Q460高强钢管平行插板节点面内抗弯承载力特性及计算方法研究

刘永生*,王 昊,陶 欣,林 刚,张传瑾,王秋临
(南京电力设计研究院有限公司,南京 210009)

摘 要: 为提升Q460高强钢管插板节点的传力可靠性,本文提出一种新型平行插板节点构造形式,并对其面内抗弯承载力特性及计算方法展开研究。设计开展了两组Q460高强钢管插板节点面内抗弯承载力试验,研究了节点破坏模式、承载力与变形规律及关键部位应变发展特征;建立了节点有限元模型并进行参数分析,深入探讨了主管径厚比(D/T)、插板长度与主管管径比(B/D)、主管管径与插板间距比(D/d)、插板厚度与节点板厚度比(t_c/t_r)、主管轴力比($N/(Af_y)$)等无量纲参数对平行插板节点承载力的影响规律,在此基础上,提出了平行插板节点面内抗弯承载力的建议计算公式。结果表明:节点破坏模式表现为受压区主管管壁局部凹陷屈曲伴随着插板中间主管管壁鼓屈;两块平行插板均匀分担了支管传递的荷载,在节点丧失承载能力时,插板仍然保持弹性;无量纲参数D/T、B/D、D/d、$N/(Af_y)$对节点承载力影响较为显著,而参数t_c/t_r对节点承载力的影响很小;所提出的节点承载力计算公式具有较好的适用性,可为实际工程提供参考。

关键词: Q460高强钢管;平行插板节点;破坏模式;面内抗弯承载性能;参数分析
中图分类号: TU392.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)08-0035-09
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20250107001

In-Plane Bending Bearing Capacity and Calculation Method of Q460 High-Strength Steel Tube-Parallel Gusset Joints

LIU Yongsheng, WANG Hao, TAO Xin, LIN Gang, ZHANG Chuanjin, WANG Qiulin*
(Nanjing Electric Power Design & Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210009, China)
*Corresponding author: 2369859690@qq.com

Abstract: To enhance the load-transfer reliability of Q460 high-strength steel tubular gusset plate joints, a novel tubular joint with parallel gusset plates is proposed, and its in-plane bending bearing capacity and calculation method are investigated. Two sets of in-plane bending bearing capacity tests were designed and conducted on Q460 high-strength steel tube-parallel gusset joints to study the failure modes, load-deformation behavior, and strain development at typical locations. Finite element models of the joints were established, and parametric analyses were performed to investigate the effects of key non-dimensional parameters on the bearing capacity, including the diameter-to-wall thickness ratio of the main tube (D/T), ratio of gusset plate length to main tube diameter (B/D), ratio of main tube diameter to gusset plate spacing (D/d), ratio of gusset plate thickness to joint plate thickness (t_c/t_r), and main tube axial force ratio ($N/(Af_y)$). Based on these analyses, a recommended formula for calculating the in-plane bending bearing capacity of tube-parallel gusset joints was proposed. The results indicate that the failure mode of the joints

收稿日期:2025-01-07
基金项目:国网江苏省电力有限公司省管产业单位科技项目(JC2024085)
作者简介:
刘永生(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事输电线路结构性能方面的研究。E-mail:2369859690@qq.com。(通信作者)

involves local buckling of the main tube wall in the compression zone accompanied by bulging of the main tube wall between the gusset plates. The two parallel gusset plates evenly share the load transferred by the branch tube, and the gusset plates remain elastic when the joints lose their load-bearing capacity. The non-dimensional parameters D/T、B/D、D/d、$N/(Af_y)$ have significant effects on the load-bearing capacity of the joints, while t_c/t_r has a minor impact. The proposed formula for calculating the load-bearing capacity of the joints exhibits good applicability and can provide a reference for practical engineering.

Keywords: Q460 high-strength steel tube; joint with parallel gusset plates; failure mode; in-plane bending bearing capacity; parametric analysis

窄基钢管塔占地面积小、线路通道占用少，在城区输电线路中应用广泛[1-2]。节点是窄基钢管塔的核心受力部件，其工作可靠性直接关系输电线路安全运行。目前窄基钢管塔多采用单插板节点[3-4]，该构造形式通过插板以栓接方式连接主管与支管，具备构造简单、受力性能优良、施工便捷、工期短等优势[5]。随着Q460高强钢等高强钢材逐步推广应用，主管与支管自身承载力大幅提升，常规单插板节点易出现钢管强度无法充分发挥的问题，难以适配高强钢管的受力需求。为此，本文在单插板节点基础上增设两块平行插板形成新型节点构造，对节点区域进行加强，实现荷载从支管向主管的有效传递。

国内外关于钢管节点的研究主要集中在相贯节点和单插板节点的受力性能方面，相关研究成果也较多。日本规范[6]明确了无加劲肋、有加劲肋两类钢管单插板节点的承载力计算方法。SOH等[7]采用屈服线理论推导了支管在轴压作用下十字形相贯节点的承载力计算公式，并基于试验数据验证了计算公式的可靠性。KIM[8]针对无加劲肋负偏心钢管K形插板节点开展试验研究，给出了插板节点主管管壁局部抗压承载力和管壁抗弯承载力的计算公式。ANDREW等[9]针对X形圆管斜插板节点的承载力特性开展数值模拟，研究了宽径比、插板厚度、夹角对节点承载力的影响规律。陈焱彬等[10]、王贵等[11]和胡剑锋等[12]针对无环向加劲肋Q460高强钢管插板节点的抗弯承载力及滞回性能开展了系统研究，给出了承载力计算方法及抗震设计节点选型建议。黄勇和陈誉等[13-14]以X形圆管斜插板受压节点为研究对象，探讨了插板与主管夹角、插板厚度及钢管壁厚等参数对节点承载力性能的影响规律，发现插板相对比较薄的情况下，国际焊接学会(IIW)规范的计算值偏于不安全。孙伟健等[15]对T形钢管混凝土插拔连接节点的平面内抗弯性能开展了数值模拟，研究了主管壁厚、支管壁厚、主管形式和混凝土强度对节点破坏模式和承载力的影响，提出了基于力学模型的主管冲剪破坏模式下节点受弯承载力计算公式。龙翔等[16]、李正良等[17]和陈志辉等[18]针对输电塔钢管-插板连接节点的面内及面外抗弯承载性能、疲劳性能开展试验及数值模拟研究，从破坏模式、承载力、应变发展等角度出发，提出了插板节点选型设计建议。整体来看，现有文献极少涉及钢管平行插板节点的承载力特性、破坏机理研究，现行规范也未给出对应的承载力计算方法与设计依据，若直接采用单插板节点计算公式进行选型设计，存在明显不合理性。

鉴于上述研究现状，本文以Q460高强钢管平行插板节点为研究对象，开展面内抗弯承载力试验与数值模拟，揭示节点破坏模式、承载力变形特征及关键区域应变发展规律，分析主管管径、壁厚、插板长度、插板间距等关键参数对节点承载力的影响，最终建立平行插板节点面内抗弯承载力理论计算公式，为该新型节点的工程选型、设计应用提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试件设计

结合实际四柱窄基钢管塔主管、支管的常用规格与内力水平，依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[19]，设计加工了两组不同规格的钢管平行插板节点试件，如图1所示。试件主管、支管均采用直缝圆钢管，两块平行插板通过角焊缝与主管管壁焊接，并与支管端部设置的插入式节点板进行螺栓连接，以实现主管与支管的连接。为消除边界条件干扰、减小主管自身弯曲带来的影响，主管长度取2 000 mm，支管长度取1 440 mm，试件详细尺寸见表1。试件钢管与插板均采用Q460高强钢，材性试验测得钢材屈服强度为479 MPa，抗拉强度为552 MPa，弹性模量为206 GPa；连接螺栓选用8.8级高强螺栓，其设计强度为400 MPa，屈服强度为640 MPa，极限强度为800 MPa。

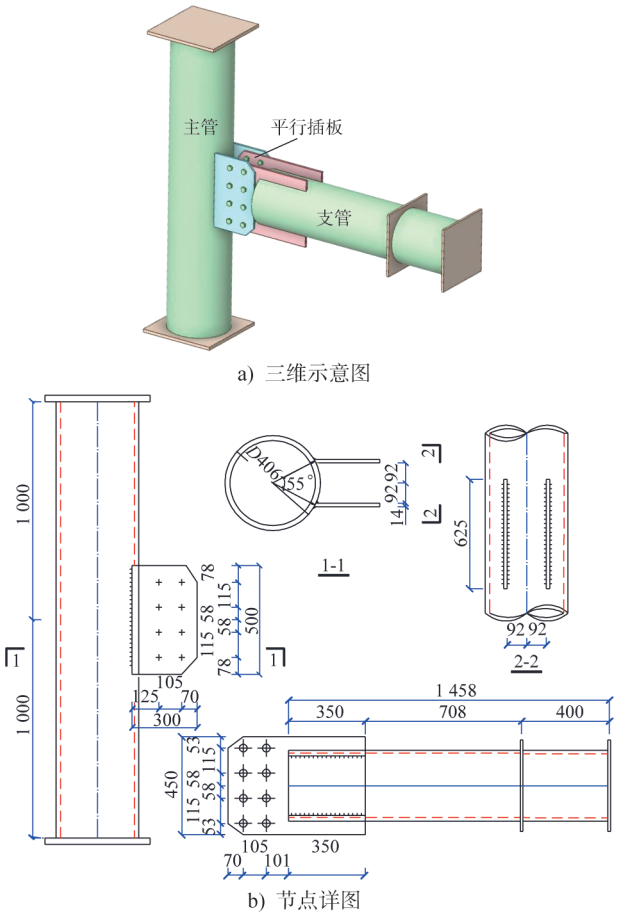
1.2 加载装置

按照钢管平行插板节点在铁塔中的实际受力情况进行加载，主管施加轴向压力，支管施加平面内横向荷载，使节点区域处于平面弯剪受力状态。图2为试验加载装置，主管一端锚固于反力墙，另一端通过1#千斤顶施加轴向压力；2#千斤顶竖向布置于反力墙与支管端部之间，用于施加支管平面内横向荷载。加载过程中，首先在主管上施加0.4倍屈服轴力(即$N=0.4Af_y$)的轴向压力并维持不变，然后在支管上逐级施加横向荷载，直至节点区域

表1　试件尺寸

Table 1　Detailed dimensions of specimens

编号	主管		支管		插板		
	规格/mm	长度/mm	规格/mm	长度/mm	间距 d/mm	厚度 t_c/mm	长度 B/mm
PJ-1	Φ406×8	2 000	Φ356×10	1 510	198	14	500
PJ-2	Φ529×14	2 000	Φ480×20	1 440	258	18	650

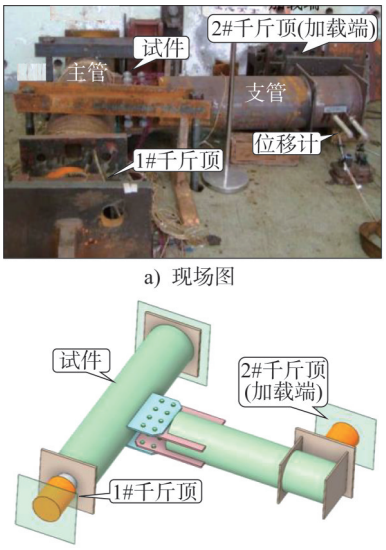


a) 三维示意图

b) 节点详图

图1　钢管平行插板节点（单位：mm）

Fig. 1　Steel tube-parallel gusset joints (unit: mm)



a) 现场图

b) 三维示意图

图2　试验装置

Fig. 2　Test setup

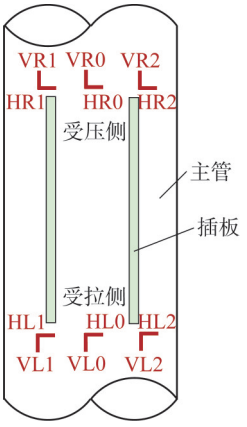


图3　应变片布置

Fig. 3　Arrangement of strain gauges

发生破坏并终止试验。

1.3　测点布置

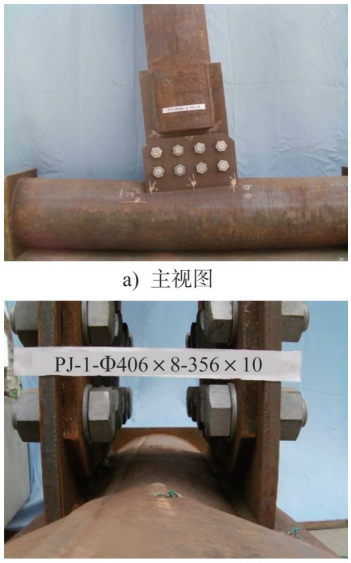
加载过程中采集支管水平位移及节点部位主管的应变，并在持荷阶段观测记录钢管平行插板节点的变形变化情况。位移计布置在支管加载端，用以测量支管在加载方向上的位移；前期数值模拟工作表明，平行插板节点在荷载作用下的破坏模式表现为插板部位主管局部凹陷，因此在插板受力较大的主管区域布置应变片，在插板上侧主管区域布置应变片VR0～VR2、HR0～HR2，下侧对称主管区域布置应变片VL0～VL2、HL0～HL2，监测主管环向与纵向应变的变化规律，应变片布置如图3所示。

2　试验结果分析

2.1　失效模式

试验加载结束时钢管平行插板节点试件PJ-1和PJ-2的失效模式较为相似，主要表现为与插板焊接的主管受压区域均发生凹陷明显的局部屈曲，破坏模式如图4所示。在荷载达到屈服承载力时，插板受压侧附近主管沿主管轴线呈对称的双波形局部凹陷，其凹陷程度随着荷载增大而不断增大，节点破坏时钢管的局部凹陷深度最

大达到了5 mm;插板受拉侧主管的受拉隆起变形较小,但插板与主管的连接焊缝根部出现了轻微的撕裂裂纹;两块插板之间的主管受到挤压,发生了整体凹陷并伴随中部鼓曲;在加载结束时,插板及支管均没有发生明显变形,插板与节点板的连接螺栓未出现破坏或滑移现象,但节点域附近主管出现轻微弯曲现象。



a) 主视图

b) 侧视图

图4 破坏模式

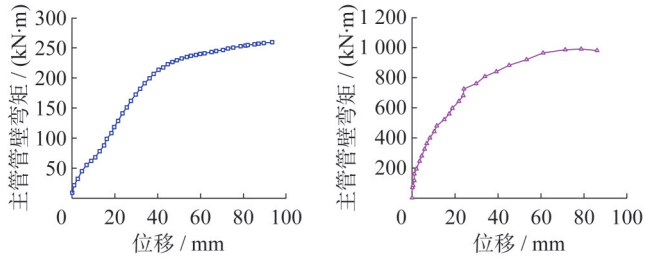
Fig. 4 Failure modes

2.2 承载力与变形特性

试验测得的各试件荷载-位移曲线如图5所示,其中横坐标为支管端部水平位移,纵坐标为主管管壁弯矩,通过支管端部荷载乘以加载点至主管管壁距离得到。试件荷载-位移曲线有明显的弹塑性阶段,随着荷载增加,曲线斜率不断减小,说明节点域刚度不断下降。具体而言,在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载-位移曲线基本呈线性增长趋势;随着荷载增加,节点区域的主管管壁发生明显的凹陷变形,整个节点进入塑性阶段,荷载-位移曲线呈现显著的非线性特征;在加载后期,支管位移不断增大,主管管壁凹陷鼓曲更加明显,但承载力不再上升甚至有下降趋势,说明此时节点已经发生了破坏,基本丧失了承载能力。

2.3 抗弯刚度分析

为了深入探讨平行插板节点的抗弯刚度变化规律,图6进一步给出了两组试件的弯矩-转角曲线,其中转角由插板端部主管变形转化得到。根据弯矩-转角曲线提取节点初始刚度和屈服后刚度,初始刚度为弯矩-转角曲线的初始斜率,屈服后刚度为屈服后曲线切线的斜率,并定义节点刚度退化系数为屈服后刚度与初始刚度的比

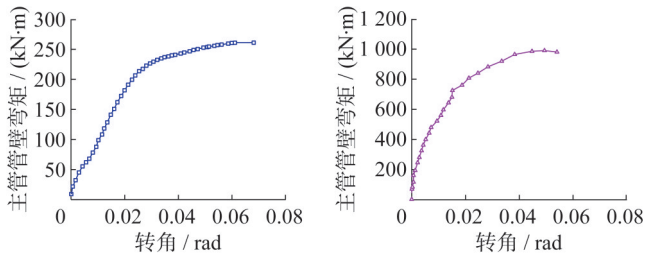


a) 试件PJ-1 b) 试件PJ-2

图5 各试件荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of specimens

值。经计算,试件PJ-1的初始刚度和屈服后刚度分别为9 377 kN·m·rad^{-1}、1 321 kN·m·rad^{-1},试件PJ-2的初始刚度和屈服后刚度分别为84 678 kN·m·rad^{-1}、11 870 kN·m·rad^{-1},由于试件PJ-2的主管径厚比显著小于试件PJ-1的主管径厚比,试件PJ-2的抗弯刚度要远大于试件PJ-1的抗弯刚度。试件PJ-1和PJ-2的刚度退化系数均在14%左右,表明节点屈服后抗弯刚度退化明显。



a) 试件PJ-1 b) 试件PJ-2

图6 各试件弯矩-转角曲线

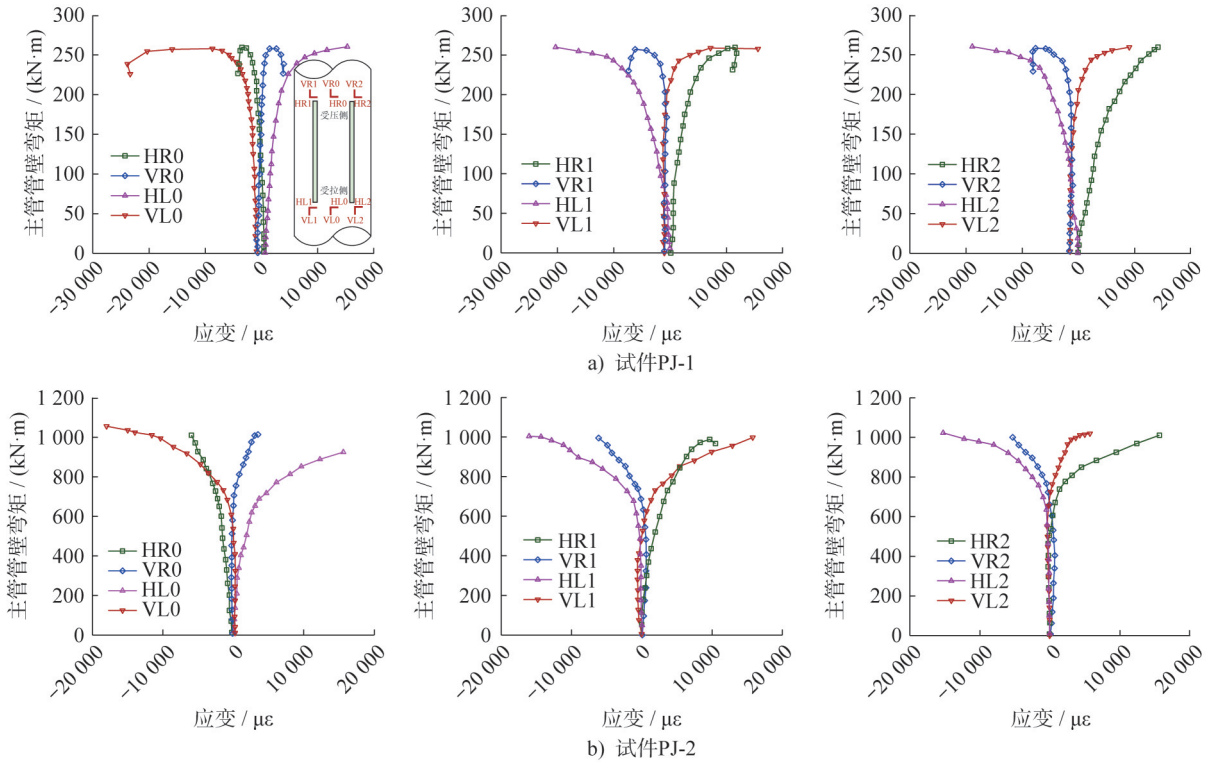
Fig. 6 Moment-rotation curves of specimens

2.4 典型部位应变发展

加载过程中节点关键部位的应变发展如图7所示,其中试件PJ-2测点HL0应变片在临近节点破坏时发生了损坏,因此丢失了最后几级的加载数据。试件PJ-1与试件PJ-2的应变发展规律较为一致,加载结束时,受压区主管管壁应变达到23 000 με,而受拉区主管管壁应变达到10 000 με,均已超过了Q460钢材的屈服应变2 395 με;相比而言,受压区主管管壁的应变要高于受拉区主管管壁的应变,这与试验节点受压区主管管壁发生明显凹屈变形、受拉区主管管壁轻微隆起变形的现象一致。

受压侧插板之间的主管环向应变最先达到受拉屈服,随后纵向应变达到受压屈服,且压应变迅速发展,这与受压侧插板之间的主管挤压隆起变形的现象一致;相比而言,整个加载过程中受拉侧主管应变均较小,但同样进入屈服状态。

双插板受压端两侧测点的环向应变达到受压屈服应变后迅速发展,且两侧压应变的发展规律基本一致,随着



a) 试件PJ-1

b) 试件PJ-2

图7　各试件的荷载–应变曲线

Fig. 7　Load-strain curves of specimens

荷载增大，纵向应变也达到受拉屈服应变并迅速发展；左右插板端部主管应变水平及发展规律较为接近，说明两块平行插板均匀分担了支管传递而来的荷载，传力路径合理且明确；插板端部的主管纵向应变为压应变、环向应变为拉应变，与插板之间的主管应变发展规律正好相反，该现象与试验中双插板之间主管挤压隆起、两侧局部凹陷的变形特点一致。

3　承载力特性的数值模拟

3.1　有限元模型

为深入探讨Q460高强钢管平行插板节点的破坏模式和承载力特性，基于ANSYS建立了平行插板节点的非线性数值模型，如图8所示。主管、支管、插板及加载板等部件均采用Solid185实体单元进行模拟，为了提高计算效率，忽略支管插板与主管插板的螺栓建模，直接采用GULE操作进行整体连接[20]。数值模型中钢材的屈服强度、极限强度、弹性模量采用实测值，泊松比为0.3，材料的应力-应变关系均采用三折线模型如图9所示，遵循von Mises屈服准则。有限元模型的边界条件与试验保持一致，主管一端为固定支座，另一端为滑动支座，释放沿主管轴线方向的平动约束，支管端部为自由端。荷载施加顺序与试验相同，先对主管施加轴向压力，再对支管加载板施加位移荷载。

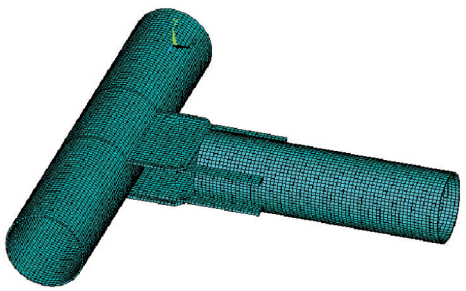


图8　有限元模型

Fig. 8　Finite element model

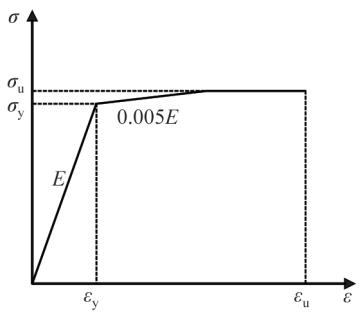


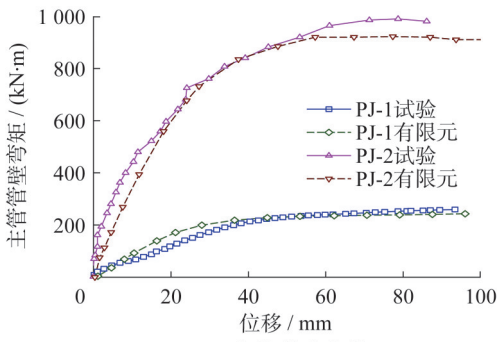
图9　高强钢材料本构

Fig. 9　Material constitutive of high-strength steel

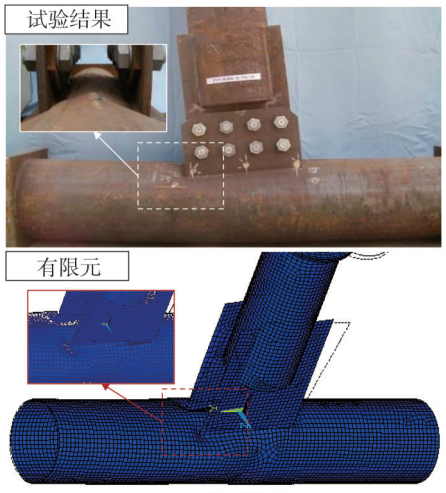
3.2　模型验证

为验证有限元模型的准确性，将模拟得到的承载力、变形特性、破坏模式与试验结果进行对比，如图10所示。

数值模拟得到的荷载-位移曲线与试验结果较为吻合，均表现出明显的弹塑性阶段。受试件加工、设备安装、数据采集等误差影响，试验结果和有限元结果难免会存在误差，试件PJ-1、PJ-2节点承载力有限元结果与试验结果误差分别为4%、7%。同时，试验和模拟分析得到的破坏模式较为一致，在极限荷载作用下，插板附近受压侧主管发生局部凹陷屈曲，平行插板之间的主管挤压外鼓，最终导致节点承载力失效。综上，本文建立的有限元模型精度合理，可用于节点承载力参数分析。



a) 荷载-位移曲线



b) 破坏模式

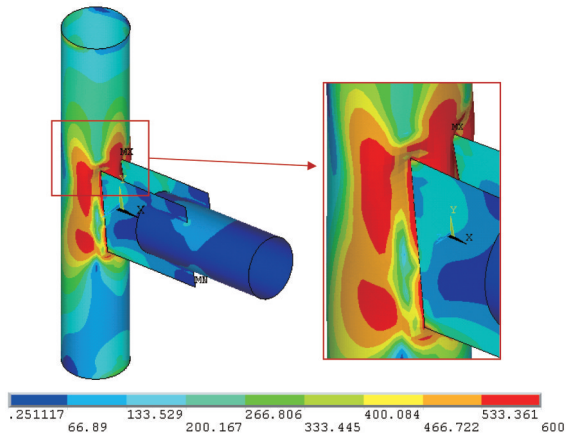
图10 试验及模拟结果对比

Fig. 10 Comparison between test and simulation results

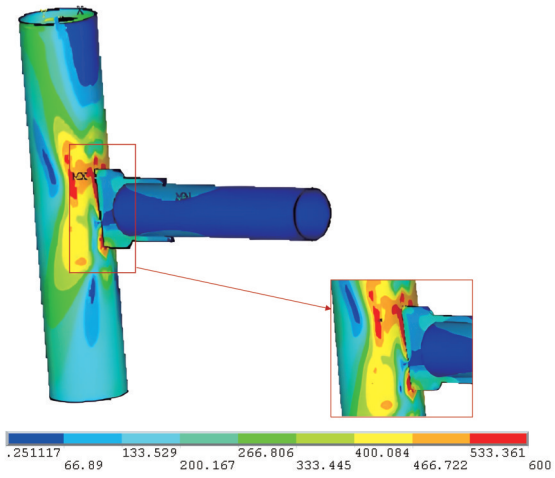
3.3 传力及失效机理分析

极限承载力作用下钢管平行插板节点的von Mises应力分布如图11a)所示。节点失效模式为受压侧节点板附近的主管管壁发生局部凹陷屈曲，伴随着插板之间的主管管壁挤压外鼓，而受拉侧主管管壁发生轻微鼓曲。从应力分布云图可以看出，节点的应力分布以两插板中心为轴线呈左右对称形式，说明两块平行插板均匀分担了支管传递的荷载，传力路径合理明确；左右插板端部和中间部位的受压区主管管壁基本同时进入屈服，随后屈服区域不断扩大，同时受拉侧插板端部的主管管壁开始进入屈服阶段并随着荷载的增加屈服区域不断增大。相比而言，受压侧主管管壁区域的应力要明显大于受拉侧的应力，可见节点的承载力失效主要由受压区主管管壁屈曲引起的；加载结束时，主管上的应力最大值位于两节点板受压侧主管附近，并以节点板为中心应力向四周逐渐减小，此外支管与插板上的应力均保持在弹性范围内，平行插板能够有效将支管荷载传递至主管。

为了与传统单插板节点面内抗弯承载力特性进行对比，图11b)进一步给出了极限荷载下钢管单插板节点应力分布云图。单插板节点失效模式为受压侧节点板附近的主管首先出现屈曲，随后节点板端部位置处的主管屈曲，并随着荷载的增加而不断发展，最终在主管与节点板的交界处出现凹陷，节点丧失承载力。相比而言，当插板形式由单插板向双插板变化时，节点受力形式由管壁中心受力转为管壁偏心局部受力，两块节点板均匀分担了由支管传递来的荷载，有效缓解了插板端部的应力集中问题。



a) 平行插板节点



b) 单插板节点

图11 极限荷载下插板节点的应力分布（单位：MPa）

Fig. 11 Stress distribution of gusset joints under ultimate loads (unit: MPa)

3.4 参数分析

进一步开展钢管平行插板节点承载力特性的影响因

素分析，重点考虑主管径厚比（D/T）、插板长度与主管管径比（B/D）、主管管径与插板间距比（D/d）、插板厚度与节点板厚度比（t_c/t_r）、主管轴力比（$N/(Af_y)$）等无量纲参数，图12给出了各参数变化下节点屈服承载力的变化规律。为了保证参数分析结果具有一定的工程参考性，主管尺寸及施加的轴力选取了工程中较为常用的数据。

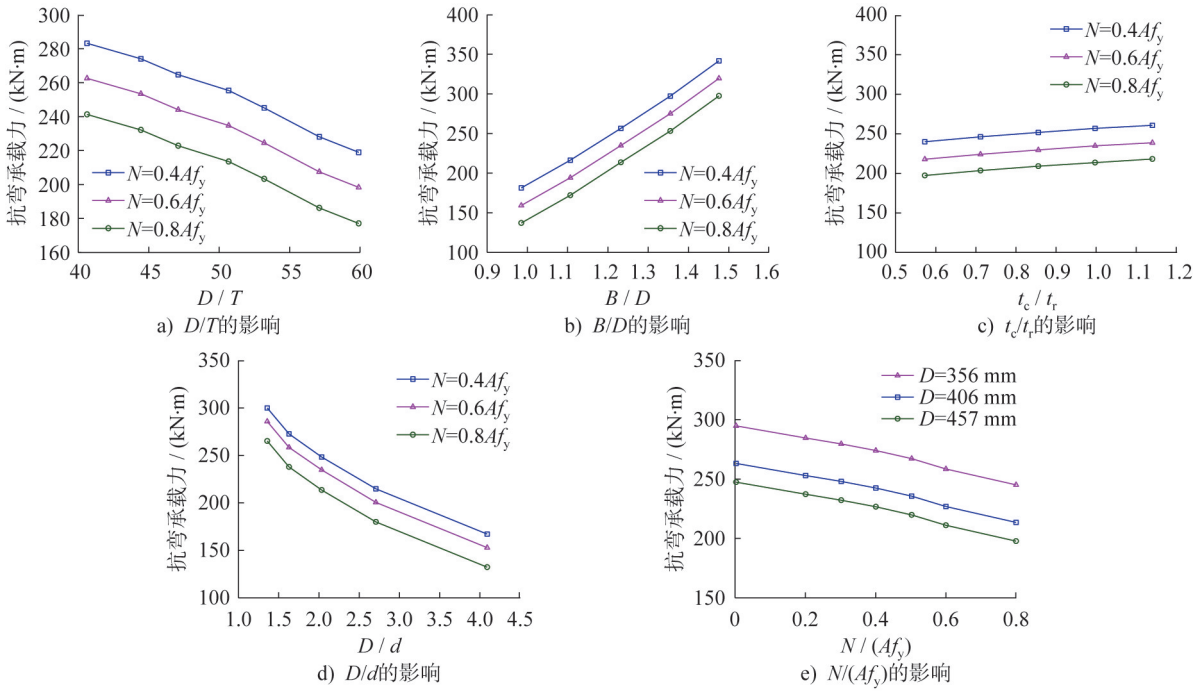


图12　关键参数对节点抗弯承载力的影响

Fig. 12　Influence of key factors on the bending bearing capacity of joints

由图可以看出，节点承载力随着主管径厚比的增大几乎呈线性下降趋势，主管径厚比每增大7%，节点承载力下降约5%，这是因为随着主管径厚比增大，主管管壁抵抗局部屈曲的能力逐渐下降，而节点破坏模式表明节点承载力主要由主管管壁抵抗局部屈曲能力所决定。节点承载力随着B/D增加而线性增加，该参数每增加0.12，节点承载力能够提升20%左右。节点承载力随着t_c/t_r的增加而增加，但增加效果不明显，t_c/t_r增加1倍，节点承载力仅增加7%，几乎可以忽略t_c/t_r对节点承载力的影响；节点承载力随着D/d的增大而显著减小，且随着主管轴力的增大而显著减小。总体而言，在本文所选取的参数范围内，即主管管径为325～457 mm、管壁为6～14 mm，减小主管径厚比是增加节点承载力较为有效的办法，其次也可通过增加插板长度和插板间距来提高平行插板节点的极限承载力。

4　承载力计算方法

钢管平行插板节点属于新型节点，国内外尚无资料和经验公式可供查询，文献[6]给出了钢管单插板节点面内抗弯承载力的经验公式，考虑到单插板节点与平行插板节点的构造及破坏模式较为相似[13]，钢管平行插板节点面内抗弯承载力计算公式的形式可以借鉴单插板节点面内抗弯承载力计算公式的形式。参数分析表明主管管径D、主管壁厚T、插板长度B、插板间距d和主管轴力N是影响双插板钢管节点承载力的关键因素，故采用三个无量纲参数来描述这些因素对承载力的影响：主管径厚比D/T、主管径长比B/D、径距比d/D，之后以这三个无量纲参数和主管轴力建立240组有限元模型并获取节点承载力，采用最小二乘法对承载力公式进行系数拟合，得到平行插板节点面内抗弯承载力建议计算公式，如式(1)所示。

$$M_u=\left[15.2\left(\frac{D}{T}\right)^{0.15}+19.9\left(\frac{B}{D}\right)^{0.45}-16\left(\frac{D}{d}\right)^{0.36}-11.3\right]BT^2f_yK_N \tag{1}$$

式中：M_u为双插板节点的屈服承载力；f_y为主管钢材的强度设计值；K_N为主管轴力对节点承载力的影响系数，可由式(2)计算得到。

$$K_N=-0.26\left(\frac{N}{N_y}\right)+1.1 \tag{2}$$

式中：N为主管轴压力；N_y为主管屈服轴力。

为了验证计算公式的可靠性，在上述模型以外重新建立了10组有限元模型，并将节点承载力有限元模拟值

与理论公式计算值进行对比，如表2所示。双插板节点承载力理论计算值与有限元模拟值的误差在5%以内，证明本文提出的计算公式精度良好，可用于该类节点的工程计算与设计。

表2 节点承载力计算值与模拟值对比

Table 2 Comparison between calculated and simulated bearing capacity of joints

编号	D/mm	T/mm	B/mm	d/mm	t_c/mm	N/N_y	M_F/(kN·m)	M_c/(kN·m)	误差
J1	356	8	500	200	14	0.4	276.6	280.4	1.36%
J2	377	8	500	200	14	0.4	267.5	269.1	0.59%
J3	406	8	500	200	14	0.4	257.9	254.7	−1.26%
J4	406	6	500	200	14	0.4	155.1	153.2	−1.23%
J5	406	8	500	200	14	0.3	250.9	259.3	3.35%
J6	406	8	600	200	14	0.4	345.1	338.7	−1.85%
J7	406	14	500	200	14	0.4	682.4	680.6	−0.26%
J8	406	8	500	200	12	0	266.1	277.6	4.32%
J9	406	10	500	200	8	0.4	380.1	377.2	−0.77%
J10	406	8	450	200	8	0.4	218.0	215.8	−1.01%

注：表中M_F为有限元模拟值；M_c为理论公式计算值；误差$=(M_c-M_F)/M_F\times100\%$。

5 结论

本文针对Q460高强钢管平行插板节点开展试验及数值模拟研究，分析了该类节点的破坏模式、应力发展规律、承载力及其关键影响因素，并提出了相应的承载力计算方法。主要结论如下：

(1) 钢管平行插板节点的破坏模式表现为插板受压侧主管沿轴线呈对称的双波形局部凹陷，受拉侧主管管壁发生轻微的隆起变形，两块插板之间的主管管壁受到挤压，亦发生了整体凹陷和中部鼓曲。

(2) 两块平行插板均匀分担了支管传递的荷载，在节点丧失承载能力时，插板仍然保持弹性，节点传力路径明确、受力合理。

(3) 由于试件PJ-2的主管径厚比显著小于试件PJ-1的主管径厚比，试件PJ-2的抗弯刚度比试件PJ-1的抗弯刚度大近8倍，此外试件PJ-1和PJ-2的刚度退化系数均在14%左右，表明节点屈服后抗弯刚度退化明显。

(4) 在所选取的参数范围内，主管径厚比对节点面内抗弯承载力影响较为显著，主管径厚比每增大7%，节点承载力下降约5%。节点承载力随着B/D增加而线性增加，B/D每增加10%，节点承载力能够提升20%左右。主管轴力增大将导致承载力线性下降；插板与节点板厚度比对承载力基本无影响。

(5) 工程设计中，优先减小主管径厚比可有效提升节点承载力，适当增加插板长度、优化插板间距也能改善节点受力性能。

(6) 提出了平行插板节点面内抗弯承载力计算公式，公式计算结果与有限元模拟值差异小于5%，计算精度满足工程要求，可为此类新型节点的设计与应用提供参考。

参考文献：

[1] 罗玉鹤. 110 kV窄基钢管塔的研究设计[J]. 电力建设，2010，31(8)：25-28. DOI：10.3969/j.issn.1000-7229.2010.08.006.
LUO Yuhe. Design of 110 kV narrow-base steel pipe tower [J]. Electric Power Construction，2010，31(8)：25-28. DOI：10.3969/j.issn.1000-7229.2010.08.006.(in Chinese)

[2] 刘德标，钱统亚，张大长. 220/110kV混压四回路新型窄基四柱钢管塔优化设计[J]. 江苏电机工程，2013，32(3)：42-45. DOI：10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2013.03.013.
LIU Debiao，QIAN Tongya，ZHANG Dachang. Optimization design of a new type narrow base four column steel pipe tower for 220/110 kV mixed voltage 4-circuit circuit transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering，2013，32(3)：42-45. DOI：10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2013.03.013.(in Chinese)

[3] 冉杨. 窄基钢管塔小角度分离式管—板节点承载力研究[D]. 杭州：浙江大学，2016.
RAN Yang. Research on bearing capacity of separated tube-gusset-plate joints with small included angles in narrow-foundation tubular towers [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2016.(in Chinese)

[4] 胡文侃，应健，陈勇，等. 窄基钢管塔小夹角K型管-板节点设计计算方法及中外标准比较[J]. 钢结构，2017，32(2)：84-89，96. DOI：10.13206/j.gjg201702019.
HU Wenkan，YING Jian，CHEN Yong，et al. A new design computing method for k-type tube-gusset-plate joints with small included angles in narrow-foundation tubular towers and the calculation results comparison by codes at home and abroad[J]. Steel Construction，2017，32(2)：84-89，96. DOI：10.13206/j.gjg201702019.(in Chinese)

[5] 董建尧，何江，刘丽敏，等. 输电线路大跨越钢管塔的应用和结构设计[J]. 武汉大学学报(工学版)，2007，40(增刊1)：214-218.
DONG Jianyao，HE Jiang，LIU Limin，et al. Application and structural design of steel tube towers for large span crossing transmission lines[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2007，40(Suppl.1)：214-218.(in Chinese)

[6] 送電用鋼管鉄塔製作基準[S].

[7] SOH C K，CHAN T K，YU S K. Limit analysis of ultimate strength of tubular X-joints [J]. Journal of Structural

Engineering, 2000, 126(7): 790-797. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126: 7(790).

[8] KIM W B. Ultimate strength of tube-gusset plate connections considering eccentricity[J]. Engineering Structures, 2001, 23(11): 1418-1426. DOI:10.1016/S0141-0296(01)00050-5.

[9] VOTH A P, PACKER J A. Numerical study and design of skewed X-type branch plate-to-circular hollow section connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 68(1): 1-10. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.06.005.

[10] 陈焱彬，张大长，王龙飞. 反复荷载下钢管单插板T型节点承载力特性试验及模拟[J]. 土木工程与管理学报，2019，36(1)：163-168. DOI：10.13579/j. cnki. 2095-0985.2019.01.025.
CHEN Yanbin, ZHANG Dachang, WANG Longfei. Experiment and numerical analysis on bearing capacity behavior of T-joint with tube-gusset plate connections under cyclic load [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(1): 163-168. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2019.01.025.(in Chinese)

[11] 王贵，张大长，王龙飞. 反复荷载下圆钢管45°单插板节点承载力特性试验及理论分析[J]. 土木工程与管理学报，2019，36(1)：169-174. DOI：10.13579/j. cnki. 2095-0985.2019.01.026.
WANG Gui, ZHANG Dachang, WANG Longfei. Experimental study and theoretical analysis on bearing capacity behavior of 45° steel tube-gusset plate connections subjected to cyclic load[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(1): 169-174. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2019.01.026.(in Chinese)

[12] 胡剑峰，张大长. 无环向加劲肋Q460高强钢管T形插板节点抗压承载力特性及计算理论[J]. 建筑钢结构进展，2019，21(6)：122-128. DOI：10.13969/j. cnki. cn31-1893.2019.06.015.
HU Jianfeng, ZHANG Dachang. Compressive bearing capacity and calculation for T-shaped Q460 high-strength steel tube-gusset joint without hoop stiffening ribs[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(6): 122-128. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.06.015.(in Chinese)

[13] 黄勇，陈誉. X型插板焊接方管节点轴压承载力的有限元分析[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版)，2014，29(2)：96-98，108.
HUANG Yong, CHEN Yu. Finite element analysis of axial ultimate capacity of X-type branch plate-to-square hollow section connection[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science Edition), 2014, 29(2): 96-98, 108. (in Chinese)

[14] 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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.03.011.
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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.03.011.(in Chinese)

[15] 孙伟健，陈娟，周成野. T形钢管混凝土插板连接节点受弯性能研究[J]. 建筑钢结构进展，2021，23(2)：62-71. DOI：10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.02.007.
SUN Weijian, CHEN Juan, ZHOU Chengye. A study on the bending behavior of concrete-filled steel tubular gusset plate T-joints[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(2): 62-71. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.02.007.(in Chinese)

[16] 龙翔，周安，盛宏玉，等. 钢管输电塔K型节点疲劳性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2011，34(10)：1528-1531.
LONG Xiang, ZHOU An, SHENG Hongyu, et al. Experimental study of fatigue properties of K-joints of electric transmission steel tubular tower [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(10): 1528-1531. (in Chinese)

[17] 李正良，刘红军. 输电塔钢管-插板连接节点板承载力研究[J]. 土木工程学报，2011(增刊1)：52-58.
LI Zhengliang, LIU Hongjun. Study of ultimate strength of gusset-plate steel tubular joint of transmission towers[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(Suppl.1): 52-58. (in Chinese)

[18] 陈志辉，付诗禧，黄雄辉，等. 输电线路钢管-插板节点面外抗弯性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展，2025，27(9)：52-63. DOI:10.13969/j.jzgjgjz.20240410001.
CHEN Zhihui, FU Shixi, HUANG Xionghui, et al. Experimental study on out-of-plane flexural behavior of steel tube-plug joints for transmission lines[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(9): 52-63. DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20240410001.(in Chinese)

[19] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]. (in Chinese)

[20] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
ZENG Pan. Finite element analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)