环氧树脂/介孔纳米二氧化硅复合材料的固化行为及性能研究

李桂全[1],刘 雁[2]*,刘振东[1],杨 帅[2],张小俊[2],蔡浩浩[2],邓飞远[1],罗小兵[1]

(1.西藏大唐扎拉水电开发有限公司,西藏 昌都 851299;2.东方电气集团东方电机有限公司,四川 德阳 618000)

摘 要:文章对比研究了常规纳米二氧化硅($NSiO_2$)与介孔纳米二氧化硅($MSiO_2$)对环氧树脂(EP)固化动力学、力学性能及介电性能的影响。通过傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、X射线光电子能谱仪(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、氮气吸附-脱附等测试表征发现,$MSiO_2$具有规则介孔结构,比表面积(399.43 m^2/g)为$NSiO_2$的7倍以上,且表面富含硅羟基等活性基团。对EP/SiO_2复合材料进行差示扫描量热分析(DSC)测试发现,两种纳米SiO_2均能降低EP的固化峰值温度和固化活化能。其中,$MSiO_2$的促进作用更显著,固化峰值温度降低更明显,固化活化能降至49.5 kJ/mol。力学性能测试显示,EP/$MSiO_2$复合材料的拉伸强度、弹性模量和洛氏硬度均高于EP/$NSiO_2$和EP。介电性能测试表明,与$NSiO_2$相比,$MSiO_2$能够更有效地降低EP的介电常数和介电损耗。研究结果表明,$MSiO_2$对EP的改性效果优于$NSiO_2$。

关键词:环氧树脂;二氧化硅;介孔结构;结构与性能;介电性能

中图分类号:TB332 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0049-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.009

Study on Curing Behavior and Properties of Epoxy Resin/Mesoporous Nano-silica Composites

LI Guiquan[1], LIU Yan[2]*, LIU Zhendong[1], YANG Shuai[2], ZHANG Xiaojun[2], CAI Haohao[2], DENG Feiyuan[1], LUO Xiaobing[1]

(1. Xizang Datang Zala Hydropower Development Co. , Ltd. , Changdu 851299, China; 2. Dongfang Electric Machinery Co. , Ltd. , Dongfang Electric Group, Deyang 618000, China)

Abstract: The effects of conventional nano-silica ($NSiO_2$) and mesoporous nano-silica ($MSiO_2$) on the curing kinetics, mechanical properties, and dielectric properties of epoxy resin (EP) were comparatively investigated. Characterization by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and nitrogen adsorption-desorption tests revealed that $MSiO_2$ possessed a regular mesoporous structure, with a specific surface area of 399.43 m^2/g, which was more than seven times that of $NSiO_2$, and its surface was rich in active groups such as silicon hydroxyl groups. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis of EP/SiO_2 composites showed that both nano-silicas could reduce the curing peak temperature and curing activation energy of EP, among which $MSiO_2$ exhibited a more pronounced promoting effect, with a more significant decrease in curing peak temperature and the curing activation energy reduced to 49.5 kJ/mol. Mechanical property tests demonstrated that the tensile strength, elastic modulus, and Rockwell hardness of the EP/$MSiO_2$ composite were all higher than those of EP/$NSiO_2$ and EP. Dielectric property tests indicated that compared to $NSiO_2$, $MSiO_2$ could more effectively reduce the dielectric constant and dielectric loss of EP. The results showed that the modification effect of $MSiO_2$ on EP was superior to that of $NSiO_2$.

Keywords: EP; SiO_2; Mesoporous structure; Structure and properties; Dielectric properties

收稿日期Submitted date 2025-07-20;修回日期Revised date 2025-08-15;录用日期Accepted date 2025-09-19

*联系人,17673097640@163.com

引用本文:李桂全,刘雁,刘振东,等.环氧树脂/介孔纳米二氧化硅复合材料的固化行为及性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):49-54.

Citation: LI G Q, LIU Y, LIU Z D, et al. Study on curing behavior and properties of epoxy resin/mesoporous nano-silica composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 49-54.

环氧树脂(EP)作为一种性能优异的高分子材料[1-2]，凭借优异的黏接性、化学稳定性、机械强度和电绝缘性，在工业与民生领域占据重要地位[3-4]。从航空航天结构复合材料、电子电器封装绝缘，到建筑工程防腐涂料、胶黏剂，再到汽车零部件黏合、医疗器械涂层防护，EP广泛应用于多个关键领域，是现代工业不可或缺的基础材料，对推动技术进步与产业升级具有重要意义[5-6]。然而，EP仍存在若干固有缺陷，限制其应用范围[5-7]。EP固化后交联密度高，分子链段运动受限，导致脆性大、抗冲击性差，易发生脆性断裂[8-9]。普通EP玻璃化转变温度较低，高温下力学性能显著下降，耐热性不足[10-11]。在潮湿或腐蚀性环境中，EP耐水性和耐化学腐蚀性可能衰减，耐磨性与抗划伤性在部分工况下亦有待提升[12]。

纳米二氧化硅(SiO_2)凭借纳米尺寸效应、高比表面积及强界面作用，成为EP改性的重要材料[12-15]。SiO_2能够与EP形成特殊复合结构，通过界面脱黏、粒子拔出等机制吸收冲击能量，提升韧性、强度和硬度[12]；同时，SiO_2可限制基体分子链热运动，提高玻璃化转变温度和热分解温度，增强耐热性[13]。均匀分散的SiO_2能够使材料结构更致密，减少渗透路径，改善耐腐蚀性和耐磨性，优化电绝缘性、透光性等功能[14-15]，有望解决EP的核心缺陷。

现有研究中加入EP的SiO_2多为实心SiO_2，内部无孔，比表面积由粒径决定。新型介孔纳米二氧化硅($MSiO_2$)具有规则排列的纳米级介孔结构，比表面积更大、孔隙率更高，其介孔可作为“载体”负载功能性分子(如固化剂、阻燃剂等)。将$MSiO_2$引入EP体系，有望实现更强的界面相互作用、更优异的改性效果及更大的功能性改性潜力。本文对比研究常规纳米二氧化硅($NSiO_2$)与$MSiO_2$对EP固化动力学、力学性能及介电性能的影响规律，为制备高性能EP纳米复合材料提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

双酚A型EP，E51，山东德源化工有限公司；甲基四氢邻苯二甲酸酐(MTHPA)，质量分数99%，酸酐基含量≥41.0%，常熟佳发化学有限责任公司；$NSiO_2$，质量分数99.5%，50 nm，上海麦克林生化科技有限公司；$MSiO_2$，50 nm，费曼纳米材料科技有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Frontier，美国PerkinElmer公司；X射线光电子能谱仪(XPS)，ESCALAB 250，美国Thermo Fisher Scientific公司；透射电子显微镜(TEM)，Tecnai G2 F20，美国FEI公司；扫描电子显微镜(SEM)，Gemini 300，德国Carl Zeiss公司；全自动比表面及孔隙度分析仪，ASAP2460，美国Micromeritics公司；差示扫描量热仪(DSC)，DSC3+，瑞士Mettler Toledo公司；电子万能试验机，CMT6104，美国MTS Systems公司；宽频带介电阻抗弛豫光谱仪，Concept 50，德国Novocontrol有限责任公司。

1.3 样品制备

根据文献[12-14]报道的优化配混比例，将$NSiO_2$和$MSiO_2$分别以质量分数1%与EP混合，在室温下高速搅拌。之后，向体系中加入质量分数为20%的固化剂MTHPA，搅拌至获得均匀混合体系，从而得到混合物EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$。取样进行DSC测试。将混合物在120 ℃下固化6 h，对得到的样品进行力学性能和介电性能测试。

1.4 性能测试与表征

FTIR分析：分辨率为4 cm^{-1}，扫描次数为16，测试范围为4 000~450 cm^{-1}。测试前在真空烘箱内50 ℃干燥6 h。

TEM测试：配制质量浓度为0.1 g/L的$NSiO_2$和$MSiO_2$乙醇分散液，超声30 min后用移液枪滴加少量分散液于铜网上，红外灯充分烘干后进行测试。

SEM测试：将$NSiO_2$和$MSiO_2$的乙醇分散液超声30 min以上，待分散均匀后滴在硅片上，样品置于烘箱充分干燥后进行SEM表征。

XPS测试：真空度为5×10^{-7} Pa，单色Al Kα源，能量为1 486.6 eV，X射线源功率为150 W，高分辨率扫描时的通能为30 eV，电压为15 kV，束流为15 mA，CAE分析仪扫描方式，仪器功函数为4.2 eV。样品元素含量通过Advantage软件进行校准后分析得到。

氮气吸附-脱附测试：以N_2为分析气体，在77 K液氮条件下，测定$NSiO_2$和$MSiO_2$的饱和压力，获得氮气吸附-脱附等温线。根据Brunauer-Emmett-Tellter (BET)方程式，计算得到纳米粒子的比表面积；根据Barett-Joyner-Halenda (BJH)方法从吸附等温线计算得到纳米粒子的孔容及孔径分布。

DSC测试：称取5~8 mg样品，在N_2气氛下，分别将样品以5、10、15、20 ℃/min的升温速率加热至250 ℃，记录升温固化曲线。

力学性能测试：按照GB/T 1040.1—2025进行测试。在室温下以10 mm/min的拉伸速度测量EP及其复合材料的力学性能，样品尺寸20 mm×10 mm×4 mm。

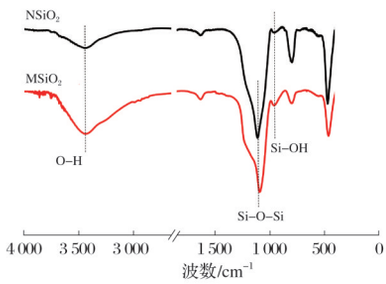
介电性能测试：按照IEC 60243—1和GB/T 1409—2006进行测试。在室温下测试样品的介电常数和介电损耗，频率范围10^1~10^5 Hz，样品尺寸25 mm×25 mm×4 mm。

2 结果与讨论

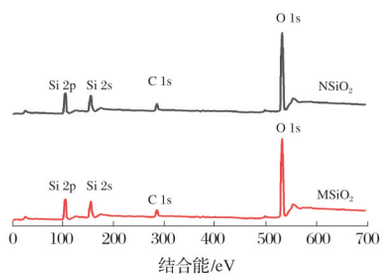
2.1 纳米SiO_2的化学结构表征

对$NSiO_2$和$MSiO_2$进行化学结构表征。图1为$NSiO_2$和$MSiO_2$的FTIR和XPS谱图。从图1a可以看出，1 078 cm^{-1}处的强峰对应Si—O—Si的非对称伸缩振动；959 cm^{-1}处的峰为Si—OH的弯曲振动；3 200~3 600 cm^{-1}处的宽峰则同时反映了Si—OH的存在以及少量来自水分子的—OH，是SiO_2的特征信号峰。从图1b可以看出，两种纳米粒子的XPS谱峰位置一致，均位于102.0、153.5、

284.8、531.9 eV处，分别对应Si 2p、Si 2s、C 1s和O 1s，元素含量与文献[15-17]中报道的相似，进一步验证了其化学结构的一致性和可靠性。



(a) FTIR 谱图



(b) XPS 谱图

图 1 $NSiO_2$和$MSiO_2$的FTIR和XPS谱图

Fig.1 FTIR and XPS spectra of $NSiO_2$ and $MSiO_2$

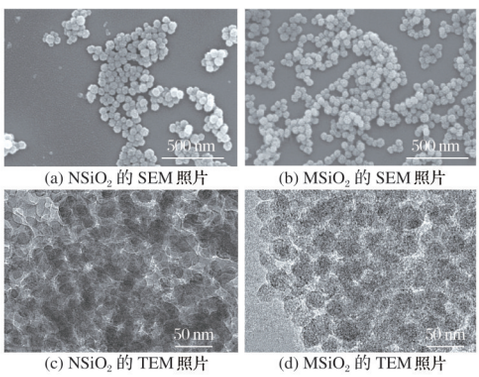
2.2 纳米SiO_2的形态表征

采用SEM和TEM对$NSiO_2$和$MSiO_2$的形貌结构进行表征。图2为$NSiO_2$和$MSiO_2$的SEM、TEM照片及粒径分布。其中，SEM测试的放大倍率是10万倍，TEM测试的放大倍率是40万倍。从图2a~图2d可以看出，$NSiO_2$是实心纳米颗粒，而$MSiO_2$呈现出排列均匀且高度有序的介孔结构。从图2e和2f可以看出，经Image J软件进行粒径统计分析，$NSiO_2$和$MSiO_2$的粒径接近，分别为(45.57±5.45) nm和(46.73±4.09) nm。

2.3 纳米SiO_2的比表面积测试

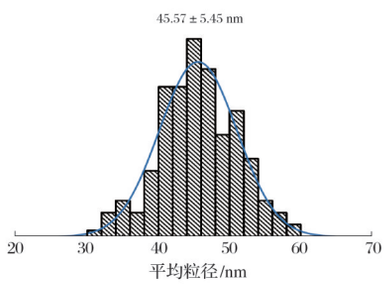
氮气吸附-脱附测试可以反映$NSiO_2$和$MSiO_2$的结构特征信息[18-19]。图3为$NSiO_2$和$MSiO_2$的氮气吸附-脱附等温线、比表面积、累积孔体积和孔径分布。从图3a和图3b可以看出，$NSiO_2$的可逆吸附-脱附曲线在相对压力(p/p_0)为1处吸附容量低，吸脱附曲线完全重合，无回滞环，对应无孔或大孔材料的III型等温线。$MSiO_2$的等温线表现出明显的脱附滞后现象，属于IV型等温线，说明纳米粒子具有内部孔结构。BET比表面积分析发现，$MSiO_2$的比表面积为399.43 m^2/g，是$NSiO_2$的7倍以上。

从图3c和图3d可以看出，$NSiO_2$的孔容主要来自超过30 nm的空间，这属于粒子间空隙而非孔结构本身。$MSiO_2$的介孔尺寸集中在2.74 nm附近，在该位置孔容曲线的阶梯状提升也说明其具有规则的介孔结构[20-21]。

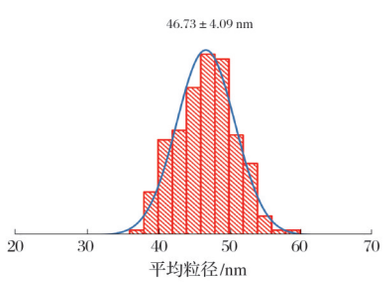


(a) $NSiO_2$的SEM照片 (b) $MSiO_2$的SEM照片

(c) $NSiO_2$的TEM照片 (d) $MSiO_2$的TEM照片



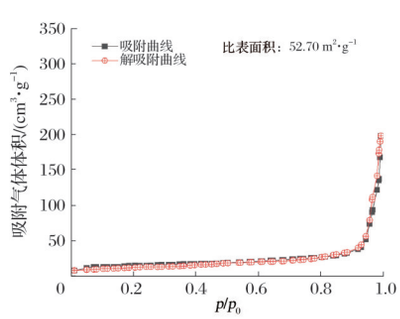
(e) $NSiO_2$的粒径分布



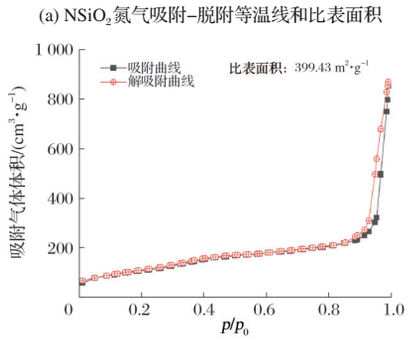
(f) $MSiO_2$的粒径分布

图 2 $NSiO_2$和$MSiO_2$的SEM、TEM照片及粒径分布

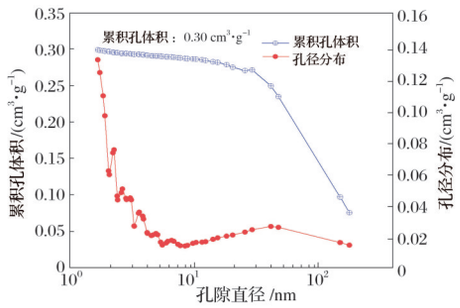
Fig.2 SEM and TEM images, and particle size distribution of $NSiO_2$ and $MSiO_2$



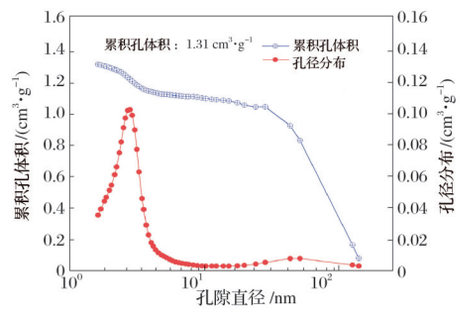
(a) $NSiO_2$氮气吸附–脱附等温线和比表面积



(b) $MSiO_2$氮气吸附–脱附等温线和比表面积



(c) $NSiO_2$的累积孔体积和孔径分布



(d) $MSiO_2$的累积孔体积和孔径分布

图3 $NSiO_2$和$MSiO_2$的氮气吸附-脱附等温线、比表面积、累积孔体积和孔径分布

Fig.3 Nitrogen adsorption desorption isotherms, specific surface area, cumulative pore volume and pore size distribution of $NSiO_2$ and $MSiO_2$

2.4 纳米SiO_2的分散性能研究

将两种SiO_2纳米粒子分别分散于乙醇溶液中并进行超声分散处理，然后静置15 d，再使用激光笔对SiO_2纳米粒子的分散液进行丁达尔效应的观察。图4为$NSiO_2$和$MSiO_2$在乙醇溶液中分散15 d后的丁达尔效应。从图4可以看出，两种分散液中透过的光路笔直且清晰，说明两种SiO_2纳米粒子的分散稳定性均较高，能够长时间在溶液中保持均匀分散的状态[22]。



(a) $NSiO_2$ (b) $MSiO_2$

图4 $NSiO_2$和$MSiO_2$在乙醇溶液中分散15 d后的丁达尔效应

Fig.4 Tyndall effect of $NSiO_2$ and $MSiO_2$ dispersed in ethanol solution for 15 d

2.5 EP/SiO_2复合材料的固化行为研究

将$NSiO_2$和$MSiO_2$分别加入EP中，制备EP/SiO_2复合材料。使用DSC热分析研究EP及其复合材料在不同升温速率下的固化行为。图5和表1为EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的固化曲线和固化峰值温度(T_p)。从图5和表1可以看出，随着SiO_2纳米粒子的加入，EP的T_p有所下降，EP/$MSiO_2$的降低幅度大于EP/$NSiO_2$。其中，在不同升温速率下，$MSiO_2$的加入对T_p的降低均最为明显。可能是因为$MSiO_2$的介孔结构赋予其远超$NSiO_2$的比表面积，提供了更多的硅羟基等可反应的活性位点[23]。硅羟基不仅可通过氢键与EP分子中的环氧基、羟基相互作用，降低反应活化能，还能直接与固化剂发生化学吸附，加速固化剂向EP基体的扩散与反应。因此，相比于$NSiO_2$，$MSiO_2$更能显著促进EP的固化反应，为高性能EP复合材料的低温快速固化提供可行途径。

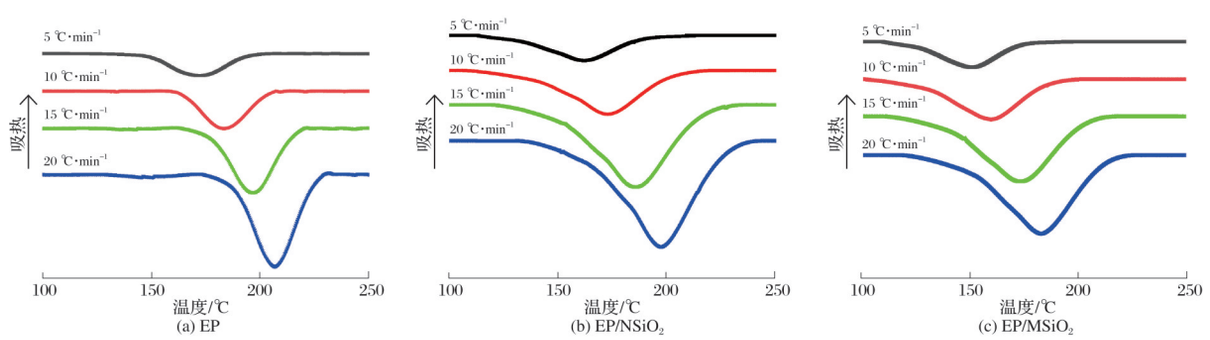


图5 EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的固化曲线

Fig.5 Curing curves of EP, EP/$NSiO_2$ and EP/$MSiO_2$ at different heating rates

表1 EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的T_p

Tab.1 T_p of EP, EP/$NSiO_2$ and EP/$MSiO_2$ 单位：K

样品	T_p			
	5 ℃·min⁻¹	10 ℃·min⁻¹	15 ℃·min⁻¹	20 ℃·min⁻¹
EP	445.4	456.0	470.0	479.4
EP/$NSiO_2$	435.2	446.0	458.4	470.4
EP/$MSiO_2$	423.5	432.9	446.8	455.7

EP复合材料的固化活化能可以使用Kissinger方法进行研究。对于非等温固化，固化活化能(E_a)、加热速率(β)和T_p之间的关系可以描述为：

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right)=\ln\left(\frac{AR}{E_a}\right)-\frac{E_a}{R}\times\frac{1}{T_p} \quad (1)$$

式(1)中：R为气体常数，取8.314 4 J/(mol·K)；A为指前因子(频率因子)，min^{-1}；E_a为固化活化能，kJ/mol；β为加热速率，K/min；T_p为固化峰值温度，K。

根据图5和表1中的数据，可得出$\ln(\beta/T_p^2)$与$1/T_p$的关系。图6为EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的$\ln(\beta/T_p^2)$-$1/T_p$曲线。其中，4个数据点对应5、10、15、20 ℃/min的加热速率。从图6可以看出，所有情况均呈现良好的线性拟合，表明实验数据符合Kissinger模型。通过斜率计算出3个样品的E_a。E_a越高，说明发生固化所需克服的能垒越高，即固化反应越难发生[24]。通过计算得到EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的E_a分别为63.4、57.7、49.5 kJ/mol。这说明$NSiO_2$或$MSiO_2$可降低EP固化过程的活化能垒，使固化反应更易进行。相较于$NSiO_2$，$MSiO_2$的加入进一步降低了E_a。这归因于$MSiO_2$的独特介孔结构，提供了更大的比表面积和更多的可反应的活性位点，对促进EP的交联固化反应起到了积极作用。

2.6 EP/SiO_2复合材料的力学性能测试

图7为EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的力学性能。从图7可以看出，$MSiO_2$和$NSiO_2$对EP的力学性能均有提升，但$MSiO_2$的改性效果更显著。在拉伸强度方面，EP基体的拉伸强度最低为52.2 MPa，EP/$NSiO_2$复合材料的拉伸强度为59.1 MPa，而EP/$MSiO_2$复合材料的拉伸强度达到67.5 MPa，明显高于前两者。这是因为$MSiO_2$具有更大的比表面积和规则的介孔结构，能与EP基体形成更强的界面相互作用，其表面丰富的硅羟基可与EP分子链通过氢键或化学作用结合，增强界面黏结力，从而在受力时更有效地传递应力，提升材料的拉伸承载能力。

弹性模量的变化趋势与拉伸强度相似，EP/$MSiO_2$的弹性模量为2 905 MPa，高于EP/$NSiO_2$ (2 648 MPa)和EP (2 588 MPa)。介孔结构使$MSiO_2$能更均匀地分散在EP基体中，通过限制分子链段运动、阻碍裂纹扩展发挥“骨架支撑”作用，提高材料的刚性。

洛氏硬度测试中，EP/$MSiO_2$的洛氏硬度为102.2，同样优于EP/$NSiO_2$ (95.6)和EP (88.4)，这得益于$MSiO_2$的高比表面积带来的更强界面增强效应以及介孔结构对局部应力的分散作用，使材料表面更难产生塑性变形，硬度得以提升。

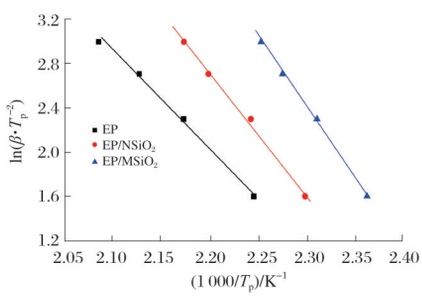


图6 EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的$\ln(\beta/T_p^2)$-$1/T_p$曲线

Fig.6 $\ln(\beta/T_p^2)$-$1/T_p$ curves of EP, EP/$NSiO_2$ and EP/$MSiO_2$

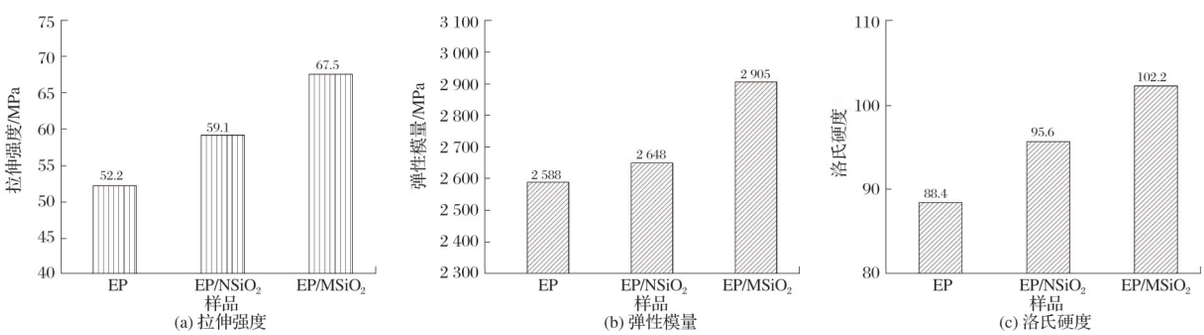


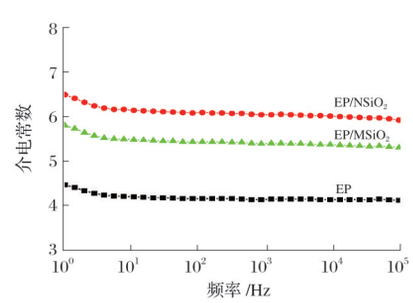
图7 EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of EP, EP/$NSiO_2$ and EP/$MSiO_2$

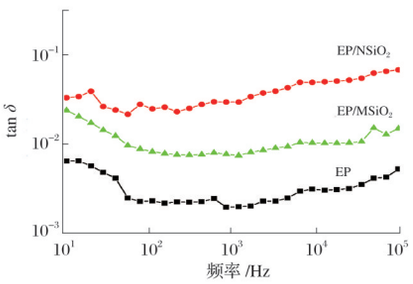
$MSiO_2$凭借其独特的介孔结构和表面特性，在增强EP复合材料的拉伸强度、弹性模量和洛氏硬度方面均表现出更优异的效果，印证了介孔纳米粒子对EP力学性能的高效改性作用。

2.7 EP/SiO_2复合材料的介电性能测试

图8为EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的介电常数和介电损耗。从图8可以看出，$MSiO_2$和$NSiO_2$对EP的介电常数与介电损耗均产生影响，且$MSiO_2$的改性效果更为突出。在介电常数方面，相较于EP，EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$复合材料的介电常数呈现一定变化，其中EP/$MSiO_2$的介电常数低于EP/$NSiO_2$。这可能是由于$MSiO_2$具有规则的介孔结构和更大的比表面积，其内部的介孔可降低复合材料整体的极性基团密度，减少偶极子极化作用，从而使得介电常数降低。在介电损耗方面，EP/$MSiO_2$的介电损耗低于EP/$NSiO_2$，略高于EP。这得益于$MSiO_2$与EP基体之间更强的界面相互作用，其表面丰富的硅羟基能与EP分子链通过氢键或化学作用紧密结合，限制分子链的运动，减少因分子链摩擦和偶极子弛豫所产生的能量损耗，进而降低介电损耗。



(a) 介电常数



(b) 介电损耗

图 8　EP、EP/$NSiO_2$和EP/$MSiO_2$的介电常数和介电损耗

Fig.8 Dielectric constant and dielectric loss of EP, EP/$NSiO_2$ and EP/$MSiO_2$

$MSiO_2$凭借其独特的介孔结构和表面特性，在优化EP复合材料的介电性能方面表现更优，这对于EP在电子电器等对介电性能要求较高的领域中的应用具有重要意义。

3　结论

本文对比研究了$NSiO_2$和$MSiO_2$对EP的改性效果，结果表明：$MSiO_2$因具有规则的介孔结构、更大的比表面积(399.43 m^2/g，约为$NSiO_2$的7倍以上)和更多表面活性基团(如硅羟基)，能够更显著地降低EP的T_p和E_a，促进固化反应。在力学性能方面，EP/$MSiO_2$复合材料的拉伸强度、弹性模量和洛氏硬度均高于EP/$NSiO_2$和EP。在介电性能方面，EP/$MSiO_2$的介电常数和介电损耗比EP/$NSiO_2$更低，略高于EP。综上所述，$MSiO_2$对EP的固化行为、力学性能和介电性能的改性效果优于$NSiO_2$。研究可为高性能EP纳米复合材料的制备提供参考。

参考文献

[1] 陈小文, 姜涛, 李文戈. 电子封装用环氧树脂基复合材料的研究进展[J]. 机械工程材料, 2024, 48(12): 1-8.

[2] 王鑫, 邵伟光, 陈俊, 等. 导电环氧树脂复合材料研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 140-145.

[3] 邱冠钧, 赵志超, 魏绪玲, 等. 橡胶作为环氧树脂增韧剂的研究进展[J]. 橡胶工业, 2024, 71(10): 795-799.

[4] 马海龙, 代明欣. 环氧树脂水泥在交通基础设施中的应用研究进展[J]. 热固性树脂, 2025, 40(1): 61-69.

[5] 吕锟, 冯玉军, 殷鸿尧. 环氧树脂潜伏型固化剂研究进展[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 136-147.

[6] 刘敏, 邹婷婷, 吴志俊, 等. 含氟环氧树脂在环氧塑封料中的应用研究[J]. 有机氟工业, 2025(2): 14-17.

[7] 李波, 樊磊, 白洁, 等. 环氧树脂/聚四氟乙烯超疏水涂层防冰性能研究[J]. 广东化工, 2025, 52(11): 1-3.

[8] 钟竹瑞, 郭聪聪, 尹国强, 等. 吸湿对不同环氧树脂及其预浸料性能的影响[J]. 化工新型材料, 2025, 53(增刊 1): 220-224.

[9] 黄成年. 高分子改性环氧聚合物混合料在道路工程中的应用[J]. 合成纤维, 2025, 54(6): 71-76.

[10] 樊若曦. MXene/PEI改性环氧树脂及其复合材料的宽温域性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.

[11] 樊开森, 付刚, 王栋, 等. 聚氨酯微胶囊/环氧树脂复合绝缘材料的自修复特性研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(4): 45-51.

[12] 张俊洋, 陈宇, 何昭贤, 等. 纳米二氧化硅在环氧树脂中的应用分析[J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(2): 1-3.

[13] 亓海霞, 徐阳光, 林锦昌, 等. 磁性二氧化硅纳米线的制备及其对环氧树脂的增韧效果[J]. 涂料工业, 2024, 54(8): 9-14.

[14] 韩晓莹, 王泽鹏, 李鑫炎. 不同粒径纳米二氧化硅对三元乙丙橡胶性能影响的分子动力学模拟[J]. 橡胶工业, 2024, 71(3): 163-170.

[15] 王奎, 李乾波, 王冲, 等. 纳米二氧化硅阻燃环氧树脂研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(8): 43-46.

[16] 张益铭, 杨明君, 卢雨晴, 等. 纤维素改性玄武岩纤维/环氧树脂复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料工业, 2025, 53(5): 91-98.

[17] 李卓函, 阴凯, 孙魄韬, 等. 无机$CaCO_3$寡聚体与有机硅氧烷改性环氧树脂电学-力学特性研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(6): 67-75.

[18] 许思远. Ir/CeO_2结构调控及其催化CO选择性还原SO_2机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2025.

[19] 宋阳, 张豪峰, 肖微, 等. 氮化硼晶须/环氧复合电介质的性能提升研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(8): 39-45.

[20] 杜博豪, 王梦沂, 刘来君, 等. GO负载ZIF-8粒径调控对环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 化工新型材料, 2024, 52(12): 124-127.

[21] 张豪峰, 石万里, 宋阳, 等. 氮化硼纳米片对环氧复合电介质的多目标性能协同提升研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(5): 30-41.

[22] 陈泽豪, 马浩, 丁海涵, 等. mATP-mAlOOH/EP复合材料的导热性及介电性能研究[J]. 化学工程师, 2025, 39(3): 96-99.

[23] 蔡程帆, 李超群, 张奇, 等. 环氧树脂固化工艺优化研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 60-63.

[24] 吉喆, 贠浩辰, 张康宁, 等. 低介电聚合物复合材料发展现状[J]. 塑料, 2023, 52(6): 105-110.