

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)

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^[1-2]。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^[3]。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^[4]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^[5]。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/cm³)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^[6]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^[7]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 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)制备得到 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)改性KNFs@SiO₂(KKNFs@SiO₂)。研究了KKNFs@SiO₂用量对KKNFs@SiO₂/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; γ -氨丙基三乙氧基硅烷(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@SiO₂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5 h, 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@

SiO₂)，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@SiO₂水分散液中加入0.02 mol KH550，在60 °C下搅拌2 h得到KKNFs@SiO₂，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@SiO₂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@SiO₂/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@SiO₂水溶液中。机械搅拌12 h后，将KKNFs@SiO₂/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@SiO₂/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@SiO₂或KKNFs@SiO₂ 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@SiO₂/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@SiO₂/EPDM复合材料的配方

Sample	EPDM/份	KKNFs@SiO ₂ /份	mKNFs@SiO ₂ /份
EPDM	100	0	0
5-mKNFs@SiO ₂ /EPDM	100	0	5
1-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	100	1	0
3-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	100	3	0
5-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	100	5	0
7-KKNFs@SiO ₂ /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⁻¹，测试步长为4 cm⁻¹。

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量，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；χ为Flory-Huggins相互作用参数(0.465)；v₀为环己烷的摩尔体积；ρ为EPDM溶胀前的密度；ρ₁为环己烷密度。

称取混炼胶样品0.5 g (ω₁)，用滤纸包裹(ω₂)，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(ω₃)。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/cm²。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m₁和d₁为测试前样品的初始质量和厚度，m₂和d₂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碳层截面进行观察。

2 结果与讨论

2.1 KKNFs@SiO₂的表征与性能测试

图1为KH550改性前后KNFs@SiO₂的FTIR光谱，从图中可见，未改性的mKNFs@SiO₂在3 300、1 645和1 536 cm⁻¹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⁻¹处的峰分别归属于芳环的伸缩振动和Ph-N振动。在1 092 cm⁻¹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SiO₂。在KKNFs@SiO₂中，在1 590 cm⁻¹附近重新出现伯胺N—H伸缩振动峰，同时在3 315 cm⁻¹处出现代表

伯胺的较强尖峰,表明KH550成功接枝在mKNFs@SiO₂上。

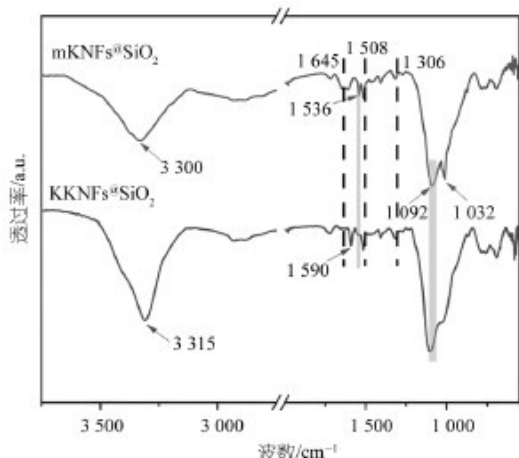


图1 KH550改性前后mKNFs@SiO₂的FTIR谱图

图2为KH550改性前后mKNFs@SiO₂的热重分析

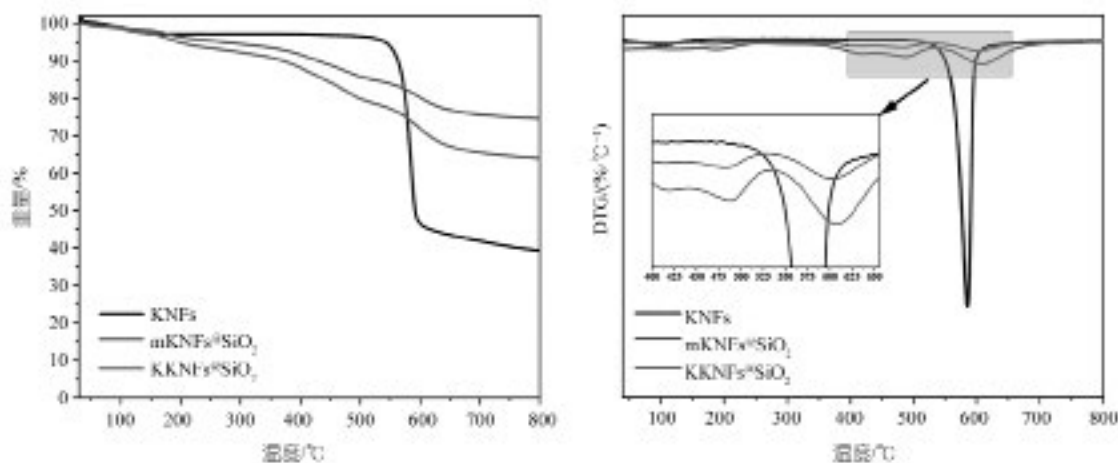


图2 KNFs、mKNFs@SiO₂和KKNFs@SiO₂的TG, DTG曲线

表2 KNFs、mKNFs@SiO₂和KKNFs@SiO₂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 ₂	275.8	430.3	606.3	74.64
KKNFs@SiO ₂	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@SiO₂/EPDM的BdR相较于EPDM提高了64.93%, 5-KKNFs@SiO₂/EPDM提高了69.80%, KKNFs@SiO₂增强作用更明显。这是由于KH550引入的 γ -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—KNFs的杂化界面层, 从而提高了橡胶与

图, 从图中可见KKNFs@SiO₂的分解分为三个阶段。第一阶段在220 °C以下, KKNFs@SiO₂失重略高于mKNFs@SiO₂, 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@SiO₂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^[8]计算得到KH550的接枝率为14.24%。KKNFs@SiO₂最大热分解温度达到了610.2 °C, 比mKNFs@SiO₂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。

KKNFs@SiO₂之间的黏合性, 橡胶中的结合胶含量增加, 使得KKNFs@SiO₂更好地增强了EPDM橡胶。图3(b)显示, KKNFs@SiO₂含量从0增加到5份的过程中, KKNFs@SiO₂/EPDM的BdR快速增大。这是由于KKNFs@SiO₂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@SiO₂含量的增加相互作用不断增强。另外, 在加入7份的KKNFs@SiO₂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@SiO₂/EPDM的交联密度相较于EPDM提高了0.21%, 5-KKNFs@SiO₂/EPDM

提高了61.60%，KKNFs@SiO₂增强效果更明显。这是由于mKNFs@SiO₂与EPDM难以形成有效的交联点，KH550的改性使得KKNFs@SiO₂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2.20×10⁻⁴ mol/cm³，随着KKNFs@SiO₂含量的提高，1、3-KKNFs@

SiO₂/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@SiO₂/EPDM的交联密度分别提高了61.7%和68.1%。这是由于KKNFs@SiO₂添加量较多时，其作为物理交联点的作用被凸显出来。

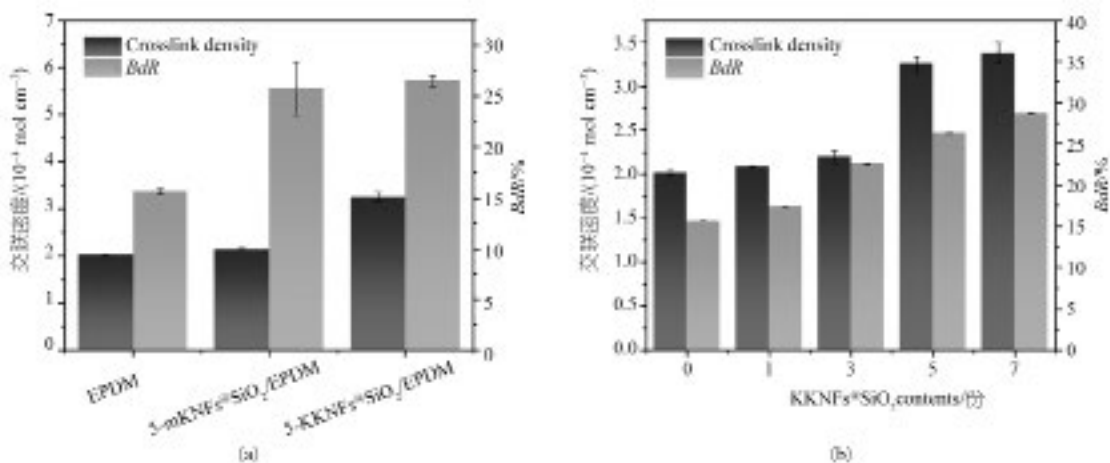


图3 KKNFs@SiO₂/EPDM的结合橡胶含量与交联密度

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@SiO₂/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@SiO₂表面原位生长的纳米SiO₂增大了纳米纤维的比表面积，同时纳米SiO₂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@SiO₂/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@SiO₂，KKNFs@SiO₂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@SiO₂/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。

表3 KKNFs@SiO₂/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 ₂ /EPDM	11.14±0.15	603±34
1-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	13.70±0.67	707±31
3-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	15.53±0.32	799±58
5-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	19.73±0.55	766±24
7-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	12.75±0.36	665±35

2.4 热稳定性

如表4所示，mKNFs@SiO₂/EPDM失重5%时的温度(T₅)、失重10%时的温度(T₁₀)、最大热分解速率温度(T_{max})和800℃时的残重(R₈₀₀)均高于纯EPDM，这是由于mKNFs@SiO₂的热稳定性。经过KH550改性之后，KKNFs@SiO₂/EPDM的T₅、T₁₀、T_{max}和R₈₀₀进一步提高。这是由于KKNFs@SiO₂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SiO₂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R₈₀₀为26.75%，与之相比，

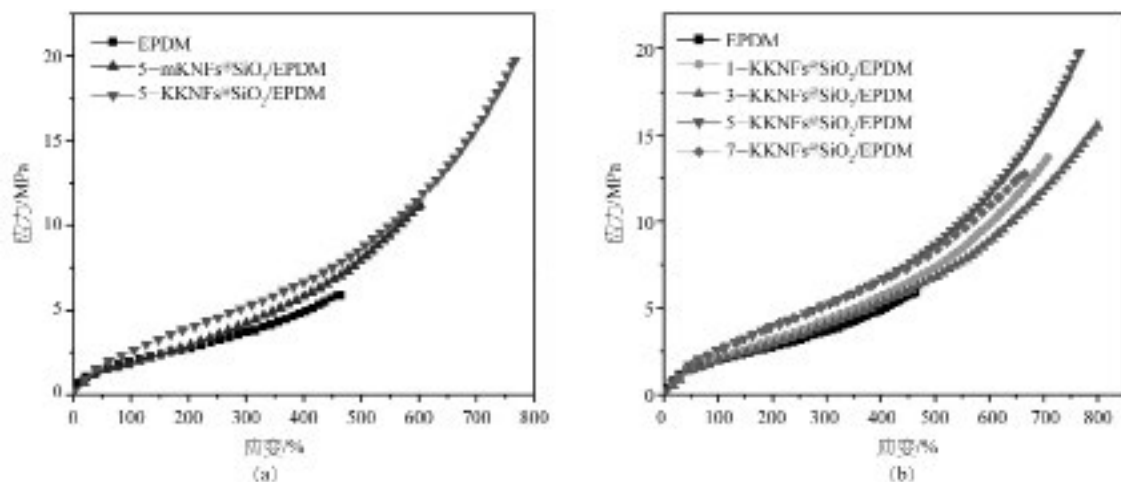


图4 KKNFs@SiO₂/EPDM复合材料的应力-应变曲线

1、3、5和7-KKNFs@SiO₂/EPDM的R800分别提高了0.52%、5.72%、13.08%和15.96%。如图5(b)所示，KKNFs@SiO₂/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@SiO₂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@SiO₂本身优异的热稳定性以及对体系交联密度的提升。

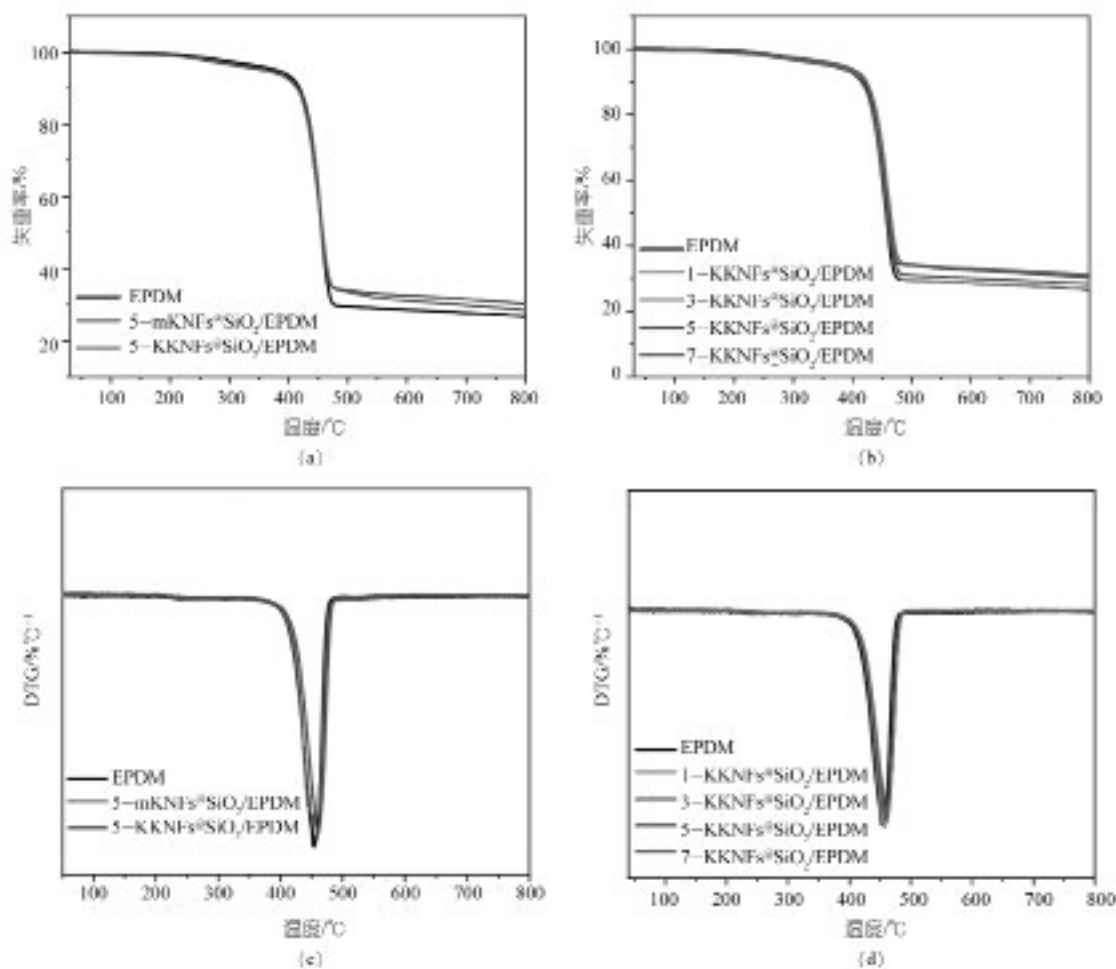


图5 KKNFs@SiO₂/EPDM 纳米复合材料的曲线图

表4 KKNFs@SiO₂/EPDM纳米复合材料的热分解数据

	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$	$R_{800}/\%$
EPDM	351.7	409.2	453.0	26.75
5-mKKNFs@SiO ₂ /EPDM	358.2	413.6	453.7	28.83
1-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	356.3	418.3	453.3	26.89
3-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	361.6	420.0	453.5	28.28
5-KKNFs@SiO ₂ /EPDM	360.3	414.8	454.0	30.25
7-KKNFs@SiO ₂ /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-mKKNFs@SiO₂/EPDM的LAR和MAR分别降低了46.64%和34.11%。在表面接枝KH550后, KKNF@SiO₂对复合材料耐烧蚀性能的提升效果进一步增强, 5-KKNFs@SiO₂/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@SiO₂表面包覆的纳米SiO₂和KH550在烧蚀后形成了一层难以分解的Si-O-Si膜, 使得KKNFs@SiO₂具有高残炭性能和耐高温性能; 另一方面, 前文所证明的KKNFs@SiO₂/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@SiO₂含量的提高, 复合材料的LAR和MAR均在不断降低。7-KKNFs@SiO₂/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@SiO₂对复合材料耐烧蚀性能的巨大提升。

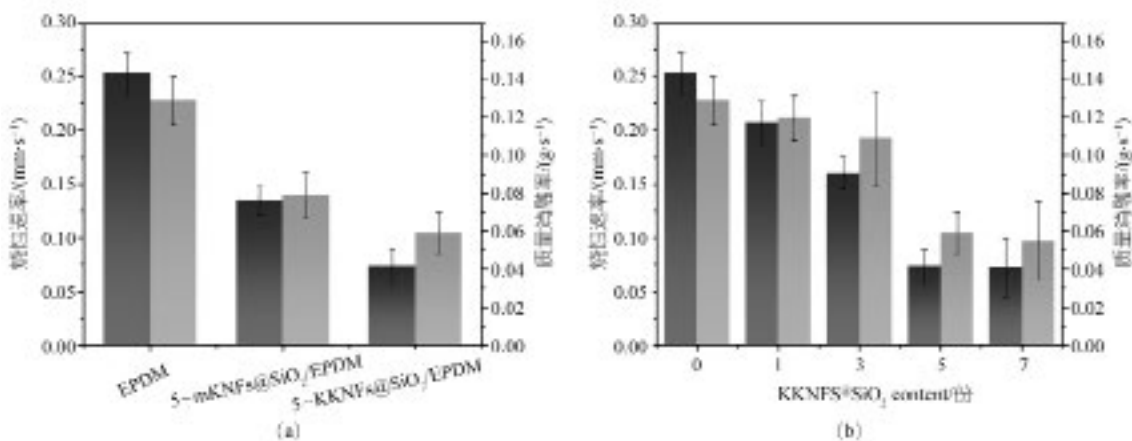


图6 KKNFs@SiO₂/EPDM复合材料的LAR和MAR

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@SiO₂/EPDM复合材料的烧蚀表面层形貌结构。如图7(a1)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(a2)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(b1)和(b2)为KKNFs@SiO₂/EPDM的烧蚀炭层形貌。与EPDM相比, KKNFs@SiO₂/EPDM的炭层最为致密, 没有明显的孔隙; 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@SiO₂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_x。在热解气流的驱动下, KKNFs@SiO₂表面熔融SiO_x, 与碳氢化合物反应生成不规则的

Si_xO_yC_z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隙, 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。

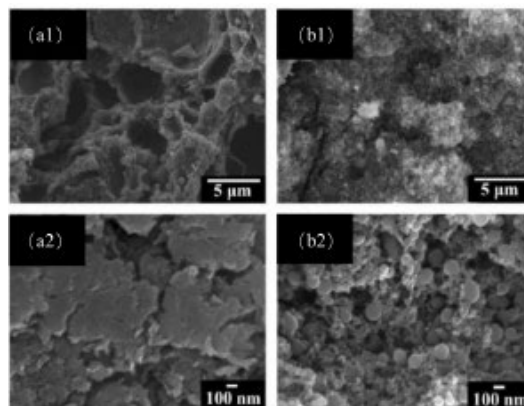


图7 EPDM(a₁-2)和5-KKNFs@SiO₂/EPDM(b₁-2)的烧蚀表面炭层SEM

3 结论

(1) KH550能够显著提高KKNFs@SiO₂与EPDM的相互作用,提高了EPDM的结合橡胶和交联密度;

(2) 随着KKNFs@SiO₂/EPDM用量的增加,EPDM的拉伸强度和断裂伸长率不断增加,当KKNFs@SiO₂用量为5份时,EPDM的综合性能最优;

(3) 与未填充KKNFs@SiO₂的EPDM相比,5-KKNFs@SiO₂/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%。

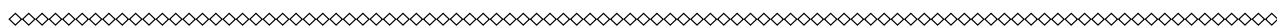
参考文献:

- [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.

转载自:《橡塑技术与装备》2026年第3期



(上接第6页)

- [3] 唐松林,施金鑫,徐晶.一种高压氮气电磁循环加热装置.202010858163.9 [P]. 2020-12-15.
- [4] 赵厚如.新能源轮胎硫化机:202120074286.3 [P]. 2021-10-01.
- [5] 赵厚如.电加热轮胎硫化机:202011641950.4 [P]. 2020-12-31.
- [6] 李健,毕召刚,王尧鹏,等.一种用于轮胎硫化的外置气体加热设备:202421196096.9[P]. 2024-05-29.
- [7] 王通,李健,陈晓峰,等.轮胎硫化装置和轮胎硫化装置的加热方法:202310893638.1.[P]. 2023-07-20.
- [8] 刘彦旭,刘保国.电磁加热技术在机械加工中的应用[J].现代制造技术与装备,2016(4):95-96.
- [9] 杨卫民,孙艳梅,陈浩,等.一种带有聚四氟乙烯涂层的轮胎电磁硫化内外模具装置.202310069096.6[P]. 2023-01-18.
- [10] 林国昌,田振辉,王友善,等.一种电加热轮胎硫化胶囊及硫化温度区域设计方法.202411099469.5[P]. 2024-08-12.
- [11] 李博,焦志伟,张金云,等.电磁感应加热在轮胎硫化机上的应用研究[J].橡胶工业,2018,65(1):1155-1159.
- [12] 孙国通,硫化机热板电磁加热有限元模拟及实验验证[D],浙江,宁波大学,2022.

- [13] 樊若男,轮胎硫化机内外模电磁加热装置研究[D].山东,山东大学,2023.
- [14] 陈超,轮胎硫化机电磁感应加热系统研究[D].山东,山东大学,2020.
- [15] 杨卫民,张金云,张涛,等.轮胎硫化外模具电磁感应加热装置.201320726171.3 [P],2013-10-18.
- [16] 史一锋.砥砺前行,转型升级中的我国轮胎工业生产经营情况分析 & 展望[J].橡塑技术与装备,2018,44(5):12-18.
- [17] 梁国彰.浅谈轮胎硫化工艺设备的节能[J].橡塑技术与装备,2011,37(6):59-61.
- [18] 李尚帅,谭晶,张金云,等.轮胎定型硫化机技术研究进展[J].现代制造工程,2019,(3)142-147
- [19] 吴畏,伍先安,杨卫民,等.轮胎硫化设备及工艺研究进展[J].橡胶工业,2018,65(6):711-716.
- [20] 刘斐,杨卫民,张金云,等.实心轮胎电磁感应加热硫化工艺[J].轮胎工业,2015,35(6):361-364.
- [21] 刘肖英,何雪涛,张金云,等.电磁感应加热鼓式硫化机[J].橡塑技术与装备,2014,40(3):24-27.
- [22] 曹广如,李勇.橡胶硫化加热技术现状及发展趋势[J].轨道交通材料,2023,2(3):7-10.

转载自:《橡塑技术与装备》2025年第9期

