高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

研究论文 / Research Article DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26331

基于乙烯基超支化聚硅氧烷改性耐烧蚀洁净硅橡胶复合材料

蒋 健[1] 王 琪[2] 程帅清[1] 张 帆[2] 张崇耿[2] 胡 峰[2] 袭 锴[1*]

([1]南京大学 高性能高分子材料与技术教育部重点实验室 化学学院 南京 210023)
([2]西安长峰机电研究所 西安 710065)

摘 要 固体火箭发动机内绝热层用硅橡胶材料在高温燃气冲刷条件下存在力学性能不足、烧蚀炭层易剥落及热解产物释放量较大等问题，限制了其在洁净化、长寿命发动机中的应用。本研究以乙烯基液体硅橡胶为基体，以乙烯基超支化聚硅氧烷(Vi-HPSi)作为改性增强剂，复配耐烧蚀填料，制备出兼具高强度与洁净的耐烧蚀硅橡胶复合材料，并对Vi-HPSi改性后材料的力学性能、热稳定性、耐烧蚀能力及热解挥发物及烟气释放进行了表征与探究。测试结果显示，引入Vi-HPSi后可增强硅橡胶内部交联网络结构，材料拉伸强度从2.04 MPa提升至4.20 MPa以上，断裂伸长率和硬度也相应提升。材料在1000 °C温度下的残余质量由45.93%提升至近78%，当Vi-HPSi添加量为30 phr时，材料线烧蚀率从0.165 mm/s降至0.101 mm/s，质量烧蚀率由0.067 g/s降至0.039 g/s。结合锥形量热与热重红外联用测试(TG-IR)可以得到，Vi-HPSi可有效抑制体系热量释放、烟气产生以及热解挥发物析出；材料热分解阶段红外透过率最低值由25%左右提升至75%，热解挥发物释放的抑制作用优异。作用机理为，Vi-HPSi在提升了体系交联密度的同时，促使了材料在高温下生成致密且结构稳定的陶瓷化炭层，以此实现力学、耐烧蚀与热解挥发物释放的抑制多项性能协同优化。该复合材料在航空航天发动机洁净绝热层领域具备良好的应用潜力。

关键词 硅橡胶；超支化聚硅氧烷；耐烧蚀；热解挥发物；洁净绝热材料

Vinyl Hyperbranched Polysiloxane-modified Clean Silicone Rubber Composites with Enhanced Ablation Resistance

Jian Jiang[1], Qi Wang[2], Shuai-qing Cheng[1], Fan Zhang[2], Chong-geng Zhang[2], Feng Hu[2], Kai Xi[1*]

([1] *Key Laboratory of High Performance Polymer Materials and Technology of Ministry of Education, School of Chemistry, Nanjing University, Nanjing 210023*)
([2] *Xi'an Changfeng Electromechanical Research Institute, Xi'an 710065*)

Abstract Silicone rubber materials used for internal insulation layers of solid rocket motors suffer from insufficient mechanical properties, easy spalling of ablative char layers, and large release of pyrolysis products under high-temperature gas scouring conditions, which limit their application in clean and long-life motors. In this work, vinyl liquid silicone rubber was adopted as the matrix, vinyl hyperbranched polysiloxane (Vi-HPSi) was used as the modification and reinforcing agent, and ablation-resistant fillers were compounded to prepare ablation-resistant silicone rubber composites with high strength and low outgassing. The mechanical properties, thermal stability, ablation resistance, release of pyrolytic volatiles and smoke of Vi-HPSi-modified materials were characterized and investigated. The test results show that the introduction of Vi-HPSi reinforces the internal cross-linked network of silicone rubber. The tensile strength of the material increases from 2.04 MPa to above 4.20 MPa, while the elongation at break and hardness are improved correspondingly. The residual mass of the material at 1000 °C rises from 45.93% to nearly 78%. When the addition amount of Vi-HPSi is 30 phr, the linear ablation rate decreases from 0.165 mm/s to 0.101 mm/s, and the mass ablation rate drops from 0.067 g/s to 0.039 g/s. Combined with cone calorimetry and TG-IR

2026-07-10 收稿, 2026-08-28 录用

* 通信联系人: 袭锴, E-mail: xikai@nju.edu.cn

measurements, Vi-HPSi can effectively suppress heat release, smoke generation and evolution of pyrolytic volatiles. The minimum infrared transmittance during thermal decomposition increases from approximately 25% to 75%, demonstrating excellent inhibition of the release of pyrolytic volatiles. The underlying mechanism is that Vi-HPSi increases the cross-linking density of the system and promotes the formation of dense and structurally stable ceramic-like char layer at high temperature, thus achieving synergistic optimization of mechanical performance, ablation resistance and suppression of pyrolytic volatile release. The as-prepared composite exhibits promising application prospects in clean insulation layers for aerospace motors.

Keywords Silicone rubber; Hyperbranched polysiloxane; Ablation resistance; Pyrolytic volatiles; Clean thermal insulation materials

引用: 蒋健, 王琪, 程帅清, 张帆, 张崇耿, 胡峰, 袭锴. 基于乙烯基超支化聚硅氧烷改性耐烧蚀洁净硅橡胶复合材料. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26331

Citation: Jiang, J.; Wang, Q.; Cheng, S. Q.; Zhang, F.; Zhang, C. G.; Hu, F.; Xi, K. Vinyl hyperbranched polysiloxane-modified clean silicone rubber composites with enhanced ablation resistance. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26331

随着新一代航天飞行器、固体火箭发动机以及高超声速飞行器的发展，飞行环境日趋复杂，热防护系统所承受的热流密度和气流冲刷强度不断提高，对绝热材料的综合性能也提出了更高要求。现代热防护材料不仅需要具备良好的耐高温和抗烧蚀能力，还要在高温分解过程中尽可能减少烟雾、红外及可见光等特征信号的释放，以满足飞行器隐身化和低可探测性的需求。有相关研究提到，随着航空航天装备向高速化和长时服役方向发展，热防护材料正逐渐由单一耐烧蚀向结构功能一体化、低特征信号方向发展[1~3]。

目前应用较多的丁腈橡胶(NBR)、三元乙丙橡胶(EPDM)[4~6]等传统绝热材料虽然具有一定的耐热性能和工艺基础，但在高温烧蚀过程中往往存在烟雾较大、炭层疏松以及抗气流冲刷能力不足等问题，难以满足洁净绝热材料的发展需求[4,7]。相比之下，硅橡胶[8,9]由于分子主链中Si－O键键能较高，在高温条件下更容易形成稳定的无机陶瓷化层，同时具有低烟、耐氧化、耐高低温等特点[10,11]，因此在耐烧蚀材料领域有较大的应用潜力。硅橡胶烧蚀后形成的SiO_2保护层能够有效阻隔热量和氧气向内部传递，对提升材料热稳定性和降低烧蚀速率具有积极作用[2,12]。

但是普通硅橡胶本身也存在一些不足[13,14]，比如力学强度偏低、烧蚀后炭层容易开裂剥落以及高温结构稳定性有限等[15]，这些问题在一定程度上限制了其进一步应用。因此，如何在保持硅橡胶耐高温特性的基础上，提高其力学性能和烧蚀残炭稳定性，成为当前研究的重要方向[16,17]。提高材料交联密度、优化高温残炭结构是提升耐高温复合材料综合性能的重要途径[18]。近年来，超支化聚合物因具有特殊的三维支化结构、多反应活性位点以及较低黏度等特点[19,20]，在耐高温树脂和耐烧蚀复合材料领域受到越来越多关注[21~23]。尤其是超支化聚硅氧烷材料，与硅橡胶具有良好的相容性，可设计的官能团使其能够在固化过程中参与交联网络构建，提高体系交联密度[24]，并有助于形成更加致密的烧蚀炭层。

基于此，本研究以乙烯基硅油为基胶，引入乙烯基超支化聚硅氧烷，并复配多种耐烧蚀填料，制备高强度、低特征信号耐烧蚀硅橡胶复合材料，重点研究超支化结构对材料热稳定性、烧蚀行为及热裂解特征信号释放规律的影响，为洁净绝热耐烧蚀材料的设计与应用提供参考。

1 实验部分

1.1 实验原料

乙烯基硅橡胶(SR-Vi)，购自湖北隆胜四海新材料；乙烯基超支化聚硅氧烷(Vi-HPSi)为实验室自制；六方氮化硼(BN)、氧化锆(ZrO_2)、碳化硅(SiC)，购自山东中冶新材料科技有限公司；空心玻璃微珠(HGMs)，购自深圳市亿拓科技有限公司；短切碳纤维(CF)，购自日本东丽株式会社；含氢硅油(PMHS)，购自湖北隆胜四海新材料股份有限公司；Karstedt铂催化剂(Pt)及1-乙炔环己醇抑制剂(ECH)，购自天津希恩思生化科技有限公司。

1.2 乙烯基超支化聚硅氧烷制备

参考本课题组乙烯基超支化有机硅树脂合成专利[25]，通过可控水解合成了乙烯基超支化聚硅氧烷树脂(Vi-HPSi)。具体合成路线如下：在反应烧瓶中加

入122.6 g甲基三甲氧基硅烷、148.23 g乙烯基三甲氧基硅烷、51.3 g去离子水和2 mL浓盐酸，在室温条件下反应2 h后，升温至70 °C，继续反应5 h；将3.6 g去离子水、2 mL浓盐酸和50 mL乙醇混合搅拌均匀，在60 °C条件下反应2 h，然后加入步骤反应烧瓶中，继续反应2 h；最后将反应完成后的树脂溶液在0.09 MPa，55 °C下旋蒸去除溶剂及小分子单体，得到乙烯基超支化聚硅氧烷树脂。

1.3 样品的制备

以乙烯基硅油为基胶，分别加入0份、20份及30份乙烯基超支化聚硅氧烷，并复配阻燃耐烧蚀填料体系。随后加入含氢硅油、1-乙炔环己醇抑制剂及Karstedt铂催化剂，混合均匀后脱泡处理。

混合均匀后的胶料在10 MPa压力、120 °C条件下热压20 min固化成片，得到不同超支化含量的加成型硅橡胶样品，分别标记为Blank、HPSi-20%、HPSi-30%，对应Si-H/Vi均为2.5。

1.4 测试或表征

力学性能测试采用电子万能试验机测定不同Vi-HPSi含量试样的拉伸应力–应变曲线。硬度测试使用邵氏A硬度计检测产品硬度，按国标规范多点取样测试，统计平均邵氏硬度(HA)。

热导率测试是通过导热系数测试仪测定材料导热性能。热稳定性与热阻隔分析是在N_2气氛下进行热重分析(TGA)，升温速率10 °C/min，测试范围30~1000 °C。

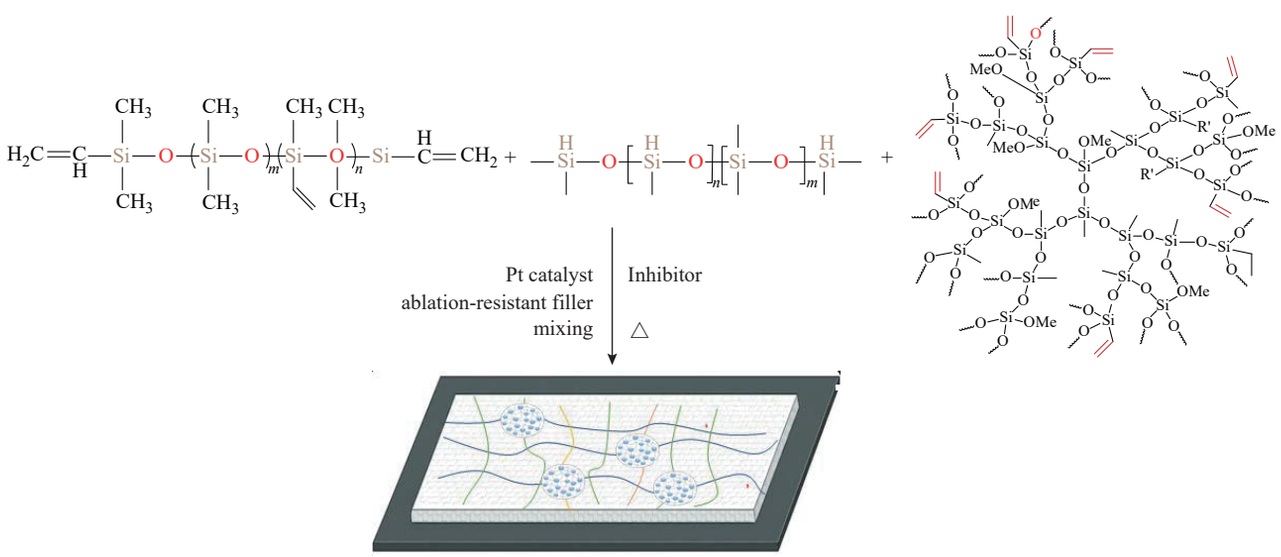

图 1 Vi-HPSi改性加成型硅橡胶制备流程

Fig. 1 Schematic illustration of the preparation process of Vi-HPSi-modified addition-cured silicone rubber

采用低场核磁分析仪VTMR20-010V-1对材料的交联密度进行测试。通过实验室丁烷喷枪模拟(火焰温度约1200 °C，持续氧吹时间120 s)初步评估宏观形貌演变；采用标准氧乙炔火焰烧蚀试验测定线烧蚀率与质量烧蚀率。使用扫描电子显微镜观察烧蚀前后试样微观形貌，分析炭层结构特征。

采用锥形量热仪在50 kW/m^{2}热辐射功率下，对比测试未添加乙烯基超支化聚硅氧烷组别(blank)与添加组别(30 phr)的热释放速率(HRR)、总释放热(THR)及总生烟量(TSP)、单位面积总烟释放量(TSR)、一氧化碳产率(COP)、二氧化碳产率(CO_2P)。

利用热重–红外联用系统(TG-IR)原位监测固态绝热材料在升温动态过程中的气相产物演化规律。同步对比测试未添加乙烯基超支化聚硅氧烷组别(blank)与添加组别(30 phr)改性体系，定量捕捉30~1000 °C区间内挥发特征峰强度的动态响应。

2 结果与讨论

2.1 力学及热性能分析

首先从力学性能角度对添加不同份数乙烯基超支化聚硅氧烷的样品进行拉伸强度及硬度测试。拉伸试样尺寸为2型哑铃试样，测试上升速率为500 mm/min。从图2(a)可以看出，未添加超支化聚硅氧烷的空白对照(blank)的拉伸强度较低，仅有2.04 MPa，随着乙烯基超支化聚硅氧烷的加入，材料拉伸性能明显提高，相较空白对照提升106%，而断裂伸长率的变化并未呈现完全一致的增长趋势，表明Vi-HPSi对材料力学性能的影响主要体现为网络结构增强及承

载能力提升。由结果说明，乙烯基超支化聚硅氧烷的引入在通过提高交联密度的同时，也使材料韧性同步增强[26]。这是由于乙烯基超支化聚硅氧烷的三维拓扑结构提供了丰富的交联位点，使其在基体中能够形成更加均匀的交联网络，从而提升材料整体强度。

同时，从图2(b)中可以看出，随着超支化聚硅氧烷的引入，材料硬度也在逐渐提升，也同样印证了其对交联网络增强的作用。

导热性能测试结果如图2(c)所示，空白组导热系数约为0.32 W/(m·K)，30份添加组约为0.37 W/(m·K)，增幅约为15.6%。导热系数略有提升，可能与体系交联密度提高有关。

TG测试结果表明，未添加超支化聚硅氧烷的空白样品在500 ~ 600 °C区间出现明显的快速失重，如图2(d)所示最终1000 °C下的残余质量约为45.93%。而添加超支化聚硅氧烷后，材料热分解过程明显趋于平缓，高温残余质量显著提高，最终1000 °C下的残余质量提升至约78.00%。可以说明添加超支化聚硅氧烷后，体系的耐温性能显著提升。原因可能是超支化聚硅氧烷高温下促进体系形成了更为稳定的Si—O—Si交联网络[27]，抑制了高温下小分子的挥发，热解过程中发生再次交联反应，显著提升热稳定性。

由低场核磁测试结果图2(f)可见，未添加HPSi

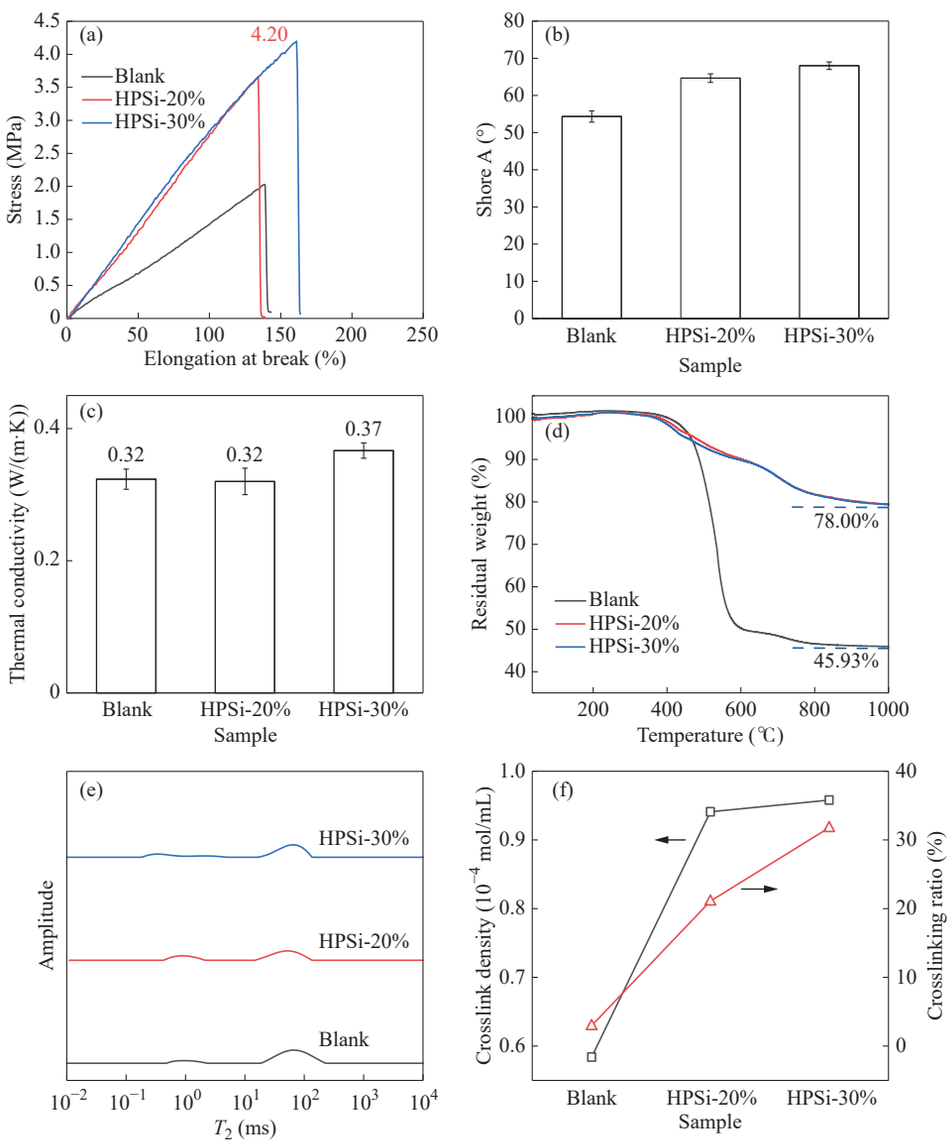

图 2 不同份数Vi-HPSi改性加成型硅橡胶的(a)拉伸应力–应变曲线，(b)邵氏硬度(HA)，(c)热导率曲线，(d) N_2气氛下热失重曲线，(e)低场核磁T_2弛豫谱图，(f)交联密度与交联比率曲线

Fig. 2 (a) Tensile stress–strain curves, (b) Shore A hardness, (c) thermal conductivity, (d) TGA curves under N_2 atmosphere, (e) LF-NMR T_2 relaxation spectra, and (f) crosslink density and crosslinking ratio of addition-curable silicone rubber modified with different loadings of Vi-HPSi

的空白样品交联密度仅为0.584，体系内存在大量运动自由度较高的松散链段。引入Vi-HPSi后，材料交联密度得到明显提升，当添加量为30 phr时，交联密度进一步达到0.958。结合图2(e)T_2弛豫谱图可以看出，随着超支化组分的加入，谱图信号向短T_2方向偏移，代表受限链段的短弛豫组分占比增大，加入Vi-HPSi后，链段运动受限增强、网络约束增强、表观交联密度增加。

2.2 耐烧蚀性能分析

探究过添加超支化聚硅氧烷对体系热力学性能提升的机理后，对添加不同比例超支化聚硅氧烷的硅橡胶固化样品进行了一系列烧蚀性能表征。耐烧蚀也是实际应用过程中较为重要的性能，直接绝对材料是否可以在极端条件下使用。

首先进行了氧乙炔烧蚀测试，实验采用 ⌀ 29.5 mm × 10 mm圆柱试样，氧气流量1.512 m^3/h、乙炔流量1.116 m^3/h，试样表面与喷嘴间距(10±0.2) mm，热流密度 4186.8 kW/m^2 (±10%)，恒定烧蚀时长10 s。借助这种极端测试条件进一步考核并验证改性硅橡胶的高温耐烧蚀与抗气流剥蚀性能。结果如图3(a)，未添加超支化聚硅氧烷的样品线烧蚀率及质量烧蚀率因添加了阻燃填料已处于较优耐烧蚀水准，在该基础上添加乙烯基超支化聚硅氧烷后材料线烧蚀率由0.165 mm/s大幅下降至0.101 mm/s，质量烧蚀率由0.067 g/s同步下降至0.039 g/s。

进一步对丁烷喷枪烧蚀后的样品进行SEM测试，形貌如图3(c)所示，空白样品烧蚀后炭层孔洞多、结构疏松，完整性较差；引入Vi-HPSi改性后，烧蚀生成的炭层致密度明显提升，随着HPSi添加量提高至30 phr，炭层孔隙显著减少，形成连续致密的防护炭层。表明硅橡胶在添加超支化聚硅氧烷后具有良好的耐烧蚀作用，可显著提升硅橡胶极端高温抗烧蚀、抗气流冲刷剥落能力。

2.3 燃烧产物及热解挥发物释放行为分析

针对改性前后硅橡胶的燃烧产物及热解挥发物释放行为分析，首先开展了锥形量热燃烧性能表征，实

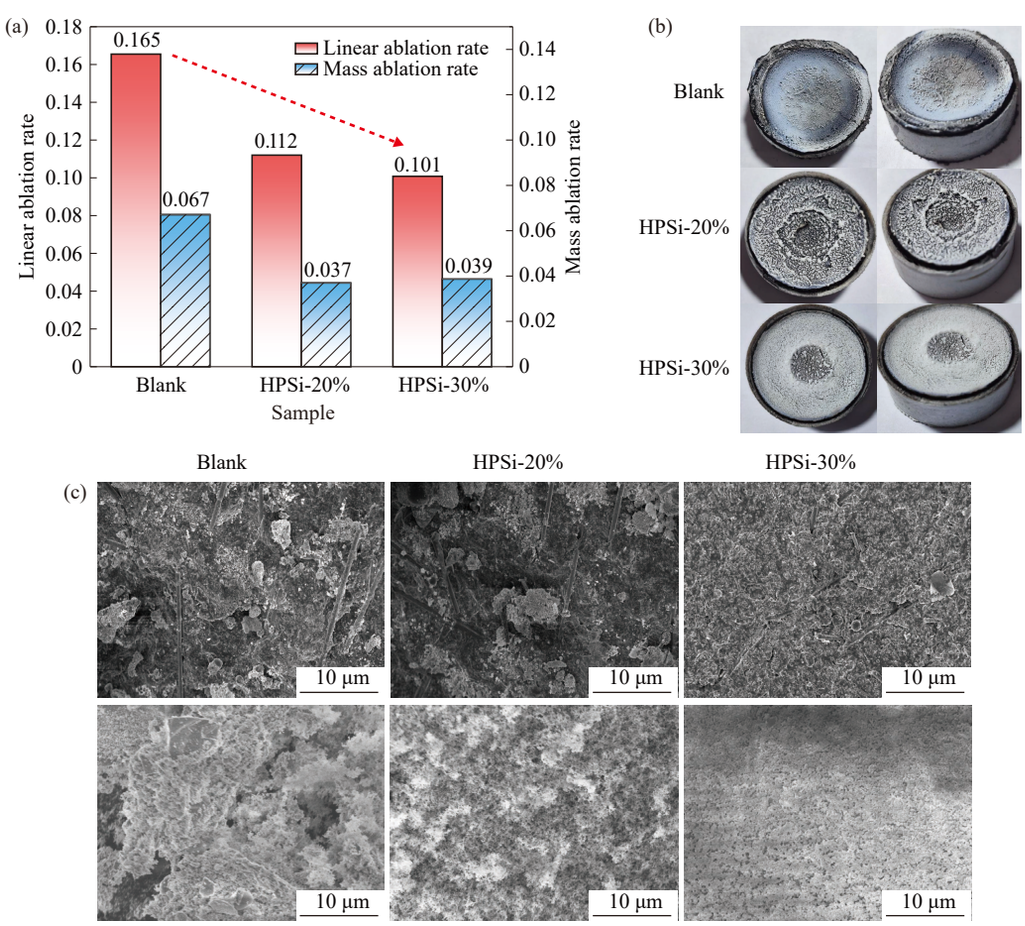

图 3 添加不同份数Vi-HPSi改性硅橡胶的(a)氧乙炔烧蚀测试结果，(b)烧蚀后试样俯视和侧视图，及(c)丁烷喷枪烧蚀前后SEM测试图

Fig. 3 (a) Oxyacetylene ablation test results, (b) top and side views after ablation, and (c) SEM images before and after butane torch ablation of silicone rubber modified with different loadings of Vi-HPSi

验结果如图4所示。空白试样复配阻燃填料后阻燃与抑烟性能已达到较高水平，在此基础上引入30 phr Vi-HPSi后进一步优化了材料的燃烧特性。热释放方面，样品峰值热释放速率由331.6 kW/m^{2}降至242.9 kW/m^2，总放热量由36.9 MJ/m^{2}下降至 27.0 MJ/m^2，热量释放明显被抑制；从产烟上来看，总烟释放量从835.3 m^2/m^{2}降至678.8 m^2/m^2，总烟释放量明显减少。从烟气毒性参数来看，经过改性后的样品CO生成速率(COP)整体低于空白样，同时CO_2生成速率也整体降低，说明Vi-HPSi的引入使CO和CO_2生成速率均有所降低，表

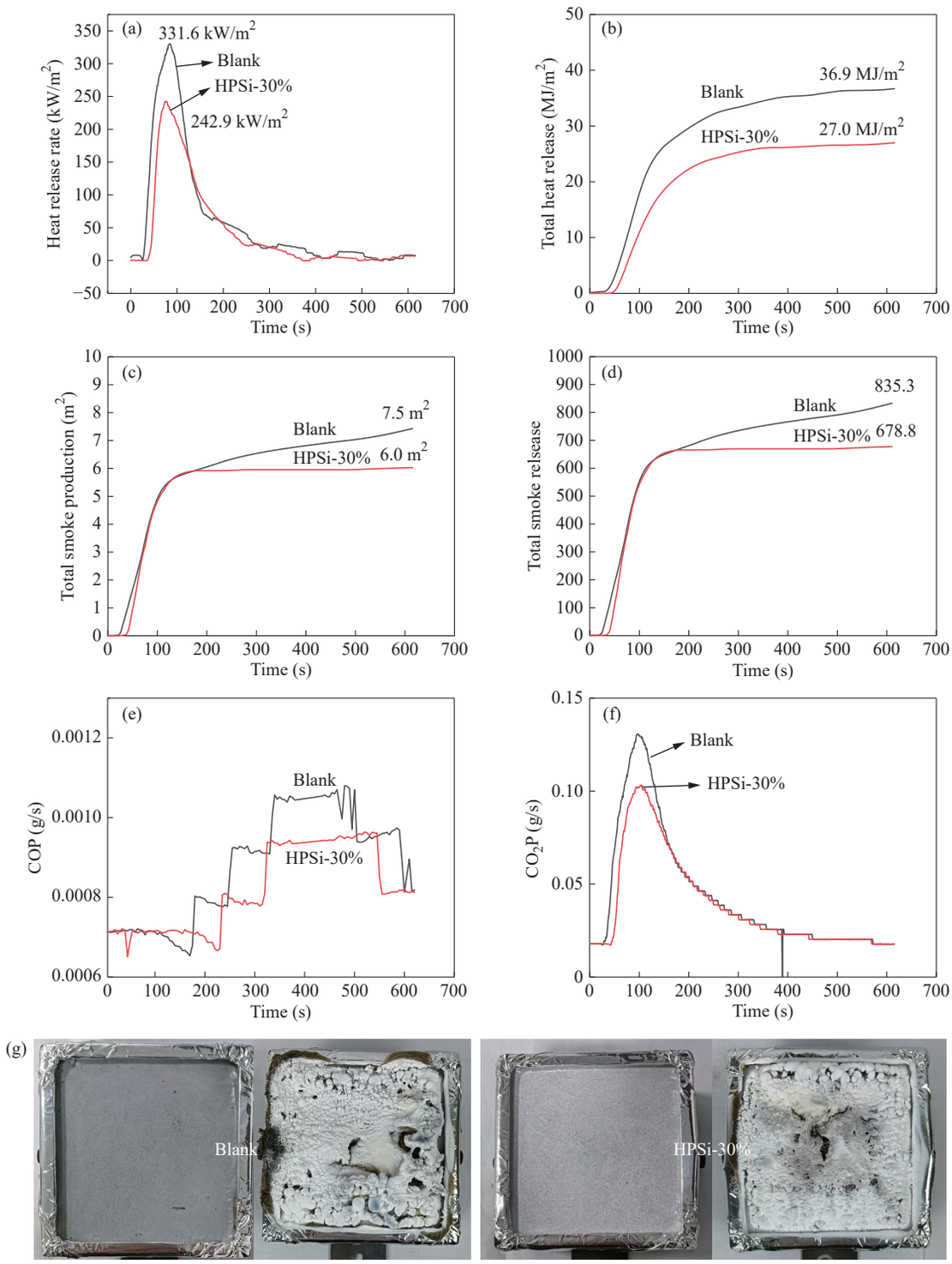

图 4 未添加与添加30 phr Vi-HPSi硅橡胶样品在锥形量热测试的(a) HRR、(b) THR、(c) TSP、(d) TSR、(e) COP、(f) CO_2P曲线，及(g)残余物实物图

Fig. 4 (a) HRR, (b) THR, (c) TSP, (d) TSR, (e) COP, (f) CO_2P curves, and (g) digital photos of residues of silicone rubber samples without and with 30 phr Vi-HPSi in cone calorimeter test

明燃烧过程中气相产物的总体释放受到抑制。结合燃烧后残炭形貌可见，再次印证添加超支化聚硅氧烷后试样成炭结构更加致密完整[28]，致密炭层可阻隔热量与可燃气体的传递，显著协同阻燃、抑烟作用。

为更为直观表征在烧蚀过程中材料的低特征信号，通过TG-IR联用测试观察随着温度的升高材料红外透过率的变化，进而判断在添加超支化聚硅氧烷前后热解挥发物释放的抑制作用影响。

从图5两组样品的三维红外谱图可以看出，热分解过程中均检测到典型硅橡胶裂解产物的特征吸收峰。其中，约1260 cm^{-1}附近的吸收带与Si－CH_3相关振动有关，1000~1100 cm^{-1}区域主要对应Si－O－Si骨架振动，780~810 cm^{-1} 特征吸收峰归属于Si－$(CH_3)_2$基团的 Si－C 伸缩与甲基摇摆振动，3050~3060 cm^{-1}左右出现的弱吸收峰与不饱和基团(＝CH)裂解产物有关。随着温度升高，两组样品均在400 ~ 800 °C附近出现明显气体释放峰，说明此温度区间是硅橡胶主链断裂及侧基裂解的主要阶段。对比可以发现，未添加Vi-HPSi样品在热分解过程中释放出的挥发性裂解产物明显更多，红外透过率最低约降至25%左右，说明在该阶段产生了大量含硅低聚物及挥发性有机小分子。相比之下，添加30 phr Vi-HPSi后，各特征吸收峰强度均出现明显减弱，最低透过率提高至约75%，热解气相产物释放抑制特性。

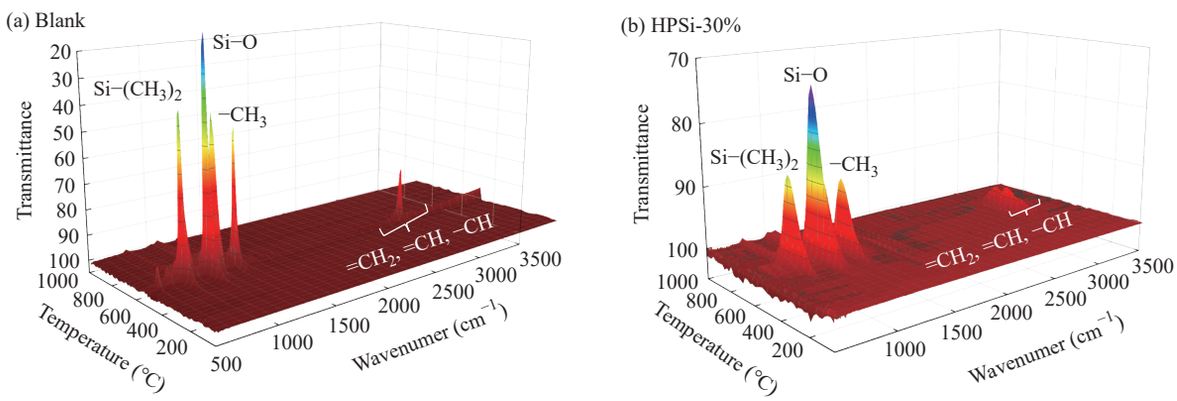

图 5 未添加(a)与添加30 phr (b) Vi-HPSi硅橡胶样品TG-IR测试结果

Fig. 5 TG-IR results of silicone rubber samples with (a) and without (b) 30 phr Vi-HPSi.

3 结论

Vi-HPSi的引入显著提高了硅橡胶体系的交联密度和网络结构完整性，使材料拉伸强度提升超过一倍，同时保持较好的韧性和绝热性能。

在硅橡胶体系中引入Vi-HPSi能够促进高温下稳定Si－O－Si结构和致密炭层的形成，使样品1000 °C下的残余质量由45.93%提高至约78%，氧乙炔烧蚀线烧蚀率由0.165 mm/s降低至0.101 mm/s，显著增强材料的耐高温烧蚀及抗冲刷能力。

添加Vi-HPSi后，材料热释放、产烟量及裂解挥发产物释放均明显降低，TG-IR测试中最低红外透过率由约25%提高至约75%，表现出优异的热解挥发物释放的抑制作用。

Vi-HPSi能够实现硅橡胶力学性能、热稳定性、耐烧蚀性能及热解挥发物释放的抑制的协同提升，在航空航天洁净绝热与低可探测热防护材料领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

1 Kang, F. R.; Zhang, T. T.; Zhang, L.; Deng, J.; Yi, X.; Pan, J. X. Effects of melamine-modified zinc phytate and NH_2-MIL-53(Al) on flame retardancy and smoke suppression of silicone rubber foam. *Constr. Build. Mater.*, **2025**, 499, 143986.

2 安广亮. 三元乙丙橡胶耐烧蚀绝热材料的制备及其结构与性能研究. 北京: 北京化工大学, **2013**.

3 李成伟, 庄晟逸, 向文超, 杨超. 航天热防护用树脂基复合材料研制的前沿进展. 中国科学(化学), **2024**, 54(11), 2167−2182.

4 尹正帅, 刘义华, 刘艳辉. 耐烧蚀硅橡胶复合材料的制备及其烧蚀性能研究. 航天制造技术, **2016**(5), 63−66.

5 刘艳辉, 智业, 尹正帅, 杨磊, 李勇. 氧化锆对炭纤维增强耐烧蚀复合材料烧蚀性能的影响. 固体火箭技术, **2016**, 39(2), 265−268.

6 任劲文. EPDM烧蚀材料复合结构设计与研究. 武汉: 武汉理工大学, **2021**.

7 邹德荣. 低特征信号绝热层用硅氧烷树脂研究. 固体火箭技术, **2000**, 23(2), 65−68.

8 Zhang, H.; Zhou, C. X.; Lu, Z. H.; Tian, Y.; Tian, J. F.; Chi, X. F.; Yan, L. W.; Gai, J. G.; Zhou, S. T.; Liang, M.; Zou, H. W. Comparison of the ablative performance of silicone rubber-based composites by analyzing a large number of samples. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2025**, 142(3), e56384.

9 Yang, D.; Zhang, W.; Jiang, B. Z.; Guo, Y. Silicone rubber ablative composites improved with zirconium carbide or zirconia. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2013**, 44, 70−77.

10 刘辉, 曾金芳, 余惠琴, 朱文苑. 耐烧蚀柔性绝热层材料的研究现状及发展趋势. 特种橡胶制品, **2019**, 40(3), 60−64.

11 陈雁彬, 胡俊杰, 吴谦秋, 陈亚格, 强福智, 李洋. 喷涂型硅橡胶绝热材料的烧蚀性能研究. 固体火箭技术, **2025**, 48(1), 156−162.

12 张丰, 高景龙, 刘艳辉. 基于陶瓷化-炭化机制的硅橡胶复合材料的耐烧蚀隔热性能. 合成橡胶工业, **2024**, 47(6), 503−509.

13 Lu, Z. H.; Zhou, S. T.; Yan, L. W.; Tian, Y.; Zou, H. W.; Ren, X. C. Improving the ablation performance of largely deformed silicone rubber-based composites under coupled mechanical-thermal-oxidative conditions by implementing deformable carbon fiber fabrics. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 258, 110876.

14 张洋. 硅橡胶绝热材料配方及性能研究. 北京: 北京理工大学, **2015**.

15 智业. 碳系填充硅橡胶耐烧蚀绝热复合材料的制备与性能研究. 沈阳: 沈阳理工大学, **2016**.

16 Zhang, H.; Zhou, C. X.; Fu, B. J.; Yuan, Q.; Yue, Y. Q.; Zhou, S. T.; Yan, L. W.; Liang, M.; Zou, H. W.; Gai, J. G. Improving the thermal insulation and ablative properties of liquid silicone rubber by adding titanium dioxide. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2025**, 142(20), e56877.

17 王肖天. 高热稳定性可陶瓷化硅橡胶设计及性能研究. 武汉: 武汉理工大学, **2022**.

18 张帆, 赵荣, 张崇耿, 张宁, 王领, 张海鹏, 余泰池. 耐高温树脂及其复合材料性能研究. 航天制造技术, **2024**(2), 25−28.

19 韩庆文, 袭锴. 超支化有机硅-酚醛复合材料的制备与性能. 高分子材料科学与工程, **2022**, 38(8), 18−24.

20 刘志朋, 吴军, 孙争光, 王龙海, 张玉红. 超支化有机硅功能高分子的研究进展. 高分子通报, **2019**, (5), 23−36.

21 李函坚. 陶瓷化硅橡胶的制备、结构与性能研究. 广州: 华南理工大学, **2016**.

22 黄雨薇. 膨胀阻燃及可瓷化硅橡胶的制备与性能研究. 北京: 北京化工大学, **2018**.

23 马超. 硼酚醛/硅橡胶基耐烧蚀绝热材料的制备与性能研究. 沈阳: 沈阳理工大学, **2019**.

24 Wang, Y. D.; Feng, Z.; Zhuang, M. Y.; Jiang, J.; Jiang, X. L.; Yang, Y.; Li, X. Z.; Xi, K. Hyperbranched polysiloxane-enhanced silicone elastomer composites for balanced thermal conductivity and mechanical properties in thermal interface materials. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, acsami.5c21078.

25 袭锴, 蒋晓霖. 一种制备高硅乙烯基含量的低粘度超支化有机硅树脂的方法. 中国专利, CN118185016A, **2024-06-14**.

26 庄铭彦, 王延东, 袭锴. 乙烯基超支化聚硅氧烷改性离型涂层及其性能. 高分子学报, **2025**, 56(11), 2058−2066.

27 薄禄薇, 徐阳, 袭锴. 超支化聚硅氧烷改性耐高温热固性聚酰亚胺胶黏剂的设计及其性能研究. 高分子通报, **2025**, 38(10), 1490−1499.

28 Wei, Z. B.; Li, Y. H.; Jiang, X. L.; Wang, Y. D.; Xu, Y.; Xi, K. Facilely prepared hyperbranched polysiloxanes elastomer with high strength and extreme environmental tolerance. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 523, 168470.