

中文引用格式:刘勇,姜一帆,耿鑫玺,等. DOPO-BPS/OSEP/EP-CE 阻燃复合材料的制备及性能[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2): 111-117.

英文引用格式:LIU Yong, JIANG Yifan, GENG Xinxi, et al. Preparation and properties of DOPO-BPS/OSEP/EP-CE flame retardant composite materials[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2): 111-117.

# DOPO-BPS/OSEP/EP-CE 阻燃复合材料的 制备及性能\*

刘勇<sup>1,2,3</sup>副教授,姜一帆<sup>1</sup>,耿鑫玺<sup>1</sup>,张焘<sup>4</sup>

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南湘潭 411201;2 地下空间防火防爆材料与装备湖南省工程研究中心,湖南湘潭 411201;3 火灾爆炸防控与应急技术湖南省普通高等学校重点实验室,湖南湘潭 411201;4 南京工业大学 安全科学与工程学院,江苏南京 211816)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.02.0976

基金项目:湖南省自然科学基金资助(2024JJ8338)。

**【摘要】** 为提高环氧树脂(EP)-氰酸酯树脂(CE)复合材料的阻燃与抑烟性能,首先以9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲 10-氧化物(DOPO)与4,4'-二羟基二苯砜(BPS)为原料,合成一种新型阻燃剂DOPO-BPS,通过溶液浇筑法,将DOPO-BPS与有机海泡石(OSEP)共同引入EP-CE基体中,制备阻燃DOPO-BPS/OSEP/EP-CE复合材料;然后在傅里叶红外光谱仪(FTIR)分析、核磁共振(NMR)分析、热重分析(TGA)、极限氧指数(LOI)测试、UL-94垂直燃烧测试和锥形量热仪分析的基础上,研究不同比例的DOPO-BPS与OSEP对EP-CE复合材料阻燃性能和抑烟性能的影响。研究表明:DOPO-BPS的磷杂菲环结构能形成稳定炭层,阻断热氧传递,与OSEP的协同作用显著提升了阻燃效果和抑烟性能。当阻燃剂DOPO-BPS与OSEP以9:1的质量比添加至EP-CE时,阻燃性能和抑烟性能最佳,阻燃性能达V-0级,LOI增至31.4%,且热释放速率峰值、总热释放量和产烟总量相比于EP-CE,分别降低了29.7%、32.2%和32.7%。

**【关键词】** 环氧树脂(EP); 氰酸酯树脂(CE); 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲 10-氧化物(DOPO); 4,4'-二羟基二苯砜(BPS); 有机海泡石(OSEP); 阻燃; 复合材料

## Preparation and properties of DOPO-BPS/OSEP/EP-CE flame retardant composite materials

LIU Yong<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yifan<sup>1</sup>, GENG Xinxi<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>4</sup>

(1 College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Hunan Engineering Research Center for Fire and Explosion Prevention Materials and Equipment in Underground Spaces, Xiangtan Hunan 411201, China; 3 Key Laboratory of Fire and Explosion Prevention and Emergency Technology in Hunan Province, Xiangtan Hunan 411201, China; 4 College of Safety Science and Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

**Abstract:** To enhance the flame retardancy and smoke suppression performance of EP-CE composites, a novel flame retardant was synthesized using DOPO and BPS as raw materials. The flame-retardant DOPO-

BPS/OSEP/EP-CE composites were fabricated by the solution casting method, where DOPO-BPS and OSEP were jointly introduced into EP-CE matrix. Based on Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis, nuclear magnetic resonance (NMR) analysis, thermogravimetric analysis (TGA), limiting oxygen index (LOI) test, UL-94 vertical burning test, and cone calorimeter analysis, the effects of different ratios of DOPO-BPS and OSEP on the flame retardancy and smoke suppression properties of EP-CE composite materials were studied. The results show that the phosphaphenanthrene ring structure of DOPO-BPS could form a stable carbon layer and block the transfer of heat and oxygen. The synergistic effect with OSEP significantly improves the flame retardant effect and smoke suppression performance. When the flame retardant DOPO-BPS and OSEP are added to EP-CE at a mass fraction of 9:1, the flame retardant performance and smoke suppression performance are the best, the flame retardant performance reaches V-0 level, and the LOI increases to 31.4%. Compared with EP-CE, the peak heat release rate, total heat release and total smoke production decrease by 29.7%, 32.2% and 32.7%, respectively.

**Keywords:** epoxy resin (EP); cyanate ester resin (CE); 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene 10-oxide (DOPO); bisphenol sulfone (BPS); organic sepiolite (OSEP); flame retardancy; composite materials

## 0 引言

环氧树脂 (Epoxy Resin, EP) 和氰酸酯树脂 (Cyanate Ester resin, CE) 作为高性能热固性聚合物,被广泛应用于航空航天、汽车制造、电子电器等工业领域,其优异的机械性能和电气性能,使得这类材料成为现代工业不可或缺的重要组成部分。然而,EP-CE 复合材料存在阻燃性能差和生烟量大的问题,限制了其应用范围的扩展<sup>[1]</sup>。

添加磷系阻燃剂是提高热固性聚合物阻燃性能的途径之一,例如:LIN Chinghsuan<sup>[2]</sup>通过将含磷的阻燃剂与 CE 接枝,再与 EP 混合,成功提升了混合物的阻燃性。HO Tsunghan 等<sup>[3]</sup>在 EP 中添加了含磷阻燃剂,使得 UL-94 垂直燃烧测试达到了 V-0 等级。而 9, 10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物 (9, 10-Dihydro-9-Oxa-10-Phosphaphenan-Threne-10-Oxide, DOPO) 作为一种常用的磷系阻燃剂,因其携带的苯环结构能有效提升阻燃剂与 EP 和 CE 等基材的相容性,并在聚合物燃烧过程中,在凝聚相上形成炭层,可覆盖于聚合物外表面,能够减缓热量、氧气和可燃气体产物的传递,从而降低可燃性,成为制备高性能阻燃复合材料的有力支持<sup>[4]</sup>。此外,添加单一元素阻燃剂往往难以满足阻燃需求,研究者们开始探索多元素协同阻燃策略,如于水军<sup>[5]</sup>、周颖<sup>[6]</sup>等在 EP-CE 体系中引入硫、氮元素后,其阻燃效果良好。4,4'-二羟基二苯砜 (Bisphenol Sulfone, BPS) 作为阻燃材料制备过程中的重要成分,能够在分子结构中提供特定的硫元素,进而提高材料的阻燃能力<sup>[7]</sup>。而海泡石

(Sepiolite, SEP) 独特的层链状结构和催化性能,可有效阻碍燃烧反应的发生,改善复合材料的抑烟性能,但分散性不好,与 EP-CE 的相容性差,发挥协同阻燃效果之前还需进行有机改性<sup>[8-9]</sup>。

基于此,笔者拟引入 BPS、改性有机 SEP (Organic Sepiolite, OSEP) 与磷系阻燃剂 DOPO,构建新型多元素协同阻燃体系,通过研究复合材料的热稳定、阻燃和燃烧等性能,探讨 DOPO-BPS/OSEP/EP-CE 阻燃复合材料的相关作用机制。

## 1 阻燃复合材料的制备

### 1.1 主要原料、设备与仪器

试验原料主要有:EP、CE、DOPO、三乙胺、四氯化碳、BPS、 $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷、二氯甲烷、 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷、 $\gamma$ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷 (KH560)、SEP、无水乙醇、盐酸、去离子水,均为分析纯。

所用试验仪器主要包括超声波分散机、集热式磁力搅拌器、循环水真空泵、玻璃仪器、电子天平、电热鼓风干燥箱、氧指数测试仪、垂直燃烧测试仪、锥形量热仪、傅里叶红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)、核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 波谱仪、扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、X 射线衍射仪和热重 (Thermogravimetric, TG) 仪。

### 1.2 样品制备

#### 1.2.1 DOPO 衍生物的制备

取 17.28 g 的 DOPO 溶于二氯甲烷,加入 12.00 g

的BPS、9.70 g的三乙胺搅拌后,滴加四氯化碳14.76 g,反应12 h。产物经萃取洗涤、减压蒸馏,得到乳白色DOPO-BPS固体。

### 1.2.2 OSEP的制备

通过稀盐酸溶液酸化SEP,搅拌12 h后洗涤、干燥得酸改SEP样品(Acid-modified SEP, A-SEP);将硅烷偶联剂KH560在乙醇中水解,与A-SEP混合,经超声分散后,在85 °C反应4 h;产物经洗涤、80 °C真空干燥12 h,研磨过筛并保存得到硅烷偶联剂改性OSEP。

### 1.2.3 DOPO-BPS/OSEP/EP-CE的制备

按6:4质量比取EP与CE树脂,先加热EP至80 °C后,加入不同比例的DOPO-BPS或OSEP,搅拌1 h,再加入CE,并升温至100 °C,并搅拌1 h。再将混合液浇注到预热模具中,分别在150、180和200 °C下固化2 h,得到6种样品,见表1。

表1 阻燃复合材料配方

Table 1 Flame retardant composites formula g

样品	EP	CE	DOPO-BPS	OSEP
EP-CE	60.0	40.0	0.0	0.0
7DOPO-BPS/30SEP/EP-CE	54.0	36.0	7.0	3.0
8DOPO-BPS/20SEP/EP-CE	54.0	36.0	8.0	2.0
9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE	54.0	36.0	9.0	1.0
30SEP/EP-CE	58.2	38.8	0.0	3.0
10DOPO-BPS/EP-CE	54.0	36.0	10.0	0.0

## 2 阻燃复合材料结果与性能分析

### 2.1 DOPO-BPS理化表征分析

图1为DOPO、BPS和DOPO-BPS的FTIR图,从中可以看出,在特定波段,产物DOPO-BPS在 $3060\text{ cm}^{-1}$ 显示DOPO苯环上的=C-H伸缩振动峰, $916$ 、 $755$ 和 $600\text{ cm}^{-1}$ 显示P-O-C、P-C和P=O基团伸缩振动峰, $1286$ 和 $1147\text{ cm}^{-1}$ 为BPS的 $-\text{SO}_2-$ 基团拉伸振动峰。原料DOPO的P-H和BPS的-OH伸缩振动峰在产物中消失,表明二者在反应中消耗。这些变化表明DOPO的P-H键与BPS的酚羟基成功反应,产物保留了磺基和含磷基团。因此,可以初步推断产物DOPO-BPS成功合成。

DOPO-BPS的 $^1\text{H}$  NMR图谱和 $^{31}\text{P}$  NMR图谱如图2所示。由图2a可知: $^1\text{H}$  NMR谱图化学位移 $6.8\times 10^{-6}\sim 8.05\times 10^{-6}$ 处归属于苯环,证实DOPO框架保留;化学位移 $8.79\times 10^{-6}$ 处P-H共振减弱,表明反应发生。不同质子化学环境的位点被标记并计算面积比,与理论比基本一致,验证了产物结构。此

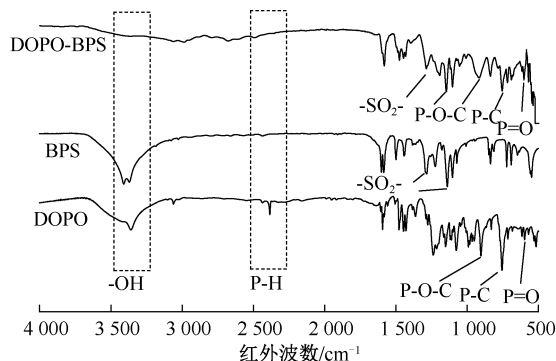


图1 DOPO、BPS和DOPO-BPS的FTIR图

Fig. 1 FTIR spectra of DOPO, BPS, and DOPO-BPS

外, $^1\text{H}$  NMR谱图中化学位移 $5.0\times 10^{-6}\sim 5.5\times 10^{-6}$ 处为溶剂峰,化学位移 $1.0\times 10^{-6}$ 处附近为三乙胺峰;图2b的 $^{31}\text{P}$  NMR谱图在化学位移 $7.27\times 10^{-6}$ 处显示强烈信号,归因于DOPO-BPS的磷原子。这些数据与FTIR分析结果相符,共同证实了DOPO-BPS的成功合成。

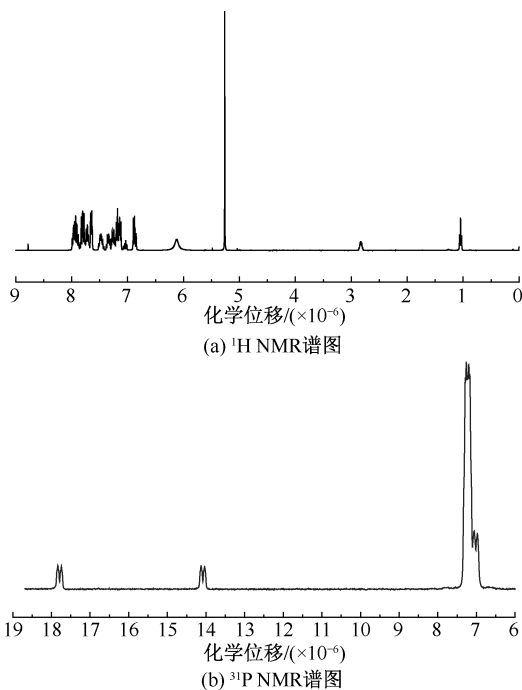


图2 DOPO-BPS的 $^1\text{H}$  NMR谱图和 $^{31}\text{P}$  NMR谱图  
Fig. 2  $^1\text{H}$  NMR spectra and  $^{31}\text{P}$  NMR spectra of DOPO-BPS

### 2.2 热稳定性分析

氮气氛围下6组样品的TG测试数据见表2,TG和微商热重(Differential Thermogravimetric, DTG)曲线如图3所示。当OSEP添加量超过3%质量分数时,SEP在EP-CE复合材料中会发生团聚现象,破坏复合材料的内部联结,故采用30SEP/EP-CE作为对照组。

表 2 EP-CE 及其复合材料的 TGA 数据

Table 2 TGA data of EP-CE and its composites

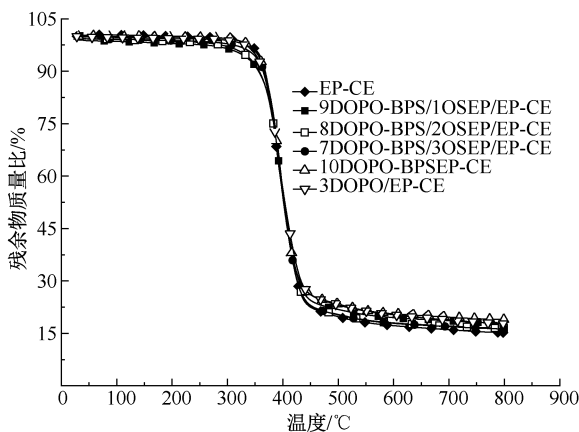
样品	初始失重温度 $t_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	最大失重速率温度 $t_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	残余物质量分数/%
EP-CE	356.7	385.7	15.2
9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE	323.6	395.1	18.0
8DOPO-BPS/20SEP/EP-CE	329.6	395.1	16.5
7DOPO-BPS/30SEP/EP-CE	345.6	396.6	16.3
10DOPO-BPS/EP-CE	353.8	394.8	18.9
30SEP/EP-CE	363.4	401.4	16.0

从表 2 可以看出,添加 10% DOPO-BPS 复合材料的残炭量达到了 18.9%,相较于 EP-CE 的 15.2% 有所提高。这一提升可能与 DOPO-BPS 本身所具有的 P=O 和 S=O 等基团在高温下产生的磷酸盐、多磷酸盐及硫酸盐等酸性物质有关。这些酸性物质催化了熔融物质的形成,促使炭层交联更加致密,起到了隔绝氧气及保护作用;增加 3% OSEP 复合材料的初始失重温度和最大失重速率温度相较于 EP-CE 均有所提升,这表明 OSEP 能够延缓 EP-CE 的热降解过程。分析不同配比下的 DOPO-BPS 和 OSEP 复合阻燃剂对 EP-CE 复合材料热稳定性的影响,发现添加 DOPO-BPS 和 OSEP 后,复合材料的  $t_{5\%}$  普遍降低,这可能与阻燃剂在燃烧初期的提前分解,形成炭层以减缓燃烧和烟气释放有关。尽管  $t_{5\%}$  降低,但复合材料的  $t_{\text{max}}$  相较于 EP-CE 有所提升,最大增幅达 12 °C,这表明 DOPO-BPS 和 OSEP 共同增强了 EP-CE 的热稳定性。

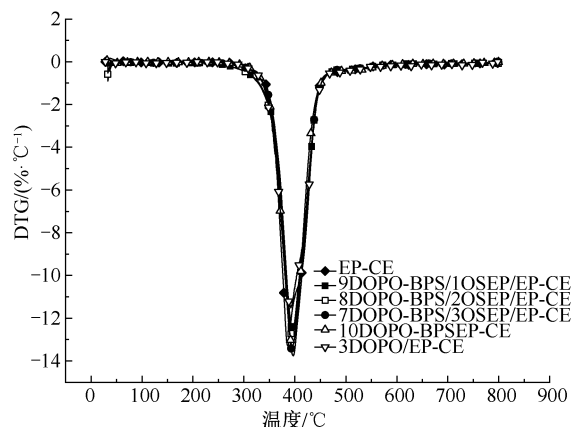
从图 3a 可知: $t_{5\%}$  的变化趋势与阻燃剂的配比密切相关。随着 DOPO-BPS 含量的减少和 OSEP 含量的增加, $t_{5\%}$  呈现出波动,可能由于 SEP 添加量影响了聚合物分子链的稳定性<sup>[10]</sup>。而 9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE 的  $t_{5\%}$  最低,达到 323.6 °C,较 EP-CE 下降了 33.1 °C,表明阻燃剂相互作用形成的新化合物可能会影响热稳定性。此外,所有复合材料在热解过程中均呈现单一失重阶段,说明阻燃剂的引入并未改变 EP-CE 的基本热分解机制。同时,在添加量一定的情况下,随着 OSEP 含量的增加,残炭量减少,但 1% OSEP 含量的复合材料在 800 °C 下的残炭量较 EP-CE 增加 2.8%,表明适量添加 OSEP 有助于提高复合材料的残炭率<sup>[11]</sup>。

### 2.3 阻燃性能分析

EP-CE 复合材料的极限氧指数(Limiting Oxygen Index, LOI)和 UL-94 垂直燃烧试验结果见表 3。



(a) TG 曲线



(b) DTG 曲线

图 3 EP-CE 及其复合材料的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of EP-CE and its composites

表 3 EP-CE 及其复合材料的 LOI 和 UL-94 测试数据

Table 3 LOI and UL-94 test data of EP-CE and its composites

样品	LOI /%	等级	滴落	总燃烧时间/s
EP-CE	24.4	NR	是	>250
7DOPO-BPS/30SEP/EP-CE	29.8	V-1	否	134.5
8DOPO-BPS/20SEP/EP-CE	30.6	V-1	否	98.5
9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE	31.4	V-0	否	47.5
10DOPO-BPS/EP-CE	30.9	V-0	否	46.5
3% OSEP/EP-CE	24.6	NR	是	>250

从表 3 可知:DOPO-BPS 阻燃剂的加入使复合材料的燃烧等级从 NR 提升至 V-0,燃烧性能明显改善。并且在特定的混合比例下,复合阻燃剂 9DOPO-BPS/10SEP 的阻燃效果优于单一阻燃剂 DOPO-BPS 和 OSEP,这表明 DOPO-BPS 和 OSEP 在阻燃 EP 时具有协同效应,能够有效地提升材料的阻燃性能。并且 DOPO-BPS 阻燃剂的加入对提升 EP-CE 复合材料的 LOI 值起到了显著的作用。特

别是在9DOPO-BPS与10SEP的质量比下,复合材料的LOI值达到了最高的31.4%。

## 2.4 燃烧性能分析

### 2.4.1 热释放特性分析

EP-CE、10DOPO-BPS/EP-CE、30SEP/EP-CE和9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE的锥形量热仪测试结果如图4所示。EP-CE复合材料的点燃时间未因OSEP的添加而发生显著改变,表明DOPO-BPS是影响燃烧性能的因素;DOPO-BPS与OSEP的组合在降低热释放速率(Heat Release Rate, HRR)上有优势,原因在于SEP的束状绞缠结构能吸附燃烧杂质,增强炭层强度,与DOPO-BPS协同作用,抑制燃烧过程<sup>[12]</sup>。

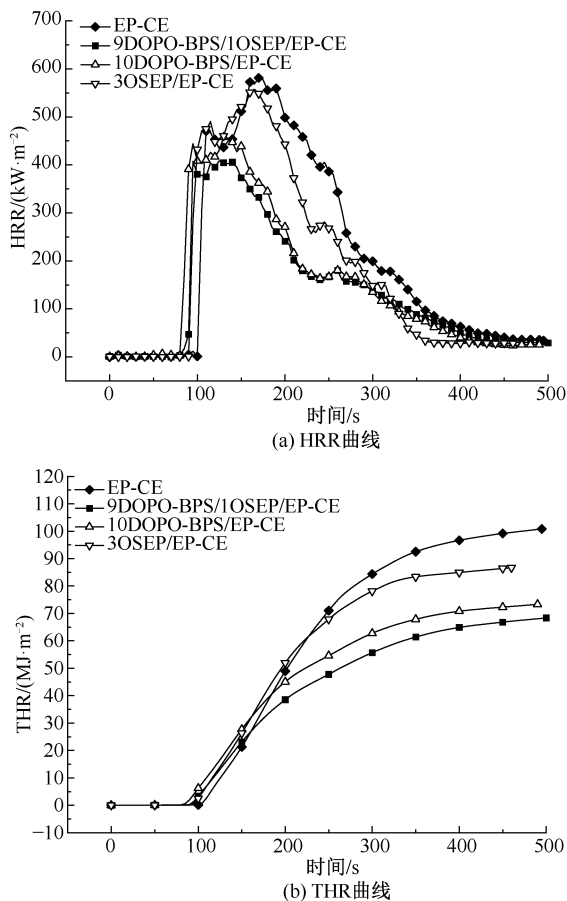


图4 EP-CE及其复合材料的HRR和THR曲线

Fig. 4 HRR and THR curves of EP-CE and its composites

表4给出了EP-CE及其复合材料的峰值放热速率(Peak of Heat Release Rate, PHRR)和总放热量(Total Heat Release, THR)。与EP-CE相比,复合材料的阻燃效果提升显著,其中9DOPO-BPS/10SEP组合的PHRR和THR降低幅度最大,分别为29.7%和32.2%。

表4 EP-CE及其复合材料的热释放特性数据

Table 4 Heat release characteristics data of EP-CE and its composites

样品	PHRR/ (kW · m <sup>-2</sup> )	THR/ (MJ · m <sup>-2</sup> )
EP-CE	581.1	100.8
10DOPO-BPS/EP-CE	458.1	73.3
30SEP/EP-CE	557.7	86.7
9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE	408.5	68.3

### 2.4.2 产烟特性分析

EP-CE及其复合阻燃材料的烟气释放速率(Smoke Production Rate, SPR)和总烟气释放量(Total Smoke Production, TSP)测试结果如图5所示。添加DOPO-BPS、OSEP或DOPO-BPS/OSEP复合阻燃剂的EP-CE复合材料在产烟特性上均有所改善。特别是9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE复合材料展现出更显著的烟雾抑制效果。单独添加DOPO-BPS的EP-CE复合材料的峰值SPR略有上升,可能与气相阻燃作用相关。但加入OSEP后,峰值SPR降低了15.7%,TSP降低了16%,相对于EP-

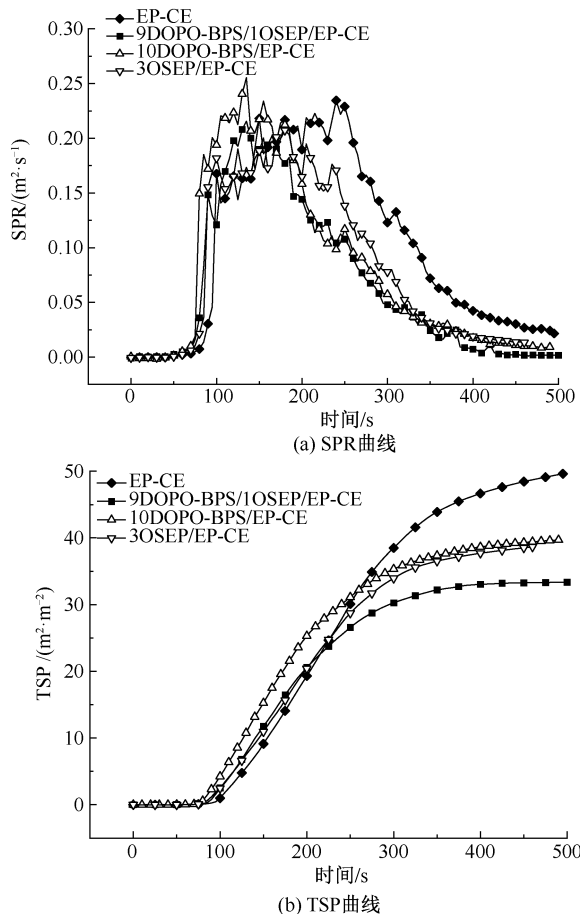


图5 EP-CE及其复合材料的SPR和TSP曲线

Fig. 5 SPR and TSP curves of EP-CE and its composites

CE 则分别从 0.235 降低了 8.5% 和 32.7%。这表明 OSEP 的二维结构在高温下促进炭层形成,其层链状结构有效阻碍烟气逸出,提高了阻燃性能并显著减少了烟气生成与释放,对降低烟雾毒性具有实际意义。

#### 2.4.3 烟气毒性分析

EP-CE 及其复合阻燃材料的烟气中 CO 和 CO<sub>2</sub> 的生成速率测试结果如图 6 所示。可以看出,在阻燃剂总添加质量分数为 10% 时,9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE 复合材料的 CO 生成速率峰值较 10DOPO-BPS/EP-CE 降低了 17.2%,表明 OSEP 显著减少了 CO 毒气产生,但是 OSEP 的加入未明显改变燃烧过程,CO 生成速率峰值降低的同时,CO<sub>2</sub> 生成速率峰值升高,这归因于 SEP 二维结构吸附并催化 CO 为 CO<sub>2</sub>。因此,SEP 与 DOPO-BPS 复合使用不仅能降低燃烧放热性能,还减少 CO 产生并促进 CO 向 CO<sub>2</sub> 转化,对提高材料的火灾安全性具有潜在应用价值。

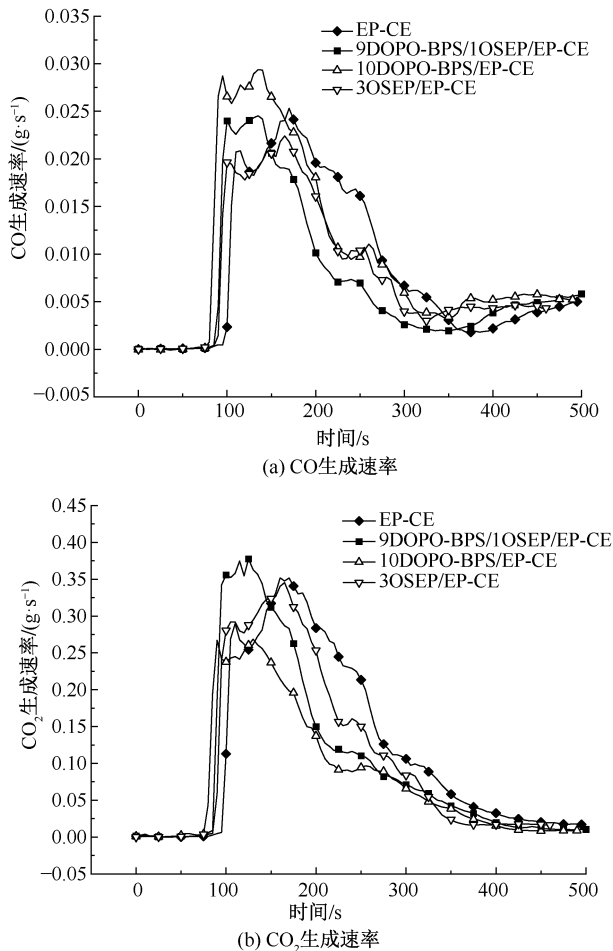


图 6 EP-CE 及其复合材料的 CO 和 CO<sub>2</sub> 生成速率曲线

Fig. 6 CO and CO<sub>2</sub> generation rate curves of EP-CE and its composites

## 2.5 残炭分析

图 7 为 3 组阻燃样品燃烧后的残炭 SEM 谱图。由图 7a 可知:EP-CE 的残炭表面存在大量孔洞,为热量和燃料的传输提供了通道;图 7b 则是加入 DOPO-BPS 后,残炭表面变得连续且光滑,这种组织紧密的炭层能够限制热量和易燃化合物的传递;图 7c 表示进一步加入 OSEP 后,炭层形貌未发生明显改变,但变得更加连续。残炭中的根状物质为 SEP,其作为隔热屏障,减少了热量和氧气的传递;这种紧密的炭层结构进一步增强了复合材料的阻燃性能。

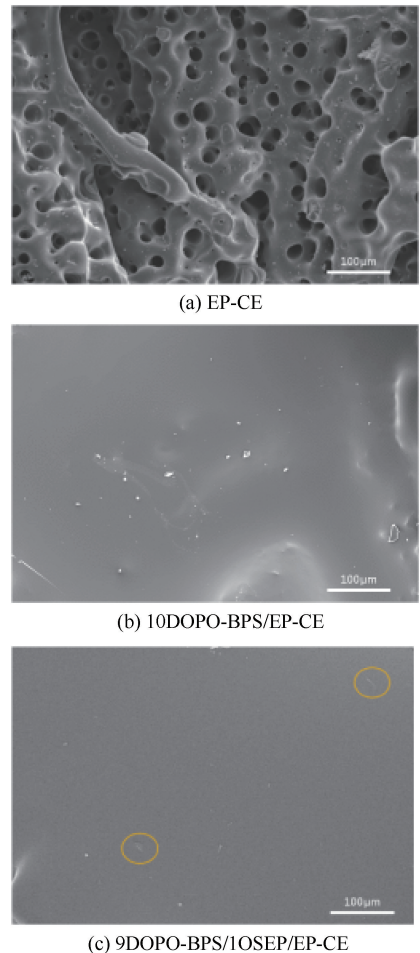


图 7 EP-CE、10DOPO-BPS/EP-CE 和 9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE 的 SEM 谱图

Fig. 7 SEM spectra of EP-CE, 10DOPO-BPS/EP-CE and 9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE

## 3 结论

1) 通过物理共混法,将 DOPO-BPS 和 OSEP 作为协同阻燃剂引入 EP-CE 体系,这样有助于 EP-CE 燃烧过程中形成紧密炭层结构,降低烟气和燃烧热

释放量。

2) 协同阻燃体系能有效提高 EP-CE 的阻燃性能,其中 9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE 表现最佳,复合材料的最大失重速率温度提高了 10 °C,LOI 达到了 31.4%,PHRR、THR 和 TSP 分别比 EP-CE 降低

29.7%、32.2%和 32.7%。

3) OSEP 的引入弥补了 DOPO 衍生物抑烟能力的不足,相对于 10DOPO-BPS/EP-CE,9DOPO-BPS/10SEP/EP-CE 复合材料的 SPR 和 TSP 峰值分别降低 15.7%和 16%。

### 参 考 文 献

- [1] CEN Xinhao, CAO Zhilin, LIN Liming, et al. Construction of a mesoporous silica/phytate-based flame-retardant hybrid and its modified epoxy resin and cyanate ester copolymer with simultaneously improved flame retardancy, smoke suppression and dielectric properties[J]. *Polymer*, 2024,308:DOI:10.1016/j.polymer.2024.127418.
- [2] LIN C. Synthesis of novel phosphorus-containing cyanate esters and their curing reaction with epoxy resin[J]. *Polymer*, 2004,45(23):7911-7926.
- [3] HO T, HWANG H, SHIEH J, et al. Thermal and physical properties of flame-retardant epoxy resins containing 2-(6-oxido-6H-dibenz[*c, e*] < 1, 2 > oxaphosphorin-6-yl)-1,4-naphthalenediol and cured with dicyanate ester[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008,93(12):2077-2083.
- [4] JIANG Saihua, ZHU Yulu, HU Yuan, et al. In situ synthesis of a novel transparent poly (methyl methacrylate) resin with markedly enhanced flame retardancy[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2016,27(2):266-272.
- [5] 于水军,谢高超,任荣,等. 硫氧镁水泥/聚苯乙烯复合材料燃烧性能研究[J], *中国安全科学学报*,2020,30(6):31-36.  
YU Shuijun, XIE Gaochao, REN Mo, et al. Study on combustion properties of magnesium oxysulfate cement/polystyrene composites[J]. *China Safety Science Journal*, 2020,30(6):31-36.
- [6] 周颖,张道海,秦舒浩. DOPO 衍生物的合成与阻燃应用研究现状[J]. *材料导报*, 2019,33(5):901-906.  
ZHOU Ying, ZHANG Daohai, QIN Shuhao. Synthesis and flame retardant applications of DOPO derivatives: an overview[J]. *Materials Reports*, 2019,33(5):901-906.
- [7] 张利芬,杨先贵,张华,等. 含 S 双酚 A 型聚碳酸酯的制备与研究[J]. *工程塑料应用*,2015,43(4):1-6.  
ZHANG Lifen, YANG Xiangui, ZHANG Hua, et al. Study on preparing sulfur-containing bisphenol A polycarbonate[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015,43(4):1-6.
- [8] 王奎,李乾波,张人旗,等. 海泡石纤维和纳米二氧化硅协同阻燃环氧树脂[J]. *工程塑料应用*, 2022,50(9):132-137, 143.  
WANG Kui, LI Qianbo, ZHANG Renqi, et al. Sepiolite fiber and nano SiO<sub>2</sub> synergistic flame retardant EP[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022,50(9):132-137, 143.
- [9] 易亮,杨倩,颜龙,等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 在膨胀型透明防火涂料中的协效作用[J]. *中国安全科学学报*,2022,32(7):63-69.  
YI Liang, YANG Qian, YAN Long, et al. Synergistic flame-retardant and smoke suppression effect of nano-TiO<sub>2</sub> in transparent intumescent fire-retardant coatings[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(7):63-69.
- [10] WANG Zhengzhou, GAO Xin, LI Wenfeng. Epoxy resin/cyanate ester composites containing DOPO and wollastonite with simultaneously improved flame retardancy and thermal resistance [J]. *High Performance Polymers*, 2020, 32(6):710-718.
- [11] 王建航,许志彦,张玉鹏,等. 磷杂菲/环氧树脂复合材料的热分解动力学研究[J]. *功能材料*, 2020,51(11):11152-11158.  
WANG Jianhang, XU Zhiyan, ZHANG Yupeng, et al. Thermal decomposition kinetics of phosphaphenanthrene/epoxy composites[J]. *Journal of Functional Materials*, 2020,51(11):11152-11158.
- [12] QIAN Xiaodong, SONG Lei, HU Yuan, et al. Novel DOPO-based epoxy curing agents[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016,126(3):1339-1348.



**作者简介:** 刘勇 (1984—),男,湖南宁乡人,博士,副教授,主要从事危险化学品道路运输安全、海泡石防火阻燃等方面的研究。E-mail:yliu1@hnust.edu.cn。