

文章编号:1673-9469(2026)04-0037-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.005

高温环境下 GFRP 植筋与混凝土界面粘结行为分析

马栋,王燕杰*,刘红波,杨家凡,林志涛
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为探究高温环境对玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋-混凝土界面粘结性能的劣化机理,基于纤维聚合物复合材料(FRP)植筋技术,设计并制备了108个拉拔试件,开展了界面粘结性能试验,试验变量包含温度(20、40、60、80、120、160℃)、混凝土强度等级(C30、C40、C50)及GFRP筋直径(8、12、16mm)等关键参数。试验表明:当温度达到粘结剂玻璃化温度 T_g 时,试件破坏模式发生显著转变,由混凝土基体劈裂破坏转变为界面剥离破坏;在界面剥离破坏模式下,典型粘结-滑移曲线可划分为线性上升段、软化段和残余强度段3个特征阶段。基于断裂力学理论和试验数据回归分析,建立了粘结强度、残余粘结强度及断裂能与温度参数相关性的计算模型。研究表明:温度升高对界面粘结性能具有显著劣化效应,尤其在接近粘结剂玻璃化温度 T_g 时,粘结强度呈指数级下降。与试验数据对比验证,本模型预测误差在10%以内,具有较高的工程适用性。

关键词: FRP植筋技术;高温环境;粘结-滑移;计算模型

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Analysis of Interfacial Bond Behavior Between ETS GFRP Bars and Concrete Under High Temperature

MA Dong, WANG Yanjie*, LIU Hongbo, YANG Jiafan, LIN Zhitao
(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To explore the deterioration mechanism of the bonding performance of Embedded Through-Section (ETS) Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) bar-concrete interface in high-temperature environments, and based on the Fiber Reinforced Polymer (FRP) bar technology, 108 pull-out specimens were designed and prepared in this study. The test variables included three key parameters: temperature (20, 40, 60, 80, 120 and 160 °C), concrete strength grade (C30, C40 and C50) and GFRP bar diameter (8, 12 and 16 mm). The test showed that when the temperature reached the glass transition temperature (T_g) of the adhesive, the failure mode of the specimens changed significantly, and the splitting failure of the concrete matrix evolved into interfacial debonding failure. Under the interfacial debonding failure mode, the typical bond-slip curve could be divided into three characteristic stages: linear rising stage, softening stage and residual strength stage. Based on the theory of fracture mechanics and the regression analysis of experimental data, a calculation model of the correlations of bond strength, residual bond strength and fracture energy with temperature parameters was established. The results showed that the increase of temperature had a significant deteriorating effect on the interfacial bonding performance, especially when it was close to the adhesive's T_g , the bond strength showed an exponential decay trend. Compared with the experimental data, the prediction error of this model was within 10%, and the model has high engineering applicability.

收稿日期:2025-04-09 修回日期:2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308165);中国博士后科学基金面上资助项目(2023M732607);河北省自然科学基金资助项目(E2021402028);海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP2113);邯郸市科技局项目(21422053226)

第一作者: 马栋(1999—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为FRP筋混凝土的粘结与锚固。

***通信作者:** 王燕杰(1992—),男,河北邯郸人,博士,高级工程师,主要研究方向为FRP筋混凝土的粘结与锚固。

Key words: embedded through-section FRP technique; high-temperature environments; bond-slip; calculation model

将纤维增强聚合物复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)应用于既有钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构加固,已被证实是最为有效的加固技术之一^[1]。该技术主要包含外贴式加固(Externally Bonded, EB)和近表层嵌贴(Near-Surface Mounted, NSM)。EB使用环氧基粘结剂将FRP布/板粘结于混凝土基体表面;NSM则将FRP筋材嵌入混凝土表面预开槽内。由于FRP与混凝土界面接触面积有限,混凝土基体侧向约束不足,易引发FRP与混凝土界面早期剥离失效^[2-3]。FRP植筋加固技术通过将FRP筋植入预钻孔洞并使用粘结剂固定,为腹板施工空间受限或混凝土保护层厚度不足而无法实施EB或NSM技术的特殊工况提供了解决方案^[4-9]。

当温度接近FRP基体材料玻璃化温度 T_g (65~150℃^[10])或粘结剂 T_g (45~82℃^[11])时,会显著劣化EB与NSM加固技术的界面粘结性能。Dai等^[11]研究了高温条件下表面粘贴FRP混凝土界面的粘结性能,建立了温度相关的粘结强度损伤退化模型。FRP植筋技术通过增加混凝土保护层厚度与界面接触面积,在热作用下为混凝土提供更好的保护^[9]。研究表明^[12-19],在火灾暴露初期阶段,FRP筋-混凝土界面粘结强度可能退化90%。尽管设置端部锚固装置可有效抑制高温失效^[20],但若要实现高温环境下FRP植筋加固RC构件的可靠设计,仍需系统揭示界面粘结性能温度劣化规律。

目前,关于FRP筋-混凝土界面粘结性能的研究多聚焦于常温条件^[4-6,21-23]。学者通过拉拔试验,研究了FRP筋-混凝土界面粘结性能失效机理,定量评估了材料性能与几何参数对界面性能的耦合影响^[5]。相较于水泥基粘结剂,环氧基粘结剂具有更优的界面粘结性能,这归因于其与混凝土基体之间更强的化学粘结作用^[9]。混凝土抗压强度与粘结强度呈线性正相关关系,而锚固长度的增加使应力分布不均匀,进而导致粘结强度减小^[24-25]。FRP植筋技术在高温下的粘结性能面临

2个关键问题:有效锚固长度随温度升高呈非线性增加^[26];FRP筋与粘结剂均属高分子聚合物复合材料,当温度超过其 T_g 时,材料强度将急剧退化。在接近 T_g 的高温区间(通常 ≤ 120 ℃),混凝土力学性能退化幅度较小,界面粘结行为主要由粘结剂-混凝土界面主导^[27]。Azevedo等^[9]通过试验研究了喷砂FRP筋在20~90℃范围内的粘结性能,但未建立考虑温度影响的粘结强度计算模型,高温下粘结强度的损伤规律尚未揭示。

综上所述,尽管FRP筋-混凝土界面粘结性能研究已取得一定进展,但考虑粘结剂影响的高温环境下FRP筋-混凝土的粘结性能研究仍较少。本文开展了不同温度(20~160℃)下108个带肋玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)筋与混凝土界面粘结性能试验,明确了界面粘结性能随温度的变化规律,构建了高温环境下界面粘结强度、残余粘结强度及断裂能的预测模型,通过试验数据验证了模型的有效性。研究成果可为FRP筋加固混凝土结构设计和理论分析提供参考。

1 试验方案

1.1 材料

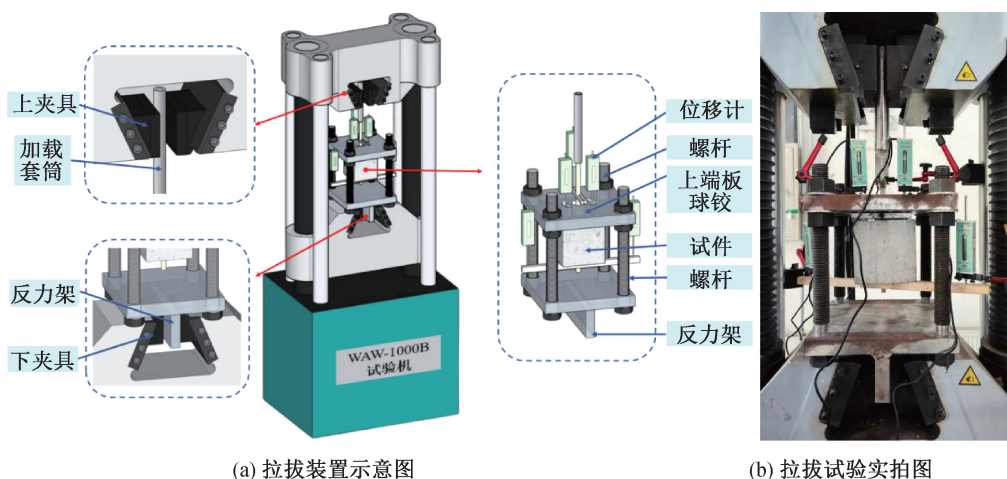
带肋GFRP筋材由深圳海川新材料股份有限公司研制,筋材采用连续纤维增强树脂基体的复合材料结构,表面肋纹通过螺旋缠绕成型与尼龙高压共挤工艺复合加工形成。GFRP筋直径 d 分别设定为8、12、16mm,按照ACI 440.3R-15^[28]要求开展单轴拉伸准静态试验,几何参数和测试得到的力学性能见表1。

本研究所用粘结剂由天津亚莱士新材料有限公司生产,依据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[29]测得其拉伸强度为18.88MPa。粘结剂其他关键性能参数由制造商提供,其中,抗压强度、抗弯强度和混凝土粘结强度分别为90.2、

表1 GFRP筋几何参数和力学性能

Tab. 1 Geometric parameters and mechanical properties of GFRP bars

设定直径/mm	测量直径/mm	肋高/mm	肋间距/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
8	8.17	0.10	9.5	729.4	43.5
12	12.03	0.65	9.0	510.4	45.0
16	16.03	0.65	8.5	538.2	45.0



(a) 拉拔装置示意图

(b) 拉拔试验实拍图

图2 试验装置

Fig. 2 Test setup

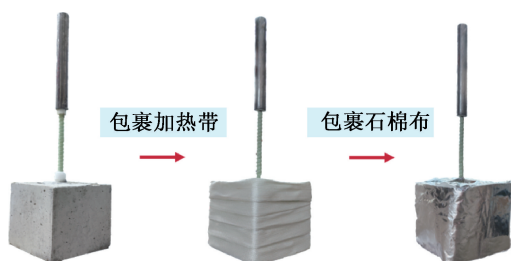


图3 拔出试件加热过程

Fig. 3 Heating procedure of pullout specimens

使环向拉应力增大,当达到混凝土抗拉强度极限时,开始出现劈裂裂纹,最后导致混凝土劈裂破坏。当温度大于粘结剂玻璃化温度 T_g 时,混凝土不会发生劈裂破坏。这是因为此时粘结剂软化,界面粘结强度急剧下降,破坏模式由混凝土劈裂破坏转为界面粘结破坏。这归因于粘结剂力学性能的衰减直接影响了 GFRP 筋-粘结剂界面的粘结性能。

2.2 试验结果

通过中心拉拔试验,测得拉拔试件在不同温度下的荷载-滑移曲线和最大荷载 P_{max} 。GFRP 筋-混凝土界面粘结应力 τ 与界面相对滑移量 s 的计算公式见式(1)(2)。

$$\tau = \frac{F}{\pi dL} \quad (1)$$

$$s = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4}{4} \quad (2)$$

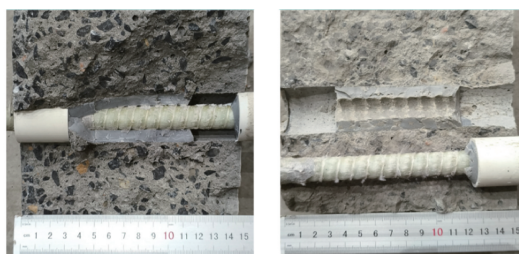
式中: F 为拉拔荷载,kN; s_1 、 s_2 、 s_3 和 s_4 为位移计自由端和加载端所测得的滑移值,mm。

图5给出了各试件的粘结-滑移曲线。其中,C30_D08_20为试件编号(C30代表混凝土强度等级,D08代表GFRP直径,20代表试验温度), a 点为粘结强度 τ_u , b 点为残余粘结强度 τ_r 。结合试件破坏模式分析发现,破坏模式对粘结-滑移曲线具有显著影响。当发生混凝土劈裂破坏时,粘结-滑移曲线仅存在上升段,且界面粘结强度随荷载的增加呈非线性下降趋势。界面剥离破坏模式下的粘结-滑移曲线具有典型的三阶段特征:上升段、软化段及残余段。在初始线性弹性上升段,界面粘结应力随滑移的增大而增大;荷载继续增加,当界

2 试验结果

2.1 破坏模式

图4为试件破坏模式,GFRP筋-混凝土拉拔试件的破坏模式包括界面剥离破坏与混凝土劈裂破坏。分析108个试件破坏模式发现,当温度为20、40℃时,试件为混凝土劈裂破坏;温度超过60℃后,试件破坏模式转为界面剥离破坏。



(a) 界面剥离破坏

(b) 混凝土劈裂破坏

图4 破坏模式

Fig. 4 Failure modes

在温度低于粘结剂玻璃化温度 T_g 的工况下,无论混凝土强度等级如何,试件均发生混凝土劈裂破坏。分析发现,粘结剂-混凝土界面剪胀效应

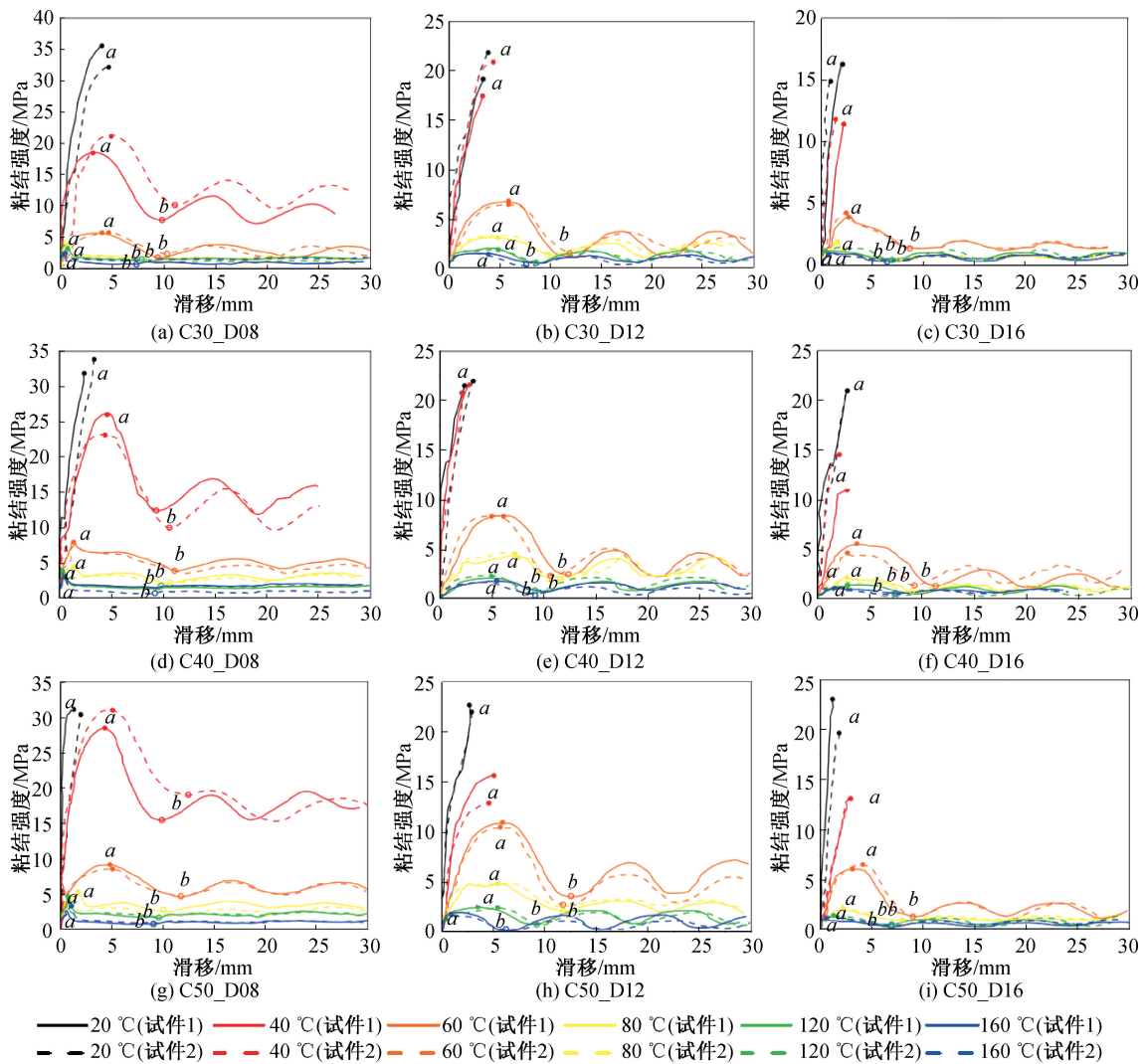


图5 不同温度下试件的粘结-滑移曲线

Fig. 5 Bond-slip curves for specimen exposed to different temperatures

面粘结应力达到粘结强度 τ_u 时,界面进入软化阶段,此时粘结应力逐渐减小,最终稳定于残余粘结强度 τ_r 。

2.3 粘结强度方差分析

为分析温度、GFRP 筋直径、混凝土强度的交互作用,本节采用方差分析法对上述3个因素进行显著性分析。表3给出了粘结强度方差分析结果,其中 F 值为各因素均方与误差均方比值,用于检验因素效应是否显著; p 值表示在假设检验中表示观察到当前 F 值的概率,若小于显著性水平则拒绝原假设,认为效应显著。结果显示,3个因素的 p 值均小于0.001,远小于标准显著性水平0.05,表明3个单因素对粘结强度均有显著影响。温度的 F 值高达1 826.387,表明温度对界面粘结强度具有极显著的主导作用,是导致界面粘结性能退化的关键因素;GFRP 筋直径的 F 值为337.440,其对

粘结强度的影响仅次于温度,同样具有显著的主效应;混凝土强度的 F 值为22.434,虽然也表现出显著性影响,但其作用效应仅为温度的1/80。这表明在高温环境下,单纯提高混凝土强度对改善界面粘结性能的作用十分有限。

双因素方差分析结果显示, p 值均小于0.05。温度与GFRP 筋直径的交互作用 F 值为58.697,表现出极显著的交互效应,这表明温度对粘结强度的影响高度依赖筋材直径。温度与混凝土强度的交互作用 F 值为3.193,显著性降低,表明当温度低于粘结剂的玻璃化温度 T_g 时,提高混凝土强度在一定程度上可提高粘结剂的粘结性能;当温度超过 T_g 时,改善效果显著减弱。混凝土强度与筋材直径的交互作用 F 值为2.743,表现出较弱的显著性,这可能是由于当筋材直径增加、混凝土强度提高时,应力集中效应加剧,引发局部界面

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

来源	自由度	平方和	均方	F 值	p 值
混凝土强度 C	2	40.348	20.174	22.434	<0.001
GFRP 筋直径 d	2	606.880	303.440	337.440	<0.001
工况温度 T	5	8 211.822	1 642.364	1 826.387	<0.001
$C \times T$	10	28.714	2.871	3.193	0.003
$d \times T$	10	527.832	52.783	58.697	<0.001
$C \times d$	4	9.865	2.466	2.743	0.038
$C \times d \times T$	20	167.150	8.358	9.294	<0.001
误差	54	48.559	—	—	—
总计	107	9 641.172	—	—	—

劣化,进而诱发界面粘结失效。三因素交互作用分析($F=9.294, p<0.001$)进一步证实了温度、混凝土强度与筋材直径之间的非线性协同效应。典型表现为当温度在 60℃ 以下时,粘结强度保持率维持在 60% 左右;当温度超过 60℃ 时,粘结强度保持率急剧下降并趋于 20% 以下。

3 粘结参数的确定

3.1 粘结强度

建立界面粘结强度本构模型是 FRP 植筋加固混凝土结构应用的关键前提。然而,现有研究尚未建立能够量化预测界面粘结性能受热退化规律的模型。现有的 ACI 440.3R-15^[28] 规范虽考虑了 FRP 筋材的强度折减系数,但未考虑界面粘结性能的温度退化机制。结合本文和文献[9]的试验结果,粘结剂的 T_g 值均约为 65℃。粘结强度非线性下降趋势通过 Dai 等^[11]建立的模型进行拟合:

$$\frac{\tau_u(T)}{\tau_{u0}} = \frac{(1-a_1)}{2} \times \tanh \left[-a_2 \times \left(\frac{T}{T_g} - a_3 \right) \right] + \frac{(1+a_1)}{2} \quad (3)$$

式中: $\tau_u(T)$ 、 τ_{u0} 分别为温度 T 、常温下的粘结强

度,MPa; a_1 、 a_2 和 a_3 为基于多元最小二乘回归方法标定的无量纲特征参数,取值分别为 0.087、-4.491 和 1.003。

图 6(a) 揭示了归一化粘结强度 $\tau_u(T)/\tau_{u0}$ 与无量纲温度参数 T/T_g 的演化规律。式(3)的预测结果不仅与本试验数据吻合良好,对 Azevedo 等^[9]的试验数据也表现出较强的适用性。根据图 6(b)的统计结果,预测粘结强度与实测值比值的平均值(average, AVG)为 1.000,变异系数(Coefficient of Variation, COV)为 0.296。

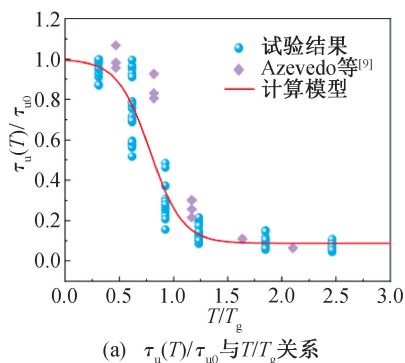
常温下粘结强度主要取决于混凝土强度、保护层厚度、筋材直径及肋纹几何形状等因素,其值可能存在显著差异。目前,被广泛接受的常温下 FRP 筋-混凝土界面粘结强度模型可表示为如下通用形式^[33]:

$$\frac{\tau_u}{\sqrt{f_c}} = k_1 + k_2 \frac{c}{d} + k_3 \frac{h_f}{s_f} \quad (4)$$

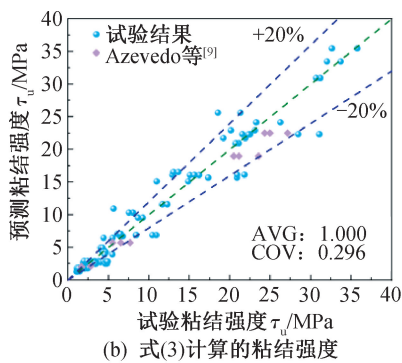
式中: k_1 、 k_2 和 k_3 为无量纲系数; f_c 为混凝土抗压强度,MPa; h_f 为筋材肋高,mm; s_f 为筋材肋间距,mm。

为表征高温下粘结强度的退化,本研究在现有模型中引入温度相关的折减系数 $\eta(T)$ 。

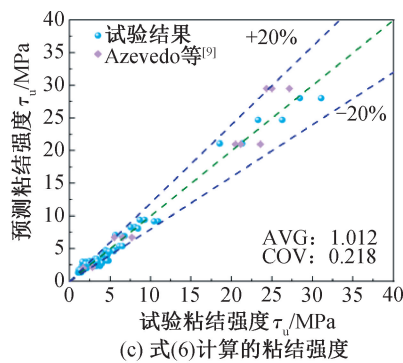
$$\eta(T) = \alpha_1 + \alpha_2 e^{-\alpha_3 (T/T_g)} \quad (5)$$



(a) $\tau_u(T)/\tau_{u0}$ 与 T/T_g 关系



(b) 式(3)计算的粘结强度



(c) 式(6)计算的粘结强度

图 6 试验结果与理论计算结果的比较

Fig. 6 Comparison between experimental and theoretical results

通过多变量最小二乘回归分析确定系数 k_1 、 k_2 、 k_3 及 α_1 、 α_2 、 α_3 后,得到粘结强度模型,见式(6)。

$$\frac{\tau_u(T)}{\sqrt{f_c}} = \left(-2.742 + 0.515 \frac{c}{d} + 24.065 \frac{h_f}{s_f} \right) \cdot \left[0.233 + 29.492e^{-4.441\left(\frac{T}{T_g}\right)} \right] \quad (6)$$

图 6(c) 对式(6) 预测的粘结强度和试验数据进行了对比分析,结果表明,预测值与实测值比值的平均值 AVG 为 1.012,变异系数 COV 为 0.218。相较于式(3),式(6) 建立的粘结强度模型精度显著提升,特别是在高温工况下,展现出较高的温度敏感性,可准确评估高温条件下的界面粘结性能退化规律,弥补了现有模型无法有效预测高温环境下 FRP 筋与混凝土界面粘结强度的不足。

3.2 残余粘结强度

残余粘结强度 τ_r 为粘结-滑移曲线由软化段向残余段过渡的临界点。研究发现,随着温度升高,残余粘结强度 τ_r 与粘结强度 τ_u 呈相同的下降规律,两者在相同温度范围内的变化密切相关,与文献[34]揭示的退化机理相符。本研究引入无量纲温度参数 T/T_g 对 $\tau_r(T)$ 进行归一化处理,通过非线性最小二乘拟合获得方程:

$$\frac{\tau_r(T)}{\tau_{r0}} = \frac{(1 - b_1)}{2} \times \tanh \left[-b_2 \times \left(\frac{T}{T_g} - b_3 \right) \right] + \frac{(1 + b_1)}{2} \quad (7)$$

式中: b_1 、 b_2 和 b_3 为无量纲系数,其值分别为 0.294、4.440 及 1.205; τ_{r0} 为常温下的残余粘结强度,MPa。

图 7 显示,当温度为粘结剂玻璃化温度 T_g 时,试验数据出现较大误差。这是由于此时粘结剂由玻璃态向橡胶态转变,GFRP 筋-粘结剂界面处于复杂状态,显著影响粘结性能。结果表明,预测值与实测值比值的平均值 AVG 为 1.001,变异系数 COV 为 0.31,且残余粘结强度 τ_r 的试验值显著小于 5 MPa。在不同温度条件下,理论模型预测结果与试验数据吻合良好。

3.3 界面断裂能

界面断裂能 G_F 随温度的变化规律与 Dai 等^[11] 在外贴法研究中的试验结果一致。本文采用 Dai 等^[11] 建立的断裂能计算模型预测界面断裂能,见式(8)。

$$\frac{G_F(T)}{G_{F0}} = \frac{(1 - d_1)}{2} \times \tanh \left[-d_2 \times \left(\frac{T}{T_g} - d_3 \right) \right] + \frac{(1 + d_1)}{2} \quad (8)$$

式中: d_1 、 d_2 和 d_3 为无量纲系数,其值分别为 0.193、-6.552 及 1.150; G_{F0} 为常温下的断裂能,MPa·mm。

在温度为 20、40 °C 的拉拔试验中,试件均发生混凝土劈裂破坏,无法获得完整的界面断裂能,因此分析时未采用试验数据。高温环境下归一化断裂能的演化规律(图 8)表明,温度超过玻璃化温度 T_g 后,界面断裂能骤然下降;当温度达到 $2.0T_g$ 时,界面断裂能下降了 90%,随后基本保持不变。断裂能的预测值与试验数据比值的平均值 AVG 为 1.013,COV 为 0.274。式(8)建立的模型能准确预测高温环境下界面断裂能。

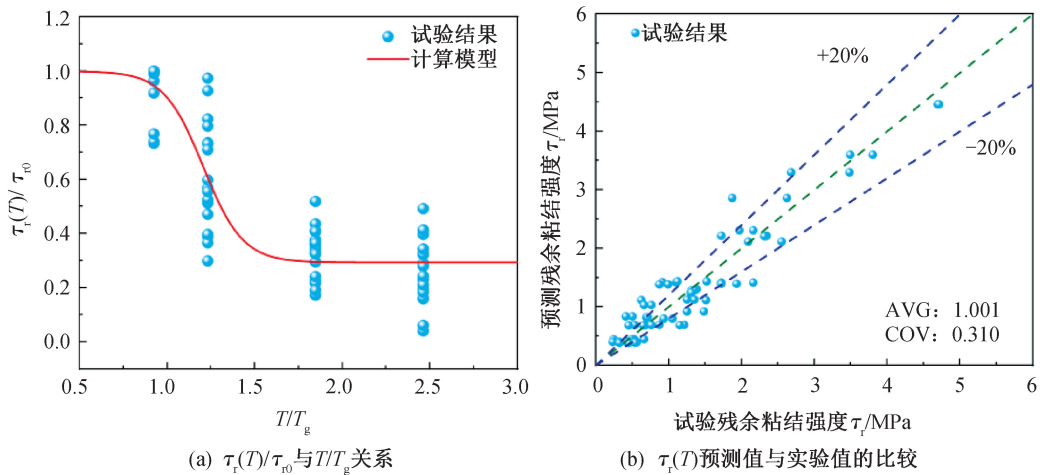


图 7 试验结果与理论计算结果的比较

Fig. 7 Comparison between experimental and theoretical results

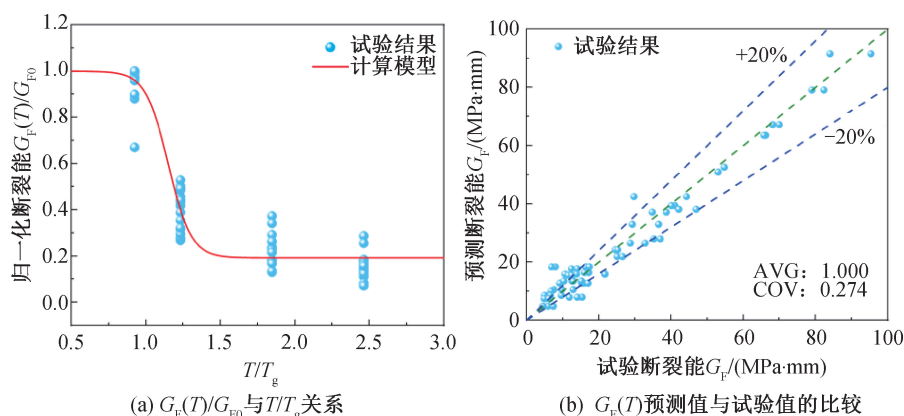


图8 试验结果与理论计算结果的比较

Fig. 8 Comparison between experimental and theoretical results

4 结论

1) 常温下 GFRP 筋-混凝土界面粘结-滑移曲线仅含上升段,破坏模式为混凝土劈裂破坏;当温度为 60 ℃ 时转变为界面剥离破坏,粘结-滑移曲线呈上升段、软化段和残余段。

2) 温度超过粘结剂玻璃化温度 T_g 后,粘结强度保留率对筋材直径的敏感性下降。随着温度升高至 80~160 ℃ (大于粘结剂 T_g),粘结强度衰减趋于稳定。与常温相比,界面粘结强度降低 80%~90%。

3) 本文引入温度折减系数,建立了考虑高温影响的粘结强度、残余粘结强度及断裂能计算模型。通过与试验结果比较,验证了所提模型的可靠性。

参考文献:

- [1] Xu Jigang, Cai Zhongkui, Feng Decheng. Life-cycle seismic performance assessment of aging RC bridges considering multi-failure modes of bridge columns [J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112818.
- [2] Wang Qiang, Li Ting, Zhu Hong, et al. Bond enhancement for NSM FRP bars in concrete using different anchorage systems [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118316.
- [3] Zhang Shishun, Jędrzejko M J, Ke Y, et al. Shear strengthening of RC beams with NSM FRP strips: concept and behaviour of novel FRP anchors [J]. Composite Structures, 2023, 312: 116790.
- [4] Chaallal O, Mofidi A, Benmokrane B, et al. Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: performance and comparison with existing techniques [J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(3): 374-383.

- [5] Bui L V H. Effects of the bond properties of ETS-GFRP bar to concrete on the shear behavior of ETS-GFRP-strengthened RC beams [J]. Structural Concrete, 2023, 24(1): 1642-1655.
- [6] Godat A, L'hady A, Chaallal O, et al. Bond behavior of the ETS FRP bar shear-strengthening method [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(5): 529-539.
- [7] Mofidi A, Chaallal O, Benmokrane B, et al. Experimental tests and design model for RC beams strengthened in shear using the embedded through-section FRP method [J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(5): 540-550.
- [8] Breviglieri M, Aprile A, Barros J A O. Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars [J]. Engineering Structures, 2014, 81: 76-87.
- [9] Azevedo A S, Firmo J P, Correia J R. Bond behaviour at high temperatures between concrete and CFRP or steel strengthening bars applied according to the embedded through-section (ETS) technique [J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 151: 105580.
- [10] Burke P J, Bisby L A, Green M F. Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 190-199.
- [11] Dai Jianguo, Gao W Y, Teng J G. Bond-slip model for FRP laminates externally bonded to concrete at elevated temperature [J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(2): 217-228.
- [12] Katz A, Berman N. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(6): 433-443.
- [13] Rosa I C, Firmo J P, Correia J R, et al. Bond behaviour

- of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature-Definition of bond vs. slip relations [J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 160:329-340.
- [14] Wang Zhuolin, Dai Jianguo, Wang Mingqian, et al. Residual bond strengths of epoxy and cement-bonded CFRP reinforcements to concrete interfaces after elevated temperature exposure [J]. Fire Safety Journal, 2021, 124:103393.
- [15] Rosa I C, Firmo J P, Correia J R, et al. Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed GFRP bars in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104119.
- [16] Solyom S, Di Benedetti M, Guadagnini M, et al. Effect of temperature on the bond behaviour of GFRP bars in concrete [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 183:107602.
- [17] Fernandes B, Moreno A L Jr, Costa C N. Residual bond behavior between NSM CFRP and concrete at elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119467.
- [18] Azevedo A S, Firmo J P, Correia J R, et al. Influence of elevated temperatures on the bond behaviour between concrete and NSM-CFRP strips [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 111:103603.
- [19] Yoo S J, Lee O S, Parr J M, et al. Degradation of flexural bond of CFRP bar in UHPFRC after exposure to elevated temperature [J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 152:105627.
- [20] Jiang Zhengwen, Pi Xiangfei, Fang Zhi, et al. Mechanical performance of a bond-type anchorage system for CFRP cable exposed to elevated temperature [J]. Engineering Structures, 2024, 302:117388.
- [21] Bui L V H, Jongvivatsakul P, Stitmannathum B, et al. Numerical modelling of bond mechanism of ETS FRP bar-concrete joints with long embedment length [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 117:103179.
- [22] Bui L V H, Sekiya H. Consistency of bond-slip models in simulating the bond between ETS-FRP bars and concrete and the shear contribution of the strengthening system [J]. Journal of Composites for Construction, 2024, 28(4):04024022.
- [23] Bui L V H, Stitmannathum B, Ueda T. Simulation of concrete beams strengthened by embedded through-section steel and GFRP bars with newly developed bond model [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2020, 18(7):364-385.
- [24] Bui L V H, Klippathum C, Kongmalai N, et al. Analytical and numerical investigation of embedded through-section GFRP-strengthened RC beams with a developed bonding-based model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 271:108595.
- [25] 陈大川, 刘冉, 彭勃. 基于适用性试验的无机植筋锚固性能研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54(14):153-158+152.
- Chen Dachuan, Liu Ran, Peng Bo. Research on anchorage performance of inorganic planting bars based on applicability test [J]. Building Structure, 2024, 54(14):153-158+152.
- [26] Wang Yanjie, Liu Hongbo, Ma Dong, et al. Experimental and analytical investigations on debonding response of embedded through-section ribbed GFRP bar-to-concrete joints at elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2024, 447:138000.
- [27] Jia Dongge, Gao Wanyang, Duan Dexin, et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints subjected to combined effects of loading and temperature variation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 254:107928.
- [28] ACI 440. 3R-15 Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures [S].
- [29] GB 50367—2013 混凝土结构加固设计规范 [S].
- GB 50367—2013 Code for design of strengthening concrete structure [S].
- [30] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S].
- [31] ASTM D7913-14 Standard test method for bond strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars to concrete by pullout testing is a new standard now available [S].
- [32] Ke Lu, Lin Lin, Feng Zheng, et al. Temperature-dependent bond-slip behavior of CFRP bars embedded in ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2024, 28:04023070.
- [33] ACI 440. 1-15 Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer bars [S].
- [34] Butler L, West J S, Tighe S L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(10):1037-1049.

(责任编辑 张爱丽)