

# 混凝土环境中 GFRP 筋抗拉性能加速老化试验研究

代 力<sup>1,2</sup>, 江祥林<sup>1</sup>, 何雄君<sup>3</sup>

(1. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330200; 2. 长大桥梁建设关键技术及装备交通运输行业研发中心, 江西 南昌 330200;  
3. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 采用加速老化试验方法对混凝土碱性环境中 GFRP 筋抗拉性能进行了研究. 将 112 根 GFRP 筋混凝土试件分为 6 组, 试验参数包括持续荷载、温度和侵蚀时间. 试验结果表明, 混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度在早期退化较快, 试件在 40 °C、60 °C 环境中浸泡 30 d 后 GFRP 筋抗拉强度分别下降了 5.4% 和 13.7%; 温度的升高加速了混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度的退化速率; 持续荷载水平对 GFRP 筋抗拉强度退化有较大影响, 且随着温度的升高, 持续荷载所造成退化的效果愈加显著; 最后, 基于 Arrhenius 方程建立了实际混凝土环境下 GFRP 筋长期抗拉强度预测模型, 并对北京、武汉和广州等地区实际混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度保留率进行了预测.

**关键词:** 混凝土环境; GFRP 筋; 持续荷载; 抗拉强度; 预测模型

中图分类号: TU502<sup>+</sup>.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)03-0383-06

## Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP bars embedded in concrete beams

DAI Li<sup>1,2</sup>, JIANG Xianglin<sup>1</sup>, HE Xiongjun<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330300, China;

2. Research and Development Center on Technologies and Equipment of Long-span Bridge  
Construction Ministry of Transport, Nanchang 330300, China;

3. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The accelerated aging tests for evaluations of tensile strength of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete environment under sustained load were conducted. 112 GFRP reinforcement concrete specimens were used in the test and divided into 6 groups, test parameters include sustained load, temperature and exposed time. The results show that the tensile strength of GFRP bar embedded in concrete environment degraded rapidly at an early age. The specimen after being exposed to concrete environment for 30 days at 40 °C and 60 °C, tensile strength of GFRP bar decreased by 5.4% and 13.7% respectively. The high temperature accelerated degradation rate of tensile strength of GFRP bars embedded in concrete environment. The tensile strength of GFRP is more affected by higher sustained load, and with the increase of temperature, the degradation effect is more significant caused by sustained load. Finally, based on the Arrhenius equation, tensile strength prediction model of GFRP bars under real concrete environment was proposed, and predicted the tensile strength retention of GFRP bars under real concrete environment on Beijing, Wuhan, and Guangzhou respectively.

**Key words:** concrete environment; GFRP bar; sustained load; tensile strength; prediction model

纤维增强聚合物复合筋(FRP)由于具有良好的耐腐蚀性、轻质高强、抗疲劳性好和无锈蚀特性等特点, 将其替代钢筋用于混凝土结构中已被大量研究证实是解决钢筋锈蚀问题的有效途径<sup>[1]</sup>.

在已有的纤维增强塑料筋种类中, GFRP 筋拥有高强度及高性价比等优点, 采用 GFRP 筋作为混凝土结构的劲性骨架已经引起土木工程界的兴趣和重视<sup>[2-3]</sup>. 实际混凝土结构所处外界环境和混

凝土本身的强碱环境均会造成 GFRP 筋的力学性能的衰减, 国内外大多数研究者均是针对裸筋在模拟混凝土孔隙液强碱环境下进行不同程度的加速老化试验<sup>[4-10]</sup>, 并基于试验拟合结果建立了抗拉性能退化模型. 然而, 人工模拟混凝土孔隙液碱性环境与实际混凝土环境之间存在一定差异, 已有的退化模型并没有考虑这一点. 因此, 研究 GFRP 筋在实际混凝土环境中的抗拉性能具有重要的实

收稿日期: 2018-08-30

修改稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178361); 江西省交通运输厅科技基金项目(2017C0002)

第一作者: 代 力(1987—), 男, 博士, 研究方向为 FRP 材料在土木工程中的应用. E-mail: dl-1987@qq.com

际工程意义, 目前关于实际混凝土环境中 GFRP 筋抗拉性能耐久性的研究还鲜见报道.

鉴于此, 本文通过实际混凝土环境下 GFRP 筋的加速老化试验, 重点分析了环境温度、持续荷载、浸泡时间等因素对 GFRP 筋抗拉强度的影响, 对 GFRP 筋在实际工程中的运用及 GFRP 筋混凝土结构的设计具有一定参考价值.

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料与试件设计

试验材料选用南京锋晖复合材料公司生产的 GFRP 筋. 筋体纤维为无碱玻璃纤维 (E-Glass), 基体材料为乙烯基树脂 (vinyl ester). GFRP 筋初始力学性能参数见表 1.

表 1 GFRP 筋力学性能指标

Tab. 1 Mechanical properties of the GFRP bar

直径/mm	极限张拉力 /kN	极限抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
10	96	1 223	51

为考察实际混凝土环境对 GFRP 筋力学性能的影响, 课题组浇筑了 112 个尺寸为 80 mm×110 mm×1 100 mm 的长方体混凝土试件和 3 个标准立方体试块, 试验所用水泥为湖北新华水泥厂生产的强度等级为 32.5 的复合硅酸盐水泥, 混凝土配合比如表 2 所示. 混凝土初凝期间测得其孔隙液 pH 值为 12.8. 将制作好的混凝土试件放置在养护室中养护, 实测 28 d 混凝土立方体抗压强度为 32 MPa. GFRP 筋在混凝土试件中的位置如图 1 所示. 为了模拟 GFRP 筋在实际混凝土构件中持续受力状态, 课题组采用自制反力架对试件进行加载, 加载装置如图 2 所示. 将试件反向放置在钢弹簧上, 保证加载时 GFRP 筋处于受拉一侧, 荷载大小通过钢弹簧压缩量进行调整, 并定期监测

钢弹簧压缩量, 以保证持续荷载恒定不变. 具体加载过程可参照课题组前期研究成果<sup>[9]</sup>.

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Concrete mix proportion/kg·m<sup>-3</sup>

水泥	细砂	粗骨料	水
420	600	1 120	168

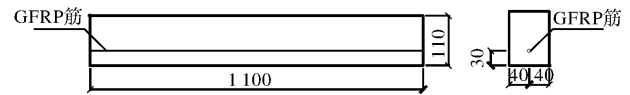


图 1 GFRP 筋混凝土试件 (单位/mm)

Fig. 1 GFRP reinforced concrete beams

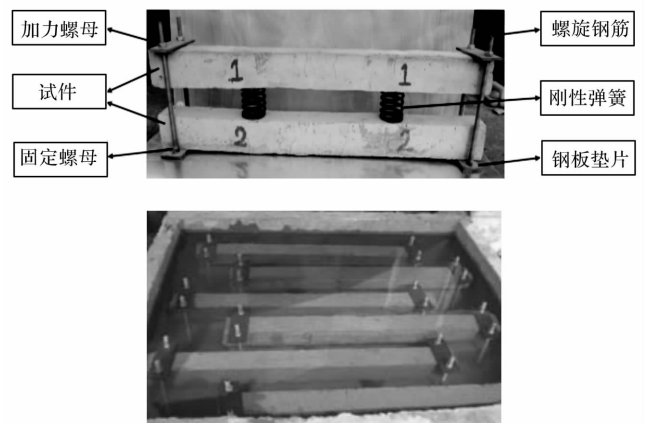


图 2 试件加载反力架设备及试验箱

Fig. 2 Load setup and test chamber

### 1.2 试验方法

为了加速 GFRP 筋老化速率, 将所有试件放置在不同温度的自来水环境中浸泡, 但是为了防止温度过高导致 GFRP 筋出现热降解反应, 参照文献[3]的试验温度, 将自来水溶液的温度分别恒定在 20±2℃、40±2℃、60±2℃. 试件按照施加持续荷载有无分为两组, 持续荷载大小为混凝土试件极限荷载的 20% 和 40%, 试件极限荷载在课题组前期研究成果中已确定. 试件的详细分组情况如表 3 所示.

表 3 试件分组

Tab. 3 Test conditions

环境类型	试件编号	持续荷载/%	温度/℃	持续时间/d			
				30	60	90	120
持续荷载 + 自来水浸泡	TW 20-40%	40	20	4	4	4	4
	TW 40-20%	20	40	4	4	4	4
	TW 40-40%	40	40	4	4	4	4
	TW 60-20%	20	60	4	4	4	4
自来水浸泡	TW20	0	20	4	4	4	4
	TW40	0	40	4	4	4	4
	TW60	0	60	4	4	4	4

达到预定浸泡时间后,将 GFRP 筋从混凝土梁试件中取出,去除筋体表面粘结混凝土并置于室温环境下放置,待其干燥后进行拉伸试验.为防止夹具对 GFRP 筋端头造成剪切破坏,将筋体两端用 250 mm 长钢管进行锚固.拉伸试验在 SHT4106-G 型微机控制电液伺服万能试验机上进行,加载数值由传感器自动记录,加载速率为 2 mm/min.

## 2 结果与分析

### 2.1 环境温度对抗拉强度影响

图 3 所示为无持续荷载混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度保留率(剩余强度与初始强度的比值)随时间的变化规律.从图示曲线变化趋势可以看出:

(1)随着浸泡时间的增加,GFRP 筋的抗拉强度呈现出逐渐减小的趋势.在温度为 40 °C 的混凝土环境中浸泡 30 d、60 d、90 d、120 d 后,GFRP 筋的抗拉强度分别下降了 5.4%、7.8%、9.2%和 12.9%.这主要是由于随着时间的增加,GFRP 筋表面树脂发生水解反应, $\text{OH}^-$ 与玻璃纤维发生化学反应,从而导致筋体抗拉强度的降低.总体而言,GFRP 筋抗拉强度在早期退化较快,40 °C、60 °C 环境中浸泡 30 d 后 GFRP 筋强度分别下降了 5.4%和 13.7%,之后退化速率逐渐变缓.20 °C 环境浸泡对 GFRP 筋强度退化影响较小.

(2)温度的升高加速了 GFRP 筋抗拉强度的退化程度,且温度越高,加速趋势越明显.GFRP 筋在 20 °C、40 °C、60 °C 混凝土环境中浸泡 120 d 后,抗拉强度分别下降了 2.9%、12.9%、27.3%.与 20 °C 混凝土环境相比,在 60 °C 混凝土环境中浸泡 30 d、60 d、90 d 和 120 d 后 GFRP 筋抗拉强度退化率分别增加了 13.0%、15.9%、19.3%、24.4%.究其原因,温度的升高使得分子运动加快,促使化学反应速率增加,从而加速了 GFRP 筋抗拉强度的退化.

### 2.2 持续弯曲荷载对抗拉强度影响

图 4 为持续弯曲荷载作用下混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度保留率随时间的变化规律.从图 4(a)中可以看出,在 40 °C 环境浸泡中,GFRP 筋抗拉强度退化率随着持续荷载的增大有增加趋势,持续荷载水平为 40% 的 GFRP 筋浸泡 120 d 后,其抗拉强度与无持续荷载和持续荷载水平为 20% 的 GFRP 筋相比,分别减少了 11.3%和 1.8%.这说明持续荷载加速了 GFRP 筋抗拉强度的退化,但当持续荷载较小时,这种加速效果并不明显.图

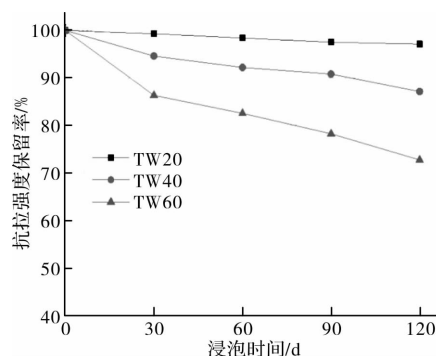


图 3 不同温度下 GFRP 筋抗拉强度保留率

Fig. 3 Tensile strength retention of GFRP bar at different temperatures

4(b)给出 20 °C 和 60 °C 环境下 GFRP 筋强度保留率与持续荷载之间的对应关系,可以看到,在 20 °C 环境中浸泡 60 d、90 d、120 d 后,与无持续荷载的 GFRP 筋相比,持续荷载为 40% 的 GFRP 筋强度保留率分别减少了 7.1%、9.6%和 11.8%.持续荷载为 20% 的 GFRP 筋在 60 °C 环境中浸泡 60 d、90 d、120 d 后,与同样温度且无持续荷载的 GFRP 筋相比,强度保留率分别减少了 5.7%、9.3%和 6.0%.这表明持续荷载水平对 GFRP 筋抗拉强度退化有较大影响,且随着温度的升高,持续荷载所造成退化的效果愈加显著.

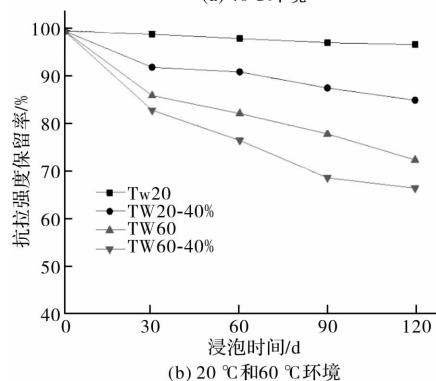
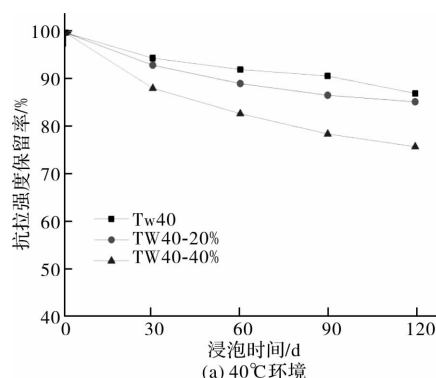


图 4 不同持续荷载下 GFRP 筋抗拉强度保留率

Fig. 4 Tensile strength retention of GFRP bar under different sustained load

综上所述,持续弯曲荷载加速了 GFRP 筋抗拉性能的老化速率.究其原因有二,一是持续荷载

使混凝土试件表面产生微裂缝,并逐渐与混凝土内部初始微裂缝相互连通.这些连通的微裂缝形成了潜在的传输通道,为侵蚀性离子进入混凝土内部提供了额外的途径<sup>[10]</sup>,加速 GFRP 筋表层树脂的水解反应速率,从而降低了筋体抗拉强度;二来本试验中 GFRP 筋处于混凝土试件受拉区,在持续弯曲荷载作用下处于受拉状态.根据材料的力学特性,材料在拉应力作用下体积会增大,且增大的部分主要是由于筋体内部纤维和树脂之间界面层粘结性能退化导致结构松散所致.一般来讲,这种松散的程度与荷载的大小呈正比关系.文献[8]中对 GFRP 筋在不同应力水平下抗拉性能的试验研究证实了这一点.筋体内部致密性的降低将导致水分子的扩散速度加快,随着化学反应的进行,纤维和树脂之间界面层的逐渐发生脱粘、分层的现象,导致 GFRP 筋抗拉强度的严重退化.图 5 给出了 GFRP 筋在混凝土环境中抗拉强度退化机理示意图.

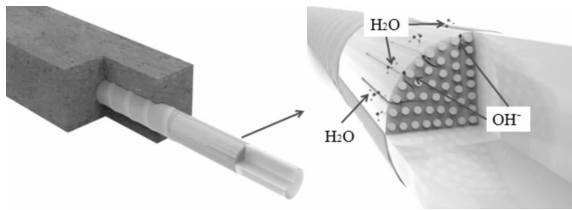


图 5 GFRP 筋在混凝土环境中抗拉强度退化机理示意图  
Fig. 5 Schematic diagram for the tensile strength degradation mechanism of GFRP bar embedded in concrete environments

### 3 混凝土环境中 GFRP 筋强度预测

#### 3.1 退化模型选择

目前国内外学者在针对短期试验数据对长期使用寿命作出预测时,通常采用 Arrhenius 方程对不同温度下的 GFRP 筋抗拉强度退化速率进行分析.根据 Arrhenius 方程,碱环境下 GFRP 筋的抗拉强度退化速率可以用式(1)表示<sup>[14]</sup>.

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

式中:  $k$  为 GFRP 筋抗拉强度退化速率;  $A$  为退化过程中材料特征常数;  $E_a$  为活化能;  $R$  为摩尔气体常数;  $T$  为环境绝对温度.基于 Arrhenius 方程进行强度预测需满足一定的假设条件:①材料在腐蚀过程中退化机理不能随时间和温度的变化而改变,即腐蚀过程中有且仅有一种退化机理;②退化速率会随着温度的升高而增加;③不考虑材料的几何形状对抗拉强度退化速率的影响.

将式(1)取倒数后两边同时取对数,可得式(2):

$$\ln(1/k) = E_a/RT - \ln A \quad (2)$$

从式(2)可见,时间的对数与环境绝对温度的倒数成线性关系,其中斜率为  $E_a/R$ .

目前常用的基于 Arrhenius 方程的退化模型主要由三种形式:

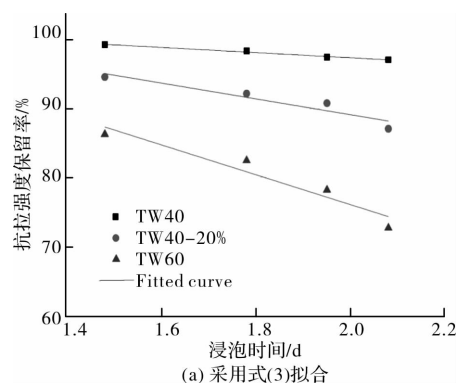
$$Y = a \log(t) + b \quad (3)$$

$$Y = 100(1 - \frac{\sqrt{2DCt}}{r})^2 \quad (4)$$

$$Y = 100 \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

式中:  $Y$  为抗拉强度保留率(%);  $t$  为暴露时间,  $a$ 、 $b$  均为退化常数,  $\tau$  为与温度有关的退化常数,  $D$  为扩散系数,  $C$  为溶液浓度,  $r$  为筋体半径. Bank<sup>[11]</sup>等均采用式(3)中模型对 GFRP 筋剩余强度进行了研究,预测结果能较好反映暴露时间与抗拉强度保留率之间的关系.将本文试验数据用式(3)进行拟合后发现,不同温度之间的拟合直线并不相互平行,这与 Arrhenius 方程的假设条件相违背.式(4)中模型由 Uomoto<sup>[12]</sup>基于 Fick 扩散定律提出, Tannous 和 Saadatmanesh<sup>[13]</sup>等采用此模型对 FRP 筋在盐和碱环境下剩余抗拉强度随时间变化的规律进行了研究.众所周知,当 FRP 筋浸泡在高温水溶液中时,抗拉强度会出现一定程度的衰减,但是由式(4)可知,FRP 筋处于浓度为零的水溶液中时抗拉强度保留率为定值,显然与试验结论不符. Chen<sup>[14]</sup>等将式(3)进行改进,得到式(5)模型,此模型假设 GFRP 筋抗拉强度的退化是由于纤维与树脂之间的界面层脱粘、分层所致,这与已有的文献中通过 SEM 得到的退化机理一致.因此,本文采用式(5)退化模型对无持续荷载混凝土环境中 GFRP 筋的剩余抗拉强度进行预测.

根据式(5)对本文试验数据进行拟合分析,如图 6(b)所示.可得到  $\tau$  值,如表 4 所示.从表中可以看出,三条曲线的拟合相关系数均大于 0.90,表明式(5)模型对实际混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度预测同样适用.



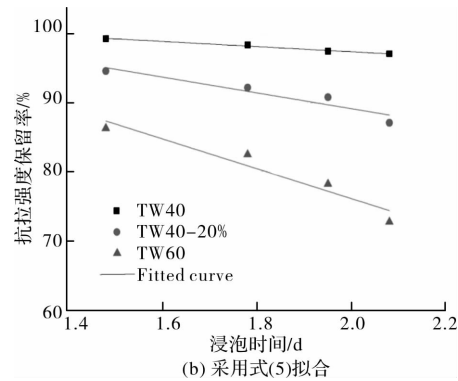


图 6 抗拉强度保留率拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves for tensile strength retention

表 4 拟合参数及相关系数

Tab. 4 The fitting parameters and the correlation coefficient

温度/℃	$\tau$	$R^2$
20	3 862.1	0.99
40	845.1	0.94
60	347.5	0.91

3.2 强度预测

如图 7 所示, 不同温度下 GFRP 筋抗拉强度保留率达到 60%、70%、80% 和 90% 所需时间可由式(5)和表 4 得到. 根据最小二乘法, 采用式(2)对图 7 中数据进行拟合, 四条曲线近乎为平行关系, 可以得到斜率  $E_a/R$  的取值, 如表 5 所示. 可以发现, 曲线斜率约为 5 881, 且相关系数均大于 0.97.

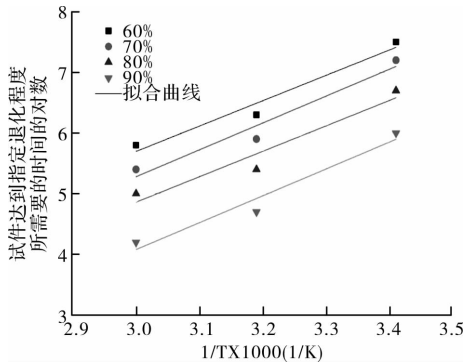


图 7 不同温度下 GFRP 筋达到相应抗拉强度保留率所需时间的拟合曲线

Fig. 7 Fitted curves for the time needed to reach a given tensile strength of GFRP bars under different temperature

表 5 回归方程的相关系数

Tab. 5 Coefficients of regression equations

抗拉强度保留率/%	$E_a/R$	$R^2$
60	5 881	0.98
70	5 881	0.98
80	5 880	0.98
90	5 881	0.97

根据 Arrhenius 方程, 可以求得不同温度下达到相同腐蚀程度所需时间的比值, 即时间转换系数, 如式(6)所示:

$$\begin{aligned} TSF &= \frac{t_1}{t_2} = \frac{c/k_1}{c/k_2} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{A \exp(-E_a/RT_2)}{A \exp(-E_a/RT_1)} \\ &= \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

根据中国气象科学数据共享服务网提供的数据资料, 北京、武汉、广州的年平均温度分别为 11.2℃、16.6℃ 和 21.8℃, 可以通过式(6)得到北京、武汉、广州三地自然老化环境温度与不同加速环境温度之间的时间转换系数, 如表 6 所示.

表 6 时间转换系数

Tab. 6 Time shift factor

温度/℃	时间转换系数(TSF)		
	北京(11.2℃)	武汉(16.6℃)	广州(21.8℃)
20	1.9	1.3	0.9
40	6.7	4.6	3.2
60	20.7	14.1	9.8

以武汉地区为例, 将图 3 中 20℃、40℃ 和 60℃ 温度下抗拉强度保留率数据分别乘以 1.3、4.6 和 14.1, 即得到了实际混凝土环境中 GFRP 筋在武汉地区年平均温度下抗拉强度保留率数据. 重复此步骤, 可得到北京、广州地区年平均温度下的数据.

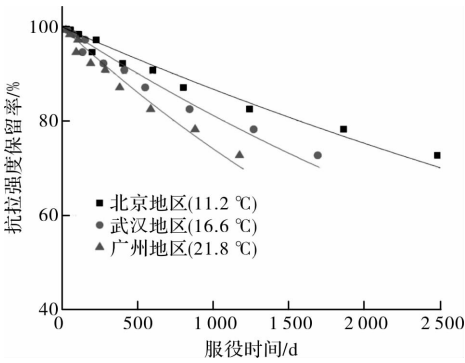


图 8 不同年平均温度环境下 GFRP 筋抗拉强度预测曲线

Fig. 8 Tensile strength predicted curves of GFRP bars at different mean annual temperatures

表 7 预测曲线回归方程系数

Tab. 7 Coefficient of the regression equations for the predicted curves

地区	温度/℃	$\tau$	$R^2$
北京	11.2	7 063.2	0.93
武汉	16.6	4 814.7	0.93
广州	21.8	3 346.5	0.93

利用式(5)对图 8 中数据进行拟合, 可以得到拟

合参数,如表7所示.北京、武汉、广州地区实际混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度保留率随时间的变化规律进行了预测,可以发现,随着年平均温度的升高,GFRP 筋抗拉强度的退化趋势在逐渐增大.在年平均温度为 11.2℃、16.6℃和 21.8℃的地区,实际混凝土环境中 GFRP 筋的剩余抗拉强度达到 50%时分别需要 13.4 年、9.1 年和 6.4 年.

## 4 结论

(1)混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度在早期退化较快,40℃、60℃环境中浸泡 30 d 后 GFRP 筋强度分别下降了 5.4%和 13.7%,之后退化速率逐渐变缓;20℃环境浸泡对 GFRP 筋强度退化影响较小.

(2)温度的升高加速了混凝土环境中 GFRP 筋抗拉强度的退化程度,且温度越高,加速趋势越明显.

(3)持续荷载水平对 GFRP 筋抗拉强度退化有较大影响,且随着温度的升高,持续荷载所造成退化的效果愈加显著.

(4)基于 Arrhenius 方程建立了混凝土环境下 GFRP 筋长期抗拉强度预测模型,在年平均温度为 11.2℃、16.6℃和 21.8℃的北京、武汉和广州等地区,GFRP 筋在实际混凝土环境中的剩余抗拉强度达到 50%时分别需要 13.4 年、9.1 年和 6.4 年.

## 参考文献 References

- [1] DEBAIKY A, NKURUNZIZA G, BENMOKRANE B, et al. Residual tensile properties of GFRP reinforcing bars after loading in severe environments[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10, 370-380.
- [2] MICELLI F, NANNI A. Durability of FRP rods for concrete structures[J]. Construction Building Materials, 2004, 18(7):491-503.
- [3] MATHIEU Robert, PATRICE Cousin, BRAHIM Benmokrane. Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(2): 66-73.
- [4] 李趁趁,于爱民,王英来.模拟混凝土碱性环境下 FRP 筋的耐久性[J]. 建筑科学,2013,29(1):47-51.  
LI Chencheng, YU Aimin, WANG Yinglai. Durability of FRP rebars in alkaline environment of concrete. [J]. Building science, 2013,29(1), 47-51.
- [5] BOBERT 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, 274-284.
- [6] 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 bars exposed to alkaline solution[J]. Journal of Building Materials,2012,15(6):760-766.
- [7] MUKHERJEE A, ARWIKAR S J. Performance of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars in tropical environments part I: Structural scale tests[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 745-753.
- [8] 薛伟辰,王伟,付凯.碱环境下不同应力水平 GFRP 筋抗拉性能试验[J]. 复合材料学报,2013,30(6):67-75.  
XUE Weichen, WANG Wei, FU Kai. Experimental study on tensile properties of GFRP rebar under different stress levels as exposed to alkaline solution[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2013,30(6):67-75.
- [9] 代力,何雄君,杨文瑞等.考虑初始裂缝的 GFRP 筋混凝土梁受弯性能试验[J]. 武汉理工大学报,2014,36(9): 85-89.  
DAI Li, HE Xiongjun, YANG Wenrui, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete beams embedded with GFRP bar with initial crack[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 85-89.
- [10] 牛建刚,牛荻涛.荷载作用下混凝土的耐久性研究[J]. 混凝土,2008(8):30-33.  
NIU Jiangang, NIU Ditao. Durability of concrete structures under load[J]. Concrete, 2008(8):30-33.
- [11] BANK L C, GENTRY T R, BARKATT A, et al. Accelerated aging of pultruded Glass/Vinyl ester rods [C]//Proceedings of the Second Conference on Fiber Composites in Infrastructure ICCI'98, Tucson:1998: 423-437.
- [12] UOMOTO T, MUTSUYOSHI H, KATSUKI F, et al. Use of fiber-reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete[J]. Materials in Civil Engineering, 2002,14(3):191-209
- [13] TANNOUS F E, SAADATMANESH H. Durability and long-term behavior of carbon and aramid FRP tendons [C]//Proceedings of the Second International Conference on Fiber Composites in Infrastructure ICCI'98, Tucson:[s. n. ],1998:524-538
- [14] YI Chen, DAVALOS J F, INDRAJIT R, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. Composite Structure, 2007, 78(1): 101-111.

(编辑 吴海西 沈 波)