

树脂涂层及海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土力学性能的影响

朱德举 黄伟 郭帅成

Effects of resin coating and seawater immersion on mechanical performance of basalt textile reinforced seawater sea sand concrete

ZHU Deju, HUANG Wei, GUO Shuaicheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验

Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns

复合材料学报. 2021, 38(9): 3084-3093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201117.001>

海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete

复合材料学报. 2018, 35(12): 3458-3465 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001>

表面处理玄武岩纤维增强水泥基复合材料力学性能

Mechanical properties of cement matrix composites reinforced with surface treated basalt fibers

复合材料学报. 2017, 34(5): 1159-1166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170302.003>

聚酰亚胺表面处理玻璃纤维/环氧树脂复合材料力学性能

Mechanical properties of polyimide surface treated glass fiber/epoxy resin composites

复合材料学报. 2018, 35(7): 1850-1856 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171128.004>

玄武岩-碳纤维/矿渣混凝土力学性能正交试验

Orthogonal experiment on mechanical properties of basalt fiber-carbon fiber/slag concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1743-1753 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190930.001>

玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1926-1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

树脂涂层及海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土力学性能的影响



分享本文

朱德举*, 黄伟, 郭帅成

(湖南大学 土木工程学院, 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 为了研究不同树脂(环氧树脂、呋喃树脂、乙烯基树脂)涂层及海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土(BTR-SSC)力学性能的影响,采用万能试验机对各树脂涂层纤维束和海水浸泡不同时间下 BTR-SSC 试件进行静态拉伸试验,并通过拔出试验评估纤维-基体界面粘结性能。结合数字图像相关分析得到裂纹与应变分布,并采用扫描电镜分析损伤机制。通过界面粘结强度计算公式实现以裂纹分布和基体强度评估界面长期性能。结果表明:3 种树脂对纤维束的增强效果显著且相近(32%左右),均可显著提升 BTR-SSC 力学性能,乙烯基树脂涂层表现最佳,抗拉性能和界面粘结性能分别提升 77% 和 180%。海水浸泡下 BTR-SSC 试件力学性能明显劣化,未处理试件仅高温浸泡 14 天后便脆断,环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂涂层试件浸泡 7 天时相对未处理试件抗拉强度分别提升 81%、48% 和 94%,浸泡 28 天时仍呈多裂缝开展,界面粘结性能分别损失 64%、57% 和 55%。该成果将有助于提升 BTR-SSC 在海洋环境中长期性能并促进其在海工结构中的应用。

关键词: 织物增强混凝土;海水海砂混凝土;表面处理;海水浸泡;力学性能

中图分类号: TB332; TU599

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)08-4211-14

Effects of resin coating and seawater immersion on mechanical performance of basalt textile reinforced seawater sea sand concrete

ZHU Deju*, HUANG Wei, GUO Shuaicheng

(Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the effects of different resin (epoxy resin, furan resin, vinyl resin) coatings and seawater immersion on the mechanical properties of basalt textile reinforced seawater sea sand concrete (BTR-SSC), a universal testing machine was used to perform static tensile tests on the fiber yarns of each resin coating and the BTR-SSC specimens immersed in seawater for different time, and the fiber-matrix interface bonding performance was evaluated by pull-out test. The crack and strain distribution were obtained by digital image correlation analysis, and the damage mechanism was analyzed by scanning electron microscopy. The long-term performance of the interface was evaluated by crack distribution and matrix strength through the calculation formula of interface bond strength. The results show that the reinforcing effects of the three resins on the fiber yarns are significant and similar (around 32%), which could significantly improve the mechanical properties of BTR-SSC. The vinyl resin coating had the best performance, and the tensile properties and interfacial bonding properties are increased by 77% and 180%, respectively. The mechanical properties of BTR-SSC specimens are significantly degraded under

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-10-24; 录用日期: 2023-11-21; 网络首发时间: 2023-11-29 15:49:11

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.001>

基金项目: 国家自然科学基金山东联合基金项目 (U1806225)

National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund (U1806225)

通信作者: 朱德举, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物材料多尺度力学行为及仿生、高性能纤维/织物增强水泥基和树脂基复合材料、防弹高性能纤维布的力学特性和有限元分析、冲击和高应变率试验技术 E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

引用格式: 朱德举, 黄伟, 郭帅成. 树脂涂层及海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4211-4224. ZHU Deju, HUANG Wei, GUO Shuaicheng. Effects of resin coating and seawater immersion on mechanical performance of basalt textile reinforced seawater sea sand concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4211-4224(in Chinese).

seawater immersion. The untreated specimens are brittle after 14 days of high temperature immersion. The tensile strength of epoxy resin, furan resin and vinyl resin coated specimens increase by 81%, 48% and 94% respectively after 7 days of immersion compared with untreated specimens. After 28 days of immersion, there are still multiple cracks developed, and the interfacial bonding properties are lost by 64%, 57% and 55%, respectively. The results will help to improve the long-term performance of BTR-SSC in the marine environment and promote its application in marine structures.

Keywords: textile reinforced concrete; seawater sea sand concrete; surface treatment; seawater immersion; mechanical performance

在海洋环境下, Cl^- 离子渗透引起钢筋锈蚀会导致钢筋混凝土结构在短时间内失效^[1]。为此, 研究人员采用耐 Cl^- 离子侵蚀的纤维代替钢筋作为混凝土结构的增强材料, 可以有效增强混凝土结构在海洋环境下的耐久性。而且, 纤维取代钢筋使海水海砂替代淡水河砂应用于混凝土结构成为可能。研究表明, 海水海砂混凝土 (SSC) 28 天及后期力学性能与淡水河砂混凝土基本相当^[2]。海水海砂的资源化应用将会极大方便沿海城市及远海岛礁的建设, 海水海砂可就地取材, 从而节约大量运输成本和时间成本, 同时有效缓解河砂资源日益短缺的严峻形势。将纤维编织成网嵌入混凝土中制成的纤维织物增强混凝土 (TRC 或 FRCM) 作为纤维应用于混凝土结构较成熟的模式之一, 其具有双轴承载的特点和较高的防火性、不需设保护层等优势, 已经在修复加固、围护结构、承载结构、管道和模板等领域得到了较广泛的应用^[3]。使用 SSC 制备出满足性能需求的纤维织物增强海水海砂混凝土 (TR-SSC) 将是实现海水、海砂资源化的一个重要途径。

然而, TRC 存在织物与基体之间界面粘结质量较差、纤维单丝间协同能力差的问题。由于水泥颗粒尺寸与纤维单丝之间的空间相比太大, 导致基体不能完全渗透到纤维单丝之间。这种不受控制的渗透导致了不同的内外粘结特性, 纤维束截面内外部纤维的应力分布不均, 外层纤维会因受力较大而先发生破坏^[4]。此外, 纤维在混凝土内部高碱环境下的腐蚀效应及其成本也限制了 TRC 的应用。TRC 中常用的织物类型有碳纤维、玻璃纤维和玄武岩纤维。其中, 碳纤维虽然具有良好的耐久性^[5-6], 但成本较高。玄武岩纤维与玻璃纤维具有相似的化学结构, 主要化学成分都是二氧化硅, 容易受到碱性环境的影响^[5-7]。但玄武岩纤维比玻璃纤维具有更高的抗拉强度, 比碳纤维具有更大的断裂伸长率^[8-9]。玄武岩纤维作为一种增强材料具有巨大的发展潜力。

环氧树脂涂层可以有效消除纤维单丝之间的滑移, 使纤维束受力更均匀, 使更多纤维单丝参与承重作用^[10], 可显著提高 TRC 的抗拉强度、界面粘结强度和韧性^[11-14]。而且环氧涂层可在织物表面形成保护层, 避免基体中的碱液与纤维直接接触, 从而抑制混凝土内部高碱环境对纤维的腐蚀效应。但是, 高碱环境会使环氧树脂产生水解反应而逐渐劣化, 为此许多研究人员采用耐碱树脂 (如乙烯基树脂、呋喃树脂等) 代替环氧树脂以获得耐久性更好的纤维增强复合材料 (FRP)。Benmokrane 等^[15] 将玄武岩乙烯基树脂 (BV) 筋和玄武岩环氧树脂 (BE) 筋浸泡在 50°C 的碱溶液中进行加速老化。结果表明, 腐蚀 5 000 h 后 BV 筋和 BE 筋的抗弯性能分别下降了 37% 和 39%, 层间剪切性能分别降低了 22% 和 14%。Ipakchi 等^[16] 研究表明呋喃树脂玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 筋在碱性环境下具有较好的耐久性。而且呋喃树脂作为一种 100% 的生物基、无毒、低成本的树脂, 它可以由来源丰富的廉价生物资源 (即糠醇) 生产, 被认为是石油基树脂的一种极好的可持续替代品。但有研究显示, 呋喃树脂 GFRP 筋耐盐水侵蚀性能较差, Eldridge 等^[17] 通过单轴拉伸试验测试呋喃树脂 GFRP 筋暴露在盐溶液中的劣化程度, 并与相同条件下的常规环氧树脂 GFRP 筋进行了对比。结果发现, 呋喃树脂 GFRP 筋劣化程度明显高于环氧树脂 GFRP 筋。目前, 并没有关于乙烯基树脂和呋喃树脂涂层应用于 TRC 的报道。

为此, 本文采用不同树脂 (环氧树脂、呋喃树脂、乙烯基树脂) 对玄武岩纤维织物进行表面处理。对比研究不同树脂涂层纤维束和 BTR-SSC 试件的单轴拉伸性能及界面粘结性能。并使用高温海水浸泡加速老化, 通过单轴拉伸试验评估不同树脂涂层 BTR-SSC 试件耐海水侵蚀性能, 结合数字图像相关分析 (DIC) 得到裂纹与应变分布。随后使用扫描电子显微镜 (SEM) 分析损伤机制。参考 Filippou 模型^[18] 和 ACK 理论模型^[19], 得出界面

粘结强度计算公式，以裂纹分布和基体强度变化评估海水浸泡对界面粘结性能的影响。充分探讨呋喃树脂和乙烯基树脂是否能作为环氧树脂应用于 BTR-SSC 的良好替代品。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

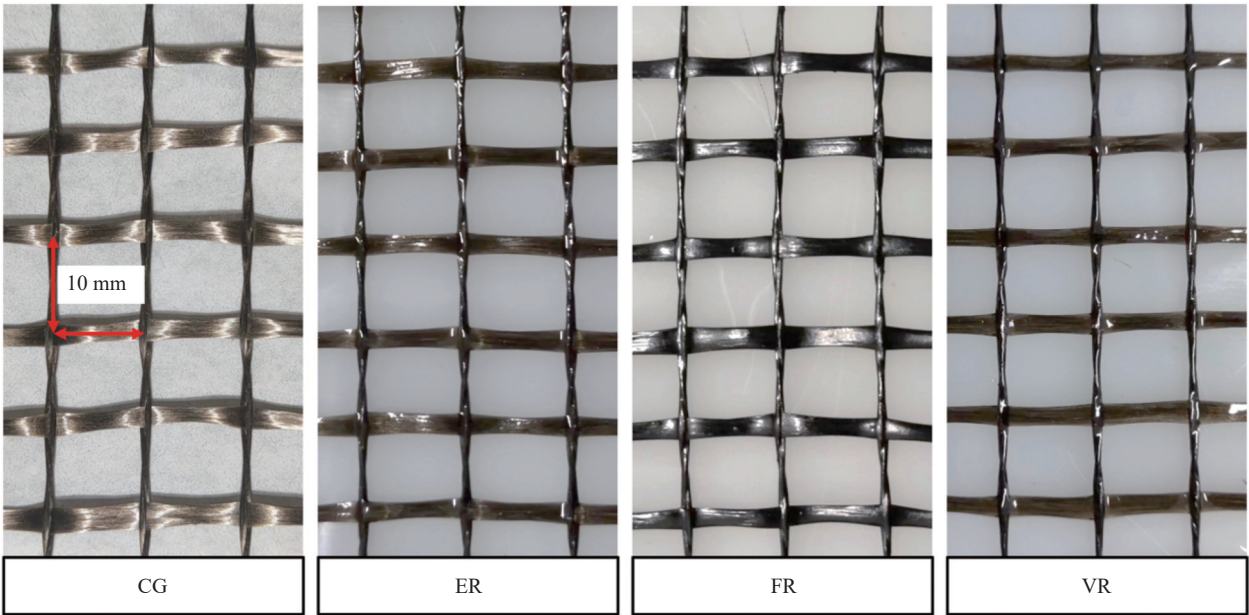
纤维织物采用经纬编织方式，网格尺寸为 10 mm×10 mm，纤维单丝的物理及力学性能参数见表 1。使用 3 种树脂(环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂)分别对纤维束进行表面处理，如图 1 所示。“CG”代表未处理试件，即对照组，“ER”代表环氧树脂涂层试件，“FR”代表呋喃树脂涂层试件，“VR”代表乙烯基树脂涂层试件。ACI 549.4R—13^[20]中描述了织物涂层，即用于涂覆或粘合纤维的聚合物，而不像在 FRP 中那样完全渗透和浸渍纤维。为了保证纤维织物的灵活性和响应的均匀性^[11, 21]，本文采用了如下方法处理织物：首先将纤维织网放入调配好的树脂混合液中浸泡 1 min。将纤维织物取出后，用两张油纸将纤维织网覆盖，然后施加压力将油纸抹平，随后将纤维

织网取出置于钢架上固化 24 h。纤维织物表面多余的树脂会粘覆在油纸上，可以有效将表面多余树脂去除，控制涂层厚度，并保证涂层均匀性。3 种树脂分别采用的是湖南固特邦土木技术发展有限公司的 JN-LS 型环氧树脂、无锡钱广化工原料有限公司的 GM-2 型呋喃树脂和上纬精细化工有限公司的 CHEMPULSE 901 型乙烯基树脂。为了节约树脂，通过小杯试验调整配比，将树脂丧失流动性的时间控制在 30 min 左右，3 种树脂的物理及力学性能参数如表 2 所示。采用体视显微镜(奥林巴斯 SZX7)拍得各组试件纤维束横截面如图 2 所示，测得未处理试件和环氧树脂、呋喃树脂、乙烯基树脂涂层试件纤维束平均厚度分别为 (0.22±0.01) mm、(0.47±0.03) mm、(0.51±0.04) mm 和 (0.47±0.02) mm，涂层厚度均控制在了 0.13 mm 左右，通过排水法测得平均截面积分别为 0.31、0.60、0.67 和 0.64 mm²。

采用海水海砂混凝土作为基体材料，海砂的最大粒径控制为 1.2 mm，同时采用聚羧酸型减水剂调节基体流动性，使用稳定剂防止浆体离析。

表 1 玄武岩纤维丝的物理及力学性能参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of basalt fiber filaments

Type	Specification	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%	Diameter/μm
Basalt fiber (BF)	3 K	1 650	85	3	12



CG—Untreated specimen, namely the control group; ER—Specimen coated with epoxy resin; FR—Specimen coated with furan resin; VR—Specimen coated with vinyl resin

图 1 不同树脂涂层玄武岩纤维织物外观形貌

Fig. 1 Surface morphology of basalt textile coated with different resins

以确保基体顺利流过织物网格，使织物与混凝土基体良好结合，基体配合比见表 3，水胶比为 0.37。

人工海水溶液根据规范 ASTM D1141-98(2021)^[22]，其化学成分详见表 4。

表 2 树脂的物理及力学性能参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of resins

Type	Model	Initial viscosity after mixing/(mPa·s)	Tensile strength/MPa	Breaking Elongation/%	Mass ratio
					Resin : Curing agent : Accelerator
Epoxy resin	JN-LS	70	46	8	100 : 40
Vinyl resin	CHEMPULSE 901	350±100	76-90	5-6	100 : 1.2 : 0.2
Furan resin	GM-2	200±100	5-15	3-4	100 : 2

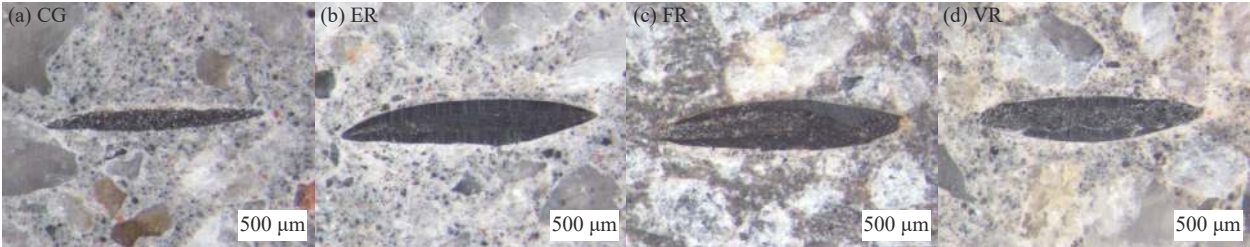


图 2 不同树脂涂层试件纤维束横截面
Fig. 2 Cross section of fiber yarns in specimens with different resin coatings

表 3 海水海砂混凝土配合比 (kg/m³)
Table 3 Mix proportion of the seawater sea sand concrete (kg/m³)

Water-binder ratio	Cement	Fly ash	Seawater	Sea sand (0-1.2 mm)		Defoamer	Superplasticizer	Suspension stabilizer
				0-0.6 mm	0.6-1.2 mm			
0.37	643	161	299	364	728	1.6	1.45	0.4

表 4 人工海水的化学组成
Table 4 Chemical composition of artificial seawater

Solvent	Concentration/(g·L ⁻¹)
NaCl	24.530
MgCl ₂	5.200
Na ₂ SO ₄	4.090
CaCl ₂	1.160
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201

所有工况采用的 TRC 薄板的试件尺寸均为 230 mm×40 mm×13 mm (长×宽×厚)，织物层数为 4 层，相邻织物间距为 2 mm，保护层厚度为 2 mm，纤维织物沿薄板的截面厚度对称布置。为了提高试件制作的效率，试件模板尺寸为 480 mm×380 mm×13 mm (长×宽×厚)，通过一次浇筑制作，随后切割成所需试件尺寸，每组试件至少 3 个。试件浇筑之前先对模板底部和周围进行涂油，将预设层数的纤维织物置于模板内，调整织物的位置使每一层的经向纤维严格对齐并与模板的边缘保持平行，将相应厚度的钢条放入每个相邻小模

板的中间空隙处来控制相邻织物间距^[23]和试件保护层的厚度，并起到隔断分割长模板的作用。为避免基体浇筑纤维织物出现松弛凹陷的状况，将纤维织物两端拉紧后采用螺栓使钢条把纤维夹紧。随后将基体依次浇筑于由小钢条分割成区域内，并用手提振动器进行振捣，最后用工具对试件表面进行抹平并调整厚度。在室温环境下养护 24 h 后拆模。

1.2 测试方法

采用万能试验机 (MTS C43.304，美国) 分别对不同树脂涂层纤维束和 TRC 试件进行静态拉伸试验。参考 GB/T 3362—2017《碳纤维复丝拉伸性能试验方法》^[24] 制作单根玄武岩纤维束拉伸试件。试件标距为 100 mm，为了消除直接使用夹具夹紧纤维束加载产生的应力集中和纤维、夹具之间易出现的滑移，在纤维拉伸试件的两端粘贴厚度为 0.3 mm 且涂覆环氧树脂胶的纸片。由位移控制加载程序，采样频率为 20 Hz，试件加载速率为 2 mm/min。

TRC 试件两端粘贴铝片以便连接拉伸夹具 (球

铰), 试件标距 100 mm, 如图 3(a) 所示。采用引伸计 (634.15C-31) 测量标距内试件的变形。试件加载速率为 0.5 mm/min。将 TRC 试件暴露于 60℃ 海水中加速腐蚀试验, 达到相应腐蚀时间后取出试件, 静置 3 天, 待试件性能稳定后测试。试件

表面刷白并喷黑漆制作随机散斑, 采用 OSG230-150UM 型工业相机记录整个拉伸过程用于进行 DIC 图像分析, 图片采集速率为 5 帧/s。并利用 MIRA4 LMH 型扫描电子显微镜观察老化前后试样中纤维及树脂表面微观形貌特征的变化。

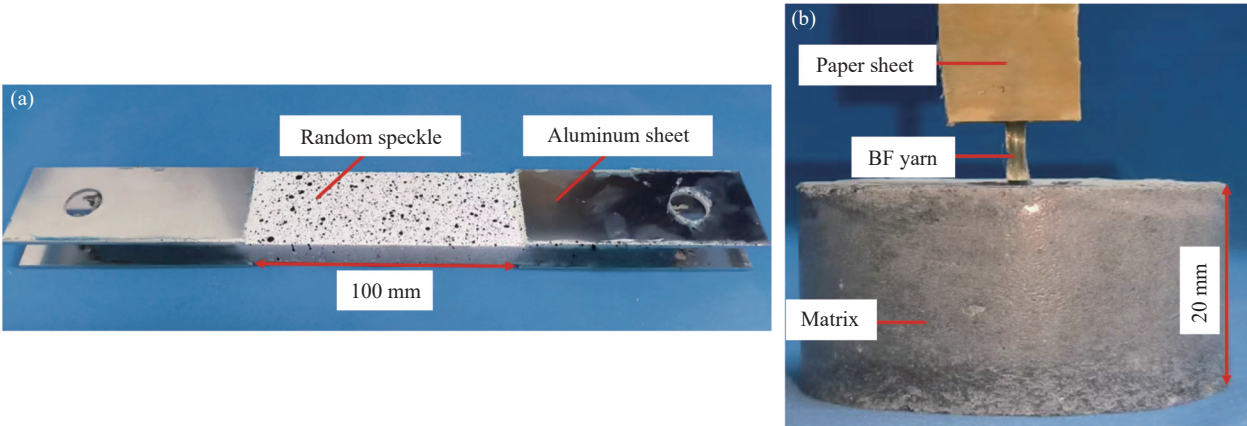


图 3 纤维织物增强混凝土 (TRC) 的拉伸试件 (a) 与拔出试件 (b)

Fig. 3 Tensile specimen (a) and pull-out specimen (b) of textile reinforced concrete (TRC)

参考 Guo 等 [13] 采用单面拔出试验, 试件如图 3(b) 所示。控制纤维埋置深度为 20 mm。进行拔出试验前, 将试件置于室温环境 (25℃) 下充分干燥 2 天后, 在纤维束的自由端粘贴 0.3 mm 厚纸片, 以方便后期的拔出测试安装。采用万能试验机进行拔出试验, 试验加载速率为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 纤维束抗拉力学性能

未处理的玄武岩纤维束 (CG) 和使用不同树脂 (环氧树脂 (ER)、呋喃树脂 (FR) 和乙烯基树脂 (VR)) 表面处理后的玄武岩纤维束拉伸荷载-位移曲线对比如图 4 所示。可以发现, 树脂涂层可以显著改善玄武岩纤维束的拉伸力学性能, 且各组曲线的斜率几乎没有变化, 说明树脂涂层对纤维束的拉伸刚度影响不大。表 5 是玄武岩纤维束拉伸试验数据。任意时刻的拉应力计算公式如下:

$$\sigma = \frac{N}{A_f} \tag{1}$$

式中: N 为施加载荷; A_f 为参考织物截面积。即使涂层增加了织物的截面面积, 但用于计算的承载面积保持不变, 等于基于未处理纤维的 A_f [4]。

可以看到, 3 种树脂对玄武岩纤维束具有相近的增强效果, 环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂涂层试件强度增长率分别为 37.7%、31.0% 和 28.6%,

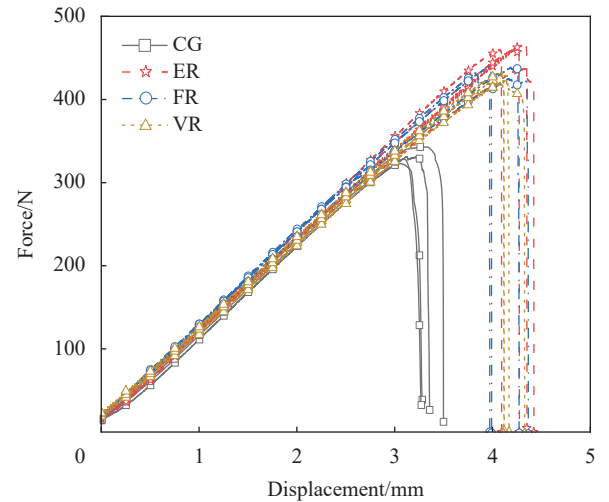


图 4 不同树脂涂层玄武岩纤维束拉伸荷载-位移曲线

Fig. 4 Tensile load-displacement curves of basalt fiber yarns with different resin coatings

表 5 不同树脂涂层玄武岩纤维束抗拉力学性能参数
Table 5 Tensile mechanical performance parameters of basalt fiber yarns with different resin coatings

Specimen	Ultimate load/N	Tensile strength/MPa	Ultimate strain/%
CG	331.4(8.4)	1 077(27)	3.17(0.12)
ER	456.5(13.3)	1 484(43)	4.23(0.12)
FR	434.1(6.6)	1 411(22)	4.04(0.17)
VR	426.3(6.5)	1 385(21)	4.09(0.03)

Note: The values in the parentheses are standard deviations.

三者相差不超过 10%。这种相同的增益很大程度上可以归因于其相同的增强机制，即树脂将纤维束各纤维单丝粘合在一起，使各纤维单丝间可协同受力，而树脂本身的拉伸强度相对纤维束来说几乎可忽略不计。另外，采用树脂对纤维束进行表面处理可以有效填充纤维表面存在的缺陷，从而避免因缺陷处应力集中而导致的纤维束过早失效。

2.2 BTR-SSC 抗拉力学性能

2.2.1 树脂涂层的影响

不同树脂涂层和未处理的玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土复合材料拉伸应力-应变关系曲线对比如图 5 所示。可以看出，采用树脂表面处理后的玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土试件，在抗拉强度和韧性方面相较未处理的试件都得到了明显提升。TRC 试件极限抗拉强度主要由纤维

织物强度决定，尽管通过纤维束的拉伸试验得出玄武岩纤维束经过不同树脂表面处理具有相似的强度，但制成海水海砂 TRC 试件后，其抗拉强度却存在较大差异，且相对未处理试件强度增长率明显提升。其中，采用乙烯基树脂表面处理后的玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土试件力学性能提升最为显著，其抗拉强度和韧性分别提高了 77% 和 203%。而环氧树脂和呋喃树脂表面处理后的玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土试件抗拉强度仅分别提高了 61% 和 31%，韧性分别提高了 167% 和 75%。主要是由于不同树脂与混凝土基体间的界面粘结性能存在差异。

2.2.2 海水浸泡的影响

图 5 为不同树脂涂层 BTR-SSC 试件在 60℃ 海水中浸泡不同时间下应力-应变关系曲线。可以发

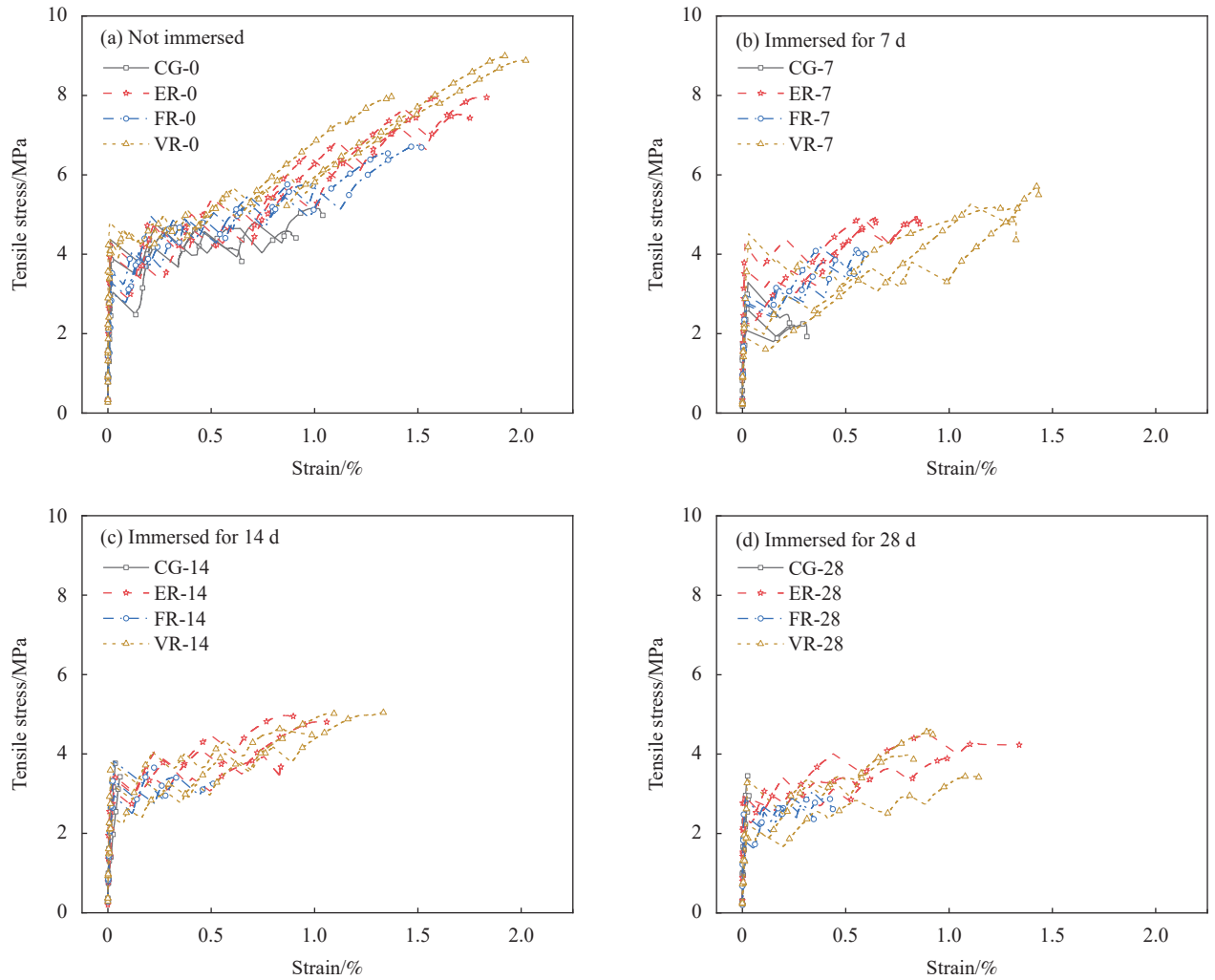


图 5 不同海水浸泡时间下不同树脂涂层的玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土 (BTR-SSC) 拉伸应力-应变关系曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain relationship curves of basalt textile reinforced seawater sea sand concrete (BTR-SSC) with different resin coatings immersed in seawater for different time

现, 各组试件在高温海水浸泡下均发生了明显劣化, 对照组 (CG) 试件仅在浸泡 14 天后就发生脆断, 说明纤维织物的增强增韧效果已完全失效, 而 3 种树脂涂层试件即使在浸泡 28 天后仍出现了多裂缝开展, 韧性得到显著提升, 说明树脂涂层可以有效改善 BTR-SSC 试件在海水浸泡下的耐久性。浸泡前期, 乙烯基树脂涂层试件表现最佳, 随着浸泡时间的增加, 环氧树脂和乙烯基树脂涂层逐渐表现出相近的增强增韧效果, 而呋喃树脂涂层的增强效果较弱。表 6 详细统计了不同浸泡时间下不同树脂涂层 BTR-SSC 试件拉伸状态下的初裂应力、极限强

度、峰值应变、韧性、裂纹数量及裂纹间距等参数。尽管乙烯基树脂和呋喃树脂较环氧树脂具有更好的耐碱性能^[15-16], 但试验数据显示, 浸泡前期, 乙烯基树脂涂层试件表现出明显的优越性, 海水浸泡 7 天时相对对照组抗拉强度和韧性分别提高了 94% 和 750%。其次, 环氧树脂涂层试件抗拉强度和韧性分别提升了 81% 和 417%。最后, 呋喃树脂涂层试件表现最差, 抗拉强度和韧性仅分别提升了 48% 和 200%。而随着浸泡时间的增加, 环氧树脂和乙烯基树脂涂层逐渐表现出相近的增强增韧效果, 呋喃树脂涂层的增强效果不显著。

表 6 不同海水浸泡时间下不同树脂涂层 BTR-SSC 抗拉力学性能参数
Table 6 Tensile mechanical performance parameters of BTR-SSC with different resin coatings immersed in seawater for different time

Specimen	Immersion time/d	First crack stress/MPa	Tensile strength/MPa	Strength retention rate/%	Peak strain/%	Toughness/MPa	Crack number	Crack spacing/mm
CG-0	0	3.79(0.68)	4.86(0.26)	—	0.58(0.36)	0.036(0.010)	3.3(0.5)	34(9)
ER-0		3.85(0.51)	7.82(0.25)	—	1.71(0.11)	0.096(0.010)	6(0)	20(1)
FR-0		3.30(0.25)	6.35(0.54)	—	1.26(0.29)	0.063(0.017)	6(0)	20(1)
VR-0		4.44(0.34)	8.61(0.56)	—	1.77(0.35)	0.109(0.025)	7.3(0.6)	16(2)
CG-7	7	2.66(0.61)	2.72(0.52)	56	0.12(0.16)	0.006(0.001)	1.3(0.6)	34(0)
ER-7		3.39(1.00)	4.93(0.02)	63	0.78(0.12)	0.031(0.007)	3(0)	34(5)
FR-7		2.61(0.27)	4.02(0.18)	63	0.45(0.13)	0.018(0.001)	3(1)	29(5)
VR-7		2.88(1.42)	5.28(0.40)	61	1.32(0.10)	0.051(0.008)	3.7(0.6)	33(5)
CG-14	14	3.26(0.59)	3.26(0.59)	Brittle failure	0.04(0.02)	0.001(0.001)	1(0)	—
ER-14		3.31(0.17)	4.57(0.56)	58	0.88(0.14)	0.035(0.007)	3.7(0.6)	33(4)
FR-14		3.38(0.43)	3.54(0.23)	56	0.23(0.18)	0.011(0.004)	2(1)	48(14)
VR-14		3.14(0.71)	4.90(0.23)	57	1.09(0.25)	0.044(0.006)	5(1)	23(2)
CG-28	28	2.99(0.46)	2.99(0.46)	Brittle failure	0.03(0.00)	0.001(0.000)	1(0)	—
ER-28		2.81(0.27)	3.93(0.54)	50	0.70(0.44)	0.033(0.017)	3.3(1.2)	39(14)
FR-28		2.37(0.55)	2.91(0.12)	46	0.31(0.09)	0.010(0.002)	3(1)	32(11)
VR-28		2.49(0.78)	4.02(0.61)	47	0.94(0.14)	0.029(0.004)	4.7(1.2)	25(5)

Note: The values in the parentheses are standard deviations.

不同树脂涂层 BTR-SSC 试件在 60℃ 海水中浸泡不同时间下的初裂应力、抗拉强度、峰值应变和韧性变化趋势如图 6 所示。可以看到, 随着浸泡时间的增长, 初裂应力、抗拉强度、峰值应变和韧性总体呈下降趋势。抗拉强度、峰值应变和韧性具有相似的变化趋势, 均在海水浸泡 0~7 天时力学性能退化最显著, 强度损失均高达 40% 左右, 与对照组损失程度相近, 且随浸泡时间的增加, 强度保留率基本相同。此外, 海水中 Cl⁻、Mg²⁺和 SO₄²⁻等侵蚀性离子会对海水海砂混凝土基体产生负面影响^[25], 如图 6(a) 所示。但与此同时, 持续的水化作用和粉煤灰的火山灰反应又可以提升基体强度, 在浸泡 14 天后初裂强度呈现部分回

升, Dong 等^[26]也观察到初裂强度的提升。

2.2.3 裂纹分布

采用 DIC 对试件裂纹分布进行分析, 图 7 和图 8 分别给出了 60℃ 海水浸泡不同时间下不同树脂涂层的 BTR-SSC 断裂破坏前的裂纹和纵向应变分布情况与平均裂纹数量和裂纹间距。可以看出, 采用树脂表面处理后的试件裂纹数量出现明显增长, 裂纹分布均匀, 裂纹间距也明显降低, 主要是由于树脂涂层可以明显改善纤维基体间的界面粘结性能^[13], 应力能在基体和织物间较好地传递, 使应力分布更加均匀。但各组试件在海水中浸泡 7 天后, 裂纹数量明显减少, 裂纹间距明显增大。说明织物与基体间的界面粘结性能显著劣化, 基

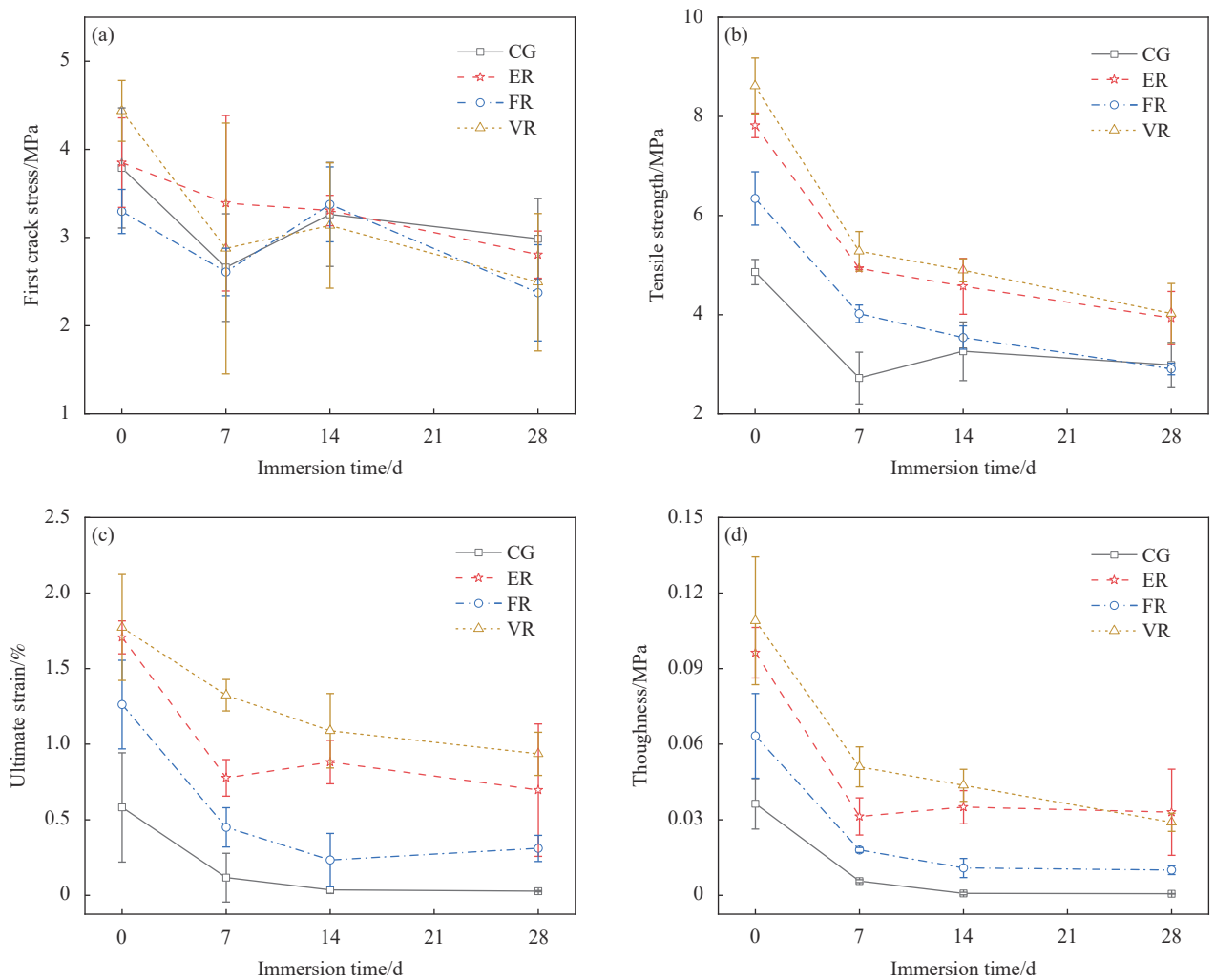


图6 海水浸泡对不同树脂涂层 BTR-SSC 抗拉力学性能的影响

Fig. 6 Effect of seawater immersion on tensile mechanical performance of BTR-SSC with different resin coatings

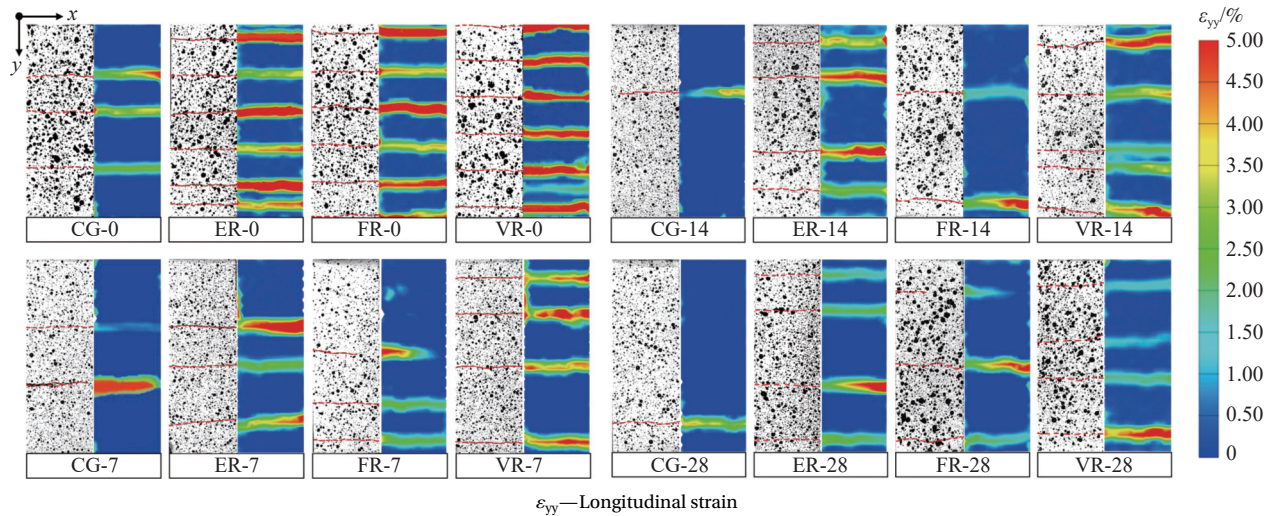


图7 不同海水浸泡时间下不同树脂涂层 BTR-SSC 裂纹和纵向应变分布

Fig. 7 Cracks and longitudinal strain distribution of BTR-SSC with different resin coatings immersed in seawater for different time

体开裂后，织物将荷载从裂纹处分配给两端基体的能力减弱，需要较长距离的应力积累才能使基体达到其抗拉强度而开裂，当裂纹间距离过小，使基体无法达到其抗拉强度时，便不会再有新的裂纹开展^[27]，从而导致裂纹数量明显减少。之后随着浸泡时间的增加，裂缝数量变化不大，环氧

树脂和呋喃树脂涂层试件裂纹间距均出现明显增长，而乙烯基树脂涂层试件裂纹间距却有所降低，说明乙烯基树脂涂层在高温海水侵蚀下对织物与基体间界面粘结性能的增强效果最佳，随着基体抗拉强度的降低，所需应力积累的距离反而减少。

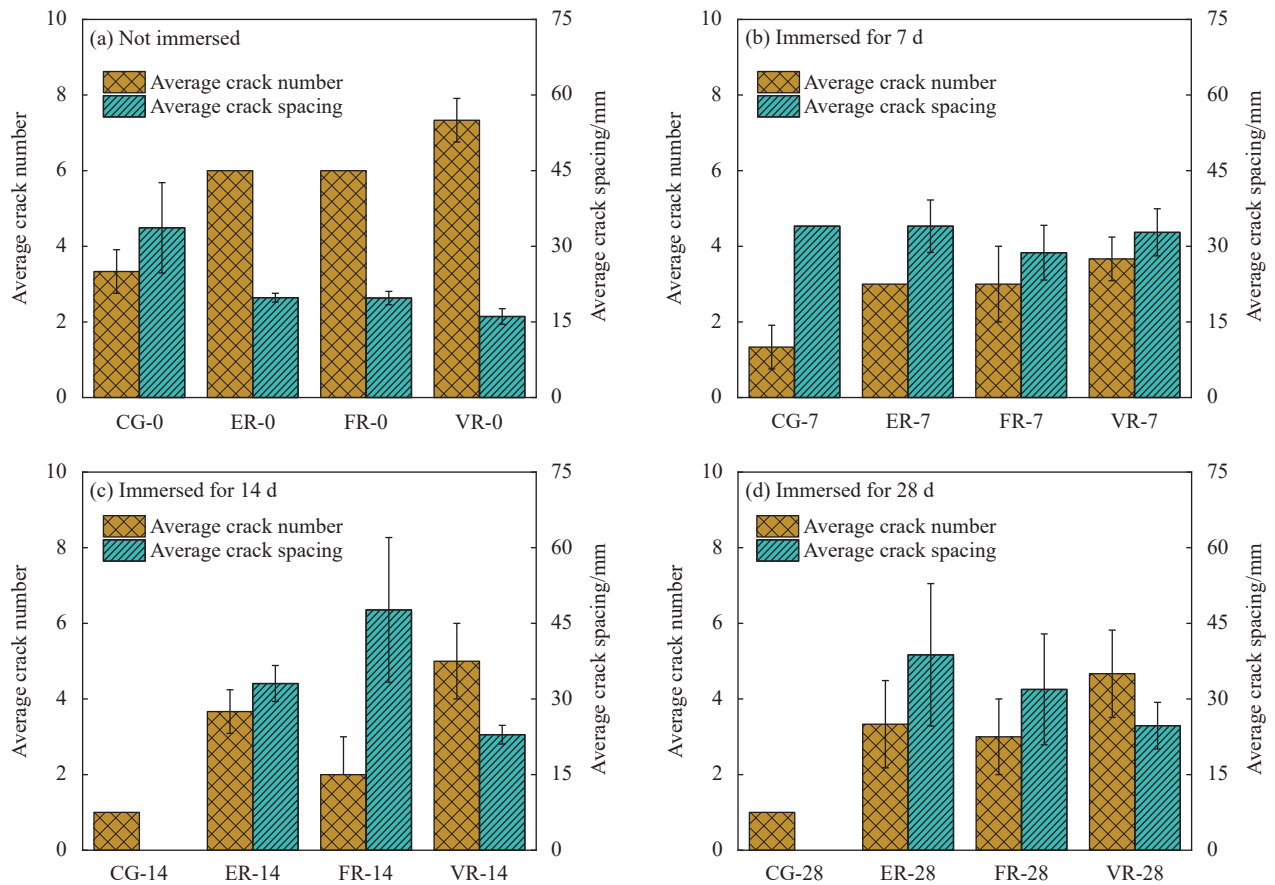


图 8 不同海水浸泡时间下不同树脂涂层 BTR-SSC 的平均裂纹数量和裂纹间距

Fig. 8 Average crack number and average crack spacing of BTR-SSC with different resin coatings immersed in seawater for different time

2.3 界面粘结性能

2.3.1 树脂涂层的影响

通过拔出试验可以直观地得出纤维束在混凝土基体中的界面粘结性能，图 9 为不同树脂表面处理后的玄武岩纤维束在海水海砂混凝土基体中的拔出荷载-滑移曲线。可以看出，3 种树脂对纤维束进行表面处理均能显著增大纤维束的极限拔出力，由于不同树脂涂层与基体间摩擦系数和化学胶着力不同，导致不同树脂涂层试件界面粘结性能存在显著差异。其中乙烯基树脂的提升效果最佳，增长率达 180%，这也是其 BTR-SSC 试件表现出更好的抗拉性能的原因。其次，环氧树脂

和呋喃树脂表面处理分别增长了 118% 和 113%。拔出试验中，纤维束受力后粘结应力并不均匀，为此采用等效粘结强度定义，计算公式如下：

$$\tau_m = \frac{F_{\max}}{CL} \tag{2}$$

式中： $F_{\max}$ 为极限拔出力； C 为纤维束截面周长； L 为纤维束埋置深度。

根据拔出荷载-滑移曲线可以得到拔出刚度、极限拔出力、等效粘结强度和拔出功等，如表 7 所示。拔出刚度是指曲线线性段的斜率，主要取决于纤维与基体间的化学粘结。可以看到，呋喃树脂和乙烯基树脂涂层试件的拔出刚度均出现增

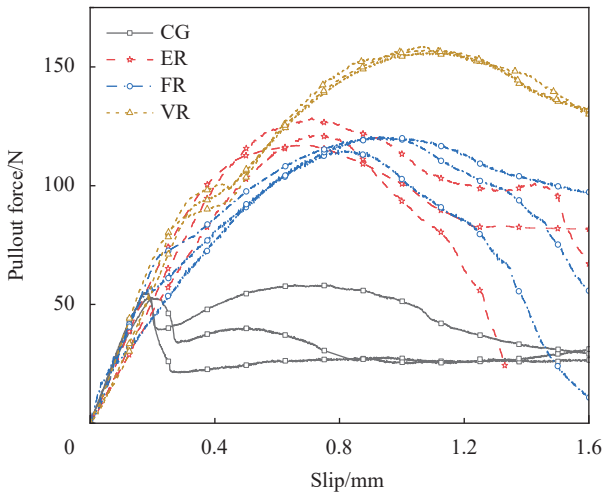


图9 不同树脂涂层玄武岩纤维束拔出荷载-滑移曲线
Fig. 9 Pull-out load-slip curves of basalt fiber yarns with different resin coatings

长，而环氧树脂涂层试件却有所降低，说明环氧树脂涂层与基体间的化学粘结较弱。另外，3种树脂涂层试件的拔出功均出现增长，尽管环氧树

表7 不同树脂涂层玄武岩纤维束拔出力学性能

Table 7 Pull-out mechanical performance of basalt fiber yarns with different resin coatings

Specimen	Pull-out stiffness/(N·mm ⁻¹)	Ultimate pull-out force/N	τ _m /MPa	Pull-out work/(10 ⁻³ J)
CG	304(16)	56(3)	1.41	13.3(13.3)
ER	253(40)	122(6)	2.23	55.6(2.9)
FR	337(30)	119(3)	2.05	71.7(10.8)
VR	369(50)	157(1)	2.76	113.1(1.5)

Note: τ_m—Equivalent bond strength. The values in the parentheses are standard deviations.

参考ACK理论^[19]，假设当第一个裂缝出现后，基体中的负载转移到裂缝处的纤维上，然后通过纤维线性转移回基体，纤维与基体之间存在连续的纯摩擦剪切粘结应力。根据上述假设，纤维-基体界面处剪切粘结强度定义为

$$\tau_s = \frac{rV_m\sigma_{mu}}{V_f2x} \tag{4}$$

式中：σ_{mu}为基体抗拉强度；V_m为基体体积分数。

由式(3)和式(4)可得：

$$\tau_s = \frac{V_m\sigma_{mu}}{1.7K_1} \tag{5}$$

由式(3)可得：

$$K_1 = \frac{xV_f}{0.85r} \tag{6}$$

表8给出了海水浸泡不同时间下不同树脂涂层BTR-SSC界面粘结性能计算参数。可以看到未

脂涂层和呋喃树脂涂层试件的极限拔出力接近，但环氧树脂涂层试件的拔出功较小。

2.3.2 海水浸泡的影响

目前评估TRC中纤维与基体的界面粘结性能的方法主要是通过拔出试验，但这种方式不可避免地会将部分织物裸露在外。在高温海水浸泡下，缺少了混凝土基体的约束和保护，裸露在外的纤维会产生更大程度的损伤，导致拔出试件中纤维束无法拔出而先发生断裂破坏。目前没有办法在保证试件充分浸泡的情况下还使裸露在外的纤维得到较好的保护，因此无法通过拉拔试验有效评估海水浸泡下TRC中纤维与基体界面粘结性能的变化。但可以通过TRC试件的裂纹分布和基体拉伸强度的变化以计算的方法实现。参考Filippou等^[18]提出的TRC平均裂纹间距计算公式：

$$x = 0.85K_1 \frac{r}{V_f} \tag{3}$$

式中：K₁为粘结强度因子；r为纤维束等效半径；V_f为纤维体积分数。

浸泡试件计算所得剪切粘结强度与拔出试验所得等效粘结强度具有较好的正相关关系，如图10所示。说明计算所得剪切粘结强度可以很好地反映TRC试件中纤维与基体的界面粘结性能。

图11为不同树脂涂层BTR-SSC试件计算所得剪切粘结强度随海水浸泡时间的变化趋势图。可以看到，随浸泡时间的增加，各组试件界面粘结性能总体呈下降趋势，树脂涂层可显著提升界面长期性能，乙烯基树脂涂层对界面长期性能的提升效果最为显著。浸泡7天时各组试件界面粘结性能损失最为明显，3种树脂涂层试件的界面粘结强度退化至同一水平，均为1 MPa左右。但浸泡14天后，乙烯基树脂和环氧树脂涂层试件的界面粘结强度出现部分回升，主要是由于基体强度提升，此时持续的水化作用和粉煤灰的火山灰反应产生的正面效应超过了海水侵蚀带来的负面效应^[25]，其产物可以很好地填充纤维周边孔隙，从

表 8 不同海水浸泡时间下不同树脂涂层 BTR-SSC 界面粘结性能计算参数

Table 8 Parameters required for the calculation of interfacial bonding performance of BTR-SSC with different resin coatings immersed in seawater for different time

Specimen	σ_{mu}/MPa	x/mm	r/mm	$V_f/\%$	K_1	τ_s/MPa
CG-0	3.8	34	0.313	1.03	1.31	1.71
ER-0		20	0.436	1.84	0.99	2.24
FR-0		20	0.461	2.06	1.05	2.11
VR-0		16	0.453	1.98	0.82	2.69
CG-7	2.9	34	0.313	1.03	1.31	1.28
ER-7		34	0.436	1.84	1.68	0.99
FR-7		29	0.461	2.06	1.52	1.09
VR-7		33	0.453	1.98	1.70	0.98
CG-14	3.3	—	0.313	1.03	—	—
ER-14		33	0.436	1.84	1.63	1.16
FR-14		48	0.461	2.06	2.52	0.75
VR-14		23	0.453	1.98	1.18	1.60
CG-28	2.7	—	0.313	1.03	—	—
ER-28		39	0.436	1.84	1.93	0.80
FR-28		32	0.461	2.06	1.68	0.91
VR-28		25	0.453	1.98	1.29	1.20

Notes: σ_{mu} —Tensile strength of the matrix; x —Average crack spacing; r —Equivalent radius of fiber yarn; V_f —Fiber volume fraction; K_1 —Bond strength factor; τ_s —Shear bonding strength.

而使界面粘结强度提升。之后随着浸泡时间进一步增加，基体和树脂逐渐劣化，导致树脂涂层对 BTR-SSC 界面粘结性能的增强效果逐渐降低。浸泡 28 天后，环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂涂层试件界面粘结性能分别损失了 64%、57% 和 55%。

2.4 微观形貌分析

BTR-SSC 力学性能损失的主要机制是纤维的腐蚀和树脂的水解。不同树脂涂层 BTR-SSC 试件在 60℃ 海水中浸泡 28 天后纤维微观形貌如图 12 所示。可以看到，各组试件纤维表面均可以观察到明显的腐蚀产物，但仅在未处理试件纤维表面观察到点蚀现象，且表面几乎完全被腐蚀产物覆盖。3 种树脂涂层试件纤维表面腐蚀产物明显少

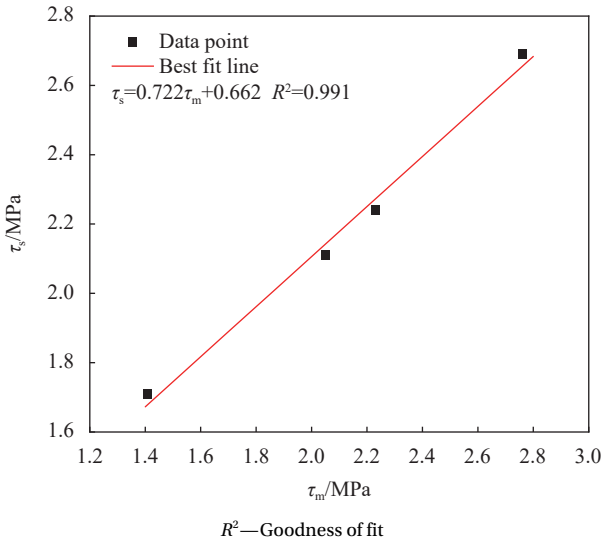


图 10 不同树脂涂层 BTR-SSC 剪切粘结强度与等效粘结强度线性拟合

Fig. 10 Linear fitting diagram of shear bond strength and equivalent bond strength of BTR-SSC with different resin coatings

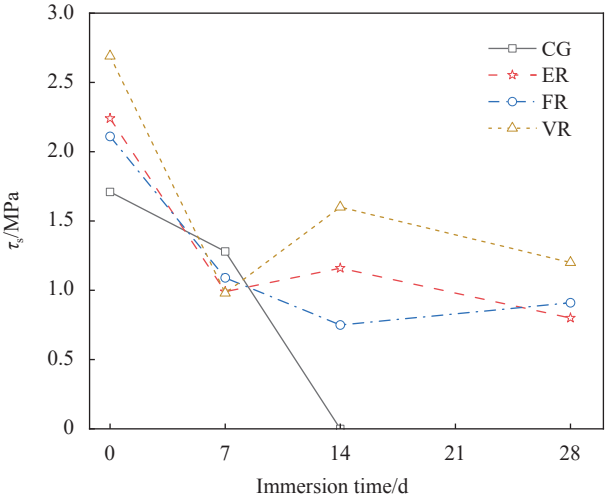


图 11 海水浸泡对不同树脂涂层 BTR-SSC 界面粘结性能的影响

Fig. 11 Effect of seawater immersion on the interfacial bonding performance of BTR-SSC with different resin coatings

于未处理试件。说明 3 种树脂可以有效保护纤维织物，但保护作用较弱。在浸泡过程中，O₂、

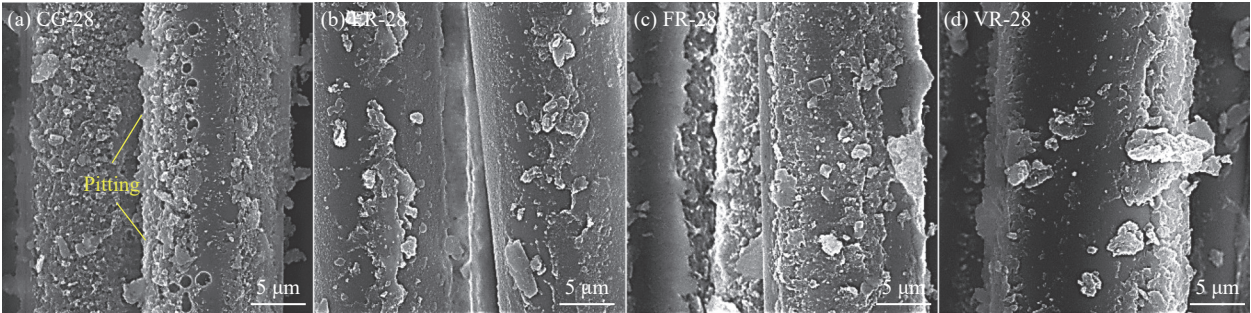


图 12 海水浸泡 28 天后不同树脂涂层 BTR-SSC 试件纤维微观形貌

Fig. 12 Fiber micromorphology of BTR-SSC specimens with different resin coatings after seawater immersion for 28 days

H₂O 分子和 OH⁻、Cl⁻等腐蚀性离子可通过微裂缝渗入,使纤维劣化^[2],而且腐蚀产物会吸水膨胀,纤维-树脂界面处的膨胀应力增加,使微裂纹进一步扩展,最终引起纤维与树脂脱粘,导致外部的有害离子更容易渗透到纤维织物内部^[28]。此外,呋喃树脂涂层试件纤维表面腐蚀产物明显多于环氧树脂和乙烯基树脂涂层试件,说明呋喃树脂涂层对纤维织物的保护作用最差。

图 13 为 BTR-SSC 试件未浸泡时及 60℃ 海水中浸泡 28 天后 3 种树脂表面微观形貌。从图 13(a)、13(c)、13(e) 可以看到,未浸泡时,乙烯基树脂表面较环氧树脂和呋喃树脂表面更粗糙,这使其表现出最佳的界面粘结性能。呋喃树脂表面可以观察到明显的微孔,这使其对纤维的保护作用大大减弱,因此呋喃树脂涂层 BTR-SSC 试件在高温海水侵蚀下的力学性能表现最差。呋喃树脂完全固化后分子链主要由亚甲基与呋喃环组成,几乎不

存在活性基团,具有良好的化学稳定性^[16],但浸泡 28 天后,呋喃树脂表面却观察到明显的坑蚀,如图 13(d) 所示,说明呋喃树脂未完全固化,部分处于低聚物状态^[29],从树脂表面溶出而形成坑蚀。此外,环氧树脂和乙烯基树脂在混凝土高碱环境下会发生水解反应^[30],树脂逐渐丧失粘结性能,从而导致其界面粘结性能劣化。从图 13(b)、13(f) 可以看到,环氧树脂的水解程度明显高于乙烯基树脂,环氧树脂表面几乎完全水解,而乙烯基树脂表面仅在局部产生部分点蚀,因此乙烯基树脂涂层 BTR-SSC 试件在高温海水侵蚀下表现出最佳的力学性能。

3 结论

通过准静态拉伸试验和拔出试验,针对不同树脂涂层和海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土 (BTR-SSC) 力学性能的影响进行了试验研究和理论分析,具体结论如下:

(1) 环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂涂层均可提升玄武岩纤维束整体性以提高其抗拉力学性能,而且增强效果相近 (32% 左右)。且均可显著提升 BTR-SSC 抗拉性能和界面粘结性能,裂纹数量明显增加,其中乙烯基树脂涂层试件表现最佳,抗拉性能和界面粘结性能分别提升 77% 和 180%;

(2) 海水浸泡下 BTR-SSC 抗拉力学性能明显劣化,未处理试件仅高温浸泡 14 天后就脆断,树脂涂层可显著提升其长期性能,浸泡 7 天时乙烯基树脂涂层试件相对未处理试件抗拉强度和韧性分别提升 94% 和 750%,环氧树脂涂层试件分别提升 81% 和 417%,而呋喃树脂涂层试件仅分别提升 48% 和 200%,且均在浸泡 28 天时仍出现多裂缝开展;

(3) 以 Filippou 模型和 ACK 理论模型为基础,得出了界面粘结强度计算公式,实现了以裂纹分布和基体强度变化评估界面长期性能,结果显示海水浸泡下界面粘结性能明显劣化,浸泡 28 天后,环氧树脂、呋喃树脂和乙烯基树脂涂层试件界面粘结性能分别损失 64%、57% 和 55%;

(4) BTR-SSC 力学性能损失主要是由于纤维的腐蚀和树脂的水解。树脂涂层的保护使纤维腐蚀程度明显低于未处理试件。但呋喃树脂表面存在微孔,这使其保护作用显著降低。海水浸泡下,环氧树脂和呋喃树脂表面均明显劣化,而乙烯基树脂表面仅局部点蚀,这使其试件表现出最佳的力学性能。

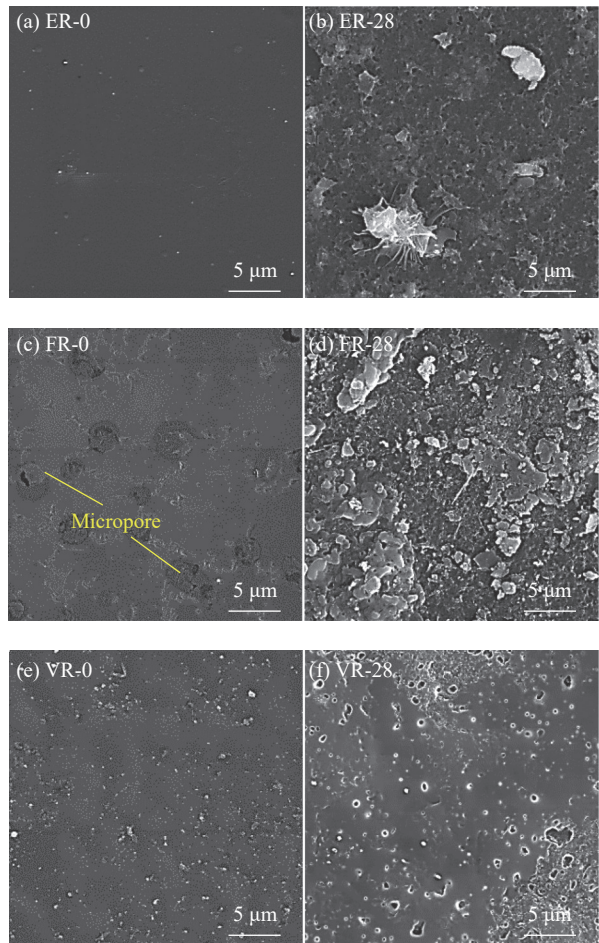


图 13 未浸泡时及海水浸泡 28 天后 BTR-SSC 试件树脂表面微观形貌

Fig. 13 Microscopic morphology of resin surface of BTR-SSC specimens before immersion and after seawater immersion for 28 days

参考文献:

- [1] FENG G, ZHU D, GUO S, et al. A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 134: 104758.
- [2] YI Y, ZHU D, RAHMAN M Z, et al. Tensile properties deterioration of BFRP bars in simulated pore solution and real seawater sea sand concrete environment with varying alkalinities[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 243: 110115.
- [3] 朱德举, 李高升. 短切纤维及预应力对玄武岩纤维增强水泥基复合材料拉伸力学性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(11): 2631-2641.
- ZHU Deju, LI Gaosheng. Effect of short fibers and prestressing on the tensile mechanical properties of basalt textile reinforced cementitious matrix composite [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(11): 2631-2641(in Chinese).
- [4] DONNINI J, CORINALDESI V, NANNI A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 88: 220-228.
- [5] WILLIAMS PORTAL N, FLANSBJER M, JOHANNESSON P, et al. Tensile behaviour of textile reinforcement under accelerated ageing conditions[J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 5: 57-66.
- [6] MICELLI F, AIELLO M A. Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 159: 490-501.
- [7] HRISTOZOV D, WROBLEWSKI L, SADEGHIAN P. Long-term tensile properties of natural fibre-reinforced polymer composites: Comparison of flax and glass fibres[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 95: 82-95.
- [8] ÖZKAN Ş, DEMİR F. The hybrid effects of PVA fiber and basalt fiber on mechanical performance of cost effective hybrid cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120564.
- [9] LI Y, ZHANG J, HE Y, et al. A review on durability of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 225: 109519.
- [10] SILVA F D A, BUTLER M, HEMPEL S, et al. Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 48: 26-34.
- [11] MESSORI M, NOBILI A, SIGNORINI C, et al. Mechanical performance of epoxy coated AR-glass fabric textile reinforced mortar: Influence of coating thickness and formulation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 149: 135-143.
- [12] ZAMIR M, SRIPADA R, PELED A. Hybrid fillers in carbon-fabric-reinforced cement-based composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 98: 113-124.
- [13] GUO S, REN J, YANG T, et al. Influences of surface treatment on the mechanical performances of carbon and basalt textiles-reinforced concretes under harsh environments[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 246: 110195.
- [14] ZHU D, BAI X, YAO Q, et al. Effects of volume fraction and surface coating of textile yarns on the tensile performance of AR-glass textile reinforced concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 71: 106420.
- [15] BENMOKRANE B, ELGABBAS F, AHMED E A, et al. Characterization and comparative durability study of glass/vinylester, basalt/vinylester, and basalt/epoxy FRP bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(6): 04015008.
- [16] IPAKCHI H, SHEGEFT A, REZADOUST A M, et al. Bio-resourced furan resin as a sustainable alternative to petroleum-based phenolic resin for making GFR polymer composites[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2020, 29(4): 287-299.
- [17] ELDRIDGE A, FAM A. Environmental aging effect on tensile properties of GFRP made of furfuryl alcohol bioresin compared to epoxy[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(5): 04014010.
- [18] FILIPPOU C A, CHRYSOSTOMOU C Z. Analytical model for textile reinforced mortar under monotonic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 120178.
- [19] AVESTON J, KELLY A. Theory of multiple fracture of fibrous composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1973, 8(3): 352-362.
- [20] ACI Committee 549. Guide to design and construction of externally bonded fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures: ACI 549.4R—13[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2013.
- [21] 徐虹, 张可, 卢岩, 等. 玄武岩纤维-碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料的制备与力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(4): 767-773.
- XU Hong, ZHANG Ke, LU Yan, et al. Preparation and mechanical properties of carbon-basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(4): 767-773(in Chinese).
- [22] American Society for Testing and Materials. Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98(2021)[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 1998.
- [23] 朱德举, 李新亮, 李安令. 经纬向纤维体积分数对耐碱玻璃纤维

织物增强混凝土拉伸力学性能的影响 [J]. [复合材料学报](#), 2022, 39(1): 322-334.

ZHU Deju, LI Xinliang, LI Anling. Influence of warp and weft fiber volume fractions on tensile mechanical properties of alkali-resistant glass textile reinforced concrete[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2022, 39(1): 322-334(in Chinese).

[24] 中国国家标准化管理委员会. 碳纤维复丝拉伸性能试验方法: GB/T 3362—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for tensile properties of carbon fiber multifilament: GB/T 3362—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017(in Chinese).

[25] YI Y, ZHU D, GUO S, et al. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment[J]. [Cement and Concrete Composites](#), 2020, 113: 103695.

[26] DONG Z, WU G, ZHAO X L, et al. Durability test on the flexural performance of seawater sea-sand concrete beams completely reinforced with FRP bars[J]. [Construction and Building Materials](#), 2018, 192: 671-682.

[27] DU Y, ZHANG M, ZHOU F, et al. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading[J]. [Construction and Building Materials](#), 2017, 138: 88-100.

[28] WEI B, CAO H, SONG S. Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater[J]. [Corrosion Science](#), 2011, 53(1): 426-431.

[29] LOPEZ DE VERGARA U, SARRIONANDIA M, GONDRA K, et al. Polymerization and curing kinetics of furan resins under conventional and microwave heating[J]. [Thermo-chimica Acta](#), 2014, 581: 92-99.

[30] GUO X, XIONG C, JIN Z, et al. A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sea sand concrete environmental effects[J]. [Journal of Building Engineering](#), 2022, 58: 105038.