第 42 卷第 2 期 高分子材料科学与工程 Vol.42, No.2
2026 年 2 月 POLYMER MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING Feb. 2026

http://pmse.scu.edu.cn

硫酰胺改性阻燃抑烟硅油的制备及性能

张 瑞, 马海红, 周正发, 徐卫兵, 任凤梅

(合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 利用环氧和氨基的反应,以硫酰胺和端环氧硅油(ETSO)为原料,合成了含氮、硫的改性硅油,命名为 SMSO,傅里叶变换红外光谱和核磁共振波谱证实 SMSO 成功合成。采用明火点燃法和锥形量热测试研究了 SMSO 的阻燃抑烟性能。结果表明,硫酰胺与 ETSO 摩尔比为 0.8∶1 时制得的改性硅油 SMSO-4,其火焰高度显著降低,烟释放总量(TSR)与 ETSO 相比降低了 65.6%,热释放总量(THR)降低了 14.4%。采用热重分析、红外-热重联用、热场发射扫描电子显微镜和 X 射线光电子能谱技术分析了其阻燃抑烟机理。结果表明,与 ETSO 相比,SMSO 的热分解速率较慢,燃烧过程中释放出更多的不可燃气体和具有自由基猝灭作用的物质,同时形成了更多的炭层,从而提高了阻燃抑烟效果。

关键词: 硫酰胺;端环氧硅油;阻燃抑烟

中图分类号: TQ324.2^{+}1 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)02-0091-09

硅油是一种有机硅材料,具有挥发性小、不腐蚀金属和抗氧化等特点[1,2],在焊接过程中被用作防溅剂来防止飞溅的残渣附着在焊接材料表面[3]。但硅油本身易燃烧,点燃后会放出大量黑烟,用作防溅剂时,接触到高温的焊接飞渣会产生大量烟雾。在封闭空间内积聚的烟雾会对焊接操作人员的安全和焊接工艺产生一定的不良影响,故需要对硅油进行阻燃抑烟改性。

目前,普遍采用在现有材料中直接添加阻燃成分的方法来达到减烟、防火的目的[4,5],物理添加阻燃成分的方式高效简单,但阻燃剂可能会发生团聚和沉积[6]。在硅油中直接添加阻燃成分还会使液态基体失去流动性,从而不满足某些实际应用需求,如用于焊接用防溅剂。

反应型阻燃剂可通过化学反应与基体结合,更稳定地存在于基体中,减少对基体性质的影响[7],但此类反应往往需要较为复杂的合成步骤,且伴随小分子副产物的产生。已有的研究结果表明,氮与硫元素均可在燃烧中产生不可燃气体,发挥气相阻燃作用[8],含硫物质在高温下还会分解释放出 H_2SO_4 等强酸,促进脱水炭化[9],在凝聚相发挥较好的阻燃作用。目前,对硅油的阻燃改性大多是引入单一元素,Shi 等[10]利用含氮量较高的双氰胺改性硅油,锥型量热测试结果显示其具有较好的抑烟效果。本文使用含氮元素与硫的硫酰胺作为改性剂,通过胺基与环氧无小分子副产物的开环反应,对硅油结构进行本征改性,探究了硫酰胺改性硅油在凝聚相和气相的阻燃机理。与未改性硅油相比,所制备的改性硅油最大分解速率温度提高了 30 ℃以上,烟释放总量最大可以降低 65.6%,热释放总量降低 14.4%,其热稳定性和阻燃抑烟性能得到极大地提高,有望用作焊接领域所需的防溅剂。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

端环氧硅油(ETSO):$\overline{M}$=362, 96%,铭怡硅业股

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0020
收稿日期: 2025-01-07
基金项目: 安徽省科技重大专项(17030901076)
通讯联系人: 马海红, 主要从事功能高分子材料制备研究, E-mail: mahaihong@hfut.edu.cn

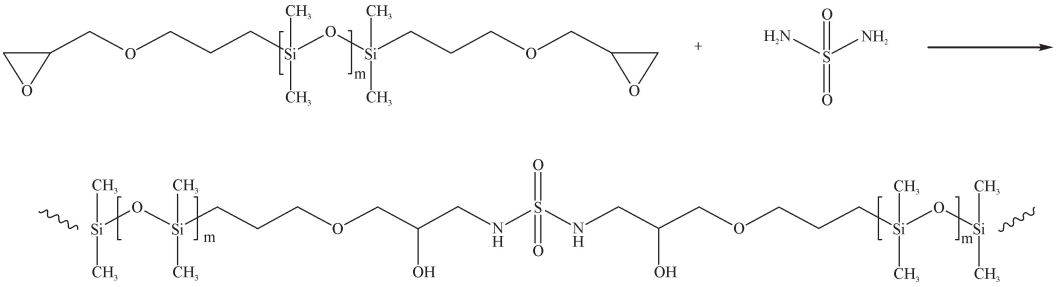


Fig. 1 Synthesis route of SMSO

Tab. 1 Formulation of SMSO

Samples	*m*(ETSO)/g	*m*(Sulfamide)/g	*m*(DMP-30)/g
SMSO-1	30	1.543	0.0315
SMSO-2	30	3.086	0.0331
SMSO-3	30	4.629	0.0346
SMSO-4	30	6.172	0.0362

份有限公司;硫酰胺(99%)、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30,95%)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF,分析纯):阿拉丁试剂有限公司(中国);去离子水:自制。

热重分析仪:TGA8000,美国珀金埃尔默股份有限公司;傅里叶变换红外光谱仪:Nicolet67,美国尼高力仪器有限公司;超导核磁共振波谱仪:VNMRS600,美国安捷伦科技公司;锥形量热仪:苏州泰思泰克科技有限公司;热重-红外联用仪:STA2500,德国耐驰仪器制造有限公司;热场发射扫描电子显微镜:Gemini 500,德国卡尔蔡司集团;X 射线光电子能谱仪:ESCALAB250Xi,美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 制备方法

在烧杯中将硫酰胺单体溶于 100 mL DMF,再加入一定量的 ETSO,搅拌溶解充分后加入 DMP-30 作催化剂,质量为硫酰胺和 ETSO 总质量的 0.1%。置于三颈烧瓶中,在氮气氛围下升温至 135 ℃,反应 6 h。将反应后的溶液倒入 500 mL 去离子水中,保温 40 ℃,静置 3 h,油状物会沉积在底部,倒出离子水,除去催化剂和溶剂,再将产物倒入离心管,加入去离子水摇匀后进行离心(转速为 2000 r/min),离心完成倒出上层去离子水,进一步除去未反应的单体,重复洗涤 3 次后于 85 ℃真空干燥 3 h 得到最终产物,命名为 SMSO。SMSO 的合成反应方程式如 Fig.1 所示。本文合成了 4 种不同的 SMSO,根据硫酰胺和 ETSO 的摩尔比 0.2∶1,0.4∶1,0.6∶1 和 0.8∶1,分别命名为 SMSO-1,SMSO-2,SMSO-3 和 SMSO-4,配方如 Tab.1 所示。

1.3 测试与表征

1.3.1 *热失重分析*:采用热重分析仪进行分析。在空气气氛下,设定升温速率为 20 ℃/min,升温范围为 30~800 ℃。

1.3.2 *红外光谱分析*:采用傅里叶变换红外光谱仪进行分析。通过溴化钾压片法,设定分辨率为 4 cm^{-1},扫描次数为 32 次,扫描范围为 500 ~ 4000 cm^{-1}。

1.3.3 *核磁共振波谱分析*:采用超导核磁共振波谱仪。以氘代氯仿为溶剂,测常规氢谱。

1.3.4 *燃烧测试*:将相同量的样品滴入药匙中,用打火机点燃后拍下火焰最大时的图片,观察样品燃烧情况。

1.3.5 *锥形量热测试*:采用锥形量热仪,将样品放在 100 mm×100 mm 的刚玉坩埚中,样品深度为 5 mm,在标准 ISO5660—1∶2002 下,外部热通量为 35 kW/m^2,测试样品的燃烧性能。

1.3.6　热重-红外联用分析:采用热重-红外联用仪,在空气氛下,设定升温速率为 20 ℃/min,升温范围为 30~600 ℃,扫描范围为 500~4000 cm^{-1},对样品的热解气体进行表征。

1.3.7　微观形貌表征:采用热场发射扫描电子显微镜,将样品喷金处理后,测试锥形量热测试后残炭的表面微观形貌及元素分布。

1.3.8　X 射线光电子能谱分析:采用 X 射线光电子能谱仪检测锥形量热测试后残炭表面的元素组成。

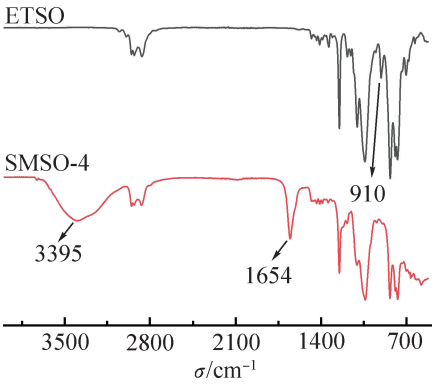


Fig. 2　FT-IR spectra of ETSO and SMSO-4

2　结果与讨论

2.1　SMSO 的结构表征

Fig.2 为 ETSO 和 SMSO-4 的红外光谱图。由图可知, ETSO 中, 910 cm^{-1} 对应环氧基团的吸收峰[11],在 SMSO-4 中基本消失。在 SMSO-4 中,出现了一些新峰,3395 cm^{-1} 处的宽峰归属于 —NH 和 —OH 的伸缩振动峰,1654 cm^{-1} 的峰归属于 S—N 的吸收峰。以上结果证明,ETSO 与硫酰胺发生了伯胺和环氧的开环反应,成功合成 SMSO-4。

Fig.3 是 ETSO 和 SMSO-4 的 ^{1}H-NMR 谱图。在 Fig.3(a)中,δ2.50 处的信号峰对应 DMSO,ETSO 结构式标记的 a 为环氧基团上的亚甲基,对应着 δ3.06 和 δ2.79 处的信号峰。结构式标记的 b 为环氧基团上的次甲基,对应 δ3.26 处的信号峰,结构式中标记的 c 为与 C—O 相连的亚甲基,对应 δ3.67 和 δ3.41 处的信号峰。对比 Fig.3(a)的核磁谱图,Fig.3(b)的 SMSO-4 样品中显现新的化学位移, SMSO-4 中与 C—O 相连的亚甲基的特征峰移至 δ3.64 和 δ3.42 处(对应于 c′处),环氧基团上次甲基的特征峰移至 δ3.20 处(对应于 b′处),环氧基团上亚甲基的特征峰移至 δ3.05 和 δ2.70 处(对应于 a′处)。此外,在 d (δ7.93)处出现了新的特征峰,对应 ETSO 上环氧基团与硫酰胺上伯氨基团反应生成的 C(NH)S 特征峰。核磁共振氢谱和红外光谱的结果表明, SMSO 通过 ETSO 中的环氧基团与硫酰胺中的伯氨基团之间的反应成功合成。

2.2　热稳定性

Fig.4 是 ETSO 和 SMSO 在空气氛围中的热失重(a)及失重速率曲线(b),热分解数据见 Tab.2。由图可知,在 200 ℃之前,ETSO 热分解缓慢,ETSO 的

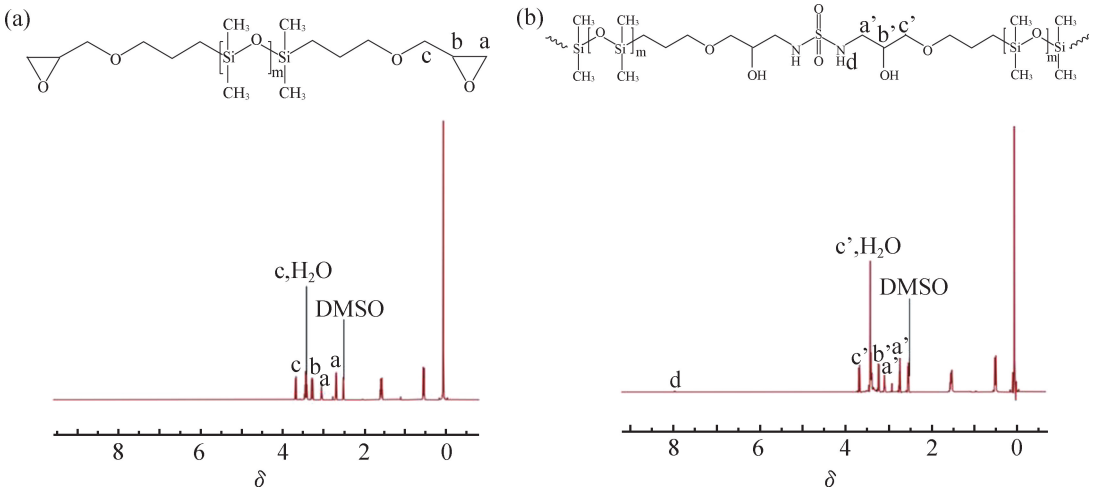


Fig. 3　^{1}H-NMR spectra of (a) ETSO and (b) SMSO-4

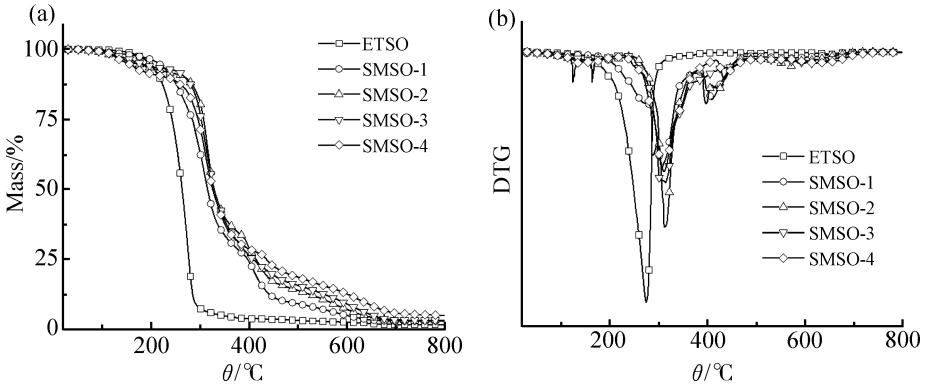


Fig. 4 (a) TGA and (b) DTG curves of ETSO and SMSO

Tab. 2 TGA and DTG data for ETSO and SMSO

Samples	$T_{5\%}$/℃	T_{Max}/℃	R_{Max}/(%·℃$^{-1}$)	Char residues at 800 ℃/%
ETSO	196	272	2	1.73
SMSO-1	220	300	0.72	2.99
SMSO-2	178	314	0.80	3.3
SMSO-3	167	316	0.82	3.2
SMSO-4	153	318	0.75	5.1

5%热失重温度($T_{5\%}$)为 196 ℃,在 200~300 ℃之间,ETSO 的质量急剧减少,最大热失重速率(R_{Max})为 2%/℃。经硫酰胺改性的 SMSO 的 $T_{5\%}$ 比 ETSO 的小,主要原因是合成的 SMSO 含有 C—N 键,其键能较低,热稳定性较差,容易分解。随着硫酰胺与 ETSO 摩尔比的增加,$T_{5\%}$ 逐渐下降,SMSO-4 的 $T_{5\%}$ 最低,为 153 ℃。引入硫酰胺后,SMSO 的最大分解速率温度(T_{Max})均高于 ETSO,且 SMSO 的 R_{Max} 相较于 ETSO 下降了约 61%,这说明硫酰胺的引入能有效提高硅油在高温时的热稳定性。800 ℃时,ETSO 的残炭量为 1.73%,SMSO 的残炭量均高于 ETSO,且随着硫酰胺与 ETSO 摩尔比增大,残炭量逐渐升高,SMSO-4 的残炭量为 5.1%。这可能是因为 SMSO 中的硫元素基团在热分解过程中会产生硫的含氧酸,促使基材脱水成炭。

2.3 阻燃抑烟性能

为了直观地观察硫酰胺对 ETSO 改性前后燃烧行为的影响,采取明火点燃的方法对不同摩尔比的 SMSO 进行测试。将相同体积的 SMSO 滴入燃烧匙中,再用明火点燃,其火焰情况及烟雾释放情况如 Fig.5 所示。ETSO 点燃后,燃烧剧烈,火焰高度最大达到 14 cm,且有大量黑色烟雾产生。随着硫酰胺与

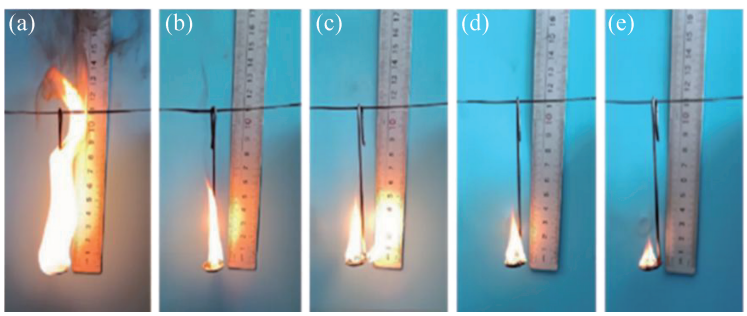


Fig. 5 Photos of combustion of (a) ETSO and (b) SMSO-1, (c) SMSO-2, (d) SMSO-3 and (e) SMSO-4

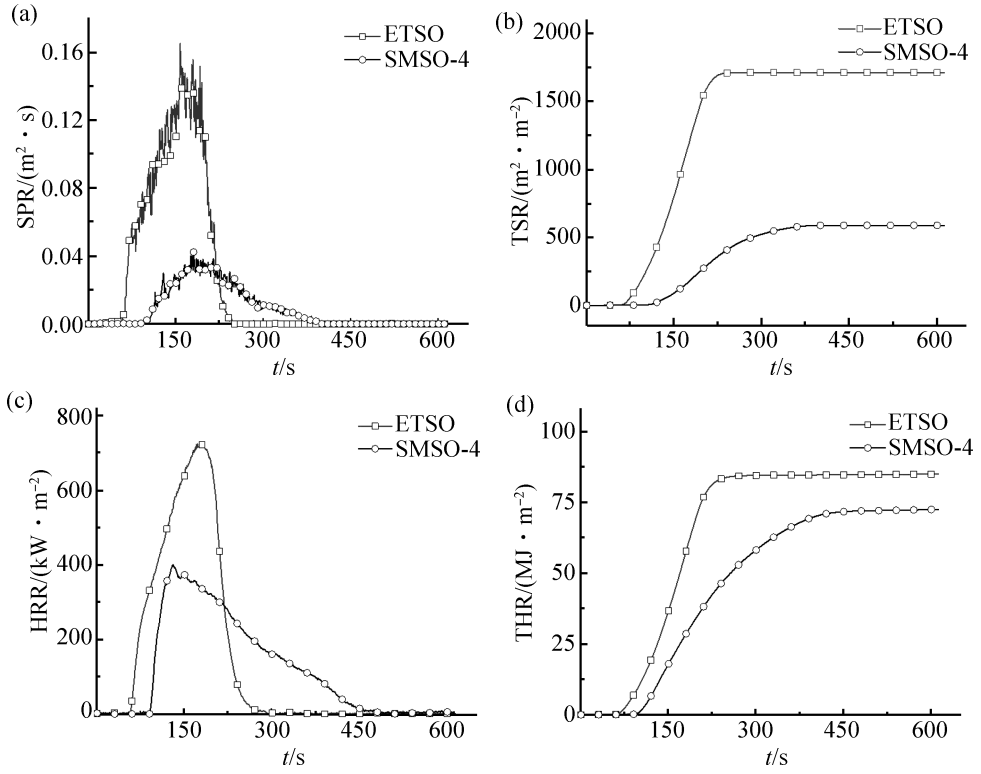


Fig. 6　CCT curves of ETSO and SMSO-4: (a) smoke production rate; (b) total smoke release; (c) heat release rate; (d) total heat release

ETSO 摩尔比增加,SMSO 的最大火焰高度逐渐降低,烟雾的释放量逐渐减少。硫酰胺与 ETSO 摩尔比为 0.8∶1 的 SMSO-4,其点燃后火焰的最大高度仅有 3 cm。在抑烟方面,除了摩尔比为 0.2∶1 的 SMSO-1 有少量黑色烟雾产生外,其他改性后的硅油没有明显的黑色烟雾产生,只有少量白烟。硫酰胺改性的 SMSO 具备一定的阻燃抑烟性能。

通过锥形量热测试进一步研究 ETSO 和 SMSO-4 的阻燃抑烟性能,该测试提供了产烟速率(SPR)、总产烟量(TSR)、放热速率(HRR)和总放热量(THR)等相关燃烧参数,结果如 Fig.6 所示。从 Fig.6(a, b)可以看出,在 ETSO 中加入硫酰胺后,SPR 和 TSR 均明显减小,ETSO 的 TSR 为 1712.52 m^2/m^2,SMSO-4 的 TSR 仅为 589.51 m^2/m^2,降低了 65.58%。峰值放热速率(pk-HRR)指的是 HRR 的最大值,数值越高,表明材料的热解速度越快,从而加速火焰传播。从 Fig.6(c, d)可以看出,SMSO-4 的 pk-HRR 和 THR 均明显降低。ETSO 的 pk-HRR 为 727.81 kW/m^2,SMSO-4 的 pk-HRR 仅为 400.93 kW/m^2,降低了 44.91%。ETSO 的 THR 为 84.92 MJ/m^2,SMSO-4 的 THR 为 72.66 MJ/m^2,降低了 14.44%。由以上分析可知,制备的 SMSO-4 较 ETSO 具有良好的阻燃抑烟性能。

2.4　阻燃抑烟机理

明火点燃和锥型量热测试结果表明,SMSO-4 的阻燃抑烟性能最好,为了探究其气相阻燃机理,通过用热重-红外联用仪对 ETSO 和 SMSO-4 热分解过程中产生的气体进行分析,结果如 Fig.7 所示。

Fig.7(a, b)为 ETSO 和 SMSO-4 的三维 TG-IR 谱图。可以看出,SMSO-4 有一些新的峰出现,与 ETSO 相同位置的峰出现时间明显延迟,这与热重数据相符合,说明硫酰胺的引入降低了 SMSO 的分解速率,提高了 SMSO 的分解温度。Fig.7(c, d)分别为 ETSO 和 SMSO-4 在不同温度的裂解产物吸光度曲线,由 Fig.7(c)可以看出,ETSO 在空气氛围中分解主要发生在 200~300 ℃,在此温度范围内,气相中出现了 C—H (2974 cm^{-1}), C═O (1752 cm^{-1}), CO_2 (2655 cm^{-1}) 和 H_2O (3758 cm^{-1}) 的吸收峰,说明 ETSO 在空气中分解有侧链烷基的脱落并氧化形成 CO_2 和 H_2O; Si—O—Si (1030 cm^{-1}) 和 Si—CH_3 (1259 cm^{-1} 和 844 cm^{-1}) 吸收峰的出现,说明 ETSO 在热分解中存在主链中硅氧键的断裂重排。由 Fig.7(d)

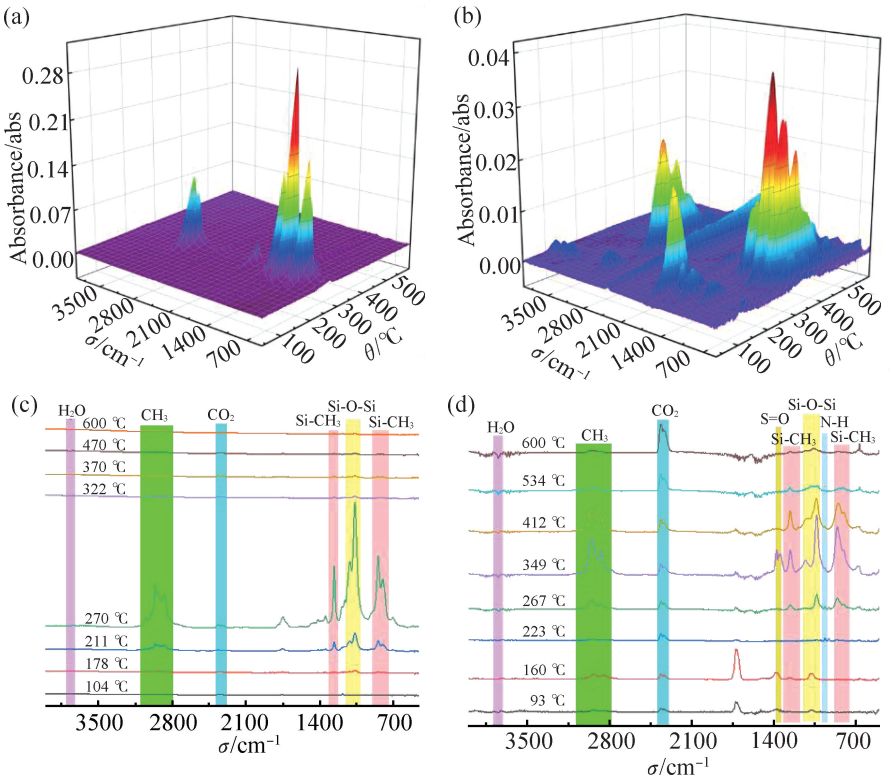


Fig. 7 TG-IR 3D spectra of (a) ETSO and (b) SMSO-4; TG-IR spectra of (c) ETSO and (d) SMSO-4

可以看出,SMSO-4 在空气氛围中的分解主要发生在 240~410 ℃,说明硫酰胺的引入一定程度上减缓了硅油主链的分解重排,且过程中出现了新的吸收峰:N—H (953 cm^{-1}) 和 S═O (1373 cm^{-1}) 吸收峰[12],N—H 吸收峰的出现说明氮元素在燃烧过程中生成了不可燃气体氨气,稀释了可燃气体并带走热量,从而在气相发挥阻燃作用;含硫自由基 SO·和 SO_2·可以捕捉燃烧中形成的 H·,O·或 HO·等活性自由基,发生自由基猝灭,从而在气相中起阻燃作用。当温度达到 534 ℃时,Si—O 和 Si—CH_3 的吸收峰基本消失,说明 SMSO-4 在此时基本停止分解,而 CO_2 的吸收峰变得很强,这可能是残炭持续燃烧氧化所产生的。

为了进一步探讨 SMSO 在凝聚相的阻燃抑烟机理,对 SMSO-1 和 SMSO-4 锥量测试后残炭的宏观形貌和微观形貌进行分析,结果如 Fig.8 所示。由 Fig.8(a)和 Fig.8(b)可知,SMSO-1 基本无残炭,仅在四周存在少量残炭;而硫酰胺含量较高的 SMSO-4,其炭层较多,这与热重数据相符合。然而,从残炭俯视图可见,残炭并不连续,存在很多空洞,说明硫酰胺虽然具有一定的成炭能力,但能力有限,持续燃烧产生的气体会冲破炭层。为了直观的观察改性硅油锥形量热测试后残炭的微观形貌变化,利用热场发射扫描电子显微镜对 SMSO-1 和 SMSO-4 的残炭表面进行观察,从 Fig.8(c, e)可以看出,SMSO-1 残炭的表面存在较多气孔,且空隙较大,结构疏松不致密,这对于可燃性气体、热量和烟雾的阻隔是不利的。从 Fig.8(d, f)可以看出,随着硫酰胺含量增加,SMSO-4 残炭表面变得连续致密,此时的炭层对烟雾释放起到了一定的阻隔作用,能够有效抑制硅油的分解以及分解产物的逸出,并同时增强抑烟效果。结果表明,硫酰胺引入量的增多可以使硅油燃烧后产生的凝聚相更加连续致密,通过凝聚相阻燃作用发挥阻燃抑烟效果,使 SMSO 在高温时具有更好的热稳定性。结合锥型量热测试的结果及残炭照片可以分析出,在持续燃烧过程中,炭层会被烧穿,所以会在燃烧后期持续放出少量烟雾和热量。

为了进一步探究凝聚相阻燃作用,利用 XPS 对

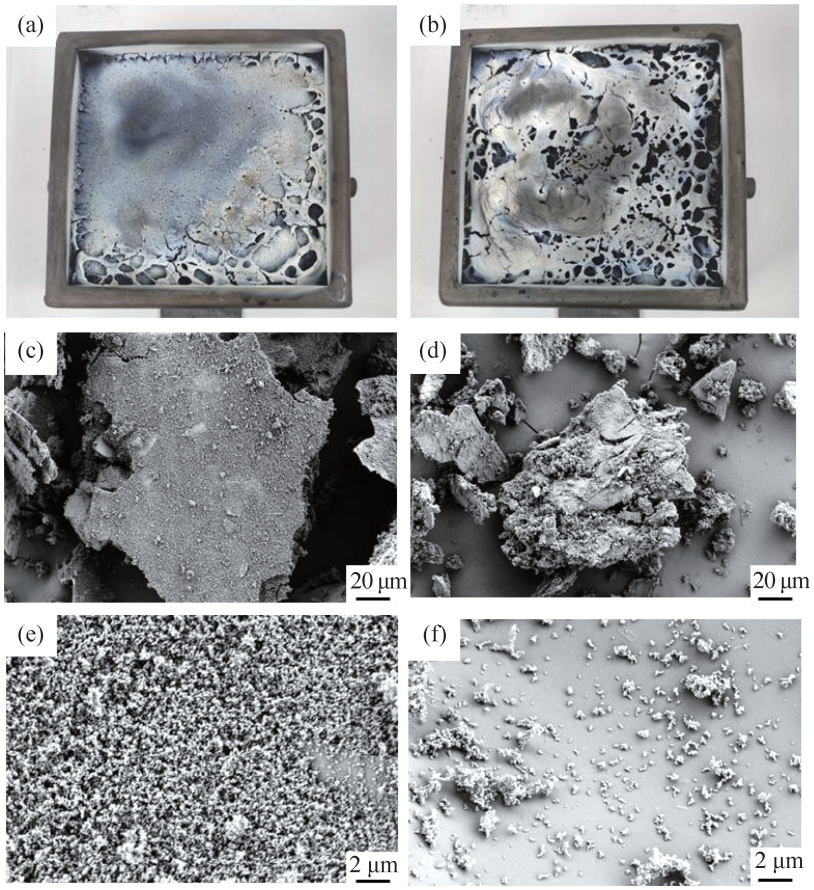


Fig. 8　Digital photographs of char residues from (a) SMSO-1 and (b) SMSO-4 after the CONE test; SEM images of char residues from (c, e) SMSO-1 and (d, f) SMSO-4 after the CONE test

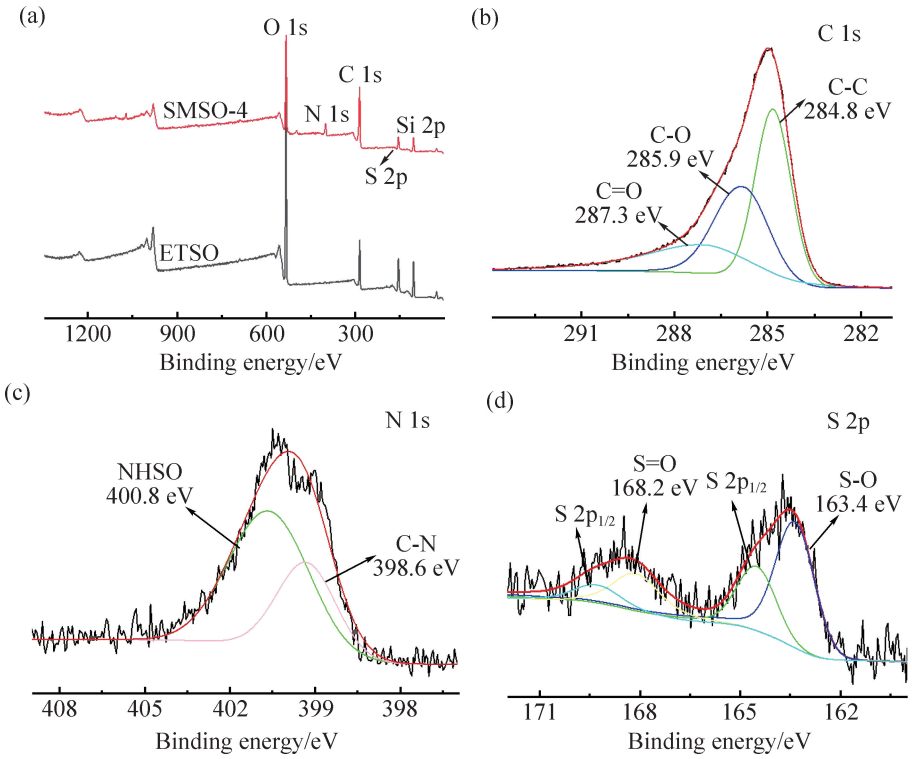


Fig. 9　(a) XPS full survey spectra of SMSO-4 and ETSO; XPS spectra of (b) C 1s, (c) N 1s, (d) S 2p for the carbon residue of SMSO-4

SMSO-4 残炭表面元素含量和化学键类型进行分析。Fig.9(a)是 ETSO 和 SMSO-4 的全谱图。由图可知，ETSO 残炭中仅存在氧、碳和硅元素，而 SMSO-4 燃烧后的残炭中除了上述 3 种元素，还有氮和硫元素。Fig.9(b～d)分别是 SMSO-4 残炭的 C 1s，O 1s 和 S 2p 高分辨率 XPS 谱图，由 Fig.9(b)可知，SMSO 的残炭中除了 C—C（284.8 eV）和 C—O（285.9 eV），还存在高氧化态的 C═O（287.3 eV），说明 SMSO-4 残炭中 C 的氧化程度较高。在 Fig.9(c)的残炭 N 1s 谱图中，主要存在 N—S—O（400.8 eV）和 C—N（398.6 eV）吸收峰，表明 S 和 N 不仅在气相发挥阻燃抑烟作用，也参与残炭的组成。Fig.9(d)S 2p 谱图中，163.4 eV 处 S $2p_{3/2}$ 吸收峰进一步表明炭层中存在 S—O，168.2 eV 处的 S $2p_{3/2}$ 说明 S 被氧化成硫酸类物质，可以在燃烧过程促进脱水成炭。

由以上结果分析可知，SMSO 在气相和凝固相均存在阻燃抑烟作用。N 元素在热解时产生的不可燃气体稀释了可燃气体和氧气的浓度，硫元素产生的的 SO·和 SO_2·可以捕捉燃烧链式反应中的活性自由基，发生自由基猝灭，且硫元素在凝聚相形成的硫酸类物质具有促进成炭的作用，形成的炭层减缓了硅油主链 Si—O 的重排分解，阻碍了烟气的释放，提高了阻燃抑烟性能。

3 结论

本文以硫酰胺和 ETSO 为原料，通过氨基与环氧基的反应，合成了一系列阻燃抑烟硅油 SMSO。采用 FT-IR 和 NMR 对其结构进行表征，证明 SMSO 成功合成。明火点燃和锥型量热测试表明，当硫酰胺与 ETSO 摩尔比为 0.8∶1 时，制备的 SMSO-4 阻燃抑烟性能最优，其 TSR 与 ETSO 相比降低了 65.6%，THR 降低了 14.4%。TGA 结果表明，所制备 SMSO 在高温时均具有较慢的分解速率。阻燃抑烟机理研究表明，SMSO 中的 N 分解产生的 NH_3 稀释了可燃气体和氧气的浓度，S 在气相中产生的含硫自由基 SO·和 SO_2·可以捕捉燃烧产生的活性自由基，从而抑制燃烧；在凝聚相中，S 形成的硫酸促进了残炭的形成，同时减缓了硅油主链 Si—O 的重排分解。本文同时引入氮元素和硫元素对端环氧硅油进行结构改性，制备了阻燃抑烟性能优异的改性硅油，拓展了硅油的应用领域，并为其它材料的本征阻燃改性提供了一定的实验和理论依据。

参考文献：

[1] Eduok U, Faye O, Szpunar J. Recent developments and applications of protective silicone coatings: a review of PDMS functional materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 111: 124-163.

[2] Riehle N, GoTz T, Kandelbauer A, *et al*. Data on the synthesis and mechanical characterization of polysiloxane-based urea-elastomers prepared from amino-terminated polydimethylsiloxanes and polydimethyl-methyl-phenyl-siloxane-copolymers[J]. Data in Brief, 2018, 18: 1784-1794.

[3] 孙振宁，陈贻炽，钱建刚，等. 环氧改性有机硅聚合物的制备及其在发动机叶片防飞溅涂层中的应用[J]. 航空制造技术，2019，62(20)：50-54.
Sun Z N, Chen Y C, Qian J G, *et al*. Synthesis of a silicone polymer modified by epoxy resin and its application as anti-spatter coating of engine blade for laser drilling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(20): 50-54.

[4] Jeng R J, Wang J R, Lin J J, *et al*. Flame retardant epoxy polymers using phosphorus - containing polyalkylene amines as curing agents[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 82: 3526-3538.

[5] Deng J, Kang F R, Xiao Y, *et al*. Effects of platinum compounds/superfine aluminum hydroxide/ultrafine calcium carbonate on the flame retardation and smoke suppression of silicone foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137: 47679.

[6] Rad E R, Vahabi H, De A A R, *et al*. Bio-epoxy resins with inherent flame retardancy[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 135: 608-612.

[7] 曹东风，刘江波，冀运东，等. 硅磷双改性环氧树脂的合成及阻燃性能[J]. 高分子材料科学与工程，2023，39(10)：40-50.
Cao D F, Liu J B, Ji Y D, *et al*. Synthesis and flame retardancy of silicon and phosphorus modified epoxy resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(10): 40-50.

[8] Rupp H, Ullmann J, Shinde K S, *et al*. Thiazole-based flame retardant for polyamide vs. a sulfur-free flame retardant with similar phosphorus and nitrogen content[J]. Materials Chemistry and Physics, 2025, 329: 130043.

[9] Wen W, Guo J, Zhao X, *et al*. Synthesis of an efficient S/N-based flame retardant and its application in polycarbonate[J]. Polymers, 2018, 10: 441.

[10] Shi X, Xu W B, Zhou Z F, *et al*. Preparation and properties of smoke suppressive silicone oil modified by dicyandiamide[J].

Silicon, 2023, 15: 4325-4334.

[11] Pan K X, Zeng X R, Li H Q, *et al*. Synthesis of phenyl silicone resin with epoxy and acrylate group and its adhesion enhancement for addition-cure silicone encapsulant with high refractive index[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016, 30: 2699-2709.

[12] 胥秋, 侯泽明, 宦宣英, 等. 双基阻燃剂 DOPS-TEAIC 的合成及阻燃环氧树脂的性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(9): 74-85.
Xu Q, Hou Z M, Huan X Y, *et al*. Synthesis of flame retardant DOPS-TEAIC with double functional groups and its properties of flame retardant epoxy resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(9): 74-85.

Preparation and Properties of Flame Retardant and Smoke Suppressive Silicone Oil Modified with Sulfamide

Rui Zhang, Haihong Ma, Zhengfa Zhou, Weibing Xu, Fengmei Ren

(*School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

ABSTRACT: Modified silicone oil containing nitrogen and sulfur, which was named SMSO, was synthesized with sulfamide and epoxy-terminated silicone oil (ETSO) by the reaction between epoxy and amine groups. Fourier infrared spectroscopy (FT-IR) and nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) confirmed the successful synthesis of SMSO. The flame retardant and smoke suppression properties of SMSO were investigated by open flame ignition method and cone calorimetry test (CCT). The results show that when the mole ratio of sulfamide and ETSO equals to 0.8∶1, the flame height of the as-prepared modified silicone oil SMSO-4 is significantly reduced, and compared with ETSO, its total smoke release (TSR) and total heat release (THR) are reduced by 65.6% and 14.4%, respectively. Thermogravimetric analysis (TGA), infrared thermogravimetric coupling (TG-IR), thermal field emission scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) techniques were used to analyze the flame retardant and smoke suppressive mechanisms. The results show that compared with ETSO, SMSO has a slower thermal decomposition rate, releases more non-inflammable gases and substances with free radical quenching effects during the combustion process, and forms more carbon layers, improving its flame retardant and smoke suppression effects.

Keywords: sulfamide; epoxy-terminated silicone oil; flame retardant and smoke suppression