

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.010

硅粉填充改性 GFRP 的力学性能及其增强机理

张庆教¹, 瞿立², 康少付^{1*}, 李进², 安百俊³, 李大同⁴, 赵良民⁵

(1. 宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学材料与新能源学院, 宁夏银川 750021;
3. 宁夏银星能源股份有限公司, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏龙源新能源有限公司, 宁夏银川 750011;
5. 宁夏机械工程学会, 宁夏银川 750001)

摘要:基于真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺,采用微米硅粉对玻璃纤维增强聚合物(GFRP)复合材料进行填充改性,探究硅粉质量分数对 GFRP 弯曲强度、短梁剪切强度和 V 型缺口梁面内剪切强度的影响规律,并通过扫描电子显微镜(SEM)和动态热机械分析仪(DMA)揭示其增强和耐热性机理。结果表明:当硅粉质量分数为 1.0% 时,复合材料弯曲强度、短梁剪切强度和面内剪切强度较未改性材料分别提高了 22%,23%,17.4%,玻璃化转变温度(T_g)提高了 3.8 °C;此时硅颗粒在树脂基体中分散较为均匀,与玻璃纤维黏附性较好,起到“机械啮合”作用,有效提升了材料强度。同时,均匀分散的无机粒子可引发裂纹偏转,延缓裂纹扩展及宏观裂纹的产生,从而提高复合材料的韧性。当硅粉质量分数进一步增大时,硅粉颗粒会发生团聚,减弱了纤维/树脂的界面结合,导致复合材料强度不增反降。无机粒子的引入增大了环氧树脂链的交联密度,提高了树脂体系的热容和热导率,进而提高了复合材料的耐热性。

关键词:玻璃纤维聚合物;无机粒子;增强机理;耐热性
中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

玻璃纤维增强聚合物(glass fiber reinforced polymer, GFRP)复合材料具有比强度高、比模量高、耐腐蚀、可设计性强等优点,被广泛应用于航空航天、轨道交通、海洋船舶、风电等领域^[1]。尤其是在全球能源危机和“双碳”目标背景下,GFRP 市场每年以 10% 的速度快速增长^[2]。随着应用领域的不断扩大,市场对 GFRP 的产品质量和附加值提出了更高要求,例如其强度和耐热性。无机粒子具有硬度高、刚度高、尺寸稳定性好、耐热性好等优点。利用无机粒子填充改性高分子材料,可以实现无机-有机材料性能的互补和优化^[3]。近年来,研究人员尝试将不同无机颗粒(如黏土(MC)^[4]、纳米碳酸钙颗粒^[5]、纳米二氧化钛颗粒(TiO_2)^[6]、微米级的氧化铝(Al_2O_3)^[7]、多壁碳纳米管(CNTs)^[8]、氧化石墨烯片(GO)^[9])与环氧树脂混合,从而使改性后的环氧

树脂复合材料的模量、断裂韧性和耐热性等性能得到改善。Ding 等^[10]将粒径为 20 nm、质量分数为 5% 和 10% 的 SiO_2 颗粒与环氧树脂共混,制备成碳纤维织物预浸料,并采用热压罐工艺制备了 SiO_2 颗粒改性碳纤维增强聚合物(CFRP)复合材料。结果表明,当 SiO_2 颗粒质量分数为 10% 时,复合材料的疲劳寿命提高了 1 倍多。目前,关于无机颗粒对玻璃纤维/树脂基复合材料体系改性效果的研究较少。同时,无机颗粒改性纤维/树脂基复合材料存在以下问题有待深入研究:一是无机粒子在基体树脂中的均匀分散问题;二是如何提高无机粒子与基体树脂的界面结合力;三是无机粒子填充改性基体树脂后,树脂体系黏度会降低,这使得树脂在浸渍高纤维体积分数的(60% 以上)的纤维预制体或者制备纤维增强复合材料时存在困难。

收稿日期:2023-06-11

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2020AAC03006);宁夏重点研发计划(引才专项)项目(2025BEH04004)

作者简介:张庆教(2001—),男,本科,主要从事纤维增强复合材料的研究(zhangqingaoa@163.com)。

* 通信作者:康少付(1982—),男,讲师,博士,主要从事先进复合材料的研究(shfkang@nxu.edu.cn)。

引用格式:张庆教,瞿立,康少付,等.硅粉填充改性 GFRP 的力学性能及其增强机理[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):70-76.

本文选用一种与玻璃纤维(表面经过硅烷型上浆剂处理)相容性较好的高活性硅粉作为填料,采用低成本的真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺制备了硅灰填充改性 GFRP,重点研究硅粉质量分数对玻璃纤维复合材料弯曲性能、面内剪切强度和短梁剪切强度的影响规律。通过扫描电子显微镜(SEM)分析硅粉在基体树脂中的分散性,揭示无机粒子增强纤维复合材料的增强增韧机理。同时,借助动态热机械分析仪(DMA)分析改性 GFRP 的耐热性,并揭示其耐热性机理。

1 材料与方 法

1.1 原材料

(1)纤维增强体:EMK430-600 型单向玻璃纤维布,面密度为 430 g/m²,玻璃纤维密度为 2.5 g/cm³,单层名义厚度为 0.3 mm,纤维布表面经硅烷型上浆剂处理。

(2)基体树脂:双酚 F 型环氧树脂(ML-5417A)和固化剂(ML-5417B),环氧树脂与固化剂的体积配比为 100:37。

(3)硅粉:将硅质量分数大于 99.9% 的多晶硅块体在真空电子束炉内,经定向生长得到沉积硅,然后再将沉积硅破碎、酸洗和球磨而得硅粉,由宁夏东梦新材料有限公司提供。使用前,将硅粉在真空干燥箱中干燥 12 h(70℃),经人工研磨后使用。

1.2 GFRP 层合板制备

硅粉填充改性 GFRP 层合板制备过程如下。

(1)硅粉与环氧树脂的共混。首先,利用环氧树脂固化剂低黏度的特性,将硅粉加入固化剂中,在室温下超声分散 60 min。然后,将盛有环氧树脂的烧杯放入水浴锅中加热至 40℃,以降低树脂黏度。接着,将含有硅粉的固化剂悬浊液倒入盛有环氧树脂的烧杯中,在高速搅拌器中搅拌 10 min。最后,将

上述共混环氧树脂体系置入真空罐内脱泡处理 5 min,备用。

(2)改性 GFRP 层合板的制备。按照[0/90]_{4s}铺层方式铺叠玻璃纤维织物,采用 VARTM 工艺将上述共混的树脂体系在真空条件下灌注到纤维预制体中。以 3℃/min 的速率升温至 50℃,保温 3 h,再升温至 100℃,保温 3 h,待充分固化后,取出层合板并按照相关力学性能测试标准制备标准试样。采用相同步骤,制备了未改性 GFRP 层合板(标记为 GFRP-None),以及硅粉质量分数分别为 0.5%,1.0%,1.5%,2.0%,2.5%(硅粉占共混环氧树脂体系的质量分数)的改性 GFRP 层合板(分别标记为 GFRP-0.5Si, GFRP-1.0Si, GFRP-1.5Si, GFRP-2.0Si, GFRP-2.5Si)。

1.3 测试与表征

利用数显游标卡尺测量试样厚度。依据标准 ASTM D3171^[11]测定层合板的纤维体积分数。参照标准 ASTM D7264^[12]进行三点弯曲试验,加载速率为 2 mm/min。按照标准 ASTM D2344^[13]进行短梁剪切实验,加载速率为 1 mm/min。依据标准 ASTM D5379^[14]测试复合材料的面内剪切强度,试样尺寸(长度×宽度)为 72 mm×20 mm,中心对角两侧开 90°的 V 型缺口,加载速度为 1 mm/min。以上实验均在万能材料试验机 MTS Exceed E42.503 上进行。表 1 给出了改性 GFRP 的测试实验结果。

利用激光粒度仪(马尔文 Mastersize 3000 型)测定硅粉粒径分布曲线,得到硅粉中位粒径 D_{50} 等参数。利用扫描电子显微镜(SEM)(日立 SU5000 型)对短梁剪切强度试样分层横断面进行观察,揭示硅粉改性 GFRP 的增强机理。利用动态热机械分析仪(耐驰 DMA 242E 型)分析 GFRP-None 试样和硅粉质量分数为 1% 的 GFRP-1.0Si 试样的耐热性。试样尺寸(长度×宽度)为 16 mm×10 mm,采

表 1 硅粉填充改性 GFRP 的测试实验结果

Tab. 1 Experimental results of GFRP modified by silicon powder

试样	平均厚度/mm	纤维平均 体积分数/%	弯曲强度/MPa	短梁剪切强度/MPa	面内剪切强度/MPa
GFRP-None	2.61	52.7	733±30	37±0.3	69±2.8
GFRP-0.5Si	2.63	52.3	762±16	41±1.1	77±1.5
GFRP-1.0Si	2.67	51.5	894±37	46±0.8	81±2.3
GFRP-1.5Si	2.69	51.2	865±61	44±1.1	78±3.1
GFRP-2.0Si	2.68	51.3	725±63	42±0.4	72±1.6
GFRP-2.5Si	2.71	50.8	683±47	38±0.4	70±1.0

用三点弯曲模式,测试温度范围 $-50\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,载荷频率为 1 Hz ,升温速率设定为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

2 结果与分析

2.1 硅粉颗粒的形貌及粒径分析

图 1 为硅粉的微观形貌图。由图 1a 可知,原始的硅粉颗粒形状不规则,粒度不均。由图 1b 可知,颗粒较大的硅粉颗粒实际上是由大量微米级和纳米级硅粉颗粒组成,这可能是由于硅粉长期堆置或者受潮而发生了团聚。图 2 为研磨后硅粉颗粒的 X 射线衍射(XRD)图谱。通过与 JCPDS 卡片比对可知,该硅粉的衍射峰位置与立方晶系硅(JCPDS No.89-5012)相匹配,且衍射峰尖锐,表明该硅粉杂质含量低,结晶性良好^[15]。图 3 为硅粉的粒径分布曲线。由图 3 可知,硅粉的中位粒径(D_{50})为 $12.9\text{ }\mu\text{m}$,表面积体积平均粒径($D_{[3,2]}$)为 $7.01\text{ }\mu\text{m}$ 。

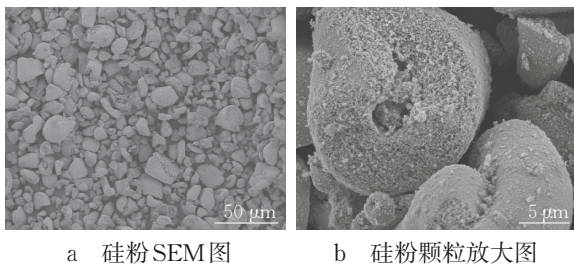


图 1 硅粉的微观形貌

Fig.1 Microscopic morphology of silicon powder

2.2 硅粉填充量对 GFRP 力学性能的影响

图 4 为不同硅粉质量分数对 GFRP 力学性能的影响。由图 4 可知,随着硅粉质量分数的增加,材料的弯曲强度、短梁剪切强度和面内剪切强度均呈现先增大后减少的趋势。当硅粉质量分数为 1.0% 时,材料的强度值达到最大值,与未改性的 GFRP 相比,其弯曲强度、短梁剪切强度和面内剪切强度的增幅分别为 22% , 23% , 17.4% 。这表明,硅粉填充改性 GFRP,并非填充量越大越好,而是存在一个最

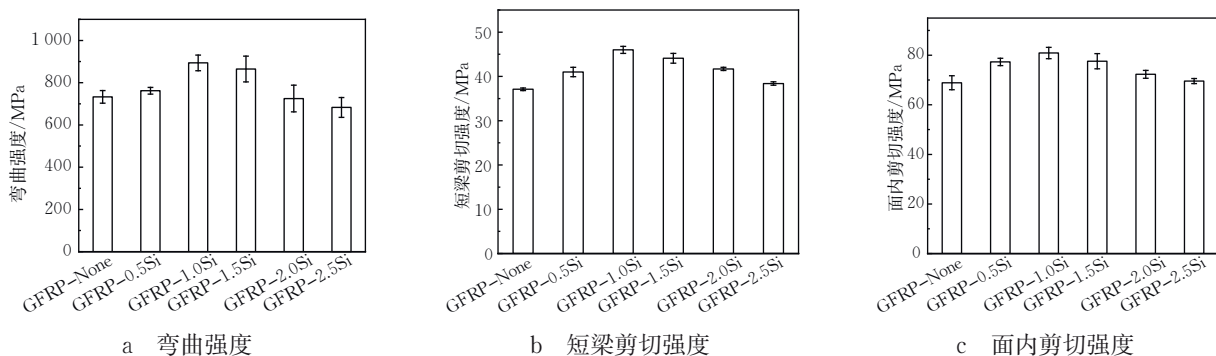


图 4 硅粉质量分数对 GFRP 力学性能的影响

Fig.4 Influence of silicon powder content on the mechanical properties of GFRP

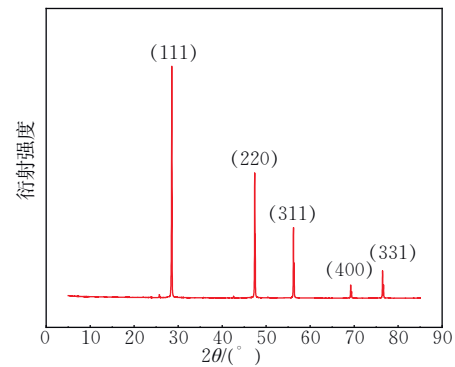


图 2 硅粉颗粒的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of silicon powder particles

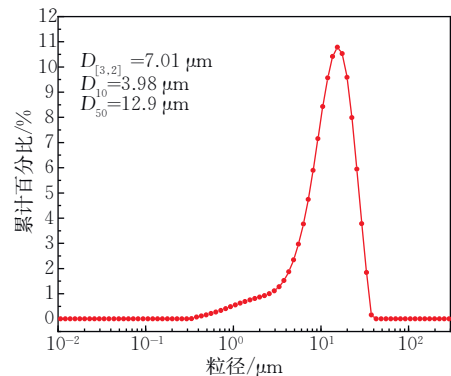


图 3 硅粉的粒径分布曲线

Fig.3 Size distribution curve of silicon powder particles

优填充量。

唐晋等^[16]认为:在微米颗粒填充改性复合材料时,填充量对增强效果影响较大;而利用纳米颗粒填充改性复合材料时,颗粒粒径对性能影响较大,且存在一个最佳的填充量。Thiagarajan 等^[17]也发现,当开心果壳质量分数为 1% 时,开心果壳颗粒填充改性的短切玻璃纤维/环氧树脂基复合材料的弯曲强度提高了 14% 。然而,随着填充量的进一步增加,弯曲强度反而下降,这一变化趋势与本文的研究结果一致。

为了进一步揭示其变化规律,图 5 给出了不同硅粉质量分数下硅粉颗粒在环氧树脂中分散状态的

SEM 图。由图 5 可知:当硅粉质量分数为 1.0% 时,硅粉颗粒在环氧树脂中分散较为均匀;而当硅粉质量分数为 2.5% 时,硅粉颗粒在基体树脂中出现了相互缠结和团聚现象。Alexandra 等^[18]研究了二氧化硅颗粒在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)树脂中的分散性对复合材料力学性能的影响。

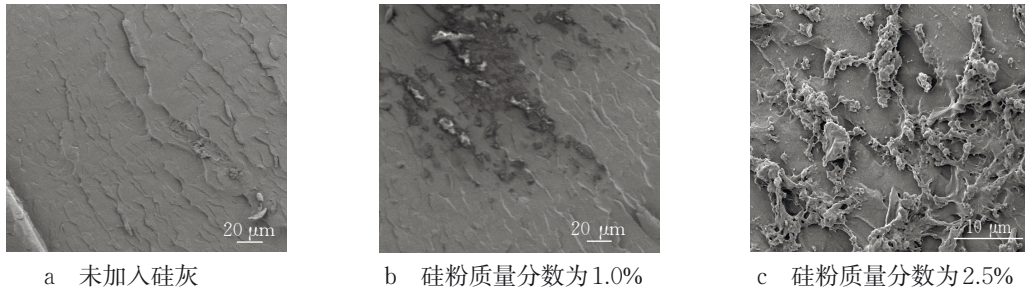


图 5 硅粉在环氧树脂体系中分散状态的 SEM 图

Fig.5 SEM image of the dispersed state of silica powder in the epoxy resin system

图 6 为硅粉改性前后 GFRP 短梁剪切试样层间断裂面的形貌。由图 6a 可知,未改性 GFRP 的纤维表面较为光整,基体树脂断裂面呈现出“河流状”脆性断裂特征,导致其力学性能较低。由图 6b 可知,当硅粉质量分数为 1% 时,玻璃纤维上黏附着少量粒径较小的硅粉颗粒,界面结合紧密。这得益于硅颗粒表面非配位原子多、活性高,易与环氧树脂

结果表明,分散良好的二氧化硅颗粒可使 SiO₂/PMMA 复合材料的杨氏模量提高 9%,最大承载应力提高 6%,而分散较差的二氧化硅颗粒则会降低材料的性能。因此,硅粉颗粒在环氧树脂中的团聚现象可能是导致其强度不增反降的原因之一。

中的官能团发生物理或化学作用,从而表现出良好的界面结合能力^[19]。硅颗粒的黏附使纤维表面粗糙化,在纤维拔出过程中产生“机械啮合”效应,有效提升了材料强度。然而,当硅粉质量分数为 2.5% 时,层间断裂面上出现少量团聚的硅粉颗粒(图 6c),与纤维的吸附交联作用较弱,这可能是复合材料性能不升反降的原因之一。

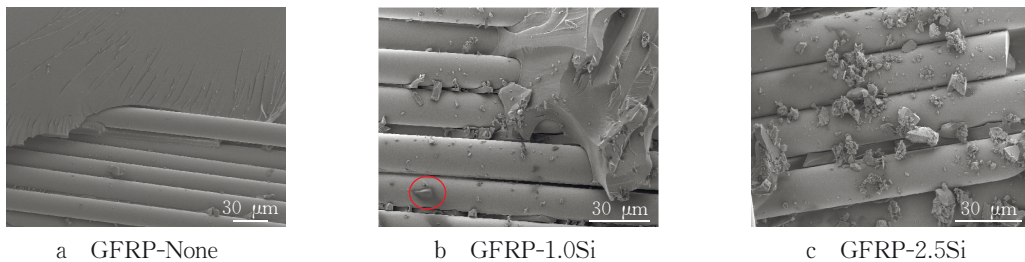


图 6 硅粉改性前后 GFRP 短梁剪切试样层间断裂面的形貌

Fig.6 Morphology of interlaminar fracture surface of GFRP short beam shear specimens before and after silicon powder modification

2.3 硅粉填充改性复合材料的增韧机理

图 7 为硅粉改性 GFRP 短梁剪切试样横断面的裂纹分层扩展形貌。由图 7a 可知,裂纹沿着纤维/树脂界面扩展,脱黏界面较为光滑圆整。由图 7b 可知,经硅粉改性后,黏附于纤维表面的刚性硅颗粒会引起界面处裂纹的偏转,使得纤维/树脂脱黏界面变得崎岖不平。

为了进一步揭示其增韧机理,图 8 给出了无机粒子填充改性纤维复合材料界面处的应力传递与裂纹扩展示意图。对于未改性复合材料,应力会通过树脂基体传递到纤维/树脂基体的界面处,裂纹沿着较为薄弱的纤维/树脂界面扩展,最终在较低的应力状态下发生纤维/树脂界面脱黏,如图 8a 所示。由

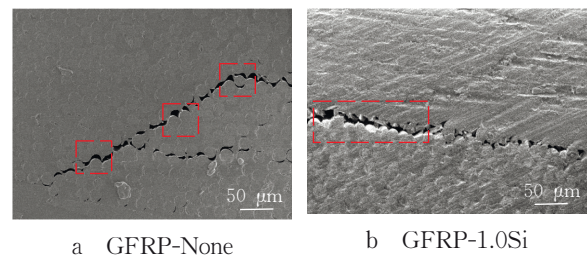


图 7 硅粉改性 GFRP 短梁剪切试样横断面的裂纹分层扩展形貌

Fig.7 Morphology of crack layering and propagation on the cross-section of the short-beam shear specimen of GFRP modified by silicon powder

图 8b 可知,经无机粒子填充改性后的复合材料,应力集中会得到缓解,裂纹在扩展过程中遇到无机刚

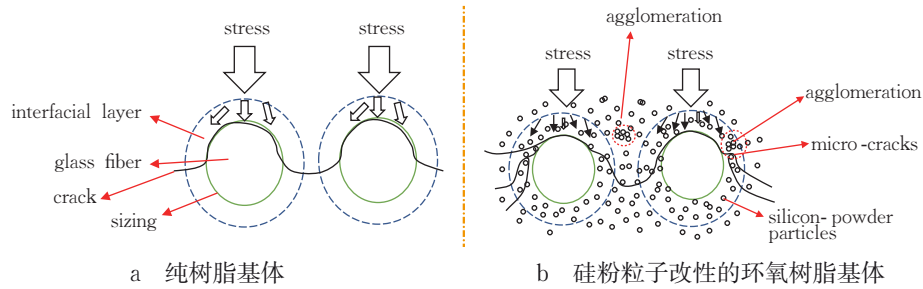


图 8 纤维/树脂基复合材料界面处应力传递与裂纹扩展示意图

Fig. 8 Schematic diagram of stress transfer and crack propagation at the interface of fiber / resin matrix composites

性颗粒时,其前缘会沿着无机颗粒发生偏转,并形成新的微裂纹(图 9)。这些微裂纹将耗散更多断裂能,抑制裂纹的延伸和宏观断裂的产生,进而提高复合材料的断裂韧性^[20-21]。

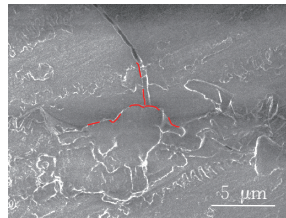


图 9 硅颗粒引起裂纹偏转

Fig. 9 Cracks deflection caused by silicon particles

2.4 硅粉填充改性复合材料的耐热性分析

耐热性是树脂基复合材料的一个重要性能指标,一般通过测定其玻璃化转变温度(T_g)进行评价^[22]。图 10 为硅粉改性前后 GFRP 的温度-损耗因子曲线。由图 10 可知,未改性复合材料的损耗因子 $\tan \delta$ 峰值温度为 132.9°C ,而经硅颗粒(质量分数为 1%)改性后材料的峰值温度提高至 136.7°C 。其可能原因如下:微/纳硅粉粒子的加入在基体树脂中起到交联点的作用,促进环氧树脂链的缠结,交联密度增大,玻璃化转变温度升高^[23-24];硅粉使环氧树脂体系热容增大,能够吸收更多的热量,引起复合材料表观 T_g 提高;硅材料具有高热导率和优异化学稳

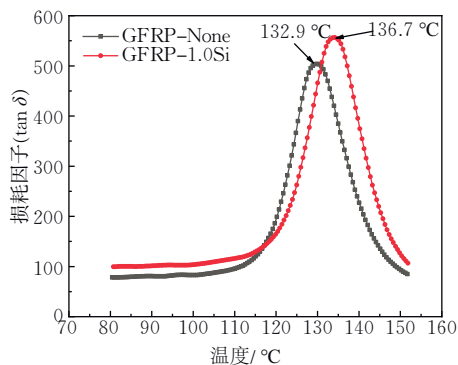


图 10 硅粉填充改性 GFRP 的温度-损耗因子曲线

Fig. 10 Temperature vs. loss factor curves of GFRP filled with silicon powder particles

定性,促进复合材料内部热耗散,进而提高改性 GFRP 材料的热稳定性^[25]。

3 结论

(1)无机颗粒填充改性纤维复合材料存在最优填充量。随着硅粉质量分数的增加(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%),改性 GFRP 的三点弯曲强度、短梁剪切强度和 V 型缺口梁面内剪切强度均呈现出先增大后减小的趋势。当硅粉质量分数为 1.0% 时,改性复合材料上述三项强度均达到峰值,较未改性 GFRP 分别提高了 22%, 23%, 17.4%。

(2)当硅粉质量分数较低时,无机颗粒在基体树脂中分散均匀,与玻璃纤维表面黏附性较好,通过“机械啮合”作用提升材料强度;但当硅粉质量分数超过一定量时,硅颗粒在基体树脂中发生团聚,降低了与纤维的吸附交联作用,这可能是导致复合材料力学性能下降的原因之一。

(3)与未改性的 GFRP-None 试样相比,GFRP-1.0Si 试样的玻璃化转变温度(T_g)提高了 3.8°C 。微/纳硅粉粒子在基体树脂中起到交联点的作用,有利于环氧树脂链的缠结,使交联密度增大, T_g 升高。此外,硅粒子会增加基体树脂体系的热容和热导率,进而提高了复合材料的热稳定性。

参考文献:

- [1] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展[J]. 航空材料学报, 2000, 20(1): 46-54.
- [2] Rajak D K, Wagh P H, Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review [J]. Polymers, 2021, 13(21): 3721.
- [3] 王慧, 王秀玲, 丁著明. 无机纳米粒子在环氧树脂增韧改性中的应用[J]. 热固性树脂, 2018(6): 55-65.
- [4] Basturk S B. Effect of methyl orange as the modifier on the mechanical, thermal, and thermo-mechanical properties of clay/epoxy composites [J]. Journal of Applied

- Polymer Science, 2022, 139(7): 51638.
- [5] Miranda T B, Silva G G. Hierarchical microstructure of nanoparticles of calcium carbonate/epoxy composites: Thermomechanical and surface properties [J]. Express Polymer Letters, 2020, 14(2): 179-191.
- [6] Goyat M S, Rana S, Halder S, et al. Facile fabrication of epoxy-TiO₂ nanocomposites: A critical analysis of TiO₂ impact on mechanical properties and toughening mechanisms [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40 (Pt A): 861-873.
- [7] Agrawal A, Satapathy A. Experimental investigation of micro-sized aluminium oxide reinforced epoxy composites for microelectronic applications [J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 517-526.
- [8] Martone A, Formicola C, Giordano M, et al. Reinforcement efficiency of multi-walled carbon nanotube/epoxy nano composites [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(7): 1154-1160.
- [9] 唐梦龙, 于思荣, 孙伟松, 等. 氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的制备与性能 [J]. 功能材料, 2016, 47(增刊1): 143-147.
- [10] Ding J L, Cheng L. Ultra-high three-point bending fatigue performance of nano-silica-reinforced CFRP [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 145: 106085.
- [11] American Society for Testing Materials. Standard test methods for constituent content of composite materials: ASTM D3171 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [12] American Society for Testing Materials. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM D7264/D7264M-15 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [13] American Society for Testing Materials. Standard test method for short beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates: ASTM D2344/D2344M-16 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [14] American Society for Testing Materials. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method: ASTM D5379/D5379M-12 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [15] 宋斌. 荧光硅纳米材料的制备、功能化及光学应用基础研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [16] 唐晋, 管晓纳, 何明骏, 等. 无机颗粒增强聚合物基复合材料耐磨性能影响因素研究进展 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(6): 1547-1557.
- [17] Thiagarajan A, Velmurugan K, Sangeeth P P. Synthesis and mechanical properties of pistachio shell filler on glass fiber polymer composites by VARIM process [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 610-614.
- [18] Siot A, Longuet C, Léger R, et al. Correlation between process and silica dispersion/distribution into composite: Impact on mechanical properties and Weibull statistical analysis [J]. Polymer Testing, 2018, 70: 92-101.
- [19] Liu Y L, Shen S J, Long L, et al. The research progress on the treatment of glass fiber surface by coupling agent [J]. Insulating Materials, 2010, 43: 34-39.
- [20] 何宏伟. 碳纤维/环氧树脂复合材料改性处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [21] 秦月. 纳米碳酸钙/玻璃微珠共增强碳纤维/尼龙6复合材料的制备与力学性能 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [22] Wang W, Han C Y, Wang X H, et al. Enhanced rheological properties and heat resistance of poly (propylene carbonate) composites with carbon fiber [J]. Composites Communications, 2020, 21: 100422.
- [23] 曲忠先, 焦剑, 王雪荣, 等. 无机纳米粒子填充改性环氧树脂研究进展 [J]. 热固性树脂, 2006, 21(1): 45-48.
- [24] 郑亚萍. 纳米 SiO₂ 对环氧树脂浇铸体性能的影响 [J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(3): 492-496.
- [25] Niu Y A, Zheng S J, Song P G, et al. Mechanical and thermal properties of PEEK composites by incorporating inorganic particles modified phosphates [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 212: 108715.

Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Silica Powder Modified GFRP

ZHANG Qingao¹, QU Li², KANG Shaofu^{1*}, LI Jin², AN Baijun³,
LI Datong⁴, ZHAO Liangmin⁵

(1.School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

3. Ningxia Yinxing Energy Co., Ltd., Yinchuan 750021, China;

4. Ningxia Longyuan New Energy Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;

5. Ningxia Society of Mechanical Engineering, Yinchuan 750001, China)

Abstract: This study employs the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process to modify glass fiber reinforced polymer (GFRP) using micron-sized silica powder. The influence of silica powder content on the flexural strength, short beam shear strength, and in-plane shear strength of the V-notched beam of GFRP was examined. The enhancement and thermal resistance mechanisms of the modified fiber composites are elucidated through scanning electron microscopy (SEM) and dynamic thermomechanical analyzer (DMA). The results show that at a silica power content of 1%, the flexural strength, short beam shear strength, and in-plane shear strength of the composite increase by 22%, 23% and 17.4%, respectively, compared to the unmodified material, while the glass transition temperature (T_g) rises by 3.8 °C. At this optimal silica content, the silica particles are well-distributed in the resin matrix and exhibit good adhesion to the glass fibers, facilitating a mechanical interlocking effect that enhances material strength. Additionally, uniformly dispersed inorganic particles promote crack deflection, delay crack propagation, and inhibit the formation of macro-cracks, thus improving the toughness of the composite. However, further increasing the silica power leads to particle agglomeration, which diminished the interfacial bonding between the fibers and the resin, resulting in a decrease in composite strength. Moreover, the introduction of inorganic particles enhances the crosslinking density of epoxy resin chains, improving the heat capacity and thermal conductivity of the resin system, consequently enhancing the heat resistance of the composite materials.

Keywords: glass fiber reinforced polymer (GFRP); inorganic particles; enhancement mechanism; thermal resistance

(责任编辑 王德平)