

CFRP加固承受主管轴力作用X形管节点 轴压承载力试验研究

黄超¹, 邵永波^{1,2*}, 欧佳灵³, 曹艺滨¹

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039;
3. 西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 为研究主管承载下碳纤维增强聚合物(CFRP)加固X形管节点在支管轴压作用下的承载力, 本文完成了4个X形管节点的轴压加载试验。在X形管节点试验过程中, 实测了轴压承载力、位移以及相贯区域应变数据, 研究了试件的失效模式、轴压承载力及应变发展规律。通过有限元软件ABAQUS建立了主管承载下CFRP加固X形管节点的有限元模型, 将数值模拟结果与试验测试结果进行对比, 验证了建立的有限元模型的准确性。此外, 本文还研究了初始承载率、支管与主管直径比、主管径厚比和CFRP缠绕层数对X形管节点承载力的影响。试验结果表明采用CFRP加固X形管节点可以有效地提高试件的轴压承载力, 随着CFRP加固层数的增加, 管节点轴压承载力显著提升。相较于主管未承载的CFRP加固X形管节点, 主管初始承载率为28%的CFRP加固X形管节点的轴压承载力仅下降3.2%, 且主管承载不会改变CFRP加固X形管节点的失效模式。有限元参数结果表明随着初始承载率的增加, 管节点承载力均降低。CFRP加固能够补偿主管承载对管节点承载力降低的影响, 缠绕CFRP层数越多, 承受主管轴力作用的X形管节点承载力下降越少。

关键词: X形管节点; 主管承载; CFRP; 失效模式; 轴压承载力

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0001-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231221001

Experimental Study on Axial Compressive Bearing Capacity of Tubular X-joint Strengthened with CFRP under Preloading on Chord

HUANG Chao¹, SHAO Yongbo^{1,2*}, OU Jialing³, CAO Yibin¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

*Corresponding author: shaoyb@mail.xhu.edu.cn

Abstract: To study the axial compressive bearing capacity of tubular X-joint strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under preloading on chord, four tubular X-joints were tested under axial compression. The axial compressive bearing capacity, displacement and strain of the chord/brace intersection during the experiment were

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队项目(2019JDTD0017)

作者简介:

黄超(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事FRP加固、结构防护加固方面的研究。E-mail: huangchao5383@163.com。

通信作者:

邵永波(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构、钢-混凝土组合结构、海洋工程结构方面的研究。

E-mail: shaoyb@mail.xhu.edu.cn。

measured, and the failure modes, axial compressive bearing capacity, and strain development of the specimens were analyzed. A finite element (FE) model of tubular X-joint strengthened with CFRP under preloading on chord was established through finite element software ABAQUS, and the numerical simulation results were compared with the experimental results to verify the accuracy of the established FE model. Effects of initial loading percentages, diameter ratio of brace to chord, chord diameter-to-thickness ratio and number of CFRP layers on the bearing capacity of tubular X-joints were investigated. The experimental results show that CFRP sheets can effectively improve the axial compressive bearing capacity of tubular X-joint, and this enhancement becomes more significant as the number of CFRP layers increases. Compared with tubular X-joint strengthened with CFRP without preloading on chord, applying an initial loading percentage of 28% on the chord results in 3.2% reduction on the axial compressive bearing capacity of the tubular X-joint. The preloading on the chord does not change the failure mode of tubular X-joint strengthened with CFRP. The parametric analyses from finite element method indicate that the bearing capacity of strengthened tubular X-joints reduces with the increase of preloading percentage. CFRP strengthening can compensate for the reduction of bearing capacity of tubular X-joints subjected to initial axial compression. With more CFRP layers, the decrease of the bearing capacity of preloaded tubular X-joints becomes less.

Keywords: tubular X-joint; preloading on chord; CFRP; failure mode; axial compressive bearing capacity

管节点在海洋导管架平台中对荷载的传递起到重要作用,因此其力学性能会影响海洋导管架平台的安全性能。管节点在服役过程中受到恶劣环境和材料退化等影响,承载力降低。为了延长平台服役年限,需要对评估后的管节点进行加固。在工程实际中,管节点加固面临两个重要问题:一是加固方法的选择;二是加固时海洋导管架平台通常处于承载状态。

传统提高管节点性能的方法包括:焊接加劲肋板、环口板焊接加固以及灌浆卡箍加固等。采用上述加固方法能够显著地提升管节点的承载力,但也会引入一些新问题:焊接残余应力、结构自身重量的增加、耐腐蚀能力缺乏等。碳纤维增强聚合物(CFRP)是一种高强度、耐腐蚀、施工便捷的材料,广泛地用于加固管道、钢管混凝土构件。国内外学者对纤维增强聚合物(FRP)加固管节点进行了大量的研究。LESANI等^[1]对FRP加固T型管节点进行了足尺试验,并建立了相应的有限元模型。HOSSEINI等^[2]对主管长径比、主管径厚比以及支管倾斜角度进行大量的参数分析,提出了T/Y型管节点采用FRP加固的承载力计算公式。FU等^[3]对圆形空心截面K型管节点采用碳纤维布加固后的静力承载力开展了试验测试和有限元分析,提出了K型管节点运用碳纤维布加固后静力承载力的计算公式。对于空间管节点,史曼瑜等^[4]和宋纪贵等^[5]分别对CFRP加固含腐蚀的TT型管节点和YY型管节点开展了试验研究,结果发现碳纤维布加固能够缓解管节点中主管相贯区域的应力集中现象。上述所提及的研究结果表明,FRP能够提高不同类型管节点的静力承载力,然而对FRP加固X形管节点的研究较少。NASSIRAEI等^[6]建立了FRP加固X形管节点有限元模型,研究了FRP长度、层数、缠绕方向和管节点几何尺寸对X形管节点静力承载力的影响,并提

出了极限承载力的预测公式。

根据《纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规范》(YB/T 4558—2016)^[7],对受损的构件加固前,需要移除上部荷载,确保构件在卸载的状态下进行加固修复。目前,承载状态下加固构件的研究主要围绕钢管和钢管混凝土构件展开。WEI等^[8-9]和XIONG等^[10-11]分别对承载状态下圆钢管短柱和圆钢管混凝土短柱采用单向碳纤维布加固后的静力承载力进行了试验测试和数值研究,结果表明承载状态下CFRP加固对极限承载力影响可以忽略,而对屈服承载力影响显著。毕欣等^[12]通过有限元软件ABAQUS对承载状态下CFRP加固含腐蚀圆钢管混凝土短柱的轴压性能进行了研究,发现初始承载对极限承载力无显著影响。服役中的导管架平台上部设备难以移除,管节点通常处于承载状态,承载下加固管节点的安全性受到重视,而对于承载状态下管节点的加固研究较少。常鸿飞等^[13]对负载下焊接环口板加固T型管节点承载力开展了试验研究,结果表明主管负载会降低管节点承载力,焊接和负载不会改变环口板加固T型管节点的破坏模式。

目前,尚未有学者对CFRP加固X形管节点的静力承载力开展试验研究,本文考虑到工程中管节点主管处于承载状态以及传统加固方法的局限性,研究了主管承载下CFRP加固X形管节点的轴压承载力。设计了4个X形管节点试件,完成了轴压加载试验,并对试验测试所得到的结果进行了分析。运用有限元软件ABAQUS建立了主管承载下CFRP加固X形管节点的有限元模型。相应的模型中考虑了X形管节点主管轴力的预施加,并基于生死单元法成功实现了对主管承载状态下X形管节点采用CFRP加固的模拟。将有限元模型模拟结果与试验测试结果进行对比,验证了提出的有限元建模方法的

可行性及模型的准确性。在此基础上,研究了初始承载率、支管与主管直径比、主管径厚比和CFRP缠绕层数对X形管节点承载力的影响,从而为该类型管节点在承载状态下采用碳纤维布加固提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文设计了4个X形管节点试件,编号分别为X-N0-0、X-N4-0、X-N6-0和X-N4-28。X-N0-0为未加固主管未承载的对照试件,X-N4-0和X-N6-0分别为采用4层和6层CFRP加固的主管未承载试件,X-N4-28为采用4层CFRP加固、初始承载率为28%的主管承载试件。利用初始承载率 η 来表征施加在主管上的初始预加荷载的大小。初始承载率 η 的计算公式如下:

$$\eta = \sigma_i / f_y \tag{1}$$

$$\sigma_i = N_i / A_s \tag{2}$$

式中: σ_i 为主管截面应力, N_i 为主管承受的预加荷载, A_s 为主管横截面积, f_y 为钢材的屈服强度。

所有试件尺寸保持一致,X形管节点试件几何尺寸如图1所示。根据《无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 17395—2008)^[14]中通用系列钢管规格和《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[15]中对管节点构造要求,确定主管直径 d_0 、支管直径 d_1 分别为114 mm和89 mm,主管壁厚 t_0 、支管壁厚 t_1 分别为4.5 mm和4 mm。为避免主管端部约束的影响^[16]以及防止支管长细比过大导致支管失稳,主管长度 l_0 、支管长度 l_1 分别为1 400 mm和280 mm。依据文献[8-11,13]对承载状态下钢管、钢管混凝土短柱、相贯节点试验研究的建议,并综合考虑加固方法以及安全性等方面因素,设计初始承载率为30% (实测主管初始承载率为28%)。试件的详细参数如表1所示,其中 n_{cf} 为CFRP层数。X形管节点中钢管材料为Q235B,根据规范^[17]完成了钢材的拉伸试验,试验结果见表2。试验所采用的碳纤维布的材料参数由生产厂商提供,如表3所示。

1.2 试件制备及加固方法

主管未承载和主管承载下CFRP加固X形管节点制备流程分别如下:

1) 主管未承载CFRP加固X形管节点的制备过程可

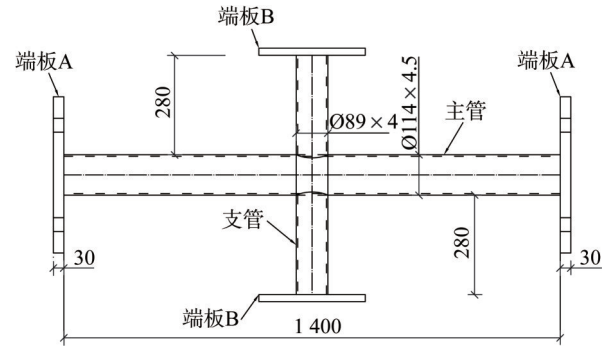


图1 X形管节点几何构造及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric construction and dimensions of tubular X-joint (unit: mm)

表1 试件详细参数

Table 1 Details of specimens

试件编号	$d_0 /$ mm	$t_0 /$ mm	$l_0 /$ mm	$d_1 /$ mm	$t_1 /$ mm	$l_1 /$ mm	n_{cf}	η
X-N0-0	114	4.5	1 400	89	4	280	0	0
X-N4-0	114	4.5	1 400	89	4	280	4	0
X-N6-0	114	4.5	1 400	89	4	280	6	0
X-N4-28	114	4.5	1 400	89	4	280	4	28%

表2 钢材材料属性

Table 2 Material properties of steel materials

试件类型	弹性模量 $E_s /$ GPa	屈服强度 $f_y /$ MPa	极限强度 $f_u /$ MPa
主管	186	307	475
支管	176	317	479

以分为以下三个阶段:(1)表面处理阶段。采用粒度为125 μm 的砂纸对钢管表面进行打磨,去除表面铁锈以及氧化层,确保钢管粘贴界面清洁。(2)碳纤维布粘贴加固阶段。先按照预先设定的尺寸对碳纤维布进行裁剪,其次在表面处理干净的X形管节点试件的碳纤维布粘贴位置处刷上按照比例配制好的碳纤维胶,最后粘贴碳纤维布。粘贴时确保碳纤维布与钢表面无空洞和气泡。(3)养护阶段。粘贴碳纤维布的加固后X形管节点试件在室温条件下静置养护,确保碳纤维布粘贴牢固。

2) 主管承载下CFRP加固X形管节点的制备过程可以分为以下四个阶段:(1)表面处理阶段。(2)主管承载

表3 CFRP材料属性

Table 3 Material properties of CFRP

材料类型	受拉弹性模量 $E_{cf} /$ GPa	拉伸强度 $f_{cf} /$ MPa	拉断伸长率 $\epsilon_{cf} /$ %	单层厚度 $t_{cf} /$ mm
CFRP	238	2 549	1.41	0.167

阶段。(3) 碳纤维布粘贴加固阶段。(4) 养护阶段。除了主管承载阶段,其余阶段制备过程与主管未承载CFRP加固X形管节点保持一致。为了使得X形管节点主管处于承载受压状态,本研究采用螺杆锚固的方式对主管施加轴压荷载。具体主管预加轴压荷载的施加步骤如下:第一步,对未加固试件的主管进行加压,到达预估荷载时保持试验机压力不变,如图2a);第二步,将中部连接拉力传感器的高强螺杆穿过主管端板预留孔洞,端部用螺母拧紧,如图2b);第三步,试验机卸载,螺杆力持续增长,当试验机完全卸载后,完成主管轴压荷载的施加,如图2c)。此时,拉力传感器荷载总和,即为高强螺杆对X形管节点主管施加的轴压荷载。

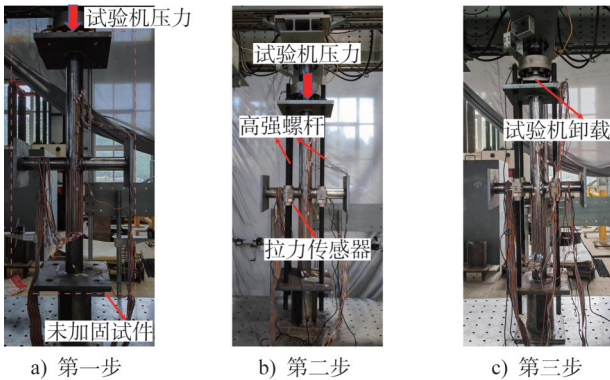


图2 主管承载试件制作过程

Fig. 2 Fabrication process of preloaded specimen

碳纤维布加固长度是根据傅宇光等^[18]所提出碳纤维增强复合材料加固金属管节点主管粘贴长度、支管粘贴长度计算公式来确定。主管粘贴长度 L_{cfp1} 、支管粘贴长度 L_{cfp2} 计算公式如下:

$$L_{cfp1} \geq K \sqrt{DT} + d / \sin \theta + g \quad (3)$$

$$L_{cfp2} \geq L_e + d \cot \theta \quad (4)$$

式中: K 为加固系数,对于碳纤维布加固钢管节点,建议取值为 $10^{[18]}$; L_e 为FRP与金属结构之间的有效粘贴长度,对于碳纤维布加固,建议取值为 $120 \text{ mm}^{[18]}$; g 为间隙长度,试验中无间隙。

根据计算结果以及建议取值,综合考虑碳纤维布的裁剪、碳纤维布的粘贴等因素,确定试验中主管粘贴长度 $L_{cfp1}=500 \text{ mm}$,支管粘贴长度 $L_{cfp2}=140 \text{ mm}$ 。CFRP加固方向及加固长度,如图3所示。试验中CFRP的粘贴层数以及粘贴方向如表4所示。

1.3 试验装置及加载方案

主管承载下CFRP加固X形管节点轴压试验的试验装置分为液压加载装置和数据采集装置。液压加载装置

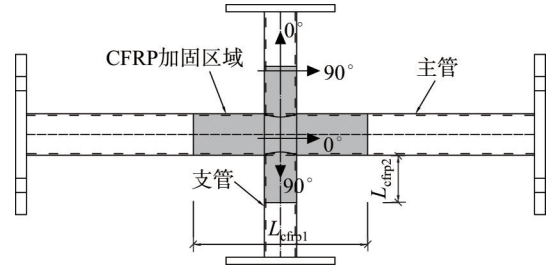


图3 CFRP粘贴示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CFRP wrapping

表4 CFRP方向和加固方案

Table 4 CFRP orientation and reinforcing scheme

试件编号	铺设方向/ $^{\circ}$	铺设层数	总铺设厚度/mm
X-N4-0	主管 0/90/0/90	4	0.668
	支管 0/90/0/90	4	0.668
X-N6-0	主管 0/90/0/90/0/90	6	1.002
	支管 0/90/0/90/0/90	6	1.002
X-N4-28	主管 0/90/0/90	4	0.668
	支管 0/90/0/90	4	0.668

采用量程为 500 kN 的结构力学试验装置,作动器轴向量程为 200 mm 。数据采集装置采用uT7116Y静态应变仪。主管轴向压力由拉力传感器测定。试件下部支管端板放置在试验机下横梁台面上,确保实现对中安装,如图4所示。

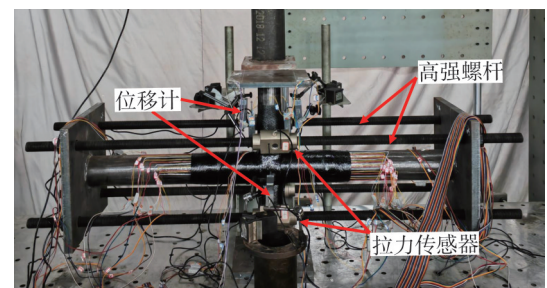


图4 试验装置

Fig. 4 Test setup

在正式加载之前,对试件进行预加载(取有限元预模拟试件极限承载力的 5%)^[13],确保位移计和应变花数据采集正常,同时消除安装间隙。正式加载过程中,在弹性阶段,采用荷载控制的方式对试件加载,以每级荷载增量为 $1/10$ 的有限元预估极限承载力对试件加压^[19],每级加载完成后持载 1 min 。当支管施加的压力达到极限承载力的 80% 后,再采用位移控制加载,对X形管节点试件以 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加载速率加压,直至管节点相贯区域出

现明显的塑性变形或CFRP断裂时终止加载。加载完成后逐步卸载,最终完成试验。

1.4 测点布置

图5为位移计和应变花的布置示意图。6个三轴应变花粘贴在X形管节点相贯区域主管的上部表面,用于监测X形管节点在支管轴压时应变发展。在施加荷载的上支管端板两侧安装位移计(LVDT)D1和D2,用于监测加载端的竖向位移;在鞍点正下方主管的侧面侧壁中心位置布置两个位移计D3和D4,用于监测主管侧壁变形;在主管和支管相贯区域的主管上表面布置两个位移计D5和D6,用于监测管节点相贯区域主管的凹陷变形。所有试件的应变花和位移计布置保持一致。

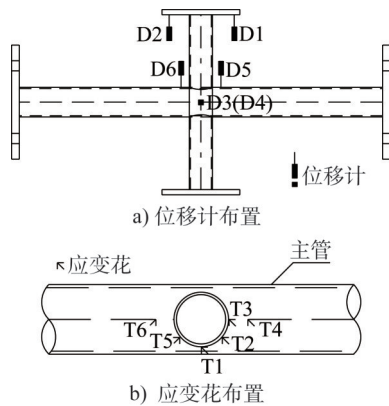


图5 位移计和应变花布置

Fig. 5 Arrangement of LVDTs and strain rosettes

2 试验结果分析

2.1 失效模式

四个X形管节点试件在支管轴压作用下的失效模式如图6所示。未加固试件X-N0-0在轴压荷载作用下的失效模式为主管椭圆化及相贯区域局部凹陷,说明管节点相贯区域形成封闭的塑性铰线而发生了转动,X形管节点失去了抵抗荷载的能力。CFRP加固试件X-N4-0和X-N6-0的失效模式为鞍点附近碳纤维断裂、主管椭圆化及相贯区域发生局部凹陷。与未加固试件失效模式相比(图6a)),CFRP加固后的试件主管椭圆化变形和管节点相贯区域的主管凹陷程度较小(图6b)~d)),说明CFRP对X形管节点主管提供了约束作用。轴压试验过程中,X-N4-0试件出现胶层和纤维断裂时,荷载为100 kN,而X-N6-0试件出现胶层和纤维断裂时,轴压荷载为120 kN。加固试件出现断裂声后,随着荷载持续施加,主管靠近相贯区域发生局部凹陷。最终加固试件达到极限承载力时,主管相贯区域局部形成塑性区域发生转动,失去抵抗荷载的能力。主管承载下CFRP加固X

形管节点试件X-N4-28失效模式也是鞍点附近CFRP断裂,主管椭圆化以及相贯区域发生局部凹陷,说明主管承载不会改变管节点的失效模式。

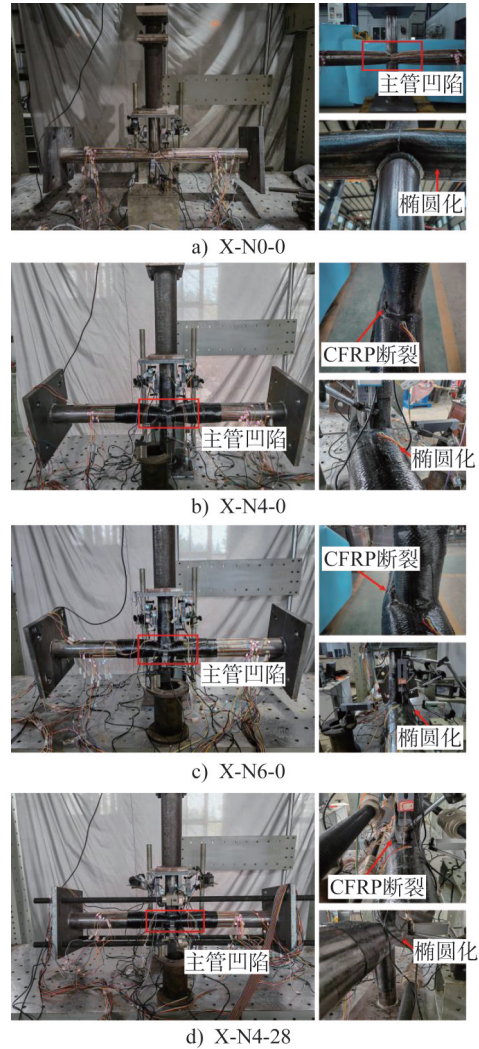


图6 X形管节点试件失效模式

Fig. 6 Failure modes of tubular X-joints

2.2 荷载-位移曲线

支管轴压作用下,四个X形管节点试件的荷载-位移曲线如图7所示。结果表明,X形管节点轴压试验加载过程可以分为四个阶段。第一阶段:加载初始阶段,试件荷载随着加载端竖向位移呈线性增长趋势,此时轴压荷载较小,主管钢材处于弹性范围。第二阶段:X形管节点试件的轴压荷载随着加载端位移呈非线性响应,相贯区域塑性发展,荷载增速变慢,主管局域出现微小的凹陷变形。第三阶段:X形管节点试件荷载呈水平趋势但加载端位移发展迅速,随着荷载持续增长,凹陷变形沿着X形管节点主管轴向不断扩展,主管侧壁的鼓曲变形持续增加,进一步导致主管椭圆化变形加剧。第四

阶段:试件荷载随着加载端竖向位移增长呈下降趋势,管节点区域塑性持续发展,主管相贯区域形成封闭的塑性铰线发生转动,管节点试件失去抵抗荷载的能力,试件承载力下降。

为研究CFRP加固对X形管节点承载力的影响,图7a)为主管未承载下不同CFRP层数加固试件的荷载-位移对比图。结果表明,CFRP能够提高X形管节点的刚度,增加碳纤维布粘贴层数,刚度提升更为显著。提取出相应曲线中X形管节点试件的极限承载力数据,试件X-N0-0、X-N4-0、X-N6-0的极限承载力分别为125.4 kN、149.2 kN、159.4 kN。比较极限承载力发现,当CFRP加固层数从4层增加到6层,极限承载力提升率从19.6%增加到27.6%。

为探究主管承载对管节点轴压承载力的影响,未加固试件X-N0-0、主管未承载CFRP加固试件X-N4-0以及主管承载CFRP加固试件X-N4-28的荷载-位移曲线如图7b)所示。试件X-N4-28和试件X-N4-0刚度无差距,表明主管承载或未承载状态下对管节点采用CFRP加固,均能显著延缓管节点失效。X-N4-28的极限承载力略小于X-N4-0的极限承载力,表明在28%的初始承载率下,主管承载对CFRP加固效果影响较小。主管承载下CFRP加固管节点与未承载CFRP加固管节点区别主要在加载过程中的第二阶段。此阶段,随着加压端支管向下加载,X形管节点相贯区域凹陷变形,该变形与沿着主管轴向的轴压荷载形成附加弯矩,使得管节点主管相贯区域更容易失效。由于相贯区域在支管轴压作用下的凹陷较小,主管承载的不利影响仅造成CFRP加固后的管节点承载力下降3.2%。

2.3 应变分析

管节点的轴压失效过程可通过测点位置处应变花监测的应变发展进行分析。等效应变用于比较不同应变状态下的变形,其表达式为^[20]:

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \quad (5)$$

式中: ϵ_e 为等效应变, ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 为测点位置的主应变。主管表面为自由面,因此处于平面应力状态,即主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 表达式如下:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ} - \epsilon_{45^\circ}}{2}\right)^2} \quad (6)$$

式中: ϵ_{0° 、 ϵ_{45° 、 ϵ_{90° 分别为 0° 方向、 45° 方向、 90° 方向应变。将测点位置所采集的3个方向线应变带入式(6)得到测点表面的主应变,将主应变带入式(5),即得到等效应变。四个X管节点试件的等效应变发展曲线如图8所示,图

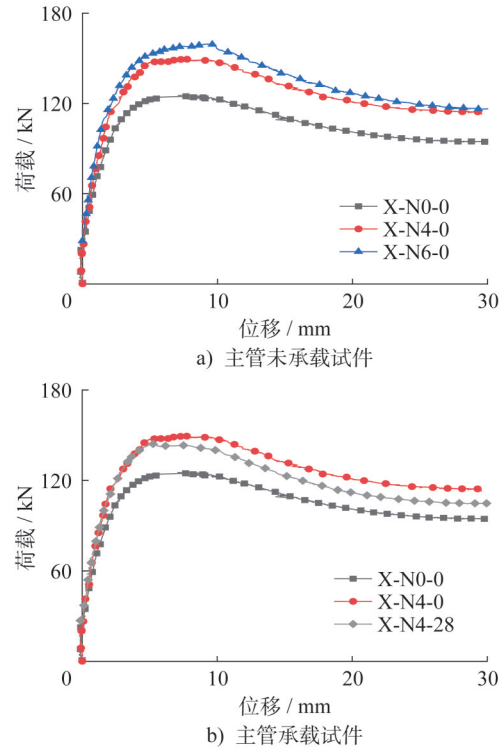


图7 X形管节点试件荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of tubular X-joints

中红色虚线代表钢材屈服应变。

对比X-N0-0、X-N4-0、X-N6-0三个试件在30、45、60、75、90、105、115 kN和试件极限承载力时应变测点的等效应变,可以看出位于相贯区域冠点和鞍点之间的测点(T2和T5)在支管轴压作用下首先进入屈服。支管轴压作用下达到X形管节点极限承载力时,测点数据所计算的等效应变都超过试件主管钢材实测屈服应变。此外,三个试件受到小于115 kN轴压荷载时,CFRP加固试件的测点应变均小于未加固试件,T5测点除外(试件X-N4-0失效模式表明,在轴压荷载超过100 kN后陆续出现胶层破坏,T5测点应变陡增可能是局部胶层破坏所导致。试件X-N4-0和X-N6-0在达到极限承载力时T5测点应变数据缺失,是因为该区域胶层破坏引起应变片损坏)。加固层数越多的试件,测点等效应变越小。说明CFRP对管节点主管相贯区域的变形产生了约束作用,随着碳纤维布层数的增加,其对主管提供的约束作用增强。与未加固试件相比,CFRP加固试件相贯区域主管应变发展缓慢,CFRP加固延缓了相贯区域钢材屈服,从而有效地提高了管节点的承载力。

主管未承载和承载试件在各级轴压荷载作用下等效应变发展如图8b)、图8d)所示。在60 kN荷载下,主管承载与未承载试件主管表面测点应变相近;而在75、90 kN时,主管承载下CFRP加固试件大部分测点位置应变略大于未承载CFRP加固试件的应变。当荷载超

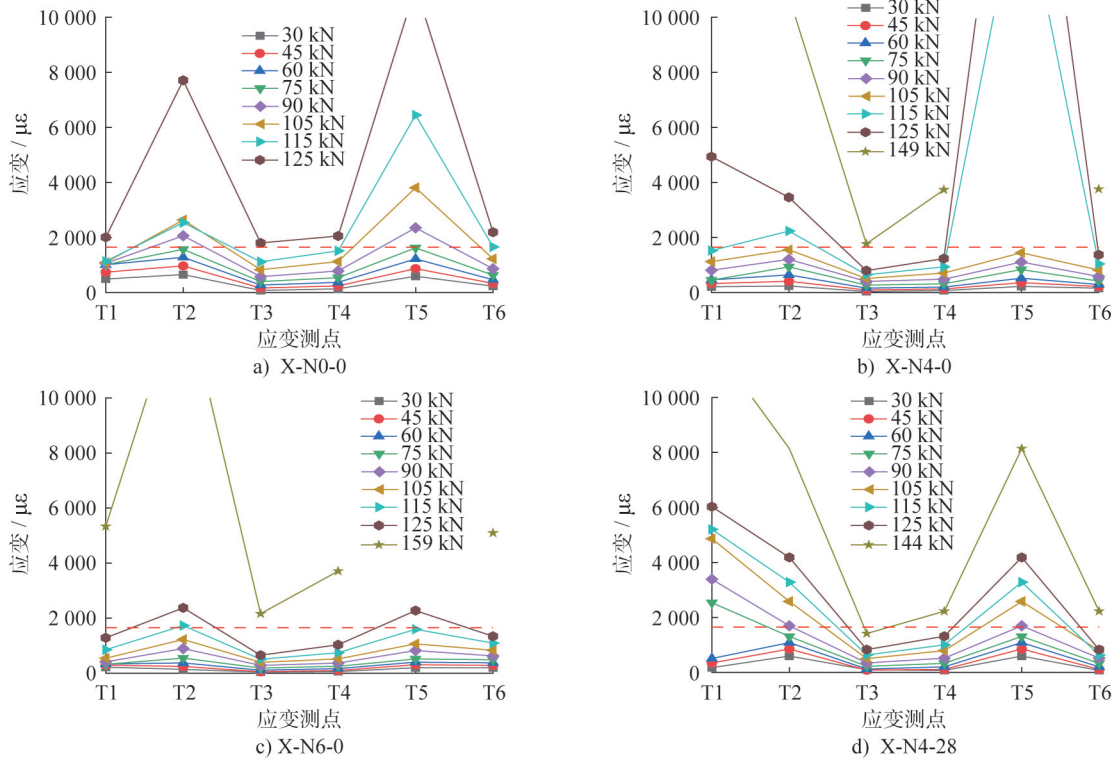


图8 X形管节点应变分布曲线

Fig. 8 Strain distribution curves of tubular X-joints

过 105 kN 后,主管承载试件应变增幅较大,测点位置的等效应变均显著大于未承载试件。主管管壁在支管轴压作用下处于面外受拉状态,由于主管轴向荷载的施加,主管承载试件的相贯区域主管表面处于复杂多向应力状态。随着支管轴压荷载持续增大,主管承载管节点应变发展速度加快,使主管承载试件相贯区域塑性变形急剧增大。因而主管承载 CFRP 加固 X 形管节点试件在较小的轴压荷载下形成塑性铰线,管节点承载力低于未承载的试件。

2.4 主管承载下 CFRP 加固 X 形管节点螺杆力分析

通过拉力传感器采集主管承载下 CFRP 加固 X 形管节点试件螺杆力,螺杆力在支管轴压作用下变化情况如图 9 所示。在构件达到其极限承载力之前,螺杆对 X 形管节点主管施加的轴压荷载略微降低。这表明,采用高强螺杆对主管施加轴向压力,能够使得 X 形管节点主管处于稳定的承载状态。拉力传感器数值在试件达到其极限承载力之后,会逐渐下降。原因是构件在达到其极限承载力之后,变形持续增大。相贯区域的局部凹陷变形会引起主管轴向长度缩短,试件主管两端端板会产生靠近相贯区的位移,进而导致螺杆收缩,螺杆力逐渐减小。

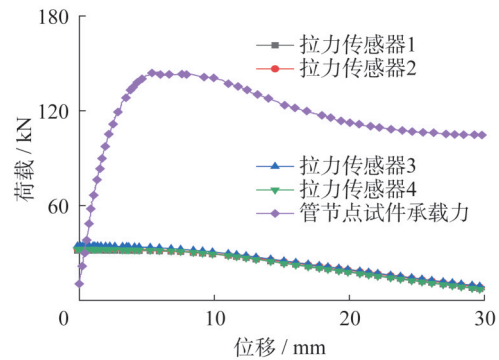


图9 主管承载下 CFRP 加固 X 形管节点试件螺杆力
Fig. 9 Bolt forces of tubular X-joint strengthened with CFRP under chord pre-load

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

3.1.1 材料属性

有限元模型中钢材的材料属性采用表 2 实测值,真实应力 σ_{true} 和对数塑性真应变 ϵ_{true}^{pl} 通过式 (7) 和式 (8) 计算,表达式如下:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \quad (7)$$

$$\epsilon_{true}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (8)$$

式中: σ_{nom} 为名义应力, ϵ_{nom} 为名义应变。

本研究中使用的 CFRP 是单向碳纤维布,其弹性阶

段拉伸行为采用ABAQUS中的“lamina”模型定义,有限元模型中选用Hashin准则来预测碳纤维增强复合材料的损伤起始^[21-22]。在有限元模型中CFRP刚度的退化是一个逐渐进行的过程,其损伤起始以及损伤演化相关的参数由文献[19,23]确定。

3.1.2 边界条件与相互作用

有限元模型中设定的边界条件与试验边界条件保持一致。模型中的下支管端板完全固定,限制住所有方向上的位移以及转动,沿着支管轴向对上支管端板施加轴压荷载。所建立的有限元模型中的边界约束条件如图10所示。试验中CFRP未发生分层和脱粘,认为CFRP与钢材表面粘接良好,根据文献[23]建议,采用绑定约束来模拟CFRP与钢材的相互作用。

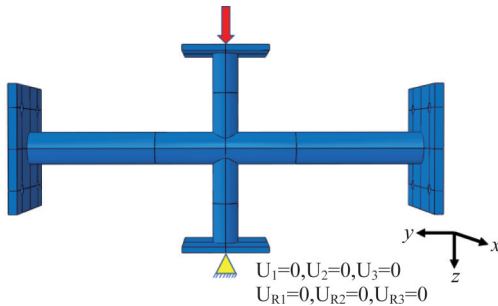


图10 边界约束

Fig. 10 Boundary conditions

3.1.3 单元选取和网格划分

有限元模型中钢管采用实体单元C3D8R建模;CFRP采用膜单元M3D4R建模,该单元类型被证实可以较为准确地模拟CFRP力学性能^[12,24]。综合考虑计算效率以及精度的影响,经过缜密的有限元模型网格收敛性分析,确定管节点试件整体网格划分尺寸为10mm,在受力复杂且为重点分析的区域(即主管与支管相贯区域)加密至6mm,CFRP网格划分尺寸与相贯区域网格保持一致,采用6mm的网格。图11为CFRP加固X形管节点所建立的模型中X形管节点以及CFRP的网格划分示意图(红色字体表示加密区域宽度)。

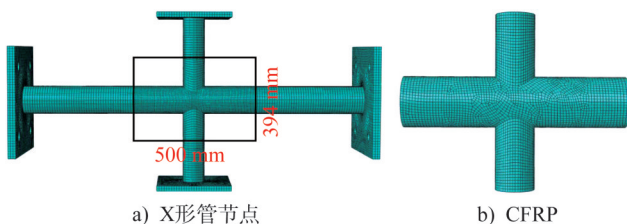


图11 X形管节点和CFRP的网格划分

Fig. 11 Mesh of tubular X-joint and CFRP in the FEM

3.1.4 主管承载下CFRP加固X形管节点有限元模型处理

主管承载下CFRP加固X形管节点的有限元模型需关注两点:(1)螺杆力在轴压试验过程中的变化发展;(2)主管承载状态下,CFRP对管节点进行加固。

为了准确模拟螺杆力变化发展情况,需要在主管未承载CFRP加固X形管节点的模型中加入螺杆。由于模型中增添了螺杆,需要考虑螺杆表面与主管端板孔洞内壁之间相互作用、螺帽与主管端板之间相互作用。以上两种相互作用采用面与面接触,运用ABAQUS中的硬接触定义接触面之间的法向作用,采用罚函数法定义其切向作用,默认采用库仑摩擦模型,摩擦系数采用文献[25]中的建议取值0.25。

与主管未承载CFRP加固X形管节点相比,主管承载下CFRP加固X形管节点在正式加载之前,主管要承受螺杆提供的预加轴向压力,此阶段(即试件制备过程中的主管承载阶段)未进行碳纤维布的粘贴。主管预加轴向压缩荷载后(即试件制备过程中的主管承载阶段后),碳纤维布粘贴进行加固。“MODEL CHANGE”功能用于模拟主管承载下CFRP加固的X形管节点的轴压过程,该功能的实质是改变CFRP的单元刚度。在主管承载阶段,CFRP单元刚度乘以一个微小系数,以忽略CFRP的贡献,即CFRP被移出。主管承载后CFRP加固阶段,微小系数被去掉,CFRP对管节点产生约束作用,即有限元模型中CFRP被重新激活。

3.2 有限元模型的验证

有限元模拟得到的四个X形管节点试件的荷载-位移曲线与试验对比,如图12所示。从图中可以看出,有限元模拟曲线与试验曲线吻合较好。此外,表5为试验与有限元模拟分别所得到的管节点试件的极限承载力。对比所得到的结果误差均在5%以内,验证了有限元模型的准确性。

提取有限元模型中的失效模式与试验的失效模式对比,如图13所示。未加固试件失效区域为管节点相贯区域,相贯区域产生凹陷变形。随着荷载增大,主管侧壁发生鼓曲呈椭圆化,相贯区域凹陷形状、主管椭圆化与试验测试结果大致相同。X-N4-0、X-N6-0试件相贯区域主管表面凹陷变形,鞍点附近CFRP断裂,说明试件在该位置有较大的应力集中。加固试件主管侧壁鼓曲变形较小,说明CFRP对主管径向变形提供了约束作用。主管承载未改变管节点轴压失效模式。

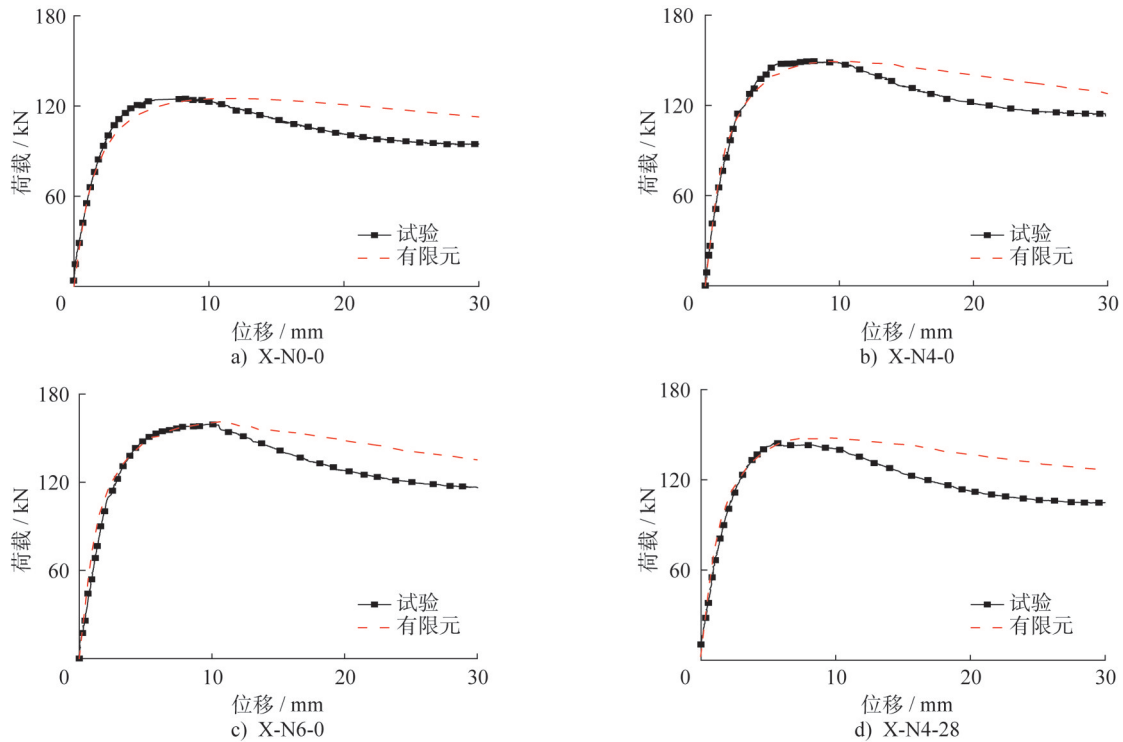


图12 X形管节点试验及有限元荷载-位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of load-displacement curves between test and FEA of tubular X-joints

表5 试验及有限元极限承载力结果对比

Table 5 Comparison of ultimate loading capacities between test and FEA

试件编号	试验值 $N_{e,u}/\text{kN}$	有限元模拟值 $N_{fe,u}/\text{kN}$	$N_{e,u}/N_{fe,u}$
X-N0-0	125.4	125.1	1.002
X-N4-0	149.2	149.5	0.998
X-N6-0	159.4	159.9	0.997
X-N4-28	144.5	148.1	0.976
平均值			0.993

为验证主管承载状态下CFRP加固X形管节点模型的准确性,提取了有限元模型中螺杆力数值,与轴压试验中拉力传感器检测的螺杆力变化对比,如图14所示。结果表明,螺杆力在构件达到极限承载力之前略微降低;达到试件极限承载力后,随着支管轴压荷载的持续施加,螺杆力逐渐下降。有限元模型中螺杆力的变化情况与试验中观察到的拉力传感器数值变化情况一致。说明建立的有限元模型能够较好地模拟主管承载下CFRP加固X形管节点在轴压作用下螺杆力的变化情况。

将试验以及有限元所得到的荷载-位移曲线、试件轴压承载力、失效模式以及主管承载下CFRP加固X形管

节点中螺杆力的发展对比可知,建立的有限元模型能够较为准确地模拟主管承载或未承载下CFRP加固X形管节点的轴压失效过程。

3.3 参数分析

为了研究各种参数对主管承载下CFRP加固X形管节点承载力的影响,基于验证后的有限元模型,对CFRP加固承受主管轴力作用的X形管节点的静力承载力进行参数分析。参数分析中有限元模型的主管直径与试验保持一致为114 mm,主支管夹角为 90° ;钢材和CFRP的材料参数与1.1节中试验的材料参数保持一致。参数分析中考虑的参数包括:初始承载率 $\eta(\eta=\sigma_i/f_y)$ 、支管与主管直径比 $\beta(\beta=d_1/d_0)$ 、主管的径厚比 $\gamma(\gamma=d_0/2t_0)$ 和CFRP粘贴层数 n_{cf} 。有限元模型中各种参数的变化范围如表6所示,参数 β 和 γ 的变化分别是通过改变支管直径和主管壁厚来实现的。

不同初始承载率下,各种参数对CFRP加固承受主管轴力作用的X形管节点的静力承载力的影响如图15所示。从图15a)、15b)和15c)中可以看出,不同参数条件下,随着初始承载率 η 的增加,管节点承载力的变化情况是基本一致的,即X形管节点的承载力随着 η 的增加而降低。图15a)表明,CFRP加固X形管节点的承载力随着 β 值的增加而增大。此外,对于 $n_{cf}=4, \gamma=12.66$ 时,当

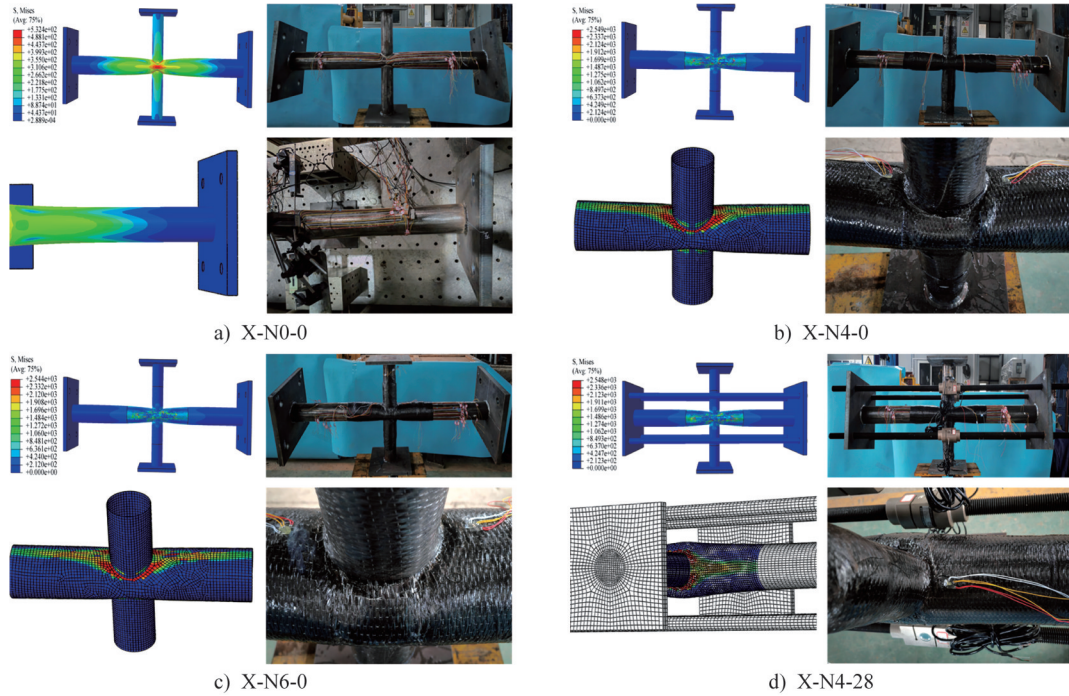


图 13 X形管节点失效模式对比

Fig. 13 Comparison of failure modes between test and FEA of tubular X-joints

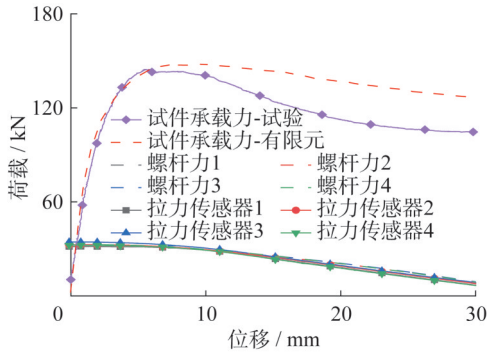


图 14 有限元模型中试件螺杆力发展

Fig. 14 Bolt force development of specimens in FEM

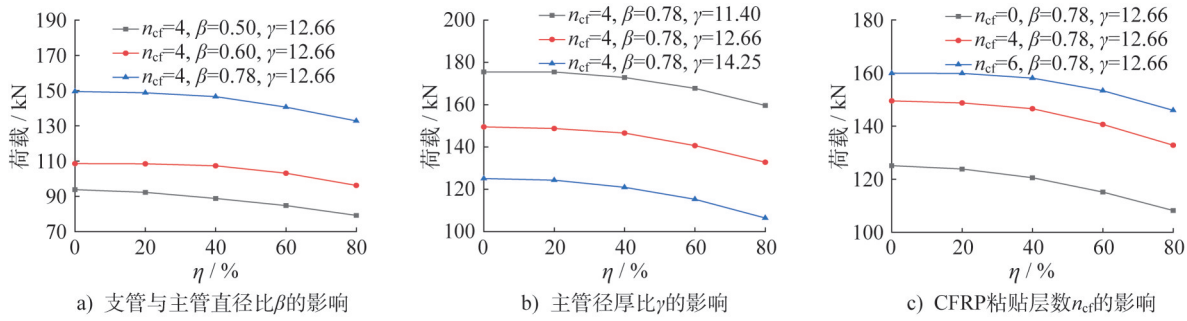
表 6 有限元模型的参数变化范围

Table 6 Parameter ranges of FEM

参数类别	参数	取值范围
初始承载率参数	η	20%、40%、60%、80%
管节点几何参数	β	0.5、0.6、0.78
	γ	11.4、12.66、14.25
CFRP 粘贴参数	n_{cf}	4、6

初始承载率从 20% 增加到 80% 时, $\beta=0.5$ 的管节点承载力下降了 14.2%, 随着 β 的增加, $\beta=0.6$ 和 $\beta=0.78$ 的管节点承载力分别下降了 11.3% 和 10.7%。结果表明, 随着 β 的增加, 主管初始承载对管节点承载力降低的影响

越小。这是由于, 在主管直径一定的情况下, β 越大, 支管管径越大。支管管径越大的管节点在承受相同的轴压荷载时, 管节点相贯区域向下凹陷越小, 进而在同样的主管轴力作用下, 形成的附加弯矩越小, 导致管节点承载力降低得越少。图 15b) 表明, 随着 γ 值增大, CFRP 加固管节点的承载力降低。 γ 值越大, 意味着在相同的主管直径的情况下, 主管的壁厚越小, 壁厚越小的管节点承载力越低。另一方面, 随着 γ 的增加, 主管初始承载对管节点承载力降低的影响越显著。对于 $n_{cf}=4, \beta=0.78$ 时, 当初始承载率从 20% 增加到 80% 时, $\gamma=11.4$ 的构件承载力下降了 9.3%, 而 $\gamma=12.66$ 和 $\gamma=14.25$ 的管节点承载力分别下降了 10.7% 和 11.4%。主管壁厚减小导致管节点在承受相同轴压荷载时, 相贯区域凹陷增加, 所形成的附加弯矩越大, 管节点承载力下降得越多。图 15c) 表明, CFRP 能够显著提高管节点的承载力。对于 $\beta=0.78, \gamma=12.66$ 时, 当初始承载率从 20% 增加到 80% 时, $n_{cf}=0$ 的管节点承载力下降了 12.6%, 随着 n_{cf} 的增加, $n_{cf}=4$ 和 $n_{cf}=6$ 的管节点承载力分别下降了 10.7% 和 8.7%。结果表明, 随着 CFRP 加固层数 n_{cf} 的增加, 主管承载对管节点承载力降低的影响可得到补偿, 主要是由于 CFRP 能够为管节点相贯区域提供更多的约束, 在支管轴压作用下缠绕 CFRP 层数越多的管节点凹陷变形越小, 主管轴压荷载引起的附加弯矩较小, X 形管节点承载力下降也就越少。

图15 不同初始承载率 η 下各种参数对X形管节点承载力的影响Fig. 15 Influence of varying parameters on bearing capacity of tubular X-joints under different initial loading percentage η

4 结论

本文通过试验研究了主管承载下CFRP加固X形管节点的轴压承载力,并建立了相应的数值模型,研究结果如下:

(1) 未加固的X形管节点承受轴压荷载的失效模式为主管相贯区域局部凹陷。CFRP加固试件的失效模式为靠近鞍点附近CFRP发生断裂,主管相贯区域呈椭圆化且发生凹陷变形。主管承载未改变CFRP加固X形管节点的失效模式。

(2) 采用CFRP加固X形管节点可以有效地提升试件的轴压承载力,碳纤维布加固层数越多,承载力提升幅度越大。相较于未加固试件,CFRP加固层数从4层增加到6层时,极限承载力提升率从19.2%增长到27.2%。

(3) 主管初始承载率为28%时,主管承载对CFRP加固效果影响较小,与主管未承载CFRP加固试件相比,轴压承载力仅下降3.2%。

(4) 所建立的有限元模型考虑了X形管节点在主管未承载或承载状态下CFRP的加固,模型计算结果与试验结果吻合良好。

(5) 参数分析表明:随着初始承载率的增加,管节点承载力均降低。CFRP加固能够补偿主管承载对管节点承载力降低的影响,缠绕CFRP层数越多,承受主管轴力作用的X形管节点承载力下降越少。

参考文献:

- [1] LESANI M, BAHAAARI M R, SHOKRIEH M M. Experimental investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 243-252. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.097.
- [2] HOSSEINI A S, BAHAAARI M R, LESANI M, et al. Static load-bearing capacity formulation for steel tubular T/Y-joints strengthened with GFRP and CFRP [J]. Composite Structures, 2021, 268: 113950. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113950.
- [3] FU Y G, TONG L W, HE L, et al. Experimental and numerical

investigation on behavior of CFRP-strengthened circular hollow section gap K-joints [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 102: 80-97. DOI: 10.1016/j.tws.2016.01.020.

- [4] 史曼瑜, 邵永波, 杨冬平. 碳纤维复合材料(CFRP)加固含腐蚀缺陷的TT型管节点静力性能研究 [J]. 应用力学学报, 2020, 37 (3): 959-968, 1383-1384. DOI: 10.11776/cjam.37.03.B007.
- SHI Manyu, SHAO Yongbo, YANG Dongping. Static performance of CFRP-strengthened tubular TT-joints with corrosion defects [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37 (3): 959-968, 1383-1384. DOI: 10.11776/cjam.37.03.B007. (in Chinese)
- [5] 宋纪贵, 邵永波, 杨冬平. 碳纤维增强聚合物加固含腐蚀缺陷的YY型管节点静力性能分析 [J]. 中国海上油气, 2020, 32 (2): 171-179. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2020.02.021.
- SONG Jigui, SHAO Yongbo, YANG Dongping. Static behavior analysis of using carbon fiber reinforced polymer to enhance the YY-type tubular joints with corrosion defects [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32 (2): 171-179. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2020.02.021. (in Chinese)
- [6] NASSIRAEI H, REZADOOST P. Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load [J]. Engineering Structures, 2021, 236: 112041. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112041.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 纤维增强复合材料加固修复钢结构技术规程: YB/T 4558—2016 [S]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technical Specification for Strengthening Steel Structures with Fiber Reinforced Polymer: YB/T 4558—2016 [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [8] WEI C, SHAO Y B, CHEN C, et al. Axial compressive strength of preloaded CHS stubs strengthened by CFRP [J]. Marine Structures, 2022, 84: 103242. DOI: 10.1016/j.marstruc.2022.103242.
- [9] WEI C, SHAO Y B, HASSANEIN M F, et al. Static strengths of preloaded circular hollow section stub columns

- strengthened with carbon fiber reinforced polymer [J]. *Steel and Composite Structures*, 2023, 47 (4) : 455-466. DOI: 10.12989/scs.2023.47.4.455.
- [10] XIONG C N, SHAO Y B, TONG L W, et al. Static strength of CFRP-strengthened preloaded circular concrete-filled steel tube stub columns, Part I: Experimental test [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184 : 110546. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110546.
- [11] XIONG C N, SHAO Y B, TONG L W, et al. Static strength of CFRP-strengthened preloaded circular concrete-filled steel tube stub column columns-Part II: Theoretical and numerical analysis [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184 : 110547. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110547.
- [12] 毕欣, 邵永波, 熊川楠, 等. CFRP加固承载状态下含腐蚀圆钢管混凝土轴压短柱力学性能研究 [J]. *建筑钢结构进展*, 2022, 24 (12) : 55-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.12.006.
- BI Xin, SHAO Yongbo, XIONG Chuannan, et al. Mechanical properties of CFRP-strengthened concrete-filled circular steel tubular stubs with corrosion under initial axial loading [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24 (12) : 55-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.12.006. (in Chinese)
- [13] 常鸿飞, 李照伟, 任腾龙, 等. 负载下环口板焊接加固 T 形钢管相贯节点试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(6) : 212-221, 234. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0092.
- CHANG Hongfei, LI Zhaowei, REN Tenglong, et al. Experimental study on compressive behavior of reinforcing CHS T-joints with welding collar plates when in service [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44 (6) : 212-221, 234. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0092. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差: GB/T 17395—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Dimensions Shapes Masses and Tolerances of Seamless Steel Tubes: GB/T 17395—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] NASSIRAEI H, ZHU L, LOTFOLLAHI-YAGHIN M A, et al. Static capacity of tubular X-joints reinforced with collar plate subjected to brace compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119 : 256-265. DOI: 10.1016/j.tws.2017.06.012.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products: ASTM A370-2017 [S]. Portland: American Society for Testing and Materials, 2017.
- [18] 傅宇光, 童乐为, 周海明. 一种采用纤维增强复合材料加固金属管节点的方法: CN201510174183.3 [P]. 2017-11-10.
- FU Yuguang, TONG Lewei, ZHOU Haiming. Method for reinforcing metal tube joint by means of fiber reinforced polymers (FRPs): CN201510174183.3 [P]. 2017-11-10. (in Chinese)
- [19] 王东锋, 邵永波, 欧佳灵. CFRP加固含腐蚀缺陷圆钢管混凝土短柱轴压承载力试验研究 [J]. *工程力学*, 2021, 38(10) : 188-199. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.10.0732.
- WANG Dongfeng, SHAO Yongbo, OU Jialing. Experimental study on axial compressive capacity of corroded concrete filled circular cfrp-steel tube stubs [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38 (10) : 188-199. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.10.0732. (in Chinese)
- [20] CHEN Y, FENG R, WANG C Y. Tests of steel and composite CHS X-joints with curved chord under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99 : 423-438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.05.011.
- [21] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47 (2) : 329-334. DOI: 10.1115/1.3153664.
- [22] VALDIVIA I, CANALES C, TUNINETTI V, et al. Numerical prediction of failure in unidirectional fiber reinforced composite [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2021, 13 (6) : 2150073. DOI: 10.1142/s1758825121500733.
- [23] SHIN D K, KIM H C, LEE J J. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three point bending [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56 : 397-407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.030.
- [24] 宋生志, 魏建军, 陈成. 碳纤维布 (CFRP) 加固 T 形圆钢管节点的静力性能研究 [J]. *建筑钢结构进展*, 2015, 17(2) : 57-64. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2015.02.009.
- SONG Shengzhi, WEI Jianjun, CHEN Cheng. A study on the performance of tubular T-joints strengthened with CFRP subjected to monotonic loading [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2015, 17 (2) : 57-64. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2015.02.009. (in Chinese)
- [25] 王卫永, 张亿发. 高温下高强钢连接的高强螺栓预紧力研究 [J]. *建筑钢结构进展*, 2023, 25 (6) : 51-57, 74. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.006.
- WANG Weiyong, ZHANG Yifa. A study on the preload in high-strength bolts for high-strength steel connection at elevated temperatures [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2023, 25 (6) : 51-57, 74. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.006. (in Chinese)