

# 改性 Kevlar 纳米纤维对三元乙丙橡胶性能的影响

张杨洋, 赵东伟, 赵鑫, 戴艺泽, 兰博, 左妍, 贾红兵\*

(南京理工大学 教育部软化学和功能材料重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 随着高超音速武器的发展, 其面临的热流环境愈发严苛, 提高热防护材料的综合性能就至关重要。本文通过在 Kevlar 纳米纤维 (KNFs) 表面原位生长纳米二氧化硅, 制备得到 KNFs@SiO<sub>2</sub>。考察了  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 改性 KNFs@SiO<sub>2</sub> 对三元乙丙橡胶 (EPDM) 耐烧蚀性能及力学性能的影响。结果表明: 与 EPDM 相比, 填充 5 份 KH550 改性的 KNFs@SiO<sub>2</sub> (KKNFs@SiO<sub>2</sub>) 的 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 235.5% 和 65.4%, 线烧蚀率和质量烧蚀率分别降低了 69.9% 和 47.6%。

**关键词:** KKNFs@SiO<sub>2</sub>; 三元乙丙橡胶; 力学性能; 耐烧蚀性能

**中图分类号:** TQ333.4

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2026)03-0050-08

**DOI:** 10.13520/j.cnki.rp.2026.03.011

近年来, 随着高超音速武器的发展, 其面临的热流环境越发严苛, 对绝热材料的耐烧蚀性能和力学性能的要求也日益提高, 但传统绝热层材料的耐烧蚀性能和力学性能等性能已趋于极限, 难以再满足更加苛刻的动力系统热防护需求<sup>[1-2]</sup>。三元乙丙橡胶 (EPDM) 作为一种新型柔性耐烧蚀材料近年来颇受关注, 其具有较低的密度, 良好的耐热氧老化性能及较高的热分解温度, 但也有力学性能差, 成炭能力弱及极性低等问题<sup>[3]</sup>。人们经常用各种纤维类填料和树脂类填料来弥补 EPDM 的缺陷。张崇耿等<sup>[4]</sup>利用硼酸锌和固体氯化石蜡及耐烧蚀硼树脂增强 EPDM。结果表明, 在硼酸锌和固体氯化石蜡及耐烧蚀硼树脂用量分别为 9、30、10 份时, 相较于指标值, 复合材料的质量烧蚀率与线烧蚀率分别降低了 13.3%、19.0%, 拉伸强度与断裂伸长率分别提高了 24.5%、75.6%, 但是密度明显高于指标值。综合来看, 该方法虽然可一定程度增强复合材料的力学性能与耐烧蚀性能, 但会使复合材料的密度过高。

纳米材料具有独特的小尺寸效应、量子隧道效应等, 近年来迅速发展<sup>[5]</sup>。Kevlar 纤维具有高强度 (9 250~11 100 MPa)、高模量 (高于 200 GPa)、低密度 (1.57 g/cm<sup>3</sup>) 等性质, 通过去质子化作用将 Kevlar 纤维纳米化分散为 Kevlar 纳米纤维 (KNFs), 可兼具 Kevlar 纤维高强度、高模量、低密度的优势<sup>[6]</sup>和高性

能聚合物纳米纤维高比表面积、高长径比的纳米效应, 进一步改性后, 可以显著增强 KNFs 与 EPDM 的界面相互作用。Wang 等<sup>[7]</sup>通过在 KNFs 上接枝环氧基团制备了水分散性良好的改性 KNFs 进而制备了改性 KNFs/XNBR 纳米复合材料。结果表明, 在添加 5 份的改性 KNFs 后, XNBR 纳米复合材料的拉伸强度提高 182.0%, 撕裂强度提高 101.0%, 力学性能明显改善。

本文以 EPDM 为基体, 在 KNFs 表面原位生长纳米二氧化硅, 进一步通过缩聚接枝硅烷偶联剂  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 制备得到  $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 改性 KNFs@SiO<sub>2</sub> (KKNFs@SiO<sub>2</sub>)。研究了 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 用量对 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 复合材料的力学性能、交联密度、热稳定性和烧蚀性能等的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

三元乙丙橡胶 (EPDM, 4045; 乙烯含量, 47.0%; ENB 含量, 5.0%) 由中国石油化工股份有限公司提供; Kevlar49 纱线购自美国杜邦公司; 氧化锌 (ZnO) 由上海晶华化学试剂有限公司提供; 硬脂

**作者简介:** 张杨洋 (2003-), 男, 本科生在读, 主要从事高分子材料的研究。

酸 (StA) 由国药化学试剂有限公司提供; 过氧化二异丙苯 (DCP) 由阿克苏诺贝尔化学公司有限公司提供; 硼酸锌 (ZB) 由青岛玉索化工科技有限公司提供; 苯并恶嗪 (BA, BZ7413) 由濮阳恩英高分子材料有限公司提供;  $\gamma$ -氨基丙基三乙氧基硅烷 (KH550) 由南京中东化学玻璃仪器有限公司提供; 二甲基亚砜 (DMSO)、叔丁醇钾 (KTB)、甲醇、环己烷、正硅酸乙酯 (TEOS)、环氧氯丙烷 (ECH) 均由国药集团化学试剂有限公司提供。

## 1.2 制备方法

KKNFs@SiO<sub>2</sub> 的制备: 称取 5 g Kevlar49 纱线切割成 1~2 cm 小段, 浸泡在无水乙醇中超声处理 6 h, 经去离子水清洗、充分干燥后, 与 5 g 叔丁醇钾在含 DMSO 的圆底烧瓶内混合搅拌 10 min, 再加入 5 g 无水甲醇搅拌 6 h 得 KNFs 的 DMSO 分散液。将该分散液与 2 mL 环氧氯丙烷在 30 °C 下反应 24 h 得改性 Kevlar 纳米纤维 (mKNFs), 于 12 000 r/min 下洗涤至中性。之后, 与 KH550 反应 5h, 再加入 10 mL TEOS 反应 3 h, 得到表面原位生长纳米二氧化硅的 Kevlar 纳米纤维 (mKNFs@SiO<sub>2</sub>), 在去离子水中经超声处理分散为浓度为 2.5 mg/mL 的分散液。向 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 水分散液中加入 0.02 mol KH550, 在 60 °C 下搅拌 2 h 得到 KKNFs@SiO<sub>2</sub>, 真空抽滤未反应的 KH550, 并用乙醇水溶液洗涤至中性。最后, 将 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 在去离子水中分散为浓度为 2.5 mg/mL 的分散液并进行超声处理。

KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 纳米复合材料的制备: 将上文最终所得分散液与 800 mL 环己烷在 50 °C 下搅拌分散 2 h, 形成稳定的分散液, 然后将 100 g EPDM 切成小块, 逐渐加入到 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 水溶液中。机械搅拌 12 h 后, 将 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 混合溶液在 60 °C 下真空蒸馏, 直至不再有环己烷冷凝物产生。所得 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 湿料在 60 °C 下真空干燥至恒重。在室温下使用橡胶开炼机上进行混炼, 加料顺序依次为 EPDM 100 份, ZnO 5 份, StA 1 份, ZB 10 份, BA 15 份, mKNFs@SiO<sub>2</sub> 或 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 变量, DCP 4.5 份, TMTD 1 份, S 1.5 份。胶料停放 24 h, 160 °C 下在硫化仪上测定正硫化时间。然后, 称取适当的胶料放入模具中, 在 160 °C 和 10 MPa 的条件下进行硫化, 得到 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 纳米复合材料。相应的胶料配方及样品号如表 1 所示。

表 1 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 复合材料的配方

Sample	EPDM/份	KKNFs@SiO <sub>2</sub> /份	mKNFs@SiO <sub>2</sub> /份
EPDM	100	0	0
5-mKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	100	0	5
1-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	100	1	0
3-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	100	3	0
5-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	100	5	0
7-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	100	7	0

## 1.3 分析与测试

采用 FTIR-8400S 型号的红外吸收光谱仪进行红外测试, 测试范围为 4 000~700 cm<sup>-1</sup>, 测试步长为 4 cm<sup>-1</sup>。

采用 DTG-60 型号的差热分析仪对样品进行热稳定性测试, 升温速率为 10 °C/min。温度范围 25~800 °C。

在室温下用环己烷作为溶剂测试硫化橡胶的溶胀行为。浸泡前对样品进行称重, 得到  $m_a$ 。浸泡结束后, 将处于溶胀平衡且重量稳定的浸泡样品擦拭并称重, 得到  $m_s$ 。样品的交联密度和交联点之间的平均分子量可按下列式计算:

$$v_r = \frac{m_a/\rho}{(m_s - m_a)/\rho_1 + m_a/\rho} \quad (1)$$

$$v_r = \frac{\ln(1 - v_r) + v_r \chi v_r^2}{v_0 v_r^{1/3}} \quad (2)$$

其中  $v_c$  为样品的交联密度;  $v_r$  为试样的溶胀体积分数;  $\chi$  为 Flory-Huggins 相互作用参数 (0.465);  $v_0$  为环己烷的摩尔体积;  $\rho$  为 EPDM 溶胀前的密度;  $\rho_1$  为环己烷密度。

称取混炼胶样品 0.5 g ( $\omega_1$ ), 用滤纸包裹 ( $\omega_2$ ), 室温下浸泡于 300 mL 环己烷中, 每 2 天更换一次溶剂, 浸泡 7 天, 取出, 真空干燥至恒重 ( $\omega_3$ )。结合胶含量 (BdR) 的计算公式如下:

$$BdR(\%) = \frac{\omega_3 - \omega_2 - \omega_1 m_f / (m_f + m_r)}{\omega_1 m_f / (m_f + m_r)} \times 100 \quad (3)$$

其中  $m_f$  和  $m_r$  分别为混炼胶中橡胶和填料的质量。

采用 CMT-4254 型号的电子万能拉力机对样品进行拉伸性能测试。测试按照 GB/T528-2009 标准, 样品为哑铃型测试样条。结果取 5 次测试的平均值。

EPDM 基绝缘子的烧蚀性能在西安智锐工业系统工程有限公司制造的试验台上进行。实验在氧-乙炔气体流量为 1 512 L/h 和 1 116 L/h 的条件下进行, 通过标定的水冷式热流计计算得到实际热通量为 457 W/cm<sup>2</sup>。试验所用试样尺寸直径为 30 mm, 高度为 10 mm, 试样表面与喷嘴尖端的距离为 10 mm。高速氧乙炔火焰垂

直放置在试样中心, 烧蚀过程持续 20 s。表征复合材料耐烧蚀性能的主要参数为质量烧蚀率 (MAR) 和线性烧蚀率 (LAR), 定义如下:

$$MAR = (m_1 - m_2) / t \quad (4)$$

$$LAR = (d_1 - d_2) / t \quad (5)$$

其中  $m_1$  和  $d_1$  为测试前样品的初始质量和厚度,  $m_2$  和  $d_2$  为烧蚀后样品的质量和最小厚度,  $t$  为实验时间。

采用 JSM-6380 型扫描电子显微镜对烧蚀样品破层截面进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 的表征与性能测试

图 1 为 KH550 改性前后 KNFs@SiO<sub>2</sub> 的 FTIR 光谱, 从图中可见, 未改性的 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 在 3 300、1 645 和 1 536 cm<sup>-1</sup> 处出现峰, 分别对应于酰胺基团的 N-H 伸缩振动、C=O 伸缩振动和 N-H 弯曲振动。此外, 1 508 和 1 306 cm<sup>-1</sup> 处的峰分别归属于芳环的伸缩振动和 Ph-N 振动。在 1 092 cm<sup>-1</sup> 处出现与 Si-O-Si 的不对称伸缩振动相关的峰, 来源于 TEOS 成功水解缩合生成的 SiO<sub>2</sub>。在 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 中, 在 1 590 cm<sup>-1</sup> 附近重新出现伯胺 N-H 伸缩振动峰, 同时在 3 315 cm<sup>-1</sup> 处出现代表伯胺的较强尖峰, 表明 KH550 成功接枝在 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 上。

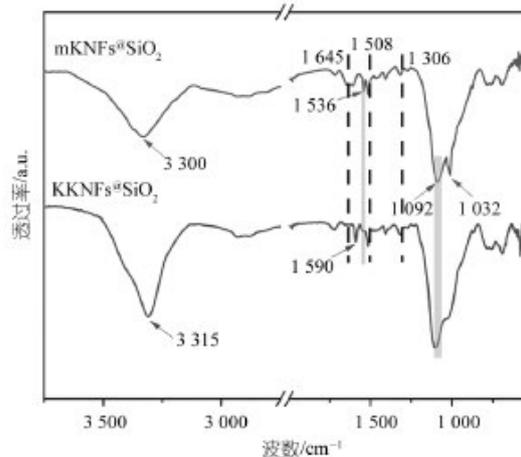


图 1 KH550 改性前后 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 的 FTIR 谱图

图 2 为 KH550 改性前后 mKNFs@SiO 的热重分析图, 从图中可见 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 的分解分为三个阶段。第一阶段在 220 °C 以下, KKNFs@SiO<sub>2</sub> 失重略高于 mKNFs@SiO<sub>2</sub>, 这可能是由于反应中 KH550 未缩合的硅羟基进一步缩合脱水以及 KH550 氨基端吸附的少量结合水的分解。第二阶段在 370~500 °C, 与 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 相比, 由于 KH550 中引入了更多烷基链段, 因此本阶段热分解速率加快 (如图 2(b) 所示), 导致残重有所降低, 然而与未改性的 KNFs 相比仍有明显提高。第三阶段在 540~700 °C, 这主要归因于 PPTA 的热解。根据文献中报道的公式<sup>[8]</sup> 计算得到 KH550 的接枝率为 14.24%。KKNFs@SiO<sub>2</sub> 最大热分解温度达到

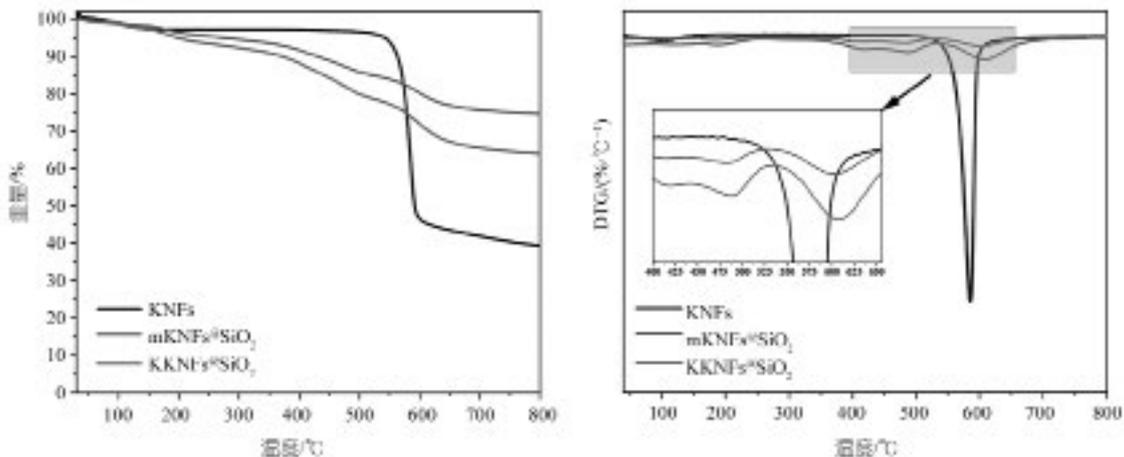


图 2 KNFs、mKNFs@SiO<sub>2</sub> 和 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 的 TG, DTG 曲线

了 610.2 °C, 比 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 提高了 3.9 °C。这是由于高温下 KH550 的热解会形成炭层的同时自缩聚生成更多难分解的 Si-O-Si 陶瓷结构, 包覆在纳米纤维表面阻碍热量传递, 延后 KNFs 在高温下的裂解。

表 2 KNFs、mKNFs@SiO<sub>2</sub> 和 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 的热分解数据

	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$R_{800}/\%$
KNFs	541.7	562.8	584.7	39.29
mKNFs@SiO <sub>2</sub>	275.8	430.3	606.3	74.64
KKNFs@SiO <sub>2</sub>	198.2	371.8	610.2	64.01

## 2.2 结合橡胶及交联密度

图 3(a) 显示, EPDM 的  $BdR$  为 15.63%, 5-mKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的  $BdR$  相较于 EPDM 提高了 64.93%, 5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 提高了 69.80%, KKNFs@SiO<sub>2</sub> 增强作用更明显。这是由于 KH550 引入的  $\gamma$ -氨基丙基加强了纳米纤维对橡胶的浸润渗透作用, 在纳米纤维和橡胶间构建了致密稳定的穿插网络, 形成 EPDM—KH550—KKNFs 的杂化界面层, 从而提高了橡胶与 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 之间的粘合性, 橡胶中的结合胶含量增加, 使得 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 更好地增强了 EPDM 橡胶。图 3(b) 显示, KKNFs@SiO<sub>2</sub> 含量从 0 增加到 5 份的过程中, KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的  $BdR$  快速增大。这是由于 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 与 EPDM 基体之间的物理交联形成的良好的界面相互作用, 并且随着 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 含量的增加相互作用不断增强。另外, 在加入 7 份的 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 后, 体系的  $BdR$  变化较小, 这可能是由于纳米纤维在橡胶基体中产生了一定程度的团聚。

从图 3(a) 中可以看出, EPDM 的交联密度为  $2.01 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$ , 5-mKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的交联密度相较于 EPDM 提高了 0.21%, 5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 提高了 61.60%, KKNFs@SiO<sub>2</sub> 增强效果更明显。这是由于 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 与 EPDM 难以形成有效的交联点, KH550 的改性使得 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 在 EPDM 基体内均匀分散, 其与 EPDM 基体间的范德华作用使其在体系中形成新的物理交联点, 因此复合材料交联密度有了明显提升。图 3(b) 显示, EPDM 的交联密度为  $2.20 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$ , 随着 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 含量的提高, 1、3-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的交联密度分别提高了 3.5% 和 9.4%, 提升不明显。这是由于接枝的 KH550 并不能与 EPDM 分子链反应形成化学键, 无法形成有效的化学交联点。5、7-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的交联密度分别提高了 61.7% 和 68.1%。这是由于 KKNFs@SiO<sub>2</sub> 添加量较多时, 其作为物理交联点的作用被凸显出来。

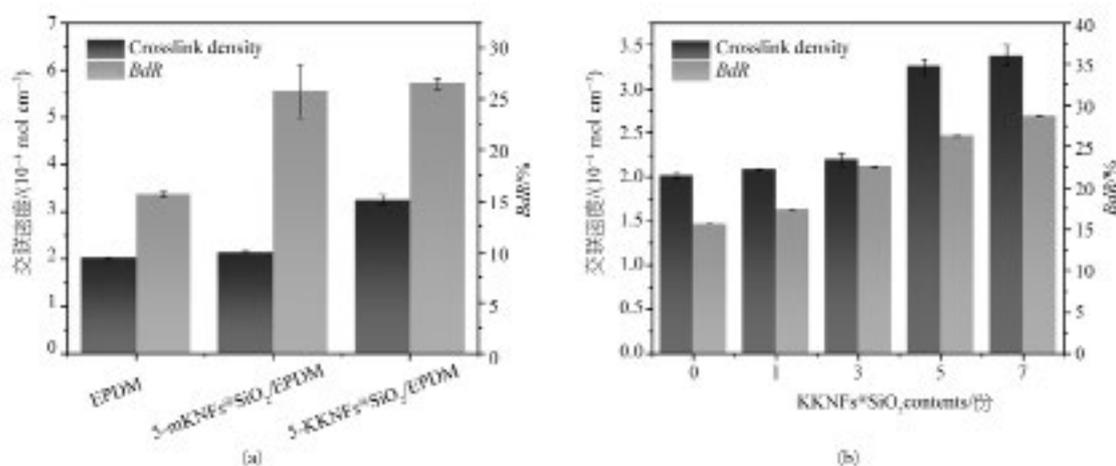


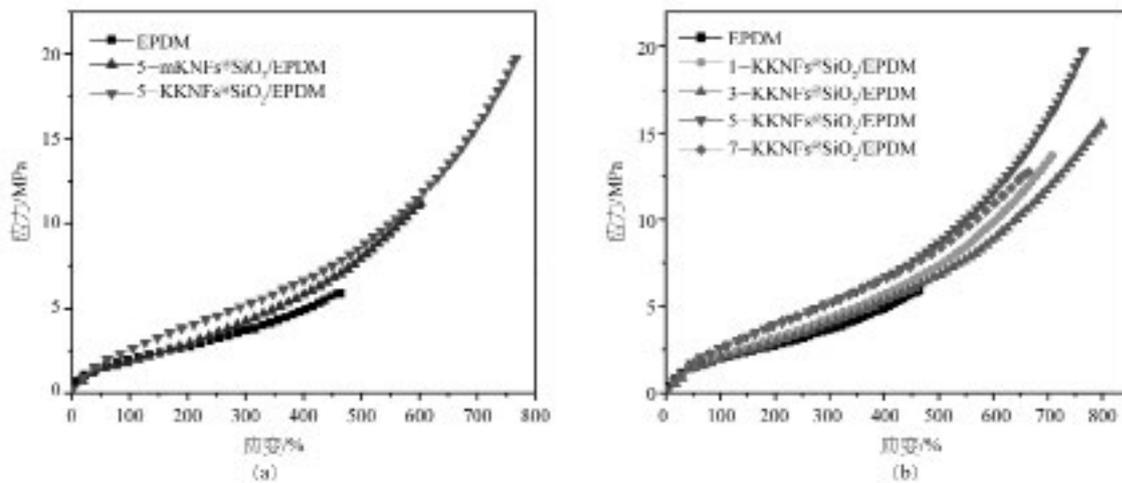
图 3 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的结合橡胶含量与交联密度

## 2.3 力学性能

如图 4(a) 所示, EPDM 的拉伸强度与断裂伸长率为 5.88 MPa 与 463%。5-mKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的拉伸强度和断裂伸长率与 EPDM 相比分别提升 89.4% 和 30.2%。这是由于 mKNFs@SiO<sub>2</sub> 表面原位生长的纳米 SiO<sub>2</sub> 增大了纳米纤维的比表面积, 同时纳米 SiO<sub>2</sub> 表面含有丰富的羟基, 有助于吸附缠结更多 EPDM 分子链, 使橡胶链段在受到外力影响时滑移受阻, 从而提高拉伸性能。5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的拉伸强度和断裂伸长率与 EPDM 相比分别提升 235.5% 和 65.4%, 复合材料的力学性能进一步提升。这是由于

相比 mKNFs@SiO<sub>2</sub>, KKNFs@SiO<sub>2</sub> 因为接枝了含有非极性烷基链的 KH550, 所以在非极性 EPDM 基体中具有更优异的分散效果。

如图 4(b) 所示, 1、3、5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 的拉伸强度相比于 EPDM 分别提高了 132.9%、164.1%、228.7%, 断裂伸长率分别提高了 52.7%、72.6%、65.4%。然而, 当 KKNFs 的用量增长到 7 份时, 纳米纤维对复合材料的力学性能产生不利影响。这是由于纳米纤维在 EPDM 基体内部因纳米尺寸产生团聚, 受到外力作用时不能顺利传递载荷, 导致应力集中, 进一步成为缺陷, 导致拉伸强度与断裂伸长率均有下降。

图4 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM复合材料的应力-应变曲线表3 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM复合材料的力学性能参数

样品	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
EPDM	5.88±0.12	463±9
5-mKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	11.14±0.15	603±34
1-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	13.70±0.67	707±31
3-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	15.53±0.32	799±58
5-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	19.73±0.55	766±24
7-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	12.75±0.36	665±35

## 2.4 热稳定性

如表4所示, mKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM失重5%时的温度( $T_5$ )、失重10%时的温度( $T_{10}$ )、最大热分解速率温度( $T_{max}$ )和800℃时的残重( $R_{800}$ )均高于纯EPDM,这是由于mKNFs@SiO<sub>2</sub>的热稳定性。经过KH550改性之后, KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的 $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{max}$ 和 $R_{800}$ 进一步提高。这是由于KKNFs@SiO<sub>2</sub>能够吸附更多硫化剂、促进剂,促进了分子间的交联反应,使得交联网络中的交联密度增加,分子链段的运动受到限制,同时纳米SiO<sub>2</sub>与纳米纤维形成纳米填料网络,形成屏障阻碍热传递,进一步促进了复合材料的热稳定性。

表4显示, EPDM的 $R_{800}$ 为26.75%,与之相比, 1、3、5和7-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的 $R_{800}$ 分别提高了0.52%、5.72%、13.08%和15.96%。如图5(b)所示, KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM纳米复合材料的主要失重阶段在400~500℃左右。从表4的数据中可以更清晰地得出,随着KKNFs@SiO<sub>2</sub>的含量的提高,体系的 $T_{max}$ 逐渐增大,与EPDM的453℃相比,添加1、3、5和7份的KKNFs的复合材料的 $T_{max}$ 分别提高到453.3、453.5、454.0和454.2℃,所对应的最大热分解温度

如图5(c)、图5(d)。这同样归功于KKNFs@SiO<sub>2</sub>本身优异的热稳定性以及对体系交联密度的提升。

表4 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM纳米复合材料的热分解数据

	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$R_{800}/\%$
EPDM	351.7	409.2	453.0	26.75
5-mKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	358.2	413.6	453.7	28.83
1-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	356.3	418.3	453.3	26.89
3-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	361.6	420.0	453.5	28.28
5-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	360.3	414.8	454.0	30.25
7-KKNFs@SiO <sub>2</sub> /EPDM	383.3	422.9	454.2	31.02

## 2.5 烧蚀性能

如图6(a)所示, EPDM的LAR和MAR分别为0.253 mm/s与0.129 g/s,与之相比, 5-mKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的LAR和MAR分别降低了46.64%和34.11%。在表面接枝KH550后, KKNF@SiO<sub>2</sub>对复合材料耐烧蚀性能的提升效果进一步增强, 5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的LAR和MAR与EPDM相比分别降低69.9%和47.6%。一方面是由于KKNFs@SiO<sub>2</sub>表面包覆的纳米SiO<sub>2</sub>和KH550在烧蚀后形成了一层难以分解的Si-O-Si膜,使得KKNFs@SiO<sub>2</sub>具有高残炭性能和耐高温性能;另一方面,前文所证明的KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM体系的高交联密度意味着体系内部形成更致密的交联结构,这给予了复合材料更高的热分解性能,从而获得优异的耐烧蚀性能。图6(b)显示,随着KKNFs@SiO<sub>2</sub>含量的提高,复合材料的LAR和MAR均在不断降低。7-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的LAR和MAR分别为0.072 mm/s和0.055 g/s,与EPDM相比,分别下降了69.9%和39.7%。这进一步证明KKNFs@SiO<sub>2</sub>对复合材料耐烧蚀性能的巨大提升。

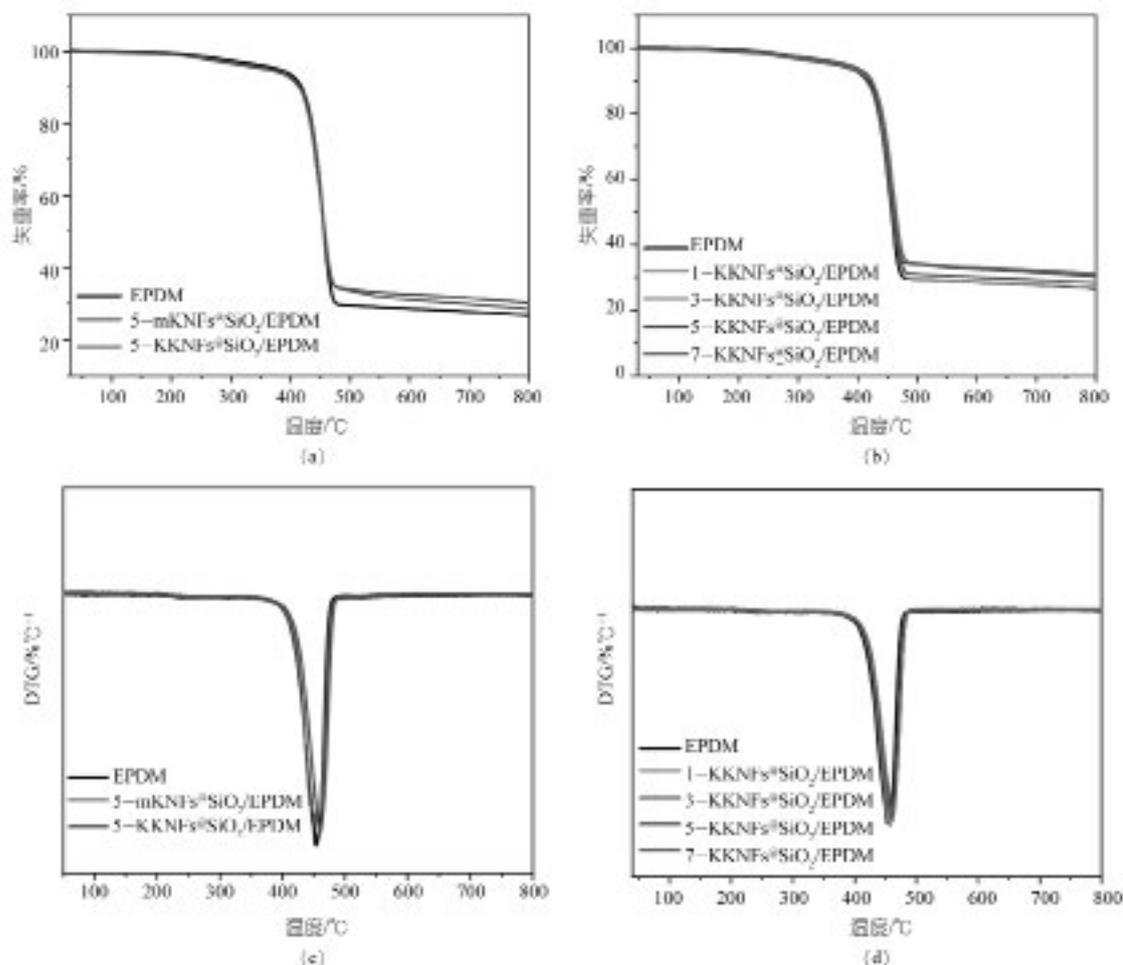


图5 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 纳米复合材料的曲线图

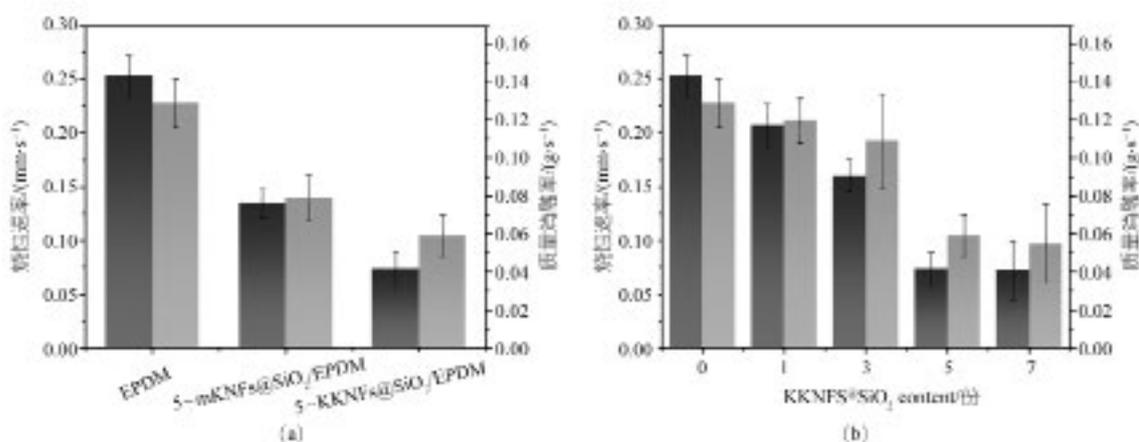


图6 KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM 复合材料的LAR和MAR

## 2.6 炭层分析

图7展示了通过SEM在不同放大倍数下观察到的KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM复合材料的烧蚀表面层形貌结构。如图7(a<sub>1</sub>)所示,纯EPDM炭层呈现疏松多

孔的结构,与此同时表面有部分不规则沉积物;如图7(a<sub>2</sub>)所示,在高放大倍数下观察局部炭层,可以看出炭层呈现层状堆叠,存在有不规则裂痕与孔隙,这表示EPDM在烧蚀实验条件下不能形成强度高且致

密的炭层，因此其线性烧蚀率和质量烧蚀率偏高。图7(b<sub>1</sub>)和(b<sub>2</sub>)为KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的烧蚀炭层形貌。与EPDM相比，KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM的炭层最为致密，没有明显的孔洞；进一步在高放大倍数下观察，可以看到纳米二氧化硅已经转化为纳米级硅氧化物颗粒以及骨架结构。在烧蚀过程中，KKNFs@SiO<sub>2</sub>表面的大量Si-O键在热解过程中会被打开，碳化后形成细化的交联网络结构和丰富的SiO<sub>x</sub>。在热解气流的驱动下，KKNFs@SiO<sub>2</sub>表面熔融SiO<sub>x</sub>，与碳氢化合物反应生成不规则的Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>C<sub>z</sub>球状颗粒。这些球状颗粒拥有较高的比表面积，可以黏附更多的残碳，填充了炭层骨架之间的孔洞，一方面使得炭层结构更加致密，另一方面硅氧化物本身的高热稳定性同样能够提高复合材料的耐烧蚀能力。

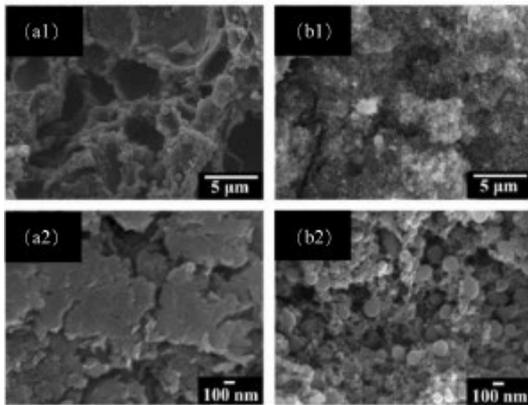


图7 EPDM(a<sub>1</sub>-2)和5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM(b<sub>1</sub>-2)的烧蚀表面炭层SEM

### 3 结论

(1) KH550能够显著提高KNFs@SiO<sub>2</sub>与EPDM

的相互作用，提高了EPDM的结合橡胶和交联密度；

(2) 随KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM用量的增加，EPDM的拉伸强度和断裂伸长率不断增加，当KKNFs@SiO<sub>2</sub>用量为5份时，EPDM的综合性能最优。

(3) 与未填充KKNFs@SiO<sub>2</sub>的EPDM相比，5-KKNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM纳米复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了235.5%和65.4%，线烧蚀率和质量烧蚀率分别降低了69.9%和47.6%。

#### 参考文献：

- [1] Padture N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature materials, 2016, 15(8): 804-809.
- [2] You Q, Liu G, Zhong Y, et al. Mechanical properties and oxidative ablation behaviors of polysilazane-modified phenolic resin aerogel/carbon fiber fabric composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(1): 286-301.
- [3] 唐士博, 薛楠川, 温世鹏. 芳纶短纤维对三元乙丙橡胶热防护材料结构与性能的影响[J]. 弹性体, 2022, 32(2): 1-5.
- [4] 张崇耿, 李强, 张新航, 等. 耐烧蚀EPDM胶料配方的研究[J]. 橡胶工业, 2007, 54(7): 421-422.
- [5] Lyu J, Wang X, Liu L, et al. High Strength Conductive Composites with Plasmonic Nanoparticles Aligned on Aramid Nanofibers [J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(46):8435-8445.
- [6] Xu Y S, Wang J, Amel M, et al. Effect of epichlorohydrin-modified Kevlar nanofibres on thermodynamic properties of different rubbers: Experiment and molecular simulation[J]. 合成橡胶工业, 2023, 47(3): 268.
- [7] Wang J, Zhang X, Wen Y, et al. Aramid Nanofiber/XNBR Nanocomposite with High Mechanical, Thermal, and Electrical Performance [J]. Nanomaterials, 2023, 13(2): 335.
- [8] 赵自强. 基于阴离子聚合方法的大分子单体合成及二氧化硅接枝改性研究[D]: 北京化工大学, 2009.

## Influence of modified Kevlar nanofibers on the properties of ethylene-propylene-diene monomer rubber

Zhang Yangyang, Zhao Dongwei, Zhao Xin, Dai Yize, Lan Bo, Zuo Yan, Jia Hongbing\*

(Key Laboratory of Soft Chemistry and Functional Materials, Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** With the development of hypersonic weapons, their harsh thermal environment making it crucial to enhance the comprehensive performance of thermal protection materials. In this paper, Kevlar nanofibers (KNFs) were coated with nano-silica through in-situ growth on their surface to obtain KNFs@SiO<sub>2</sub>. The influence of  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane (KH550) modified KNFs@SiO<sub>2</sub> on the ablation resistance and mechanical properties of ethylene propylene diene monomer (EPDM) was investigated. The results showed that compared to EPDM, the tensile strength and elongation at break of the KNFs@SiO<sub>2</sub>/EPDM composite filled

with 5 parts of KH550 modified KNFs<sup>®</sup>SiO<sub>2</sub> (KKNFs<sup>®</sup>SiO<sub>2</sub>) increased by 235.5% and 65.4%, respectively, while the linear ablation rate and mass ablation rate decreased by 69.9% and 47.6%, respectively.

**Key words:** KKNFs<sup>®</sup>SiO<sub>2</sub>; ethylene-propylene-diene monomer rubber; mechanical properties; ablation resistance

(R-03)

## 喜报 | 玲珑轮胎荣获上汽通用五菱“优秀质量奖”

Linglong Tire has been awarded the "Excellent Quality Award" by SAIC-GM-Wuling

2026年1月26日，上汽通用五菱全球伙伴大会盛大启幕。在率先举行的供应商伙伴大会上，玲珑轮胎凭借多年来稳定卓越的产品品质与紧密无间的协同合作，荣膺大会重磅奖项——“优秀质量奖”。

这不仅是一份荣誉，更是上汽通用五菱对玲珑轮胎数十年来坚守质量巅峰、持续提供高可靠产品的最高认可。

### 千亿征程，共铸辉煌

2025年，上汽通用五菱全球总销量突破163.5万辆，年度产值再度跨越千亿大关。在这份亮眼的成绩单背后，是供应链伙伴的坚实支撑与协同创新。玲珑轮胎作为核心战略合作伙伴，已与五菱并肩前行逾20年，目前在其整体轮胎配套份额占比位居轮胎行业前列，是名副其实的“主力军”与“同行者”。

### 场景定义，技术引领

在五菱倡导的“场景定义汽车”理念中，轮胎作为联结车辆与路面的唯一部件，其性能边界直接关乎用户体验。玲珑轮胎深度参与场景化定义轮胎项目，通过虚拟仿真与模拟驾驶，精准优化轮胎性能，使其在整车上得到极致发挥。这一创新模式不仅显著缩短了开发周期，更强化了产品在细分市场的竞争力。

### 从享境到华境，静音棉轮胎实力护航

2025年，玲珑轮胎为五菱享境车型配套的静音棉轮胎225/50R18 AS330，以出色的静音性与舒适性获得好评。而即将上市的五菱与华为深化合作的战略车型——华境，玲珑265/45R21 AM050也凭借卓越性能，完全满足甚至超越了严苛的配套要求，实力护航旗舰车型的豪华体验。

大会现场，五菱与华为合作的旗舰车型“华境S”体验车正式下线。玲珑轮胎作为底盘系统的重要伙伴，与全球供应商共同见证了这一里程碑时刻，标志着双方合作已进入更深层的技术融合与联合开发阶段。

### 领航之路，并肩同行

荣获“优秀质量奖”，是肯定，更是动力。玲珑轮胎将继续秉持“客户第一、用户至上”的原则，持续加大研发投入、坚守质量根本、提升服务能级，与上汽通用五菱携手，以更高品质、更强性能的产品，共同“为人民需要而造，向未来领航而行”！

摘编自“玲珑轮胎”

(R-03)

