

DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.071

温度对 CFRP 棒索环氧树脂粘结锚固系统 受力性能影响试验研究

杨 燕^{1,2}, 郑航宇³, 于 铎³, 许国文^{1,2}, 吴杭姿^{1,2}, 周华樟³

- (1. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122;
2. 上海碳纤维复合材料土木工程应用工程研究中心, 上海 200122);
3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090

摘 要: 纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 具有轻质高强、耐疲劳和耐腐蚀等优点, 在土木工程领域逐渐成为重要结构材料之一, 其中碳纤维复合材料 (CFRP) 棒索抗拉强度高, 在索结构中应用更具优势, 已被工程师应用于桥梁结构。CFRP 索基体以及粘结锚固系统所用的环氧树脂胶粘剂是温度敏感型材料。本文针对 CFRP 拉索环氧树脂粘结型锚固节点, 进行不同正常使用环境温度下锚固系统承载力试验, 系统地研究了在极端低温和高温环境下 CFRP 索锚固体系的受力机理。结果表明, 在极端温度工况下, 粘结型锚固节点的性能表现受显著影响, 特别在高温环境下, 锚固节点的承载性能明显下降, 而在低温工况下, 对锚固节点承载性能影响相对较弱。正常使用环境高温下锚固节点破坏形态为 CFRP 棒索与粘结胶体间的塑性破坏, 低温工况下破坏形态为 CFRP 棒索与粘结胶体界面的滑移和粘结胶体与钢锚筒的界面粘结滑移。本文给出实际工程中考虑高温温度效应的 CFRP 棒索锚固系统承载力折减系数, 为后续粘结型锚固节点的工程应用及维护提供重要依据。

关键词: 碳纤维复合材料拉索; 锚固节点; 温度效应; 锚固性能

中图分类号: TU351

文献标志码: A

文章编号: 1006-6578(2025)01-0071-09

Experimental study on the influence of temperature on mechanical properties of CFRP rod-cable epoxy resin bonded anchorage system

YANG Yan^{1,2}, ZHENG Hang-yu³, YU Duo³, XU Guo-wen^{1,2},
WU Hang-zi^{1,2}, ZHOU Hua-zhang³

- (1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200122, China;
2. Research Center of Shanghai Carbon Fiber Composite Application Technology in Civil Engineering,
Shanghai 200122, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Fiber Reinforced Polymer (FRP) composite materials, known for their lightweight, high strength, fatigue resistance, and corrosion resistance, are gradually becoming important structural materials in the field of civil engineering. Among these materials, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) rods possess high tensile strength, making them advantageous for application in cable structures and widely used by engineers in bridge structures. The epoxy resin adhesive used in the CFRP cable matrix and bonding anchoring system is temperature-sensitive. This paper focuses on the CFRP cable epoxy resin

收稿日期: 2023-12-14.

基金项目: 上海市住建委科研计划项目 (沪建科 2021-002-024); 中建股份科技研发计划 (CSCEC-2022-Z-8).

作者简介: 杨燕 (1986—), 女, 山西大同人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事于 FRP 复合材料研究. E-mail: yangyancscec@foxmail.com

通信联系人: 周华樟, 男, 博士, 副教授. E-mail: huazhang.zhou@hit.edu.cn

bonded anchoring nodes, conducting load-bearing tests on anchoring systems under different normal operating temperatures. A systematic study of the mechanical behavior of the CFRP cable anchoring system in extreme low and high-temperature environments was carried out. The results indicate that the performance of bonded anchoring nodes is significantly affected under extreme temperature conditions, particularly with a noticeable decrease in load-bearing capacity in high-temperature environments. In contrast, the impact on load-bearing performance is relatively weaker under low-temperature conditions. The failure mode of the anchoring nodes in high-temperature operating conditions is characterized by plastic deformation between CFRP rods and bonding agents, while in low-temperature conditions, the failure mode is manifested as slippage at the interface between CFRP rods and bonding agents, as well as between bonding agents and steel anchor sleeves. This paper provides a load reduction coefficient for the CFRP rod anchoring system considering high-temperature effects in practical engineering, offering crucial insights for the subsequent engineering application and maintenance of bonded anchoring nodes.

Key words: carbon fiber composite cable; anchor joint; temperature effect; anchorage performance

碳纤维增强聚合物复合材料(carbon fiber reinforced polymer composites, CFRP)是一种具备轻质高强^[1]、耐腐蚀、耐疲劳^[2]等优势特性的材料,已在建筑结构的新建、加固、修复、增强中广泛应用^[3].

目前 CFRP 索锚固体系主要包括夹片型、粘结型和复合型三种类型,其中粘结型锚固系统应用最为广泛.粘结型锚固体系能够通过棒索和粘结材料之间的应力来传递外力,无论是单根 CFRP 筋/索,还是多根 CFRP 拉索,粘结型锚固体系都能够获得良好的锚固效果^[4].例如 CFRP 索人行桥采用锚固系统为粘结型锚具,包括 24 根 Leadline 棒材和 CFCC 绞线^[5];瑞典的 Stork 桥是采用 CFRP 索的高速公路桥,其中 CFRP 索有 2 根,它们以 241 根 CFRP 筋的形式排列,拉索锚固系统采用内锥形锚具,使用了可调刚度的环氧树脂^[6];Neigles 桥的建成标志着 CFRP 索替代钢索使用,主缆锚固采用粘结型锚具,每根 CFRP 筋通过小型粘结型锚具独立锚固在同一个锚头上^[7];我国的江苏大学斜拉桥,每根拉索由多根 CFRP 筋组成,拉锚索固系统采用直筒内锥式粘结型锚具^[8],如图 1 所示.

环氧树脂是粘结锚固系统的主要粘结材料之一^[9],是一种温度敏感型材料. CFRP 索锚固体系一般多采用高温固化热固性环氧树脂胶体,玻璃化温度可达 130 °C 左右^[10].树脂与 CFRP 的化学键结合性能较高,固化速度快,但树脂基体蠕变较大、耐湿热与耐高温性能较差^[11].当选用树脂作为粘结材料时,其耐高温性能需被充分考虑.目前,针对 FRP 的耐高温性能研究多为防火性能研究,试验温度要远大于环氧树脂玻璃化转变温度,未考虑温度低于玻璃化转变温度时 FRP 及锚固系统受力性能影响^[10].在寒冷地区应用 FRP 应考虑树脂基体脆化的影响,现有的研



图 1 粘结型锚具桥梁实例

Fig. 1 Bridge examples applying bonded anchorage joints

究中,CFRP 索锚固体系位于低温环境中的承载性能研究尚缺.我国地域辽阔,我国地表极端温度区间为 $-52.3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +48.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,钢结构在太阳暴晒情况下最高温度可达 $62.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[13]~ $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14].

本文旨在考虑锚固节点在不同地域正常使用条件下所面临的高温和低温天气温度对锚固系统锚固性能的影响.通过对在不同温度工况下 CFRP 索锚固节点进行拉伸试验,重点分析不同温度下锚固节点破坏形态和承载性能规律.旨在确定设计过程中锚固节点承载力安全系数,以确保其在各种温度条件下的可靠性和稳定性.

1 试验概况

1.1 试验设计

试验采用直径为 8 mm、长为 1 350 mm 的碳纤维增强环氧树脂 CFRP 棒索,该 CFRP 棒索采用拉

挤工艺生产制备,纤维为 T700 级碳纤维束,经集束、拉挤、高温固化等工艺制作,表面光滑,该 CFRP 棒索拉伸强度、拉伸模量以及断裂伸长率,结果如表 1 所示;锚固系统粘结材料采用环氧树脂胶,来自南京曼卡特科技有限公司生产的名为 MT-500 胶,该产品标称强度报告如表 2 所示;锚固节点采用 20 号钢,钢管外径 35 mm,壁厚 8 mm,长度分别为 150 mm、300 mm,其弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.31,抗拉极限强度为 600 MPa;钢锚筒夹具长为 60 mm,如图 2 所示。

表 1 碳纤维丝及 CFRP 棒索性能

Table 1 Performance of carbon fiber filament and CFRP rod cable

	碳纤维丝	CFRP 棒索
拉伸强度/MPa	4 900	1 800~2 200
拉伸模量/GPa	230	130
伸长率/%	1.8	1.5~1.6

表 2 环氧树脂胶体强度

Table 2 Properties of epoxy colloid

抗压强度/ MPa	泊松比	粘结强度/ MPa	抗剪强度/ MPa
107.6	0.2	19.2	21.3

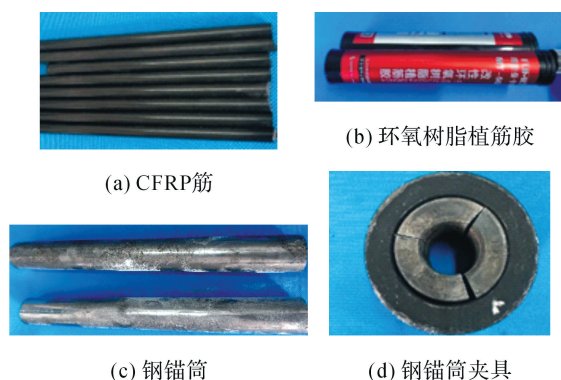


图 2 CFRP 棒索及锚固体系材料

Fig. 2 CFRP cable and anchorage system materials

1.2 试件制作

CFRP 棒索粘结型锚固性能试验,试件锚固段长度分别为 150 mm 和 300 mm,自由段长度为 900 mm,其中 150 mm 锚固端为加热端。试件制作方法如下:首先截取 CFRP 棒索,用 16 目砂纸对 CFRP 棒索锚固端表面进行磨砂处理,打磨长度分别为 150 mm 和 285 mm,深度约为 0.05~0.1 mm,打磨后使用丙酮清洗 CFRP 棒索锚固区段和钢锚筒内表面,静置晾干;将环氧树脂灌满钢锚筒中,然后将 CFRP

棒索插入钢锚筒中,小范围缓慢上下抽动,并保持旋转,固定棒索,使之居中;最后,将试件固定静置 24 h,再重复上述步骤完成另一侧锚固节点,完成两端锚固后,将试件放置于 25 °C 的环境中养护 72 h。按照不同的试验温度工况命名试件编号,例如“W-25-1”表示试验温度 25 °C 试件 1。

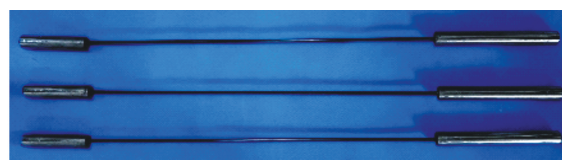


图 3 CFRP 索锚固试件

Fig. 3 Specimens of CFRP cable anchorage joints

1.3 试验加载与测量设备

参照 ASTM D7205/D7205M-21^[12],对粘结型锚固节点在高温和低温环境下进行承载力试验研究。试验过程中 CFRP 锚固体系承载力和位移分别采用金诺轮辐式压力传感器(量程为 0~50 t)和位移式传感器(量程为 0~120 mm 和 0~40 mm)测量,试验记录仪器为东华测试 DH3816N 静态应力应变测试分析系统。试验加载方式采用位移加载,控制在 5~6 min 内完成试验,加载过程中数据采集仪的采集频率设置为 1 Hz。

1.3.1 高温试验

试验加载装置采用穿心千斤顶及台座组合装置,在试件安装过程中应确保 CFRP 两侧锚固筒保持水平居中,以避免试验过程中试件受偏心力影响,如图 4。

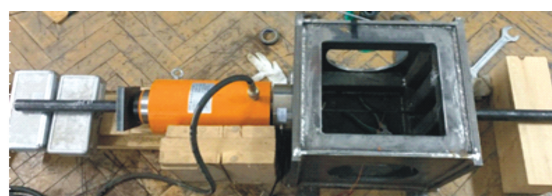
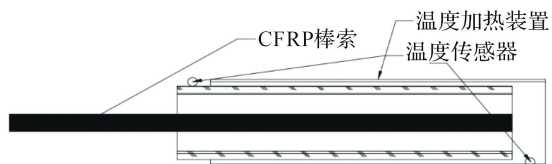


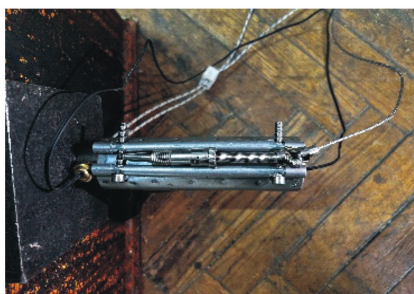
图 4 穿心千斤顶等组合装置

Fig. 4 Through-hole jack and other combined devices

将试件穿过并固定在试验台座、穿心千斤顶和力传感器上。将温度加热装置套在锚固长度为 150 mm 的钢锚筒上,在钢锚筒表面和温度加热装置侧边分别放置温度传感器实时监测锚固节点的温度。固定位移传感器并连接采集仪。温度控制端锚固节点示意如图 5 所示。完成准备工作后,开始加热锚固端。待温度传感器达到试验温度时,开始试验。



(a) 温度控制端锚固节点示意



(b) 温度控制端锚固节点实物

图5 温度控制端锚固节点

Fig. 5 Anchorage joint with temperature control equipment

1.3.2 低温试验

首先将试验台座、穿心千斤顶、CFRP 棒索试件等装置移置低温试验箱内,设置低温试验箱温度,温差控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$.放置 12 h 后,测量锚固端温度,开始进行张拉试验.

1.4 试验工况

锚固系统在高温下受力性能试验分为一个常温对照组和 4 个高温工况,分别为 25°C 、 45°C 、 60°C 、 75°C 和 90°C ,每组进行 5 次重复试验.锚固系统在低温下受力性能试验分为 3 个低温工况,分别为 -5°C 、 -10°C 、 -15°C ,每组进行 5 次重复试验.

2 试验结果与分析

2.1 高温环境下试验现象及破坏形态

在不同高温试验环境下的 CFRP 索锚固试件的破坏形态基本相同,均为受热锚固端发生粘结滑移破坏,如图 6 所示.从破坏图可见,随着试验温度升高,由 CFRP 棒索粘结滑移产生的白胶体层痕迹越发明显,CFRP 筋材与环氧树脂胶体界面发生明显破坏.

不同试验温度下部分试件的荷载-位移曲线如图 7 所示,由曲线前半段可见,在试验温度为 45°C 时,峰值承载达到最大;在曲线后半段可见,当试验温度为 25°C 时,发生持续粘结滑移时承受荷载达到最大.与试验温度 25°C 相比,试验温度为 45°C 、 60°C

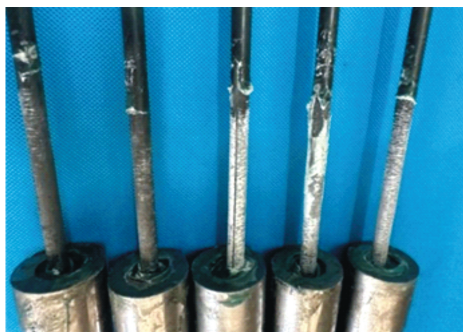


图6 高温环境下试件破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of specimens under high-temperature load cases

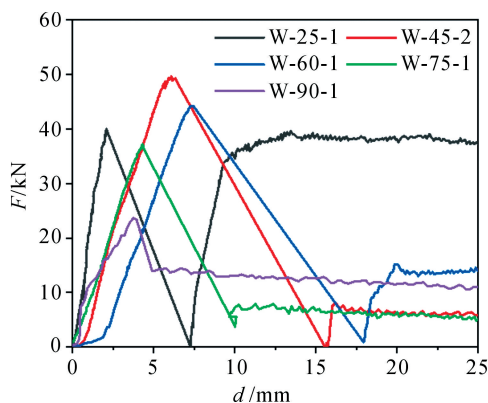


图7 高温工况试验荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves under high-temperature test load cases

时锚固节点极限承载力提高 14.96%、14.30%,试验温度为 75°C 、 90°C 时锚固节点极限承载力降低 10.47%、42.96%;由曲线后半段可见,随着试验温度越高,锚固节点发生粘结滑移破坏段承载均值 F 越低.通过对全部高温试验数据整理得到,与试验温度 25°C 相比,试验温度为 45°C 、 60°C 、 75°C 时锚固节点粘结滑移破坏段承载均值增加 67.39%、-80.01%、-83.55%, 90°C 时锚固节点粘结滑移破坏段承载均值降低为 88.55%.由此可见,锚固节点温度升高会影响环氧树脂胶体粘结性能,导致 CFRP 棒索与环氧树脂胶体间粘结界面破坏.

高温工况试验详细数据总表如表 3 所示,由总表可见,当试验温度 T 为 25°C 时,索锚固节点荷载峰值数(发生粘结滑移次数)多为 2 个;随着试件温度升高,索锚固节点荷载峰值 N 多为 1 个.高温工况试验峰值荷载数据、峰值荷载所对应的粘结滑移位移值分别如图 8 和图 9 所示,可见随着试验温度升高,锚固节点极限荷载呈现先升后降的趋势.表明

表 3 高温工况试验数据总表

Table 3 Summary of test data under high-temperature conditions

试件编号	$T/^{\circ}\text{C}$	N	F_{41}/kN	δ_{41}/mm	F_{42}/kN	δ_{42}/mm	F_c/kN
W-25-1	25	2	12.57	0.76	40.01	2.08	37.26
W-25-2	25	2	16.69	1.36	42.26	7.38	22.13
W-25-3	25	1	30.64	2.79	—	—	31.37
W-25-4	25	2	12.66	1.24	39.64	2.39	38.24
W-25-5	25	2	14.63	1.06	42.68	2.12	36.64
W-45-1	45	2	17.40	2.63	36.32	8.09	16.10
W-45-2	45	1	49.33	—	—	5.93	8.18
W-45-3	45	1	48.26	—	—	5.06	12.62
W-45-4	45	1	42.64	—	—	5.36	11.62
W-45-5	45	1	44.69	—	—	5.09	16.16
W-60-1	60	1	44.21	—	—	7.28	14.12
W-60-2	60	1	43.33	—	—	5.96	4.71
W-60-3	60	1	40.35	—	—	6.62	8.94
W-60-4	60	1	46.16	—	—	6.24	8.16
W-60-5	60	1	44.62	—	—	6.19	7.98
W-75-1	75	2	26.55	1.56	41.50	7.63	6.50
W-75-2	75	1	37.23	—	—	4.31	6.32
W-75-3	75	1	36.18	—	—	4.65	5.98
W-75-4	75	1	34.69	—	—	4.19	6.17
W-75-5	75	1	35.17	—	—	4.39	6.06
W-90-1	90	1	22.04	—	—	3.64	4.29
W-90-2	90	1	23.37	—	—	3.95	6.00
W-90-3	90	1	21.64	—	—	3.81	4.23
W-90-4	90	1	22.39	—	—	3.35	4.71
W-90-5	90	1	22.16	—	—	3.97	4.31

注: T 为试验温度, N 为试验过程中发生突发粘结滑移的次数, F_{4n} 为第 n 个突发粘结滑移前的荷载值, δ_{4n} 为第 n 个突发粘结滑移后对应的粘结位移值, F_c 为持续粘结滑移破坏段时荷载平均值, 持续滑移破坏段指的是试件在承受荷载的同时出现粘结滑移。

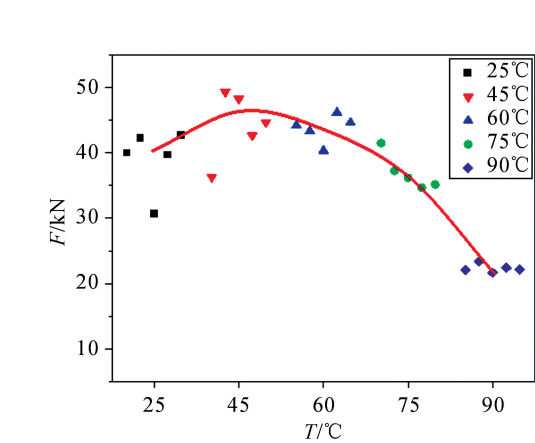


图 8 高温工况试验峰值荷载

Fig. 8 Peak load under high-temperature load cases

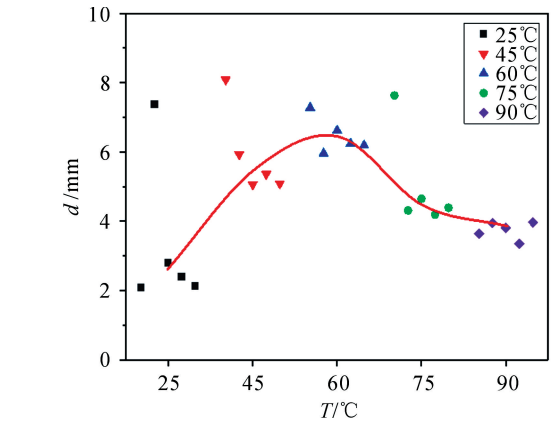


图 9 高温工况试验粘结滑移位移

Fig. 9 Bond slip displacement under high-temperature load cases

当索锚固节点温度升高时,环氧树脂胶体与 CFRP 棒索粘结界面强度和极限承载力有明显的降低,原因是低温环境下的粘结滑移主要由原有的完全脆性逐渐转变为塑性粘结。

2.2 低温环境下试验现象及破坏形态

不同低温环境下的锚固系统破坏模式和破坏细部,如图 10 所示,CFRP 索锚固节点的破坏模式为 CFRP 棒索与粘结胶体、粘结胶体与锚固筒界面的粘结滑移。低温的环境下的拉伸试验,胶体和钢锚筒界面在试件两端均发生了破坏。这是由于试件整体处于低温环境,试件两锚固端内的胶体均受低温影响,从而锚固节点棒索-胶体-锚固筒粘结脆性增加,锚固端长度对锚固节点粘结性能影响降低。因此当千斤顶行程位移较大时,两端的 150 mm 和 300 mm 锚固节点均发生粘结滑移。同时,在试验过程中,锚固端环氧树脂胶体与锚固筒发生粘结破坏时伴随着清脆的响声和试件长度的明显变化。

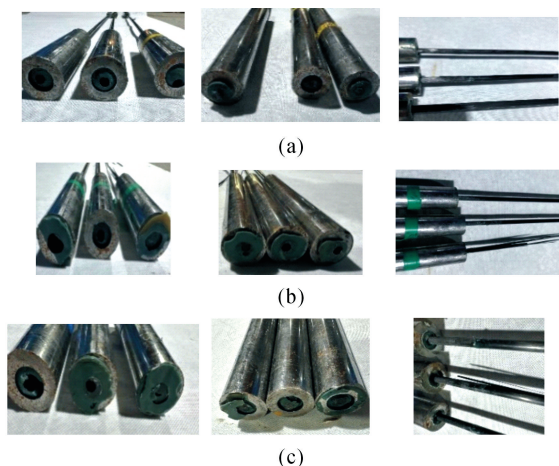


图 10 低温环境下锚固节点破坏形态

Fig. 10 Failure patterns of anchored joints under low-temperature load cases

低温工况试验详细数据总表如表 4 所示,低温工况试验峰值荷载数据和峰值荷载所对应的粘结滑移位移值分别如图 11 和图 12 所示。与试验温度 -5°C 相比,试验温度为 -10°C 和 -15°C 时,锚固节点极限承载力分别降低 14.73% 和 5.25%,粘结滑移位移值越提高 20% 和 4%。与高温环境中锚固性能衰减相比,可见低温环境中锚固性能变化不大。

选择部分低温试验的数据绘制荷载-位移曲线图,如图 13 所示。由图 13 中可见,三种低温环境下锚固节点的荷载-位移曲线趋势十分相似;由曲线前段可见,低温环境下试件突发粘结滑移次数较多,体现了在低温环境下从破坏开始到完全破坏中粘结滑移的脆性断裂次数较多,在达到极值点的最大值之

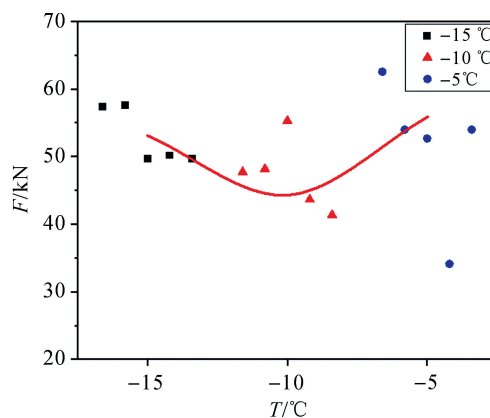


图 11 低温工况试验峰值荷载

Fig. 11 Peak load under low-temperature cases

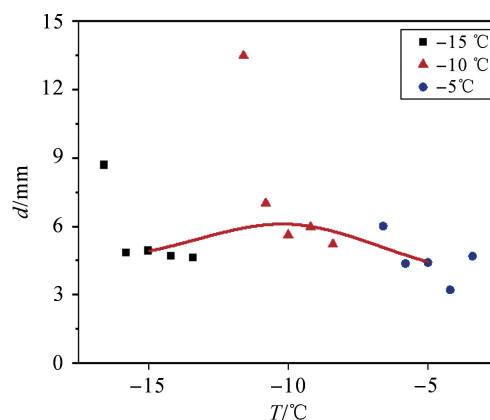


图 12 低温工况试验粘结滑移位移

Fig. 12 Bond slip displacement under low-temperature cases

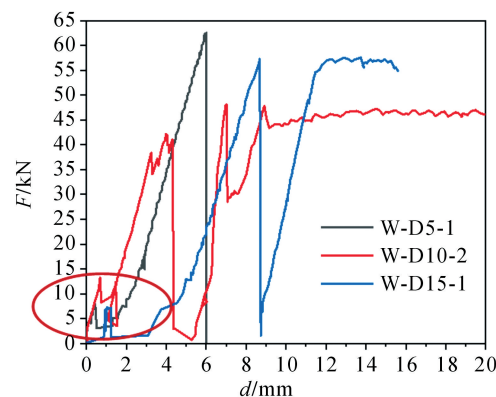


图 13 低温环境部分试验荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves under low-temperature load cases

前,试件发生部分粘结破坏;由曲线后段可见,试件在达到荷载峰值 $F_{\max}$ 后仍能达到较大的粘结滑移荷载值 F_c ,证明达到荷载峰值产生的粘结滑移并未对锚固节点产生较大的破坏,锚固节点仍能继续承受

表 4 低温与常温工况试验数据总表

Table 4 Summary of test data under low-temperature conditions

试件编号	$T/^{\circ}\text{C}$	N	$F_{41}-F_{42}-F_{43}-F_{44}/\text{kN}$	$\delta_{41}-\delta_{42}-\delta_{43}-\delta_{44}/\text{mm}$	F_c/kN
W-D5-1	-5	3	7.92-17.87-62.54	0.44-2.91-6.01	—
W-D5-2	-5	3	11.68-12.33-53.99	0.68-1.47-4.37	39.21
W-D5-3	-5	2	13.01-52.66	1.55-4.42	45.97
W-D5-4	-5	3	9.68-14.16-34.11	0.80-1.11-3.22	50.77
W-D5-5	-5	3	8.32-12.34-53.98	0.39-1.24-4.69	42.64
W-D10-1	-10	5	9.86-8.86-47.71-7.56-15.25	0.78-5.35-13.48-16.97-20.11	36.35
W-D10-2	-10	4	13.19-41.09-48.15-47.86	0.68-4.35-7.01-8.97	46.32
W-D10-3	-10	7	8.04-23.05-31.17-55.28-55.98-53.57-46.860.56-3.26-3.84-5.62-5.82-6.21-6.31	—	—
W-D10-4	-10	4	10.46-12.46-43.64-44.64	0.71-3.79-5.96-6.04	42.64
W-D10-5	-10	4	8.06-12.34-41.36-36.16	0.69-1.68-5.21-6.03	44.37
W-D15-1	-15	3	7.30-7.12-57.31	1.03-1.24-8.69	55.54
W-D15-2	-15	4	10.09-12.48-57.60-8.48	1.21-1.48-4.84-6.37	48.74
W-D15-3	-15	3	6.68-11.13-49.60	0.53-0.89-4.93	49.03
W-D15-4	-15	3	7.23-10.24-50.16	0.61-1.14-4.71	46.36
W-D15-5	-15	3	6.37-12.16-49.61	0.54-1.03-4.63	48.64

注: T 为试验温度、 N 为突发粘结滑移次数、 $F_{41}-F_{42}-\cdots-F_{4n}$ 分别为第 n 次突发粘结滑移前对应的荷载值, 同样 $\delta_{41}-\delta_{42}-\cdots-\delta_{4n}$ 为第 n 个突发粘结滑移前对应的粘结位移值, F_c 为试件发生持续粘结滑移破坏时荷载平均值。

较大的荷载. 这是由于胶体与钢锚筒界面发生破坏, CFRP 棒索与胶体材料的锚固长度和两者的粘结界面无明显变化. 对低温试验数据整理可得, 与试验温度 -5°C 相比, 试验温度为 -10°C 和 -15°C 时, 锚固节点粘结滑移破坏段承载均值分别降低 4.97% 和 11.25%.

2.3 温度对锚固系统承载性能影响

对高温和低温工况的试验数据进行整理, 得到不同温度试验数据对比表 (表 5) 和不同温度荷载-位移曲线图 (图 14). 以常温 (25°C) 的数据作为对比

基准, 可见在高温环境下, 试件的极限荷载与粘结滑移时的荷载显著下降, 试件的极限荷载与粘结滑移逐渐降低, 并且粘结滑移破坏段荷载均值也逐渐降低. 当温度为 90°C 时, 突发粘结滑移时荷载与 25°C 相比, 下降 42.96%; 持续粘结滑移破坏段荷载均值相比下降 88.55%, 证明温度升高后, CFRP 棒索与胶体的粘结界面受到影响, 粘结性能受到严重损伤; 低温环境下的试件相较于常温的试件极限荷载更高, 但粘结滑移位移增大, 破坏形态主要是粘结胶体与锚固筒粘结界面的损坏.

表 5 不同温度工况试验数据对比

Table 5 Comparison of test data under different temperature load cases

试件编号	$T/^{\circ}\text{C}$	$F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\max}$ 幅值/%	d/mm	F_c/kN	F_c 幅值/%
W-D15-PJ	-15	52.86	32.12	5.56	49.66	33.28
W-D10-PJ	-10	47.57	18.90	6.924	42.42	13.84
W-D5-PJ	-5	55.79	39.44	4.542	44.64	19.80
W-25-PJ	25	40.01	—	0.76-2.08	37.26	—
W-45-PJ	45	46.23	15.54	5.36	12.15	-67.39
W-60-PJ	60	45.73	14.30	6.25	7.45	-80.01
W-75-PJ	75	35.82	-10.47	4.39	6.13	-83.55
W-90-PJ	90	22.82	-42.96	3.74	4.34	-88.35

注: T 为试验温度, $F_{\max}$ 为试件粘结滑移前荷载最大值, d 为荷载为 $F_{\max}$ 时试件的粘结滑移值, F_c 为试件发生持续粘结滑移破坏时荷载平均值。

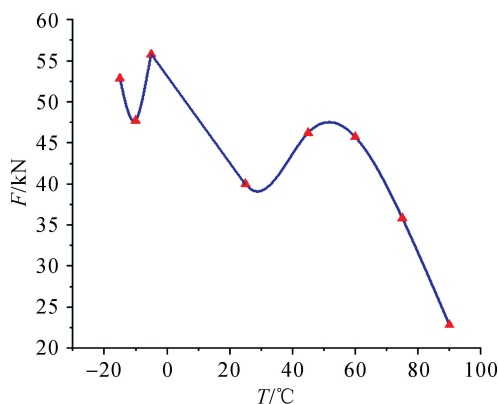


图 14 不同温度工况试验极限荷载

Fig. 14 Ultimate load under different temperature load cases

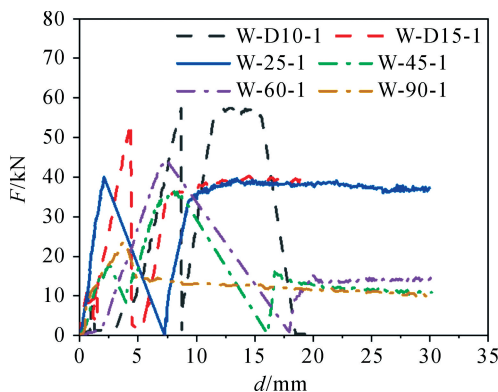


图 15 高低温工况试验荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curve under temperature load cases

高低温工况试验荷载-位移曲线图如图 15 所示,低温环境下的极限荷载高于高温环境下的极限荷载,表明在高温环境下环氧树脂胶锚固性能损伤较为严重。由曲线达到最大值,即锚固节点达到最大极限荷载值 $F_{\max}$ 后,曲线的谷点(即锚固节点的粘结滑移后残余承载力 F_c)高低对比可知,低温环境下的试件谷值远低于高温环境下的试件谷值,原因是低温环境下,环氧树脂胶粘结滑移是胶体和钢锚筒界面的滑移,表现为脆性破坏;高温环境下,环氧树脂胶与 CFRP 棒索界面发生粘结滑移,表现为塑性破坏。其中,塑性破坏表示当锚固节点发生破坏时,锚固节点粘结滑移位移较大,且在持续滑移阶段承载能力较小;脆性破坏表示当锚固节点发生破坏时,锚固节点粘结滑移位移较小,持续粘结滑移阶段承载较大。

由于低温状态下,承载力相较于常温下更高,因此低温环境下承载力增加可作为安全储备。而高温环境下,在 25 °C~45 °C,极限承载力上升,而 45 °C~90 °C,极限承载力下降。根据构件可能达到的实际

温度,选择温度为 75 °C 工况下的极限承载力作为高温极限承载力,得承载力折减系数 $\alpha = 0.9$,承载力安全折减计算如式(1)所示。

$$\alpha = \frac{F_{75}}{F_{25}} \quad (1)$$

式中: F_{75} 为 75 °C 时极限荷载设计值, kN; F_{25} 为 25 °C 时极限荷载设计值, kN。

3 结论与展望

1) 在极端温度环境下,粘结型锚固节点表现出不同的性能特点。在低温环境下,锚固节点的极限承载力增加,粘结界面破坏呈现脆性破坏特征。相反,在高温环境下,锚固节点的极限承载力减少,粘结滑移时的承载能力下降,粘结界面破坏呈现先脆性后塑性的破坏特征。

2) 在高温环境下,锚固节点的粘结滑移破坏主要集中在 CFRP 棒索与粘结胶体的粘结界面破坏。而在低温环境中,粘结滑移破坏主要表现在 CFRP 棒索与粘结胶体以及粘结胶体与钢锚筒之间的粘结界面破坏,其中粘结胶体与锚固筒界面破坏为主要特征。这些差异性能特点为不同环境条件下设计和使用粘结锚固节点提供了重要参考与指导。

3) 相较于低温环境,高温环境对粘结锚固节点极限承载力影响较大,所以在考虑高温环境天气温度对粘结型锚固节点极限承载力影响的设计中,建议采用 0.9 折减系数进行锚固系统承载力计算。

参考文献

- [1] 韩娟,刘伟庆,方海. 纤维增强树脂基复合材料在土木基础设施领域中的应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 543-554.
HAN Juan, LIU Wei-qing, FANG Hai. Application of fiber reinforced resin matrix composites in the civil infrastructure field [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2020, 42 (5): 543-554.
- [2] ELREFAI A, WEST J, SSOUDKI K. Performance of CFRP tendon-anchor assembly under fatigue loading [J]. Composite Structures, 2007, 80(3): 352-360.
- [3] YANG Y, WANG X, WU Z, et al. Damping properties of FRP cables for long-span cable-stayed bridges [J]. Materials and Structures, 2016, 49(7): 2701-2713.
- [4] WANG L, ZHANG J, XU J, et al. Anchorage systems of CFRP cables in cable structures—a review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 82-99.
- [5] KARBHARI V M. Use of composite materials in civil infrastructure in Japan [R]. International Technology

- Research Institute: Baltimore, MD, USA, 1998: 211.
- [6] MEIER H, MEIER U. BRÖNNIMANN R. Zwei CFK-Kabel für die Storchbrücke [J]. Schweiz. Ing. Arch. 1996, 114: 980-985.
- [7] MEIER U. Structural tensile elements made of advanced composite materials [J]. Structural Engineering International, 1999, 9(4): 281-285.
- [8] 吕志涛, 梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 54-59.
- LV Zhi-tao, MEI Kui-hua. Research on the first CFRP cable-stayed bridge in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 54-59.
- [9] 牛延沼, 李承高, 咸贵军, 等. CFRP 拉索变刚度黏结型锚固系统受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(3): 220-231.
- NIU Yan-zhao, LI Cheng-gao, XIAN Gui-jun, et al. Mechanical properties of CFRP cable bonded anchorage system with variable stiffness [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(3): 220-231.
- [10] 吴智深, 汪昕, 吴刚. FRP 增强工程结构体系[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 71
- WU Zhi-shen, WANG Xin, WU Gang. FRP reinforced engineering structure system [M]. Beijing: Science Press, 2017: 71.
- [11] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维复合材料拉索的锚固体系及服役性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 45-54.
- WANG An-ni, LIU Xiao-gang, YUE Qing-rui. Research progress on anchorage system and service performance of carbon fiber composite cables[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 45-54.
- [12] ASTM D7205/D7205M-21. Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars [S].
- [13] 范重, 李夏, 晁江月, 等. 航站楼使用阶段钢结构温度取值研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 9-18.
- FAN Zhong, LI Xia, CHAO Jiang-yue, et al. Research on temperature value of steel structure in terminal building[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2017, 34(4): 9-18.
- [14] 盛一安, 王柏生. 钢结构构件日照温度场和温度作用取值研究[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(6): 52-57.
- SHENG Yi-an, WANG Bai-sheng. Study on sunshine temperature field and temperature effect of steel structure components[J]. Low Temperature Building Technology, 2021, 43(6): 52-57.

(上接第 70 页)

- [8] HANAOR A. Geometrically rigid double-layer tensegrity grids [J]. International Journal of Space Structures, 1994, 9(4): 227-238.
- [9] MOTRO R. Forms and forces in tensegrity systems [C] // Proceedings of Third International Conference on Space Structures, Amsterdam Elsevier, 1984.
- [10] MOTRO R, NAJARI S, JOUANNA P. Static and dynamic analysis of tensegrity systems [C] // Shell and Spatial Structures: Computational Aspects. Proceedings of the International Symposium, 1986, 26: 270-279.
- [11] ROTH B, WHITELEY W. Tensegrity frameworks [J]. Trans, 1981, 265(2): 419-446.
- [12] CONNELLY R, WHITELEY W. The stability of tensegrity frameworks [J]. International Journal of Space Structures, 1992, 7(2): 153-163.
- [13] CONNELLY R, WHITELEY W. Second-order rigidity [J]. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 1996, 9(3): 453-491.
- [14] CONNELLY R, TERRELL M. Globally rigid symmetric tensegrities [J]. Topology Structural, 1995, 21(6): 59-78.
- [15] VASSART N, MOTRO R. Multiparametered form finding method; application to tensegrity systems [J]. International Journal of Space Structures, 1999, 14(2): 147-154.
- [16] DAVIDE C, ANDREA M. Structural performances of single-layer tensegrity domes [J]. International Journal of Space Structures, 2012, 27(2&3): 167-178.
- [17] 陈志华, 刘锡良. 张拉整体三棱柱单元体结构分析 [J]. 天津大学学报, 2000, 33(1): 89-93.
CHEN Zhi-hua, LIU Xi-liang. Study on tensegrity structures of triangular prism unit [J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33(1): 89-93.