

树枝状二氧化硅/环氧树脂纳米复合材料的 制备及性能研究

罗小兵¹, 周江^{2*}, 刘振东¹, 邓飞远¹, 李桂全¹, 谢志辉², 周进², 彭浣钦²

(1. 西藏大唐扎拉水电开发有限公司, 西藏 昌都 854413;

2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为了制备综合性能优异的环氧树脂基复合材料, 本研究采用双模板法合成了树枝状纳米二氧化硅(DSiO₂), 并将其用于改性环氧树脂(EP)。通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X射线光电子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)及氮气吸附-脱附测试, 研究复合材料的结构与性能的关系。结果表明: 经硅烷偶联剂 Z-6040 改性后, DSiO₂ 在环氧树脂中的分散性优异。当 DSiO₂ 质量分数从 0 增至 0.9% 时, 复合材料的固化起始温度从 160.7℃ 降至 111.3℃, 峰值温度从 196.3℃ 降至 159.6℃; 拉伸强度从 24.2 MPa 提升至 53.6 MPa, 断裂伸长率从 10.5% 增至 13.5%, 洛氏硬度从 85.1 提升至 91.5。相比未改性 EP, DSiO₂/EP 复合材料的储能模量显著提高, 玻璃化转变温度(T_g)向高温方向移动, 热稳定性增强。

关键词: 环氧树脂; 二氧化硅; 树枝状孔隙结构; 力学性能

Preparation and properties study of dendritic silica/epoxy resin nanocomposites

Luo Xiaobing¹, Zhou Jiang^{2*}, Liu Zhendong¹, Deng Feiyuan¹, Li Guiquan¹,

Xie Zhihui², Zhou Jin², Peng Huanqin²

(1. Xizang Datang Zala Hydropower Development Co., Ltd., Cangdu 854413, China;

2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: To prepare epoxy resin-based composites with excellent comprehensive properties, this study synthesized dendritic nanosilica (DSiO₂) via a dual-template method and applied them to modify epoxy resin (EP). The relationship between structure and property of the composites was investigated by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and nitrogen adsorption-desorption tests. The results indicate that after modification with the silane coupling agent Z-6040, DSiO₂ exhibits excellent dispersibility in epoxy resin. As the mass fraction of DSiO₂ increases from 0 to 0.9%, the onset curing temperature of the composite decreases from 160.7℃ to 111.3, and the peak temperature decreases from 196.3℃ to 159.6℃; the tensile strength increases from 24.2 MPa to 53.6 MPa, the elongation at break increases from 10.5% to 13.5%, and the Rockwell hardness increases from 85.1 to 91.5. Compared with the unmodified EP, the DSiO₂/EP composites exhibit significantly increased storage modulus, a glass transition temperature (T_g) that shifts toward higher temperature, and enhanced thermal stability.

Key words: epoxy resin; silica; dendritic pore structure; mechanical properties

0 引言

环氧树脂(EP)作为一种高性能热固性树脂, 具有优异的力学性能、化学稳定性、电绝缘性及粘结性, 被广泛应用于电子封装、复合材料、涂料、胶粘剂等领域^[1-3]。然而, 纯环氧树脂存在脆性较高、抗冲击性能不足、高温下易发生形变等缺点, 限制了其在高端工程领域的进一步应用^[4-6]。为克服这些

不足, 通过纳米材料对环氧树脂进行改性已成为研究热点^[7-8], 其中纳米二氧化硅(SiO₂)因来源广泛、成本低廉且能有效提升材料强度与热稳定性, 被视为理想的改性填料^[9-12]。现有研究中, 用于环氧树脂改性的常规纳米二氧化硅多为实心结构, 其比表面积受粒径限制(通常仅为 50 m²/g 左右)^[13-15], 与环氧树脂基体的界面作用较弱, 且难以实现功能性负载,

改性效果存在瓶颈^[16-17]。相比之下,介孔二氧化硅凭借规则的纳米孔道结构、超高比表面积及可控的孔隙率,在复合材料领域展现出独特优势:一方面,其大比表面积可增强与基体的界面结合;另一方面,介孔结构可作为“微容器”负载固化剂、阻燃剂等功能性分子,实现材料性能的多功能调控。然而,目前关于介孔二氧化硅,尤其是具有特殊形貌的树枝状介孔二氧化硅对环氧树脂固化行为、力学性能及动态力学性能的系统研究仍较为匮乏,其改性机理尚未明确。基于此,本文采用双模板法合成具有中心-径向树枝状孔道结构的纳米二氧化硅(DSiO₂),通过硅烷偶联剂进行表面改性,提升其与环氧树脂的相容性。然后系统研究DSiO₂在环氧树脂中的分散性能,并探究其对复合材料固化行为、力学性能及动态力学性能的影响规律,揭示树枝状介孔结构与改性效果之间的构效关系,为制备高性能环氧树脂基复合材料提供理论依据与实验支持。

1 实验

1.1 主要原材料

双酚A型环氧树脂(EP),牌号为E51,德源化工有限公司;甲基四氢邻苯二甲酸酐(MTHPA),常熟市嘉发化工有限公司;硅烷偶联剂,牌号为Z-6040,美国道康宁公司;三乙醇胺(TEOA)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、水杨酸钠(NaSal)、正硅酸乙酯(TEOS)、无水乙醇、盐酸,均为分析级,成都科隆化学制品有限公司。

1.2 仪器设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),Frontier Discovery型,PerkinElmer公司;X射线光电子能谱仪(XPS),ESCALAB 250型,Thermo Fisher Scientific公司;透射电子显微镜(TEM),Tecnai G2 F20型,FEI公司;扫描电子显微镜(SEM),Gemini 300型,Carl Zeiss公司;全自动比表面及孔隙度分析仪,ASAP2460型,Micromeritics公司;差示扫描量热仪(DSC),DSC3+型,Mettler Toledo公司;电子万能试验机,CMT6104型,MTS Systems公司;动态力学测试仪(DMA),Q800型,TA Instruments公司。

1.3 树枝状纳米二氧化硅的合成

参考文献[18],使用双模板法制备单分散树枝状大孔纳米二氧化硅(DSiO₂)。首先将0.8 g三乙醇胺(TEOA)溶解在40 mL去离子水中。然后将混合溶液放置在80℃的油浴中,以500 r/min的转速连续

搅拌30 min。随后加入0.608 g十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)并搅拌1 h,再加入0.060 8 g水杨酸钠(NaSal)作为辅助模板,继续搅拌3 h。接着滴加6.4 mL正硅酸乙酯(TEOS)到溶液中并进行20 min的水解。将产物以15 000 r/min的速度离心15 min,并用乙醇洗涤3次,得到带有模板的树枝状纳米二氧化硅(记为DSiO₂-T)。使用盐酸-乙醇溶液(HCl质量分数为10%)对DSiO₂-T进行进一步纯化,在80℃下洗涤8 h,并重复此过程多次,直至完全去除CTAB。将产物置于50℃烘箱中干燥,烘干后研磨得到纯净的树枝状纳米二氧化硅(DSiO₂)。最后,使用硅烷偶联剂Z-6040对DSiO₂进行进一步的表面改性,得到最终产物。

1.4 DSiO₂/EP复合材料的制备

将DSiO₂与环氧树脂(EP)混合,在室温下高速搅拌。之后按EP质量的20%向体系中加入酸酐类固化剂MTHPA,并搅拌均匀以获得混合物。控制DSiO₂的加入量为EP和固化剂总质量的0.3%、0.6%、0.9%,所得样品分别命名为0.3DSiO₂/EP、0.6DSiO₂/EP、0.9DSiO₂/EP。随后对混合物进行DSC升温固化测试,在120℃下固化6 h,然后将得到的固化样品进行力学性能测试、动态力学性能测试和硬度测试。

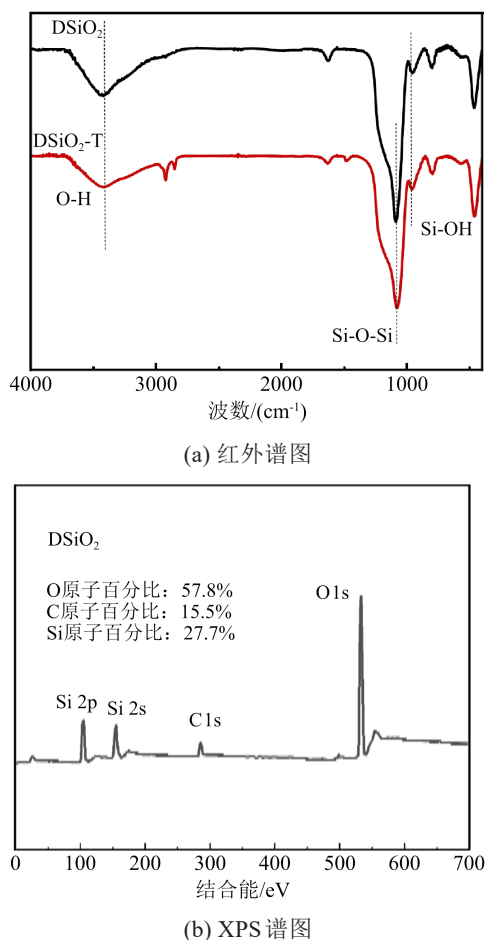
2 结果与讨论

2.1 DSiO₂的化学结构表征

图1是DSiO₂的FTIR和XPS谱图。从图1(a)可以看出,在1 078 cm⁻¹处的强峰对应于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以及少量来自水分子的-OH的存在。对于未除模板的DSiO₂-T,2 926 cm⁻¹和2 854 cm⁻¹处的峰对应于C-H的伸缩振动,而1 450 cm⁻¹处的峰对应于C-H的弯曲振动。上述结果说明了DSiO₂的成功合成,以及CTAB和NaSal模板的完全去除。从图1(b)可以看出,位于102.0、153.5、284.8、531.9 eV处的特征峰分别对应于Si 2p、Si 2s、C 1s、O 1s。该结果验证了所合成DSiO₂的化学结构的一致性和可靠性。

2.2 DSiO₂的形态表征

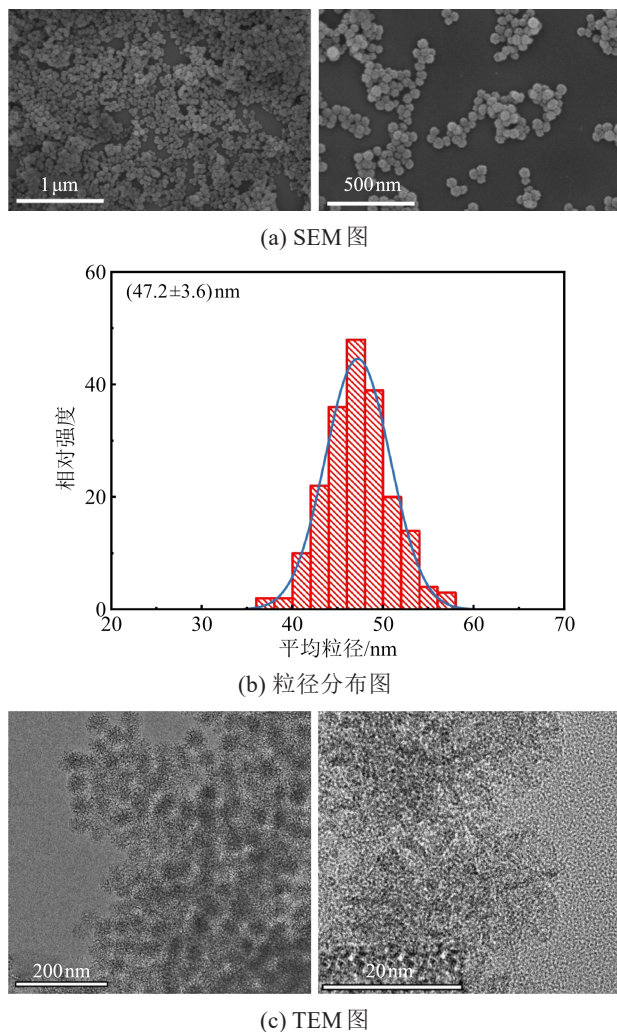
采用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对DSiO₂的形貌结构进行表征,并用软件进行粒径统计分析,结果如图2所示。从图2可以看出,DSiO₂的平均粒径为(47.2±3.6) nm。TEM图

图1 DSiO₂的FTIR和XPS谱图Fig.1 FTIR spectra and XPS spectra of DSiO₂

中呈现出清晰的中心-径向的树枝状孔道结构^[18],这种独特结构是由胶束渗透效应导致的,在合成过程中,后添加的辅助模板(NaSal)整合到主模板(CTAB)胶束内部,引发了胶束结构转变,硅前驱体(TEOS)沿模板吸附并生长,最终形成了具有向外辐射的树枝状孔道结构的SiO₂纳米粒子。

2.3 DSiO₂的比表面积测试

采用氮气吸附比表面测试(BET)表征DSiO₂的结构特征信息,结果如图3(a)所示。从图3(a)可以看出,DSiO₂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隙结构。通过BET比表面积分析,发现DSiO₂的比表面积为862.1 m²/g,远高于普通纳米SiO₂的比表面积(约为50 m²/g)。从图3(b)可以看出,DSiO₂呈现较宽的孔径分布和无突增的孔容变化,表明其具有分层次的孔隙结构,有助于提高材料的吸附性能以及表面积利用率。

图2 DSiO₂的微观形貌和粒径分布Fig.2 Microstructure and particle size distribution of DSiO₂

2.4 DSiO₂的分散性能研究

将DSiO₂分散在环氧树脂中,并进行超声分散处理,制备成DSiO₂质量分数分别为0.3%、0.6%、0.9%、1.2%的DSiO₂/EP混合物,使用激光笔对其进行照射,观察分散液的丁达尔现象,评价DSiO₂的分散性,结果如图4(a)所示。从图4(a)可以看出,对于DSiO₂质量分数为0.3%~1.2%的混合物,激光入射时都观察到清晰笔直的光路,说明DSiO₂在环氧树脂中分散均匀,且DSiO₂的分散尺寸在光波长量级附近。进一步将不同浓度的DSiO₂/EP混合物在室温下静置15天,考察长期放置时DSiO₂的分散稳定性。从图4(b)可以看出,当DSiO₂质量分数为0.9%时,经过15天的放置,DSiO₂依然可以稳定分散。当DSiO₂的质量分数更高时,其会逐渐发生团聚并倾向于沉积在容器底部。因此,在后续复合材料制备研究中,均选用0.9%作为DSiO₂的最大添加量。

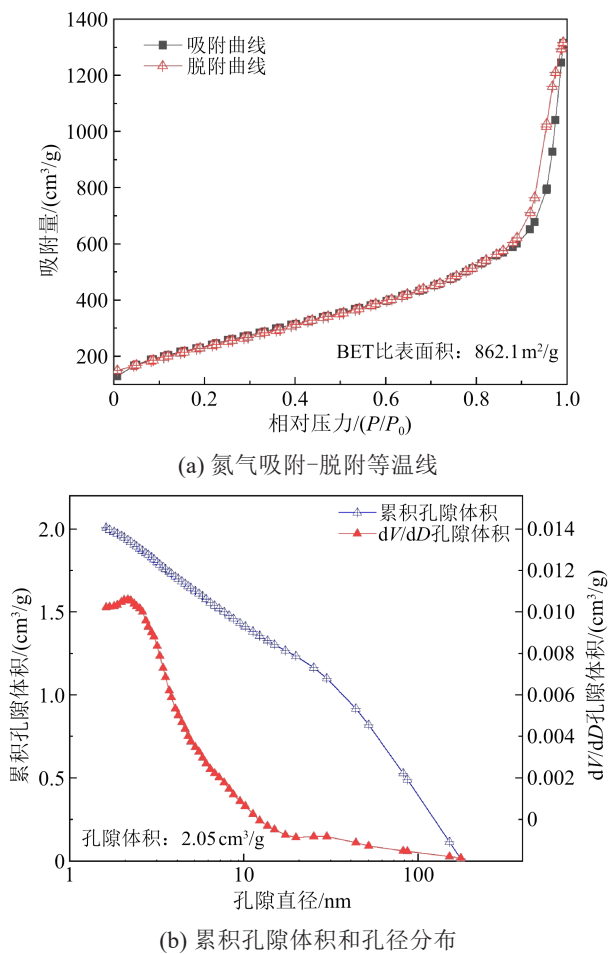


图3 DSiO₂的氮气吸附-脱附等温线、累积孔隙体积和孔径分布结果

Fig.3 Nitrogen adsorption-desorption isotherms, cumulative pore volume, and pore size distribution of DSiO₂

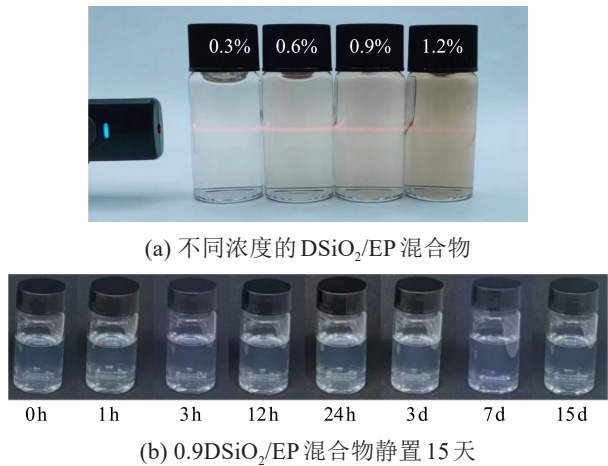


图4 不同浓度的DSiO₂/EP混合物静置照片

Fig.4 Images of DSiO₂/EP mixtures with different concentrations after standing

2.5 DSiO₂/EP复合材料的固化行为研究

使用DSC热分析研究EP及其复合材料的升温固化行为,固化曲线如图5所示,相关数据列于表1。

从图5和表1可以看出,所有样品的DSC固化曲线均呈现典型的放热峰,对应环氧树脂与固化剂MTHPA的开环聚合反应。随着DSiO₂添加量增大,放热峰整体向低温方向移动,表明固化反应在更低温度下即可发生并完成。

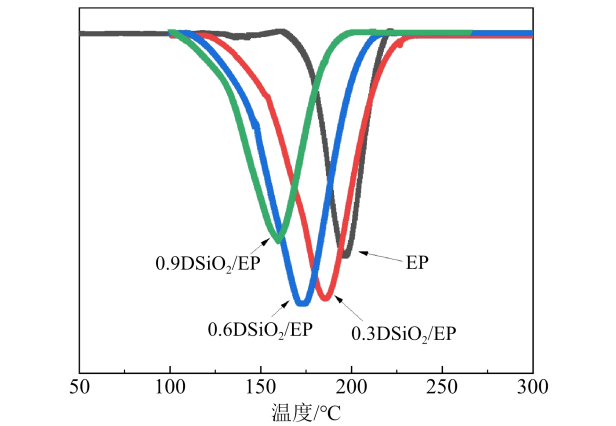


图5 EP和DSiO₂/EP复合材料的固化曲线

Fig.5 Curing curves of EP and EP/DSiO₂ composites

样品	固化特征温度/℃		
	起始温度	峰值温度	终止温度
EP	160.7	196.3	210.6
0.3DSiO ₂ /EP	133.1	185.6	214.1
0.6DSiO ₂ /EP	122.2	172.6	201.8
0.9DSiO ₂ /EP	111.3	159.6	187.2

随着DSiO₂质量分数从0增至0.9%,复合材料的固化起始温度降低49.4℃,固化峰值温度降低36.7℃,固化终止温度降低23.4℃,说明DSiO₂的添加量越大,对环氧树脂固化反应的促进作用越显著,使固化过程在更低温度下启动、达到反应高峰和结束。DSiO₂的添加能显著降低环氧树脂固化温度,可能源于其结构特性与界面作用的协同效应:其比表面积高达862.1 m²/g,经硅烷偶联剂Z-6040改性后,表面富含与环氧树脂相容性良好的基团,可与环氧树脂分子或固化剂MTHPA形成界面相互作用,为固化反应提供大量活性位点;同时,其树枝状介孔结构(孔径分布宽,孔容为2.05 cm³/g)可吸附固化剂MTHPA,提高局部固化剂浓度,加快反应速率;加之DSiO₂在EP中分散均匀(DSiO₂质量分数在0.9%以内时无明显团聚),避免了因局部填料聚集导致的反应不均,确保固化促进作用在整体体系中

的有效发挥,从而使固化反应在更低温度下即可发生并完成。

2.6 DSiO₂/EP复合材料的力学性能研究

对EP及其复合材料进行力学性能测试,结果如图6和表2所示。

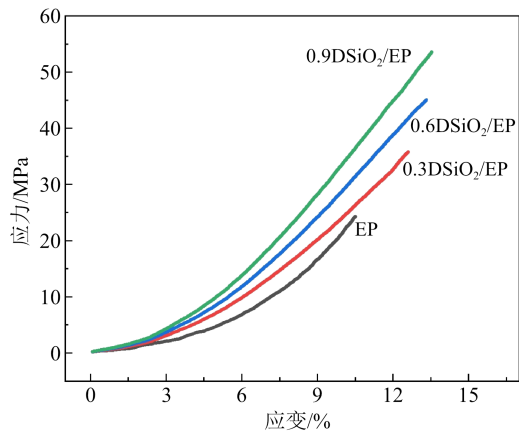


图6 EP和DSiO₂/EP复合材料的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of EP and DSiO₂/EP composites

表2 EP和DSiO₂/EP复合材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of EP and DSiO₂/EP composites

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	洛氏硬度
EP	24.2	10.5	85.1
0.3DSiO ₂ /EP	35.8	12.6	88.5
0.6DSiO ₂ /EP	45.0	13.3	90.4
0.9DSiO ₂ /EP	53.6	13.5	91.5

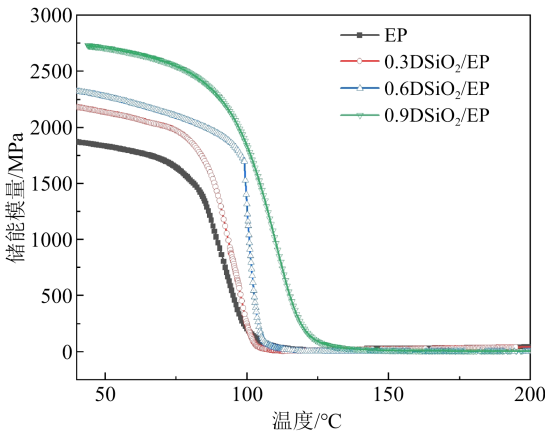
从图6和表2可以看出,随着DSiO₂添加量的增大,复合材料的力学性能呈现单调递增趋势。纯EP的拉伸强度为24.2 MPa,添加DSiO₂后,0.3DSiO₂/EP、0.6DSiO₂/EP和0.9DSiO₂/EP的拉伸强度分别提升至35.8、45.0、53.6 MPa,增幅分别为47.9%、86.0%、121.5%。纯EP的断裂伸长率为10.5%,0.3DSiO₂/EP、0.6DSiO₂/EP和0.9DSiO₂/EP的断裂伸长率分别增至12.6%、13.3%、13.5%,表明材料在提升拉伸强度的同时仍保持一定韧性。纯EP的洛氏硬度为85.1,0.3DSiO₂/EP、0.6DSiO₂/EP和0.9DSiO₂/EP的洛氏硬度分别提高至88.5、90.4、91.5,表明复合材料表面硬度随填料添加量增加而增强。DSiO₂对环氧树脂力学性能的显著提升,可能源于其结构优势与界面协同作用:基于其862.1 m²/g的高比表面积,经硅烷偶联剂Z-6040改性后,DSiO₂表面基团可与环氧树脂分子形成化学结合,从而增强界面粘结力以传递应

力;独特的中心-径向树枝状孔道结构可以通过机械互锁与基体紧密结合,在外力作用时分散吸收能量、减少裂纹扩展;DSiO₂在质量分数为0.9%以内时可在环氧树脂中均匀分散,无明显团聚,确保应力均匀传递,避免因团聚形成缺陷点,从而同步提升拉伸强度、韧性与硬度^[19-20]。

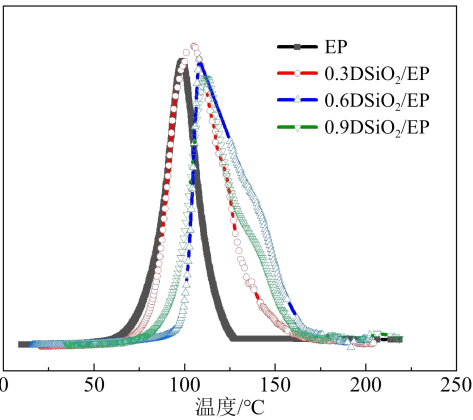
2.7 DSiO₂/EP复合材料的动态力学性能研究

通过分析EP及不同DSiO₂添加量复合材料的储能模量和损耗因子(tanδ)随温度的变化,探究DSiO₂对EP动态力学行为的影响,结果如图7所示。从图7(a)可以看出,所有样品的储能模量均随温度升高呈下降趋势,反映了高分子材料随温度升高从玻璃态向高弹态转变的特性,此时刚性降低。其中添加DSiO₂的复合材料储能模量显著高于纯EP,且随添加量增大而单调递增,表明DSiO₂的加入增强了材料的刚性和结构稳定性。

损耗因子(tanδ)曲线的峰值对应材料的玻璃化



(a) 储能模量



(b) tanδ

图7 EP和DSiO₂/EP复合材料的动态力学性能

Fig.7 Dynamic mechanical properties of EP and DSiO₂/EP composites

转变温度(T_g),反映分子链段运动的活跃程度。从图7(b)可以看出,随 DSiO_2 添加量增大, $\tan\delta$ 峰值向高温方向移动(T_g 升高),且峰值强度降低,表明 DSiO_2 与环氧树脂基体的强界面作用限制了分子链段的运动,使材料需在更高温度下才发生玻璃化转变,热稳定性提升。

动态力学性能优化的本质是 DSiO_2 的结构特性及其与基体界面协同作用的结果:其一,经硅烷偶联剂Z-6040改性后, DSiO_2 表面有机基团与环氧树脂分子形成稳固的化学结合,构建了“刚性粒子-柔性基体”的强界面结合层,该结合层可有效传递外力,减少温度变化过程中基体内部的应力松弛,从而显著提升储能模量;其二,独特的中心-径向树枝状孔道结构形成机械锚定效应,孔道内填充的环氧树脂固化后与孔壁紧密咬合,进一步增强了粒子与基体的界面粘结强度,限制了高分子链段的滑移与转动;其三,均匀分散的纳米粒子在基体中形成物理交联点,构建了三维网络支撑结构,这种结构在温度升高时可阻碍分子链段的协同运动,延缓玻璃化转变过程,使得 T_g 向高温偏移,同时降低 $\tan\delta$ 峰值强度,最终实现材料刚性与热稳定性的同步提升。

3 结论

本研究采用双模板法合成了树枝状纳米二氧化硅,并将其用于环氧树脂的改性研究,系统分析了复合材料的结构与性能的关系,具体结论如下:

(1)采用双模板法成功合成具有中心-径向树枝状孔道结构的 DSiO_2 纳米粒子;经硅烷偶联剂Z-6040改性后, DSiO_2 在环氧树脂中的分散性优异,在质量分数为0.9%以内时可稳定分散15天以上。

(2)固化动力学研究结果表明, DSiO_2 显著影响了环氧树脂的固化行为,随质量分数由0增至0.9%,复合材料的固化温度显著下降。

(3)力学性能测试结果表明, DSiO_2 显著提升了环氧树脂的力学性能,在 DSiO_2 质量分数为0.9%时,复合材料的拉伸强度由24.2 MPa提升至53.6 MPa,增幅达121.5%;断裂伸长率由10.5%增至13.5%;洛氏硬度由85.1提升至91.5,强度、韧性与硬度同步改善。

(4) DSiO_2 可有效增强环氧树脂的动态力学与热稳定性能,复合材料的储能模量显著提高,玻璃

化转变温度(T_g)向高温方向移动,损耗因子峰值降低,分子链段运动受限程度提升,材料刚性与热稳定性明显增强。

综上所述, DSiO_2 凭借高比表面积、独特树枝状介孔结构、良好分散性及强界面结合作用,在低添加量下可实现环氧树脂固化行为、力学性能与动态力学性能的协同优化,为高性能环氧树脂基绝缘复合材料的制备与工程应用提供了理论与实验支撑。

参考文献 References

- [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.
Chen Xiaowen, Jiang Tao, Li Wenge. Research progress on epoxy resin-based composite materials for electronic packaging[J]. Materials for Mechanical Engineering,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.
Wang Xin, Shao Weiguang, Chen Jun, et al. Research progress on conductive epoxy resin composites[J]. Plastics Science and Technology,2024,52(12):140-145.
- [3] 纪嘉骏,张增平,李俊辉,等.用于公路工程的环氧树脂密封胶的研究与应用进展[J].中国塑料,2025,39(1):63-74.
Ji Jiajun, Zhang Zengping, Li Junhui, et al. Research and application progress of epoxy resin sealant for highway engineering[J]. China Plastics,2025,39(1):63-74.
- [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.
Ma Hailong, Dai Mingxin. Research progress on the application of epoxy resin cement in transportation infrastructure[J]. Thermosetting Resin,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.
Lü Kun, Feng Yujun, Yin Hongyao. Research progress on latent curing agents for epoxy resins[J]. Materials Research and Application,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料中的应用研究[J].有机氟工业,2025(2):14-17,22.
Liu Min, Zou Tingting, Wu Zhijun, et al. Research on the application of fluorinated epoxy resin in epoxy plastic sealing materials [J]. Organo-Fluorine Industry,2025(2):14-17,22.
- [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.
Li Bo, Fan Lei, Bai Jie, et al. Research on the anti icing performance of epoxy resin/polytetrafluoroethylene superhydrophobic coating[J]. Guangdong Chemical Industry,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(S1):220-224.
Zhong Zhurui, Guo Congcong, Yin Guoqiang, et al. The influence of moisture absorption on the properties of different epoxy resins and their prepregs[J]. Chemical New Materials, 2025, 53

- (S1):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.
Huang Chengnian. Application of polymer modified epoxy polymer mixture in road engineering[J]. Synthetic Fiber in China, 2025, 54(6): 71-76.
- [10] 华晨曦, 张涛, 徐势轩, 等. 多级孔结构环氧树脂复合材料的3D打印制备与性能[J]. 塑料工业, 2025, 53(5): 172-178.
Hua Chenxi, Zhang Tao, Xu Shixuan, et al. 3D printing preparation and properties of epoxy resin composite materials with multi-level pore structure[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(5): 172-178.
- [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.
Fan Kaisen, Fu Gang, Wang Dong, et al. Study on the self-healing characteristics of polyurethane microcapsule/epoxy resin composite insulation materials[J]. Insulating Materials, 2025, 58(4): 45-51.
- [12] 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.
Wang Kui, Li Qianbo, Wang Chong, et al. Research on nano silica flame retardant epoxy resin[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(8): 43-46.
- [13] 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, 112.
Zhang Yiming, Yang Mingjun, Lu Yuqing, et al. Preparation and performance study of cellulose modified basalt fiber/epoxy resin composite materials[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(5): 91-98, 112.
- [14] 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.
Li Zhuohan, Yin Kai, Sun Potao, et al. Study on the electrical mechanical properties of inorganic CaCO_3 oligomers and organosiloxane modified epoxy resin[J]. Insulating Materials, 2025, 58(6): 67-75.
- [15] 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.
Zhang Junyang, Chen Yu, He Zhaoxian, et al. Application analysis of nano silica in epoxy resin[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2025, 54(2): 1-3.
- [16] 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.
Qi Haixia, Xu Yangguang, Lin Jinchang, et al. Preparation of magnetic silica nanowires and their toughening effect on epoxy resin[J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54(8): 9-14.
- [17] 谢志辉, 张跃, 梁智明, 等. 二氧化硅/氧化石墨烯杂化改性对环氧树脂固化动力学的影响[J]. 塑料工业, 2022, 50(12): 46-51.
Xie Zhihui, Zhang Yue, Liang Zhiming, et al. The effect of hybrid modification of silica/graphene oxide on the curing kinetics of epoxy resin[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(12): 46-51.
- [18] Guo Zhaoyang, Wu Liting, Wang Yang, et al. Design of dendritic large-pore mesoporous silica nanoparticles with controlled structure and formation mechanism in dual-templating strategy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(16): 18823-18832.
- [19] 张健, 刘贺千, 朱勇行, 等. 干式空心电抗器用环氧玻璃纤维复合材料协同增韧改性及性能研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(7): 43-50.
Zhang Jian, Liu Heqian, Zhu Yongxing, et al. Study on the synergistic toughening modification and properties of epoxy glass fiber composite materials for dry-type hollow reactors[J]. Insulating Materials, 2024, 57(7): 43-50.
- [20] 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.
Song Yang, Zhang Haofeng, Xiao Wei, et al. Research on the performance enhancement of boron nitride whisker/epoxy composite dielectric[J]. Insulating Materials, 2024, 57(8): 39-45.

收稿日期: 2025-08-14; 修回日期: 2025-09-29。

作者简介:

罗小兵(1978—), 男(汉族), 四川成都人, 工程师, 主要从事大型发电机机电建造相关研究;

通信作者: 周江(1991—), 男(汉族), 四川达州人, 高级工程师, 博士, 主要从事大型电力设备绝缘设计及研发相关工作。