

文章编号:1007-9629(2023)02-0156-07

# 混凝土环境中 GFRP 筋性能衰退的规律及机理

李文超<sup>1,2</sup>, 周广发<sup>3</sup>, 温福胜<sup>1</sup>, 刘福胜<sup>2,\*</sup>, 焦裕钊<sup>4</sup>

(1. 泰山学院 机械与建筑工程学院, 山东 泰安 271000; 2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 3. 水发规划建设有限公司, 山东 济南 250100; 4. 山东斯福特实业有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:**为了探究玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋在模拟和真实混凝土环境中性能衰退的规律及机理,设置了碱溶液(AS)和混凝土包裹 GFRP 筋后置于自来水中(CS)2种侵蚀环境,采用短梁剪切法分析了 GFRP 筋力学性能衰退规律,并借助扫描电子显微镜、差示扫描量热法分析了 GFRP 筋的微观结构和玻璃化转变温度( $T_g$ )。结果表明:随着温度的升高,GFRP 筋层间剪切强度衰退的速率加快;GFRP 筋在 60 °C 的 AS 中老化 183 d 后层间剪切强度保留了 48.6%, $T_g$ 降低了 9.2%,部分纤维与树脂脱黏,树脂出现孔洞;相同条件下 CS 中 GFRP 筋的层间剪切强度保留了 61.4%, $T_g$ 降低了 3.4%,纤维产生浅坑。基于 Arrhenius 方程建立了北京地区 GFRP 筋的性能预测模型。

**关键词:**玻璃纤维增强复合材料筋;混凝土环境;微观结构;玻璃化转变温度;预测模型

中图分类号:TU532

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.007

## Degradation Law and Mechanism of GFRP Bars in Concrete Environment

LI Wenchao<sup>1,2</sup>, ZHOU Guangfa<sup>3</sup>, WEN Fusheng<sup>1</sup>, LIU Fusheng<sup>2,\*</sup>, JIAO Yuzhao<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical and Architectural Engineering, Taishan University, Taian 271000, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 3. Shuifa Planning and Construction Co., Ltd., Jinan 250100, China; 4. Shandong Safety Industrial Co., Ltd., Taian 271000, China)

**Abstract:** The performance degradation rule and mechanism of performance of glass fiber reinforced polymer(GFRP) bars in simulated concrete pore solution and real concrete environment were explored. The GFRP bars were conditioned in two different ways. The first part of GFRP bars were immersed in alkali solution(AS) and the second part of GFRP bars were wrapped with concrete and then submerged in tap water(CS). The mechanical property degradation of GFRP bars was analyzed by using short beam shear method. Microstructure and glass transition temperature( $T_g$ ) of GFRP bars after aging in two environments for 183 days were analyzed using scanning electron microscopy and differential scanning calorimeter respectively. The results demonstrate that the degradation rate of GFRP bars increases with the increase of temperature. After 183 days aging treatment at 60 °C in AS environment, the interlaminar shear strength of GFRP bars is retained at 48.6%,  $T_g$  is reduced by 9.2%, the separation between fiber and resin is observed and a few holes may be seen in the resin. However, after the same treatment of GFRP bars in the CS environment, the interlaminar shear strength of GFRP bars is retained at 61.4%,  $T_g$  is reduced by 3.4%, and the fibers has shallow pits caused by erosion. Finally, the durability prediction model of GFRP bars serving in Beijing is established by using Arrhenius equation.

收稿日期:2021-12-20; 修订日期:2022-04-27

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GHZ015);中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20193700004703)

第一作者:李文超(1987—),男,山东泰安人,泰山学院讲师,山东农业大学博士生. E-mail: liwch@tsu.edu.cn

通讯作者:刘福胜(1964—),男,山东潍坊人,山东农业大学教授,博士生导师,博士. E-mail: liufsh@sdau.edu.cn

**Key words :** glass fiber reinforced polymer bar; concrete environment; microstructure; glass transition temperature; prediction model

玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋具有耐腐蚀、重量轻等特点,是腐蚀环境中钢筋的有效替代品之一<sup>[1-2]</sup>,但复杂的侵蚀环境和混凝土碱性环境对GFRP筋也存在不利影响<sup>[3-5]</sup>.为探明GFRP筋的耐久性能,研究者常采用加速老化试验测试GFRP筋的强度保留率并分析其性能衰退规律<sup>[6-9]</sup>,同时辅以扫描电子显微镜(SEM)、差示扫描量热仪(DSC)来探究GFRP筋的降解机理<sup>[10-11]</sup>.在宏、微观检测的基础上,利用Arrhenius方程等原理,提出纤维增强复合材料(FRP)筋不同的耐久性模型.Bank等<sup>[12]</sup>认为老化后FRP筋的强度保留率与老化时间的对数是线性关系,该模型被多次用于FRP筋耐久性的预测<sup>[13-14]</sup>.部分学者用指数关系描述FRP筋强度保留率与老化时间的关系<sup>[15-17]</sup>,此类模型认为FRP筋力学性能的退化机理为纤维与树脂脱黏.

在上述研究中,侵蚀环境多采用人工溶液,但人工溶液模拟的混凝土环境与真实混凝土环境对GFRP筋力学性能的影响差异较大<sup>[15-17]</sup>.在潮湿环境中,FRP筋的界面相最易受损<sup>[14]</sup>,表现为纤维和树脂的脱黏,与测试GFRP筋层间剪切强度时的破坏现象契合,而不同于研究者常采用的GFRP筋拉伸试验破坏.

基于此,本文通过测试不同温度(25、40、60℃)和老化龄期(15、30、60、90、183 d)GFRP筋的层间剪切强度保留率,分析其力学性能衰退的规律,利用SEM、DSC等方法揭示GFRP筋的降解机理,以得到GFRP筋在模拟和真实混凝土环境中的长期力学性能预测模型.

## 1 试验

### 1.1 试件制备及侵蚀环境

试验选用山东斯福特实业有限公司生产的GFRP筋,直径( $d$ )为16 mm,主要原材料为玻璃纤维和乙烯基树脂,其中纤维含量(质量分数)约80%.将GFRP筋截至长度80 mm,共制作104个试件.不同侵蚀环境中的试件如图1所示.

依据CAN/CSA S807-19《Specification for fibre-reinforced polymers》规定,在1 L去离子水中加入118.5 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、4.2 g KOH和0.9 g NaOH,测得溶液pH值约为13,用来模拟混凝土的孔溶液,该环境记为AS.另外,用厚度为20 mm的混凝土包裹GFRP筋后浸入自来水中,此环境记为CS.每种侵蚀环境均设置25、40、60℃3种温度,采用恒温水浴槽



图1 不同老化环境中的试件

Fig. 1 Specimens in different aging environments

控制试验水温.为保证GFRP筋的老化温度达到设计值,部分试件在GFRP筋表面安装贴片式热电偶温度传感器,采用多通道测温仪对其温度进行定期监测.

### 1.2 试验内容

按照ASTM D4475-02(2016)《Test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method》规定,设置跨距为48 mm,采用WAW-100D型电液伺服万能试验机进行短梁剪切试验(见图2),加载速率为1.3 mm/min,测得GFRP筋的破坏荷载( $P$ ),按下式计算层间剪切强度( $S$ ).

$$S = 0.849P/d^2 \quad (1)$$

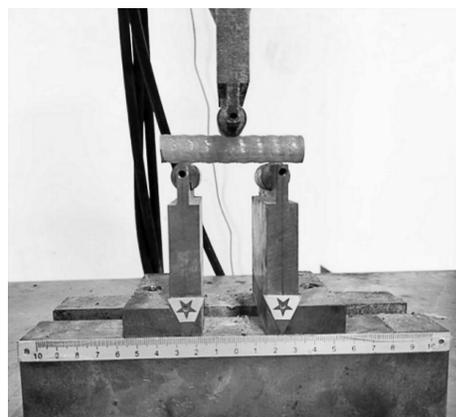


图2 短梁剪切试验

Fig. 2 Short-beam shear test

为分析GFRP筋性能衰退的机理,采用Gemini Sigma 300型SEM观测GFRP筋横、纵截面微观结构的变化,并利用Perkinelmer DSC 4000型DSC测试GFRP筋的玻璃化转变温度( $T_g$ ).

## 2 结果及分析

图3为GFRP筋的表面形态.由图3可见:GFRP

筋在 AS 环境中加速老化后,微溶于水的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  沉积在 GFRP 筋表面;在 CS 环境中,试件表面的树脂破坏,外部纤维与树脂分离。

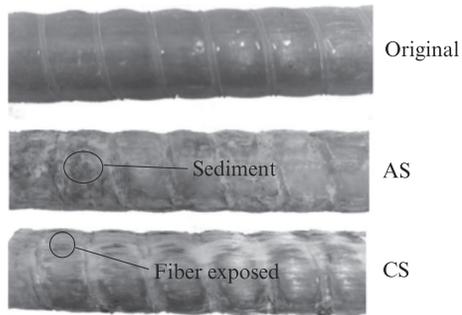


图3 GFRP筋的表面形态

Fig. 3 Surface morphologies of GFRP bars

## 2.1 短梁剪切试验

试验加载过程中试件两端出现裂缝,裂缝沿轴向逐渐增大,直至贯穿破坏.试验测得未加速老化 GFRP 筋试件的层间剪切强度为 46.93 MPa. 不同侵蚀环境下 GFRP 筋层间剪切强度保留率(Y)的对比如图4所示.由图4可见:

(1)2种侵蚀环境中 GFRP 筋层间剪切强度保留率的衰退速率均随着温度的升高而增大,GFRP 筋在 25、40、60 °C 的 CS 环境中加速老化 183 d 后,层间剪切强度相较于初始强度值分别衰退了 17.7%、27.6% 和 38.6%. 主要原因为温度升高可以加速 GFRP 筋的水解反应,降低其力学性能。

(2)GFRP 筋老化前期的强度衰退较快.同样以 CS 环境为例,0~90 d GFRP 筋在 25、40、60 °C 下的层间剪切强度相较于初始强度值分别衰退了 11.4%、20.9% 和 27.8%,90~183 d 该数据为 6.3%、6.7% 和

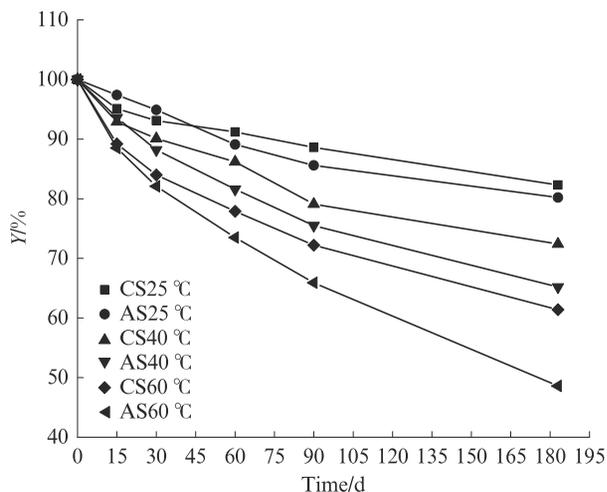


图4 不同侵蚀环境下 GFRP 筋的层间剪切强度保留率对比  
Fig. 4 Comparison of Y of GFRP bars in different aggressive environments

10.8%. 在老化前期,水分子迅速扩散至筋材,削弱了树脂与纤维的界面黏结能力,导致层间剪切强度降低显著.在老化后期,随着筋材的饱和,水分子破坏 GFRP 筋界面相的能力下降,材料强度降低速率放缓。

(3)在 25 °C 下老化的前 30 d 及 40 °C 下老化的前 15 d, GFRP 筋在 CS 环境中层间剪切强度的衰退较快,可能是因为 CS 环境中试件在养护过程中对 GFRP 筋造成了损伤.在其他老化条件下, GFRP 筋在 AS 环境中层间剪切强度的衰退速率均快于 CS 环境.以 60 °C 下加速老化 183 d 为例, AS 和 CS 环境中 GFRP 筋层间剪切强度的保留率分别为 48.6%、61.4%. CS 环境中 GFRP 筋的损伤低于 AS 环境中,主要原因是混凝土有效阻止了  $\text{OH}^-$  和水分子进入 GFRP 筋。

## 2.2 SEM

将 60 °C 下 2 种环境中加速老化 183 d 的试件与未加速老化试件进行对比,其微观结构如图5所示.由图5可见:

(1)GFRP 筋由纤维、树脂及其界面相组成,试件老化与其关系紧密<sup>[18]</sup>.未加速老化的试件,纤维与树脂黏结紧密,树脂无损伤.在 AS 环境中试件部分纤维与树脂脱黏,此现象由树脂基体吸水后膨胀程度各异引起,且渗透水压亦会使界面相产生破坏.在 AS、CS 环境下,试件中的树脂受到侵蚀,出现了少量的孔洞。

(2)在 AS 环境中老化试件的纤维表面附有沉淀物,在 CS 环境中老化试件的纤维表面有受侵蚀产生的浅坑.在 AS 环境中存在大量的  $\text{OH}^-$ ,会与玻璃纤维中的  $\text{SiO}_2$  发生式(2)、(3)所示的化学反应<sup>[19]</sup>,产物 Si-OH 是附着于纤维表面的凝胶层,其密度小于纤维,可加剧  $\text{OH}^-$  的扩散.在 CS 环境中, GFRP 筋外侧的混凝土会在一定程度上放缓  $\text{OH}^-$  和  $\text{H}_2\text{O}$  侵蚀 GFRP 筋的速率。



基于宏观力学性能试验结果及微观结构观测,现将 GFRP 筋的退化机理分析如下:

(1)树脂基体在水分子和  $\text{OH}^-$  的作用下,产生了不同程度的膨胀变形,削弱了其纤维的黏结,渗透水压会进一步破坏界面相。

(2) $\text{OH}^-$  与玻璃纤维结构中的  $\text{SiO}_2$  反应,使纤维结构受损。

(3)树脂基体中酯键的水解反应同样会降低 GFRP 筋的性能,本次试验 GFRP 筋采用乙烯基树脂,其酯键的数量较少,因此仅观测到少量的树脂

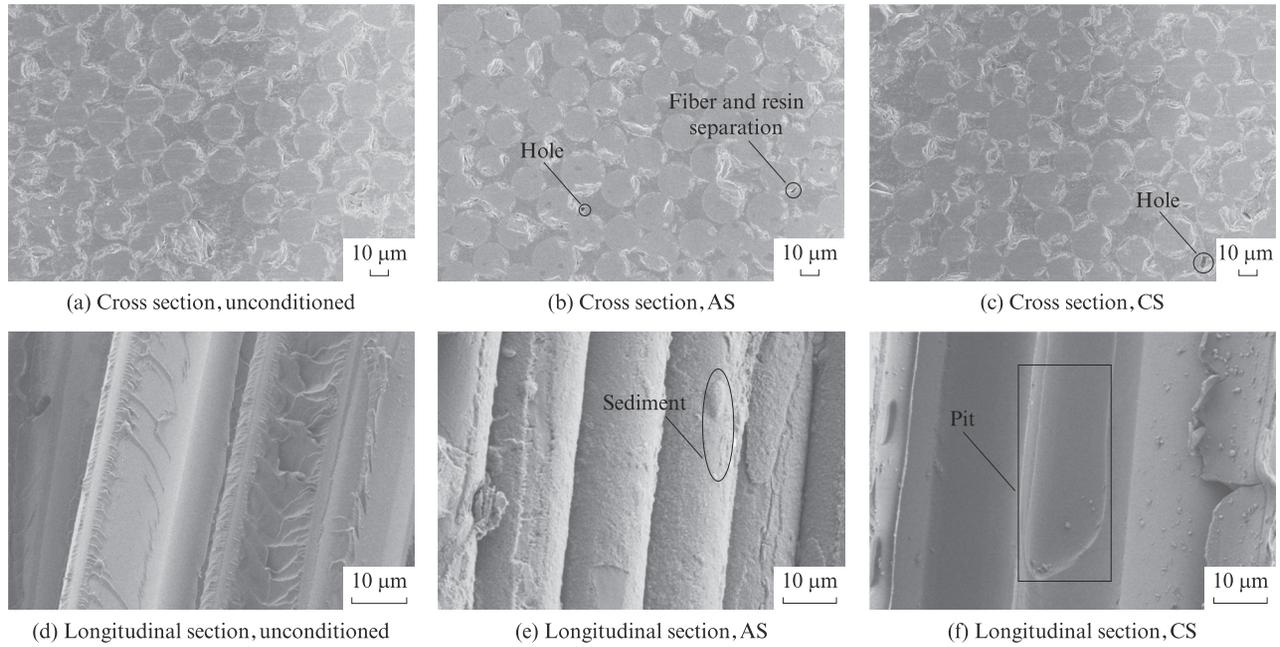


图5 GFRP筋的微观结构

Fig. 5 Microstructure of GFRP bars

损伤.

### 2.3 DSC

依据 ASTM D3418《Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry》,利用DSC测试GFRP筋在60℃下2种环境中老化183 d时的 $T_g$ .本次试验对GFRP筋样品进行了2次升、降温,2次升温过程中测得的 $T_g$ 分别记为 $T_{g1}$ 和 $T_{g2}$ ,结果如图6所示.由图6可见:所有试样的 $T_{g2}$ 均大于 $T_{g1}$ ,这是因为在第1次升温过程中会使试样进一步固化;与未加速老化试样相比,GFRP筋在60℃下的AS及CS环境中老化183 d后, $T_{g2}$ 分别下降了9.2%和3.4%,说明树脂发生了不可逆反应.

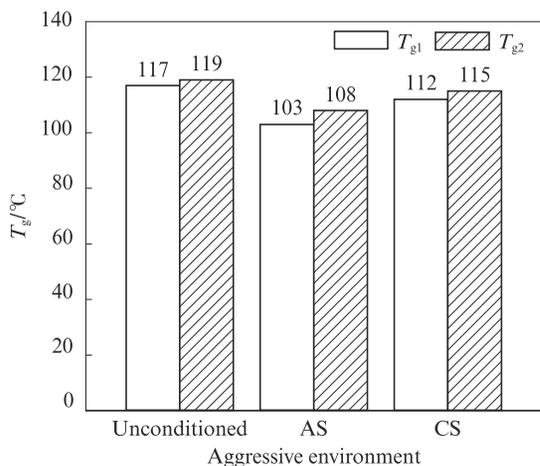


图6 不同侵蚀环境中GFRP筋的玻璃转化温度对比

Fig. 6 Comparison of  $T_g$  of GFRP bars in different aggressive environments

### 3 GFRP筋长期预测模型研究

目前,常用的GFRP筋长期力学性能预测模型大多基于Arrhenius方程提出<sup>[12-16]</sup>.根据Arrhenius理论,GFRP筋层间剪切强度退化速率( $k$ )与温度( $T$ )的关系如下<sup>[20]</sup>:

$$k = 1/t = A \exp(-E_a/RT) \quad (4)$$

式中: $t$ 为退化时间,d; $A$ 为退化常数,1/d; $E_a$ 为材料的活化能,J/mol; $R$ 为理想气体常数,J/(mol·K).

对式(4)进行如下转化:

$$1/k = t = \frac{1}{A} \exp(E_a/RT) \quad (5)$$

$$\ln(1/k) = \ln t = E_a/RT - \ln A \quad (6)$$

结合试验数据,在预测GFRP筋的长期性能时以下3种模型应用最为普遍,如式(7)~(9)所示.

Model 1:

$$Y = a \lg t + b \quad (7)$$

Model 2:

$$Y = 100 \exp(-t/\tau) \quad (8)$$

Model 3:

$$Y = (100 - Y_\infty) \exp(-t/\tau) + Y_\infty \quad (9)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $\tau$ 是拟合参数; $Y_\infty$ 是FRP筋在无穷长老化时间时的层间剪切强度保留率,%.

模型1最早由Litherland等<sup>[21]</sup>提出并对玻璃纤维混凝土(GRC)的耐久性进行了预测.Bank等<sup>[12]</sup>将该模型应用于FRP复合材料的长期力学性能分析.吴刚等<sup>[22]</sup>利用该模型预测了GFRP筋在不同环境中层

间剪切强度保留率与时间的关系.模型1虽然应用较为广泛,但自身存在一定的局限性:首先,该模型是基于试验数据进行的拟合,并未考虑材料的退化机理;其次,在未老化时FRP筋层间剪切强度为无穷大,与实际不符;最后,Arrhenius方程假设材料的退化机理不随温度的变化而改变,在多位学者<sup>[13,23]</sup>的研究中得到的Arrhenius线并不平行,与假设相违背.模型2和模型3相似,2个模型均假设FRP筋的破坏机理为纤维和树脂脱黏,与微观观测结果一致<sup>[24-25]</sup>.2个模型最大的区别为材料在无穷长时间时的层间剪切强度保留率是否为零.当时间足够长时,模型2显示材料层间剪切强度保留率为零,模型3则认为材料层

间剪切强度保留率为 $Y_{\infty}$ ,模型3更接近GFRP筋在真实服役环境下耐久性的研究结果<sup>[26]</sup>.基于此,本次研究以模型3来建立GFRP筋在2种环境中的耐久性预测模型.

GFRP筋在2种加速老化环境中的长期力学性能预测模型建立步骤如下:

(1)将试验数据按式(9)进行拟合,得到 $\tau$ 、 $Y_{\infty}$ .如图7所示,相关系数( $R^2$ )均超过0.89.

(2)将 $\tau$ 、 $Y_{\infty}$ 带入式(9),分别令层间剪切强度保留率为70%、80%和90%,按式(6)拟合Arrhenius直线,结果如图8所示.AS和CS环境中的 $E_a/R$ 分别为3941和3984.

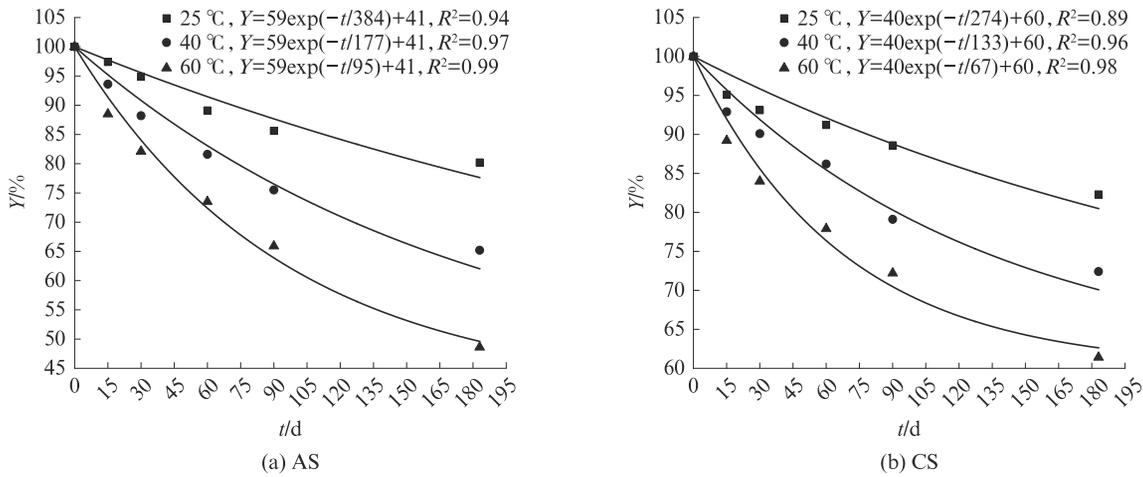


图7 基于模型3的GFRP筋长期力学性能试验数据的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of long-term mechanical property test data for GFRP bars based on model 3

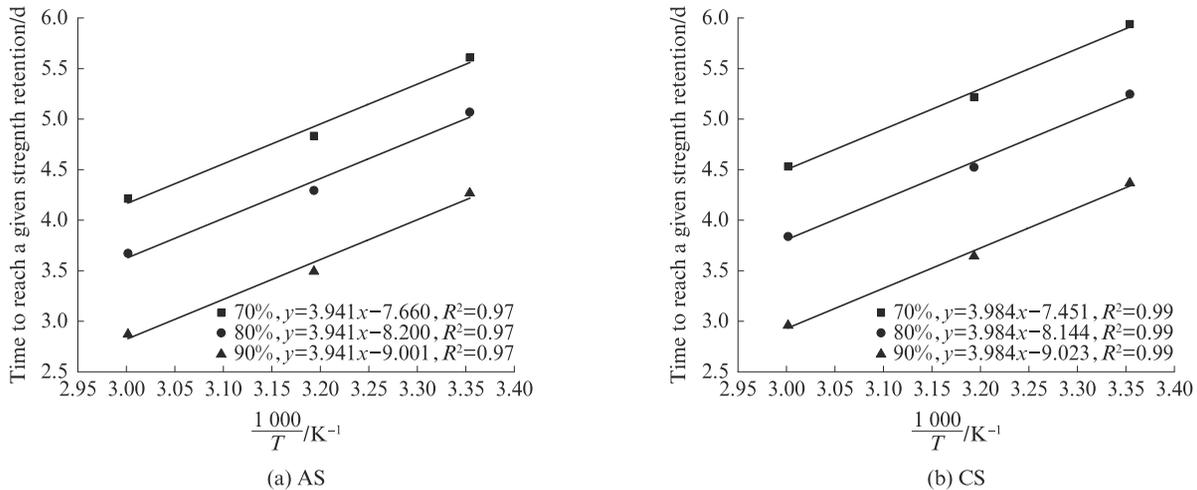


图8 不同环境中GFRP筋的耐久性预测模型Arrhenius线

Fig. 8 Arrhenius line for durability prediction model of GFRP bars in different environments

(3)利用Arrhenius方程得出不同老化条件下的时间转换因子(TSF).

在不同温度下GFRP筋退化至相同强度保留率所需时间的关系用TSF表示<sup>[26]</sup>.如GFRP筋在温度

$T_1$ 、 $T_2$ 老化环境中层间剪切强度退化速率均为 $k$ 时,所需时间 $t_1$ 、 $t_2$ 的关系依据式(4)分析如下:

$$k = 1/t_1 = A \exp(-E_a/RT_1) \quad (10)$$

$$k = 1/t_2 = A \exp(-E_a/RT_2) \quad (11)$$

$$\text{TSF} = \frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (12)$$

以北京地区为例,利用式(12)并结合试验数据,将2种环境下不同温度的TSF列入表1.其中根据中国气象数据网<sup>[27]</sup>显示北京地区的年平均气温为13.2℃.

表1 GFRP筋不同温度间的时间转换因子

Table 1 TSF of GFRP bars at different temperatures

Environment	13.2℃	25℃	40℃	60℃
AS	1.00	1.72	3.25	6.91
CS	1.00	1.73	3.29	7.06

(4)利用表1数据及试验结果,建立北京地区温度为13.2℃时GFRP筋的长期力学模型主曲线,如图9所示.

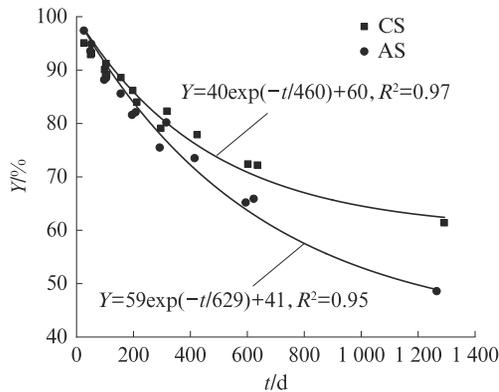


图9 温度为13.2℃时GFRP筋的长期力学模型主曲线  
Fig. 9 Master curves of long-term mechanical property of GFRP bars at 13.2℃

温度为13.2℃时,若GFRP筋在AS和CS环境下层间剪切强度保留率相同则需满足下列等式关系:

$$Y = 59\exp(-t_1/629) + 41 = 40\exp(-t_2/460) + 60 \quad (13)$$

$$t_2 = -460\ln[1.475\exp(-t_1/629) - 0.475] \quad (14)$$

式(13)、(14)仅在层间剪切强度保留率大于60%时适用.此外,GFRP筋真实服役环境中的湿度通常远低于试验环境.Mufti等<sup>[28]</sup>对服役5~8a的GFRP筋进行了检测,发现GFRP筋的微观结构、化学成分及 $T_g$ 均未发生变化,表明室内加速老化试验即使采用模型3进行预测,其结果同样偏保守.

## 4 结论

(1)在碱溶液(AS)和混凝土包裹玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋后置于自来水中(CS)2种环境中,GFRP筋层间剪切强度的衰退速率均随着温度的升高而加快,在老化前期的层间剪切强度衰退速

率快于后期.GFRP筋在AS环境中的衰退速率普遍快于CS环境中(25℃及40℃初始老化阶段除外).

(2)加速老化183d后GFRP筋的微观结构发生了变化.AS环境中老化GFRP筋的纤维表面有沉积物,少量纤维与树脂脱黏,此现象由树脂基体吸水后的膨胀程度各异引起,且渗透水压亦会使界面相产生破坏.树脂产生了少量孔洞,说明树脂受到了侵蚀.在CS环境中老化GFRP筋的纤维表面产生了浅坑,老化受损较轻.

(3)与普通试样相比,GFRP筋在60℃下AS和CS环境中老化后的玻璃化转变温度分别下降了9.2%、3.4%,说明树脂发生了不可逆水解反应,且在AS环境中GFRP筋的反应程度较大,与微观组织的观测结果一致.

(4)建立了北京地区GFRP筋长期力学模型主曲线,利用该曲线可以预测GFRP筋在2种环境中服役时间的层间剪切强度保留率,并得到2种环境中GFRP筋老化程度相同时的老化时间关系.

## 参考文献:

- [1] 代力,江祥林,何雄君.混凝土环境中GFRP筋抗拉性能加速老化试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(3):383-388.  
DAI Li, JIANG Xianglin, HE Xiongjun. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP bars embedded in concrete beams[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science), 2019, 51(3): 383-388. (in Chinese)
- [2] 宋泽鹏,陆春华,宣广宇,等.螺纹GFRP筋与混凝土黏结性能试验与理论计算[J].建筑材料学报,2021,24(4):887-894.  
SONG Zepeng, LU Chunhua, XUAN Guangyu, et al. Experimental and theoretical calculation of bonding performance between threaded GFRP bar and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):887-894. (in Chinese)
- [3] 王伟,薛伟辰.碱环境下GFRP筋拉伸性能加速老化试验研究[J].建筑材料学报,2012,15(6):760-766.  
WANG Wei, XUE Weichen. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP rebars exposed to alkaline solution[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 760-766. (in Chinese).
- [4] ARCZEWSKA P, POLAK M A, PENLIDIS A. Degradation of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293: 123451.
- [5] 董志强,吴刚.FRP筋增强混凝土结构耐久性性能研究进展[J].土木工程学报,2019,52(10):1-19,29.  
DONG Zhiqiang, WU Gang. Research progress on durability of FRP bars reinforced concrete structures [J]. China Civil

- Engineering Journal, 2019, 52(10):1-19, 29. (in Chinese)
- [ 6 ] EL-HASSAN H, EL-MAADDAWY T, AL-SALLAMIN A, et al. Durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in moist seawater-contaminated concrete under sustained load[J]. Construction and Building Materials, 2018, 175:1-13.
- [ 7 ] 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):33-36, 54. ZHANG Xinyue, OU Jinping. Durability experimental research on resistance of acidic, alkali, salt solutions and freeze-thaw properties of FRP bar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1):33-36, 54. (in Chinese)
- [ 8 ] BENMOKRANE B, ALI A H, MOHAMED H M, et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures[J]. Composites, 2017, 114:163-174.
- [ 9 ] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. Composites Structure, 2007, 78(1): 101-111.
- [ 10 ] 蔡启明, 陆春华, 延永东, 等. BFRP/GFRP筋剪切性能温度效应试验研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):395-400. CAI Qiming, LU Chunhua, YAN Yongdong, et al. Experimental investigation of temperature effect on shear properties of BFRP/GFRP bars [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):395-400. (in Chinese)
- [ 11 ] MONTAIGU M, ROBERT M, AHMED E, et al. Laboratory characterization and evaluation of durability performance of new polyester and vinyl ester E-glass GFRP dowels for jointed concrete pavement[J]. Journal of Composite for Construction, 2013, 17(2):176-187.
- [ 12 ] BANK L C, GENTRY T R, THOMPSON B P, et al. A model specification for composites for civil engineering structures[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6):405-437.
- [ 13 ] WU G, DONG Z Q, WANG X, et al. Prediction of long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions[J]. Journal of Composite for Construction, 2015, 19(3):04014058.
- [ 14 ] MANALO A, MARANAN G, BENMOKRANE B, et al. Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments[J]. Cement and concrete Composites, 2020, 109(5):103564.
- [ 15 ] LU C H, NI M Z, CHU T S, et al. Comparative Investigation on tensile performance of FRP bars after exposure to water, seawater, and alkaline solutions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(7):04020170.
- [ 16 ] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156:985-1004.
- [ 17 ] 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. (in Chinese)
- [ 18 ] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, ALMUSALLAM T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. Composites Part B, 2013, 45(1): 835-844.
- [ 19 ] CHEN Y. Accelerated aging tests and long-term prediction models for durability of FRP bars in concrete[D]. Morgantown: West Virginia University, 2007.
- [ 20 ] NELSON W. Accelerated testing—Sustained models, test plans, and data analyses[M]. New York: Wiley, 1990.
- [ 21 ] LITHERLAND K L, OKLEY D R, PROCTOR B A. The use of accelerated aging procedures to predict the long term strength of GRC composites[J]. Cement and Concrete Research, 1981, 11(3):455-466.
- [ 22 ] 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, 47(8):32-41. 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, 47(8):32-41. (in Chinese)
- [ 23 ] GONENC O. Durability and service-life prediction of concrete reinforcing materials [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2001.
- [ 24 ] 李承高, 郭瑞, 王俊琦, 等. CFRP@GFRP混杂复合材料杆体在水浸泡环境下的性能演化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3290-3301. LI Chenggao, GUO Rui, WANG Junqi, et al. Property evolution of CFRP@GFRP hybrid composite rod exposed in the distilled water[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3290-3301. (in Chinese)
- [ 25 ] 宣广宇, 陆春华, 徐可, 等. 不同侵蚀环境下GFRP筋抗拉性能退化试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8):161-168. XUAN Guangyu, LU Chunhua, XU Ke, et al. Experiment on tensile properties of GFRP bars exposed to different aggressive environments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8):161-168. (in Chinese)
- [ 26 ] 王自柯. FRP筋在模拟海水-海砂混凝土孔溶液浸泡下的耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. WANG Zike. Study of the durability performances of fiber reinforced polymer (FRP) bars exposed to simulated seawater and sea sand concrete pore solution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [ 27 ] 国家气象信息中心. 国家气象科学数据中心[DB/QL]. (2019-02-01) [2021-12-10]. <http://data.cma.cn/forecast/index.html>. National Meteorological Information Center. National meteorological science data center [DB/QL]. (2019-02-01) [2021-12-10]. <http://data.cma.cn/forecast/index.html>. (in Chinese)
- [ 28 ] MUFTI A A, BANTHIA N, BENMOKRANE B, et al. Durability of GFRP composite rods[J]. Concrete International, 2007, 29(2):37-42.