

# X 形圆钢管节点平面内受弯滞回性能试验研究

赵必大, 林时康, 陈界佑, 吴双双, 李福龙, 陈 鎰

(浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 为了研究 X 形圆钢管节点平面内受弯滞回性能, 进行了两个节点在往复平面内弯矩作用下的试验研究。结果表明: 两个节点的破坏模式均为相贯线附近焊缝热影响区的主管管壁开裂, 开裂前主管管壁经历显著的塑性发展; 节点表现出良好的滞回性能; 主管管壁塑性变形和开裂后的裂纹扩散成为节点的主要耗能模式, 尽管支管根部的塑性变形对耗能也有贡献。对比支主管正交节点(支主管夹角  $90^\circ$ ), 支主管斜交节点(支主管夹角非  $90^\circ$ ) 具有更高的抗弯承载力, 并且具有更好的延性和耗能能力。当支主管斜交且夹角较大(大于  $70^\circ$ ) 时, 夹角正弦的倒数能较好地反映了支主管斜交对节点承载力的有利影响。

**关键词:** X 形圆钢管相贯节点; 平面内受弯滞回性能; 平面内抗弯承载力; 延性; 耗能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0517-07

## Experimental study on the in-plane flexural hysteretic behavior of CHS X-joints

ZHAO Bida, LIN Shikang, CHEN Jieyou, WU Shuangshuang, LI Fulong, CHEN Yi

(College of Civil Engineering, Zhejiang University of technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** To study the in-plane flexural hysteretic behavior of unstiffened circular hollow section (CHS) X-joints, an experimental test on two CHS X-joints with different brace-to-chord angle (BCA) under cyclic in-plane moment (IPM) were performed. The results show that the failure modes of both joints are cracking of the chord wall in the heat affected zone of the weld near the intersecting line, and the chord wall undergoes significant plastic deformation before cracking. Two X-joints behave excellently in hysteretic behavior. The plastic deformation of the chord wall and the crack propagation after cracking become the main energy consumption modes of the joint, although the plastic deformation of the branch pipe root also contributes to the energy consumption. In contrast, the X-joints with brace-to-chord skew (i. e., BCA is not  $90^\circ$ ) have better ductility and higher flexural capacity and energy consumption capacity than the X-joints with brace-to-chord orthogonal (i. e., BCA is  $90^\circ$ ). For the X-joints with brace-to-chord skew but larger BCA (larger than  $70^\circ$ ), the reciprocal of the sine of BCA can reflect the beneficial influence of brace-to-chord skew on the in-plane flexural capacity.

**Key words:** unstiffened CHS X-joints; in-plane flexural hysteretic behavior; in-plane flexural capacity; ductility; energy dissipation

圆钢管截面构件具有抗扭性能良好、各方向抗弯性能相同、外表光滑、防火防腐维护费用低(相对开口截面构件)等优点, 广泛应用于各种结构体系。腹杆(支管)直接焊接在弦杆(主管)表面的钢管相贯节点一直是钢管结构常用的节点连接形式, 相贯节点具有承载力较低(相对于相邻构件(腹杆))、刚度较弱等特点。因此, 钢管相贯节点的静力承载力、刚度以及抗震性能一直受研究者的关注。构件受轴力为主的管理架是最常见的一种钢管结构类型, 故长期以来钢管节点性能研究

更多是基于支管轴力作用下的情况。Choo 等<sup>[1]</sup>基于压力容器的塑性极限分析法提出了确定厚壁 X 形圆钢管节点在支管轴力作用下静力承载力的新方法, 并且新方法与实际结果吻合较好。王德禹等<sup>[2]</sup>基于环模型建立了空间 XX 形圆钢管节点极限承载力计算式, 并用数值分析结果和已有试验结果验证了计算式。舒兴平等<sup>[3]</sup>用 ANSYS 中的 shell181 单元对 KT 形圆钢管相贯节点的承载力进行了研究, 结果表明: 支杆(垂直于弦杆与两根腹杆形成平面 K 形节点的那根杆)与弦杆的直径比对

收稿日期: 2021-11-29

修改稿日期: 2022-08-22

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY20E080020)

第一作者: 赵必大(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构与组合结构方面的研究。E-mail: zhaobida@126.com



的支管端的位移; D7 用来测量主管的轴向位移. 通过布置的位移计的测量结果, 计算得到支主管相对位移、节点转角. 首先, 鉴于试验过程中位移计 D5 和 D6 的测得值几乎相同且几乎为零, 认为两支管端基本上同步加载, 可得支管加载端相对于试件中心(支管和主管轴线点)的位移  $\delta$  为

$$\delta = \delta_C - \delta_A = \delta_2 - \delta_7 \quad (1)$$

式中:  $\delta_A$ 、 $\delta_C$  分别为主管轴向位移、加载端位移, 分别取主管端竖向位移计 D7 的测值  $\delta_7$ 、加载端位移测值(比如 D2 测得位移  $\delta_2$ ). 而  $\delta$  由两部分组成, 其一是节点域主管管壁凹凸局部变形引起的刚体位移  $\delta_a$ (在整体杆系结构分析中可视为抗弯刚度为  $K_{ib}$  的半刚性节点的转角引起); 其二是支管(作为杆件)的弯曲变形  $\delta_b$ . 可得到节点转角  $\psi_i$  为

$$\psi_i = (\delta - \delta_b) / l_{bn} \quad (2)$$

式中:  $l_{bn}$  是支管根部到作动器加载中心的水平距离,  $\delta_b$  可根据弹性梁理论计算得到.

应变测点方面, 单向片 S1~S4 用来监控作动器的加载情况, 单向片 S5~S8 用来监测两端的主管轴向应变, 单向片 S9~S12、三向片 T1~T8 分别用来测试相贯线附近的支管、主管的应变, 用来分析节点域的应变分布和塑性发展.

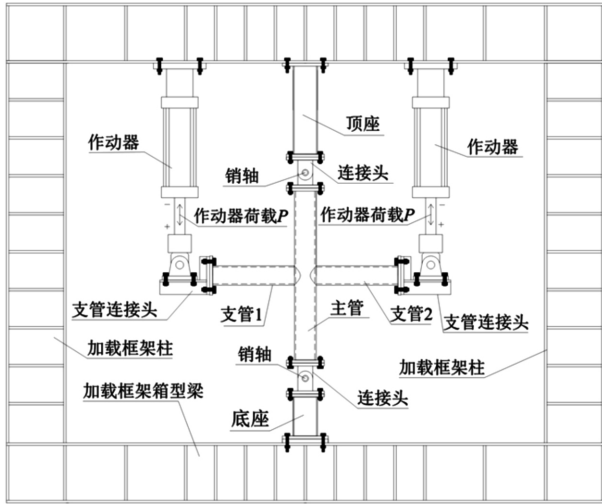


图2 试件的加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test setup

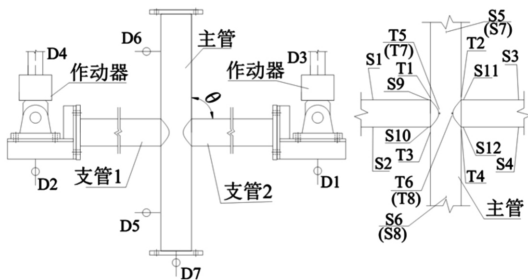


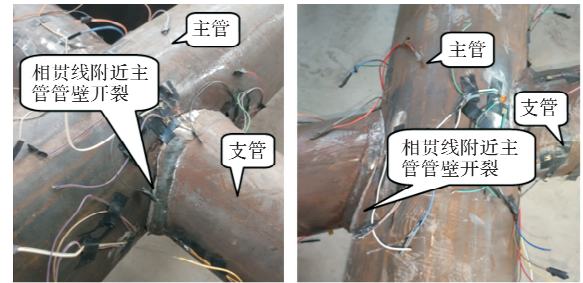
图3 试件的应变片与位移计布置

Fig. 3 Arrangement of strain and displacement gauges

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象与破坏模式

在第6级循环加载过程中, 两个试件的相贯线附近主管管壁应变首次观测到屈服, 试件 X-1(X-2)加载端的位移、荷载分别为 16.3 mm(15.8 mm)、22.7 kN(23.5 kN). 此后, 节点域的主管管壁塑性不断发展, 试件 X-1、X-2 分别在  $\pm 63$  mm、 $\pm 69$  mm 的加载过程中达到了承载力极值, 随后相贯线附近主管管壁(属于焊缝热影响区)开裂, 节点承载力随着裂纹扩展而逐渐下降. 在加载后期支管根部管壁亦发生塑性变形. 两个节点的最终破坏模式均为焊缝热影响区的主管管壁撕裂, 如图4所示.



(a) X-1

(b) X-2

图4 试件破坏照片

Fig. 4 Failure of specimens

### 2.2 滞回曲线分析

图5给出试件的加载端荷载-相对位移滞回曲线( $P-\delta$ 曲线), 考虑到试件两根支管的  $P-\delta$  曲线几乎相同, 图中仅给出一根支管的滞回曲线以节省篇幅. 图中的荷载  $P$  以作动器向下运动为正,  $P_y (=M_y/l_{bn} = 45.1$  kN)为支管根部截面屈服荷载理论值. 由图可知, 2个节点的极限承载力都超过支管(杆件)屈服荷载  $P_y$ , 故用弹性梁理论计算支管弯曲变形(式(2)的  $\delta_b$ )在加载后期存在一定的偏差, 但考虑到支管仅根部少部分区域进入塑性(峰值荷载  $P_u$  超过屈服荷载  $P_y$  并不多), 仍可用式(2)的方法获得节点转角  $\psi_i$  以简化问题. 由图亦可知, 节点的滞回曲线饱满, 表现出较好的滞回性能.

利用  $M_i = Pl_{bn}$ , 再根据式(2)得到转角  $\psi_i$ , 获得节点平面内弯矩-转角( $M_i-\psi_i$ )曲线并将其与有限元模拟结果进行对比, 见图6. 有限元模型按试件的实际几何尺寸建立, 连接头的端板和主管(支管)的端板之间采用 TIE 约束以简化, 在主管连接头耳板的孔洞中心施加铰接以模拟试验的主管两端边界约束, 在支管连接头施加模拟试验的位移荷载. 有限元模型采用 S4R 壳单元, 节点域采用

精细的网格尺寸  $T$  (主管壁厚); 主管和支管的材料采用双线性随动强化, 屈服强度  $f_y$  与弹性模量  $E$  见表 2 (材料拉伸试验得到), 强化阶段切线模量  $E_t$  取为  $E/100$ ; 钢管的端板以及接头均假定为弹性模量同主管的弹性材料。由图 6 可知, 有限元所得曲线与试验结果有一定的差异, 主要原因是本文有限元分析没能准确模拟试验中主管管壁开裂后的行为, 另外钢材实际应力-应变关系与随动强化

模型亦存在差异, 但有限元所得曲线在外形和趋势上比较接近开裂前的试验结果。

图 7 给出节点域测点的荷载-应变曲线, 限于篇幅仅给出一侧支主管相贯线附近测点的结果, 其中三向应变片换算成等效应变  $\epsilon_i = [2(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + 2(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + 2(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{0.5} / 3$ 。  $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$  为第一到第三主应变, 平面问题的  $\epsilon_2$  为 0,  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$  则由应变花测算出来。图中同时给出钢管屈服应变  $\epsilon_y$ , 以便对比。

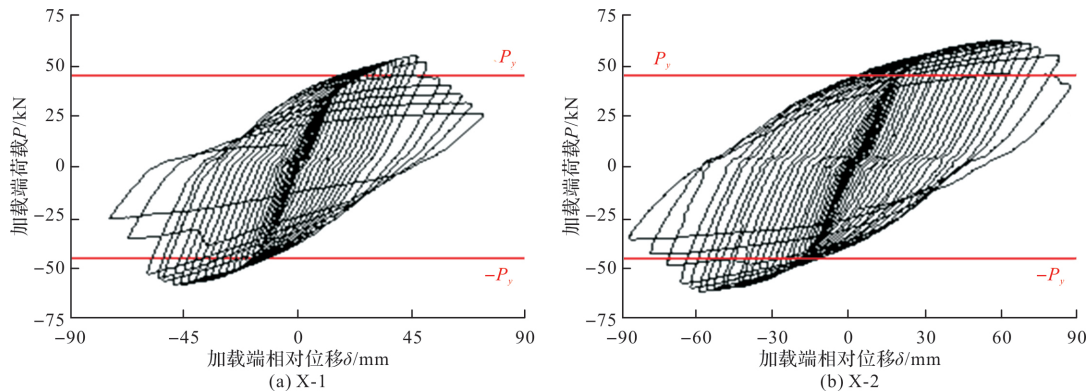


图 5 支管端荷载-相对位移滞回曲线

Fig. 5 Load-displacement hysteretic curves

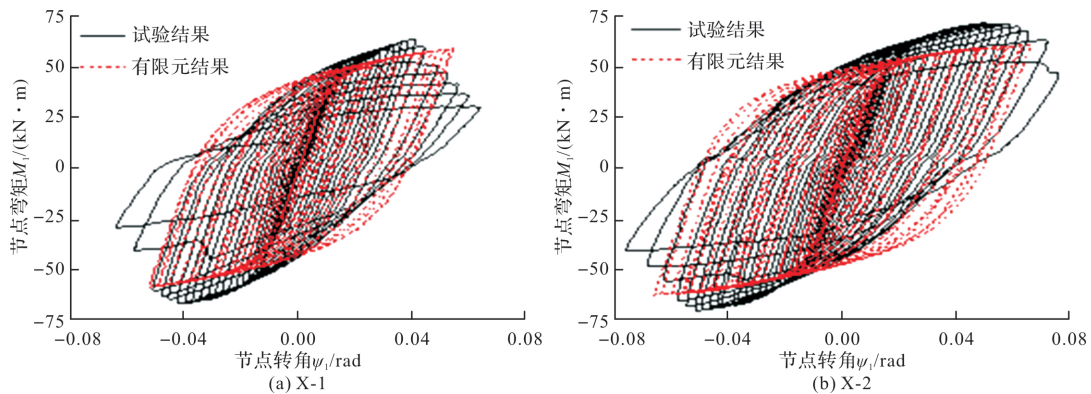
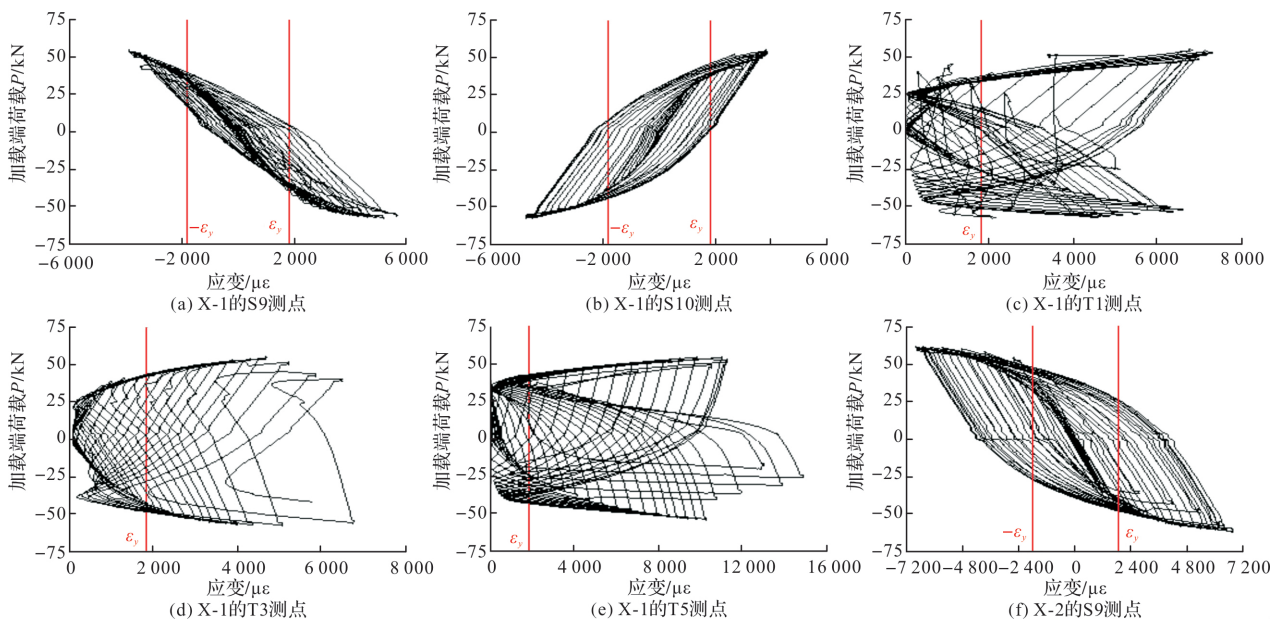


图 6 节点的平面内弯矩-转角 ( $M_i$ - $\psi_i$ ) 滞回曲线

Fig. 6 Moment-rotation ( $M_i$ - $\psi_i$ ) hysteretic curves





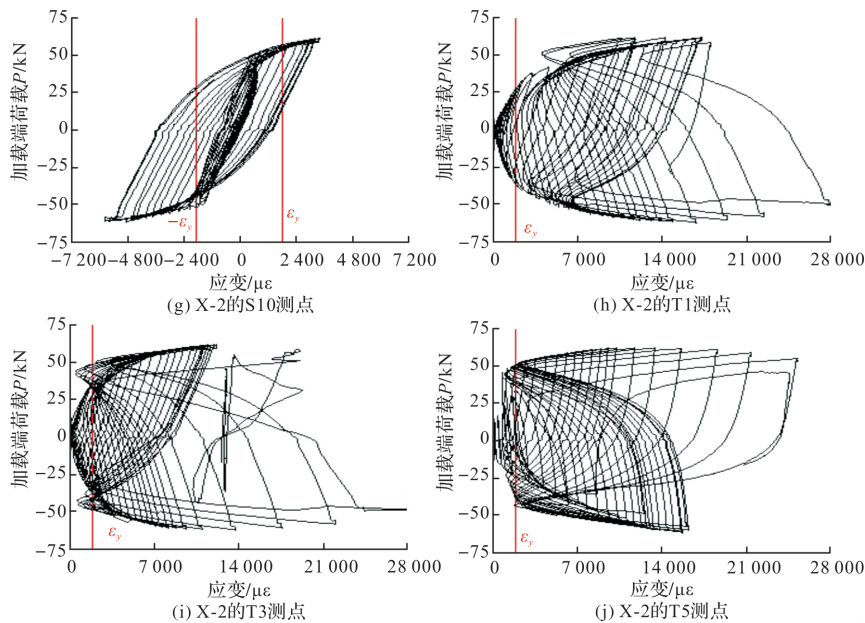


图 7 荷载-应变滞回曲线

Fig. 7 Load-strain hysteretic curves

由图 7 可知, 试件接近破坏时节点域的支管和主管都进入塑性, 但主管的塑性程度明显高于附近的支管, 且冠点和鞍点附近主管管壁均出现较大的塑性应变, 说明主管沿着相贯线都屈服且塑性化程度较高. 因此, 节点主要倚靠相贯线附近主管塑性变形及其开裂后的裂纹扩散来耗能, 尽管支管根部的塑性变形对节点耗能也有贡献.

2.3 节点抗弯承载力、延性和耗能分析

将试验得到的节点平面内抗弯承载力极限值  $M_{iu}$  (正、负向分别为  $M_{iu+}$ 、 $M_{iu-}$  且为两支管平均值) 与《钢结构设计标准》GB 50017—2017<sup>[22]</sup>、欧洲规范 EC3<sup>[23]</sup> 的 X 形圆钢管节点平面内抗弯承载力计算值  $M_{GB}$ 、 $M_{EC3}$  进行对比, 列于表 3.  $M_{GB}$ 、 $M_{EC3}$  式基于主管塑性软化破坏模式对应的计算公式, 且主管的钢材屈服强度  $f_y$ 、壁厚  $T$  取实测值.

表 3 节点抗弯承载力试验值与规范计算值

Tab. 3 Test value and standard calculation value of bending capacity of joints							
试件	$M_{iu+}$	$M_{iu-}$	$M_{eva} /$ kN · m	$M_{GB}$	$M_{EC3}$	$M_{eva} / M_{GB}$	$M_{eva} / M_{EC3}$
X-1	63.4	66.5	65.0	55.7	54.6	1.17	1.19
X-2	71.1	71.3	71.2	59.2	58.1	1.20	1.23

注:  $M_{eva} = (M_{iu+} + M_{iu-}) / 2$

由表 3 可知, 2 个试件的正、负向抗弯承载力接近, 且平均值  $M_{eva}$  大于相应规范计算值. 由表亦可知, 支主管斜交节点 X-2( $\theta=70^\circ$ ) 与支主管正交节点 X-1( $\theta=90^\circ$ ) 的抗弯承载力比值为 1.097, 仅略大于  $1/\sin 70^\circ = 1.064$ , 说明当支主管夹角较大 ( $\theta \geq 70^\circ$ ) 时规范用  $1/\sin \theta$  项来反映支主管斜交的有利影响比较合理. 进一步将节点抗弯承载力  $M_{eva}$  与支管

截面屈服弯矩  $M_y$  进行对比发现, X-1 的比值  $M_{eva}/M_y$  约为 1.25, 小于 X-2 的比值 (约 1.37), 说明支主管斜交 ( $\theta \neq 90^\circ$ ) 有利于提高节点承载效率 (即  $M_{eva}/M_y$ ).

表 4 给出节点延性评价结果. 表中  $\mu = \psi_u / \psi_y$  为延性系数, 节点极限转角  $\psi_u$  取弯矩-转角骨架曲线 (根据  $M_i-\psi_i$  滞回曲线得到) 中抗弯承载力极值对应的转角, 节点屈服转角  $\psi_y$  按文献[24]的方法确定,  $\psi_u$  和  $\psi_y$  均取两根支管的平均值. 由表可知, 2 个试件的正、反向极限转角 ( $\psi_{u+}$ 、 $\psi_{u-}$ ) 均大于 0.04, X-2 的延性系数大于 X-1, 说明支主管斜交节点的延性比正交节点更好.

表 4 节点延性系数

Tab. 4 Ductility ratio of joints

试件	$\times 10^{-2}$				$\mu_+$	$\mu_-$
	$\psi_{y+}$	$\psi_{y-}$	$\psi_{u+}$	$\psi_{u-}$		
X-1	1.55	1.65	4.21	4.56	2.72	2.76
X-2	1.80	1.88	5.68	5.25	3.16	2.79

参考《建筑抗震试验规程》<sup>[25]</sup>, 用能量耗散系数  $\zeta = E_{eva} / E_{ta}$  评价节点的耗能能力, 结果见表 5. 表中,  $E_{eva}$  表示  $P-\delta$  滞回曲线包围的面积, 反映循环往复一周节点吸收的能量, 这里取节点承载力下降 20% 对应加载级、节点承载力最大值对应加载级这两个典型滞回环的面积.  $E_{ta} = (P_{u+} + \delta_{u+} + P_{u-} - \delta_{u-}) / 2$ ,  $\delta_{u+}$ 、 $\delta_{u-}$  分别为试件承载力下降 20% (或承载力最大值) 所在的  $P-\delta$  曲线的最大正、负变形值,  $P_{u+}$ 、 $P_{u-}$  分别为  $\delta_{u+}$ 、 $\delta_{u-}$  相应的荷载, 表中的括号中的值为节点试件承载力最大值所对应加载级的相关计算值. 由表 5 可知, X-2 (支主管斜交节点) 在平面内往复弯矩作用下的耗能能力强于 X-1 (支主管正交节点).

表5 耗能分析

Tab. 5 Energy dissipation assessment

试件	$E_{eva}/(kN \cdot mm)$	$E_{ta}/(kN \cdot mm)$	$\zeta$
X-1	5 350.3(4 643.2)	2 686.3(2 609.6)	1.99(1.78)
X-2	8 182.0(6 570.0)	3 897.3(3 521.5)	2.10(1.87)

支主管斜交 X 形节点( $\theta \neq 90^\circ$ )比支主管正交 X 形节点( $\theta = 90^\circ$ )具有更高的承载力、更好的延性和耗能,其原因可以解释如下. 支管传来的弯矩  $M$  可简化为一对力偶  $F$ ,  $F$  分布在相贯线附近主管管壁上并分解为法向荷载集度  $q_n$  (垂直主管管壁方向)和切向荷载集度  $q_t$ ,  $q_n$  是引起管壁屈服直至破坏的关键. 斜交节点不仅相贯线大于正交节点,而且相同弯矩下法向荷载集度  $q_n$  更小,故需要更大的弯矩才能达到引起材料破坏的应变,亦即抗弯承载力更大. 屈服后,在相同弯矩增量下,斜交节点的峰值塑性应变的增长比正交节点更慢,主管管壁开裂前塑性发展更加充分,有利于提高延性和耗能. 图 8 给出 2 个试件在各自试验最大荷载(即将开裂)作用下节点域的塑性应变云图. 由图可知, X-2 的塑性应变峰值(0.569 6)明显小于 X-1(0.662),但前者在相贯线附近支主管管壁的塑性区域面积更大,说明支主管斜交节点的塑性均匀发展,延性和耗能更好,验证了试验和定性分析结果. 另外,由图 8 的塑性应变图和图 7 的应变测点结果也可知,两个节点试件均为相贯线附近主管管壁塑性应变过大后开裂破坏.

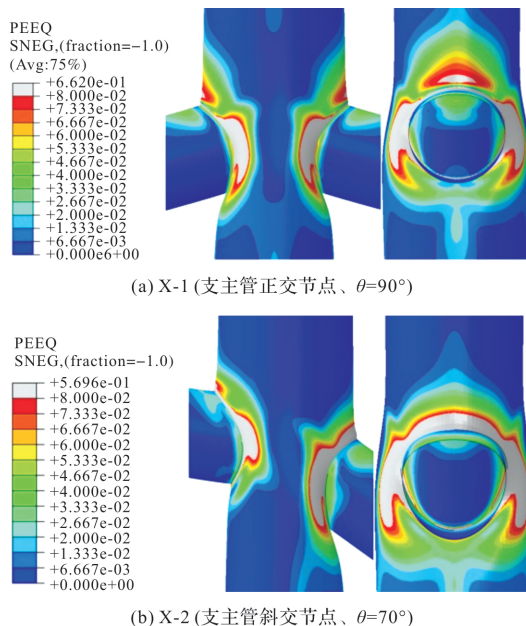


图8 试件的等效塑性应变云图比较

Fig. 8 Strain contours comparison of two X-joints

### 3 结论

进行了 2 个 X 形圆钢管节点在拟静力平面内往复弯矩作用下的试验研究,得到以下结论:

(1)两个节点均为相贯线附近(焊缝附近)主管管壁经历显著的塑性发展后开裂破坏,节点表现出良好的滞回性能;

(2)两个节点的主要耗能方式均为主管管壁塑性变形以及开裂后的裂纹扩散,尽管支管根部塑性变形对耗能也有贡献;

(3)对比支主管正交节点( $\theta = 90^\circ$ ),支主管斜交节点的相贯线附近主管管壁塑性发展更加均匀,其承载力、延性和耗能能力也更强;并且当节点的支主管斜交但夹角较大( $\theta \geq 70^\circ$ )时,规范用  $1/\sin\theta$  项来反映支主管斜交的有利影响比较合理.

### 参考文献 References

- [1] CHOO Y S, QIAN X D, LIEW JYR et al. Static strength of thick-walled CHS X-joints—Part I. New approach in strength definition[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2003, 59: 1201-1228.
- [2] 王德禹,陈铁云. 基于圆环模型的空间 XX 管接头轴压极限强度分析[J]. 上海交通大学学报. 1997, 31(11): 116-120.  
WANG Deyu, CHEN Tieyun. Static strength analysis of axial loaded multiplanar tubular XX-joints based on ring model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University. 1997, 31(11): 116-120.
- [3] 舒兴平,郑伯兴. KT 型相贯节点极限承载力非线性有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版). 2006, 33(6): 1-6.  
SHU Xingping, ZHENG Boxing. Nonlinear finite element analysis of the ultimate strength on tubular KT-joints[J]. Journal of Hunan University (Natural sciences). 2006, 33(6): 1-6.
- [4] 孙建东,童乐为,王斌,等. 空间 KK 形圆管搭接节点承载力计算公式改进研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 99-105.  
SUN Jiandong, TONG Lewei, WANG Bin, et al. Improved formula for loading capacity of multi-planar overlapped CHS KK-joints [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 99-105.
- [5] 马昕煦,陈以一. 支方主圆 T 形相贯节点轴压承载力计算公式[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 163-170.  
MA Xinxu, CHEN Yiyi. Ultimate strength formulae for RHS-CHS T-joints under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 163-170.
- [6] 陈誉,黄勇,冯然. X 形圆管斜插板节点轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报. 2015, 36(3): 90-97.  
CHEN Yu, HUANG Yong, FENG Ran. Experimental study on compressive property of circular tube-skewed gusset X-joints[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 90-97.
- [7] ZHAO B D, LIU C Q, YAO Z Y, et al. Capacity difference of circular hollow section X-joints under

- brace axial compression and tension[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(5): 1443-1453.
- [8] 高春彦, 杨卫平, 李斌. 圆钢管混凝土 K 型焊接相贯节点力学性能数值模拟[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版). 2018, 50(1): 18-22.
- GAO Chunyan, YANG Weiping, LI Bin. Numerical simulation on the mechanical behavior of the concrete-filled circular steel tubular welded K-joints[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition). 2018, 50(1): 18-22.
- [9] 武振宇, 谭慧光, 张耀春. 不等宽 T 型方钢管节点的刚度计算[J]. 哈尔滨建筑大学学报. 2002, 35(5): 22-27.
- WU Zhenyu, TAN Huiguang, ZHANG Yaochun. Stiffness of stepped T-type RHS joints subjected to axial loading[j]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture. 2002, 35(5): 22-27.
- [10] 王伟. 圆钢管相贯节点非刚性性能及对结构整体行为的影响效应[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- WANG Wei. Non-rigid behavior of unstiffened circular tubular joints and their effects on global performance of steel tubular structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [11] 赵必大, 刘成清, 章圣治, 等. Y 型圆钢管相贯节点的轴向刚度计算模型[J]. 西南交通大学学报(自然科学版), 2015, 50(5): 872-878.
- ZHAO Bida, LIU Chengqing, ZHAN Shenyan, et al. Calculation model for axial rigidity of CHS Y-type joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 872-878.
- [12] ZHAO B D, CHEN Y, LIU C Q, et al. An axial semi-rigid connection model for cross-type transverse branch plate to-CHS joints [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 413-426.
- [13] 陈以一, 沈祖炎, 翟红, 等. 圆钢管相贯节点滞回特性的实验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 57-62.
- CHEN Yiyi, SHEN Zuyan, ZHAI Hong, et al. Experimental research on hysteretic property of unstiffened space tubular joints [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 57-62.
- [14] ZHAO X Z, LIU J T, XU X B, et al. Hysteretic behaviour of overlapped tubular k-joints under cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2018, 145: 397-413.
- [15] 王彬, 赵宪忠. 平面 K 形圆钢管搭接节点恢复力模型研究[J]. 建筑结构. 2012, 42(S1): 716-720.
- WANG Bin, ZHAO Xianzhong. Research on hysteretic model of overlapped CHS K-joints [J]. Building structure. 2012, 42(S1): 716-720.
- [16] 陈以一, 王伟, 周锋. 钢管结构——新需求驱动的形式拓展和性能提升[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 1-20.
- CHEN Yiyi, WANG Wei, ZHOU Feng. Steel tubular structures: configuration innovation and performance improvement driven by new requirements[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 1-20.
- [17] WANG W, CHEN Y Y, MENG X D, et al. Behavior of thick-walled CHS X-joints under cyclic out-of-plane bending[J]. Journal of constructional Steel Research, 2010, 66: 826-834.
- [18] ZHAO B D, FANG C, WANG W, et al. Seismic performance of CHS X-connections under out-of-plane bending[J]. Journal of constructional Steel Research, 2019, 158: 591-603.
- [19] 孟宪德, 陈以一, 王伟. X 形圆钢管相贯节点平面外受弯滞回模型研究[J]. 土木工程学报. 2012, 45(8): 8-15.
- MENG X D, CHEN Y Y, WANG W. A hysteretic model of unstiffened CHS X-joints under out-of-plane bending[J]. China Civil Engineering Journal. 2012, 45(8): 8-15.
- [20] ZHAO B D, SUN C, CAI Y Z, et al. An out-of-plane bending hysteretic model for multi-planar CHS X-connections[J]. Structures, 2020, 23: 335-350.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for welding of steel structure of building: GB50661—2011 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2018.
- [23] European Committee for standardization. Eurocode 3: Design of steel structures, part 1.8: Design of joints [S]. Brussels: CEN, 2005.
- [24] KUROBANE Y, MAKINO Y, OCHI K. Ultimate resistance of unstiffened tubular joints [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(2): 385-40.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015.

(编辑 沈波)