 43.7%、82.6%和 91.6%。PPO/PS 的阻燃机制为凝聚相成炭阻燃，随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的阻燃机制逐渐转变为气相稀释和对聚合物基体的冷却效应。加入 MCA 对 MCA－PPO/PS 复合材料可同时起到阻燃、抑烟和改善加工流动性的作用。

关键词： 三聚氰胺氰尿酸盐；聚苯醚/聚苯乙烯；复合材料；燃烧性能；流动性能
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Combustion behavior and flowability of MCA modified PPO/PS composites

LIU Jichun*, SONG Wensheng, JING Mengmeng, LU Chang, PAN Bingli, DU Xigang
(School of Chemical Engineering & Pharmaceutics, Key Laboratory of Polymer Science and Nanotechnology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: MCA－PPO/PS composites were prepared by melt－compounding PPO/PS and melamine cyanurate (MCA) as a halogen-free flame retardant. The structure of the composites was characterized by XRD and SEM, and their combustion behavior and flowability were investigated. It is discovered that the microstructure of MCA in the composites is the same as that of pure MCA after the sample preparation and processing procedure. Thus the flame retardant effect of MCA remains unchanged. MCA is dispersed evenly in the composites, with no obvious agglomeration. In comparison with that of pure PS, the oxygen index (OI) of PPO/PS with mass ratio of 100∶100 increases by 5.4%, the peak heat release rate (PHRR) decreases by 33.1% and the total smoke release (TSR) increases by almost 1.5 times. With rise of MCA loading, the flame retardancy of the MCA－PPO/PS composite gradually improves, while the total smoke release (TSR) decreases remarkably. Meanwhile, the melt viscosity of the composites decreases and the flowability increases with MCA loading. The addition of 5%, 25% and 45% mass fraction of MCA to the MCA－PPO/PS composite can decrease the TSR by 43.7%, 82.6%, and 91.6%, respectively. The flame retardant mechanism of PPO/PS is condensed phase charring mechanism. The flame－retarding mechanism of the MCA－PPO/PS composite changes from condensed phase charring mechanism to gas phase diluting and cooling effect of polymer matrix with MCA loading. The addition of MCA can enhance flame retardancy, suppress smoke release and improve melt flowability of the MCA－PPO/PS composite simultaneously.

Keywords: melamine cyanurate; PPO/PS; composite; combustion behavior; flowability

收到初稿日期： 2011-08-15；**收到修改稿日期：** 2011-10-24；**网络出版时间：** 2012-03-12 15:42:47
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120312.1542.009.html
基金项目： 河南科技大学人才科研基金(09001147)；国家自然科学基金(51003024)
通讯作者： 刘继纯，博士，副教授，主要从事阻燃功能聚合物基复合材料研究 E-mail：liujc0504@163.com

聚苯乙烯(PS)是一种原料来源丰富、价格低廉的热塑性通用塑料，由于具有卓越的透明性、电绝缘性、成型加工性能、较好的刚性、易于发泡成型等优点，而大量用作电器材料、减震包装材料、绝热材料、玩具、仪器仪表、汽车零部件等，但其主要缺点是耐溶剂性差、耐热温度不高、在空气中极容易燃烧，燃烧过程中熔融滴落严重且释放大量浓黑烟，不仅严重污染环境，而且对人们的生命财产安全构成了直接威胁，因此对其进行阻燃、抑烟处理以提高应用的安全性极为重要。为了改善 PS 的耐热性和阻燃性，可以把适当种类和用量的无机纳米粒子引入 PS 基体中制备成有机/无机复合材料[1-2]，或者把适量聚苯醚(PPO)加入 PS 基体中通过熔融共混方法制备成 PPO/PS。PPO 是一种难燃、易成炭、具有自熄性的非结晶性聚合物，与同样是非结晶性的 PS 具有良好的相容性，可以任意比例共混而不使力学性能下降太多。由于 PPO 相对分子质量较大，热稳定性好，不容易从聚合物基体中迁移和析出，因而 PPO/PS 具有优良的综合性能，是目前产量最大、应用最广泛的高分子材料之一[3-5]。

另一方面，虽然 PPO/PS 能够在一定程度上改善 PS 的耐热性能和阻燃性能，但是由于 PPO 价格昂贵，熔体黏度高，导致 PPO/PS 的价格比纯 PS 有较大提高，熔体流动性变差，成型加工性能下降。PPO 用量越多，这种负面影响就越显著。研究表明[6]，为了使 PPO/PS 能够在空气中自熄，PPO 所占质量分数至少要达到 44%以上，而如此高的用量势必会使材料的成本急剧上升，熔体流动能力变差，成型加工性能严重恶化。

为了解决 PPO/PS 在应用上存在的上述问题，本文作者尝试引入第三组分组成复合材料。三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)是近年来开发的一种新型氮系阻燃剂，它是一种靠氢键结合的加合物，在 300 ℃以下受热非常稳定，350 ℃左右开始升华但不分解，其分解温度为 440～450 ℃，其本身及分解产物具有无卤、低烟、低毒等特点，迎合了当今阻燃剂向高效低毒方向发展的潮流，并且价格低廉，因而近年来得到了广泛的研究和应用。MCA 对尼龙(PA)类材料的阻燃效果突出，其阻燃机制为：MCA 于 350 ℃升华吸热，然后热分解生成三聚氰胺及氰尿酸，后者催化 PA 降解为低聚物，并以熔滴形式脱离燃烧区域，向环境转移大量热量，三嗪环进一步分解释放出氨气、水蒸气、二氧化碳等惰性气体，稀释空气中的氧浓度而抑制燃烧[7-11]。但是 MCA 主要是气相阻燃，燃烧过程中材料凝聚相成炭量较低，炭层松散，不能形成致密的保护层，也限制了其阻燃效率的提高。目前，国内外关于 MCA 的研究大多用来阻燃聚酰胺类聚合物[12-18]，极少应用于其他聚合物体系[9-19]，没有见到关于 MCA 在 PPO/PS 中应用的报道。本文作者把适量 MCA 加入 PPO/PS 后发现，MCA 对 MCA－PPO/PS 复合材料可同时起到阻燃、抑烟和改善加工流动性的作用，尤其是能够大幅度降低复合材料的发烟量，为阻燃、低烟、环境友好型 PPO/PS 复合材料的开发应用提供了新的思路。

1　实验部分

1.1　原材料

聚苯乙烯(PS)，牌号 PG－383M，熔体流动速率(MFR)为 2.59 g/10 min (200 ℃，5 kg)，江苏镇江奇美化工有限公司；聚苯醚 (PPO)，牌号 SE100X－111，美国 GE 公司；三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)，纯度≥ 99%，密度 1.7 g/cm^3，pH 值 5～7，平均粒径 2 μm，济南晨旭化工有限公司。

1.2　MCA－PPO/PS 复合材料制备

按照实验设计的配方组成首先把 PS 树脂、PPO 树脂和无卤阻燃剂 MCA 加入高速混合机中混合均匀，然后把混合后的物料加入温度为 260 ℃、转速为 60 r/min 的 HAAKE 流变仪中混合 10 min 后出料，得到一系列不同组成的 MCA－PPO/PS 复合材料。将得到的物料在塑料粉碎机上粉碎后，一部分用于熔体流动速率(MFR)和动态流变性能(HAAKE)测试，另一部分在平板硫化机上于 200 ℃模压成厚度为 3 mm 的板材，将板材在万能制样机上裁切后分别用于 X 射线衍射、扫描电镜、耐高温性能和燃烧性能分析与测试。不同材料的编号与组成见表 1。

表 1　不同材料的编号与组成

Table 1　Serial number and composition for different materials

Materials	Mass ratio of MCA : PPO : PS
PS	0 : 0 : 100
PPO/PS	0 : 100 : 100
MCA10－PPO/PS	10 : 90 : 100
MCA50－PPO/PS	50 : 50 : 100
MCA90－PPO/PS	90 : 10 : 100
MCA/PS	100 : 0 : 100

1.3　分析与测试

XRD 测试在德国 Bruker 公司 Diffraktometer

D8 衍射仪上进行，采用 CuK_α 辐射源(X 射线波长 λ =0.1542 nm)，管电压 40 kV，管电流 30 mA，扫描速度为 3°/min，扫描范围 2θ 为 2°～ 40° 。

把用于氧指数(OI) 测定的 MCA－PPO/PS 复合材料样条用液氮冷却后在室温下快速淬断，表面镀金后采用加速电压为 20 kV 的 SEM 观察材料断面的微观形态。

把用平板硫化机压制后的复合材料板材裁切成规定尺寸的样条，然后按照 GB/T 2406－1993 规定的方法进行 OI 测定。将裁切成 100 mm×100 mm×3 mm 的复合材料样片置于锥形量热仪(Cone calorimeter)上测试热释放速率(HRR)、点燃时间(TTI)、总烟释放量(TSR)等燃烧性能参数，热辐射功率为 40 kW/m^2。

从模压制备的厚度为 3 mm 的板材上裁下直径为 30 mm 的圆片，在高温电阻炉内于 400 ℃恒温热分解 3 h，观察不同组成的复合材料高温热分解后的外观形貌并用数码相机拍照。

把不同质量比的 MCA－PPO/PS 复合材料在高温电阻炉内于 400 ℃热处理 3 h，然后按照下式计算材料的残留率：

$$R = \frac{H}{H_0} \times 100\%$$

式中：R 为残留率实验值(%)；H_0 为复合材料初始质量(g)；H 为高温处理后复合材料的残留质量(g)。

按照国家标准 GB/T 3682－2000 规定的方法测定复合材料的熔体流动速率(Melt flow rate，MFR)，每次测试用物料均为 6 g，测试温度255 ℃，负荷 2160 g。

称取经塑料粉碎机粉碎的复合材料颗粒 45 g，用 HAAKE 流变仪进行动态流变性能测试，实验温度 260 ℃，转子转速 60 r/min，实验时间 10 min。

2 结果与讨论

2.1 MCA－PPO/PS 复合材料结构分析

图 1 为熔融复合后得到的质量比为 50∶50∶100 的 MCA－PPO/PS 复合材料的 XRD 谱图。可见，由于 PS 和 PPO 均为非结晶性聚合物，在 XRD 谱图上没有衍射峰出现，与阻燃剂 MCA 相比，MCA/PS 和 MCA50－PPO/PS 两种复合材料中 MCA 的衍射峰的位置和相对强度并没有发生变化，表明在复合材料的制备和加工过程中，MCA 没有热分解，也没有受热升华，其结晶结构没有发生任何变化，因此，复合材料中 MCA 的阻燃作用不变。

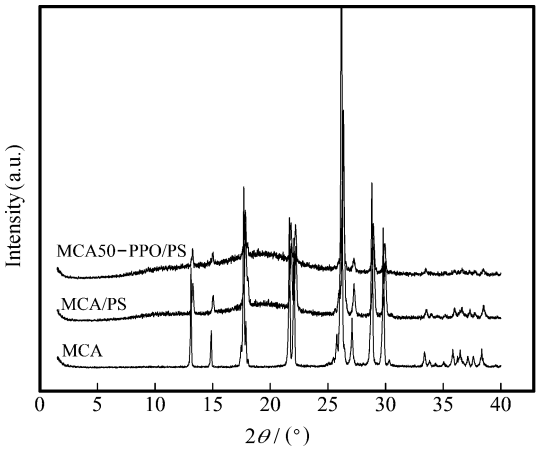

图 1 MCA 和含 MCA 复合材料的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns for MCA and MCA-containing composites

图 2 为不同放大倍数的 MCA50－PPO/PS 复合材料的断面 SEM 照片。可见，复合材料的断面粗糙，PS 和 PPO 两种聚合物融为一体，阻燃剂 MCA 的粒子在复合材料中分散比较均匀，无明显团聚现象。整体上来看，MCA－PPO/PS 复合材料的组成分布比较均匀。

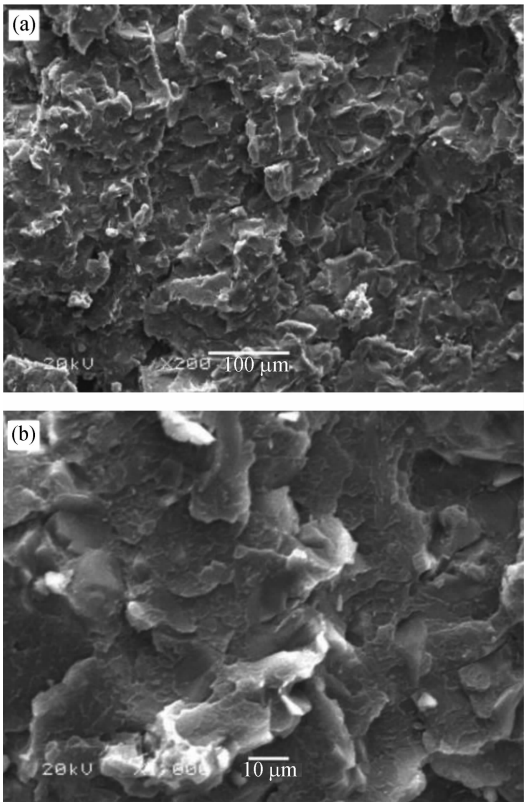

图 2 MCA50－PPO/PS 复合材料的断面 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of the cross-section of MCA50－PPO/PS composite

2.2　复合材料燃烧性能

图 3 为纯 PS 及不同质量比的 MCA－PPO/PS 复合材料的热释放速率曲线图，表 2 为各试样的锥形量热实验和 OI 实验数据。从图 3 和表 2 可见，纯 PS 的热释放速率曲线具有尖锐的峰值，材料的热释放速率峰值(Peak heat release rate，PHRR)为 1119.6 kW/m^2。与纯 PS 相比，质量比为 100∶100 的 PPO/PS 的 PHRR 值为 749.4 kW/m^2，比 PS 的相应值降低 33.1%，OI 值增加 5.4%，火灾性能指数(FPI)由 58.1×10^{-3} s·m^2/kW 增加到 69.4×10^{-3} s·m^2/kW，表明 PPO/PS 的阻燃性能比纯 PS 有很大提高。

在 PPO/PS 中加入第三组分 MCA 后得到的 MCA－PPO/PS 复合材料的 PHRR 值均比 PPO/PS 的相应值有所降低。MCA 用量较少时(如样品 MCA10－PPO/PS 和 MCA50－PPO/PS)，MCA－PPO/PS 复合材料的 OI 值和 FPI 值与 PPO/PS 差别不大，但是当 MCA 用量较多时(如样品 MCA90－PPO/PS)，MCA－PPO/PS 复合材料的 OI、FPI、TTI 和 TTP 均比 PPO/PS 的相应值增加很多，这表明加入 MCA 的确能够使复合材料的阻燃性能有较明显的改善，并且随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的阻燃性能逐渐增强。仔细观察图 3 可以发现，尽管 PPO/PS 的 PHRR 值与 MCA－PPO/PS 复合材料的 PHRR 值差别不大，但随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的热释放速率曲线的峰宽逐渐增大，不再有尖锐的峰值，复合材料从开始点燃到出现 PHRR 的时间(TTP)逐渐延长，即热释放速率峰值逐渐向后延迟，表明材料在燃烧时的放热速度逐渐变得平缓，降低了材料在使用中的火灾危险性[20]

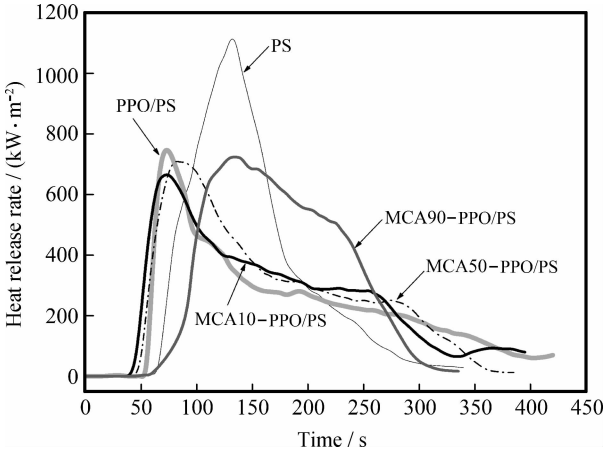

图 3　纯 PS 及 MCA－PPO/PS 复合材料的热释放速率曲线

Fig. 3　Heat release rate curves for pure PS and MCA－PPO/PS composites

从表 2 还可以看出，尽管 PPO/PS 的阻燃性能与纯 PS 相比有很大提高，但是两种材料的平均有效燃烧热(AEHC)基本不变，说明这两种材料热分解产生的挥发性气体物质在气相火焰中燃烧的程度基本相同，因此 PPO/PS 阻燃性能的改善只能是由于燃烧时材料凝聚相的变化所致，其阻燃机制为凝聚相成炭阻燃[6, 21]。在 PPO/PS 中加入 MCA 后形成的复合材料的 TTI、TTP、FPI 和 OI 值均随着 MCA 用量增加而逐渐增大，而 AEHC 值随着 MCA 用量增加而逐渐减小，说明复合材料的阻燃性能随着 MCA 用量增加而不断改善，复合材料热分解产生的挥发性气体物质在气相火焰中的燃烧程度不断降低，无法充分燃烧，因此其阻燃机制为气相阻燃。

为了进一步证实上述阻燃机制，把几种不同材料在 400 ℃高温热分解 3 h，观察其热分解残留物形貌并计算残留率。图 4 为不同材料在 400 ℃热处理 3 h 后的残留物形貌数码照片。可见，纯 PS 在 400 ℃高温热分解 3 h 后没有任何残留，MCA/PS

表 2　不同材料的锥形量热实验和氧指数实验数据

Table 2　Cone calorimetry and oxygen index data for different materials

Sample	TTI/s	PHRR/(kW·m^{-2})	TTP/s	AEHC/(MJ·kg^{-1})	FPI/(10^{-3}s·m^2·kW^{-1})	OI/%
PS	65	1119.6	130	33.0	58.1	17.5
PPO/PS	52	749.4	75	32.1	69.4	22.9
MCA10－PPO/PS	45	667.8	75	31.1	67.4	22.0
MCA50－PPO/PS	50	713.0	80	30.2	70.1	23.5
MCA90－PPO/PS	85	724.1	130	28.5	117.4	24.0

Note：TTI－Time to ignition；PHRR－Peak heat release rate；TTP－Time to PHRR；AEHC－Average effective heat of combustion；FPI－Fire performance index；OI－Oxygen index.

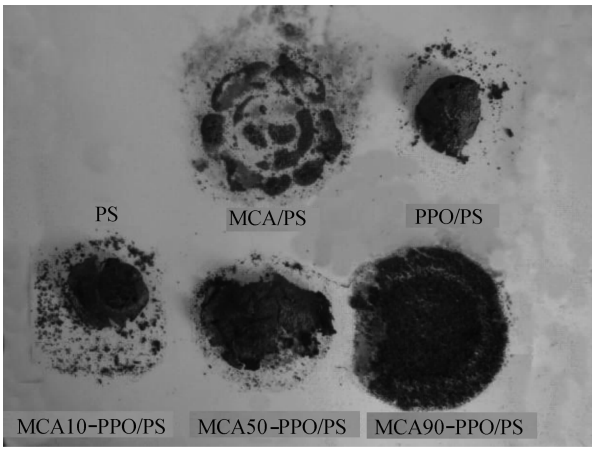

图 4　不同材料在 400 ℃热处理 3 h 后的残留物形貌数码照片

Fig. 4　Digital photos of the residue morphology of different materials after heat-treated at 400 ℃ for 3 h

复合材料的残留物铺展很大，但很不连续，碎裂成许多小块。PPO/PS 的残留物铺展较小，生成的炭层比较完整致密，破碎现象很少。随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的残留物铺展程度越来越大，生成的炭层更加破碎，致密程度明显降低。图 5 给出了复合材料的热分解残留率变化曲线。可见，随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的热分解残留率呈不断下降趋势，材料的成炭性能逐渐下降。图 4 和图 5 的实验结果清楚地表明，PPO/PS 的阻燃机制为凝聚相成炭阻燃，随着加入 MCA 及其用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的成炭数量逐渐减少，生成的炭层碎裂成许多小块，高温热分解和燃烧时无法在复合材料表面生成连续和致密的炭层，材料的阻燃机制逐渐转变为以气相阻燃为主，这是由于随着MCA含量增加，MCA－PPO/PS 复合材料中 PPO/PS 的净含量逐渐减少，具有成炭作用的 PPO 的净含量也逐渐减少，因此复合材料的成炭能力逐渐降低。与此同时，MCA 在高温下热分解产生的氨气、水蒸气、二氧化碳等惰性气体不仅能够稀释燃烧区可燃气体及氧气的浓度，而且具有覆盖作用(毯子效应)，提高了材料的阻燃性能。此外，由于复合材料中的 MCA 在受热升华和热分解时要吸收大量热量，对复合材料能够起到冷却作用，这也会使材料的阻燃性能得到一定程度的提高[13, 16, 22]，因此，MCA－PPO/PS 复合材料阻燃性能的提高是惰性气体气相稀释和对复合材料基体的冷却两种因素共同作用的结果，并不是凝聚相阻燃作用。

图 6 为几种不同材料在锥形量热仪测试中的总烟释放量曲线，表 3 为相应的发烟数据。可见，与纯 PS 相比，PPO/PS 在燃烧时虽然阻燃性能有较大改善，但材料的总烟释放量(Total smoke release，TSR)从 5060.1 m^2/m^2 增至 12625.2 m^2/m^2，增加了近 1.5 倍，其他表征材料生烟的参数，如比消光面积峰值(Peak specific extinction area，PSEA)、比消光面积平均值(Average specific extinction area，ASEA)、生烟总量(Total smoke production，TSP)，也都有显著增加(见表 3)，这对发生火灾时受困人员的生命安全和救援工作均构成了极大威胁，不符合当今新型阻燃材料的发展方向。与 PPO/PS 相比，MCA－PPO/PS 复合材料的 TSR 数值随着 MCA 用量增加大幅度降低。例如，在复合材料中加入 5%(MCA10－PPO/PS)、25%(MCA50－PPO/PS)和 45%(MCA90－PPO/PS)质

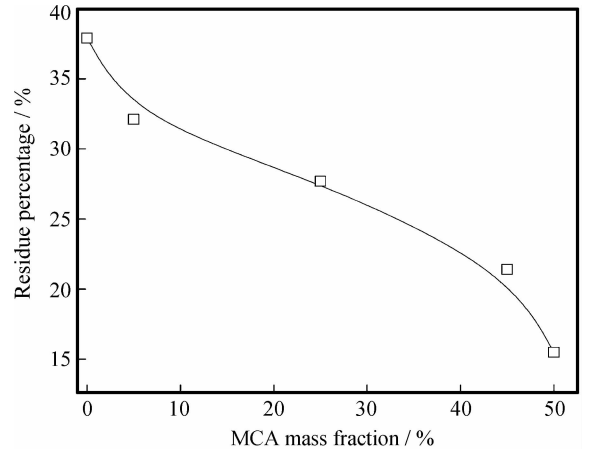

图 5　MCA－PPO/PS 400 ℃热处理 3 h 的残留率变化曲线

Fig. 5　Residual rate curves of MCA－PPO/PS composites after heat-treated at 400 ℃ for 3 h

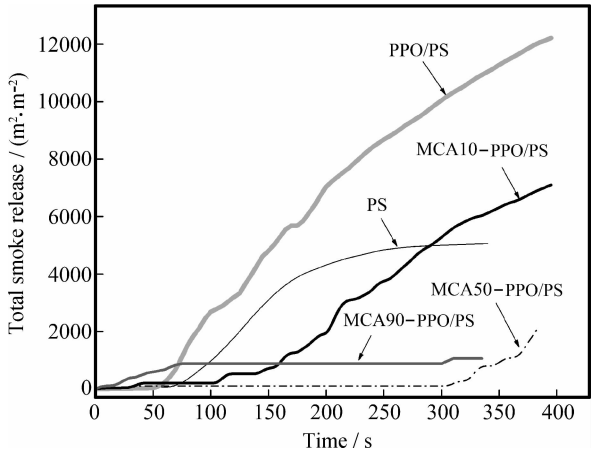

图 6　不同材料在锥形量热仪实验中的总烟释放量曲线

Fig. 6　Total smoke release curves for different materials in cone calorimeter test

表 3　不同材料的锥形量热实验发烟数据

Table 3　Cone calorimetry smoke data for different materials

Sample	PSEA/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	ASEA/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	TSR/($m^2 \cdot m^{-2}$)	TSP/($m^2 \cdot m^{-2}$)
PS	4418.1	1566.1	5060.1	44.7
PPO/PS	4856.9	3962.8	12625.2	111.6
MCA10－PPO/PS	4981.1	2209.0	7102.9	62.8
MCA50－PPO/PS	4377.8	636.1	2190.5	19.4
MCA90－PPO/PS	3805.6	295.2	1059.2	9.4

Note：PSEA—Peak specific extinction area；ASEA—Average specific extinction area；TSR—Total smoke release；TSP—Total smoke production.

量分数的 MCA 可分别使材料的 TSR 数值比 PPO/PS 的相应值降低 43.7%、82.6%和 91.6%。此外，MCA－PPO/PS 复合材料的 PSEA、ASEA 和 TSP 数值也都比 PPO/PS 的相应值大幅度降低。实验结果清楚地表明，加入 MCA 不但能够增强 PPO/PS 的阻燃性，更重要的是能够大幅度降低材料的发烟量，从而实现 PPO/PS 复合材料阻燃、低烟的目标。

2.3　复合材料流动性能

图 7 为 MCA－PPO/PS 复合材料的熔体流动速率(MFR) 随 MCA 用量的变化曲线。可见，在 PPO/PS 中加入 MCA 后所得复合材料的 MFR 值随着 MCA 用量增加而呈不断增大趋势，表明复合材料在熔融后的熔体黏度逐渐减小，流动性能逐渐改善，成型加工更加容易进行。

图 8 为四种不同材料的 HAAKE 流变曲线。可以看出，几种材料在熔融后的流变曲线形状类似，但是实验过程中 HAAKE 流变仪转子的转矩不同。实验时间相同时，PPO/PS材料的转矩最大，随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料的转矩逐渐减小。图 9 为上述几种材料在 10 min 时的平衡转矩随 MCA 用量的变化曲线。可见，随着 MCA 用量增加，MCA－PPO/PS 复合材料熔融后的平衡转矩逐渐降低。图 8 和图 9 的实验结果表

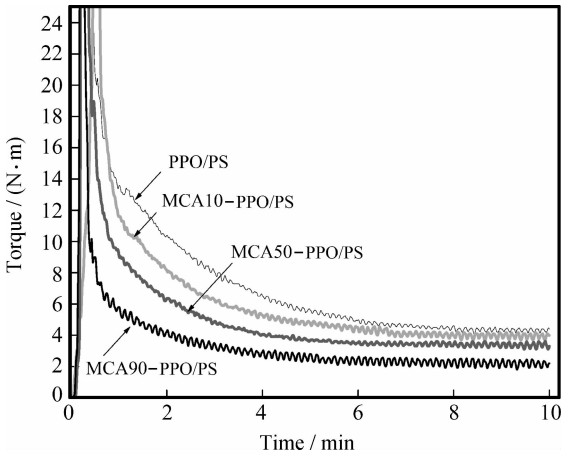

图 8　不同材料的 HAAKE 流变曲线

Fig. 8　HAAKE rheological curves of different materials

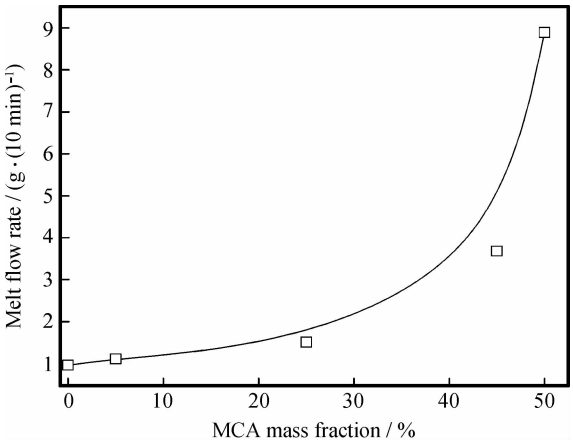

图 7　MCA 用量对 MCA－PPO/PS 复合材料熔体流动速率的影响

Fig. 7　Influence of MCA loading on the melt flow rate of MCA－PPO/PS composites

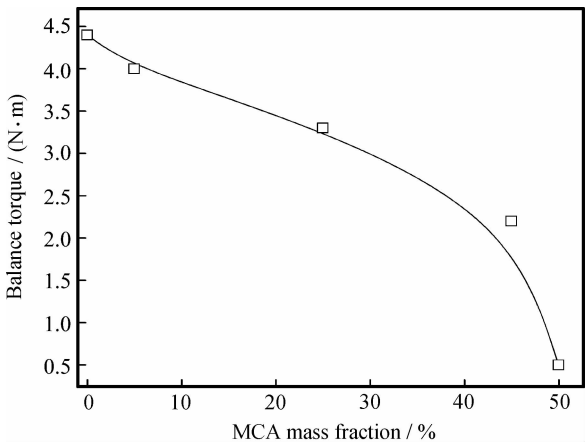

图 9　MCA 用量对 MCA－PPO/PS 复合材料平衡转矩的影响

Fig. 9　Balance torque curves of MCA－PPO/PS composites as a function of MCA loading

明，所有 MCA－PPO/PS 复合材料在熔融后的转矩均比 PPO/PS 更低，并且 MCA 用量越多，复合材料的转矩越低。物料的转矩越低，表明对流变仪转子运动时的阻力越小，材料的黏度越低，熔融流动性越好，成型加工越容易，这与图 7 的实验结果一致。因此，加入 MCA 对复合材料的流动性能也有较大改善。

3 结 论

（1）在三聚氰胺氰尿酸盐-改性聚苯醚/聚苯乙烯（MCA－PPO/PS）复合材料的制备和加工过程中，阻燃剂 MCA 的微观结构没有发生任何变化，因此复合材料中 MCA 的阻燃作用不变。MCA 在复合材料中分散良好，无明显团聚现象，复合材料的组成比较均匀。

（2）MCA－PPO/PS 复合材料的阻燃性能随着 MCA 用量增加而逐渐增强，发烟量大幅度降低，复合材料阻燃性能的提高是由于 MCA 热分解产生的惰性气体气相稀释与 MCA 受热升华吸热对聚合物基体的冷却效应两种因素共同作用的结果。

（3）MCA－PPO/PS 复合材料的熔体黏度随着 MCA 用量增加而逐渐降低，流动性能逐渐改善，成型加工更易进行。

（4）MCA 对 MCA－PPO/PS 复合材料可同时起到阻燃、抑烟和改善加工流动性的作用，尤其是能够大幅度降低复合材料的发烟量，为阻燃、低烟、环境友好型 PPO/PS 复合材料的研究开发提供了新的思路。

参考文献：

[1] 郭晓冉，王文平，费 明，等. POSS/PS 复合材料的制备及其热性能 [J]. 复合材料学报，2009，26(6)：31－36.
Guo Xiaoran，Wang Wenping，Fei Ming，et al. Synthesis and thermal properties of POSS/PS composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(6)：31-36.

[2] 宋晓艳，程博闻. 多面体倍半硅氧烷(POSS)/聚苯乙烯复合材料热性能 [J]. 复合材料学报，2010，27(5)：29-35.
Song Xiaoyan，Cheng Bowen. Thermal property of polyhedral oligomeric silsesquioxane(POSS)/polystyrene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(5)：29-35.

[3] Agari Y，Shimada M，Ueda A. Thermal diffusivity and conductivity of PPO/PS blends [J]. Polymer，1997，38(1)：2649-2655.

[4] Kim S H，Kim D，Lee D S. Gas permeation behavior of PPO/PS blends [J]. Journal of Membrane Science，1997，127(1)：9-15.

[5] Suzuki T，Yoshimizu H，Tsujita Y. Characterization of microvoids in PPO/PS polymer blend by means of ^{129}Xe NMR spectroscopy [J]. Desalination，2002，148(1)：359-361.

[6] 刘继纯，陈 权，井蒙蒙，等. PPO/PS 的燃烧行为研究 [J]. 塑料科技，2011，39(4)：35-39.
Liu Jichun，Chen Quan，Jing Mengmeng，et al. Combustion behavior of PPO/PS alloy [J]. Plastics Science and Technology，2011，39(4)：35-39.

[7] Casu A，Camino G，Giorgi M D，et al. Fire－retardant mechanistic aspects of melamine cyanurate in polyamide copolymer [J]. Polymer Degradation and Stability，1997，58(3)：297-302.

[8] Kiliaris P，Papaspyrides C D. Polymer/layered silicate(clay) nanocomposites：An overview of flame retardancy [J]. Progress in Polymer Science，2010，35(7)：902-958.

[9] Modesti M，Lorenzetti A，Simioni F，et al. Influence of different flame retardants on fire behaviour of modified PIR/PUR polymers [J]. Polymer Degradation and Stability，2001，74(3)：475-479.

[10] Horacek H，Grabner R. Advantages of flame retardants based on nitrogen compounds [J]. Polymer Degradation and Stability，1996，54(2)：205-215.

[11] Lewin M. Flame retarding polymer nanocomposites：Synergism，cooperation，antagonism [J]. Polymer Degradation and Stability，2011，96(3)：256-269.

[12] Chen Yinghong，Wang Qi，Yan Wei，et al. Preparation of flame retardant polyamide 6 composite with melamine cyanurate nanoparticles in situ formed in extrusion process [J]. Polymer Degradation and Stability，2006，91(11)：2632-2643.

[13] Gijsman P，Steenbakkers R，Fürst C，et al. Differences in the flame retardant mechanism of melamine cyanurate in polyamide 6 and polyamide 66 [J]. Polymer Degradation and Stability，2002，78(2)：219-224.

[14] Markarian J. Flame retardants for polyamides：New developments and processing concerns [J]. Plastics，Additives and Compounding，2005，7(2)：22-25.

[15] Liu Yuan，Wang Qi. Melamine cyanurate－microencapsulated red phosphorus flame retardant unreinforced and glass fiber reinforced polyamide 66 [J]. Polymer Degradation and Stability，2006，91(12)：3103-3109.

[16] Kiliaris P，Papaspyrides C D，Pfaendner R. Polyamide 6 filled with melamine cyanurate and layered silicates：Evaluation of flame retardancy and physical properties [J]. Macromolecular Materials and Engineering，2008，293(9)：740-751.

[17] Zhang J，Lewin M，Pearce E，et al. Flame retarding polyamide 6 with melamine cyanurate and layered silicates [J]. Polymers for Advanced Technology，2008，19(7)：928-936.

[18] 朱林林，张兴祥，王学晨. 三聚氰胺氰尿酸盐对锦纶 6 的抗滴落阻燃改性研究 [J]. 化工新型材料，2009，37(4)：65-67.

Zhu Linlin, Zhang Xingxiang, Wang Xuechen. Anti-dripping and flame retardant polyamide 6 fibers containing melamine cyanurate [J]. New Chemical Materials, 2009, 37(4): 65-67.

[19] 刘继纯，李晴媛，付梦月. PS/MCA 复合材料的阻燃性能研究 [J]. 现代塑料加工应用，2009，21(4)：17-20.

Liu Jichun, Li Qingyuan, Fu Mengyue. Flame retardancy of PS/MCA composites [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2009, 21(4): 17-20.

[20] 纪　全，张　静，王孝龙，等. 阻燃聚酯/蒙脱土复合材料的制备及燃烧性能 [J]. 高分子材料科学与工程，2008，24(6)：148-151.

Ji Quan, Zhang Jing, Wang Xiaolong, et al. Preparation and flammability property of flame retardant polyester/MMT nanocomposite [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(6): 148-151.

[21] 李　斌，王建祺. 聚合物材料燃烧性和阻燃性的评价—锥形量热仪(Cone)法 [J]. 高分子材料科学与工程，1998，14(5)：15-19.

Li Bin, Wang Jianqi. Utilization of cone calorimeter for the appraisal of the flammability and flame retardancy of polymeric materials [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 1998, 14(5): 15-19.

[22] Levchik S V, Levchik G F, Balabanovich A I. Mechanistic study of combustion performance and thermal decomposition behaviour of nylon 6 with added halogen-free fire retardants [J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, 54(2): 217-222.