

DOI:10.11918/201908057

不同侵蚀环境下 GFRP 筋抗拉性能退化试验

宣广宇, 陆春华, 徐 可, 阮向杰

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为研究 GFRP (glass fiber reinforced polymer) 筋在不同侵蚀环境下的抗拉性能, 对侵蚀前后 GFRP 筋进行了拉伸试验, 重点分析了侵蚀环境类别和暴露时间对 GFRP 筋抗拉性能的影响。采用了两种侵蚀方式: 一是直接将 GFRP 筋浸泡在碱、盐和清水溶液中, 浸泡周期为 180 d; 二是将 GFRP 筋埋置于混凝土梁内, 加载后将梁置于大气和氯盐干湿环境中, 周期为 366 d。借助扫描电子显微镜 SEM (scanning electron microscopy) 对埋置于混凝土梁内 GFRP 筋的微观结构变化及其损伤机制进行了分析。试验及分析结果表明: GFRP 筋的抗拉性能随溶液直接浸泡时间的增加出现不同程度的降低, 浸泡 180 d 后, GFRP 筋的抗拉强度在碱、盐和清水溶液中分别退化 30.0%、21.3% 和 11.3%; 对于混凝土梁内 GFRP 筋, 366 d 后其抗拉强度下降约为 10%; 结合试验结果和 SEM 微观结构分析, 可认为导致 GFRP 筋抗拉性能退化的主要原因是纤维与树脂基体黏结性能降低。最后, 基于 Arrhenius 模型对 GFRP 筋在两种侵蚀方式下的抗拉性能退化进行了拟合分析, 并对其在碱、盐直接浸泡和混凝土梁内环境下的长期性能进行了预测。

关键词: GFRP 筋; 侵蚀环境; 抗拉性能; 退化模型; SEM

中图分类号: TU532 + .3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2020)08 - 0161 - 08

Experiment on tensile properties of GFRP bars exposed to different aggressive environments

XUAN Guangyu, LU Chunhua, XU Ke, RUAN Xiangjie

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: To explore the tensile properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars exposed to different aggressive environments, the tensile properties of GFRP bars before and after conditioned were tested. Effects of environmental categories and exposure periods on the tensile properties of GFRP bars were analyzed. The GFRP bars were conditioned in two different ways: the first part of GFRP bars were directly immersed in different solutions (alkaline solution, salt solution, and tap water) with the immersion period of 180 days; and the second part of GFRP bars were embedded in sustained-loaded concrete beams exposed to outdoor air and NaCl solution in drying-wetting cycles with the total period of 366 days. Scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the microstructure changes of the GFRP bars placed in concrete beams. Test and analytical results show that the tensile properties of the GFRP bars immersed in aggressive solutions had different degrees of degradation with increasing exposure period. After 180 days of exposure to solutions, the tensile strength decreased by 30.0%, 21.3%, and 11.3% in alkaline solution, salt solution, and tap water, respectively. For the GFRP bars embedded in concrete, the average loss of the tensile strength of the bars was about 10% after 366 days. Based on the test results and SEM microstructure analysis, it can be deduced that the main reason of the degradation of conditioned GFRP bars is the debonding between the fibers and the resin matrix. Finally, the tensile strength degradation of GFRP bars under two conditions were fitted based on Arrhenius model. In addition, the long-term performance predictions of GFRP bars exposed to alkaline solution and salt solution and embedded in concrete beams were proposed, respectively.

Keywords: GFRP bars; aggressive environment; tensile properties; degradation model; SEM

纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, 简写 FRP) 筋, 具有轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀、电磁绝

缘等优点^[1], 已逐渐成为土木、水利以及交通工程等结构设计中一种潜在用材。其中, GFRP (glass FRP) 筋凭借其造价低、综合性价比高特点, 在各类混凝土结构中有广泛的应用前景。作为普通钢筋的替代品, 配置 FRP 筋的混凝土结构构件通常会在酸、碱、氯盐和潮湿等各种环境中服役。因此, 以 GFRP 筋为例, 其在侵蚀环境中的力学长期性能需要进行大量试验研究与理论分析。

收稿日期: 2019 - 08 - 13

基金项目: 国家自然科学基金 (51578267, 51878319);

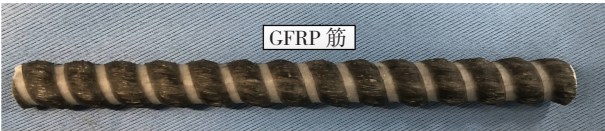
江苏省“六大人才高峰”高层次人才选拔培养资助项目 (2015 - JZ - 008)

作者简介: 宣广宇 (1995—), 男, 硕士研究生;

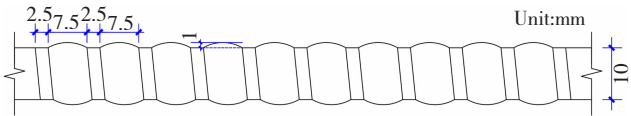
陆春华 (1979—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陆春华, lch79@ujs.edu.cn

当前,针对 GFRP 筋在侵蚀环境下力学性能的研究,主要关注其抗拉性能的退化规律. 研究表明所处环境不同的 GFRP 筋,其抗拉性能的退化存在较大差异^[2],并受到树脂基体材料的影响^[3];且随着腐蚀暴露龄期的增加,GFRP 筋的抗拉性能退化愈明显^[4-5]. 目前,国内外大部分研究主要从材料本身入手,用人工配置的溶液来模拟实际服役时所处的侵蚀环境,对 GFRP 筋的抗拉性能进行测试分析. 然而,D'antino 等^[6]指出:直接浸泡侵蚀比真实混凝土环境下的腐蚀更为恶劣,利用直接浸泡试验得到的数据对 GFRP 筋的抗拉性能退化进行预测会显得有些保守. 此外,实际混凝土结构工程往往在荷载和环境等诸多因素耦合作用下服役,也需要考虑荷载因素^[7]. 因此,需要增加对埋置于混凝土内 GFRP 筋在受荷状态下的抗拉性能退化的对比研究. 此外,一般认为 FRP 筋的抗拉性能退化往往是由其微观结构变化所引起,因此将扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, 简写 SEM) 的微观结构分析与宏观抗拉性能退化研究相结合,已成为探讨 FRP 筋抗拉性能退化的有效途径^[4].



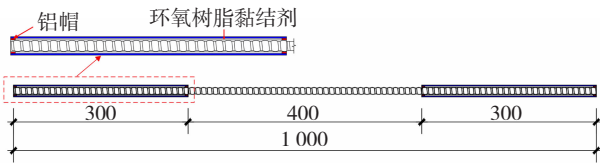
(a) GFRP 筋实物图



(b) GFRP 筋尺寸详图

图 1 GFRP 筋
Fig. 1 GFRP bar

参考 JG/T 406—2013《土木工程用玻璃纤维增强筋》^[8]的要求,制作了 GFRP 筋拉伸试件 (见图 2 (a)),测得 GFRP 筋的初始抗拉性能,见表 1. GFRP 筋的典型拉伸破坏形态为炸散式,主要呈炸散絮状,见图 2(b).



(a) 拉伸试件示意



(b) 拉伸试件典型破坏图

图 2 GFRP 筋拉伸试样 (mm)

Fig. 2 GFRP specimens in tensile test (mm)

2 试件制作及侵蚀试验方案

2.1 直接浸泡试验

在进行浸泡试验前,用环氧树脂将待侵蚀 GFRP 筋试样的两端 (长度 300 mm, 见图 2(a)) 进行密封处理,以保护锚固段筋材,避免其遭受侵蚀.

鉴于此,本文首先从材料出发,通过对 GFRP 筋的直接浸泡试验,探究不同浸泡环境与浸泡时间对 GFRP 筋抗拉性能的影响. 其次以构件为落脚点,将 GFRP 筋埋置于混凝土梁中进行加载侵蚀试验,对比分析碱溶液直接浸泡与实际混凝土环境对 GFRP 筋腐蚀的差异. 最后,对 GFRP 筋在碱、盐直接浸泡和实际混凝土环境下的长期性能进行了预测. 此外,对埋置于混凝土梁内 GFRP 筋进行 SEM 观测,进一步探究了 GFRP 筋抗拉性能的损伤机制. 相关研究可为 GFRP 筋的实际工程应用提供一定的理论与试验基础.

1 GFRP 筋及其初始力学性能

本文选用南京锋晖复合材料有限公司生产的 GFRP 筋,公称直径为 12 mm. 该 GFRP 筋由玻璃纤维和乙烯基酯树脂按一定的比例混合后通过拉挤成型工艺制备而成,质量含纤率为 64%;筋材表面处理方式带肋缠绕式见图 1(a),其肋纹间距与肋高尺寸见图 1(b).

表 1 GFRP 筋初始实测力学性能

Tab. 1 Measured mechanical properties of GFRP bar

筋材种类	公称直径/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变
GFRP	12	971.8	40.2	0.024 2

注:表中所示结果为 3 个试件的平均值.

待环氧树脂全部硬化后,将 GFRP 筋分别置于装有碱溶液、盐溶液和清水的溶液箱中进行浸泡试验. 溶液具体配置方法:①碱溶液:依据 ACI 440. 3R - 04 规范^[9]中的相关建议与方法进行配置,用于模拟混凝土内的碱性环境,具体配比见表 2;②盐溶液:依据 ASTM D665 - 14e1 规范^[10]中的相关建议与方法

进行配置,用来模拟海水环境,具体配比见表 3;
③清水:由自来水组成,近似模拟室外潮湿环境. 试验在结构实验室内进行,环境温度为室温;在试验周期内,定期测量侵蚀溶液的 pH 值,保证其溶质的含量处于稳定状态.

为定量描述侵蚀溶液浸泡下 GFRP 筋的力学性能退化过程,将试件分别浸泡 45、90、135 和 180 d 后取出(每种溶液取一组 3 根),并使其干燥,然后按图 2(a)进行拉伸试件制备并进行力学性能测试. 试验发现,拉伸试件的破坏形式仍以炸散式为主,个别试件由于筋材与锚具间黏结不足而出现滑移破坏,视为无效结果,在计算中不予采用.

以碱溶液为例,不同浸泡时间后 GFRP 筋拉应力-应变曲线关系见图 3. 由图 3 可见,浸泡后试件拉应力-应变的变化特性与未浸泡试件类似,即从开始加载到峰值荷载,其拉应力-应变曲线基本呈线性增长,超过峰值荷载后突然下降,呈现脆性破坏特征. 不同的是,浸泡后试件的峰值荷载随浸泡时间的增加而逐渐降低.

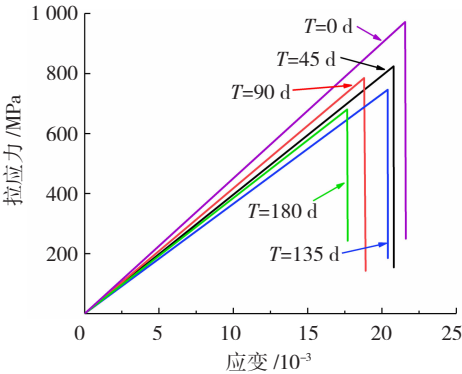


图 3 碱溶液直接浸泡下 GFRP 筋拉应力-应变关系

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of GFRP bars immersed in alkaline solution

表 2 碱性溶液各组分分配比

Tab. 2 Distribution ratio of alkaline solution group

1 L 水所含溶质克数/(g · L ⁻¹)			实测 pH 值
Ca(OH) ₂	NaOH	KOH	
118.5	0.9	4.2	12.9

表 3 盐溶液各组分分配比

Tab. 3 Distribution ratio of salt solution group

1 L 水所含溶质克数/(g · L ⁻¹)					实测 pH 值
NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	
24.53	5.20	4.09	1.16	0.70	7.1

2.2 混凝土梁内 GFRP 筋侵蚀试验

将 GFRP 筋作为受力筋配置在混凝土梁内,梁尺寸和配筋构造详图见 4(a). 混凝土设计强度等级为 C30,其配合比为水泥:水:砂:石=449:220:615:1 116,水灰比为 0.49. 其中水泥采用 P. O 42.5

硅酸盐水泥;粗骨料采用粒径为 5~22 mm 的碎石;砂选用粗砂;水为自来水. 实测 28 d 标准立方体混凝土强度为 37.9 MPa.

为了反映实际结构中混凝土梁的受荷情况,采用图 4(b)所示的两两自锚方式对试验梁施加持续荷载至开裂状态. 随后将两两自锚梁分成两部分,一部分试件直接置于室外,承受一般大气环境的作用,记为自然老化环境;另一部分试件置于质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中进行干湿循环作用,每个干湿循环周期为 6 d,干湿比例为 1:1,模拟实际混凝土构件遭受海水干湿交替作用,记为加速侵蚀环境,见图 5(a). 以上两类试件的暴露时间均为 366 d. 待试验结束后,将混凝土梁破型,从中取出 GFRP 筋,见图 5(b). 清洗并干燥后按图 2(a)进行拉伸试件制备并进行力学性能测试. 经测定,试件的破坏形式与拉应力-应变关系与直接浸泡试验的试件类似.

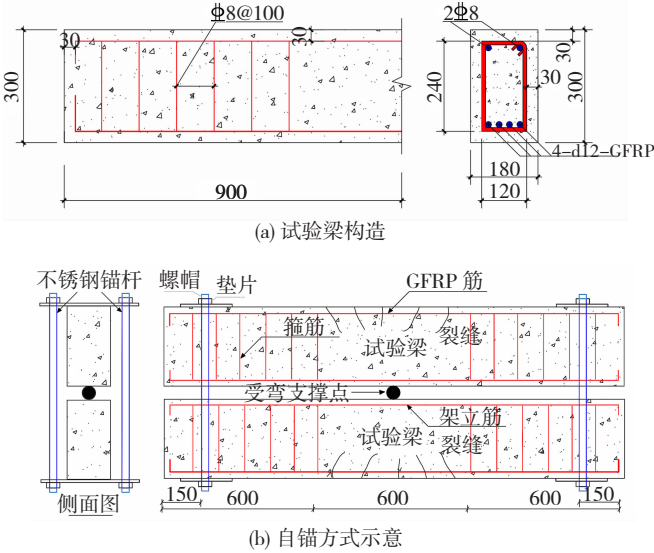


图 4 试验梁构造图与自锚方式示意 (mm)

Fig. 4 Schematic diagram of test beam construction and self-anchoring method (mm)



(a) 加速侵蚀环境



(b) 侵蚀后混凝土梁内 GFRP 筋

图 5 混凝土梁内 GFRP 筋的长期侵蚀试验

Fig. 5 Long-term erosion test of GFRP bars in concrete beams

3 试验结果及分析

3.1 直接浸泡下 GFRP 筋抗拉性能变化

对不同浸泡龄期的 GFRP 筋进行拉伸试验,结果见表 4.

表 4 直接浸泡下 GFRP 筋拉伸试验结果							
Tab.4 Tensile test results of GFRP bars immersed in solutions							
侵蚀环境	暴露时间/d	抗拉强度		弹性模量		极限拉应变	
		平均值/ MPa	保留率/%	平均值/ GPa	保留率/%	平均值	保留率/%
未侵蚀	0	971.8	100.0	40.2	100.0	0.024 2	100.0
	45	824.1	84.8	39.7	98.6	0.020 7	85.5
	90	785.2	80.8	41.8	103.9	0.018 8	77.7
	135	745.8	76.7	40.6	100.1	0.018 3	75.6
	180	680.4	70.0	38.5	95.8	0.017 7	73.1
碱溶液	45	895.7	92.2	39.7	98.9	0.022 5	93.0
	90	883.3	90.9	40.4	100.5	0.021 9	90.5
	135	826.0	85.0	40.5	100.6	0.020 4	84.5
	180	774.6	79.7	41.1	102.3	0.018 8	77.7
	45	931.9	95.9	40.2	99.9	0.023 2	95.9
盐溶液	90	872.8	89.8	39.2	97.6	0.022 2	91.7
	135	867.5	89.3	39.7	97.4	0.021 9	90.5
	180	862.3	88.7	40.1	99.8	0.021 5	88.8
	45	872.8	89.8	39.2	97.6	0.022 2	91.7
	90	867.5	89.3	39.7	97.4	0.021 9	90.5
清水	135	867.5	89.3	39.7	97.4	0.021 9	90.5
	180	862.3	88.7	40.1	99.8	0.021 5	88.8

3.1.1 抗拉强度

对比本文试验和现有文献[2,11-12]结果,直接浸泡后 GFRP 筋的抗拉强度保留率见图 6. GFRP 筋的抗拉强度随着浸泡时间的增加,均出现下降的趋势. 其中,在碱环境下退化最为明显,盐环境次之,清水环境影响最小. 文献[11,13]研究发现碱性溶液有较高浓度的 OH⁻, 并会与 GFRP 筋中的 Si-O 发生化学反应,使 GFRP 筋内部受损,抗拉强度退化明显. 已有文献[14]指出,GFRP 筋抗碱能力较为一般,而其在氯盐环境下有着较好的耐腐蚀性能. 本文试验结果在一定程度上也验证了这点. 此外,本文 GFRP 筋在清水浸没 180 d 后,其抗拉强度退化了 11.3%. 一般认为,GFRP 筋在清水长时间浸泡过程中,水分会导致玻璃纤维与树脂基体发生膨胀,且树脂基体在清水中发生水解反应后产生少量 OH⁻,并破坏 GFRP 筋中的 Si-O 的结构,从而导致 GFRP 筋的抗拉强度在清水中也出现一定程度的退化^[11].

在本文试验浸泡周期内,GFRP 筋抗拉强度的退化在初期较快,随后逐渐变缓. 以本试验中碱环境为例,在浸泡 45 d 后,GFRP 筋的强度损失率接近总损失率的 50%;而 90 d 至 180 d(共浸泡 90 d)的损失率仅为 40%,文献[2,11-12]的试验结果也验证这一

退化规律. 其原因可能在于,随着浸泡时间的增加,溶液在 GFRP 筋中的扩散达到一定深度后难度加大,反应生成物在 GFRP 筋内部产生堆积,使侵蚀速率日趋平缓^[15].

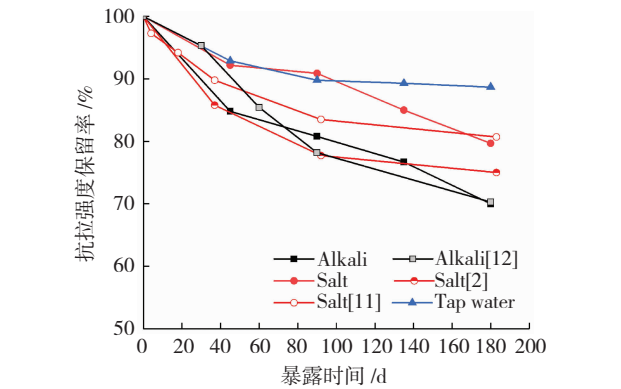


图 6 GFRP 筋抗拉强度保留率随暴露时间退化关系
Fig.6 Variation of tensile strength retention of GFRP bars with exposure time

由图 6 可见,文献[2]盐环境中 GFRP 筋的退化速度和损伤程度均明显高于本试验和文献[11]的结果,究其原因为本试验与文献[12]的溶液温度为室温,而文献[2]的溶液温度为 60℃,这表明所处环境温度的提高对 GFRP 筋抗拉强度的退化起到了明显的加速作用. 已有文献[11]研究发现,随着溶液温度的升高,OH⁻与纤维的化学反应速率会相应提升,加快了筋材被腐蚀的速度,从而加大 GFRP 筋抗拉强度退化的程度.

3.1.2 弹性模量

由表 4 可见,经 3 种溶液浸泡后,GFRP 筋材的弹性模量退化不明显,弹性模量损失基本上在 5% 以内;且由于测量、试验装置等因素的影响,还会造成弹性模量略有提高的情况出现^[15]. 因此,结合本文和文献[11]试验结果,可认为在常温下 GFRP 筋的弹性模量受侵蚀环境影响不大. 此外,文献[2]溶液温度虽为 60℃,而其弹性模量的变化也与本文相近. 具体原因在于^[16]:FRP 筋中的纤维是影响其弹性模量的主要因素,当筋材在常温下时,并未达到纤维的软化温度,故在试验周期内其弹性模量变化不大.

3.1.3 极限拉应变

不同浸泡环境下 GFRP 筋的极限拉应变保留率随时间变化关系见图 7. 图 7 也给出了文献[2,11]的试验结果. 由图 7 可见,GFRP 筋极限拉应变的退化过程与其抗拉强度的变化趋势相近. 主要原因为浸泡后 GFRP 筋的拉应力-应变关系仍为直线关系,且极限拉应变在数值上表现为抗拉强度与弹性模量和横截面积乘积的比值[8]. 在本文试验和文献[2,11]中,随着浸泡时间的增加,GFRP 筋的抗拉强度逐渐下降,且其弹性模量保留率均在 95% 以上,所以极限拉应

变与其抗拉强度的变化趋势相近,即随着时间的增加逐渐呈下降趋势.

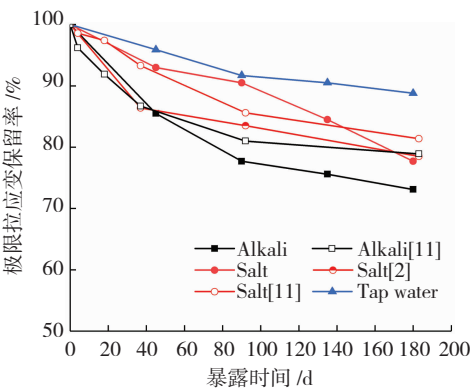


图 7 GFRP 筋极限拉应变保留率随暴露时间退化关系
Fig. 7 Variation of ultimate tensile strain retention of GFRP bars with exposure time

3.2 混凝土梁内 GFRP 筋抗拉性能变化

对于置于一般大气环境下的混凝土梁(自然老化环境),其内部 GFRP 筋所处的环境可视为混凝土内碱环境为主,并受大气环境的影响.经 366 d 后,测得本文试验中自然老化环境下 GFRP 筋的抗拉强度保留率为 92.8%.为对比分析碱环境下直接浸泡与混凝土环境对 GFRP 筋腐蚀的差异,综合本文试验和现有文献[11-12,17-18]结果,自然老化环境与碱溶液直接浸泡(180 d)后 GFRP 筋的抗拉强度保留率对比关系见图 8.

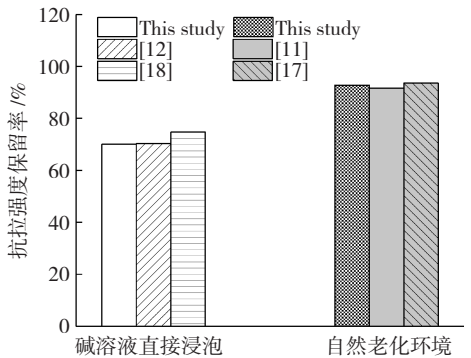


图 8 两种碱环境下 GFRP 筋抗拉强度保留率对比
Fig. 8 Comparison of tensile strength retention of GFRP bars in two alkaline environments

由图 8 可见,本文试验、文献[12,18]在碱溶液直接浸泡(180 d)后的结果远远大于本文自然老化试验和文献[11,17]的结果.究其原因因为自然老化环境虽是碱性,由于受混凝土碳化的影响,其 pH 值会逐渐下降,从而导致混凝土腐蚀 GFRP 筋的能力随时间逐渐降低.而将 GFRP 筋直接浸泡在碱溶液时,溶液 pH 值始终保持恒定,与实际混凝土相比,其腐蚀筋材效果更强,从而导致 GFRP 筋提前发生了劣变,大大降低其抗拉强度.

对于置于 NaCl 溶液干湿循环条件下混凝土梁(加速侵蚀环境),其内部 GFRP 筋所处的环境以混凝土内碱环境为主,并受 NaCl 溶液的影响.为探究其与自然老化环境下混凝土梁内 GFRP 筋抗拉性能退化的差异,结合本文试验和相关文献[11,17,19]结果,图 9 给出了加速侵蚀环境与自然老化环境下混凝土梁内 GFRP 筋抗拉强度保留率的对比.

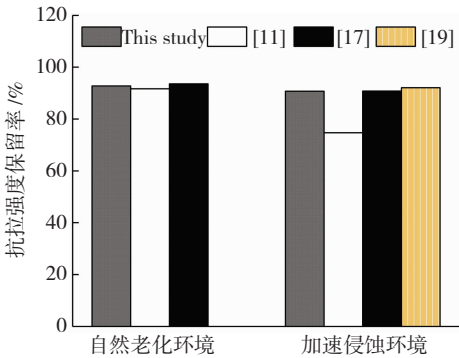


图 9 混凝土梁内 GFRP 筋抗拉强度保留率
Fig. 9 Tensile strength retention of GFRP bars in concrete beams

由图 9 可见,加速侵蚀环境下本文试验和现有文献[17,19]的结果稍大于本文试验和现有文献[11,17]在自然老化环境的结果,究其原因因为加速侵蚀环境下持续荷载产生的裂缝为 NaCl 溶液进入混凝土内部提供了途径,使其到达 GFRP 筋表面的难度大大降低,从而导致其损失率高于自然老化环境.此外由于本文试验和文献[17,19]中的构件是置于 NaCl 溶液中,而 GFRP 筋有较强的抗氯离子侵蚀能力,故不会造成梁内 GFRP 筋出现较大程度的退化.而文献[11]的梁是置于碱性溶液中,该梁中 GFRP 筋退化程度明显高于在梁置于 NaCl 中的情况.因此,结合本试验和现有文献[11,17,19],可以认为当梁置于 NaCl 溶液时,其内部 GFRP 筋退化程度有限,而当梁置于碱溶液中,其内部 GFRP 筋会出现较大程度的退化.

4 GFRP 筋微观结构分析

由于混凝土内 GFRP 筋的侵蚀效果更符合工程实际,故对未侵蚀和埋置于混凝土梁内 GFRP 筋的微观结构进行了 SEM 观测分析.因经过混凝土梁内侵蚀后 GFRP 筋的表面较为松散,为有效降低在制作电镜观测试样时由人为因素导致 GFRP 筋内部结构损失,在切割和抛光处理前,用环氧树脂对试样进行嵌固.经测定未侵蚀及混凝土梁内侵蚀后 GFRP 筋(横/纵)断面的 SEM 结果分别见图 10、11.图中虚线为 GFRP 筋试样的外边缘,实线是腐蚀临界线,平整无玻璃纤维部分为环氧树脂嵌固胶.

由图 10 可见,未侵蚀的 GFRP 筋纤维与树脂基

体黏结紧密,且外边缘未见纤维松散;在混凝土自然老化环境下,纤维与树脂基体之间的黏结发生了松弛,其边缘最外层纤维出现松散;而在混凝土加速侵蚀环境下,纤维与树脂基体之间的黏结程度进一步降低,松散区域越来越大.值得注意的是,横断面上

可明显地观察到腐蚀区域与未腐蚀区域的临界线(图中实线),虽然经过侵蚀后纤维与树脂基体黏结出现不同程度的松散,但内部的纤维和树脂基体仍保持较好的黏结,未出现明显的松弛.

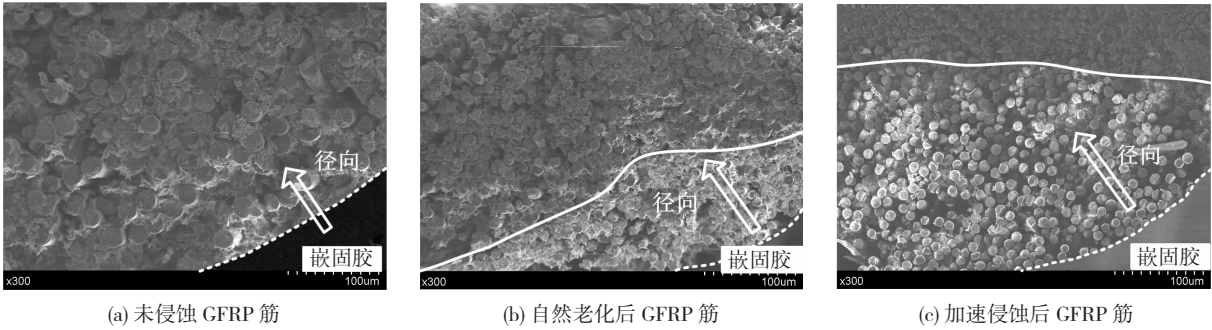


图 10 侵蚀前后 GFRP 筋横断面 SEM 照片

Fig. 10 SEM images of transverse sections of GFRP bars before and after corrosion

由图 11 可见,随着环境的改变,纤维与树脂基体虽出现不同程度的脱黏,见图中标记处,但纤维丝的表面仍较为光滑,其表面无明显损伤出现.这也是混凝土梁内 GFRP 筋抗拉性能未出现明显退化的主要原因.

GFRP 筋的受侵蚀是一个沿筋材径向从外部逐渐向内部不断深入的过程,并且腐蚀主要造成了纤维和树脂基体黏结的降低,在腐蚀严重的外层会出现脱黏,而筋材内部未腐蚀区域并没有受到影响,纤维与树脂基体仍能保持初始的性能,所以筋材能保持较好的抗拉性能.

结合试验结果和 SEM 微观结构分析,可以看出

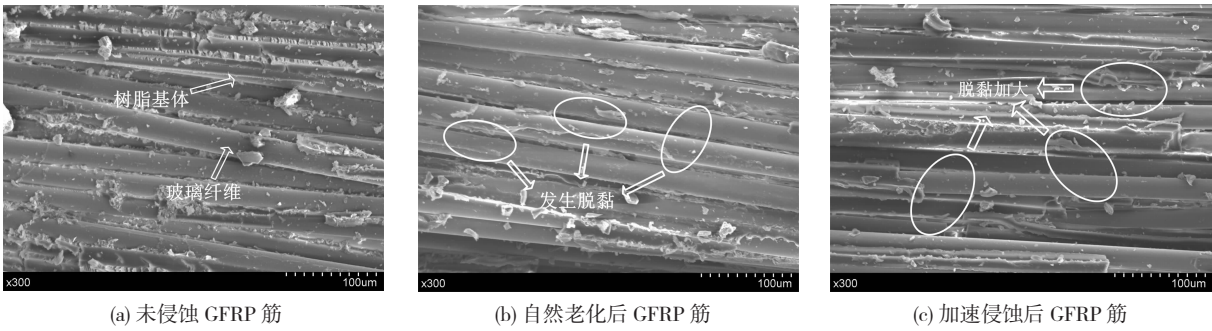


图 11 侵蚀前后 GFRP 筋纵断面 SEM 照片

Fig. 11 SEM images of vertical sections of GFRP bars before and after corrosion

5 GFRP 筋抗拉强度退化对比分析与预测

5.1 直接浸泡下 GFRP 筋抗拉强度退化对比分析

参照已有研究成果^[4,20-21],对于盐与碱溶液直接浸泡下的 GFRP 筋,可用 Arrhenius 模型对其抗拉强度保留率的退化进行数值拟合分析:

$$Y = 100\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \tag{1}$$

式中: Y 为 GFRP 筋抗拉强度保留率; t 为侵蚀时间, d ; τ 为拟合回归参数. 结合本文试验,对其在盐与碱溶液直接浸泡下抗拉强度保留率进行了拟合.

图 12(a) 给出了本文试件在碱溶液浸泡下的拟合曲线以及与现有文献^[11-12,18]的对比,图 12

(b) 为其在盐溶液浸泡下的拟合曲线以及与现有文献^[4,11,22]的对比. 由图 12 可见,本文拟合关系曲线能较好描述现有文献^[4,11-12,18,22]的试验结果. 由此可说明,本文拟合曲线具有一定适用性.

5.2 混凝土梁内 GFRP 筋抗拉强度退化对比分析

文献^[17]给出了自然老化环境下混凝土梁内 GFRP 筋抗拉性能退化模型:

$$Y = \begin{cases} 107.014 - 2.183\ln t, & t \leq 288 \text{ d}; \\ 95.819 - 0.004t & t > 288 \text{ d}. \end{cases} \tag{2}$$

结合文献^[11]和本文试验的试验结果,其与根据式(2)计算得到的理论值之间的对比见表 5. 该退化模型的理论计算值 Y_1 与试验值 Y_2 吻合度较高,该退化模型具有一定的可行性.

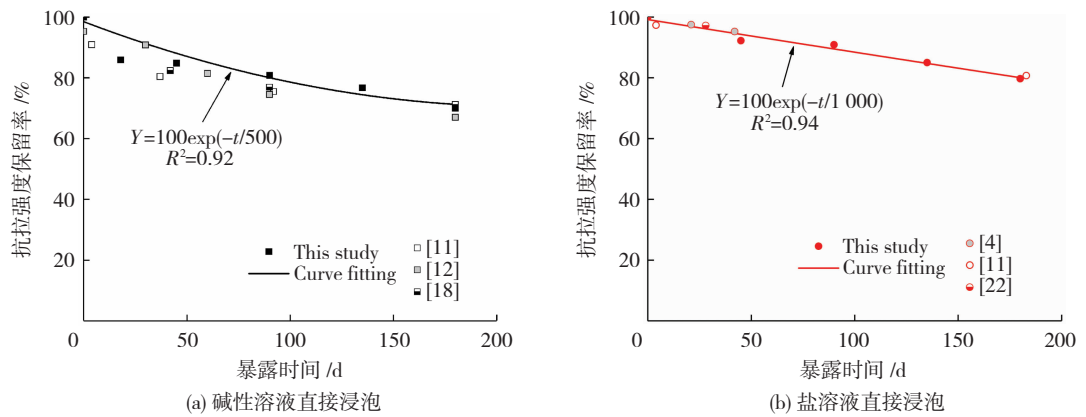


图 12 直接浸泡下 GFRP 筋抗拉强度退化数值拟合与对比分析

Fig. 12 Fitting and comparative analysis of tensile strength retention of GFRP bars immersed in aggressive solutions

表 5 自然老化环境下混凝土梁内 GFRP 筋抗拉强度保留率理论与实测值的对比

Tab. 5 Comparison of theoretical and measured values of tensile strength retention of specimens in concrete beams under natural aging environment

文献	t/d	Y ₁ /%	Y ₂ /%	(Y ₂ /Y ₁)/%	平均值(Y ₂ /Y ₁)/%
本文试验	365	94.36	92.79	98.34	97.75
文献[11]	360	94.38	91.70	97.16	

5.3 GFRP 筋长期性能预测

由于试验及人为物力等因素,研究 GFRP 筋长期性能退化往往是借助加速老化试验进行的^[23-24].文献[25]提出可以从考虑环境因素的短期试验数据回归分析得到 R_{10} ,即 FRP 筋抗拉强度每 10 a 的对数(记为 Log decade)下降的百分比,进而对 FRP 筋的长期性能进行预测.结合此方法对本文所用 GFRP 筋在盐、盐溶液浸泡下的服役寿命进行预测.GFRP 筋在盐、碱溶液直接浸泡下服役 50、100 a 后的抗拉强度保留率见图 13.

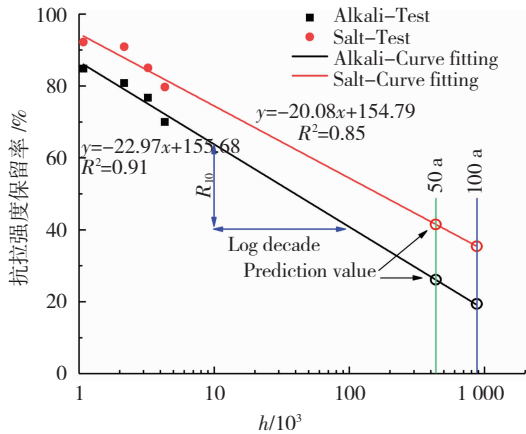


图 13 GFRP 筋长期性能预测

Fig. 13 Long-term predictions of tested GFRP bars

由图 13 可见,本文 GFRP 筋直接在盐溶液中服役 50 a 和 100 a 后,其抗拉强度保留率分别为 41.3%、35.5%,而直接在碱溶液中服役 50 a 和 100 a 后,其保留率则为 26.1%、19.2%.

上述结果为 GFRP 筋在盐、碱溶液直接服役的预测值,对其在自然老化环境下性能的预测需进一步探讨.参考本文 GFRP 筋在碱溶液与自然老化试验值,结合其在碱溶液的拟合曲线可推算出本文 GFRP 筋在自然老化环境下暴露一年相当于碱溶液直接浸泡 37 d.再结合文献[25]的方法,预测出其在自然老化环境下服役 100 a 后,抗拉强度保留率为 42.0%.可见,GFRP 筋在实际工况下服役 100 a 后,仍能够保持一定的力学性能.

6 结 论

- 1) GFRP 筋的抗拉性能随溶液直接浸泡时间的增加而降低;其中浸泡 180 d 后, GFRP 筋的抗拉强度在碱溶液中退化最为明显,盐溶液次之,清水环境影响最小.
- 2) 对于混凝土梁内 GFRP 筋,其抗拉强度下降速率明显小于碱溶液直接浸泡.分析认为混凝土的 pH 值会随碳化作用而逐渐下降,从而导致其腐蚀 GFRP 筋的能力随时间逐渐降低.
- 3) 结合试验结果和 SEM 微观结构分析,可认为导致 GFRP 筋抗拉性能退化的主要原因是纤维与树脂基体黏结性能的降低.
- 4) 由盐、碱溶液直接浸泡下 GFRP 筋长期性能的预测结果,可以发现 GFRP 筋的抗拉性能出现明显退化.相比而言,混凝土内 GFRP 筋在服役 100 a 后仍能保持良好的力学性能.

参考文献

[1] 王洋,董恒磊,王震宇. GFRP 筋混凝土梁受弯性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12):23
WANG Yang, DONG Henglei, WANG Zhenyu. Flexural experiment of concrete beams reinforced with GFRP bars [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(12):23. DOI:10.11918/j. issn. 0367-6234. 201804109

[2] 薛伟辰,刘亚男,付凯,等. 碱和海水环境下 GFRP 筋的抗拉性能

- 加速老化试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 40
- XUE Weichen, LIU Yanan, FU Kai, et al. Experimental research on accelerated ageing of tensile properties of GFRP bars in the alkaline and seawater environment[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Sciences Edition), 2015, 36(1): 40. DOI:10.3969/j.issn.1002-5634.2015.01.008
- [3] D'ANTINO T, PISANI M A. Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 476. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.175
- [4] WANG Zike, ZHAO Xiaoling, XIAN Guijun, et al. Long-term durability of basalt and glass-fibre-reinforced-polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea-sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 472. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038
- [5] SILVA M A G, DA FONSECA B S, BISCAIA H. On estimates of durability of FRP based on accelerated tests[J]. Composite Structures, 2014, 116(9): 382. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.05.022
- [6] D'ANTINO T, PISANI M A, POGGI C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 141: 131. DOI:10.1016/j.compositesb.2017.12.037
- [7] 代力, 何雄君, 杨文瑞, 等. 持续荷载作用下混凝土梁中玻璃纤维增强复合材料筋抗拉性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 5
- DAI Li, HE Xiongjun, YANG Wenrui, et al. Test for tensile properties of GFRP bars embedded in concrete beams under sustained loading[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 5. DOI:10.13204/j.gjz201603002
- [8] 土木工程用玻璃纤维增强筋: JG/T 406—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
- Glass fiber reinforced concrete for civil engineering: JG/T 406—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013
- [9] Guide test methods for fiber reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures: ACI 440. 3R-04[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2004
- [10] Standard test method for rust-preventing characteristics of inhibited mineral oil in the presence of water: ASTM D665-14e1[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2014
- [11] 代力. 持续荷载与环境作用下混凝土梁中 GFRP 筋抗拉性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017
- DAI Li. Study on tensile properties of GFRP bars embedded in concrete beams under sustained load and environment effects[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017
- [12] WON J P, LEE S J, KIM Y J, et al. The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(5): 766. DOI:10.1016/j.compositesb.2007.11.002
- [13] CHEN Yi, DAVALOS J F, RAY I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. Composite Structures, 2007, 78(1): 102. DOI:10.1016/j.compstruct.2005.08.015
- [14] MICELLI F, AIELLO M A. Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments[J]. Composites Part B: Engineering, 2017(3): 9. DOI:10.1016/j.compositesb.2017.03.005
- [15] 吴刚, 朱莹, 董志强, 等. 碱性环境中 BFRP 筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014(8): 35
- WU Gang, ZHU Ying, DONG Zhiqiang, et al. Experimental study on the corrosion resistance performance of BFRP bars in the alkaline environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2014(8): 35. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2014.08.029
- [16] 李趁趁, 王英来, 赵军, 等. 高温后 FRP 筋纵向拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 1079
- LI Chenchen, WANG Yinglai, ZHAO Jun, et al. Longitudinal tensile properties of FRP bars after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6): 1079. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2014.06.024
- [17] 董杰, 何雄君, 章恒, 等. 混凝土梁中 GFRP 筋加速老化与自然老化相关性分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(2): 315
- DONG Jie, HE Xiongjun, ZHANG Heng, et al. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams[J]. Wuhan University of Technology Journal (Transportation Science and Engineering Edition), 2017, 41(2): 315. DOI:10.3963/j.issn.2095-3844.2017.02.027
- [18] STEPANEK P, JANUS O, GIRGLE F, et al. Long term strength of GFRP reinforcement by alkaline, temperature and cyclic loading[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 11: 14. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.003
- [19] ROBERT M, BENMOKRANE B. Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38(1): 277. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.021
- [20] CHEN Yi, DAVALOS J F, RAY I, et al. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(4): 282. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279)
- [21] DAVALOS J F, CHEN Yi, RAY I. Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(16): 1911. DOI: 10.1177/0021998311427777
- [22] 张新越, 欧进萍. FRP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 34
- ZHANG Xinyue, OU Jinping. Durability experimental research on resistance of acidic, alkali, salt solutions and freeze-thaw properties of FRP bar[J]. Wuhan University of Technology Journal, 2007, 29(1): 34. DOI:10.3321/j.issn:1671-4431.2007.01.009
- [23] KIM H Y, PARK Y H, YOU Y J, et al. Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions[J]. Composite Structures, 2008, 83(1): 38. DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.03.005
- [24] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, AIMUSALLAM T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 843. DOI:10.1016/j.compositesb.2012.05.004
- [25] PILAKOUTAS K, BURGOYNE C J, BYARS E, et al. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in concrete structures[M]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007: 44