

模拟海水海砂混凝土孔溶液碱度对玄武岩-碳混杂纤维增强复合筋耐久性的影响

郭向柯¹, 吴庆亮¹, 周新显¹, 宋 灿¹, 李伟华^{1,2}

(1. 华北水利水电大学河南省基础设施腐蚀防控重点实验室, 郑州 450045; 2. 河南省科学院化学研究所, 郑州 450046)

摘 要: 利用碳纤维代替部分玄武岩纤维形成玄武岩-碳混杂纤维增强复合(HFRP)筋, 以期提高玄武岩纤维增强复合(BFRP)筋在碱性海水海砂混凝土(SSSC)中的耐久性。研究不同碱度模拟 SSSC 孔溶液(pH=10.1, 12.3, 13.2)中 BFRP 筋和 HFRP 筋的力学性能时变规律, 利用微观分析测试手段揭示其耐腐蚀性能提升机制。结果表明: BFRP 和 HFRP 筋受拉伸和层间剪切失效模式基本相似; 相比 BFRP 筋, HFRP 筋初始拉伸性能得到明显提升, 且界面性能并未弱化, 腐蚀 90 d 后由于碱度提升致使拉伸强度和层间剪切强度衰减的最大幅度分别降低 19.67%和 23.43%; HFRP 筋的劣化包括纤维刻蚀、树脂水解、纤维/树脂界面及 BFRP/CFRP 界面性能退化; 由于碳纤维较小的直径、优异的耐腐蚀性能, 以及 BFRP/CFRP 界面的屏障作用, 延缓了水分和腐蚀离子在 HFRP 筋中的腐蚀和渗透, 进而提高了其在高碱性 SSSC 环境中的耐久性。

关键词: 混杂纤维增强复合筋; 海水海砂混凝土; 孔溶液碱度; 力学性能; 耐久性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2264-09

网络出版时间: 2025-05-30



海水海砂混凝土(SSSC)由于可直接利用海水和海砂, 在离岸和海岛建造过程中具有天然优势, 但高浓度氯盐极易诱导钢筋腐蚀并导致传统混凝土结构过早失效^[1]。鉴于纤维增强复合(FRP)筋可耐氯盐和电化学侵蚀, 有望代替钢筋作为 SSSC 内部增强筋并在海洋环境中应用^[2]。

FRP 筋在碱性混凝土环境中易被腐蚀, 这是阻碍其在工程结构中广泛应用的重要因素之一。在碱性环境中, FRP 筋的劣化主要包括纤维、树脂及纤维/树脂界面性能退化。纤维劣化主要由离子浸出及游离 OH⁻的刻蚀作用导致^[3]; 水分和 OH⁻会造成树脂水解和塑化, 并由此导致纤维/树脂界面脱黏和分层^[4-5]。Wang 等^[6]发现相比于 pH 值为 12.9 的碱性 SSSC 孔溶液环境, pH 值为 13.4 时玄武岩纤维增强复合(BFRP)筋和玻璃纤维增强复合(GFRP)筋的拉伸性能劣化更严重。Yi 等^[7]的研究表明, 55 °C 时 pH

值为 13.2 的碱性 SSSC 孔溶液比 pH 值为 10.1 孔溶液造成界面性能损失高 47%。在 55 °C pH=13.2 的碱性 SSSC 孔溶液中暴露 90 d 后 BFRP 筋抗拉强度下降至初始值的 30%以下^[8]。显然, FRP 筋在碱性混凝土环境中的易腐蚀问题亟须解决。

研究人员大多通过减少环境作用的影响(比如降低碱度^[9-11])或提高 FRP 筋本身抵抗腐蚀的能力(比如利用高性能树脂^[12-13]、纤维改性^[14]及碳纳米管^[15-16])来提高 FRP 筋的耐久性。通常高硅灰含量矿物掺合料可有效降低混凝土碱度并缓解 FRP 筋的劣化, 但硅灰含量过高会降低水泥基材料的流动性并增加开裂风险^[17]。Feng 等^[18]的研究结果表明, 添加碳纳米管提高了 BFRP 筋的腐蚀抵抗能力。但碳纳米管增加了筋材的制备成本, 且未改变其线弹性失效模式及提高纤维主导的拉伸性能。采用碳纤维代替部分玄武岩(玻璃)纤维形成新型混杂

收稿日期: 2025-02-10。 修订日期: 2025-03-10。

基金项目: 国家自然科学基金(52408258); 河南省基础设施腐蚀防控重点实验室开放基金(HNICP 202410); 河南省科技厅科技攻关项目(252102320027); 河南省建设厅科技研发项目(HNJS-2024-K32)。

第一作者: 郭向柯(1992), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 李伟华(1971), 女, 博士, 教授。

Received date: 2025-02-10. Revised date: 2025-03-10.

First author: GUO Xiangke (1992-), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: guoxiangke@ncwu.edu.cn

Correspondent author: LI Weihua (1971-), female, Ph.D., Professor.

E-mail: liweihua@ncwu.edu.cn

FRP(HFRP)筋可能是一种理想选择^[19-20]。相比碳纤维增强复合(CFRP)筋, HFRP 筋成本较低, 且力学性能和腐蚀抵抗性能预期优于 BFRT/GFRP 筋。

此外, 随着双碳战略“碳达峰”“碳中和”的实施及建筑业趋向工业化、数字化和绿色化, 利用大宗固废(如钢渣和矿渣等)制备水泥基材料已成为必然要求。但固废基矿物掺和料通常会改变混凝土内部孔溶液碱度^[21], 进而可能影响 FRP 筋的耐久性。因此研究模拟不同 SSSC 孔溶液碱度对 HFRP 筋耐久性的影响具有重要的学术和工程实践意义。

本工作系统研究不同碱度模拟 SSSC 孔溶液对 HFRP 筋时变性能的影响, 通过 HFRP 筋宏观力学时变性能(拉伸和层间界面)的探明及微观劣化机制的揭示, 以期提升 FRP 筋增强混凝土的耐久性及 HFRP 筋在混凝土结构中的应用提供理论参考。

1 实验

1.1 HFRP 筋

环氧树脂基 BFRP 和 HFRP 筋的公称直径(d)为 10 mm, 纤维体积分数约为 65%, 均通过预排布的纤维, 经送纱、浸润、预成型、预热及固化等工序, 并基于拉挤工艺制备(见图 1)。相比 BFRP 筋, HFRP 筋内、外核分别为 CFRP 和 BFRP(BFRP 环向包裹 CFRP), 其中碳纤维代替玄武岩纤维的体积分数为 25%。

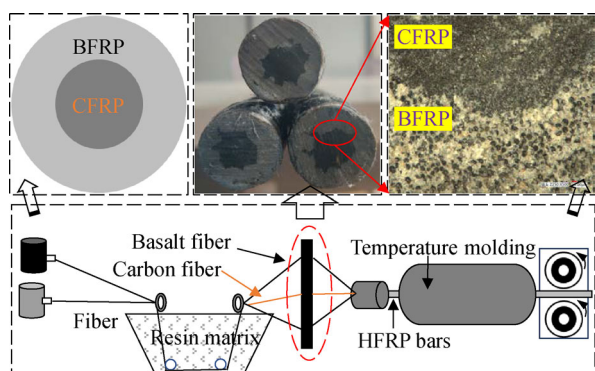


图 1 HFRP 筋的制备工艺
Fig. 1 Preparation process of HFRP bars

1.2 腐蚀环境

设计 3 种不同 pH 值的碱性盐溶液以研究模拟不同碱度 SSSC 孔溶液对 HFRP 筋耐久性的影响。普通 SSSC 孔溶液[Ca(OH)₂ 2 g/L, KOH 19.9 g/L, NaOH 2.4 g/L]由青岛近海海水配置, pH=13.2。2 种低碱度 SSSC 孔溶液碱度利用海水稀释而成,

pH 值分别为 12.3 和 10.1。所有 FRP 试样切割为 1000 mm 和 50 mm, 两端利用树脂密封后直接暴露于模拟 SSSC 孔溶液中, 腐蚀龄期分别为 30、60 d 和 90 d。为避免低温塑化对 HFRP 筋力学性能的影响, 所有腐蚀暴露实验均在 55 °C 的恒温水箱中进行。Bank 等^[22]指出高温仅会加速 FRP 材料劣化, 不会改变材料本身的劣化机制。腐蚀期间为减少蒸发, 水箱外围利用保温材料封装。模拟 SSSC 孔溶液每隔 30 d 更换 1 次, 且每周对其碱度进行标定至少 3 次并及时补充海水使其达到预期要求。

1.3 实验测试分析

1) 宏观力学测试

拉伸性能根据 ACI 40.3R-12^[23]进行(图 2), 试样总长度 1000 mm, 测试段为 40d。层间剪切性能基于 ASTM D4475^[24]测定, 试样长度和跨度分别为 7d 和 6d。实验均利用 MTS 测试, 拉伸和层间剪切测试速率分别为 2.0 mm/min 和 1.3 mm/min。

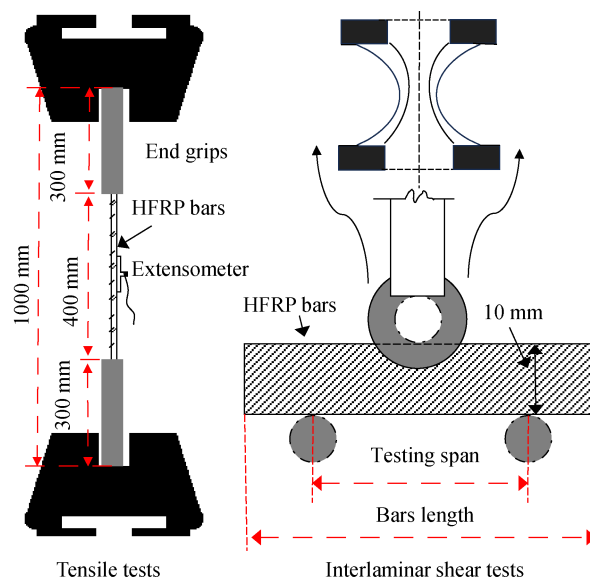


图 2 宏观力学性能测试
Fig. 2 Mechanical testing

未腐蚀 BFRP/HFRP 筋的拉伸强度(TS), 弹性模量(E), 拉伸应力(ϵ)分别为(1216.18±28.55)/(1705.99±28.55) MPa、(61.17±2.44)/(85.01±1.98) GP、(2.01%±0.04%)/(1.98%±0.14%); 层间剪切强度(ILSS)分别为(45.01±1.43)/(45.19±1.47) MPa。这表明混杂碳纤维明显提高了 HFRP 筋的拉伸性能, 且并未弱化层间界面性能。

2) 微结构表征

利用数字显微镜(DM)和扫描电子显微镜(SEM)及配备的能谱分析(SEM-EDS)对腐蚀后 FRP 试样的腐蚀形貌及腐蚀成分进行分析; 利用原子力显微镜

(AFM)对 BFRP/CFRP 筋界面过渡区微结构进行分析。将这些研究结果与未腐蚀试样测试结果相对比,以期全面揭示 HFRP 筋耐久性提升机制。

2 结果与讨论

2.1 拉伸时变性能

1) 典型失效模式

图 3 为 FRP 筋试样拉伸典型失效模式。拉伸时 BFRP 筋的变形程度随荷载提高而增加,接近极限荷载时部分纤维断裂,荷载震荡降低,随后急剧下

降并伴随纤维炸裂失效,是典型的线弹性失效模式。HFRP 筋失效的极限荷载明显提高,荷载达到极限荷载后急剧下降,并没有震荡段,失效炸裂纤维明显减少,荷载-位移曲线在失效前呈现出非线性段,可能与其内、外核结构有关,拉伸受位移模式控制,外层低性能 BFRP 材料先失效,而内层高性能 CFRP 材料受力后荷载提高率降低。相比 HFRP 筋,腐蚀后 BFRP 筋极限拉伸荷载显著降低,炸裂纤维明显减少,这一现象在高碱性模拟 SSSC 孔溶液中更易被观察。

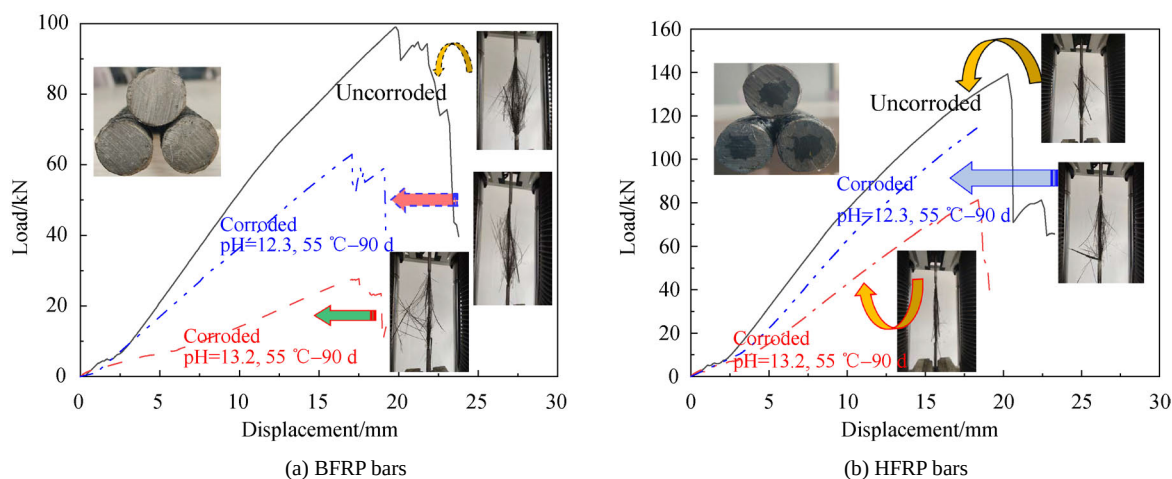


图 3 BFRP 筋和 HFRP 筋单轴拉伸典型失效模式

Fig. 3 Typical failure mode of uniaxial tension of BFRP bars and HFRP bars

2) 拉伸强度

图 4 为 BFRP 筋和 HFRP 筋的拉伸强度 (TS)。TS 随腐蚀时间延长及模拟 SSSC 孔溶液碱度的提高而降低。以 BFRP 筋为例,在 pH=10.1 时,在模拟 SSSC 孔溶液中暴露 30、60、90 d, TS 分别为 1115.44、1048.77、954.52 MPa; 提高溶液 pH 值至 12.3, 相应值分别为其初始值的 90.43%(1099.75 MPa)、80.75%(982.05 MPa)、71.20%(865.95 MPa); 而 pH=13.2 时,残余强度分别为初始值的 89.05%(1082.80 MPa)、49.15%(597.68 MPa)、26.21%(318.68 MPa)。这也表明与暴露时间相比,碱度对 BFRP 筋耐久性的影响更显著。

尽管如此,混杂碳纤维缓解了碱度对 HFRP 筋 TS 的劣化。以腐蚀 90 d 为例,在 pH 值分别为 10.1、12.3、13.2 的模拟 SSSC 孔溶液中, BFRP 筋的 TS 为其原始值的 78.48%、71.20%、26.20%; 而 HFRP 筋的相应值分别为 87.86%、85.22%、55.26%。由 pH 值升高导致 TS 降低幅度的差异也证明了这一点。BFRP 筋在 30、60、90 d 由 pH 值升高导致

TS 降低的最大幅度分别为 2.68%、37.09%、52.28%, 而 HFRP 筋同期的相应值分别为 3.42%、20.45%、32.61%, 表明由碱度提升致使 TS 衰减的最大幅度分别降低 19.67%。这些结果也表明相比于 pH 值从 10.1 提高至 12.3, pH 值由 12.3 提升至 13.2 时, TS 更易退化, 耐久性退化速率更高, 暗示 SSSC 孔溶液对 HFRP 筋的劣化可能存在碱度阈值, 当碱度降低至阈值时, 对 HFRP 筋劣化的影响可忽略。

2.2 层间界面时变性能

1) 失效模式

未腐蚀 BFRP 筋和 HFRP 筋受剪切力失效时沿中性轴出现贯穿裂纹, 且均偏离 BFRP/CFRP 界面 (见图 5), 暗示混杂纤维并未弱化 HFRP 筋的界面性能。腐蚀后所有试样失效, 主裂纹均向筋材边缘偏离, 且纵向表面裂纹增多。层间剪切实验时, 试样中性轴承受最大的剪力, 筋材边缘处由于纤维和树脂性能劣化, 纤维/树脂界面抗剪性能降低, 受剪切力时更易劣化, 这也暗示筋材边缘此时因吸水而饱和^[25]。

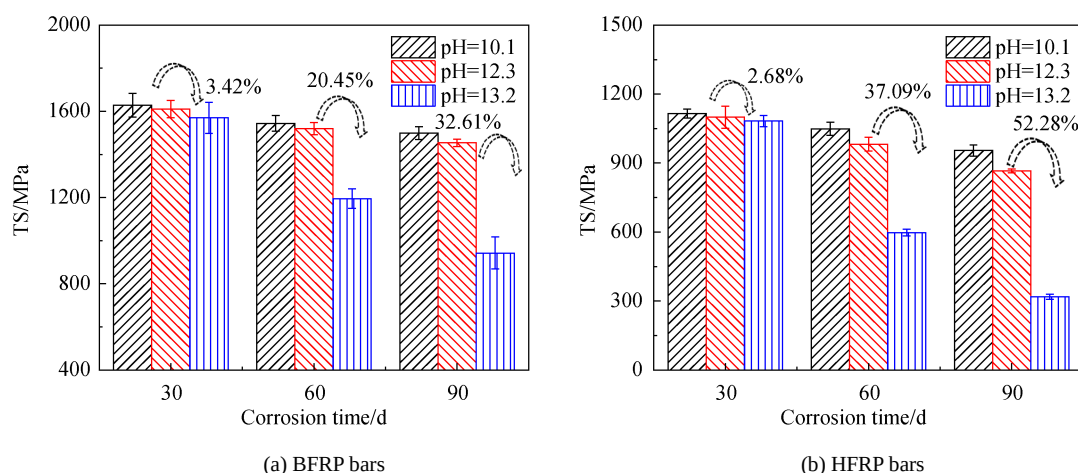


图 4 BFRP 筋和 HFRP 筋的拉伸强度
Fig. 4 Tensile strength of BFRP bars and HFRP bars



图 5 层间剪切典型失效模式
Fig. 5 Typical failure modes of interlayer shear

所有 FRP 试样裂纹宽度随模拟 SSSC 孔溶液碱度的提高而扩展, 且在 pH=13.2 的模拟 SSSC 孔溶液中, 筋材失效时被压碎, 暗示此时筋材边缘处 FRP 材料发生了严重劣化。尽管如此, 腐蚀 HFRP 筋裂纹均偏离 BFRP/CFRP 界面, 暗示混杂纤维并未弱化腐蚀后 HFRP 筋的界面性能。

2) 层间剪切强度

图 6 为 BFRP 筋和 HFRP 筋的层间剪切强度 (ILSS)。由图 6 可见, ILSS 随腐蚀时间的延长而降低。当腐蚀时间由 30 d 延长至 90 d 时, 在 pH 值为

10.1、12.3、13.2 的模拟 SSSC 孔溶液中, BFRP 筋的 ILSS 分别降低了 7.93%、22.22%、31.79%, 而 HFRP 筋相应值分别降低了 9.54%、11.16%、21.63%。这提供了证据表明碱度对 BFRP 筋和 HFRP 筋的界面性能有显著影响。相比 BFRP 筋, 混杂碳纤维弱化了碱度对 HFRP 筋界面性能的影响。此外, BFRP 筋在 30、60、90 d 由孔溶液 pH 值升高导致 ILSS 降低幅度最大值分别为 16.44%、29.99%、40.30%, 而 HFRP 筋同期相应值分别为 4.75%、7.46%、16.87%, 表明由碱度提升致使 ILSS 衰减的最大幅度分别降低 23.43%。这与模拟 SSSC 孔溶液中 FRP 试样 TS 的劣化结果相似, 暗示 SSSC 孔溶液碱度对 HFRP 筋界面性能的劣化存在阈值, 且相比 BFRP 筋, HFRP 筋的相应碱度阈值较高。

2.3 微结构分析

图 7 为 BFRP 筋和 HFRP 筋的 DM 照片。明显地, 在未腐蚀 FRP 试样中均发现大量树脂基体黏附在玄武纤维和碳纤维表面, 且纤维/树脂界面完整, 表明此时纤维主导的拉伸性能及树脂或纤维/树脂界面主导的界面性能优异。

在 55 °C 的模拟 SSSC 孔溶液中暴露 90 d 后, 孔溶液 pH 值对 BFRP 筋的劣化具有显著影响。当 pH=10.1 时, 树脂基体相对减少, 部分树脂吸水溶胀并黏附在纤维表面, 纤维树脂界面基本完整, 表明劣化较为轻微; 当 pH 值提升至 12.3 时, 树脂基本变得支离破碎且基体大量减少, 纤维基本裸露在外面, 暗示筋材进一步劣化; 在 pH=13.2 的溶液中, 大量纤维裸露且纤维/树脂界面剥离与分层, 表明 BFRP 筋发生了严重的劣化。对于 HFRP 筋, 避免重复观察, DM 仅呈现了其 BFRP/CFRP 界面及 CFRP

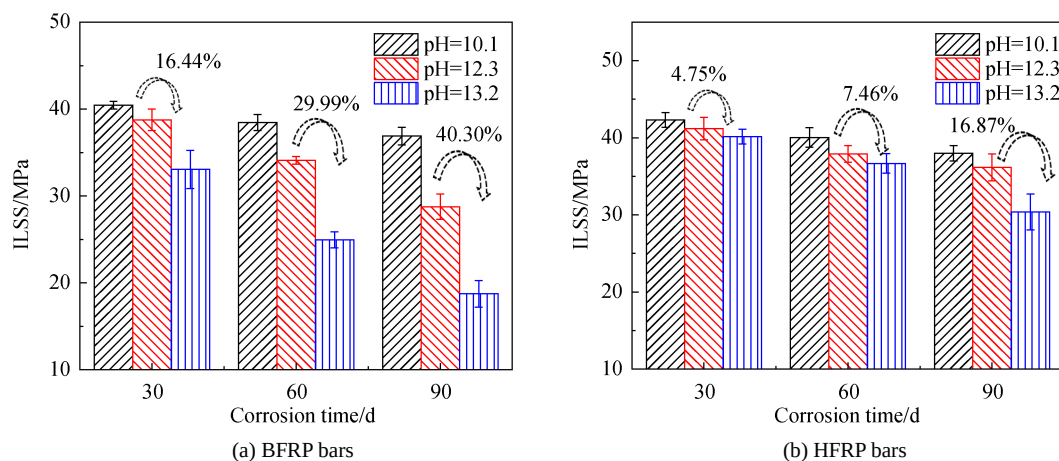


图6 BFRP筋和HFRP筋的层间剪切强度

Fig. 6 Interlaminar shear strength of BFRP bars and HFRP bars

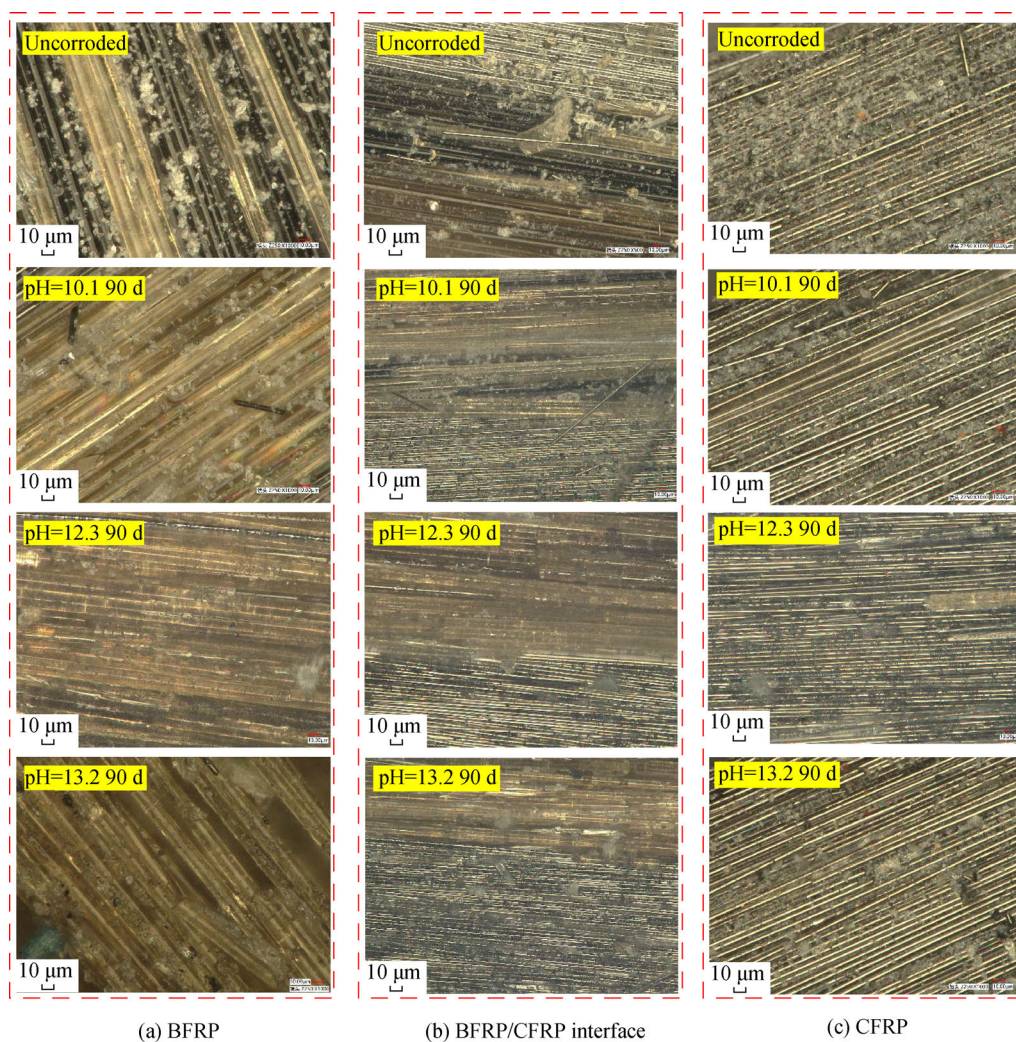


图7 BFRP筋和HFRP筋的DM照片

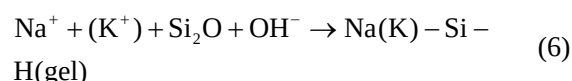
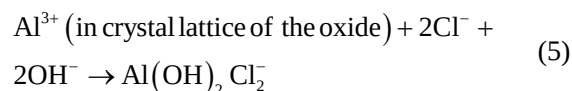
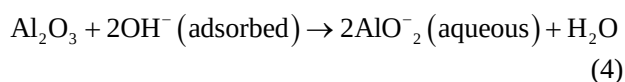
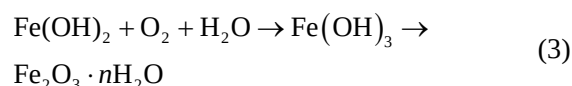
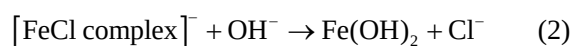
Fig. 7 DM images of BFRP bars and HFRP bars

材料的腐蚀情况。虽然模拟SSSC孔溶液碱度也加剧了HFRP筋的劣化,但对比BFRP筋,BFRP/CFRP

界面和CFRP材料仅在pH值为12.3时局部玄武岩纤维表面树脂基体减少,部分玄武岩纤维裸露,而

碳纤维表面黏附大量树脂基体；pH=13.2 时 BFRP/CFRP 界面处树脂基体大量减少，玄武岩纤维基本裸露且玄武岩纤维/树脂界面发生脱粘与分层，而 CFRP 材料表面的纤维大量减少，仅部分纤维/树脂界面劣化。这暗示 BFRP/CFRP 界面附近环向的 BFRP 材料也是 HFRP 筋内部潜在的薄弱部分。

图 8 为腐蚀后 BFRP/CFRP 界面 SEM-EDS 照片。可知界面区域玄武岩纤维和碳纤维均发生了刻蚀，但较小直径的碳纤维嵌入较大直径的玄武岩纤维中，形成了紧密的过渡界面区域。此外，EDS 扫描在 BFRP/CFRP 界面的不同位置均发现 Na、Mg、Al、Si、K、Ca 及 Fe 等元素，如表 1 所示。这些结果表明，界面区域玄武岩纤维中的金属离子发生了严重的刻蚀。可能涉及的化学反应如下。



此外，玄武岩纤维的主要链条与 OH^{-} 可能涉及反应如下。

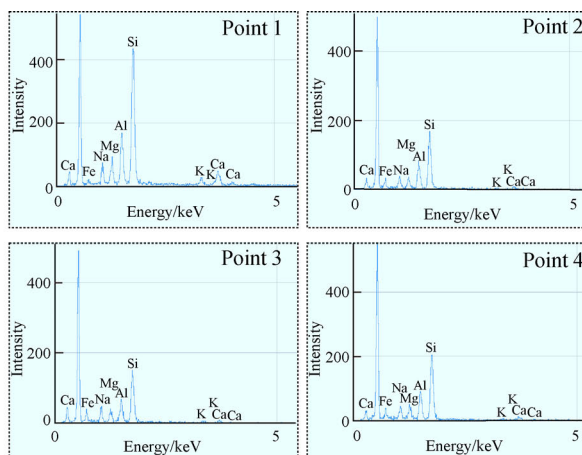
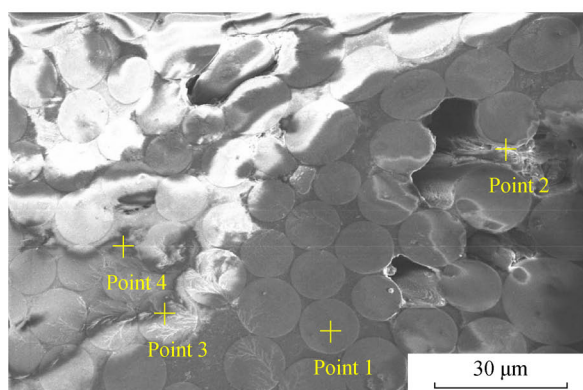
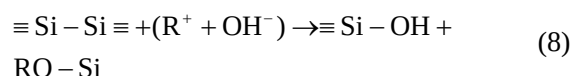
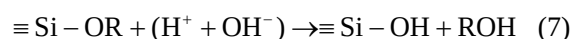


图 8 BFRP/CFRP 界面 SEM-EDS 图像
Fig. 8 SEM-EDS images of BFRP/CFRP interface

表 1 BFRP/CFRP 界面 EDS 结果
Table 1 EDS results of BFRP/CFRP interface

Element	Mass fraction/%			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Na	6.3	9.3	10.0	7.6
Mg	7.3	8.3	7.5	8.3
Al	15.3	19.8	17.7	18.6
Si	51.0	55.2	53.9	58.4
K	3.6	1.4	2.9	1.6
Ca	8.8	3.8	4.0	4.8
Fe	7.7	2.2	4.5	0.7

图 9 为 BFRP/CFRP 界面区域的 AFM 结果。未腐蚀试样以 BFRP 材料为例，纤维/树脂界面相对均匀（高差仅为 60 nm）；而腐蚀后纤维/树脂界面存在

较大起伏（高差>200 nm），这使得 AFM 观测场深的限制使其 2D 图像较为模糊，但 3D 图像表明 CFRP 和 BFRP 材料中的纤维/树脂界面起伏高差分别为 270 nm 和 850 nm，这表明不均匀的纤维刻蚀及树脂水解在界面区域发生，且玄武岩纤维的刻蚀更严重，这与 DM 和 SEM-EDS 的结果一致。

2.4 讨论

图 10 总结了 HFRP 筋在不同碱度模拟 SSSC 孔溶液发生劣化的机理。首先，水分的存在使得 FRP 材料劣化成为可能，水分在筋材中腐蚀和渗透可能是同步的；树脂基体吸水后易于溶胀、塑化及水解，致使固有缺陷微裂纹扩张、贯通，基体黏结性能弱化；劣化后基体中的水分及腐蚀离子在筋材中加剧腐蚀和渗透，其中 OH^{-} 刻蚀纤维 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 链及

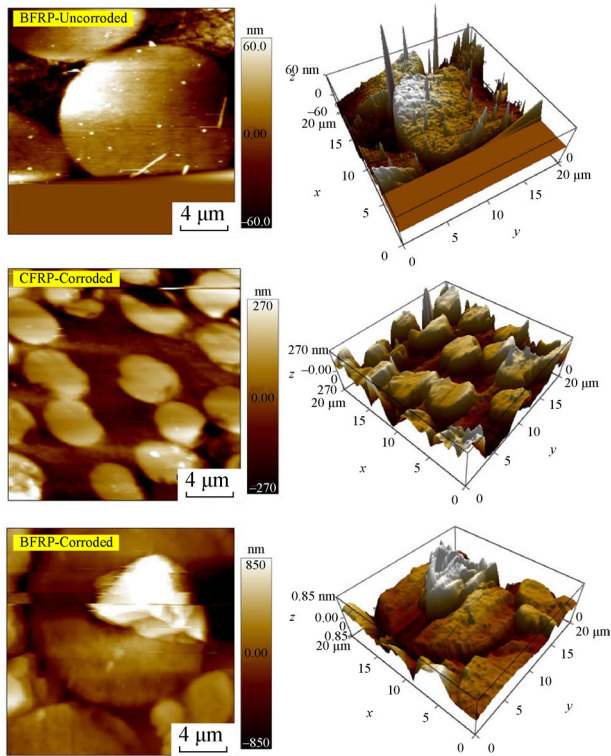


图9 BFRP/CFRP界面AFM结果
Fig. 9 AFM results of BFRP/CFRP interface

Al—O—Al链，Cl⁻、Na²⁺与玄武岩纤维中的Si、Fe、

Al元素发生化学反应，纤维中离子溶出使得其有效直径减小；纤维刻蚀与离子溶出、树脂基体劣化与黏结性能退化使得纤维/树脂界面脱粘与分层。纤维的有效直径减小导致纤维主导的拉伸性能降低，而树脂基体的劣化、纤维/树脂界面脱粘与分层导致基体及纤维/树脂基体主导的界面性能降低，弱化了界面对力的传递^[26]。而SSSC孔溶液的碱度与其内部的OH⁻浓度成正比，故高碱度孔溶液中高浓度OH⁻通常造成纤维刻蚀、树脂劣化及纤维/树脂界面性能的退化更为严重，加剧了拉伸性能和界面性能的劣化。

尽管如此，相比BFRP筋，碳纤维具有优异的力学性能和耐腐蚀性能，代替部分玄武岩纤维提高了HFRP筋纤维主导的拉伸性能及其腐蚀抵抗能力；碳纤维较小的直径可弱化水分及其赋存腐蚀离子对于HFRP筋的腐蚀与渗透，提高了其层间界面抵抗性能。另一方面，混杂碳纤维使得HFRP筋存在BFRP环向包裹的CFRP界面区域，BFRP/CFRP界面的屏障作用阻碍了水分及其赋存腐蚀离子在筋材中的渗透和腐蚀，进一步降低了HFRP筋劣化的速率，提高了其抗腐蚀能力。此外，由于BFRP环向包裹CFRP界面区域存在大量树脂基体，而富余基体导致的高吸湿性更易于诱导局部BFRP材料劣化；同时，BFRP/CFRP界面的屏障作用也使得水分

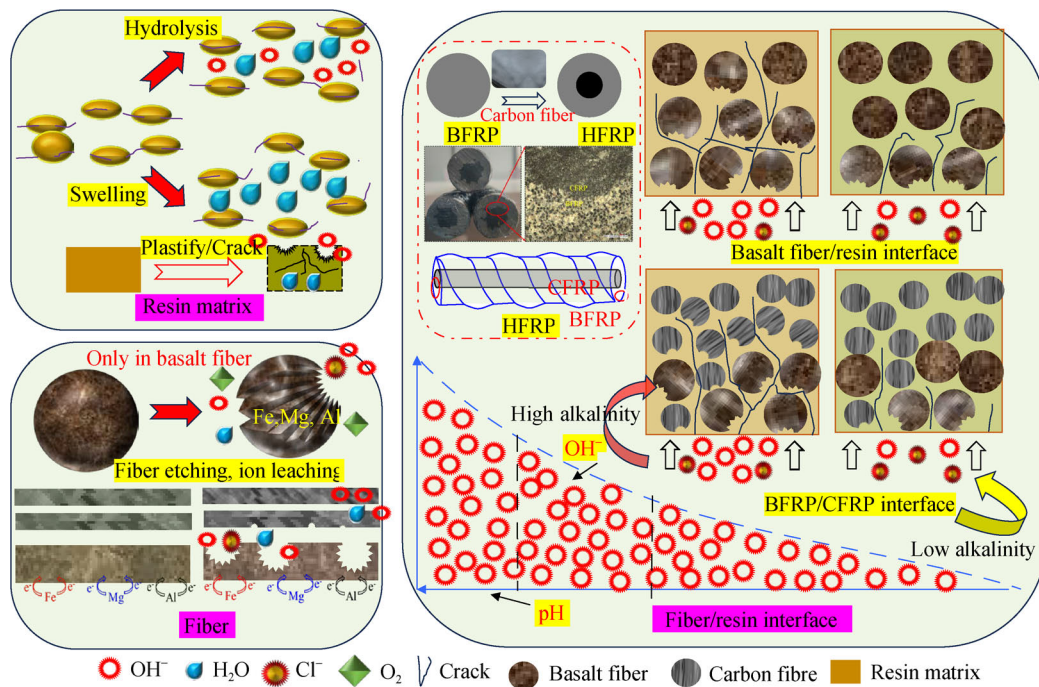


图10 HFRP筋在不同碱度模拟SSSC孔溶液中的劣化机理
Fig. 10 Degradation mechanism of HFRP bars in simulated SSSC pore solutions with different alkalinity

和腐蚀离子在此积聚, 导致 BFRP 材料局部劣化。因此, 在未来的研究中, 应更多地关注 BFRP/CFRP 界面区域。

3 结论

1) 混杂碳纤维并未改变 HFRP 筋拉伸失效和层间界面失效的模式。相比于 BFRP 筋, HFRP 筋拉伸失效极限荷载提高, 失效时炸裂纤维随腐蚀时间延长和模拟 SSSC 孔溶液碱度提高明显减少; BFRP 筋和 HFRP 筋层间界面失效均存在贯穿主裂纹, 且裂纹偏离 BFRP/CFRP 界面。

2) 混杂碳纤维提高了 HFRP 筋的拉伸性能和层间界面性能, 以及在碱性模拟 SSSC 孔溶液中的腐蚀抵抗能力。以 TS 为例, 相比于 BFRP 筋, BFRP 筋在 pH=10.1、12.3、13.2 的模拟 SSSC 孔溶液中 TS 为其原始值的 78.48%、71.20%、26.20%, HFRP 筋相应值分别为 87.86%、85.22%、55.26%。腐蚀 90 d 后由于碱度提升致使 TS 和 ILSS 劣化降低最大幅度分别为 19.67%和 23.43%。

3) HFRP 筋在碱性 SSSC 孔溶液中的劣化包括纤维刻蚀、树脂水解、纤维/树脂界面及 BFRP/CFRP 界面性能退化; 由于碳纤维拥有较小的直径、优异的耐腐蚀性, 以及 BFRP/CFRP 界面的屏障作用延缓了水分及腐蚀离子在 HFRP 筋中的渗透和腐蚀, 提高了其在高碱性 SSSC 环境中的耐久性。

参考文献:

- [1] DONG B, YU Y G, GAO W, et al. Electro-chemo-physical analysis for long-term reinforcement corrosion within the reactive system of concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2025, 155: 105846.
- [2] 孙亚楠, 金祖权, 杨林. 改性树脂基体玻璃纤维筋-混凝土界面粘结性能演化及提升机制[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(11): 3460–3469. SUN Yanan, JIN Zuquan, YANG Lin. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(11): 3460–3469.
- [3] FENG G Y, GUO S C, ZHOU L L, et al. Effects of surface characteristics and alkalinity on the deterioration of BFRP bars and BFRP-SSC interface in seawater environment[J]. *Compos Part B Eng*, 2024, 268: 111072.
- [4] 李师财, 金祖权, 宋华苗. 氯盐腐蚀下纤维/树脂界面黏结退化试验与分子动力学模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1136–1145. LI Shicai, JIN Zuquan, SONG Huamiao. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(5): 1136–1145.
- [5] LIU X, TANG P, CHEN W. Alkalinity optimization and long-term life prediction for BFRP bars serving in simulated marine concrete environments[J]. *J Build Eng*, 2024, 86: 108919.
- [6] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 139: 467–489.
- [7] YI Y, ZHU D J, GUO S C, et al. Mitigating the deterioration of BFRP bars in seawater sea sand mortar by reducing alkalinity[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 317: 125885.
- [8] GUO X K, XIONG C S, JIN Z Q, et al. Deterioration of

- basalt/carbon-based hybrid-FRP bars in a simulated pore solution of seawater sea-sand concrete[J]. *J Build Eng*, 2022, 54: 104634.
- [9] YI Y, GUO S C, LI S, et al. Effect of alkalinity on the shear performance degradation of basalt fiber-reinforced polymer bars in simulated seawater sea sand concrete environment[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 299: 123957.
- [10] YI Y, ZHU D J, GUO S C, et al. Development of a low-alkalinity seawater sea sand concrete for enhanced compatibility with BFRP bar in the marine environment[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 134: 104778.
- [11] YI Y, ZHU D J, 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]. *Compos Part B Eng*, 2022, 243: 110115.
- [12] SHAHID N, VILLATE R G, BARRON A R. Chemically functionalized alumina nanoparticle effect on carbon fiber/epoxy composites[J]. *Compos Sci Technol*, 2005, 65(14): 2250–2258.
- [13] 贾储源. 芳纶纤维/环氧树脂复合材料的湿热老化性能及改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. JIA Chuyuan. Study on humid-heat aging properties and modification of aramid fiber/epoxy resin composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [14] WON J P, PARK C G. Effect of environmental exposure on the mechanical and bonding properties of hybrid FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. *J Compos Mater*, 2006, 40(12): 1063–1076.
- [15] SHIRODKAR N, CHENG S F, SEIDEL G D. Enhancement of mode I fracture toughness properties of epoxy reinforced with graphene nanoplatelets and carbon nanotubes[J]. *Compos Part B Eng*, 2021, 224: 109177.
- [16] SRITHARAN R, ASKARI D. Enhancing the short-beam strength of composite laminates using helical carbon nanotubes[J]. *Compos Part B Eng*, 2021, 221: 108999.
- [17] CODINA M, CAU-DIT-COUMES C, LE BESCOP P, et al. Design and characterization of low-heat and low-alkalinity cements[J]. *Cem Concr Res*, 2008, 38(4): 437–448.
- [18] FENG G Y, OU Y F, RAHMAN M Z, et al. Improving corrosion resistance of BFRP bars by coating CNTs modified resin in simulated pore solution of seawater sea sand concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 392: 131945.
- [19] GUO X K, JIN Z Q, XIONG C S, et al. Degradation of mechanical properties and microstructure evolution of basalt-carbon based hybrid FRP bars in real seawater and sea-sand concrete[J]. *Compos Part B Eng*, 2024, 271: 111163.
- [20] GUO X K, JIN Z Q, XIONG C S, et al. Interlayer interface properties of basalt/carbon-based hybrid-FRP bars in simulated seawater and sea-sand concrete pore solution[J]. *J Build Eng*, 2024, 92: 109786.
- [21] NATKUNARAJAH K, MASILAMANI K, MAHESWARAN S, et al. Analysis of the trend of pH changes of concrete pore solution during the hydration by various analytical methods[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 156: 106780.
- [22] BANK L C, GENTRY T R, THOMPSON B P, et al. A model specification for FRP composites for civil engineering structures[J]. *Constr Build Mater*, 2003, 17(6): 405–437.
- [23] American Society for Testing and Materials. ASTM D4475—02 Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2002.
- [24] American Certification Institute. ACI 440.3R—12 Guide test methods for Fiber-reinforced Polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures[S]. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2012.
- [25] MANALO A, MARANAN G, BENMOKRANE B, et al. Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 109: 103564.
- [26] GUO X K, XIONG C S, JIN Z Q, et al. A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sea sand concrete environmental effects[J]. *J Build Eng*, 2022, 58: 105038.

Effects of Simulated Seawater Sea Sand Concrete Pore Solution Alkalinity on Durability of Basalt-carbon Hybrid Fiber Reinforced Plastics Bars

GUO Xiangke¹, WU Qingliang¹, ZHOU Xinxian¹, SONG Can¹, LI Weihua^{1,2}

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Infrastructure Corrosion Prevention and Control, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Institute of Chemistry, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China)

Extended Abstract

Introduction Alkaline environment-induced (Basalt fiber reinforced polymer) BFRP bars degradation is the prominent issues to BFRP-reinforced seawater sea sand concrete (SSSC) durability. A new type of basalt-carbon hybrid FRP (HFRP) bars was developed to improve the mechanical properties and durability of BFRP bars in marine environments. Herein, the effect of simulated SSSC pore solution alkalinity on the durability of HFRP bars was studied. Macro- and micro-properties of HFRP samples were tested, *i.e.*, tensile properties, interlayer shear properties, microstructure, chemical composition, and chemical stability. Meanwhile, the degradation mechanism of HFRP bars in simulated SSSC pore solutions with different alkalinity has also been summarized. The results show that compared with BFRP bars, the initial tensile strength of HFRP bars has been significantly improved, and its interfacial strength has not weakened. After 90 d of corrosion, the increase in alkalinity leads to a maximum decrease in tensile strength and interlayer shear strength degradation of 19.67% and 23.43%, respectively. The degradation of HFRP bars includes fiber etching, resin hydrolysis, degradation of interfaces on fiber/resin and BFRP/CFRP. The smaller diameter and excellent corrosion resistance of carbon fiber, and BFRP/CFRP interface barrier function delay the penetration and corrosion of moisture and existing ions, *i.e.*, Cl^- and OH^- , improving the durability of HFRP bars in high alkaline SSSC environments.

Methods Tensile properties, interlayer shear properties, microstructure, chemical composition, and chemical stability of HFRP bars in simulated SSSC pore solution with different alkalinity were systematically measured. The research mainly adopts a combination of macroscopic performance testing and microscopic testing analysis.

Both epoxy resin based BFRP and HFRP bars with a nominal diameter d of 10 mm were prepared by pultrusion process. HFRP bars consists of inner and outer cores made of CFRP and BFRP materials, respectively. The volume fraction of carbon fiber replacing basalt fiber was 25%.

Three alkaline salt solutions with different pH values were designed to study the effects of simulated SSSC pore solution alkalinity on HFRP bars. The ordinary SSSC pore solution ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2 g/L, KOH 19.9 g/L, NaOH 2.4 g/L) was prepared from seawater with a pH value of 13.2. Two lower alkalinity SSSC pore solutions with pH value of 12.3 and 10.1 were diluted with artificial seawater, respectively. All corrosion exposure experiments were conducted in a constant temperature water tank at 55 °C.

The tensile performance was evaluated according to ACI 40.3R-12. The total length of the sample was 1000 mm, and the testing section was 10 d. The interlayer shear performance was determined based on ASTM D4475. The length and span of the sample were 7d and 6d, respectively. All experiments were conducted using MTS testing. The testing rates for tension and interlayer shear are 2 mm/min and 1.3 mm/min, respectively.

Digital microscopy (DM) and SEM-EDS were used to analyze the corrosion morphology and composition of BFRP and HFRP bars after corrosion. AFM was used to analyze the microstructure of the transition zone at the BFRP/CFRP interface.

Results and discussion The macroscopic morphology analysis results indicate that the carbon fiber hybrid did not change the tensile line elastic failure mode and interlayer interface failure modes of HFRP bars. Compared to BFRP bars, the ultimate load of HFRP bars was increased, and the explosive fibers during failure were significantly reduced with the extension of corrosion time and the increase in simulated SSSC pore solution alkalinity; Both BFRP and HFRP bars interlayer interface failures involve a main crack that runs through and deviates from the BFRP/CFRP interface.

The carbon fiber hybrid improves the tensile properties and interlayer interface properties of HFRP bars, and enhances its corrosion resistance in alkaline simulated SSSC pore solution. Taking tensile strength as an example, compared with BFRP bars, the tensile strength of BFRP bars in simulated SSSC pore solutions with pH values of 10.1, 12.4, and 13.2 was 78.48%, 71.20%, and 26.20% of its original value, while the corresponding values of HFRP bars were 87.86%, 85.22%, and 55.26%, respectively. After 90 d of corrosion, the maximum decrease in tensile strength and interlayer shear strength due to the increase in alkalinity was 19.67% and 23.43%, respectively.

The degradation of HFRP bars in alkaline SSSC pore solution includes fiber etching, resin hydrolysis, and degradation of fiber/resin interfacial and BFRP/CFRP interfacial properties. The smaller diameter of carbon fiber, excellent corrosion resistance, and BFRP/CFRP interface barrier function delay the penetration and corrosion of moisture and existing ions, improving the durability of HFRP bars in high alkaline SSSC environments.

Keywords hybrid fiber reinforced plastics bars; seawater sea sand concrete; alkalinity pore solution; mechanical properties; durability