

# 不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受拉承载力研究

郑宝锋<sup>1,2</sup>, 吴步宸<sup>2</sup>, 张 奎<sup>3</sup>, 王嘉昌<sup>2</sup>, 舒贻平<sup>1,2</sup>, 蒋庆林<sup>4</sup>

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;  
3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 江苏东阁不锈钢制品有限公司, 江苏 盐城 224000)

**摘要:** 随着不锈钢结构的广泛应用, 不锈钢相贯节点越来越多地用于建筑结构中。然而, 不锈钢圆管相贯节点的性能和设计方法却鲜有研究。考虑几何因素和弦杆预加载荷对节点承载力的影响, 共对 6 个 T 形和 3 个 Y 形不锈钢圆管相贯节点, 进行了支管受拉承载力试验研究。获得了材料性能、破坏模式、节点承载力和载荷-变形曲线。试验结果表明: T 形、Y 形节点的破坏模式相似, 均为节点域弦杆的塑性变形。基于试验结果建立了节点有限元分析模型, 经试验验证后进行了参数化分析, 以研究支管受力状态对节点承载力的影响。数值分析结果表明: 不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受拉承载力始终大于支管受压承载力。基于国内外设计规范中支管受拉与支管受压 T 形相贯节点采用相同设计公式的背景, 采用文献[15]提出的不锈钢圆管 T 形和 Y 形支管受压相贯节点承载力设计公式预测节点承载力, 并与 CIDECT 计算结果对比。结果表明: CIDECT 计算结果是偏保守的, 文献[15]提出的公式具有良好的准确性。

**关键词:** 不锈钢; 圆管; T 形节点; Y 形节点; 试验研究; 有限元分析; 设计方法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0508-09

## Investigations on capacity of stainless steel T- and Y-joints in circular hollow sections with axial tension in brace

ZHENG Baofeng<sup>1,2</sup>, WU Buchen<sup>2</sup>, ZHANG Kui<sup>3</sup>, WANG Jiachang<sup>2</sup>, SHU Ganping<sup>1,2</sup>, JIANG Qinglin<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. China Northwest Building Design & Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710018, China;

4. Jiangsu Dongge Stainless Steel Ware Co., Ltd., Jiangsu Yancheng 224000, China)

**Abstract:** With the widespread application of stainless steel structures, stainless steel hollow section joints in cold-rolled tubes are increasingly used in building structures. However, the performance and design methods of stainless steel circular tubular joints are rarely studied. A total of six T-joints and three Y-joints were tested considering the effect of the geometric configurations and the preload in the chord on the behaviors of the joint. The material properties, failure modes, joint strengths and load-deformation curves were all reported. The test results showed that the failure mode of T-joints, as well as Y-joints, was the plastic deformation of the chord at the panel zone. Based on the test results, the finite element analysis model of the joint was established, and the parametric analysis was carried out to study the effect of brace load on the joint strength. The results showed that the capacity of stainless steel T- and Y-joints in circular hollow sections with brace under axial tension was always greater than that of those with brace under axial compression. According to the background of using the same design formula for both the braces under axial tension and compression in the specifications at home and abroad, the capacity of the stainless steel T- and Y-joints in circular hollow sections was finally calculated by using the formula proposed in Ref [12] and compared with predictions using the CIDECT recommendations. The results showed that the CIDECT's predictions were conservative and the formula proposed in Ref[12] had good accuracy.

**Key words:** stainless steel; circular hollow sections; T-joints; Y-joints; test; finite element analysis; design

收稿日期: 2022-05-01 修改稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808110)

第一作者: 郑宝锋(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 不锈钢结构设计理论研究。E-mail: 101012279@seu.edu.cn

随着国家经济的高速发展, 人们对建筑外观要求越来越高. 不锈钢结构不仅具有优异的耐腐蚀性能, 还具有良好的力学性能和加工性能, 在民用和工业建筑中具有广泛的应用前景. 管结构由于造型美观, 节点构造简单、受力性能良好, 在我国应用越来越广泛. 在不锈钢结构领域, 我国学者进行了大量的研究, 但是, 对不锈钢相贯节点性能研究尚未广泛开展. 基于以上背景, 本文对不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点进行支管轴向拉力作用下的承载力研究.

在不锈钢材料性能方面, 王元清等<sup>[1]</sup>、王萌等<sup>[2]</sup>和常笑等<sup>[3]</sup>对不锈钢力学性能进行研究, 舒赣平等<sup>[4-5]</sup>和袁焕鑫等<sup>[6]</sup>对不锈钢受压构件进行研究. 在不锈钢相贯节点研究方面, Rasmussen 等<sup>[7-8]</sup>对不锈钢 X 形、K 形相贯节点变形及承载力进行了研究, 结果表明: 采用残余应变为 0.2% 和 0.5% 的应力替换国际管结构协会设计手册(CIDECT, 1st)<sup>[9]</sup>设计公式中的屈服强度可用于节点承载力的计算. Feng 和 Young<sup>[10-12]</sup>对冷弯不锈钢方管相贯 T 形、X 形节点进行试验研究与数值分析, 结果表明: 残余应变为 0.2% 的应力替换 CIDECT<sup>[9]</sup>设计

公式中的屈服强度, 能较好地预测不锈钢管 T 形、X 形节点在正常使用极限状态和承载力极限状态下的承载力. Zheng 等<sup>[13]</sup>对不锈钢圆管 K 形相贯节点进行了研究, 通过试验研究及参数化分析, 对 CIDECT<sup>[14]</sup>公式中考虑几何因素的因子  $Q_u$  和考虑弦杆预加载荷因素的因子  $Q_f$  进行修正. Wang 等<sup>[15]</sup>对不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受压性能进行了研究, 结果表明, 使用 CIDECT 规范计算的节点承载力偏保守. 根据参数化分析结果对 CIDECT<sup>[14]</sup>公式中的  $Q_u$  和  $Q_f$  对弦杆塑性破坏的作用进行修正. Zheng 等<sup>[16]</sup>对不锈钢方管 K 形节点进行了研究, 提出了一种兼顾弦杆连接面和弦侧壁变形的屈服线破坏机理, 改进了 K 形节点承载力计算方法. 此外, Feng 等<sup>[17]</sup>、Lan 等<sup>[18]</sup>和张哲文等<sup>[19]</sup>对不锈钢相贯节点的高温和疲劳等性能进行了研究.

从研究现状可知, 国内外暂无对支管受拉不锈钢圆管相贯节点的试验研究, 为此, 本文通过节点试验, 获得节点的破坏模式和承载力, 并建立有限元模型, 分析支管受力状态对节点承载力的影响.

表 1 不锈钢圆管 T 形、Y 形节点的测量尺寸和弦杆预加载荷

Tab. 1 Measured dimensions and chord preload of stainless steel T- and Y-joints in circular hollow sections

节点编号	弦杆/mm			支管/mm			端板/mm				焊脚尺寸	弦杆预加
	$d_0$	$t_0$	$L_0$	$d_1$	$t_1$	$L_1$	$D_0$	$T_0$	$D_1$	$T_1$	/mm	荷载/kN
TT102×76-P0	101.12	2.81	801	76.20	2.06	400	250	16	220	16	3.03	0.00
TT102×76-PC50	101.15	2.80	800	76.21	2.04	402	250	16	220	16	3.02	-50.00
TT102×76-PC100	101.08	2.79	803	76.16	1.98	400	250	16	220	16	3.03	-100.00
TT102×76-PC150	101.10	2.90	800	76.18	2.00	401	250	16	220	16	2.98	-150.00
TT102×76-PT100	101.09	2.80	799	76.14	2.03	400	250	16	220	16	3.05	100.00
TT102×89-P0	101.15	2.85	800	88.82	2.38	403	250	16	220	16	3.51	0.00
YT102×76-P0	101.20	2.88	803	76.22	2.01	400	250	16	220	16	3.01	0.00
YT102×76-PC100	101.15	2.86	800	76.15	2.04	399	250	16	220	16	3.04	-100.00
YT102×89-P0	101.14	2.82	801	88.80	2.45	400	250	16	220	16	3.48	0.00

注: 弦杆预加载荷以弦杆受压为负、受拉为正.

1 试验研究

1.1 节点试件设计

设计和制作了 9 个不锈钢圆管相贯节点, 其中 T 形节点 6 个, Y 形节点 3 个, 材料均为奥氏体型 304 冷成型不锈钢钢管. T 形、Y 形节点弦杆与支管之间的夹角分比为 90° 和 45°. 焊缝采用氩弧焊, 焊脚尺寸根据 CIDECT<sup>[14]</sup> 的规定取值, 详见表 1. 试样的表面在焊接后进行了喷砂处理.

在试件设计中, 以支管与弦管的管径比  $\beta$  和弦

杆预加载荷  $N_{0,p}$  为主要参数. 支管的公称直径分别为 76 mm 和 89 mm, 厚度分别为 2 mm 和 2.5 mm, 弦杆的公称直径为 102 mm, 厚度为 3 mm, 管径比  $\beta$  分别为 0.75 和 0.87. 对于 T 形节点试件, 在 -150 ~ 100 kN 范围内设计 5 种不同弦杆预加载荷; 对于 Y 形节点试件, 在 -100 ~ 0 kN 范围内设计 2 种不同弦杆预加载荷. 预加载荷在弦管产生的轴向应力比为 0.3 ~ 0.5. 弦杆和支管的轴线长度( $L_0$  和  $L_1$ ) 分别为 800 mm 和 400 mm. 从节点区到弦管端部加载处的长度约为截面直径的 4

倍,加载端处应力对节点区应力的干扰可以忽略.弦杆两端和支管末端焊接 Q345 钢材的圆形端板,试验中通过 6 颗高强螺栓连接耳板.试样如图 1 所示,测量尺寸如表 1 所示.

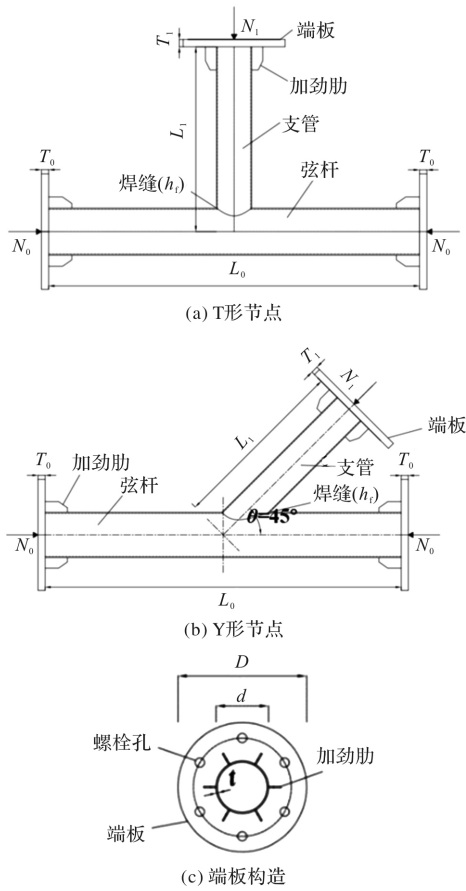


图 1 节点示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of joints

表 1 中,  $d_0$ 、 $t_0$ 、 $L_0$  分别为弦杆的直径、壁厚和长度;  $d_1$ 、 $t_1$ 、 $L_1$  分别为支管的直径、壁厚和长度;  $D_0$ 、 $T_0$  分别为焊接到弦杆的端板的直径和厚度;  $D_1$ 、 $T_1$  分别为焊接到支管的端板的直径和

厚度;  $h_f$  为焊脚尺寸;  $N_{0,p}$  为设计的弦杆预加载荷.

节点编号的规则以 TT102×76-PC50 为例,首字母 T 表示 T 形节点(Y 表示 Y 形节点);第二个 T 表示支管的受力形式为受拉;102 和 76 分别表示弦杆和支管外径;PC 表示弦杆预加载荷为压力(PT 表示弦杆预加载荷为拉力);50 表示以 kN 为单位的预加载荷值.

### 1.2 材料性能试验

使用自动电火花丝切割机分别从三种截面构件中各取出 3 个试件,总计 9 个材性试件.依据《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T228.1—2010)<sup>[20]</sup>进行标准拉伸试件设计.试验在 10t CMCT5105 电子万能试验机上进行.试验中试件前后表面粘贴两个应变片(BX120-3AA)测量应变.试验速率为 0.5 mm/min,试验装置及拉伸破坏如图 2 所示.

选用 Gardner 模型<sup>[21]</sup>处理试验数据,如公式(1)所示,其中:  $E_0$  表示杨氏模量;  $\sigma_{0.2}$  表示 0.2% 屈服应力;  $\sigma_{1.0}$  表示 1.0% 屈服应力;  $\sigma_u$  表示极限拉应力;  $n$  表示 Ramberg-Osgood 模型  $\sigma_0 \sim \sigma_{0.2}$  之间的应变硬化指数;  $n_{0.2,1.0}$  表示  $\sigma_{0.2} \sim \sigma_{1.0}$  之间的应变硬化指数.数据处理结果如表 2 所示.

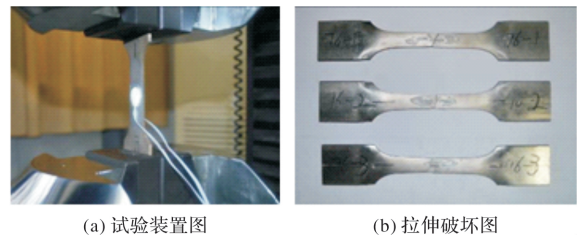


图 2 材性试验图

Fig. 2 Photograph of material tests

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \in [0, \sigma_{0.2}] \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left( 0.008 - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \epsilon_{0.2}, & \sigma \in (\sigma_{0.2}, \sigma_u] \end{cases} \quad (1)$$

表 2 材料性能试验结果

Tab. 2 Test results of material properties

试件编号	$E_0$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{1.0}$ /MPa	$\sigma_u$ /MPa	$n$	$n_{0.2,1.0}$
SJ76-1	211 560	336.19	382.08	741.12	3.90	2.30
SJ76-2	190 470	338.99	387.05	709.70	8.85	2.07
SJ76-3	178 720	341.03	393.05	722.86	5.59	2.54
平均值	193 583	338.74	387.39	724.56	6.12	2.30
SJ89-1	193 760	369.45	437.56	803.53	3.85	3.08
SJ89-2	191 480	377.65	444.49	807.8	3.99	3.00
SJ89-3	181 920	418.58	492.56	807.29	4.20	3.32
平均值	189 053	388.56	458.20	806.21	4.01	3.14

续表 2

试件编号	$E_0$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{1.0}$ /MPa	$\sigma_u$ /MPa	$n$	$n_{0.2,1.0}$
SJ102-1	204 140	395.32	463.94	771.54	4.90	2.65
SJ102-2	207 890	388.87	438.54	774.37	6.77	2.24
SJ102-3	198 980	379.79	430.73	755.26	5.69	2.44
平均值	203 670	387.99	444.40	767.06	5.79	2.44

1.3 节点试验

节点加载装置示意图和加载实物图分别如图 3 (a)和(b)和图 4(a)和(b)所示. 该反力架可用于弦杆施加预加压力或拉力荷载条件下, T 形、Y 形支管的受拉或受压试验. 试验中弦杆左、右侧均为滑动铰支座, 可以在支座长圆孔方向(弦杆轴向)滑动; 支管端部为滑动铰支座. Y 形节点加载方式与 T 形节点相似, 仅改变支管加载千斤顶的位置.

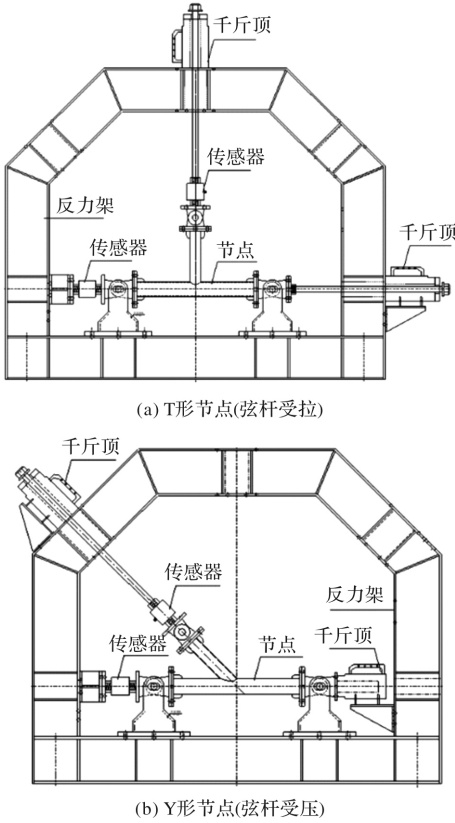
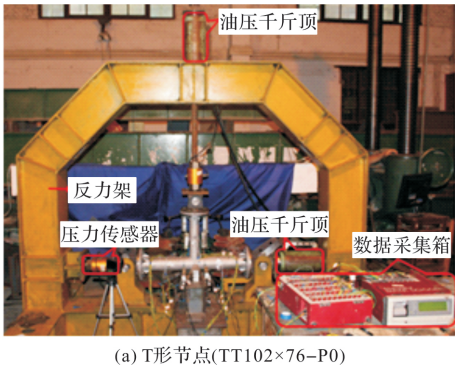
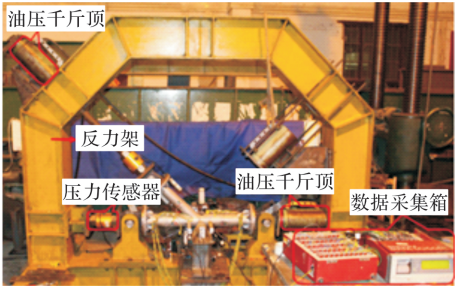


图 3 加载装置示意图

Fig. 3 Diagrams of test rig



(a) T形节点(TT102×76-P0)



(b) Y形节点(YT102×76-P0)

图 4 加载实物图

Fig. 4 Photograph of test rig

1.3.1 试验测量内容及加载制度

采用位移计测量节点位移和变形. T 形节点位移计布置如图 5(a)和(b)所示, 图中 DG-X 表示位移计编号. 在支管端板两边各布置一个位移计, 用以获取加载端的位移. 在弦杆跨中布置竖向位移计, 同时在距离跨中 100 mm, 左右各布置一个位移计, 弦杆跨中竖向位移计可以用来记录弦杆下表面的竖向变形. 在弦杆前后两侧各设置三个位移计, 用于记录弦杆管壁的侧向变形. 冠点左右两侧各布置一个位移计, 用于测量弦杆上表面的变形. Y 形节点位移计布置如图 6(a)和(b)所示, 由于空间限制, 仅在冠点一侧布置位移计, 其余布置与 T 形节点位移计布置一致.

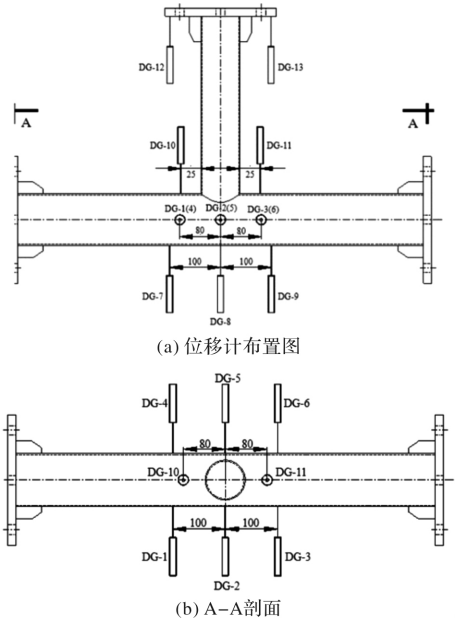


图 5 T 形节点位移计布置图

Fig. 5 Arrangements of displacement transducers for T-joints



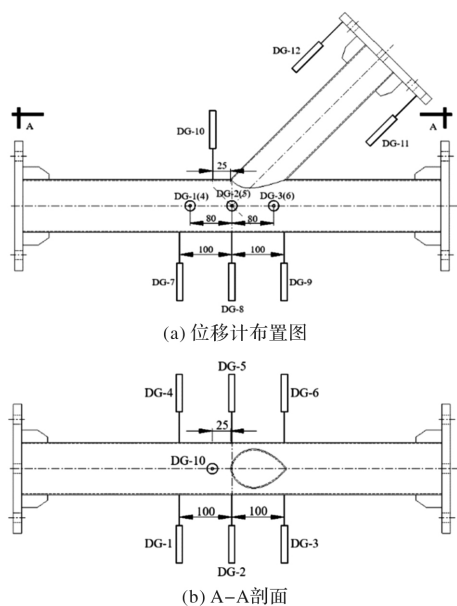


图6 Y形节点位移计布置图

Fig. 6 Arrangements of displacement transducers for Y-joints

试验中首先施加弦杆预加荷载,并在后续加载中手动保持不变.正式加载前,施加初始载荷(小于预测最终载荷的5%)以消除间隙并检查数据采集系统.随后进行正式加载,缓慢施加支管轴力,直到节点破坏.使用数据采集设备(TDS303)连续记录位移计的读数和施加的荷载(压力传感器).

### 1.3.2 试验结果

试验现象如图7、图8所示.其中,T形和Y形节点的破坏模式相似,均为节点域弦杆的塑性变形.加载初期,支管带动弦杆向上运动,弦杆的变形类似于跨中施加向上集中拉力的简支梁,表现出明显的弯曲,节点域变形微小.当加载到一定阶段,跨中弦杆侧壁开始向内收缩,弦杆截面由原来的圆形变为椭圆形,但是变形值很小;继续加载时,节点承载力不断提高,没有下降的趋势,当弦杆弯曲到一定程度,弦杆下表面在压应力作用下发生局部凹陷,节点承载力急剧下降.其中,YT102×76-PC100节点加载过程中因操作失误,未能记录完整的荷载位移曲线.



(a) 整体弯曲



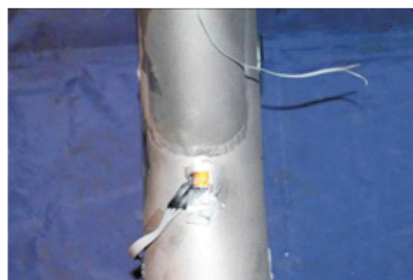
(b) 弦杆侧壁凹陷

图7 TT102×76-P0节点破坏模式

Fig. 7 Failure mode of TT102×76-P0



(a) 整体弯曲



(b) 弦杆侧壁凹陷

图8 YT102×76-P0节点破坏模式

Fig. 8 Failure mode of YT102×76-P0

图9、10分别表示T形、Y形节点支管轴向荷载与弦杆跨中侧向和竖向变形之间的关系.其中,弦杆跨中侧向变形采用弦杆跨中两侧位移计(DG-2与DG-5)记录结果的平均值,以向外鼓曲为正、向内凹陷为负,用来表示弦杆侧向变形;弦杆竖向变形为T形节点冠点两侧位移计(DG-10与DG-11)的平均值或Y形节点冠点处位移计(DG-10)与弦杆底部位移计(DG-8)的差值,以变大为正、变小为负.从图9中可以看出,T形节点在支管承受轴向拉力作用下,弦杆中预加轴向压力荷载越大,荷载位移曲线越低;弦杆中预加轴向拉力荷载时,荷载位移曲线升高.根据CIDECT<sup>[14]</sup>中圆管相贯节点的极限变形条件,节点的承载力取为 $3\%d_0$ 局部变形对应的荷载.当弦杆侧向与竖向变形均达到 $3\%d_0$ ,则节点的承载力取二者对应荷载的较小值,若其中一个方向变形未达到变形限值,则取另一个方向上变形限值对应的荷载值作为该节点的承载力.图中竖向虚线表示CIDECT手册中规定的节点变形限值,即为 $3\%d_0$ ,从图9

(a)中可以看出,弦管竖向变形为  $3\%d_0$  时对应的荷载比侧向变形对应的荷载小,即节点区竖向变形对节点承载力起控制作用。表 3 中给出了节点的承载力。

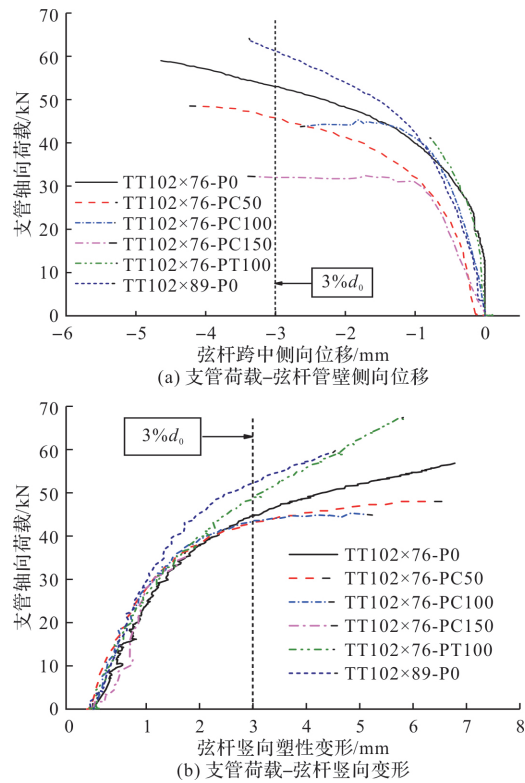


图 9 T 形节点荷载-位移曲线  
Fig. 9 Load-deformation curves of T-joints

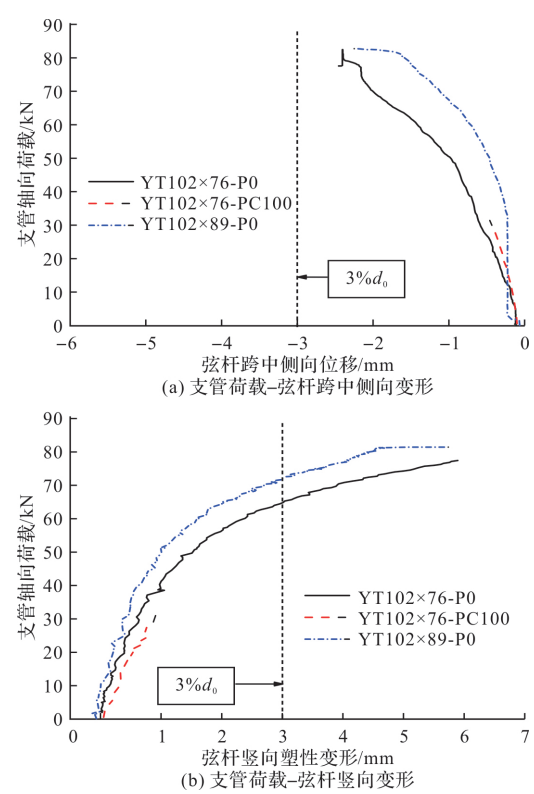


图 10 Y 形节点荷载-位移曲线  
Fig. 10 Load-deformation curves of Y-joints

从图 10 中的荷载-位移曲线可以看出,弦杆侧向变形均未达到极限变形条件,节点的极限承载力由弦杆节点区竖向变形控制。

表 3 节点试验结果及其与有限元、现行方法预测值的比较

Tab. 3 Test results and comparisons of test strengths and predicted strengths by finite element models and CIDECT							
节点编号	$N_T/\text{kN}$	$N_C/\text{kN}$	$N_F/\text{kN}$	$N_{ip}/\text{kN}$	$N_T/N_C$	$N_T/N_F$	$N_T/N_{ip}$
TT102×76-P0	44.86	37.21	48.23	43.53	1.21	0.93	1.03
TT102×76-PC50	43.28	32.35	45.16	38.80	1.34	0.96	1.12
TT102×76-PC100	43.57	27.21	39.46	34.00	1.60	1.10	1.28
TT102×76-PC150	32.00	21.68	31.48	29.07	1.48	1.02	1.10
TT102×76-PT100	49.00	47.71	48.86	52.68	1.03	1.00	0.93
TT102×89-P0	52.28	39.15	52.29	46.29	1.34	1.04	1.13
YT102×76-P0	65.28	52.55	69.89	59.84	1.44	0.93	1.09
YT102×76-PC100	-	38.52	61.92	46.27	-	-	-
YT102×89-P0	77.57	55.22	73.66	63.54	1.41	0.99	1.22
平均值					1.35	1.00	1.11
标准差					0.16	0.06	0.10

注:“-”表示由于试验操作失误,未得到准确试验结果。

表中,  $N_T$  表示试验获得的节点承载力;  $N_C$  表示按 CIDECT 计算得到的承载力;  $N_F$  表示有限元极限承载力;  $N_{ip}$  表示按文献[15]提出公式计算得到的承载力。

2 数值模拟与参数化分析

2.1 有限元建模

采用 ANSYS 软件建立节点分析模型, 模型

的几何尺寸采用试验试件实测尺寸,材料性能采用表1中的试验结果平均值。有限元模型中采用SHELL181壳单元。考虑到弦杆与支管交叉区域应力分布复杂,故加密该区域的网格,同时有限元模型中的边界条件与试验中相同,如图11所示。

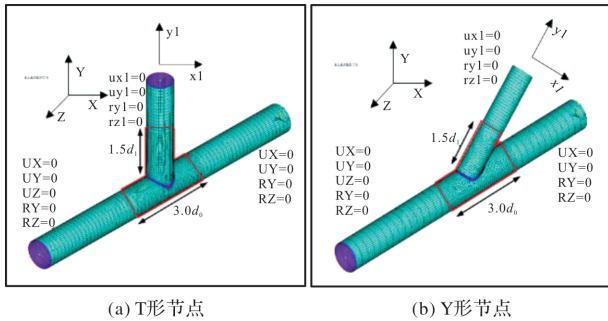


图11 节点有限元模型

Fig. 11 Finite element model of joints

为了能精确地模拟杆端铰接,采用CERIG命令,在圆管端部截面形心处设置一个节点,定义该节点单元类型为MASS21并与端部截面节点建立耦合,最后在该节点上定义边界条件。

为了考虑连接焊缝的影响,采用Vegte<sup>[22]</sup>提出的方法,沿着相交点添加了一圈壳单元来模拟焊缝,添加的壳单元厚度为弦杆厚度的一半。焊缝模型如图12所示,其中: $a = h_f + 0.5t_0$ ;  $b = h_f$ ; 壳体厚度为 $0.5t_0$ ;  $h_f$ 表示焊脚尺寸。焊接部分的材料性能近似地采用了弦杆的材料性能。

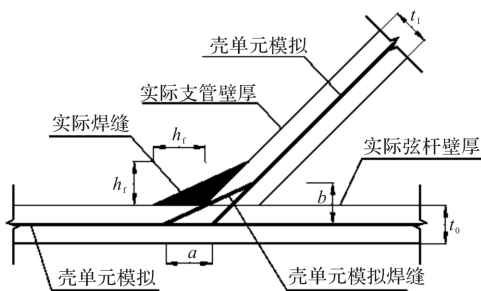


图12 焊缝模拟示意图

Fig. 12 Simulation of weld

有限元分析包括两个加载步:在第一步加载中,将预加载施加于弦杆,并在第二步加载中该预加载保持恒定。第二步加载施加支管载荷,直至节点破坏。

## 2.2 有限元模型的对比验证

对9个节点试件进行分析,结果如表3所示。从中可以看出,有限元模型的计算结果与试验结果有很好的-致性。 $N_T/N_F$ 的平均比值约为1.00,标准差为0.06。图13为有限元分析得到

的T形、Y形节点的典型破坏模式,与试验结果相符较好。同时,有限元分析得到的曲线与试验结果吻合较好(见图14)。综上,有限元模型可以准确地预测不锈钢管T形、Y形节点的承载能力。

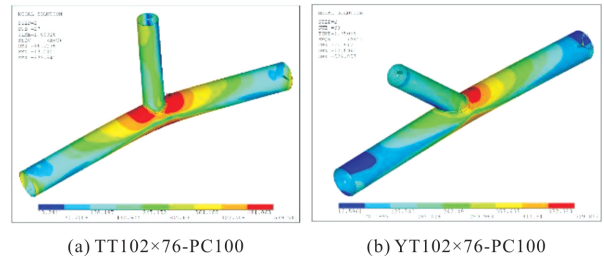


图13 有限元计算节点破坏模式

Fig. 13 Failure modes of joints in finite element modeling

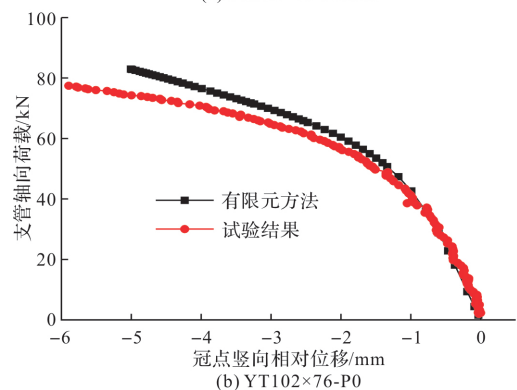
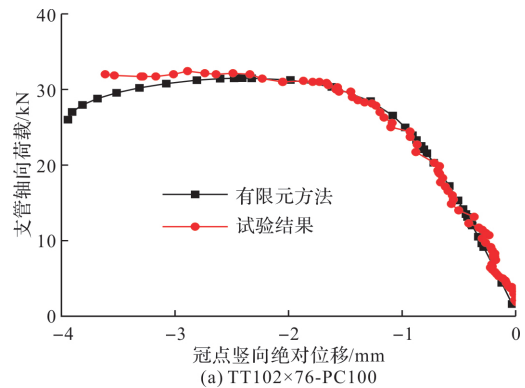


图14 节点试验曲线与有限元曲线比较

Fig. 14 Comparison of the load-displacement curves from finite element analysis and test results

## 2.3 参数化分析

为了研究支管受力状态对不锈钢圆管T形、Y形节点承载力的影响,采用有限元方法对表4中三组、共24个不同的不锈钢圆管T形、Y形节点分别在支管轴向拉力和压力作用下的节点承载力进行了计算。试件设计考虑了管径比和径厚比的影响。三组管径比 $\beta$ 分别为0.50、0.75和0.90,每组弦杆径厚比 $2\gamma$ 分别取25.00、33.33、44.44和62.50。

表 4 支管受拉、受压不锈钢节点有限元分析基本参数及结果

Tab. 4 Basic parameters and results of finite element analysis of stainless steel joints with branches under tension and compression

	$d_0$	$t_0$	$d_1$	$t_1$	$\beta$	$2\gamma$	$N_{TC}$	$N_{TT}$	$\frac{N_{TT}}{N_{TC}}$	$N_{YC}$	$N_{YT}$	$\frac{N_{YT}}{N_{YC}}$	$\frac{N_{YC}}{N_{TC}} \sin\theta$
	/mm	/mm	/mm	/mm			/kN	/kN		/kN	/kN		
第一组	200.00	8.00	100.00	6.00	0.50	25.00	239.13	279.69	1.17	332.55	406.98	1.22	0.98
	200.00	6.00	100.00	5.00	0.50	33.33	156.84	188.37	1.20	226.02	293.25	1.30	1.02
	200.00	4.50	100.00	4.00	0.50	44.44	94.38	120.06	1.27	147.30	197.25	1.34	1.10
	200.00	3.20	100.00	3.00	0.50	62.50	50.34	65.33	1.30	82.46	115.57	1.40	1.16
第二组	200.00	8.00	150.00	6.00	0.75	25.00	274.88	302.41	1.10	393.82	459.28	1.17	1.01
	200.00	6.00	150.00	5.00	0.75	33.33	155.65	219.94	1.41	284.28	345.21	1.21	1.29
	200.00	4.50	150.00	4.00	0.75	44.44	128.78	155.37	1.21	195.96	252.80	1.29	1.08
	200.00	3.20	150.00	3.00	0.75	62.50	74.94	94.99	1.27	119.19	163.52	1.37	1.12
第三组	200.00	8.00	180.00	6.00	0.90	25.00	300.81	304.31	1.01	423.06	485.43	1.15	0.99
	200.00	6.00	180.00	5.00	0.90	33.33	220.04	227.98	1.04	313.44	366.49	1.17	1.01
	200.00	4.50	180.00	4.00	0.90	44.44	149.91	171.30	1.14	221.44	286.47	1.29	1.04
	200.00	3.20	180.00	3.00	0.90	62.50	94.14	110.31	1.17	143.06	186.79	1.31	1.07
平均值									1.19			1.27	1.07

表中:  $N_{TT}$  和  $N_{TC}$  分别表示支管受拉和支管受压 T 形节点承载力;  $N_{YT}$  和  $N_{YC}$  分别表示支管受拉 Y 形和支管受压 Y 形节点承载力。

从表中可以看出: (1)相同边界条件和截面尺寸下, 支管受拉的不锈钢相贯节点承载力均高于支管受压的不锈钢相贯节点承载力, 其最高值为 1.41, 二者比值的平均值为 1.19, 并且随着弦杆径厚比  $2\gamma$  的增大, 受拉承载力与受压承载力比值不断提高; (2)由表 4 中最后一列数据可知, 支管受压 Y 形节点垂直于弦杆的支管承载力分量与相应的支管受压 T 形节点承载力的比值的平均值为 1.07。因此, 可以将 Y 形节点承载力计算简化为相应的 T 形节点承载力与  $\sin\theta$  之比; (3)节点承载力随  $\beta$  的增加而增加, 随  $2\gamma$  的增加而降低。相较之下, 参数  $\beta$  的影响大于  $2\gamma$ 。

3 节点承载力计算公式

根据参数化分析结果可知, 不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受拉承载力始终大于支管受压承载力。同时, 现行设计规范中均采用支管受压状态作为 T 形、Y 形相贯节点的设计控制条件。因此, 本文拟采用文献[15]提出的不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点支管受压承载力公式, 对试验节点承载力进行计算。该公式基于 CIDECT 规范公式, 并对其中  $Q_u$  和  $Q_f$  进行修正, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} N_1^p = \frac{1}{\Phi} \frac{\sigma_{0.2} t_0^2}{\sin\theta} Q_u Q_f \\ Q_u = 3.68(1 + 5.60\beta^2)\gamma^{0.2}, & \beta \geq 0.25 \\ Q_f = \begin{cases} 1 + 0.15n - 0.55n^2, & n < 0 \\ 1.0, & n \geq 0 \end{cases} \\ n = \frac{N_0}{N_{pl,0}} + \frac{M_0}{M_{pl,0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N_{1p}$  为节点承载力的标准值;  $N_0$  表示弦杆

轴力;  $N_{pl,0}$  表示弦杆全截面屈服时能够承受的最大轴向荷载;  $M_0$  表示弦杆上作用弯矩, 该弯矩包含支管轴向力引起的弦管弯矩;  $M_{pl,0}$  表示弦杆全截面屈服时承受的弯矩。

将采用公式计算的节点承载力与试验结果及 CIDECT 计算结果进行比较, 如表 3 所示。由表可得, 采用公式(2)计算的节点承载力小于试验结果, 大于 CIDECT 规范计算结果。具体来说, 试验结果与公式(2)计算结果的比值平均值为 1.11, 标准差为 0.10; 试验结果与 CIDECT 计算结果的比值平均值为 1.35, 标准差为 0.16。由此表明, 采用式(2)计算所得节点承载力偏安全, 且精度优于 CIDECT 计算结果, 故可将式(2)应用于支管受轴向力的不锈钢圆管 T 形、Y 形相贯节点设计中。

4 结论

(1)支管轴向拉力荷载作用下的 T 形、Y 形节点的破坏主要为节点域弦杆的塑性变形, 节点区域的弦杆最终被拉伸成椭圆形。节点承载力由节点区弦杆局部竖向变形控制, 随着弦杆中预加轴向荷载的增大, 节点承载力下降;

(2)根据试验结果建立的有限元模型能够准确反映不锈钢圆管相贯节点的真实受力情况, 在此模型基础上进行参数化分析, 得到不锈钢圆管 T 形和 Y 形支管受拉相贯节点承载力始终大于同条件下支管受压相贯节点承载力, 比值的平均值分别为 1.19 和 1.27;

(3)文献[15]提出的计算公式可用于支管受拉相贯节点承载力计算, 试验值与计算值比值平均为 1.11, 优于 CIDECT 公式的预测精度。



## 参考文献 References

- [1] 王元清,常婷,石永久. 循环荷载下奥氏体不锈钢的本构关系试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012,42(6): 1175-1179.  
WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu. Experimental study on constitutive relationship in austenitic stainless steel under cyclic loading[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42 (6): 1175-1179
- [2] 王萌,杨维国,王元清,等. 奥氏体不锈钢滞回本构模型研究[J]. 工程力学, 2015,32(11): 107-114.  
WANG Meng, YANG Weiguo, WANG Yuanqing, et al. Study on hysteretic constitutive model of austenitic stainless steel [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (11): 107-114.
- [3] 常笑,杨璐,王萌,等. 循环荷载下奥氏体型和双相型不锈钢材料本构关系研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 137-147.  
CHANG Xiao, YANG Lu, WANG Meng, et al. Study on constitutive model of austenitic stainless steel and duplex stainless steel under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (5): 137-147.
- [4] 舒赣平,郑宝锋,沈晓明. 冷成型不锈钢管轴心受压柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(5): 87-95.  
SHU Ganping, ZHENG Baofeng, SHEN Xiaoming. Experimental study on cold-formed stainless steel tubular columns subjected to axial loading[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (5): 87-95.
- [5] 舒赣平,郑宝锋,范圣刚,等. 不锈钢轴心受压柱弯曲屈曲承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2013,34 (11): 116-122.  
SHU Ganping, ZHENG Baofeng FAN Shenggang, et al. Study on flexural stability of stainless steel columns under axial loading[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (11): 116-122.
- [6] 袁焕鑫,王元清,杜新喜,等. 不锈钢焊接工字形截面短柱轴压局部稳定性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015,36 (5): 38-45.  
YUAN Huanxin, WANG Yuanqing, DU Xinxi, et al. Compression tests on local buckling behavior of welded stainless steel I-section stub columns [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5): 38-45.
- [7] RASMUSSEN K J R, YOUNG B. Tests of X- and K-joints in SHS stainless steel tubes[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2001;127(10): 1173-82.
- [8] RASMUSSEN K J R, HASHAM A S. Tests of X- and K-joints in CHS stainless steel tubes [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2001;127(10): 1183-9.
- [9] WARDENIER J, KUROBANE Y, PACKER J A, et al. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading [A]. Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT). Cologne, Germany: Verlag TÜV Rheinland; 1991.
- [10] FENG R, YOUNG B. Experimental investigation of cold-formed stainless steel tubular T-joints[J]. Thin-Walled Structures 2008;46(10): 1129-1142.
- [11] FENG R, YOUNG B. Design of cold-formed stainless steel tubular T- and X-joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011;67(3): 421-36.
- [12] FENG R, YOUNG B. Design of cold-formed stainless steel tubular joints at elevated temperatures[J]. Eng-Struct 2012;35(1): 188-202.
- [13] ZHENG B F, ZHANG K, WANG J C, et al. Test and design of stainless steel K-joints in cold-formed circular hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106447.
- [14] WARDENIER J, KUROBANE Y, PACKER J A, et al. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading [A]. Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire (CIDECT). Cologne, Germany: Verlag TÜV Rheinland; 2008.
- [15] WANG J C, ZHANG K, WANG J C, et al. Investigations on stainless steel T- and Y-joints in cold-rolled circular hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021;177: 106462.
- [16] ZHENG B F, WU B C, WANG J C, et al. Design of stainless steel gapped K-joints in cold-formed square hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022;190: 107105.
- [17] FENG R, YOUNG B. Tests and behaviour of cold-formed stainless steel tubular X-joints[J]. Thin-Walled Structures, 2010;48(12): 921-34.
- [18] LAN X, HUANG Y. Structural design of cold-formed stainless steel tubular X- and T-joints at elevated temperatures [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 108: 270-279.
- [19] 张哲文. 不锈钢 T 型相贯节点疲劳性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.  
ZHANG Zhewen. Research on fatigue behaviour of stainless steel welded tubular T-joints [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第一部分-室温试验方法: GB/T 228. 1—2010[S]. 北京, 中国计划出版社, 2010.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature: GB/T 228. 1—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [21] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections-Part 1: Material and cross-sectional behaviour[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004,60(9): 1291-1318.
- [22] G. J. Van der Vegte. The static strength of uniplanar and multiplanar tubular T-and X-joints[D]. Turkey, Delft; Delft University of Technology, 1995.