复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

高温下CFRP筋及其粘结型锚固系统的力学性能

苏捷 李权浩 方志 蒋正文 方川 王志伟

Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system exposed to elevated temperature

SU Jie, LI Quanhao, FANG Zhi, JIANG Zhengwen, FANG Chuan, WANG Zhiwei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211214.003

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温后CFRP筋及其粘结式锚固系统的力学性能

Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system after elevated temperature exposure

复合材料学报. 2021, 38(12): 4031-4041 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210215.005

大直径玻璃纤维增强聚合物复合材料抗浮锚杆外锚固性能试验及黏结-滑移模型

External anchorage performance test and bond-slip model of large diameter glass fiber reinforced polymer composite anti-floating anchor

复合材料学报. 2020, 37(4): 896-906 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190618.002

固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面黏结性能的影响

Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature

复合材料学报. 2021, 38(12): 4073-4089 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210311.005

高强不锈钢绞线网与工程水泥基复合材料黏结锚固性能试验

Experiment on bonding and anchoring performance between high-strength stainless steel wire mesh and engineered cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(7): 1731-1742 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191010.001

高温下双搭接钢-CFRP板胶粘界面力学性能试验

Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature

复合材料学报. 2021, 38(2): 449-460 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.002

高温后高延性混凝土的抗压性能及微观结构

Compressive properties and micro-structure of high ductility concrete exposed to elevated temperature

复合材料学报. 2020, 37(4): 985-996 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190731.001

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 11 期 11 月 2022 年
Vol. 39 No. 11 Nov 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20211214.003

高温下 CFRP 筋及其粘结型锚固系统的力学性能

分享本文

苏捷[1,2], 李权浩[1], 方志[1,2], 蒋正文*[1,2], 方川[1], 王志伟[3]

(1. 湖南大学 土木工程学院，长沙 410082；2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室，长沙 410082；
3. 中复碳芯电缆科技有限公司，连云港 222069)

摘 要：为明确高温下碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer，CFRP) 筋及其以活性粉末混凝土 (RPC) 为粘结介质的粘结型锚固系统的力学性能，以处理温度为试验参数，完成了 12 个筋材试件的高温轴拉试验和 8 个锚固性能试件的高温拉拔试验。揭示了处理温度对高温下 CFRP 筋及其粘结型锚固系统力学性能的影响规律，建立了适于分析高温下 CFRP 筋轴向拉伸性能、以 RPC 为粘结介质的粘结型锚固系统粘结强度及临界锚固长度的实用计算公式。结果表明：对于筋材轴拉试件，100℃、210℃ 和 300℃ 下筋材的抗拉强度、弹性模量较常温试件分别下降了 (2.3%、11.4%)、(29.8%、35.6%) 和 (40.9%、45%)，高温下筋材的弹性模量较抗拉强度受处理温度的影响更为显著；100℃、210℃ 和 300℃ 下筋材的极限拉应变较常温试件分别增大了 18.5%、17.3% 和 14.8%，高温下筋材的极限拉应变随处理温度升高而呈先增大后减小的变化趋势；对于锚固性能试验，试件的粘结强度随处理温度升高而线性衰减，处理温度为 100℃、210℃ 与 300℃ 试件的粘结强度较常温试件分别下降了 20.4%、52.6% 和 85.1%。文中所建立的高温下 CFRP 筋与粘结型锚固系统力学性能的实用计算公式均具有较高精度。

关键词：CFRP 筋；粘结型锚固系统；高温轴拉性能；高温锚固性能；临界锚固长度

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5300-11

Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system exposed to elevated temperature

SU Jie[1,2], LI Quanhao[1], FANG Zhi[1,2], JIANG Zhengwen*[1,2], FANG Chuan[1], WANG Zhiwei[3]

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Zhongfu Carbon Fiber Core Cable Technology CO., LTD., Lianyungang 222069, China)

Abstract: To determine the elevated-temperature mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar and its bond-type anchorage system with bonding agent of reactive powder concrete (RPC), the axial tensile tests and pull-out tests with parameter of treatment temperature were conducted on 12 CFRP bar specimens and 8 anchorage performance specimens exposed to elevated temperature, respectively. The effects of elevated temperature on the mechanical properties of CFRP bar and its bond-type anchorage system under high temperature were uncovered, and the practical formulas were developed for determining the axial tensile properties of CFRP bar, the bond strength and the critical anchorage length of the bond-type anchorage system with bonding agent of RPC exposed to elevated temperature. The results demonstrated that the tensile strength and elastic modulus of axial tensile specimens exposed to the elevated temperature of 100℃, 210℃ and 300℃ decreased by (2.3%, 11.4%), (29.8%, 35.6%) and (40.9%, 45%), respectively, compared to the specimen under room temperature.

收稿日期：2021-11-03; **修回日期**：2021-12-01；**录用日期**：2021-12-02；**网络首发时间**：2021-12-15 08:59:41
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211214.003
基金项目：国家自然科学基金 (51908206; 51408213)
通信作者：蒋正文, 博士, 副教授, 研究方向为高性能材料结构抗火性能 E-mail: jiangzw@hnu.edu.cn
引用格式：苏捷, 李权浩, 方志, 等. 高温下 CFRP 筋及其粘结型锚固系统的力学性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5300-5310.
SU Jie, LI Quanhao, FANG Zhi, et al. Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system exposed to elevated temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5300-5310(in Chinese).

The effect of elevated temperature on the elastic modulus of CFRP bar exposed to elevated temperature was more significant than the tensile strength. The ultimate tensile strain of axial tensile specimens exposed to the elevated temperature of 100℃, 210℃ and 300℃ increased by 18.5%, 17.3% and 14.8%, respectively, compared to the specimen under room temperature. With the increase of the elevated temperature, the ultimate tensile strain of CFRP bar increased firstly and then decreased. The bond strength of the anchorage performance specimens decreased linearly with the increase of the elevated temperature. Specifically, compared to the specimen under room temperature, the bond strengths of the specimens exposed to the elevated temperature of 100℃, 210℃ and 300℃ decreased by 20.4%, 52.6% and 85.1%, respectively. The practical formulas with high accuracy for determining the mechanical properties of the CFRP bar and bond-type anchorage system exposed to elevated temperature were developed in the present study.

Keywords：CFRP bar；bond-type anchorage system；axial tensile performance under elevated temperature；anchorage performance under elevated temperature；critical anchorage length

具有轻质、高强、免锈蚀及抗疲劳性能良好等诸多优点的碳纤维增强聚合物复合材料(Carbon fiber reinforced polymer，CFRP)筋有望成为传统钢制筋材的替代品，特别是对于在恶劣环境下工作的预应力结构[1-3]。相较于易导致 CFRP 筋出现“切口效应”而过早发生横向破坏的夹持型锚固系统，粘结型锚固系统通过 CFRP 筋-粘结介质界面的化学胶着力、摩擦力及机械咬合力可实现对 CFRP 筋更可靠、有效的锚固[4-5]。活性粉末混凝土(Reactive powder concrete，RPC)以其优异的力学性能和耐久性能可成为有效锚固 CFRP 筋的粘结介质[6]。RPC 灌注的 CFRP 筋粘结型锚固系统已在实际工程中得以成功应用，并表现出优异的锚固性能[7-8]。然而，CFRP 筋及其粘结型锚固系统在建造和运营过程中可能遭受火灾作用[9-12]。火灾下 CFRP 筋及 CFRP 筋-粘结介质界面因树脂基体较弱的耐高温性能而易成为受力薄弱环节，则高温下 CFRP 筋及其粘结型锚固系统的力学性能值得关注。因此，对 CFRP 筋及其粘结型锚固系统的高温力学性能进行研究是十分必要的。

国内外部分学者对高温下 CFRP 筋的力学性能开展了研究。Wang 等[13]试验研究了 20~600℃作用下 CFRP 筋力学性能退化规律，结果表明：高温下 CFRP 筋应力-应变始终呈线性关系；CFRP 筋抗拉强度随处理温度升高而近似线性衰减，并在 500℃时完全丧失；处理温度高于 350℃时，CFRP 筋弹性模量急剧下降。杨桢楠[14]试验研究了 100~500℃作用下 CFRP 筋的力学性能，结果表明：处理温度大于 200℃时，CFRP 筋的抗拉强度与弹性模量均大幅下降。周飞[15]对 20~500℃作用下 CFRP 筋力学性能进行了试验研究，提出了适于表征高温下 CFRP 筋轴拉性能退化规律的指数函数模型。上述研究所采用 CFRP 筋的树脂玻璃化转变温度 T_g 均小于 200℃。

另有部分学者对高温下纤维增强塑料(Fiber reinforce plastic，FRP)筋-混凝土界面的粘结性能进行了试验研究。吕西林等[16]研究了处理温度、混凝土强度与粗骨料粒径等参数对 20~250℃作用下玻璃纤维增强聚合物复合材料(Glass fiber reinforced polymer，GFRP)筋-混凝土界面粘结性能的影响规律，结果表明处理温度高于 110℃时，界面粘结强度相较于常温下降低了 85%~90%。Katz 等[17-18]对 20~250℃作用下 GFRP 筋-混凝土界面粘结性能进行了研究，给出了适于表征界面粘结强度衰减规律的半经验模型，结果表明处理温度为 250℃时，界面粘结强度仅为常温时的 10%~20%；筋材表面处理方式是影响界面粘结强度的重要因素。王晓璐等[19]研究了 20~350℃作用下 FRP(GFRP、玄武岩纤维增强聚合物复合材料(Basalt fiber reinforced polymer，BFRP))筋-混凝土界面的粘结性能，提出了高温下界面粘结强度衰减模型与粘结-滑移本构模型，结果表明处理温度由 60℃增至 120℃时，界面粘结强度的衰减幅度最大；200℃时界面粘结强度仅为常温时的 15%。鞠竹等[20]对 20~190℃作用下 GFRP 筋-混凝土界面的粘结性能进行了研究，并提出了适用于表征高温下界面粘结-滑移行为的双折线模型。

综上所述，现有研究侧重于高温下具有较低 T_g(T_g<200℃)FRP 筋材轴拉性能及 FRP 筋-混凝土界面粘结性能，鲜见关于高温下 CFRP 筋(T_g>200℃)及其粘结型锚固系统力学性能研究的报道。为此，本文将在方志等[21]的研究(侧重于研究高温后 CFRP 筋及其粘结型锚固系统的残余力学性能，是开展火灾后相应评估工作的依据)的基础上，对高温下一种抗火性能优良的 CFRP 筋(T_g>200℃)及其粘结型锚固系统的静力性能进行

试验研究，以揭示处理温度对高温下 CFRP 筋轴拉性能及其锚固性能的影响规律，提出适于表征高温下 CFRP 筋轴拉性能及其锚固性能的实用计算公式，为评估 CFRP 筋及其锚固系统的抗火性能提供依据。本文与前期研究的成果将共同为高性能 CFRP 筋材的工程应用提供理论基础。

1 试验概况

1.1 试件设计

参照《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)[22] 设计 CFRP 筋轴拉试件，以筋材处理温度 T(分别为 25℃、100℃、210℃ 和 300℃) 为试验参数，设计 4 组试件，每组 3 个试件，共计 12 个试件。

CFRP 筋轴拉试件由长为 680 mm 的自由段及其两端长为 360 mm 的粘结型锚固系统组成，总长共计 1 400 mm，如图 1 所示。其中，锚固 CFRP 筋的粘结型锚固系统通过在外径为 42 mm、内径为 36 mm 的钢套筒内灌注 RPC 形成，筋材周围 RPC 保护层厚度为 12 mm。

选取试验锚的处理温度 T (分别为 25℃、100℃、210℃、300℃) 为锚固性能试验的参数，设计 4 组试件，每组 2 个试件，共计 8 个试件。锚固性能试件的粘结长度 l 均设置为 5d，其中 d 为 CFRP 筋的公称直径，d=12 mm。

CFRP 筋-RPC 锚固性能试件由 CFRP 筋材自由段及其位于左右两侧的工具锚与试验锚组成，如图 2 所示。以 CFRP 筋轴拉试件的粘结型锚固系统作为锚固性能试件的工具锚。为便于测定 CFRP 筋-RPC 界面粘结-滑移性能，锚固性能试件右侧的试验锚通过在外径为 76 mm、内径为 72 mm 的钢套筒内灌注 RPC 形成。试验锚长度设置为 420 mm，以与高温炉炉腔长度 380 mm 相匹配。为获取试验预设的粘结长度 l=5d，试验锚加载端与自由端的 CFRP 筋外侧均预埋长度为 180 mm 的耐高温陶瓷套管。利用耐高温胶密封陶瓷套管与 CFRP 筋间的孔隙，以防止灌注粘结介质时 RPC 进入陶瓷套管内。此外，利用耐高温胶带将 K 型热电偶的较少部分金属探头固定于 CFRP 筋-RPC 界面，以实时监测试验过程中粘结界面的温度。

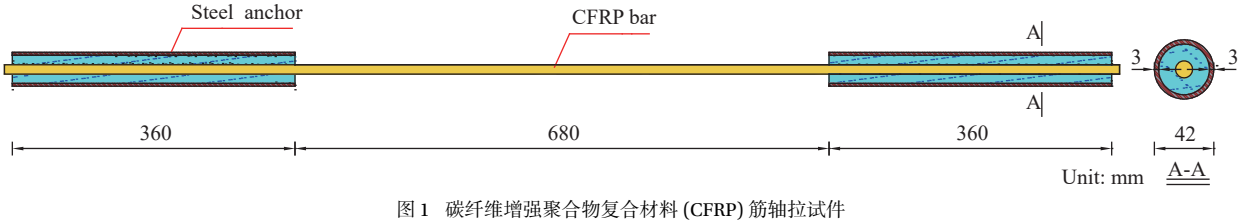


图 1 碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP) 筋轴拉试件

Fig. 1 Axial tensile specimen of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar

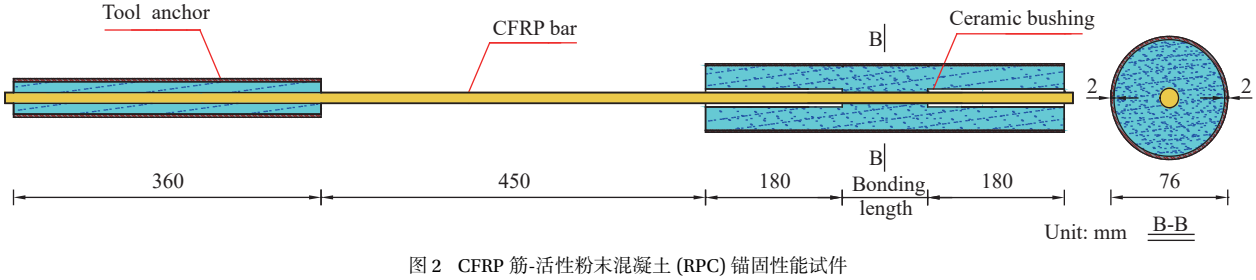


图 2 CFRP 筋-活性粉末混凝土 (RPC) 锚固性能试件

Fig. 2 Anchorage performance specimen of CFRP bar-reactive powder concrete (RPC)

利用设置在锚筒两端的聚乙烯封盖中心处圆孔精确定位轴拉试件或锚固系统性能试件的 CFRP 筋。浇筑钢锚筒的粘结介质 RPC 形成粘结型锚固系统，将其静置 24 h 后再采用 90℃ 蒸汽养护 48 h。

1.2 试验材料

轴拉与锚固性能试验所用的 CFRP 筋材均由江苏连云港中复碳芯电缆科技有限公司提供，其外观尺寸及 T_g 如图 3 和表 1 所示。CFRP 筋由体积含量为 66.3vol% 的 T700SC 连续碳纤维丝束与 TP224 环氧树脂拉挤而成。

CFRP 筋粘结型锚固系统的粘结介质-RPC 由不含钢纤维的商品预混料加水拌制而成，其设计强度等级为 RPC150。边长 100 mm 的立方体实测

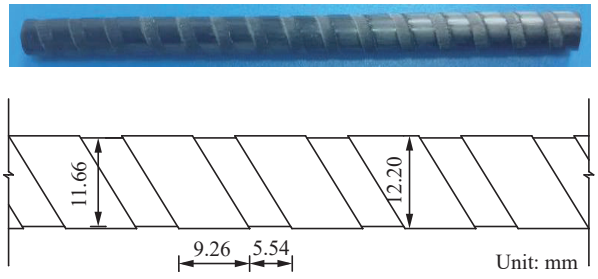


图 3　CFRP 筋及其外观尺寸

Fig. 3　CFRP bar and its external dimensions

抗压强度为 158 MPa，RPC 配合比 (单方质量比) 如表 2 所示。

表 1　CFRP 筋外观尺寸及玻璃化转变温度 T_g

Table 1　Dimensions and glass transition temperature T_g of CFRP bar

Nominal diameter/mm	Rib width/mm	Rib height/mm	Embossing space/mm	T_g/℃
12	9.26	0.27	14.8	210

表 2　RPC 配合比及抗压强度

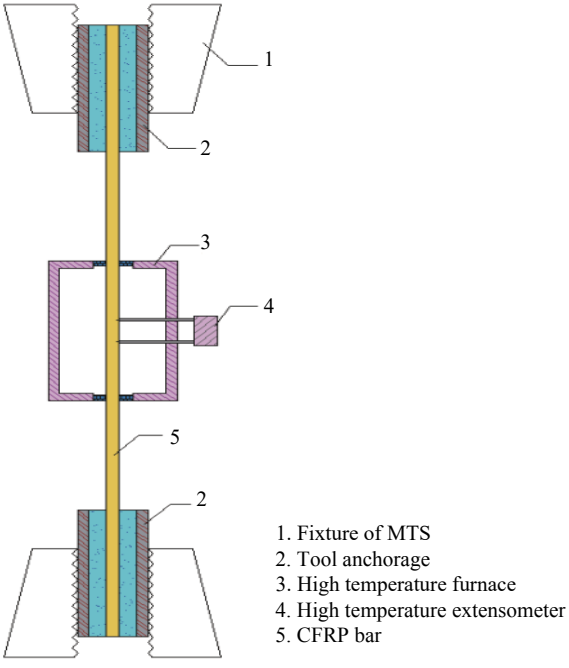
Table 2　Mix proportion and compressive strength of RPC

Strength grade	Cement	Silica fume	Quartz flour	Quartz sand	Water reducer	Water binder ratio
RPC150	1	0.25	0.25	1.1	0.02	0.16

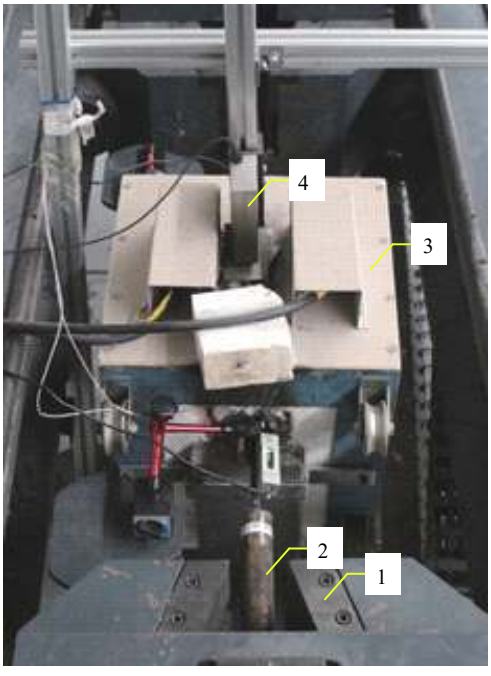
1.3　温升加载方式与测点布置

轴拉与锚固性能试验的温升加载及测量装置分别如图 4、图 5 所示。试验中采用的温升加载方式参考金属材料高温拉伸试验方法 (GB/T 4338—2006)[23]，如图 6 所示。将轴拉试件的筋材自由段或锚固性能试件的试验锚放置于高温试验炉 (尺寸为 380 mm (长)×410 mm (宽)×650 mm (高)) 中，以 3℃/min 的温升速率温升至目标温度，恒温一定时间 (对于轴拉试件，通常恒温 20 min；对于锚固性能试件，恒温至 CFRP 筋-RPC 界面温度达到目标温度) 后再进行单调加载。高温炉由长沙科辉炉业科技有限公司提供，其升温区间和最大升温速率分别为 100~1 200℃ 和 100℃/min。利用设置在 CFRP 筋表面与 CFRP筋-RPC 界面的 K 型热电偶分别监测轴拉与锚固性能试件的实时温度。

当试件温度达到目标温度且稳定时，利用 600 kN 液压伺服试验机 (南京诺尔泰设备制造有限公司) 以 1 mm/min 的位移加载速率对试件施加



(a) Schematic diagram

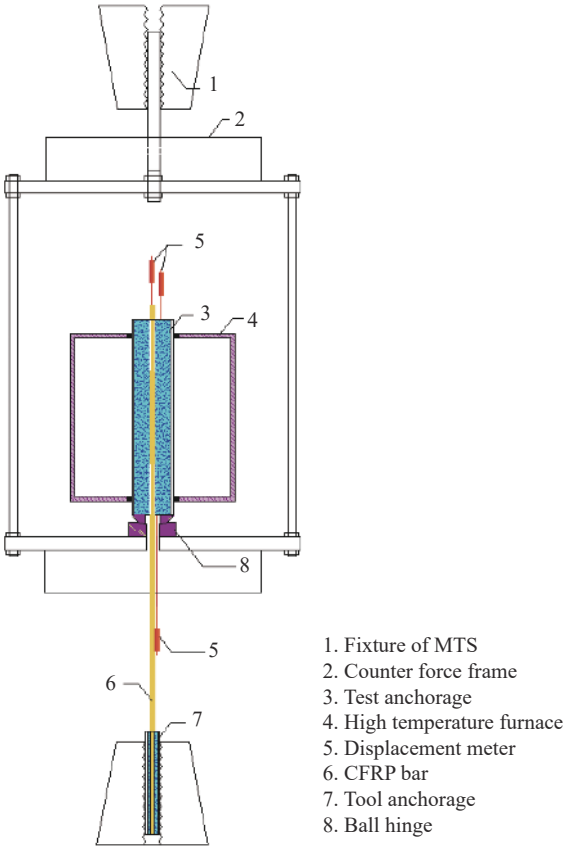


(b) Real setups

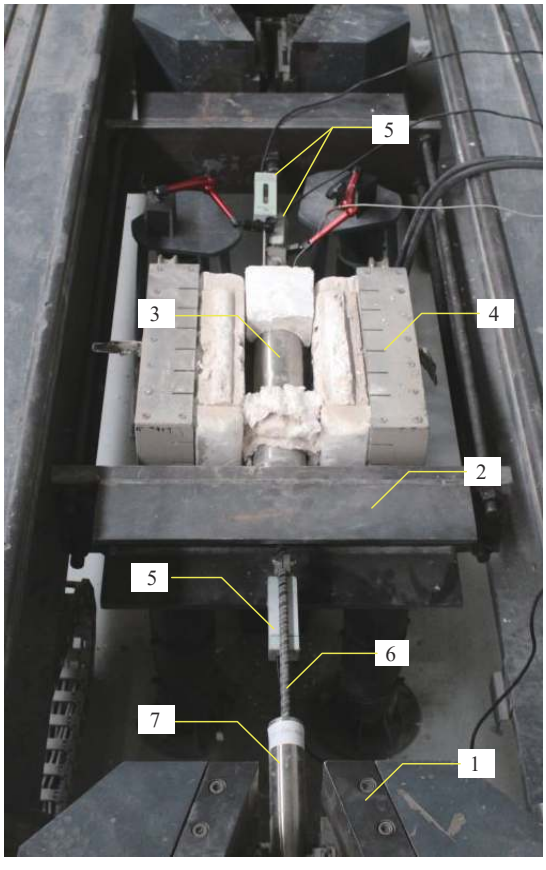
MTS—Mechanical testing and simulation

图 4　轴拉试验的温升及加载装置

Fig. 4　Setups of elevated temperature and loading of axial tensile test



(a) Schematic diagram

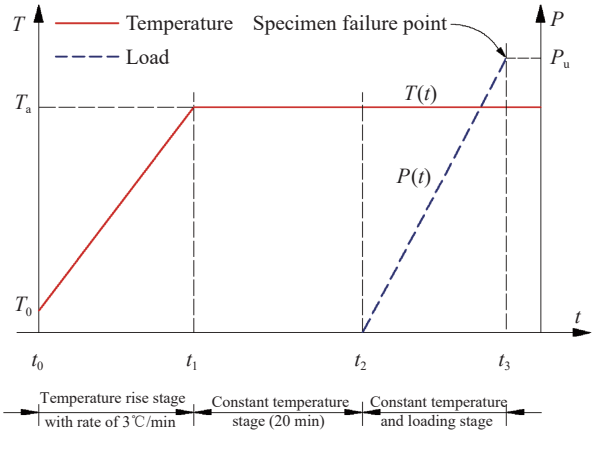


(b) Real setups

图 5　锚固性能试验的温升及加载装置

Fig. 5　Setups of elevated temperature and loading of anchorage performance test

轴向拉力或拉拔力。其中，锚固性能试件的拉拔力需借助固定于液压伺服试验机夹具上的工具锚，对放置在反力架上的试验锚进行施加，如图 5 所示。为使锚固性能试件始终处于铅直受力状态，



T_0—Room temperature; T_a—Target temperature; P_u—Ultimate load; T—Temperature; P—Load; t—Time; t_0—Test start time; t_1—Time to target temperature; t_2—Start load time; t_3—Time to failure

图 6　温升及加载过程

Fig. 6　Processes of elevated temperature and loading

在反力架与试验锚之间设置了可转动的开孔球铰。利用液压伺服试验机的力传感器采集试件拉拔力。采用与 CFRP 筋表面紧密接触的高温引伸计测量轴拉试件筋材自由段中部的应变。锚固性能试件加载端 CFRP 筋-RPC 界面滑移通过固定于 CFRP 筋上的位移传感器获取。

2　CFRP 筋轴拉试验结果及分析

2.1　CFRP 筋轴拉试件的破坏形态

高温下各 CFRP 筋轴拉试件的典型破坏形态均为拉断破坏，破断位置均分布于筋材自由段区域内；随着处理温度逐渐升高，拉断破坏形态由筋材断口破坏与少量丝束分离的片状形态转变为纤维丝“蓬松”的形态，如图 7 所示。

常温下，试件的轴拉应力超过 80% 极限抗拉强度后，少量纤维丝破断而发出细小声响；当轴拉应力达到极限抗拉强度时，试件会突然破坏而形成位于自由段中部的断口，并伴随有轻微的炸裂现象。但文中常温试件炸裂程度较轻，且筋材自由段左侧区域因炸裂形成的碳纤维细条未能及

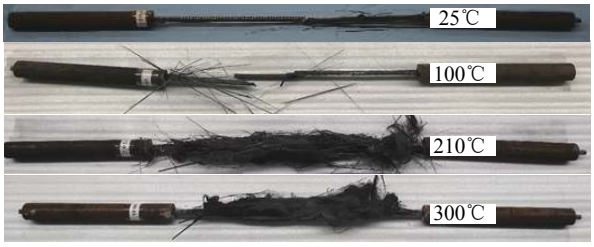


图 7　CFRP 筋轴拉试件的破坏形态

Fig. 7　Typical failure modes of CFRP bar axial tensile specimens

时收集而丢失，导致图 7 中所示常温试件的破坏形态与典型的纤维束爆裂形态 (纤维束炸开的扫帚状) 存在一定的差别。

对于处理温度为 100~210℃ 的轴拉试件，其轴拉应力接近极限抗拉强度时因少量纤维丝破断而发出细小声响。由于树脂性能退化较轻微，少量破断的纤维丝呈丝束分离的片状形态。筋材轴拉应力达到极限抗拉强度后突然发生伴有清脆响声的破断，其断口位置靠近筋材自由段中间区域。

对于处理温度不低于 T_g=210℃ 的轴拉试件，其自由段中部树脂因高温作用而逐渐软化、甚至部分分解 (厂家提供的树脂基体 5wt% 质量损失相应温度为 318℃)，导致树脂-纤维界面粘结性能快速衰减、部分纤维丝间无树脂而裸露。筋材轴拉应力达到极限抗拉强度后，其自由段中部裸露的纤维丝发生破断而呈现“蓬松”的状态。

2.2　CFRP 筋轴拉试验结果

各轴拉试件的主要试验结果、应力-应变曲线如表 3 与图 8 所示。可见，高温下轴拉试件破断前的应力-应变基本呈线性关系。利用应力-应变曲线中 0.2~0.5 倍极限抗拉强度范围内的割线模量确定筋材轴向试件的弹性模量[24]。高温下 CFRP 筋轴拉性能的衰减规律如图 9 所示。

表 3　CFRP 筋轴向拉伸试验结果

Table 3　Results of axial tensile test for CFRP bar

Specimen	P_u/kN	f_u/MPa	$\overline{f}_u$/MPa	E/GPa	$\overline{E}$/GPa	$\varepsilon_u/10^{-6}$	$\overline{\varepsilon}_u/10^{-6}$
AT-T25-1	280.8	2 631		162.2		15 627	
AT-T25-2	283.1	2 653	2 650	161.8	159.9	15 464	15 513
AT-T25-3	284.5	2 666		155.6		15 448	
AT-T100-1	274.2	2 569		133.0		18 506	
AT-T100-2	278.0	2 605	2 588	143.5	141.6	18 343	18 387
AT-T100-3	276.3	2 589		148.3		18 312	
AT-T210-1	198.9	1 864		98.7		18 298	
AT-T210-2	192.7	1 806	1 861	105.5	102.9	18 254	18 201
AT-T210-3	204.3	1 914		104.4		18 051	
AT-T300-1	176.0	1 649		82.6		17 963	
AT-T300-2	157.0	1 471	1 566	92.4	87.9	17 762	17 816
AT-T300-3	168.3	1 577		88.8		17 723	

Notes: In the specimen code, AT is axial tensile, T indicates the treatment temperature, the last number indicates the same specimen number; P_u—Ultimate bearing capacity; f_u—Tensile strength; $\overline{f}_u$—Average value; E—Elastic modulus; $\overline{E}$—Average value; ε_u—Ultimate tensile strain; $\overline{\varepsilon}_u$—Average value.

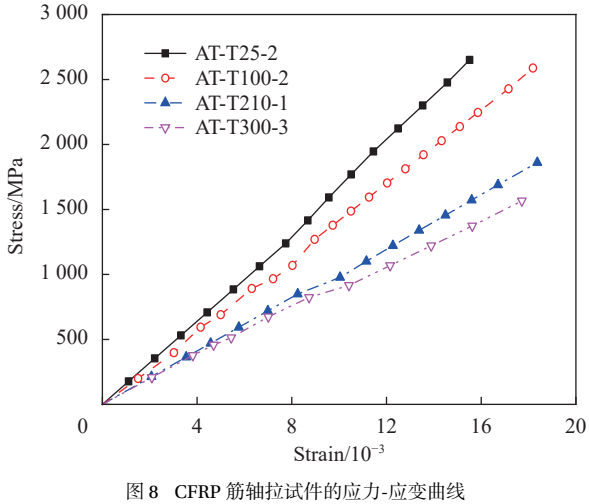
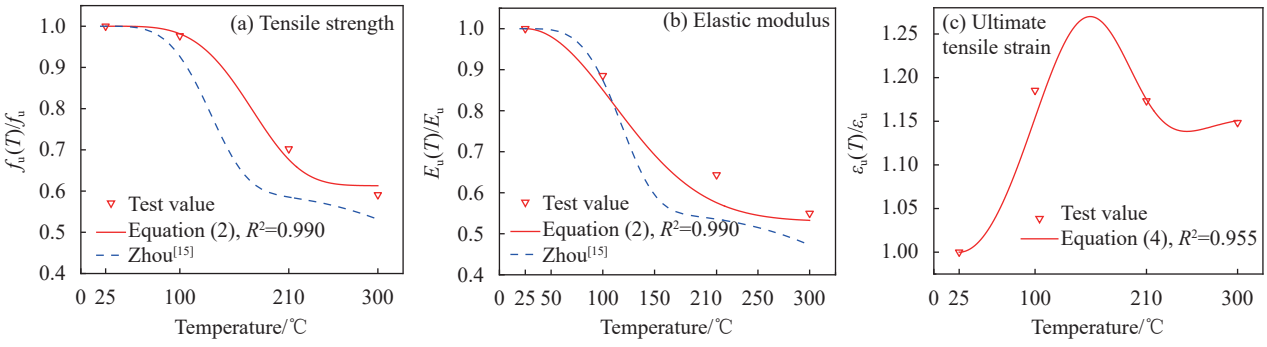


图 8　CFRP 筋轴拉试件的应力-应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curves of CFRP bar axial tensile specimen

相较于常温试件，100℃ 下轴拉试件的抗拉强度、弹性模量分别减小了 2.3%、11.4%，而极限拉应变增大了 18.5%；210℃ 和 300℃ 下轴拉试件的抗拉强度、弹性模量分别减小了 (29.8%、40.9%) 和 (35.6%、45%)，而极限拉应变分别增大了 17.3% 和 14.8%。可见，高温下筋材弹性模量较抗拉强度受处理温度的影响更为显著，两者的衰减幅度在处理温度由 100℃ 增至 210℃ 时达到最大。高温下筋材的极限拉应变较常温下有所增大，并随处理温度升高而呈先增大后减小的变化趋势。究其原因，处理温度为 T_g 时，筋材自由段区域的树脂逐渐软化，导致筋材整体性退化明显，各纤维间的受力更趋不均，使筋材抗拉强度与弹性模量退化



$f_u(T)/f_u$—Reduction coefficient of tensile strength under high-temperature; $E_u(T)/E_u$—Reduction coefficient of elastic modulus under high-temperature; $\varepsilon_u(T)/\varepsilon_u$—Reduction coefficient of ultimate tensile strain under high-temperature

图 9　高温下 CFRP 筋轴拉性能衰减规律

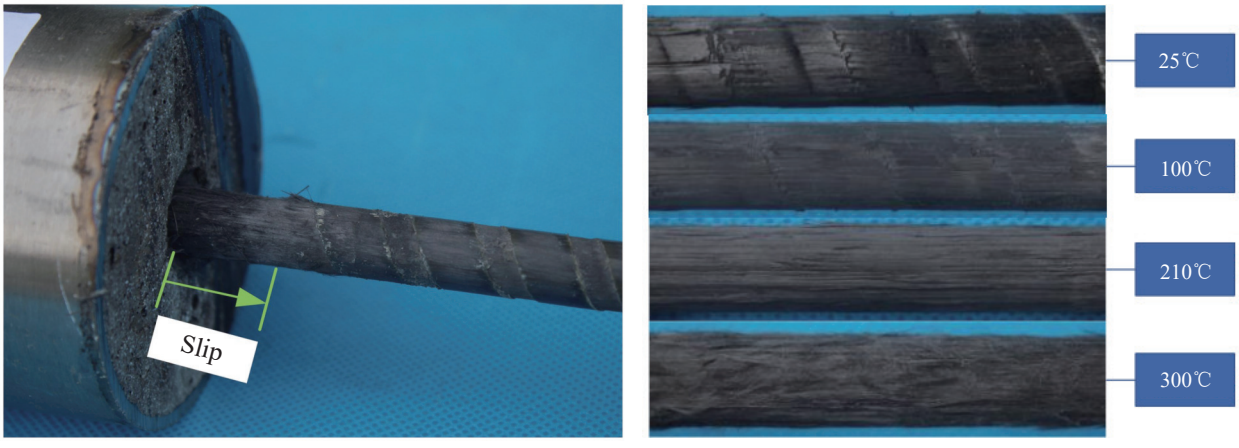
Fig. 9　Decay law of axial tensile performance of CFRP bar exposed to elevated temperature

显著。此外，高温下筋材的弹性模量(或轴拉刚度)较抗拉强度更依赖于树脂基体的力学性能。高温下树脂基体的力学性能因其较差的耐高温性能而快速衰减，其退化幅度远大于碳纤维，进而导致高温下筋材弹性模量的衰减幅度较抗拉强度更大、极限拉应变较常温下有所增加。

3　CFRP 筋-RPC 锚固性能试验结果及分析

3.1　CFRP 筋-RPC 锚固性能试件的破坏形态

图 10 为 CFRP 筋-RPC 锚固性能试件破坏形态。将锚固性能试件破坏后的试验锚加载端含陶瓷套管区域切除，以便观察 CFRP 筋-RPC 界面的破坏形态，如图 10(a) 所示。高温下锚固性能试件的破坏形态均为滑移破坏，具体表现为筋材表面压纹肋发生剪切破坏，其核心部分从锚固区被拔出，筋材肋间 RPC 未被拔出。随着处理温度升高，筋材压纹肋及肋间表面树脂逐渐软化、甚至部分分解，而高温下 RPC 的剩余剪切性能远高于树脂；导致压纹肋更易发生剪切破坏、从锚固区拔出的筋材核心部分表面压纹肋残留的痕迹越发模糊，无树脂包裹而裸露的部分纤维丝因与肋间 RPC 发生摩擦而破坏，如图 10(b) 所示。因此，高温下 CFRP 筋-RPC 界面粘结性能主要取决于树脂的剩余剪切性能。



(a) Slip of CFRP bar-RPC interface　　(b) Failure morphologies in surface of CFRP bar

图 10　CFRP 筋-RPC 锚固性能试件破坏形态

Fig. 10　Typical failure modes of CFRP bar-RPC anchorage performance specimens

3.2　CFRP 筋-RPC 锚固性能试件的粘结-滑移曲线

各锚固性能试件的试验结果、高温下的粘结-滑移曲线分别如表 4 和图 11 所示。可见，各锚固性能试件的粘结-滑移曲线均可分为以下四个阶段：

(1) 线性段。粘结-滑移基本呈线性关系，加载端的粘结界面滑移较小，均在 0~1 mm 之间。粘结界面的切应力主要由筋材与 RPC 间化学胶着力抵抗。粘结界面的化学胶着力随处理温度升高而逐

表 4　CFRP 筋-RPC 锚固性能试验结果

Table 4　Results of CFRP bar-RPC anchorage performance test

Specimen	T/℃	P_u/kN	$\bar{P}_u$/kN	τ_u/MPa	s/mm	$\bar{s}_u$/mm
A-T25-L5d-1	25	66.74	66.38	29.36	6.74	6.67
A-T25-L5d-2		66.02			6.60	
A-T100-L5d-1	100	50.58	52.84	23.37	6.44	6.53
A-T100-L5d-2		55.10			6.62	
A-T210-L5d-1	210	34.30	31.47	13.92	5.88	6.01
A-T210-L5d-2		28.64			6.14	
A-T300-L5d-1	300	11.85	9.85	4.36	5.69	5.63
A-T300-L5d-2		7.85			5.57	

Notes: In the specimen code, A is anchorage, T indicates the treatment temperature, the last number indicates the same specimen number; T—Treatment temperature; L—Bond length; τ_u—Average bond strength; s—Slip of loading end corresponding to P_u; d—Diameter of CFRP bar; $\bar{P}_u$—Average value of ultimate bearing capacity for anchorage system; $\bar{s}_u$—Average value of the slip of loading end corresponding to P_u。

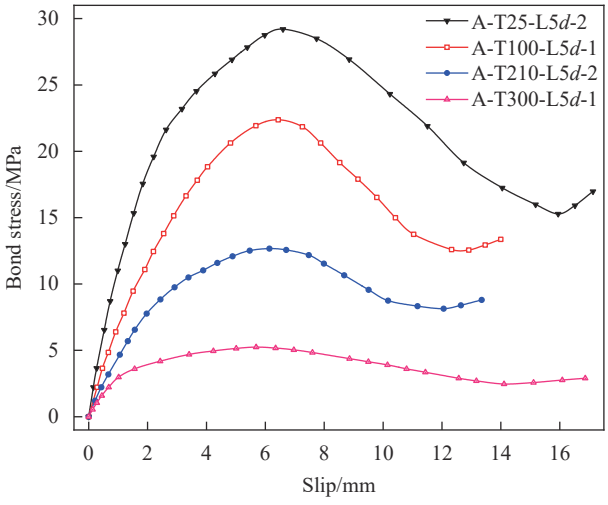


图 11　高温下 CFRP 筋-RPC 锚固性能试件的粘结-滑移曲线

Fig. 11　Bond-slip curves of CFRP bar-RPC anchorage performance specimens exposed to elevated temperature

渐减小，导致加载端的初期滑移逐渐增大；(2) 非线性上升段。粘结-滑移呈明显的非线性关系，筋材与粘结介质间化学胶着力丧失，粘结界面的切应力主要由筋材与 RPC 间摩擦力、筋材表面凸起的压纹肋及肋间 RPC 形成的机械咬合力共同抵抗。筋材表面的压纹肋树脂抗剪性能逐渐衰减，导致粘结强度逐渐降低；(3) 下降段。筋材表面的部分压纹肋发生剪切破坏，其与肋间 RPC 的机械咬合力丧失。抵抗粘结界面切应力的机械咬合力逐渐减小，导致 CFRP 筋-RPC 界面滑移继续增大；(4) 残余段。界面的切应力主要由未拔出的筋材核心部分与 RPC 界面间摩擦力抵抗。随着滑移增大，试验锚陶瓷管内的带肋筋材进入锚固区，其表面压纹肋与 RPC 间机械咬合力参与抵抗粘结界面切应力，进而导致残余段可承担的粘结界面切应力逐渐增加。

采用下式计算试件锚固区 CFRP 筋-RPC 界面的平均粘结强度 τ_u，并将计算结果示于表 4：

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d l} \tag{1}$$

式中：P_u 为极限荷载值；d 为筋材公称直径；l 为粘结长度。

3.3　温度对 CFRP 筋-RPC 锚固性能试件粘结强度的影响

锚固性能试件粘结强度随温度的变化规律如表 4 与图 12 所示。可见，试件粘结强度随处理温度升高而线性退化。相较于常温下的锚固性能试件，100℃、210℃ 和 300℃ 下试件粘结强度分别减小了 20.4%、52.6% 和 85.1%。究其原因为随着处理温度逐渐升至 210℃ 和 300℃，筋材表面的压

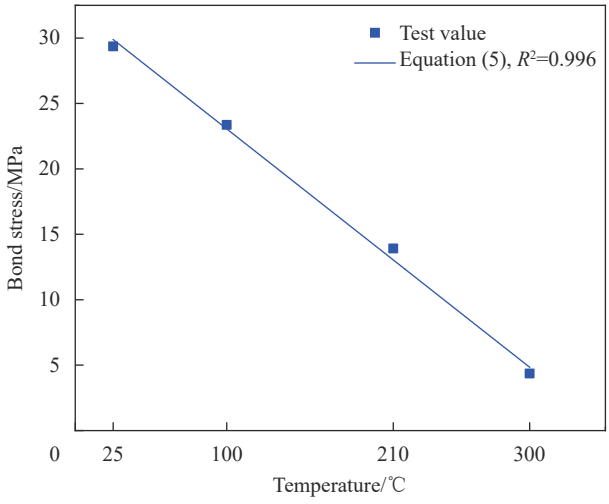


图 12　处理温度对 CFRP 筋-RPC 界面黏结强度的影响

Fig. 12　Effect of elevated temperature on bond strength of CFRP bar-RPC interface

纹肋树脂逐渐软化、甚至部分分解，导致用于抵抗粘结界面切应力的主要抗力—筋材压纹肋与肋间 RPC 的机械咬合力大幅退化。

4　公式建立

4.1　高温下 CFRP 筋轴拉性能

对本文高温下轴拉试验结果进行回归分析，构建适于表征高温下 (25℃≤T≤300℃) CFRP 筋轴拉性能退化规律的计算模型，如以下两式及图 9(a)、图 9(b) 所示：

$$\frac{f_u(T)}{f_u}=0.387\exp\left[-3\left(\frac{T-T_0}{T_g}\right)^4\right]+0.613 \tag{2}$$

$$\frac{E_u(T)}{E_u}=0.47\exp\left[-3\left(\frac{T-T_0}{T_g}\right)^2\right]+0.53 \tag{3}$$

将式 (2) 除以式 (3)，可得高温下 CFRP 筋极限拉应变退化规律的计算公式为

$$\frac{\varepsilon_u(T)}{\varepsilon_u}=\frac{0.387\exp\left[-3\left(\frac{T-T_0}{T_g}\right)^4\right]+0.613}{0.47\exp\left[-3\left(\frac{T-T_0}{T_g}\right)^2\right]+0.53} \tag{4}$$

式中：$f_u(T)$、$E_u(T)$、$\varepsilon_u(T)$ 分别为高温下 CFRP 筋的抗拉强度、弹性模量及极限拉应变；f_u、E_u、ε_u 为常温下 CFRP 筋的抗拉强度、弹性模量及极限拉应变；T_0 为常温 25℃；25℃≤T≤300℃。

利用式 (4) 计算本文各轴拉试件的极限拉应变，并将其与试验值进行对比分析，结果如表 5 与图 9(c) 所示。试验值/计算值的平均值及变异系数分别为 1.010 与 0.01，表明式 (4) 可较准确地表征高温下 (25℃≤T≤300℃) CFRP 筋极限拉应变的退化规律，亦表明式 (2)、式 (3) 均具有较高计算精度。

为明确 T_g 对高温下 CFRP 筋轴拉性能的影响规律，将本文 CFRP 筋 (T_g=210℃) 轴拉性能退化规律与文献 [15] 中 CFRP 筋 (T_g=126℃) 相应结果进行对比分析，如图 9(a)、图 9(b) 及图 13 所示。可见本文 CFRP 筋极限抗拉强度和弹性模量随温度的衰减规律与文献 [15] 试验结果基本相似；相较于文献 [15] 选用的 CFRP 筋 (T_g=126℃)，本文筋材 (T_g=210℃) 的高温轴拉性能更优，300℃ 下本文筋材的轴拉性能较常温试件仅退化 46%~50%，如图 9(a) 与图 9(b) 所示；但本文筋材轴拉性能受 $(T-T_0)/T_g$ 的影响更显著，如图 13 所示。

表 5　CFRP 筋轴拉试件极限拉应变试验值与计算值对比

Table 5　Comparison of measured and predicted ultimate tensile strain of CFRP bar axial tensile specimens

Specimen	$\varepsilon_{u,t}/10^{-6}$	$\varepsilon_{u,c}/10^{-6}$	$\varepsilon_{u,t}/\varepsilon_{u,c}$
AT-T25	15 513	15 513	1.000
AT-T100	18 387	17 902	1.030
AT-T210	18 201	18 227	0.999
AT-T300	17 816	17 852	0.998
Average			1.010
Variation coefficient			0.01

Note: $\varepsilon_{u,t}$, $\varepsilon_{u,c}$—Experimental and calculated values of ultimate tensile strain of axial tensile specimen respectively.

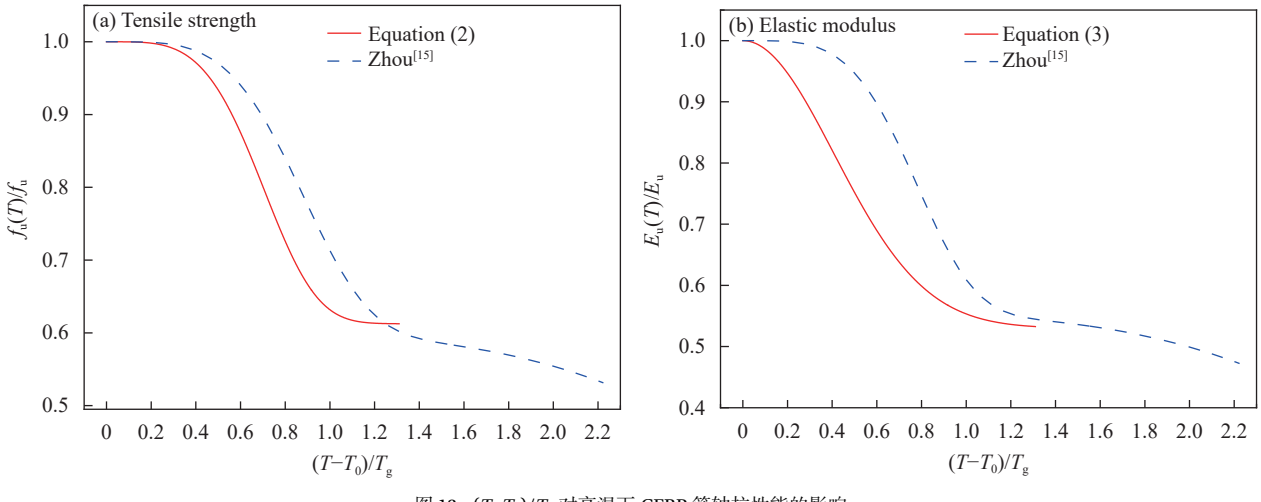


图 13　$(T-T_0)/T_g$ 对高温下 CFRP 筋轴拉性能的影响

Fig. 13　Effect of $(T-T_0)/T_g$ on axial tensile performance of CFRP bar exposed to elevated temperature

4.2　高温下 CFRP 筋-RPC 锚固性能试件界面粘结强度

基于 ACI 440.1R-15[24] 中 FRP 筋-普通混凝土界面粘结强度的理论模型，对表 4 中的实测数据进行回归分析，构建适于表征高温下 CFRP 筋-RPC 界面粘结强度退化规律的计算公式，如下式所示：

$$\frac{\tau_u(T)}{\sqrt{f_{cu}}}=\left[1-\frac{0.64(T-T_0)}{T_g}\right]\left(2+1.89\frac{d}{l}\right) \tag{5}$$

式中：f_{cu} 为 RPC 的立方体抗压强度；T_0 为室温，25℃；25℃≤T≤300℃。

利用式 (5) 预测各试件的平均粘结强度，结果如表 6 所示，实测值/预测值的平均值及变异系数分别为 0.99 与 0.06，表明式 (5) 可较准确地表征高温下 (25℃≤T≤300℃) CFRP 筋-RPC 界面粘结强度的退化规律。

表 6　CFRP 筋-RPC 界面粘结强度试验值与计算值对比

Table 6　Comparison between measured and predicted bond strength of CFRP bar-RPC interface

Specimen	f_{cu}/MPa	$\tau_{u,t}$/MPa	$\tau_{u,c}$/MPa	$\tau_{u,t}/\tau_{u,c}$
A-T25-L5d	158	29.36	29.89	0.98
A-T100-L5d	158	23.37	23.06	1.01
A-T210-L5d	158	13.92	13.04	1.07
A-T300-L5d	158	4.36	4.84	0.90
Average				0.99
Variation coefficient				0.06

Notes: f_{cu}—Cube compressive strength of RPC; $\tau_{u,t}$, $\tau_{u,c}$—Experimental and calculated values of interfacial bond strength between CFRP bars and RPC, respectively.

4.3　高温下 CFRP 筋-RPC 锚固性能试件临界锚固长度

将温升处理下 CFRP 筋的拉断破坏与高温下锚固区滑移破坏同时发生时所对应的筋材锚固长度定义为高温下筋材的临界锚固长度 $l_{cr}(T)$，则由临界破坏时的平衡条件可知：

$$\tau_u(T)\pi d l_{cr}(T)=f_u(T)(\pi d^2/4) \tag{6}$$

将式 (5) 代入式 (6)，可得高温下 CFRP 筋的临界锚固长度 (25℃≤T≤300℃) 为

$$l_{cr}(T)=\frac{f_u(T)d}{8\sqrt{f_{cu}}\left(1-\dfrac{0.64(T-T_0)}{T_g}\right)}-0.945d \tag{7}$$

利用式 (7) 计算本文中各试件的临界锚固长度，并将其与试件实际锚固长度进行比较，以预测试件发生的破坏形态，结果如表 7 所示。可见，基于式 (7) 预测的破坏形态与实际情况吻合。

表 7　CFRP 筋-RPC 锚固性能试件临界锚固长度计算值及预测的破坏形态

Table 7　Critical anchorage length determined by formula and predicted failure mode of CFRP bar-RPC anchorage performance test

Specimen	T/℃	Anchorage length/mm	Actual failure mode	Critical anchorage length/mm	Predicted failure mode
A-T25-L5d	25	60	Slip	304.9	Slip
A-T100-L5d	100			389.0	
A-T210-L5d	210			497.8	
A-T300-L5d	300			1 142.9	

5　结 论

(1) 相较于常温试件，100℃、210℃ 和 300℃ 下轴拉试件的抗拉强度、弹性模量分别下降了 (2.3%、11.4%)、(29.8%、40.9%) 和 (35.6%、45%)；而极限拉应变分别增大了 18.5%、17.3% 和 14.8%。高温下筋材的弹性模量较抗拉强度受处理温度的影响更为显著；筋材的极限拉应变随处理温度升高而先增大后减小。

(2) 锚固性能试件碳纤维增强聚合物复合材料 (CFRP) 筋-活性粉末混凝土 (RPC) 界面的粘结强度随处理温度升高而线性退化。100℃、210℃ 和 300℃ 下 CFRP 筋-RPC 界面的粘结强度较常温试件分别下降 20.4%、52.6% 与 85.1%。

(3) 构建了适于表征高温下 CFRP 筋及其粘结型锚固系统力学性能退化规律的实用计算公式，均具有较高计算精度。

(4) 高温下文中所用筋材轴拉性能较玻璃化转变温度 T_g<200℃ 的 CFRP 筋更优良，但本文筋材轴拉性能受 $(T-T_0)/T_g$ (T 为处理温度，T_0 为室温) 的影响更显著。

(5) 文中针对 CFRP 筋及其锚固系统高温力学性能的研究均未考虑筋材初应力的影响，与预应力结构中 CFRP 筋的实际受力情形存在一定偏差。但本文研究可视为后续含初应力的 CFRP 预应力筋及其锚固系统高温力学性能研究的基础，有必要先行开展。

参考文献：

[1]　滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12)：1-11.
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 1-11(in Chinese).

[2]　叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3)：24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36(in Chinese).

[3]　郝庆多, 王勃, 欧进萍. 纤维增强塑料筋在土木工程中的应用[J]. 混凝土, 2006(9)：38-40, 44.
HAO Qingduo, WANG Bo, OU Jinping. Fiber reinforced

polymer rebar's application to civil engineering[J]. Concrete，2006(9)：38-40, 44(in Chinese).

[4] 梅葵花, 吕志涛, 张继文. CFRP筋黏结型锚具试验研究及实桥应用分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1)：53-60.
MEI Kuihua, LV Zhitao, ZHANG Jiwen. Experimental study and practical application of bond-type anchorages for CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport，2016，29(1)：53-60(in Chinese).

[5] 宋进辉. 大吨位FRP拉索整体锚固体系优化设计及性能评价[D]. 南京: 东南大学, 2017.
SONG Jinhui. Optimal design and performance evaluation of integral anchoring system with large tonnage FRP cable[D]. Nanjing: Southeast University, 2017(in Chinese).

[6] 方志, 王常林, 张洪侨, 等. 碳纤维绞线在活性粉末混凝土中锚固性能的试验研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6)：198-206.
FANG Zhi, WANG Changlin, ZHANG Hongqiao, et al. Experimental study on anchoring performance of CFRP strand in reactive powder concrete[J]. China Journal of Highway and Transport，2016，29(6)：198-206(in Chinese).

[7] WANG L C, ZHANG J Y, XU J, et al. Anchorage systems of CFRP cables in cable structures-A review[J]. Construction and Building Materials，2018，160：82-99.

[8] ZHANG K Y, FANG Z, NANNI A, et al. Experimental study of a large-scale ground anchor system with FRP tendon and RPC grout medium[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(4): 04014073.

[9] 李国强, 吴波, 蒋首超. 工程结构抗火研究进展与建议[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(5)：13-18.
LI Guoqiang, WU Bo, JIANG Shouchao. State of the art and suggestions of research on fire resistance of structures[J]. Progress in Steel Building Structures，2010，12(5)：13-18(in Chinese).

[10] ZHANG Y, FANG Z, JIANG R N, et al. Static performance of a long-span concrete cable-stayed bridge subjected to multiple-cable loss during construction[J]. Journal of Bridge Engineering，2020，25(3)：04020002.

[11] 张帅, 张隐, 潘明珠. 阻燃预警智能涂层的研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 1-12.
ZHANG Shuai, ZHANG Yin, PAN Mingzhu. Research progress of intelligent flame retardant coating with fire-warning capabilities[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 1-12(in Chinese).

[12] 姚秀鹏, 韩阳, 沈雷, 等. 高温后聚丙烯纤维增强水泥基复合材料导热的多尺度方法[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3531-3542.
YAO Xiupeng, HAN Yang, SHEN Lei, et al. Multi-scale method for thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced cementitious composites after high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3531-3542(in Chinese).

[13] WANG Y C, WANG P M H, KODUR V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures[J]. Composite Structures，2007，80(1)：131-140.

[14] 杨桢楠. CFRP筋混凝土受弯构件的抗火性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
YANG Zhennan. Study on fire resistance behavior of reinforced concrete flexural members with CFRP bars[D]. Nanjing: Southeast University, 2017(in Chinese).

[15] 周飞. 火场温度作用下CFRP筋混凝土受弯构件的结构性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHOU Fei. Study on structural behavior of concrete flexural members with CFRP tendons under fire action[D]. Nanjing: Southeast University, 2019(in Chinese).

[16] 吕西林, 周长东, 金叶. 火灾高温下GFRP筋和混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5)：32-39.
LV Xilin, ZHOU Changdong, JIN Ye. Test study on bond behavior between GFRP bar and concrete in high temperature[J]. Journal of Building Structures，2007，28(5)：32-39(in Chinese).

[17] KATZ A, BERMAN N, BANK L C. Effect of high temperature on bond of FRP rebars[J]. Journal of Composites for Construction，1999，3(2)：73-81.

[18] KATZ A, BERMAN N. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete[J]. Cement Concrete Composites，2000，22：433-443.

[19] 王晓璐, 查晓雄, 张旭琛. 高温下FRP筋和混凝土的黏结性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6)：8-15.
WANG Xiaolu, ZHA Xiaoxiong, ZHANG Xuchen. Bond behavior of FRP rebar and concrete at elevated temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2013，45(6)：8-15(in Chinese).

[20] 鞠竹, 王振清, 李晓霁, 等. 高温下GFRP筋和混凝土黏结性能的实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11)：1351-1357.
JU Zhu, WANG Zhenqing, LI Xiaoji, et al. The experimental investigation of bond behavior between GFRP bar and concrete in high temperature[J]. Journal of Harbin Engineering University，2012，33(11)：1351-1357(in Chinese).

[21] 方志, 方川, 蒋正文, 等. 高温后CFRP筋及其锚固系统力学性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12)：4031-4041.
FANG Zhi, FANG Chuan, JIANG Zhengwen, et al. Mechanical properties of CFRP bar and bond-type anchorage system after elevated temperature exposure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(12)：4031-4041(in Chinese).

[22] 中国建筑材料联合会. 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法: GB/T 30022—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
China Building Materials Federation. Test method for basic mechanical properties of fiber reinforced composite reinforcement: GB/T 30022—2013[S]. Beijing: China Standards Press, 2013(in Chinese).

[23] 中国钢铁工业协会. 金属材料高温拉伸试验方法: GB/T 4338—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
China Iron and Steel Association. Metallic materials—Tensile testing at elevated temperature: GB/T 4338—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006(in Chinese).

[24] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R-15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.