

## 桁架型高耸结构碳纤维加固的多层级试验研究

崔融<sup>1</sup> 高维健<sup>2</sup> 牛荫杰<sup>3</sup> 张笑闻<sup>4</sup>

(1. 中国铁塔股份有限公司甘肃省分公司, 兰州 730000)

(2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110066)

(3. 北京石油化工学院 新材料与化工学院, 北京 102627)

(4. 大连宇晨高新材料科技有限公司, 大连 116023)

**摘要:**【目的】针对桁架型高耸结构在长期服役中因材料老化、动态荷载及极端环境导致的稳定性劣化问题,系统评估碳纤维加固工艺的增强效应。【方法】建立了“材料-部件-整体”多层级试验方法。在材料级测试界面,进行黏接性能及复材板性能的测试;在部件级对加固前、后的L形截面梁及连接节段进行四点弯曲试验,验证局部加固效果;在整体级通过拉力试验对甘肃兰州某25 m高通信塔进行实地测试,分析主承力部件应变与顶端位移。【结果】试验结果表明,材料级砂纸打磨使钢/碳纤维粘接剪切强度提升29.98%,优于喷砂和激光处理;部件级加固后L形梁及节点的屈服载荷提升15%以上,局部应变降低65%~75%;整体级主承力部件应变降低28.52%,顶端位移减少15.58%。所提加固工艺显著改善了结构刚度与强度,为工程应用提供了优化依据。

**关键词:** 碳纤维复合材料; 桁架型高耸结构; 力学试验; 多层级试验; 极限强度

**中图分类号:** TB332; O348 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.03.016

## 0 引言

桁架型高耸结构以其优异的力学性能、轻量化及空间效率,广泛应用于超高层建筑、大跨度桥梁、输电塔、通信塔等现代工程领域,是解决复杂结构承载与跨越难题的重要技术方案<sup>[1-3]</sup>。长期服役过程中,桁架型高耸结构可能因材料老化、动态荷载累积效应或极端环境作用而导致局部屈曲、节点松动或整体稳定性下降<sup>[4-6]</sup>。碳纤维由于其自身高强度、高模量、低密度等优势广泛应用于高耸型桁架的系统性加固,以确保其承载性能与耐久性满足工程要求<sup>[7-9]</sup>。

国内外学者对桁架结构的碳纤维加固试验进行了诸多研究。针对机械及工程结构中常用的工字截面钢桁架部件,NARMASHIRI等<sup>[10]</sup>采用碳纤维复合材料板材对其进行加固,并针对典型弯曲工况中桁架受压破坏、局部失稳、碳纤维板断裂和胶层断裂失效模式进行试验研究,试验结果表明,当碳纤维加固板与钢桁架充分粘接时,碳纤维可以充分发挥其高模量、高强度的优势。EDBERG等<sup>[11]</sup>同样对碳纤维加固的工字截面钢桁架部件进行了弯曲破坏试验,发现其破坏形式均为碳纤维层与钢桁架之间胶接层发生剥离破坏,加固后整体结构的刚度、屈服荷载和极限荷

载分别提高了17%、23%、78%。SEN等<sup>[12]</sup>的试验中考虑了不同钢材屈服强度、不同截面厚度和不同组合桁架形式等因素,并讨论了上述影响因素对碳纤维加固提升效果的影响。COLOMBI等<sup>[13]</sup>对碳纤维复合材料加固的平板钢桁架进行了试验研究,发现加固后桁架承载力、弹性刚度和塑性刚度均有显著提升,而不同粘接剂种类对桁架结构的应力分布和荷载位移曲线影响较小。马猛亮<sup>[14]</sup>考虑碳纤维加固板材的厚度、长度、宽度、预应力大小及胶层厚度等因素,进行了钢桁架碳纤维加固试验研究,发现碳纤维加固板端部的最大剪应力随着其预应力、长度和厚度的增大而增大,随着胶层厚度的增大而减小。CHEN等<sup>[15]</sup>在试验中发现,横向包裹碳纤维布可使钢管桁架节点极限承载力提升35%,从而有效抑制焊缝开裂。

上述研究成果表明,碳纤维加固对桁架结构性能有显著提升,碳纤维与钢桁架之间的粘接强度影响着加固性能的提升幅度,但桁架表面处理方式对粘接强度的影响并未得以讨论,目前碳纤维加固效果的论述也仅存在于部件级范围,尚没有文献在材料、部件和整体等多个层级内完善地进行桁架型高耸结构的试验研究。

本文提出一种“材料-部件-整体”多层级试验方

收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-04-29

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项(2021YFE0115400); 甘肃省企业研发机构能力建设专项(23CXJA0005)

作者简介: 崔融,男,1980年生,甘肃兰州人,高级工程师; 主要研究方向为通信工程; E-mail:876191280@qq.com。

张笑闻(通信作者),男,1993年生,辽宁大连人,博士; 主要研究方向为复合材料结构失效分析、多尺度方法; E-mail:zhangxw@163.com。

引用格式: 崔融,高维健,牛荫杰,等. 桁架型高耸结构碳纤维加固的多层级试验研究[J]. 机械强度,2026,48(3):145-151.

CUI Rong, GAO Weijian, NIU Yinjie, et al. Multi-level test study on carbon fiber reinforcement of truss type high-rise structures [J].

Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(3): 145-151.



免费获取

法,通过材料性能测试、部件级四点弯曲试验及整体结构拉力试验,系统评价碳纤维加固工艺对桁架型高耸结构的增强效果。

## 1 碳纤维加固工艺

采用的碳纤维加固方法参考文献[16],以高模量碳纤维布或碳纤维板材作为主要加固承力材料,实施工艺如图1所示。针对需要加固的钢桁架结构,第1步,进行除锈除灰等表面清洁,并进行平整化处理,以保证其平整且具有一定的表面粗糙度;第2步,刷底漆,并使用混有高模量聚氨酯树脂的腻子填充至结构表面,增加碳纤维加固层与钢桁架结构的变形一致性;第3步,粘接碳纤维预浸布或碳纤维板,其厚度需根据加固要求进行计算;第4步,粘接延展性能较好的芳纶纤维层,避免结构遭受机械损伤后破坏加固层,并进行表面涂装。

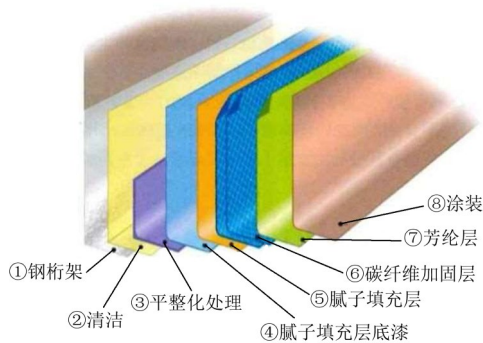


图1 钢桁架结构碳纤维加固实施工艺流程

Fig. 1 Schematic of the implementation process for carbon fiber reinforcement of steel truss

钢结构桁架粘接后形成的复合材料与纯钢桁架相比,在提高结构刚度的同时也增大了横截面积,极大地改善了钢构件的应力状态。此外,通过增加混有高模量聚氨酯树脂的腻子填充层,抑制了受载过程中钢结构和碳纤维加固层之间的剥离行为,保证即使在高应力水平下或屈曲大变形时,碳纤维加固效果也能有效地施加在钢桁架结构上。

## 2 碳纤维加固的多层级试验论证

桁架型高耸结构形式复杂,为准确地评估碳纤维加固效果,工程实际中经常采用“搭积木”的试验验证方法<sup>[17]</sup>,即从材料级的测试入手,逐步提升试验件的复杂性和规模,最终对完整尺寸的结构进行测试,以验证其结构的完整性和可靠性。据此,在“材料-部件-整体”方面多层次地进行试验设计,对碳纤维加固工艺进行论证,具体试验如图2所示。在材料级,对碳纤维加固板材进行材料性能试验,对碳纤维/钢材结合处进行材料连接性试验;在部件级,对加固前、后的L形截面梁及其连接节段进行四点弯曲试验,验证局部加

固效果;在整体级,对桁架型高耸结构进行碳纤维加固,并采用拉力测试来验证整体加固效果。

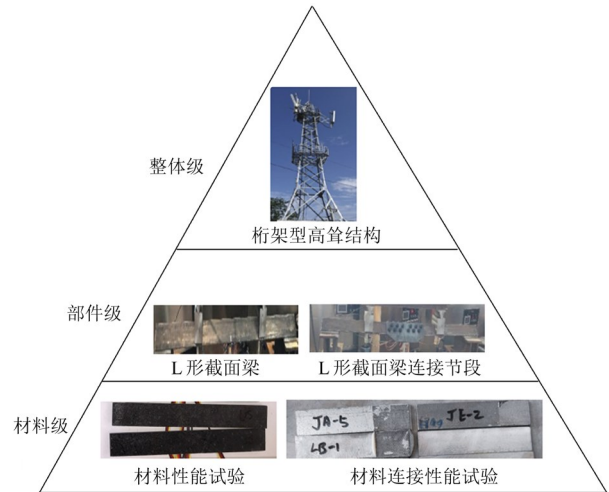


图2 “搭积木”式试验方案

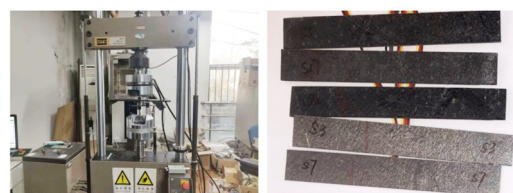
Fig. 2 Test plan of the “building block”

### 2.1 材料性能试验

#### 2.1.1 碳纤维板材试验

单向的连续纤维增强复合材料可近似为横观各向同性材料,其弹性特性在垂直于纤维方向的平面内呈各向同性;但沿纤维方向与垂直于纤维方向的力学性能则表现出显著的各向异性<sup>[18]</sup>。获取主要的碳纤维复合材料板力学参数是实现桁架型高耸结构加固工艺效果测算的关键。

参照文献[19]的尺寸制作碳纤维板力学试验件,并采用MTS318型伺服力学试验机对试件进行拉伸试验,试验环境和试件照片如图3所示,试验数据如表1所示。



(a) 试验环境

(b) 试件照片

图3 碳纤维复合材料板材拉伸性能试验

Fig. 3 Tensile performance testing of carbon fiber composite plates

表1 碳纤维复材板材料性能

Tab. 1 Material performance of the carbon fiber composite board

序号	检测项目	试件数量	结果(平均值)
1	纵向拉伸强度/MPa	5	1 828.03
2	纵向拉伸模量/GPa	5	148.36
3	横向拉伸强度/MPa	5	56.5
4	横向拉伸模量/GPa	5	8.23
5	泊松比	5	0.35

#### 2.1.2 材料连接性试验

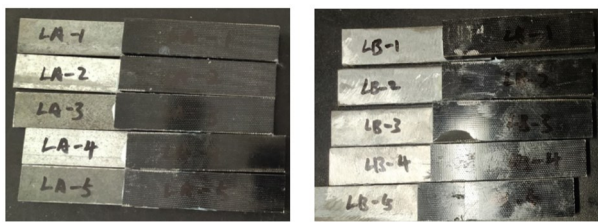
材料连接性试验件是由两块 800 mm×25 mm×

5 mm 尺寸的 T700 碳纤维板和钢板搭接粘接而成, 搭接面积为 625 mm<sup>2</sup>。粘接前, 采用砂纸打磨、喷砂处理和激光处理 3 种表面处理工艺对不同钢板进行表面处理, 同时配备表面未处理的对照试验件, 不同对照组的试件数量如表 2 所示。粘接条件为: 在 55 °C 的温度环境下, 加压固化 24 h, 粘接后试验件如图 4 所示。

表 2 对照试验设计

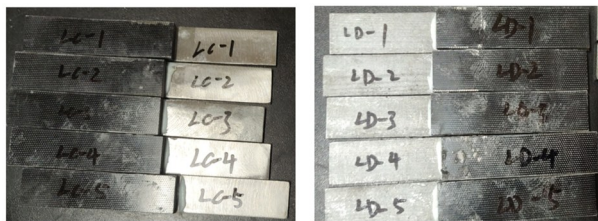
Tab. 2 Design of the controlled test

序号	金属表面处理方式	参数	试件数量
1	未处理	—	5
2	砂纸打磨	60 目	5
3	喷砂处理	0.3 mm 喷丸	5
4	激光处理	200 W 功率	5



(a) 表面未处理

(b) 砂纸打磨



(c) 喷砂处理

(d) 激光处理

图 4 4 种不同表面处理方式的金属-碳纤维连接性试验件样品

Fig. 4 Test specimens of metal-carbon fiber connectivity with four different surface treatment methods

将上述试验件通过在夹持端夹持 5 mm 垫片来保证金属-复材连接区域受力状态为纯剪切。采用 MTS318 型伺服力学试验机对载荷进行控制, 4 种试验件的连接处粘接剪切强度数据如表 3 所示。金属表面未处理的情况下, 粘接剪切强度为 14.19 MPa, 对金属表面喷砂和激光处理后, 剪切强度分别提升了 7.74%、6.19%, 提升效果并不明显。相比于未处理试件, 采用砂纸打磨处理后试件剪切强度提升了 29.98%, 达到了 18.45 MPa。

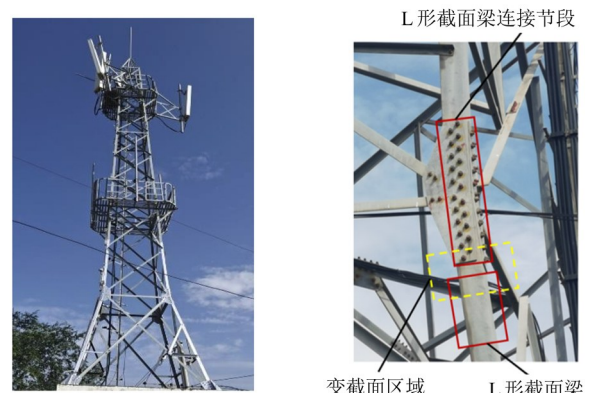
### 2.2 部件论证试验

L 形截面梁是桁架型高耸结构中较为典型的承载部件, 实物如图 5 所示。为验证局部加固效果, 对加固前、后的 L 形截面梁及连接节段进行四点弯曲荷载试验, 通过试验结果对局部碳纤维加固效果进行评价。其中, 加固层采用本文碳纤维加固工艺, 于 L 形截面梁/连接节段外侧进行粘接加固, 碳纤维加固层厚度为 5 mm。

表 3 连接处粘接剪切强度

Tab. 3 Adhesive shear strength at the joint

序号	金属表面处理方式	剪切强度/MPa	剪切强度均值/MPa
1	未处理	14.65	14.19
2		13.31	
3		14.16	
4		12.34	
5		16.51	
6	砂纸打磨	17.4	18.45
7		17.08	
8		20.82	
9		20.55	
10		16.4	
11	喷砂处理	13.95	15.29
12		15.46	
13		15.64	
14		16.33	
15		15.08	
16	激光处理	12.64	15.07
17		18.46	
18		12.64	
19		18.98	
20		12.64	



(a) 整体实物图

(b) 局部实物图

图 5 桁架型高耸结构

Fig. 5 Truss type high-rise structures

试验的加载工装示意图如图 6 所示。试验的加载设备为 500 t 液压千斤顶, 加载板顶端在同一高度, 并分别与分配梁的两端相接触, 将荷载对称同步地传递到试件上。试件的两端各设置固定支座。端板下部的垫板与支座接触来模拟简支的边界条件。所施加的荷载用力传感器来测定, 以精确控制分级加载。

试验过程中的测量系统由力传感器、三向电阻应变片、位移传感器构成, 集成到 DH3816 静态应变测试系统中。位移测点和应变测点具体位置如图 7 所示, 在试件中间和距中间 300 mm 处放置位移和应变传感器。对加载过程中各测点的应变值、位移值进行测

量,并对其进行温度补偿、系统接地等处理,以降低温度、电磁条件对测量信号的干扰。

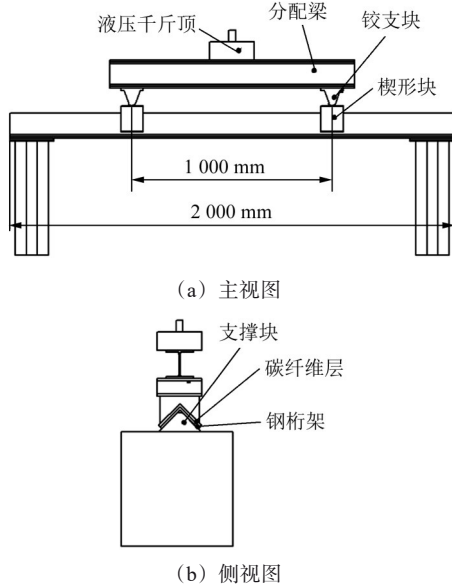


图 6 试验加载工装

Fig. 6 Test loading fixture

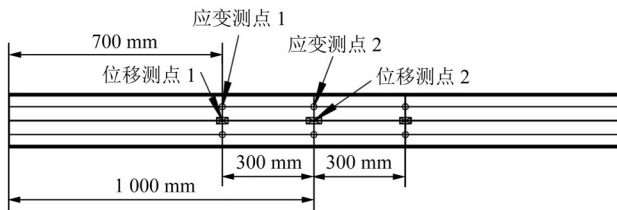


图 7 应变测点和位移测点位置

Fig. 7 Location of strain and displacement measurement points

对L形截面梁、加固的L形截面梁、L形截面梁连接节点、加固的L形截面梁连接节点4种试件进行四点弯曲试验,采用载荷加载方式进行加载,试验件及试验现场照片如图8所示。由图8可知,4组试验中试验件变形均符合四点弯曲特性,呈现出明显的对称性。



(a) L形截面梁

(b) 加固的L形截面梁



(c) L形截面梁连接节段

(d) 加固的L形截面梁连接节段

图 8 4种典型试件实物图

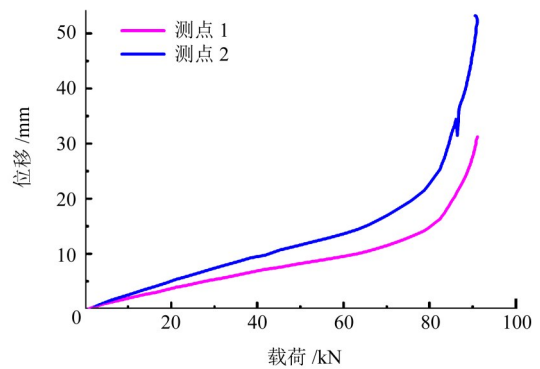
Fig. 8 Physical images of four typical specimens

4组试验的位移-载荷曲线如图9所示,在同一载荷下,测点2位移大于测点1位移,两个测点曲线均有明确的拐点,拐点之后梁结构开始发生塑性变形。加固前、后结构屈服载荷对比如表4所示,加固的L形截面梁比L形截面梁的结构屈服载荷提升16.0%,加固的L形截面梁连接节段比L形截面梁连接节段的结构屈服载荷提升19.5%。

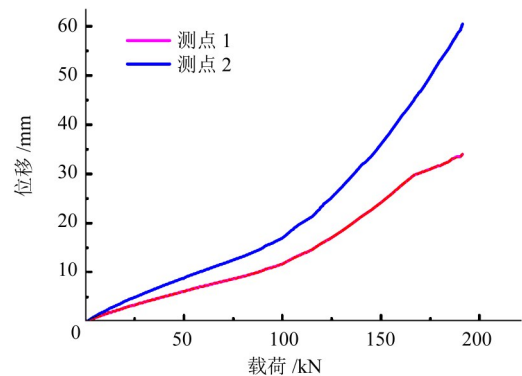
表 4 加固前、后结构屈服载荷对比

Tab. 4 Comparison of yield load of the structure before and after reinforcement

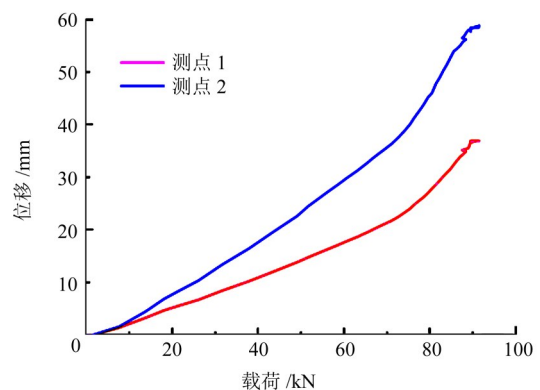
项目	结构屈服载荷/kN	增益/%
L形截面梁	78.3	16.0
加固的L形截面梁	90.8	
L形截面梁连接节段	65.8	19.5
加固的L形截面梁连接节段	78.6	



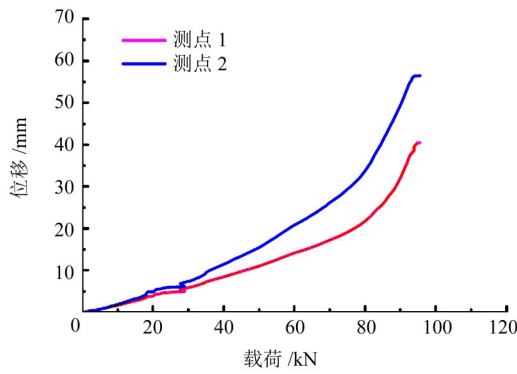
(a) L形截面梁



(b) 加固的L形截面梁



(c) L形截面梁连接节段

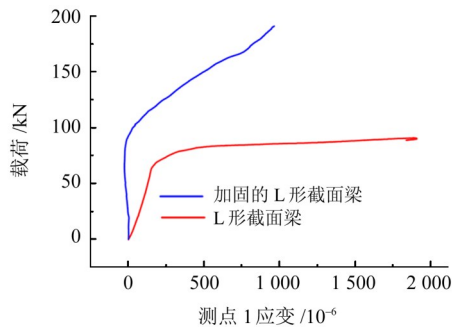


(d) 加固的 L 形截面梁连接节段

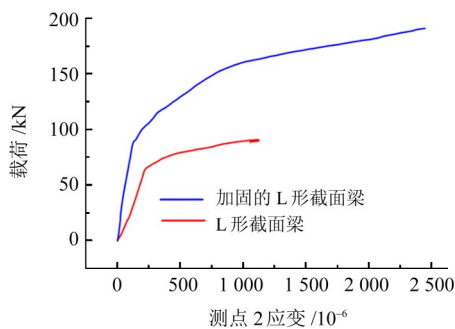
图 9 4 种试件四点弯曲试验的位移-载荷曲线

Fig. 9 Displacement-load curves of four typical components in four point bending tests

L 形截面梁和加固的 L 形截面梁结构的测点 1、测点 2 的试验数据如图 10 所示,在弹性阶段,加固的 L 形截面梁试验曲线的斜率比 L 形截面梁结构大,意味着加固的 L 形截面梁刚度性能更好。将图 10 中数据提取至表 5 中,弹性阶段的相同载荷下,加固 L 形截面梁的测点应变更小,意味着加固方案可以降低角钢应力,降幅范围为 65%~75%。



(a) 测点 1 的载荷-应变图



(b) 测点 2 的载荷-应变图

图 10 L 形截面梁和加固的 L 形截面梁的载荷-应变图

Fig. 10 Load-strain diagram of L-shaped section beam and reinforced L-shaped section beam

### 2.3 整体结构加固论证试验

参照国家标准 GB/T 50344—2019<sup>[20]</sup>制定了碳纤维加固前、后的整体结构测试方案,以整体拉力试验来等效替代风载荷,评估本文所述的碳纤维加固工艺对桁架型高耸结构的加固效果。

表 5 加固前、后的 L 形截面梁应变对比

Tab. 5 Comparison of strain of L-shaped section beams before and after reinforcement

载荷/kN	L 形截面梁应变/ $10^{-6}$	加固的 L 形截面梁应变/ $10^{-6}$	降低比例/%
25	105.2	27.0	74.33
50	177.2	59.4	66.48
75	377.4	101.9	73.00

#### 2.3.1 试验设备

试验所采用的设备如图 11 所示。采用艾德堡拉力计对力载荷进行控制及测量,采用风速仪对风载荷进行测量。采用 DH3816N 静态应力-应变测试分析系统对整体关键部位应变进行测试分析,采用全站仪对顶端应变进行测量。



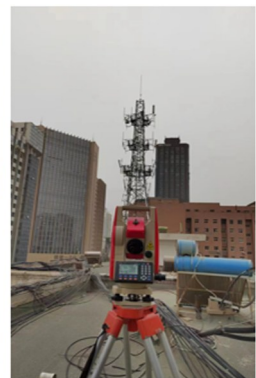
(a) 拉力计



(b) 风速仪



(c) 应变检测仪



(d) 全站仪

图 11 桁架型高耸结构拉力试验检测设备

Fig. 11 Tensile testing equipment for truss type high-rise structures

#### 2.3.2 整体拉力试验方案

以甘肃省兰州市某桁架型通信塔为例,整体结构高 25 m,为满足不断增长的通信需求,需要在原有基础上增加设备和天线等负载,现有结构已不满足承载需求,因此采用上述碳纤维加固方式对强度薄弱区域进行加固。为了评估碳纤维加固对局部强度和整体刚度的提升效果,针对碳纤维加固前、后,进行了 2 次相同的拉力试验测试。试验步骤如下:

第 1 步,将应变采集位置打磨并粘贴应变片,采集位置为高度为 10 m 的主承力梁,并将应变片和应变测试仪相连。将 4 个全站仪分别架设在三脚架上,通过

光学对中器将全站仪中心对准顶端位置。将钢索捆绑在高度为15 m的平台处,连接拉力传感器,并通过定滑轮固定至地面。

第2步,连接并调试相关设备,将应变、全站仪数据清零,记录风速。

第3步,通过定滑轮对整体匀速施加拉力,在拉力值达到15.0 kN时停止,并保持拉力2 min,记录数据。

第4步,对桁架型高耸结构进行碳纤维加固,完成加固后重复上述步骤进行重新测量。

### 2.3.3 加固效果测试结果

在桁架型高耸结构加固前、后,在关键区域布置了应变和位移测试传感器,并开展了2次拉力试验测试,加固层实物图及试验现场如图12所示。



(a) 加固层实物图 (b) 拉力试验现场

图12 加固桁架型高耸结构及试验现场

Fig. 12 Reinforced truss type high-rise structure and testing field

拉力载荷为15 kN时,碳纤维加固前、后塔柱应变测试数据如表6所示。相比于原结构,加固维修后结构主承力部件应变测试结果降低了28.52%,即通过碳纤维加固可以有效地降低桁架型高耸结构的局部应力。

表6 碳纤维加固前、后主承力部件应变测试数据

Tab. 6 Strain test data of main load-bearing components before and after carbon fiber reinforcement

测点编号	原应变/ $10^{-6}$	加固后应变/ $10^{-6}$	变化比例/%	平均变化比例/%
1	383.95	261.27	-31.95	
2	179.18	167.58	-6.47	
3	292.48	88.67	-69.68	
4	191.93	80.97	-57.81	
5	237.35	208.68	-12.08	
6	257.00	279.11	8.60	-28.52
7	128.14	124.67	-2.71	
8	220.47	208.01	-5.65	
9	355.77	149.11	-58.09	
10	308.89	177.69	-42.47	
11	314.72	120.90	-61.58	
12	237.37	231.74	-2.37	

拉力载荷为15 kN时,碳纤维加固前、后4个结构顶端的位移测试数据如表7所示。相比于原结构,加固维修后顶端位移测试结果降低了15.58%,即通过碳纤维加固可以有效地降低桁架型高耸结构的整体受载位移。

表7 碳纤维加固前、后结构顶端位移测试数据

Tab. 7 Displacement test data of top of structure before and after carbon fiber reinforcement

测点编号	原位移/m	加固后位移/m	变化比例/%	平均变化比例/%
1	0.006 4	0.004 7	-26.6	
2	0.006 6	0.004 7	-28.8	-15.58
3	0.009 8	0.009 5	-3.1	
4	0.026 2	0.025 2	-3.8	

## 3 结论

针对桁架型高耸结构碳纤维加固工艺,提出了一种多层级试验验证方法,通过从材料级到完整结构的递进式试验,系统评估了加固效果。主要结论如下:

1) 表面处理工艺显著影响金属-碳纤维界面粘接性能,砂纸打磨可使剪切强度较未处理表面提升29.98%,优于喷砂和激光处理。

2) 对于L形钢桁架及其连接节段,碳纤维加固使弯曲屈服载荷提高15%以上,局部应变降低65%以上。

3) 全尺寸结构试验表明,加固后结构顶端位移减小15.58%,主承力部件应变降低28.52%,有效提升了高耸桁架结构的刚度与强度。

## 参考文献(References)

- 王磊,张旭,李强. 大跨度空间桁架结构的轻量化设计与静动力学性能分析[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 245-253.  
WANG Lei, ZHANG Xu, LI Qiang. Lightweight design and static/dynamic mechanical performance analysis of long-span spatial truss structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 245-253. (In Chinese)
- 刘洋,陈昊,周伟. 高耸输电塔桁架结构的风致振动抑制与疲劳寿命预测[J]. 机械强度, 2022, 44(6): 1321-1330.  
LIU Yang, CHEN Hao, ZHOU Wei. Wind-induced vibration suppression and fatigue life prediction of tall transmission tower truss structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6): 1321-1330. (In Chinese)
- 赵峰,孙健,吴磊. 基于仿生学的高层建筑桁架结构优化与抗冲击性能研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4): 789-798.  
ZHAO Feng, SUN Jian, WU Lei. Bionics-based optimization and impact resistance of high-rise building truss structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 789-798. (In Chinese)
- CHEN X, LI Y, WANG Z, et al. Fatigue life assessment and reinforcement strategies for aging lattice transmission towers under cyclic wind loads[J]. Engineering Structures, 2023, 274: 115182.
- ZHANG R, LIU H, GENG Y, et al. Buckling resistance enhancement of long-span steel trusses using hybrid FRP-strengthened connections[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 171: 108745.
- WANG J, FENG P, MOTAVALLI M, et al. Seismic retrofit of historical truss bridges with shape memory alloy (SMA)-based bracing systems[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 200: 107692.
- ALAM M, HUSSEIN A. Seismic retrofitting of steel lattice transmission towers using CFRP composites: experimental and

- numerical investigation [J]. *Engineering Structures*, 2023, 274, 115182.
- [8] WANG C, ZHAO X, WANG Y. CFRP-strengthened steel tubular truss joints under static and fatigue loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108602.
- [9] KIM Y, LIM J. Durability enhancement of aging lattice towers with hybrid CFRP/steel reinforcement systems [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123429.
- [10] NARMASHIRI K, SULONG N H R, JUMAAT M Z. Failure analysis and structural behaviour of CFRP strengthened steel I-beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 1-9.
- [11] EDBERG W, MERTZ D, GILLESPIE J. Rehabilitation of steel beams using composite materials [C]//*Materials for the New Millennium*. Washington D. C. : ASCE, 2014: 23-28.
- [12] SEN R, LIBY L, MULLINS G. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32(4): 309-322.
- [13] COLOMBI P, POGGI C. An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2006, 37(1): 64-73.
- [14] 马猛亮. 预应力碳纤维增强塑料(CFRP)板加固H型钢梁抗弯性能研究分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2019: 1-20.  
MA Mengliang. Research and analysis on bending behavior of H-beam strengthened with prestressed carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019: 1-20. (In Chinese)
- [15] CHEN X, WANG Y, ZHANG R, et al. Experimental and numerical study on CFRP-strengthened steel tubular truss joints [J]. *Engineering Structures*, 2023, 45(2): 245-253.
- [16] LI H, WANG J, ZHANG C. Mechanical behavior of CFRP-strengthened steel tubular K-joints: experimental study and design method [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 191: 107175.
- [17] DONG L, WADLEY H. Shear response of carbon fiber composite octet-truss lattice structures [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 81: 182-192.
- [18] WANG Q, YANG X F, ZHANG X W, et al. Effect of cure cycles on residual stresses in thick composites using multi-physics coupled analysis with multiple constitutive models [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 104094.
- [19] REN M F, ZHANG X W, HUANG C, et al. An integrated macro/micro-scale approach for *in situ* evaluation of matrix cracking in the polymer matrix of cryogenic composite tanks [J]. *Composite Structures*, 2019, 216: 201-212.
- [20] 中国建筑科学研究院有限公司. 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 1-15.  
China Academy of Building Research Co., Ltd. Technical standard for inspection of building structure: GB/T 50344—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 1-15. (In Chinese)

## Multi-level test study on carbon fiber reinforcement of truss type high-rise structures

CUI Rong<sup>1</sup> GAO Weijian<sup>2</sup> NIU Yinjie<sup>3</sup> ZHANG Xiaowen<sup>4</sup>

(1. China Tower Corporation Limited Gansu Branch, Lanzhou 730000, China)

(2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110066, China)

(3. College of New Materials and Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102627, China)

(4. Dalian Yuchen High-Tech Materials Co., Ltd., Dalian 116023, China)

**Abstract:** [Objective] To address the issue of stability degradation in truss type high-rise structures caused by material aging, dynamic loads, and extreme environments, this study systematically evaluates the enhancement effects of carbon fiber reinforcement techniques. [Methods] A multi-level test approach encompassing “material-component-structure” was employed. In material-level tests, the bonding shear strength and composite properties were measured. In component-level tests, four-point bending experiments were conducted on L-shaped beams and joints to verify the overall reinforcement effect. Finally, tensile testing was applied to a full-scale 25 m truss structure test to analyze the strain and top displacement of the main load-bearing components. [Results] The results demonstrate that sandpaper grinding increases the bonding shear strength by 29.98% at the material level. At the component level, the yield load of reinforced beams improves by over 15%, while local strain decreases by 65% to 75%. At the structural level, the strain in primary components decreases by 28.52% and the top displacement is reduced by 15.58%, indicating significant improvements in structural stiffness and strength.

**Key words:** Carbon fiber composite material; Truss type high-rise structure; Mechanical test; Multi-level testing; Ultimate strength

Corresponding author: ZHANG Xiaowen, E-mail: zhangxwdut@163.com

Fund: National Key R&D Program Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation Special Project (2021YFE0115400); Gansu Province Enterprise R&D Institution Capacity Building Special Project (23CXJA0005)

Received: 2025-04-01 Revised: 2025-04-29

(编辑: 李立)