

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022010723081963

文章编号:1674-599X(2023)04-0054-08

引用格式:李传习,鄢亦斌,高有为,等. CFRP板及其浸渍胶性能的纳米增韧剂影响研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4):54-61.

Citation: LI Chuanxi, YAN Yibin, GAO Youwei, et al. Effect of nano tougheners on the properties of CFRP sheets and the impregnated resin[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4):54-61.

CFRP板及其浸渍胶性能的纳米增韧剂影响研究

李传习, 鄢亦斌, 高有为, 李御航, 司曙英胡

(长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:为研究纳米增韧剂对碳纤维增强复合材料(CFRP)板及其浸渍胶的改善效果,制备不同纳米增韧剂的浸渍胶和CFRP板,测试浸渍胶的黏度与力学性能及CFRP板的拉伸强度。研究表明:随着纳米增韧剂的掺入,浸渍胶黏度上升,CFRP板及浸渍胶的力学性能得到显著改善,其改善效果与纳米增韧剂的种类和掺量相关,其中,掺入质量分数为0.4%的纳米SiO₂增韧剂的CFRP板的拉伸性能最好。

关键词:碳纤维增强复合材料;浸渍胶;纳米增韧剂;力学性能

中图分类号:TB332

文献标志码:A

Effect of nano tougheners on the properties of CFRP sheets and the impregnated resin

LI Chuanxi, YAN Yibin, GAO Youwei, LI Yuhang, SIDU Yinghu

(Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control by Department of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the improvement effect of nano tougheners on CFRP sheets and the impregnated resin, the impregnated resin and CFRP sheets with different nano tougheners were prepared, and the viscosity and mechanical properties of the impregnated resin and the tensile strength of CFRP sheets were tested. The results showed that with the incorporation of nano tougheners, the viscosity of the impregnated resin increased and the mechanical properties of the CFRP sheet and the impregnated resin were significantly improved. The improvement effect was related to the type and amount of nano tougheners. The CFRP sheet containing 0.4% nano-SiO₂ toughener showed the best tensile properties.

Key words: carbon fiber reinforced polymers; the impregnated resin; nano tougheners; mechanical properties

碳纤维增强复合材料(carbon fibre reinforced plastic, CFRP)质量轻、强度高、比模量高,具有优异的抗疲劳性和耐腐蚀性等优点,被广泛用于航空、航天、风电叶片和汽车船舶等行业^[1-3],在土木工程领域也显示出较大的应用潜力^[4-6]。CFRP是由表面惰性较大的碳纤维和环氧树脂基体完全接触混合而成的,其层间韧性较弱^[7],要求设计的损伤容限较

大,不利于碳纤维性能的充分利用。纳米增韧剂的增韧性能优异^[8],对CFRP层间韧性有着较好的增强效果^[9-11]。CFRP的纳米增韧技术包括离位增韧和原位增韧。其中,离位增韧技术通过化学气相沉积法将纳米增韧剂接枝到碳纤维表面,该技术能够很好地改善碳纤维与环氧树脂的界面性能,但在接枝过程中会对碳纤维表面造成损伤,导致碳纤维性能

收稿日期:2022-01-07

基金项目:国家自然科学基金(52078059);湖南省交通科技项目(202016)

作者简介:李传习(1963—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。

下降,且不利于大规模生产;原位增韧技术是通过溶液共混法将纳米增韧剂与环氧树脂共混。该方法简单,制作方便,对碳纤维损伤小,已被许多商业公司用于工业规模化生产,该技术的关键是解决纳米增韧剂在环氧树脂中的分散问题^[12-14]。研究表明:采用原位增韧技术能够有效改善CFRP的性能。

ZENG等^[15]通过真空辅助树脂灌注(vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)制备CFRP板,研究表明:当增韧剂纳米SiO₂的质量分数为4%~12%时,浸渍胶本体断裂韧性呈线性增加;当增韧剂纳米SiO₂的质量分数为4%时,CFRP的断裂韧性的改善效果已达到饱和状态。JUMAHAT等^[16]通过缠绕技术制备CFRP板,发现增韧剂纳米SiO₂的体积分数为11.7%时,CFRP板的压缩模量从85.7 GPa增加到132.4 GPa。LUO等^[17]采用RFI技术制作CFRP板,结果显示当增韧剂纳米SiO₂掺量的质量分数为4%时,CFRP板最大拉伸强度和弯曲强度分别提升了86.30%、126.98%,电子扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)图像显示断口出现了“聚合物裂纹”和“剪切带”。TANG等^[18]采用VARTM制备CFRP板,提升了环氧树脂和CFRP板的拉伸强度,SEM的断口表明纳米SiO₂改善了碳纤维-环氧树脂界面的附着力,界面失效模式发生转变。GODARA等^[19]采用模压法制备CFRP板,再掺入质量分数为0.5%的碳纳米管(MWCNTs),明显提高了CFRP板的层间断裂韧性。尹君山等^[20]采用树脂传递模塑成型(resin transfer molding, RTM)制备CFRP板,研究发现MWCNTs桥接着碳纤维和环氧树脂,形成多尺度的增强体结构,从而提升了CFRP板的层间剪切强度。BEKYAROVA等^[21]采用VARTM制备了CFRP板,发现掺入SWCNTs的质量分数为0.5%时,CFRP板的层间剪切强度提高了40%。郑国栋等^[22]采用热熔法制备CFRP板,研究发现增韧剂MWCNTs-EDA的质量分数为1%时,CFRP板的压缩性能、弯曲性能和冲击后的压缩强度分别提高了14.7%、40.9%和20.6%。综上所述,原位增韧技术有效提升了CFRP板的性能。将纳米增韧剂均匀分散在浸渍胶中可以有效提升浸渍胶基体的性能,同时改善了碳纤维与浸渍胶的界面连接,从而对CFRP板起到增强增韧的效果。

在这些原位增韧研究中,需制作CFRP板的浸渍胶,若其纳米增韧剂的掺量过大,导致黏度过大,

过滤不畅,制作的CFRP不适用于真空辅助成型(vacuum assisted resin infusion, VARI)工艺。而高韧性CFRP适应VARI工艺,但学者们对其环氧树脂浸渍胶改性纳米增韧剂种类及掺量的研究鲜见。VARI具有工艺简单,成本低,制作方便,在室温下即可操作的优点^[23]。

本研究通过环氧树脂中纳米SiO₂和MWCNTs等增韧剂不同含量的单掺和混掺,分析增韧剂的种类和掺量对浸渍胶本体黏度和力学性能的影响,并采用VARI工艺制作CFRP板,以拉伸强度为指标,分析不同纳米增韧剂对CFRP板性能的影响,为在VARI工艺下对CFRP板原位增韧的纳米增韧剂的选取提供参考。

1 试验

1.1 试验材料与仪器

1) 试验材料。

CFRP布为赛科欧加固材料厂300 g/m²的一级CFRP布;GE7118A/7114B环氧树脂浸渍胶由惠柏新材料科技(上海)股份有限公司生产;纳米SiO₂由上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产,粒径为15 nm;MWCNTs由成都中科时代纳能科技有限公司生产,外径为4~6 nm,长度为10×10⁻³~20×10⁻³ mm;KH-560偶联剂由南京创世化工助剂有限公司生产;Sika30结构胶黏剂由德国西卡公司生产;真空辅助成型辅材由常州桦立柯新材料有限公司生产;搭接试件的钢板采用中铁宝桥公司生产的桥梁结构钢Q345D。

2) 试验仪器。

数字式黏度计NDJ-8S,超级恒温槽,由上海衡平仪器仪表厂生产;程式恒温恒湿试验箱JW-2009由上海巨为仪器设备有限公司出品;新芝系列超声波细胞粉碎机GY98-3N由宁波新芝生物科技股份有限公司生产;水切割机由奥拓福水刀有限公司出售;高低温拉力试验机由湖南兰思仪器有限公司出售;高低温力学测试系统WDW-300C由上海华龙测试仪器有限公司出售。

不同编号的浸渍胶中纳米增韧剂的种类和质量分数见表1。其编号形式为“S*M*”,S代表浸渍胶中掺有增韧剂纳米SiO₂,S后面的数字表明其掺量与加纳米增韧剂后的环氧树脂的重量比(×1 000);M

代表浸渍胶中掺有增韧剂 MWCNTs, M 后面的数字表明其掺量与加纳米增韧剂后的环氧树脂的重量比($\times 1\ 000$)。例如: S3M1 浸渍胶, 表明该胶中掺有

质量分数为 0.3% 的纳米 SiO_2 和质量分数为 0.1% 的 MWCNTs, 即每 99.6 g 环氧树脂(浸渍胶 A 组分)中掺入 0.3 g 纳米 SiO_2 和 0.1 g MWCNTs。

表 1 各浸渍胶的纳米增韧剂的种类和质量分数及制作 CFRP 板编号

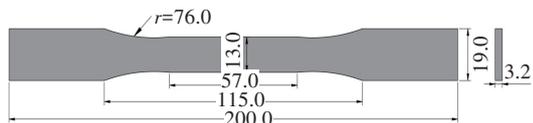
Table 1 Type and mass fraction of nano tougheners for the impregnated resin and number of the CFRP plates %

浸渍胶编号	纳米 SiO_2 质量分数	MWCNTs 质量分数	浸渍胶编号	纳米 SiO_2 质量分数	MWCNTs 质量分数
S0M0	0.0	0.0	S0M6	0.0	0.6
S2M0	0.2	0.0	S3M1	0.3	0.1
S4M0	0.4	0.0	S2M2	0.2	0.2
S6M0	0.6	0.0	S1M3	0.1	0.3
S8M0	0.8	0.0	S4M2	0.4	0.2
S10M0	1.0	0.0	S3M3	0.3	0.3
S0M2	0.0	0.2	S2M4	0.2	0.4
S0M4	0.0	0.4			

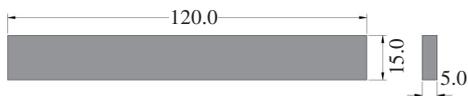
1.2 试件设计与制备

1.2.1 浸渍胶及其拉伸和弯曲试件

拉伸试件按 ASTM D638-10 标准制作, 每组试件取 5 个有效数据。弯曲试件按《树脂浇铸体弯曲性能试验方法》(GB/T 2570—1995) 标准制作, 每组试件取 5 个有效数据。拉伸和弯曲试件的尺寸大小如图 1 所示。在图 1 中, r 为圆弧半径。



(a) 拉伸试件



(b) 弯曲试件

图 1 浸渍胶拉伸和弯曲试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of the tensile and bending specimens of the impregnated resin(unit:mm)

试件的制作流程为: 先按配合比称取环氧树脂、纳米增韧剂和偶联剂, 人工搅拌 5 min, 将纳米增韧剂初步分散在环氧树脂中; 再将环氧树脂、纳米增韧剂和偶联剂的初步混合物置于超声波细胞粉碎机中, 超声分散 2 h, 分散完成后, 水浴冷却至室温; 然后按比例加入固化剂, 并充分搅拌均匀, 配成浸渍胶、将形成的浸渍胶倒入涂有脱模剂的拉伸和

弯曲模具中, 静置 2 h。最后, 将模具放入恒温恒湿箱内, 对试件进行固化, 固化条件为 $50\text{ }^\circ\text{C}/4\text{ h}+70\text{ }^\circ\text{C}/6\text{ h}$, 固化完成后, 得到浸渍胶拉伸试件和弯曲试件。

1.2.2 CFRP 板

试验过程中, CFRP 板采用四层 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的 CFRP 布, 按 0° 方向铺设, 通过 VARI 工艺制作而成。VARI 是一种新型的低成本复合材料成型技术, 利用真空负压带动低黏度树脂的流动, 实现树脂对纤维及其织物的浸渍^[18-19]。配置的浸渍胶通过真空负压浸润 CFRP 布, 制出不同增韧剂浸渍胶的 CFRP 板。试验装置如图 2 所示。



图 2 CFRP 板的 VARI 成型装置

Fig. 2 VARI molding device for CFRP plate

VARI 工艺的具体流程为:

- 1) 取一块钢化玻璃, 置于平面, 用酒精清洗表面后, 前后涂抹三层脱模剂;
- 2) 在玻璃板上, 依次铺放四层 CFRP 布、导流网、脱模布、螺旋管、注胶座、真空袋, 用密封胶将真空袋与玻璃板密封贴实;
- 3) 连接树脂容器-真空管-密封装置-真空管-

树脂收集器-真空管-真空泵;

4) 检查装置的气密性,保证装置的密封性;

5) 注胶,将配置好的浸渍胶注入密封装置,注胶完成后夹紧真空管夹;

6) 将制品置于恒温恒湿箱内进行固化;

7) 脱模,得到 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times t\text{ mm}$ (t 为VARI成型的板材厚度,取决于CFRP布层数和树脂含量)的试件。同一板材的CFRP板在不同位置的厚度略有差异,用水切割机按试件需求的形状大小对CFRP板进行切割处理。

根据制作CFRP浸渍胶纳米的增韧种类和掺量的不同,制作不同种类的CFRP板。其编号是在浸渍胶编号的前面加一个前缀“C-”,如:“C-S0M0”、“C-S2M0”。根据浸渍胶的黏度及其力学性能试验结果,制作了10种CFRP板,其编号分别为C-S0M0、C-S0M4、C-S2M0、C-S0M6、C-S4M0、C-S3M1、C-S6M0、C-S2M2、C-S0M2、C-S1M3。

1.2.3 CFRP板拉伸试件

CFRP板拉伸试件的长度和宽度参照ASTM-D3039M标准,确定为 $250\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,通过水切割机制作CFRP板,每种CFRP板拉伸试件制作5个。

为避免在试验过程中出现试件打滑现象,用铝片对拉伸试件进行锚固,铝片尺寸大小为 $50.0\text{ mm}\times 25.0\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 。先用壁纸刀对铝片表面划下 $\pm 45^\circ$ 的划痕,用砂纸对拉伸试件两端进行 $\pm 45^\circ$ 的角度打磨,增大铝片和拉伸试件表面的粗糙度,防止试件在试验过程中打滑;再用酒精清洗掉铝片和试件表面的灰尘,将清洗好后的铝片用Sika30结构胶胶粘在试件两端,通过使用细小钢珠将胶层厚度控制在 1 mm ;最后将其放置于室温下固化7 d。锚固好后的拉伸试件如图3所示。

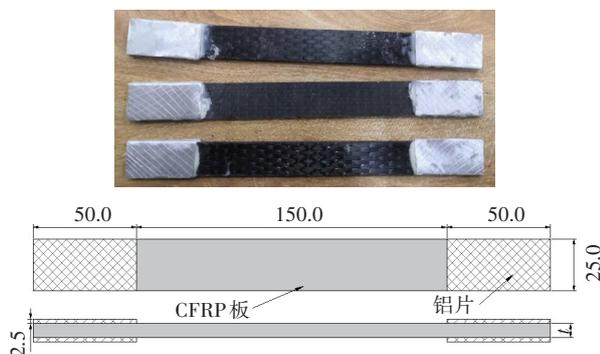


图3 锚固好的CFRP板拉伸试件(单位:mm)

Fig. 3 The anchored tensile specimen of CFRP plate (unit:mm)

1.3 试验方法

1.3.1 浸渍胶黏度试验

浸渍胶中掺入纳米增韧剂会显著增加其黏度^[16-17],而低黏度是VARI工艺的关键条件之一,为确保黏度满足工艺要求,测定 25°C 下掺入纳米增韧剂后浸渍胶的黏度。再将超声分散后的浸渍胶水浴冷却至室温,加入固化剂,充分搅拌均匀。最后将树脂置于超级恒温槽内加热至 25°C ,用数字式旋转黏度计测量其黏度,连续测量三次,取其平均值。为避免其他因素对黏度的影响,每组试样的测定过程保持一致,包括水浴冷却时间、搅拌时间、加热时间等。测量装置如图4所示。



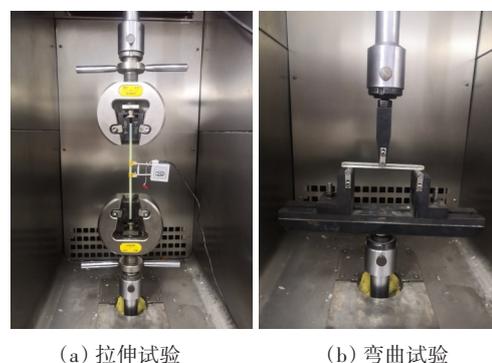
图4 浸渍胶黏度测量试验

Fig. 4 Viscosity measurement test of the impregnated resin

1.3.2 浸渍胶力学性能试验

采用50 kN电子万能试验机,测试浸渍胶的拉伸性能。使用夹具夹紧试件上下端,试件与夹具位于同一竖直线,并垂直于地面,安装好引伸计,然后以 2 mm/min 的速度连续、均匀加载直至破坏。

采用50 kN电子万能试验机,测试浸渍胶的弯曲性能。试件垂直于加载中心线放置,且试件中心点与加载点重合,其左、右各悬出 10 mm ,然后,以 2 mm/min 的速度连续、均匀加载,直至破坏。试件的基本力学性能试验装置如图5所示。



(a) 拉伸试验

(b) 弯曲试验

图5 浸渍胶拉伸和弯曲试验

Fig. 5 Tensile and bending test of the impregnated resin

1.3.3 CFRP板拉伸强度试验

采用300 kN准静态拉伸试验机,测试CFRP板

的拉伸性能。调整试件,使其中心线垂直于地面,并与夹具位于同一竖直线上,安装引伸计,然后,以5 mm/min的速度连续、均匀地加载直至破坏,试验装置如图6所示。



图6 CFRP板拉伸性能试验

Fig. 6 Tensile properties test of CFRP plate

2 试验结果与分析

2.1 不同纳米增韧剂的浸渍胶黏度

25 °C下不同纳米增韧剂浸渍胶的黏度变化如图7所示。从图7可以看出,随着纳米增韧剂掺量的增加,浸渍胶的黏度逐渐变大;相同掺量下,单掺MWCNTs的浸渍胶黏度高于单掺纳米SiO₂的浸渍胶黏度,混掺纳米增韧剂的浸渍胶黏度高于单掺纳米增韧剂的浸渍胶黏度,且同掺量下混掺时,随着MWCNTs比重的增加,浸渍胶的黏度有所增加。其主要原因是MWCNTs细长的管状结构与浸渍胶接触面积大,难以流动,转子转动时会受到较大的黏滞阻力,使得同掺量下MWCNTs比SiO₂对浸渍胶黏度的影响更明显;混掺时,球形的纳米SiO₂吸附在管状的MWCNTs上,纳米SiO₂、MWCNTs和浸渍胶三者之间的交联更为紧密,引起更大的黏滞阻力,同样的掺量,在纳米SiO₂和MWCNTs的协同作用下的浸渍胶黏度比单掺时的更高,且这种协同作用随着MWCNTs掺量的增加而增强。

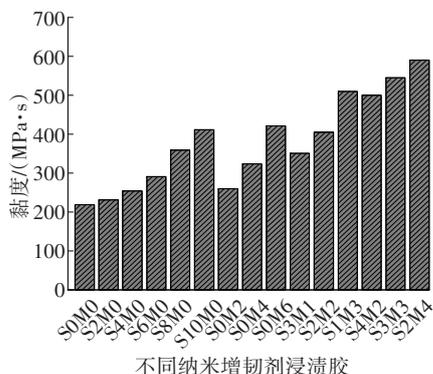


图7 不同纳米增韧剂与浸渍胶黏度的关系

Fig. 7 Relationship between different nano tougheners and the impregnated resin

2.2 浸渍胶力学性能

不同纳米增韧剂浸渍胶的拉伸强度变化如图8所示。从图8可以看出,当单掺纳米增韧剂时,随着纳米增韧剂掺量的增加,浸渍胶的拉伸强度先上升后下降。当掺量的质量分数为0.4%时,单掺SiO₂或MWCNTs的浸渍胶的拉伸强度都达到最大值,分别为64.65 MPa(试件S4M0)、65.58 MPa(试件S0M4),较纯浸渍胶(试件S0M0)的54.63 MPa分别提升18.34%、20.04%。随着其掺量的增加,纳米增韧剂间产生团聚现象,拉伸强度快速下降。当总掺量的质量分数为0.4%时,单掺增韧剂的浸渍胶的拉伸强度优于混掺的。当总掺量的质量分数为0.6%时,试件S3M3的拉伸强度最大。

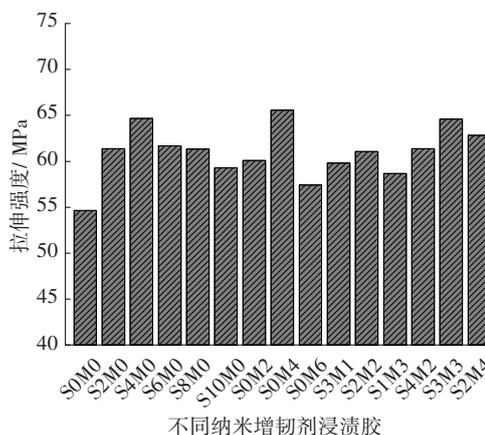


图8 不同纳米增韧剂与浸渍胶拉伸强度的关系

Fig. 8 Relationship between different nano tougheners and tensile strength of the impregnated resin

不同纳米增韧剂与浸渍胶断裂伸长率的关系如图9所示。从图9可以看出,浸渍胶的断裂伸长率同样呈先上升后下降的趋势。当单掺SiO₂,浸渍胶在总掺量的质量分数为0.6%(试件S6M0)时,最大断裂伸长率为9.94%,较试件S0M0的最大断裂伸长率(6.55%)提升了51.76%。当单掺MWCNTs,浸渍胶在掺量为0.4%(试件S0M4)时,最大断裂伸长率为11.08%,较试件S0M0的提升为69.16%。当总掺量的质量分数为0.4%时,试件S1M3的最大断裂伸长率最长,达到11.48%,较试件S0M0的提升为75.27%;当总掺量的质量分数为0.6%时,试件S4M2的最大断裂伸长率为10.49%,较试件S0M0的提升为60.15%。这表明混掺纳米增韧剂的浸渍胶断裂伸长率优于单掺的。

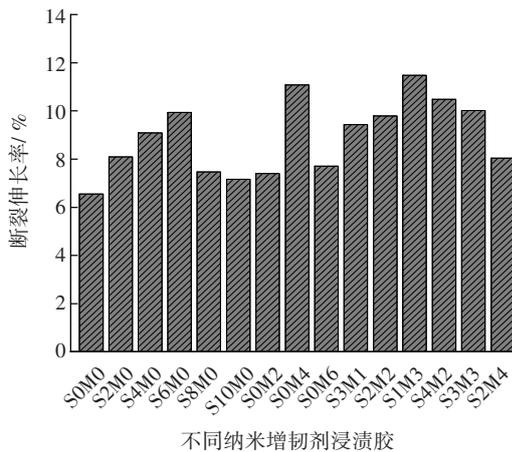


图 9 不同纳米增韧剂与浸渍胶断裂伸长率的关系

Fig. 9 Relationship between different nano tougheners and elongation at break of the impregnated resin

不同纳米增韧剂浸渍胶的弯曲强度变化如图 10 所示。从图 10 可以看出,当单掺 SiO₂,浸渍胶在质量分数为 0.4% 时,弯曲强度为 129.29 MPa,较试件 S0M0 的弯曲强度(103.88 MPa)提升了 24.46%,随着掺量继续增加,弯曲强度开始下降;当单掺 MWCNTs,浸渍胶的弯曲强度在质量分数为 0.2% (试件 S0M2)时,弯曲强度为 118.28 MPa,较试件 S0M0 的提升了 13.86%,然后随掺量的增加而下降。当纳米增韧剂的总质量分数为 0.4% 时,试件 S3M1 的弯曲强度最大,为 142.13 MPa,较试件 S0M0 的提升了 36.82%;当纳米增韧剂的总质量分数为 0.6% 时,试件 S6M0 的弯曲强度最大,为 119.19 MPa,较试件 S0M0 的提升了 14.74%。

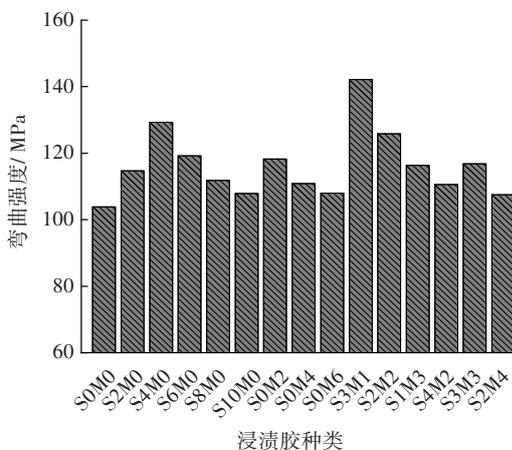


图 10 不同纳米增韧剂与浸渍胶弯曲强度的关系

Fig. 10 Relationship between different nano tougheners and bending strength of the impregnated resin

因此,适量的纳米增韧剂能有效改善浸渍胶的

力学性能,改善效果与纳米增韧剂的种类和掺量相关。基体在荷载作用下产生裂纹,遇到附近的纳米增韧剂时裂纹扩展受阻,绕开纳米增韧剂形成新的裂纹,此过程需要消耗不少能量,从而有效抑制了裂纹的扩展,使浸渍胶达到了增强增韧的效果。随着质量分数的增加,纳米增韧剂在基体中密度变大,容易发生团聚,使得颗粒异常增大,引起浸渍胶力学性能劣化。SiO₂和MWCNTs由于两者间的吸附协同作用,裂纹需要更长的路径才能绕开颗粒,对裂纹的阻碍作用和浸渍胶部分力学性能的改善更为明显,然而这种吸附作用使得纳米增韧剂的团聚性也更强。在纳米增韧剂改性的浸渍胶中,质量分数为 0.4% 的 MWCNTs 的试件(S0M4),拉伸强度最大;质量分数为 0.1% 的 SiO₂ 和质量分数为 0.3% 的 MWCNTs 的试件(S1M3),其断裂伸长率最长;质量分数为 0.3% 的 SiO₂ 和质量分数为 0.1% 的 MWCNTs 的试件(S3M1)的弯曲强度最大。

2.3 CFRP 板拉伸强度

基于 VARI 工艺,原位增韧的不同纳米增韧剂浸渍胶 CFRP 板的拉伸强度变化规律如图 11 所示。从图 11 可以看出,当单掺纳米增韧剂时,随着掺量的增加,CFRP 板的拉伸强度先增加后下降;当单掺 SiO₂ 时,质量分数为 0.4% 的试件 C-S4M0 的最大拉伸强度为 1 233.82 MPa,较试件 C-S0M0 的最大拉伸强度(931.72 MPa)提升了 32.42%;单掺 MWCNTs 时,质量分数为 0.2% 的试件 C-S4M0 的最大拉伸强度 1 154.80 MPa,较试件 C-S0M0 的提升了 23.94%;总掺量的质量分数为 0.4% 时,试件 C-S4M0 表现出最大的拉伸强度,高于单掺 MWCNTs 和混掺纳米增韧剂的试件。一方面,浸渍胶的力学性能得到改善,从而增强了 CFRP 板的拉伸强度;另一方面,纳米增韧剂连着碳纤维和浸渍胶,同时填充了碳纤维与浸渍胶之间的空隙,提高了碳纤维与基体的界面力,使得纳米增韧剂、浸渍胶和碳纤维三者之间的交联网络更为紧密。在所有试件中,C-S4M0 表现出最高的拉伸强度,可能是与 CFRP 板的制作过程有关。圆形的 SiO₂ 和浸渍胶混合时,流动性更好,过滤更流畅,受到上层 CFRP 布的阻挡较小,能更充分地浸润 CFRP 布,改善效果更好。

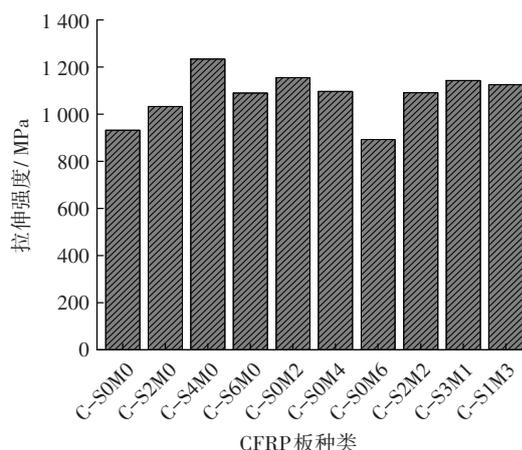


图11 不同纳米增韧剂与CFRP板拉伸强度的关系

Fig. 11 Relationship between different nano tougheners and tensile strength of the CFRP plate

3 结论

1) 随着纳米增韧剂质量分数的增加,浸渍胶的黏度逐渐增大,相同掺量下各浸渍胶黏度大小为:混掺纳米 SiO_2 和MWCNTs > 单掺MWCNTs > 单掺纳米 SiO_2 。当混掺掺量不变时,MWCNTs的占比越大,浸渍胶黏度越高。

2) 纳米增韧剂能显著改善浸渍胶的力学性能。单掺纳米增韧剂时,浸渍胶的力学性能随着掺量的增加呈先增加后减小的趋势,同掺量下混掺纳米增韧剂可以进一步提升浸渍胶的部分力学性能。所有纳米增韧试件中,浸渍胶的拉伸强度、断裂伸长率和弯曲强度最高分别提升了20.04%、75.27%和36.82%,分别为65.58 MPa、11.48%和142.13 MPa。

3) 纳米增韧剂增强了浸渍胶的性能,同时连接着碳纤维与浸渍胶,并填充了碳纤维与浸渍胶之间的空隙,显著提升了CFRP板的拉伸强度。采用VARI工艺对CFRP板原位增韧时,浸渍胶中含质量分数为0.4%的 SiO_2 增韧剂的CFRP板,表现出最好的改善效果,其拉伸强度提升了32.42%,达1 233.82 MPa。

参考文献 (References):

[1] 陈巍. 先进航空发动机树脂基复合材料技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 68-72, 92. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.068.
CHEN Wei. Status and development trends of polymer matrix composites on advanced aeroengine [J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 68-72, 92. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.068.

- [2] 于海宁, 高长星, 王艳华. 碳纤维增强树脂基复合材料的应用及展望[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(1): 55-59. YU Haining, GAO Changxing, WANG Yanhua. Application and prospect of carbon fiber reinforced resin-based composites [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(1): 55-59.
- [3] 周国泰, 吕文静, 孙营, 等. 碳纤维增强复合材料在新能源汽车领域的应用[J]. 纤维复合材料, 2018, 35(1): 6-9, 17. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2018.01.002. ZHOU Guotai, LYU Wenjing, SUN Ying, et al. Application of carbon fiber reinforced composites in new energy vehicles [J]. Fiber Composites, 2018, 35(1): 6-9, 17. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6423.2018.01.002.
- [4] 马哲. CFRP预应力筋在预制节段拼装桥梁中的应用研究[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.03.009. MA Zhe. Study on the application of CFRP prestressed tendons in precast segmental bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 50-55. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.03.009.
- [5] 张建仁, 毛杰, 彭建新, 等. 使用碳纤维板加固的RC梁桥服役过程可靠度指标分析[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(2): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2014.02.005. ZHANG Jianren, MAO Jie, PENG Jianxin, et al. Reliability index analysis of the service process of RC beam bridge reinforced by carbon fiber [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology, 2014, 11(2): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2014.02.005.
- [6] 张建仁, 张智伟, 彭晖, 等. 表层嵌贴碳纤维板混凝土试件疲劳性能研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.001. ZHANG Jianren, ZHANG Zhiwei, PENG Hui, et al. An experimental investigation on the fatigue performance of NSM CFRP strip-concrete interface [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.001.
- [7] 郑林宝, 王延相, 陈纪强, 等. CF-CNTs多尺度增强体的制备及CF-CNTs/环氧树脂复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2428-2436. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170112.001. ZHENG Linbao, WANG Yanxiang, CHEN Jiqiang, et

- al. Preparation of CF-CNTs multi-scale reinforcement and mechanical properties of CF-CNTs/epoxy composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(11): 2428-2436. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170112.001.
- [8] 刘朝晖, 廖美捷, 柳力, 等. 纳米 TiO₂/MMT/SBR 复合改性沥青老化性能评价及机理分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 17(2): 10-17.
LIU Zhaohui, LIAO Meijie, LIU Li, et al. Aging resistance evaluation and mechanism analysis of nano-TiO₂/MMT/SBR composite modified asphalt [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 17(2): 10-17.
- [9] 郑余晨, 俞科静, 钱坤, 等. 改性碳纳米管处理碳纤维的效果表征[J]. *材料导报*, 2012, 26(12): 109-113. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2012.12.031.
JIA Yuchen, YU Kejing, QIAN Kun, et al. The effect characterization of carbon fiber dealt with modified carbon nanotubes [J]. *Materials Review*, 2012, 26(12): 109-113. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2012.12.031.
- [10] 李玮, 程先华. 稀土 Ce 接枝碳纳米管-碳纤维多尺度增强体对环氧树脂基复合材料界面性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2789-2797. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200805.002.
LI Wei, CHENG Xianhua. Effect of rare earth Ce grafted carbon nanotubes-carbon fiber multi-scale reinforcement on interfacial properties of epoxy matrix composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(11): 2789-2797. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200805.002.
- [11] ZENG Y, LIU H Y, MAI Y W, et al. Improving interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy laminates by incorporation of nano-particles [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(1): 90-94. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.04.036
- [12] 赵忠博. 基于碳纳米管改性碳纤维增强环氧复合材料的力学、界面和抗疲劳性能[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
ZHAO Zhongbo. Mechanical properties, interface and fatigue resistance of carbon fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [13] ZHAO Z B, TENG K Y, LI N, et al. Mechanical, thermal and interfacial performances of carbon fiber reinforced composites flavored by carbon nanotube in matrix/interface [J]. *Composite Structures*, 2017, 159: 761-772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.022.
- [14] 李娜, 路鹏程, 王志平. 碳纳米管/碳纤维环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J]. *功能材料*, 2017, 48(7): 7073-7078. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2017.07.014.
LI Na, LU Pengcheng, WANG Zhiping. Preparation and mechanical property of MWCNTs/carbon fiber epoxy resin composites [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(7): 7073-7078. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2017.07.014.
- [15] ZENG Y, LIU H Y, MAI Y W, et al. Improving interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy laminates by incorporation of nano-particles [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(1): 90-94. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.04.036.
- [16] JUMAHAT A, SOUTIS C, JONES F R, et al. Improved compressive properties of a unidirectional CFRP laminate using nanosilica particles [J]. *Advanced Composites Letters*, 2010, 19(6): 096369351001900. DOI: 10.1177/096369351001900604.
- [17] LUO H T, DING J, HUANG Z X, et al. Investigation of properties of nano-silica modified epoxy resin films and composites using RFI technology [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 155: 288-298. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.055.
- [18] TANG Y H, YE L, ZHANG D H, et al. Characterization of transverse tensile, interlaminar shear and interlaminar fracture in CF/EP laminates with 10% and 20% silica nanoparticles in matrix resins [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(12): 1943-1950. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.08.019.
- [19] GODARA A, MEZZO L, LUIZI F, et al. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites [J]. *Carbon*, 2009, 47(12): 2914-2923. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.06.039.
- [20] 尹君山. RTM成型环氧/碳纳米管混杂多尺度复合材料的结构和性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
YIN Junshan. Study on structure and properties of epoxy/carbon nanotube hybrid multi-scale composites manufactured via resin transfer molding process [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
- [21] BEKYAROVA E, THOSTENSON E T, YU A P, et al. Functionalized single-walled carbon nanotubes for carbon fiber - epoxy composites [J]. *The Journal of* (下转第79页)

- Center (TNEC) excavation case history [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37 (2) : 438-448. DOI: 10.1139/t00-018.
- [19] 洪源, 彭正坤, 任晨灏, 等. 非等桩径荤素桩组合咬合桩受力计算模型研究[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37 (1) : 75-81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.011.
- HONG Yuan, PENG Zhengkun, REN Chenhao, et al. Research on the force calculation model of the bored occluding pile composed of unequal diameter reinforced concrete piles and plain piles [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37 (1) : 75-81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.011.
- (责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)

(上接第61页)

- Physical Chemistry C*, 2007, 111 (48) : 17865-17871. DOI: 10.1021/jp071329a.
- [22] 郑国栋, 张清杰, 邓火英, 等. 不同官能化碳纳米管对MWCNTs-碳纤维/环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, 32 (3) : 640-648. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20150601.001.
- ZHENG Guodong, ZHANG Qingjie, DENG Huoying, et al. Effect of different functionalized carbon nanotubes on mechanical properties of MWCNTs-carbon fiber/epoxy composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32 (3) : 640-648. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20150601.001.
- [23] 赵晨辉, 张广成, 张悦周. 真空辅助树脂注射成型(VARI)研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2009(1) : 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2009.01.021.
- ZHAO Chenhui, ZHANG Guangcheng, ZHANG Yuezhou. The development of vacuum assisted resin infusion (VARI) [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2009(1) : 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2009.01.021.
- (责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:杜雪明)