

# GFRP 筋拉伸力学性能温度效应试验研究

周继凯, 杜钦庆, 陈诗学, 马晓辉  
(河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 玻璃纤维增强塑料(GFRP)材料的力学性能对工作环境温度很敏感, 在设计时应充分考虑环境温度对此的影响。通过试验研究在不同环境温度(20 ℃~120 ℃)条件下 GFRP 筋拉伸力学性能的温度效应。加载设备采用 MTS322 电液伺服静动万能试验机, 试验温度由环境箱进行自动控制。试验结果表明: 试件在加载过程中, 会因损伤而发出清脆响声, 其表面出现白斑状裂纹, 随荷载增加响声增大而渐密; 破坏形态多为较大范围内发生片状裂开破坏, 偶见某一断面断裂破坏, 均为脆性破坏; GFRP 筋的力学性能对环境温度非常敏感, 极限抗拉强度、抗拉初始弹性模量、屈服应变和极限延伸率随着环境温度增加而下降, 而抗拉屈服后弹性模量变化规律则相反; GFRP 筋应力-应变曲线在 20 ℃~80 ℃时为双线性, 随着温度升高, 其屈服点逐渐降低, 在 100 ℃, 120 ℃时应力-应变曲线变为线性。通过试验分析, 建立考虑环境温度影响的 GFRP 筋应力-应变关系及其相关参数同环境温度的关系; 提出考虑环境温度影响的 GFRP 筋极限抗拉强度计算公式。试验研究成果为 GFRP 筋在不同环境温度条件下应用提供了科学依据。

**关键词:** 岩土力学; 玻璃纤维增强塑料; 拉伸试验; 力学性能; 温度效应

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2008)增1-2707-08

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON THERMAL EFFECT OF TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF GFRP REBAR

ZHOU Jikai, DU Qinqing, CHEN Shixue, MA Xiaohui  
(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** Temperature is an important factor influencing the mechanical properties of glass fiber reinforced plastic(GFRP) material, and it should be considered sufficiently. Based on experiments, the mechanical properties of GFRP rebar at different environmental temperatures ranging from 20 ℃ to 120 ℃ are studied. The load is applied by MTS322 electro-hydraulic servo-controlled testing machine, and the test temperature is controlled by the circumstance box. Twenty six GFRP rebars are adopted in this test, which are 10 mm in diameter and 400 mm in the efficient pull-out length. The following conclusions can be drawn from the experiments. Firstly, during the loading process, white fleck cracks appear on the surface with hard noise caused by damage. The noise becomes louder with the load increasing. Flake crack in a big range is the main failure mode, and the rupture on a section is a rare occasion. Both are brittle failure modes. Secondly, the mechanical properties of GFRP rebar are sensitive to temperature. The ultimate tensile strength, the initial tensile Young's modulus, the yield strain and the ultimate elongation ratio all decrease with the temperature increasing, but the elastic modulus after tensile yield is reverse. Thirdly, the stress-strain relationship of GFRP rebar between 20 ℃ - 80 ℃ is bilinear. With the temperature increasing, the yield point reduces gradually. At the temperatures of 100 ℃ and 120 ℃, the stress-strain relationship is linear. By the analysis of experiment, considering thermal effect, the stress-strain relationship of GFRP rebars and the relationships between correlative parameters and the temperature have been established. A formula has been developed to calculate the ultimate tensile strength of GFRP rebar. The experimental results

**收稿日期:** 2006-12-17; **修回日期:** 2007-04-15

**基金项目:** 广东省交通科技项目(2004-17)

**作者简介:** 周继凯(1970-), 男, 1993年毕业于大连理工大学土木工程系港口及航道工程专业, 现为博士研究生、副教授、国家一级注册结构工程师, 主要从事结构与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: hhjk@hhu.edu.cn

supply scientific foundations for the GFRP rebars' application at different temperatures.

**Key words:** rock and soil mechanics; glass fiber reinforced plastic(GFRP); tensile test; mechanical properties; temperature effect

## 1 引言

钢筋混凝土结构具有施工方便、造价低和承载能力高等优点,是当前工程中应用最为广泛的结构形式。但钢筋混凝土结构耐久性一直困扰着工程界,尤其是钢筋锈蚀问题。玻璃纤维增强塑料(GFRP)是一种由树脂和玻璃纤维复合组成的新型材料,具有比强度高、抗冲击性能好、耐腐蚀、非磁性等显著优点。在混凝土结构中使用GFRP筋代替钢筋,具有广阔的前景,目前已经应用于桥梁、水工建筑物、海港码头、煤巷临时加固以及永久边坡加固工程中<sup>[1~4]</sup>。

用GFRP筋取代钢筋是解决钢筋锈蚀行之有效的方法。然而,目前国内GFRP筋的研究仍处于探索阶段,研究数据总体上偏少,研究的范围、深度远远不够。由于缺少理论、试验支持及产品标准和技术文件,GFRP筋的实际应用还处于试验性阶段。为了满足结构设计与生产中质量控制的需要,详细研究GFRP筋的性能十分必要。

复合材料力学性能通常对温度非常敏感。有关温度效应试验研究主要集中在:(1)生产养护温度<sup>[5]</sup>;(2)长期温度,含恒定<sup>[6]</sup>和循环变化<sup>[7,8]</sup>;(3)短期温度,含中低温<sup>[9~12]</sup>和高温<sup>[13]</sup>(如火灾)。其中对GFRP材料的温度效应研究很少。

GFRP材料中玻璃和树脂的力学性能均对环境温度很敏感。试验<sup>[14]</sup>表明,GFRP筋在100℃时的抗拉强度大约是20℃时的70%(钢材在100℃时的抗拉强度大约是20℃时的95%)。

在设计时应充分考虑环境温度对GFRP筋力学性能的影响,必须通过试验研究GFRP筋力学性能温度效应规律。

本文将重点研究GFRP筋在不同温度(20℃~120℃)条件下的力学特性,为GFRP筋安全应用及推广提供依据。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料

#### 2.1.1 GFRP筋

GFRP筋由南京奥沃生产提供,为全螺纹玻璃纤维增强塑料筋。试验用GFRP筋直径为10 mm,树脂含量25%,玻璃纤维含量75%,密度为2.0 g/cm<sup>3</sup>。

#### 2.1.2 黏结剂

黏结剂为双组份冷固化触变环氧树脂类黏结剂,强度高,对多数材料黏合良好,防水和抗化学腐蚀能力强,收缩率小,常用于混凝土结构的加固工程。

#### 2.1.3 钢管

根据GFRP筋的直径选择钢管规格,要求内径比GFRP筋直径大3~6 mm,壁厚不小于2.5 mm。

### 2.2 试验设备

试验加载设备采用MTS322电液伺服静动万能试验机。环境箱可以自动控制箱内的温度变化,内部空间为356 mm×432 mm×559 mm(宽×深×高)。环境箱上部和下部有孔,可以安装在万能试验机内,如图1所示。

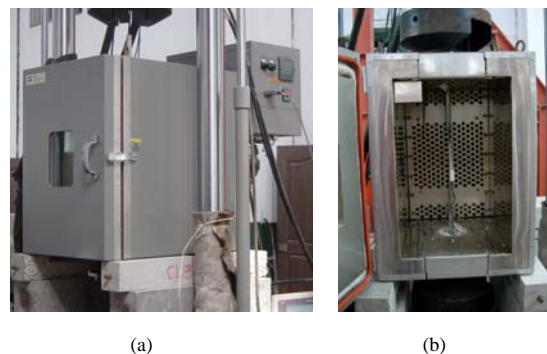


图1 试验设备

Fig.1 Testing equipments

数据采集系统由两部分组成:MTS试验系统和计算机测量应变系统。计算机测量应变系统采用TS3890型静态应变测量处理仪。

试件的轴向拉伸采用NCS-YYU-10/200型电子引伸计来测量。

### 2.3 试验步骤

#### 2.3.1 制备试件

采用环氧树脂黏结剂将钢管和GFRP筋连接。连接需养护一定时间才可进行试验<sup>[15]</sup>。试件长1 m。两端外包钢管的内径为15 mm,每端钢管长300 mm。

### 2.3.2 温度控制

把试件装在环境箱内, 再同 MTS 试验机连接好, 然后将环境箱调到预定的温度, 做好密封保温。

环境箱内温度分别控制为 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C 和 120 °C。

恒温 30 min 后进行拉伸试验, 满足《纤维增强塑料高低温力学性能试验准则》(GB/T 9979 - 1988) 所规定的试验保温时间要求。

### 2.3.3 拉伸试验,

加载采用位移加载方式, 加载应变率约为  $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。试验测定极限抗拉强度、弹性模量和极限延伸率等力学指标。数据均由采集系统自动记录。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 破坏形态

试件的破坏形态可分为 2 种: (1) 试件断裂, 是有效破坏形态; (2) 试件端部锚具与试件的黏结强度不足, 试件滑移出锚具, 是无效破坏形态。

试件在加载过程中, 当加载到极限荷载的 20%~30% 时, 试件会因损伤而发出清脆响声, 并一直持续下去; 当加载到极限荷载的 60%~70% 时, 响声增大而渐密, 最后突然发出很大的断裂声, 试件陡然破坏。试件在加载到极限荷载的 50% 左右时, 表面出现白斑状裂纹。试件有效破坏也分 2 种形态: 常见的是试件在较大范围内发生片状裂开, 失去承载能力; 另一种为试件在某一断面断裂而失去承载能力, 这种破坏形态比较少见。

试件破坏均表现为脆性破坏, 见图 2。



图 2 试件破坏形式

Fig.2 Failure modes of specimens

GFRP 筋在加载过程中发出清脆响声, 明显不同于钢筋。这是因为 GFRP 筋受荷初期, 玻璃纤维

和树脂承受拉力, 树脂先发生屈服; 过了屈服点后, 树脂进入塑性强化状态, 外加荷载增量主要由玻璃纤维承担, 当玻璃纤维受力达到其断裂强度或玻璃纤维与树脂黏结力丧失后材料失去其承载力。因为受荷前后阶段损伤程度不同, 因而发出声响强度与密度有所不同。

在温度小于 80 °C 时, GFRP 筋试件大部分为断裂破坏。在 100 °C 和 120 °C 时, 有部分 GFRP 筋试件端部锚具与试件发生滑移破坏, 原因是锚固用的黏结剂的强度随温度的增高而变小。

### 3.2 应力 - 应变关系

根据实测结果绘制 GFRP 筋受拉应力 - 应变曲线, 结果见图 3~8。

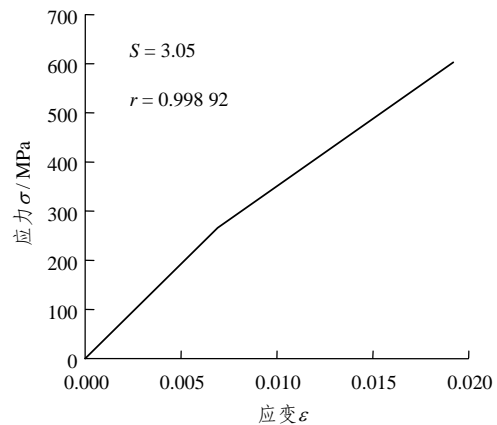


图 3 20 °C 时应力 - 应变关系

Fig.3 Stress-strain relationships at 20 °C

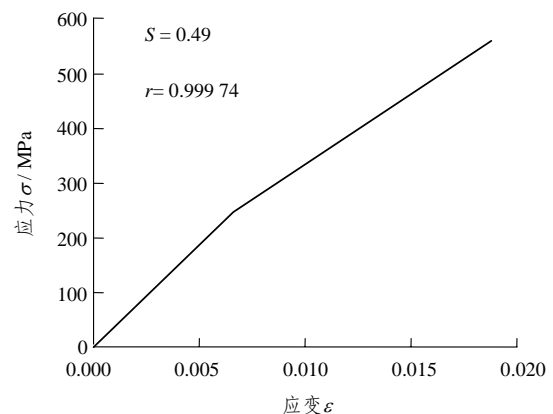


图 4 40 °C 时应力 - 应变关系

Fig.4 Stress-strain relationships at 40 °C

经拟合得到的 GFRP 筋受拉试验双线性应力 - 应变关系为

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \varepsilon & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ E_1 \varepsilon & (\varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

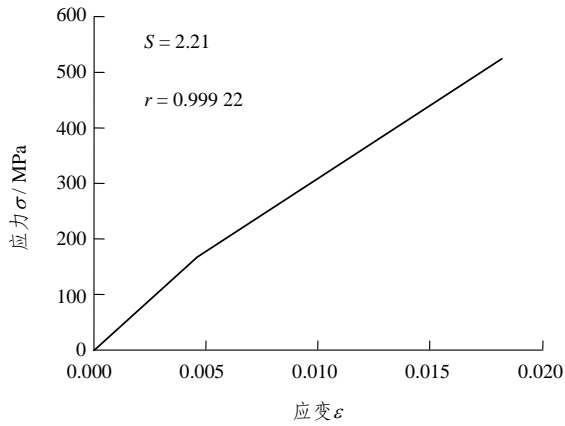


图 5 60 °C 时应力 - 应变关系  
Fig.5 Stress-strain relationships at 60 °C

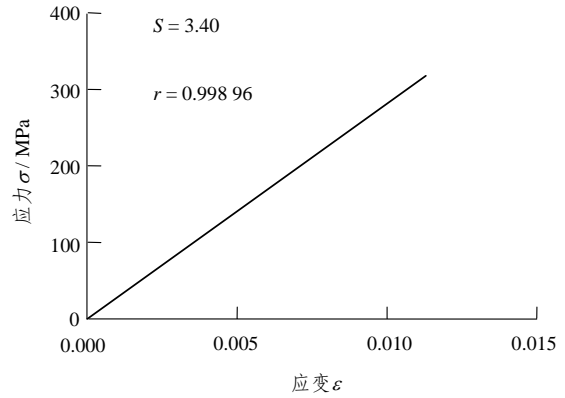


图 8 120 °C 时应力 - 应变关系  
Fig.8 Stress-strain relationships at 120 °C

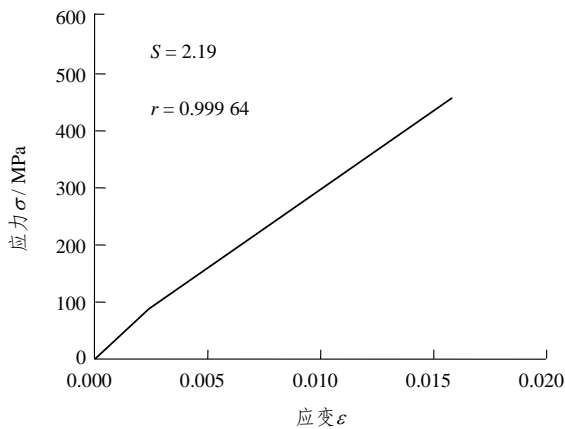


图 6 80 °C 时应力 - 应变关系  
Fig.6 Stress-strain relationships at 80 °C

表 1 不同温度下受拉 GFRP 筋双线性应力 - 应变关系参数拟合结果  
Table 1 Fitting results of parameters of bilinear stress-strain relationship of GFRP rebars at different temperatures

温度/°C	$E_0$ /GPa	$E_1$ /GPa	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$
20	39.60	27.34	0.006 9	0.019 2
40	37.19	24.60	0.006 6	0.018 8
60	35.69	26.10	0.004 6	0.018 2
80	33.89	27.60	0.002 4	0.015 8
100	29.90	29.90	0.000 0	0.014 7
120	30.64	30.64	0.000 0	0.011 3

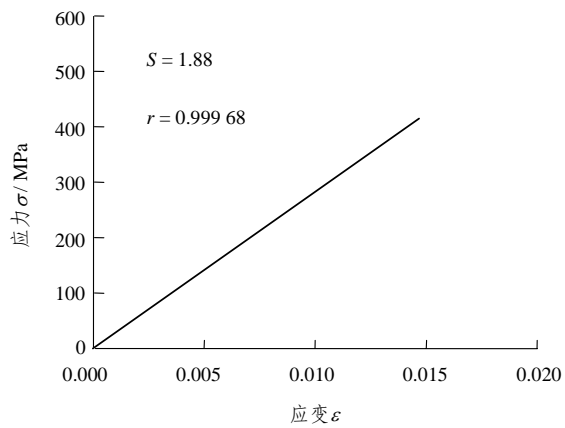


图 7 100 °C 时应力 - 应变关系  
Fig.7 Stress-strain relationships at 100 °C

将在不同温度(20 °C~120 °C)下 GFRP 筋的应力 - 应变关系曲线绘制在图 9 中。

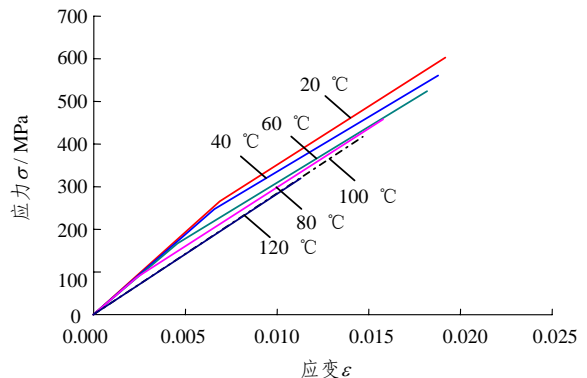


图 9 不同温度下应力 - 应变关系  
Fig.9 Stress-strain relationships at different temperatures

式中:  $E_0$  为 GFRP 筋初始抗拉弹性模量(GPa),  $E_1$  为 GFRP 筋屈服后抗拉弹性模量(GPa)。

不同温度下受拉 GFRP 筋双线性应力 - 应变关系参数拟合结果见表 1。

在常温(20 °C)条件下, GFRP 筋受拉断裂直至破坏一般可以分为 2 个阶段。第一阶段为 GFRP 筋

屈服阶段。这个阶段玻璃纤维和树脂承受拉力，玻璃纤维弹性模量大于树脂的弹性模量，且玻璃纤维强度大于树脂的强度，因而树脂先发生屈服，这时由玻璃纤维和树脂组成的复合材料综合弹性模量将发生突变，表现为弹性模量降低，变形随荷载的增加而增加。屈服后，GFRP 筋受力状态进入第二阶段。在这个阶段，树脂进入塑性强化状态，玻璃纤维是脆性材料，其应力 - 应变曲线近似为直线，外加荷载增量主要由玻璃纤维承担，当玻璃纤维受力达到其断裂强度后材料失去承载力。因为玻璃纤维为主要受力体，因而材料破坏具有明显的脆性特征。复合材料的应力 - 应变关系常呈双线性，见图 10。

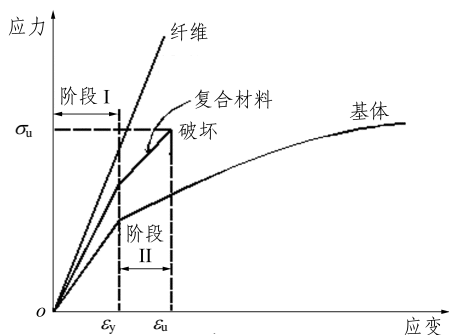


图 10 复合材料应力 - 应变关系

Fig.10 Stress-strain relationships of composite material

由图 9 可见，GFRP 筋的应力 - 应变曲线对环境温度非常敏感。在 20 °C~80 °C 时，GFRP 筋应力 - 应变曲线呈现双折线特征，有明显的屈服点(见图 3~6)。在 100 °C~120 °C 时，GFRP 筋的应力 - 应变曲线为一直线，没有屈服点(图 7, 8)。这种随温度增高而屈服点逐渐降低甚至消失的现象，与其组成材料(玻璃纤维和树脂)在温度增高时的力学性能变化特性相关。

相关研究表明，聚合物会随着温度升高而软化、分解。复合材料变柔软的温度即为玻化温度，记为  $T_g$ 。超过玻化温度，复合材料分子结构会发生改变，弹性模量显著降低。 $T_g$  的大小由树脂聚合体的类型决定。GFRP 筋中树脂的  $T_g$  为 65 °C~120 °C。在 GFRP 筋中，玻璃纤维表现出比树脂较好的耐高温性能，温度升高时，仍可以在长度方向继续承受一定的荷载，但 GFRP 筋抗拉强度仍会因玻璃纤维与树脂之间黏结力降低而降低。

随着环境温度的提高，在第一阶段，树脂屈服点越来越低，因而 GFRP 筋表现出应力 - 应变关系由双线性过渡为直线这一现象。

根据试验结果，本文就环境温度对试件的抗拉弹性模量、屈服应变、极限延伸率(极限拉应变)影响分别进行了回归分析，并得出考虑环境温度影响的应力 - 应变关系。

(1) 初始抗拉弹性模量  $E_0^T$  与环境温度的关系:

$$E_0^T = 41.33 - 0.097 8T \quad (2)$$

式中:  $T$  为环境温度。

初始抗拉弹性模量  $E_0^T$  随着环境温度增加近似线性下降，见图 11。

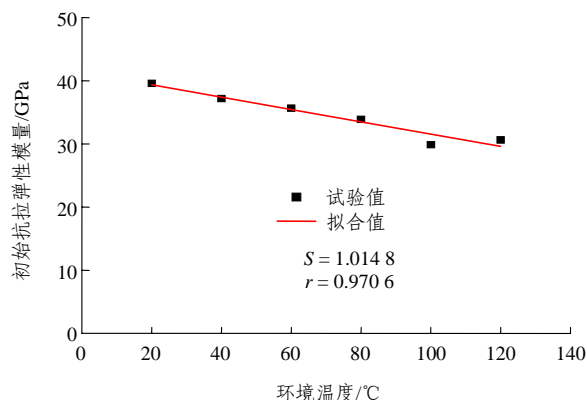


图 11 初始抗拉弹性模量与环境温度关系

Fig.11 Relationship between initial tensile elastic modulus and environmental temperature

以 20 °C 为参考点，升温后初始抗拉弹性模量变化系数  $k_{E_0}^{\Delta T}$  可以拟合为

$$k_{E_0}^{\Delta T} = 1 - 0.002 48\Delta T \quad (3)$$

其中，

$$\Delta T = T - 20$$

(2) 抗拉屈服后弹性模量  $E_1^T$  与温度关系:

$$E_1^T = 25.03 + 0.031T \quad (4)$$

抗拉屈服后弹性模量  $E_1^T$  随着环境温度增加近似线性上升，见图 12。

以 20 °C 为参考点，升温后抗拉屈服后弹性模量变化系数  $k_{E_0}^{\Delta T}$  可以拟合为

$$k_{E_0}^{\Delta T} = 1 + 0.001 21\Delta T \quad (5)$$

(3) 屈服应变  $\varepsilon_y^T$  与环境温度关系:

$$\varepsilon_y^T = 7 300 + 4.285T - 0.785 7T^2 \quad (6)$$

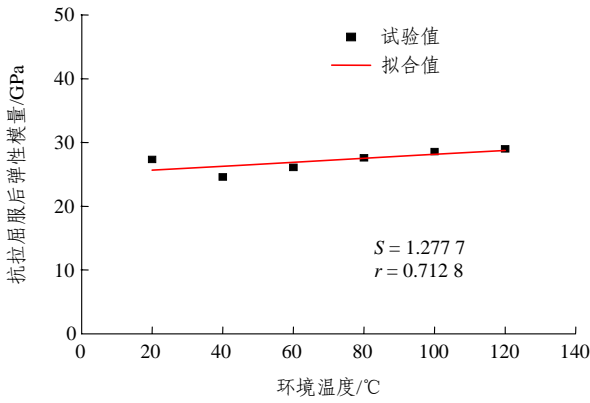


图 12 抗拉屈服后弹性模量与环境温度关系

Fig.12 Relationship between elastic modulus after tensile yield and environmental temperature

屈服应变  $\varepsilon_y^T$  随着环境温度增加下降很快, 近似为二次曲线, 在温度为 100 °C 时, 其值为 0, 见图 13。

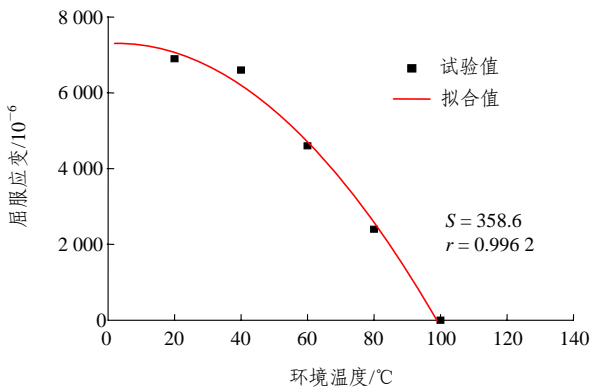


图 13 屈服应变与环境温度关系

Fig.13 Relationship between yield strain and environmental temperature

以 20 °C 为参考点, 升温后屈服应变变化系数  $k_{\varepsilon_y}^{\Delta T}$  可以拟合为

$$k_{\varepsilon_y}^{\Delta T} = 1 - 0.00384\Delta T - 1.11 \times 10^{-4}(\Delta T)^2 \quad (7)$$

(4) 极限延伸率  $\delta^T$  (极限拉应变  $\varepsilon_u^T$ ) 与环境温度的关系:

$$\delta^T = 1.925 + 0.001866T - 7.098 \times 10^{-5}T^2 \quad (8)$$

极限延伸率  $\delta^T$  随着环境温度增加而下降, 近似为二次曲线, 见图 14。

以 20 °C 为参考点, 升温后极限延伸率变化系数  $k_{\delta}^{\Delta T}$  可以拟合为

$$k_{\delta}^{\Delta T} = 1 - 5.03 \times 10^{-4}\Delta T - 3.67 \times 10^{-5}(\Delta T)^2 \quad (9)$$

(5) 考虑环境温度影响的应力 - 应变关系, 试验

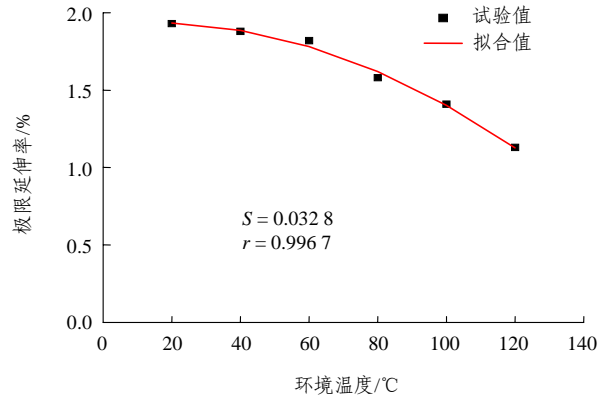


图 14 极限延伸率与环境温度关系

Fig.14 Relationship between limit elongation ratio and environmental temperature

结果表明, GFRP 筋的应力 - 应变关系对环境温度很敏感。通过上面的拟合分析, 可以建立考虑环境温度影响 GFRP 筋的应力 - 应变关系:

$$\sigma^T = \begin{cases} E_0^T \varepsilon^T & (0 \leq \varepsilon^T \leq \varepsilon_y^T) \\ E_1^T \varepsilon^T & (\varepsilon_y^T < \varepsilon^T < \varepsilon_u^T) \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 极限抗拉强度

由拉伸试验可得不同环境温度下 GFRP 筋的极限抗拉强度, 见表 2。

表 2 不同环境温度下 GFRP 筋的极限抗拉强度  
Table 2 Ultimate tensile strengths of GFRP rebars at different environmental temperatures

环境温度/°C	极限抗拉强度/MPa	标准差/MPa
20	602.82	53.71
40	560.76	27.98
60	523.99	19.98
80	457.55	42.80
100	417.08	56.63
120	319.14	33.90

对环境温度和极限抗拉强度关系进行回归分析, 可得到考虑环境温度影响的试件极限抗拉强度  $f_u$  拟合公式:

$$f_u = 622.78 - 0.8982T - 0.0131T^2 \quad (11)$$

极限抗拉强度  $f_u$  随着环境温度增加下降较快, 近似二次曲线, 见图 15。

以 20 °C 为参考点, 升温后极限抗拉强度变化

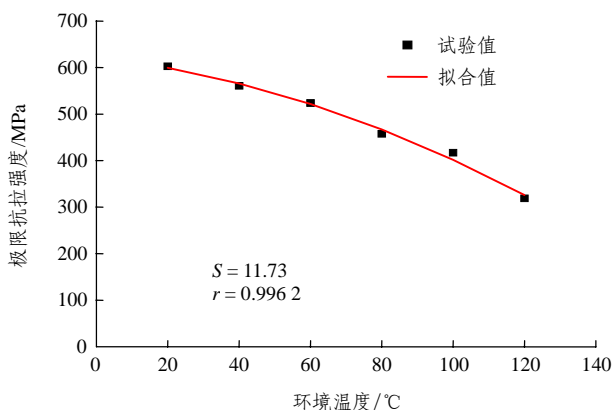


图 15 极限抗拉强度与环境温度关系

Fig.15 Relationship between ultimate tensile strength and environmental temperature

系数  $k_{f_u}^{\Delta T}$  可以拟合为

$$k_{f_u}^{\Delta T} = 1 - 0.00237\Delta T - 2.19 \times 10^{-5}(\Delta T)^2 \quad (12)$$

极限抗拉强度下降率等于  $1 - k_{f_u}^{\Delta T}$ , 则计算所得极限抗拉强度随环境温度的增加的下陷率见表 3、图 16。

表 3 极限抗拉强度下降率

Table 3 Rate of decline of ultimate tensile strength

环境温度 / °C	极限抗拉强度下降率 / %
40	6.98
60	13.08
80	24.10
100	30.81
120	47.06

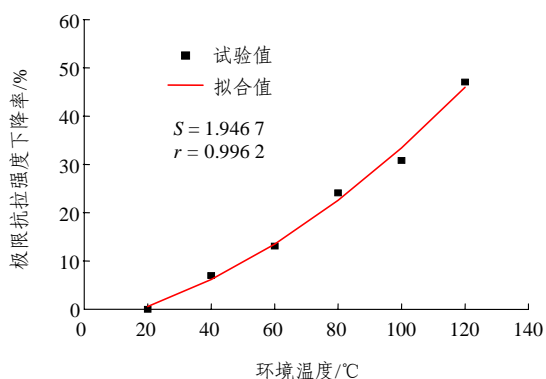


图 16 环境温度增加导致极限抗拉强度下降率

Fig.16 Rate of decline of ultimate tensile strength induced by increase of environmental temperature

当环境温度达到 40 °C 时, 试验得出的极限抗

拉强度下降率大于 5%; 当环境温度达到 100 °C 时, 试验得出的极限抗拉强度下降率达到 30.81%。

GFRP 筋极限抗拉强度通常在 20 °C 左右常温下试验得出的, 未能反映出高温环境的不利影响, 因此必须对常温下试验得出的 GFRP 筋极限抗拉强度引进温度影响修正系数。依据试验结果, 建议采用下式对温度影响进行修正:

$$f_u^T = k_{f_u}^{\Delta T} f_u^{20} \quad (13)$$

式中:  $f_u^T$  为环境温度为  $T$  时 GFRP 筋极限抗拉强度(MPa),  $f_u^{20}$  为环境温度为 20 °C 时 GFRP 筋极限抗拉强度(MPa)。

## 4 结 论

本文通过试验研究了 GFRP 筋在不同环境温度 (20 °C~120 °C) 下抗拉力学性能变化特性, 得到以下结论:

(1) GFRP 筋的力学性能对环境温度非常敏感, 在工程应用中应引起足够的重视。

(2) GFRP 筋初始抗拉弹性模量  $E_0^T$  随着环境温度增加而下降, 而抗拉屈服后弹性模量  $E_1^T$  变化规律则相反, 并根据试验结果拟合出二者随环境温度变化的关系式。

(3) GFRP 筋屈服应变  $\epsilon_y^T$  和极限延伸率  $\delta^T$  随着环境温度增加而下降, 并根据试验结果拟合出二者随环境温度变化的关系式。

(4) GFRP 筋极限抗拉强度  $f_u^T$  随着环境温度增加下降较快, 提出了考虑环境温度影响的  $f_u^T$  计算公式。

(5) 根据试验结果建立了考虑环境温度影响的 GFRP 筋的应力 - 应变关系式。

GFRP 筋作为一种新型复合材料, 在考虑温度影响的同时还需考虑如下因素的影响: (1) GFRP 筋力学性能具有很强的尺寸效应; (2) 保温时间很长, 这可能会改变 GFRP 筋材料结构, 进而影响其力学性能。

## 参考文献(References):

[1] 赵国藩. 混凝土及其增强材料的发展与应用[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(1): 1 - 6.(ZHAO Guofan. Development and applications of concrete and its reinforcing materials[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(1): 1 - 6.(in Chinese))

- [2] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋在混凝土结构中的应用[J]. 工业建筑, 1999, 29(2): 19 - 21, 28.(XUE Weichen, KANG Qingliang. Application of fiber reinforced plastics in concrete structures[J]. Industrial Construction, 1999, 29(2): 19 - 21, 28.(in Chinese))
- [3] 刘汉东, 于新政, 李国维. GFRP锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 719 - 3 723.(LIU Handong, YU Xinzhen, LI Guowei. Experimental study on tensile mechanical properties of glass fiber reinforced plastic rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 719 - 3 723.(in Chinese))
- [4] 李国维, 黄志怀, 张 丹, 等. 玻璃纤维增强聚合物锚杆承载特征现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 240 - 2 246.(LI Guowei, HUANG Zhihui, ZHANG Dan, et al. Field test on load-bearing character of glass fiber reinforced polymer bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 240 - 2 246.(in Chinese))
- [5] GENIDY M S, MADHUKAR M S, RUSSELL J D. An investigation of cure induced stresses in low cure temperature thermoset polymer composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999, 18(14): 1 304 - 1 321.
- [6] 田文彤, 周一亮, 刘 阳, 等. 高性能GFRP棒材的试验研究[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(1): 40 - 42.(TIAN Wentong, ZHOU Yiliang, LIU Yang, et al. Experimental study on high performance of GFRP bar [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2003, 28(1): 40 - 42.(in Chinese))
- [7] MAHALE S, RAJAMANI D, REVATHI A, et al. Hot-wet property characterisation of a high-temperature cured glass-epoxy composite in immersion environment[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(17): 1 883 - 1 892.
- [8] RAY B C. Effects of changing environment and loading speed on mechanical behavior of FRP composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006, 25(12): 1 227 - 1 240.
- [9] ABBASI A, HOGG P J. Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(5): 394 - 404.
- [10] FU H M, ZHANG Y F, HUANG W. A relational expression between static stress and temperature, humidity for composite materials[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(18): 1 611 - 1 617.
- [11] XU D F, LIU R J, XIA J S, et al. Fracture behavior of glass-cloth/polyester composite laminate at low temperature[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1985, 4(2): 205 - 211.
- [12] ELLYIN F, ROHRBACHER C. Effect of aqueous environment and temperature on glass-fibre epoxy resin composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2000, 19(17): 1 405 - 1 427.
- [13] 周长东, 吕西林, 金 叶. 火灾高温下玻璃纤维筋的力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 23 - 28.(ZHOU Changdong, LU Xilin, JIN Ye. Research on mechanical behavior of GFRP bars in high temperature[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 23 - 28.(in Chinese))
- [14] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[R]. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2003.
- [15] 周继凯, 杜钦庆, 吕娇云, 等. 玻璃纤维增强复合材料筋材连接试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (5): 24 - 27.(ZHOU Jikai, DU Qinqing, LU Jiaoyun, et al. Experimental study of glass fiber reinforced polymer bar joint[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006, (5): 24 - 27.(in Chinese))