

新型喷头式节点抗弯性能及其幂函数模型研究

李 韧,肖志成,李会军*,李宝辉

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 传统碗式节点作为一种典型装配式节点,常应用于大跨度空间网格结构,但因其抗弯刚度较小,其应用范围受限。基于此,本文对传统碗式节点进行改进,提出了一种抗弯性能更好的喷头式节点。首先对喷头式节点进行设计,并对喷头式节点与碗式节点进行了纯弯作用下的有限元模拟,对比了二者的抗弯性能;然后,研究了周围螺栓半径、轴向压力和轴向拉力对喷头式节点抗弯性能的影响;最后,建立了喷头式节点弯矩-转角的幂函数模型,采用模拟退火算法得到了该模型曲率系数,利用多元非线性拟合方法确定了相关的模型参数,并对幂函数模型进行了评估。结果表明,与传统碗式节点相比,新型喷头式节点的初始刚度提高了21.71倍,极限弯矩值提高了5.42倍,而用钢量仅增加了15%;随着周围螺栓半径的增大,节点的初始刚度缓慢增大而极限弯矩值显著增加;随着轴向压力的增大,节点初始刚度和极限弯矩值也逐渐增大;增大轴向拉力会明显降低节点初始刚度和极限弯矩值,当轴向拉力达到一定值时,出现节点螺栓颈缩位置提前的现象,轴向力对节点的失效模式有较大影响;建立的幂函数模型能很好地吻合节点的实际弯矩-转角曲线,幂函数模型的各项特征参数及其影响系数拟合效果较好。所得结论可为该节点的工程应用与研究提供参考。

关键词: 传统碗式节点;新型喷头式节点;抗弯性能;失效模式;幂函数模型;模拟退火算法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0053-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240203001

Study on Bending Performance and Power Function Model of a New Sprayer Joint

LI Ren, XIAO Zhicheng, LI Huijun*, LI Baohui

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

*Corresponding author: lihj@nwfau.edu.cn

Abstract: As a typical prefabricated joint, the traditional socket joint is used in large-span spatial grid structures. However, due to its small bending stiffness, its application range is limited. Based on this, the traditional socket is improved, and a sprayer joint with better bending performance is proposed. Firstly, the new sprayer joint is designed, and the finite element simulation of the sprayer joint and the socket joint under pure bending is carried out to compare their bending performance. Then, the influence of the radius of the surrounding bolt, the axial compression and the axial tension on the bending performance of the sprayer joint is studied. Finally, the power

收稿日期: 2024-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51408490), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-234, 2023-JC-YB-363), 国家级大学生创新创业训练计划(202310712067)

作者简介:

李 韧(2003—), 男, 学士, 主要从事大跨度空间钢结构方面的研究。E-mail: liren@nwfau.edu.cn。

肖志成(2002—), 男, 学士, 主要从事大跨度空间钢结构方面的研究。

通信作者:

李会军(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事大跨度空间钢结构方面的研究。E-mail: lihj@nwfau.edu.cn。

function model of moment-rotation curve of the sprayer joint is established, and the curvature coefficient of the model is obtained by simulated annealing algorithm. The relevant model parameters are determined by multivariate nonlinear fitting method, and the power function model is evaluated. The results show that the initial stiffness of the new sprayer joint is increased by 21.71 times, the ultimate bending moment is increased by 5.42 times, and the steel consumption is only increased by 15% compared with the traditional socket joint. With the increase of the radius of the surrounding bolt, the initial stiffness of the joint increases slowly and the ultimate bending moment increases significantly. With the increase of axial compression, the initial stiffness and ultimate bending moment of the joint also increase gradually. Increasing the axial tension will significantly reduce the initial stiffness and ultimate bending moment of the joint. When the axial tension reaches a certain value, the joint will appear obvious bolt necking in advance. The axial force has a great influence on the failure mode of the joint. The power function model can well fit the actual moment-rotation curve of the joint, and the characteristic parameters and their influence coefficients of the power function model are well fitted. The conclusions can provide references for the actual engineering design and calculation of the joint.

Keywords: traditional socket joint; new sprayer joint; bending performance; failure mode; power function model; simulated annealing algorithm

大跨度空间网格结构常见的节点形式包括^[1-4]:焊接球节点、螺栓球节点、嵌入式毂节点、碗式节点、铸钢节点、插板式节点等。为了进一步方便施工、降低工程造价、改善节点受力性能,近年来国内外学者相继提出了多种新型节点形式,如板式节点^[5]、板柱式节点^[6]、C型节点^[7]、齿式节点^[8]、花环齿槽式节点^[9]等。节点形式不同,其抗弯刚度差异较大,而节点抗弯刚度直接影响着空间网格结构的稳定承载力^[10-11],故节点刚度及半刚接网壳结构稳定性的研究一直是热点问题。

近年来,针对半刚性节点的研究主要集中在抗弯刚度、承载能力以及破坏模式等方面,国内外学者已进行了大量试验研究、数值模拟与理论研究。范峰等^[12]进行了螺栓球节点在压弯共同作用下的试验研究,同时建立了考虑轴压力和螺栓预紧力的半刚性节点精细化数值分析模型,得到了节点在压弯作用下的转动刚度和极限承载力。张晓磊等^[13]对嵌入式毂节点的抗弯性能进行了深入研究,并利用幂函数模型拟合了该节点的弯矩-转角公式,同时研究了节点刚度对单层球面网壳承载力的影响。郭小农等^[14]对板式节点进行了试验研究,分析了不同板厚下节点的破坏模式,研究表明,随着板厚的增加,节点刚度亦随之增加。

半刚性节点的弯矩-转角曲线是描述节点力学性能的重要曲线,为方便计算,国内外学者对其进行简化,提出了多种数学模型。目前国内外学者提出的弯矩-转角曲线模型主要包括线性模型^[15]、双线性模型^[2]、多项式模型^[16]、B样条模型^[17]、幂函数模型^[18]、指数函数模型^[19]以及三折线模型^[20]等,其中幂函数模型所需模型参数较少,且具有连续平滑的特点。

传统碗式节点作为一种典型的装配式节点常用于单层网壳结构当中^[21-22],但因其抗弯刚度有限,故适用范围

受限。基于此,本文对传统碗式节点进行了改进,提出了新型喷头式节点。首先,采用ABAQUS软件建立了新型喷头式节点的精细化有限元模型,并与传统碗式节点的抗弯性能进行了对比分析;然后,研究了周围螺栓半径和荷载工况对新型喷头式节点抗弯性能和失效模式的影响;最后,提出了新型喷头式节点的幂函数模型,并利用模拟退火算法优化了模型的曲率系数,采用多元非线性拟合方法确定了相关模型参数,并对幂函数模型的适用性进行了评估。

1 新型喷头式节点设计

传统碗式节点(图1a))主要依靠单个高强螺栓进行传力,抗弯性能较弱。基于此,本文对传统碗式节点进行了改进,提出了喷头式节点(图1b))。喷头式节点由带有焊接柱体的节点球、垫片、周围螺栓、中间螺栓、喷头锥体组成。该节点在受弯时,周围螺栓下部和喷头锥体上部 F 会形成一个抵抗弯矩 M' ,从而提高了节点的抗弯性能。

2 新型喷头式节点有限元模型的建立及验证

采用ABAQUS软件建立新型喷头式节点的精细化有限元模型。为准确描述材料的真实属性,输入材料属性时,先将名义应力及名义应变转化为真实应力及真实应变,计算方法见式(1)、式(2)。

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

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$

新型喷头式节点各部件均为钢材,采用Von-Mises屈服准则。其中带有焊接柱体的节点球弹性模量取为 2.06×10^5 MPa,屈服应力取为328 MPa;锥头的弹性模量取为 2.06×10^5 MPa,屈服应力取为405 MPa;密度取

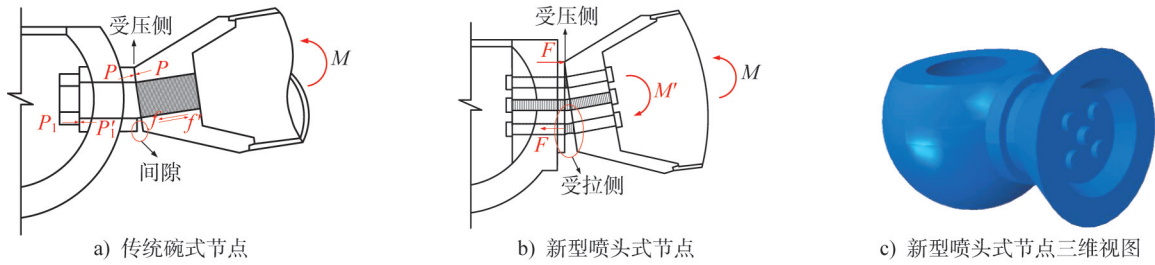


图1 节点传力机理对比

Fig. 1 Comparison of joint force transmission mechanisms

为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 泊松比取为 0.3。节点各部件材料的应力-应变曲线如图 2 所示。

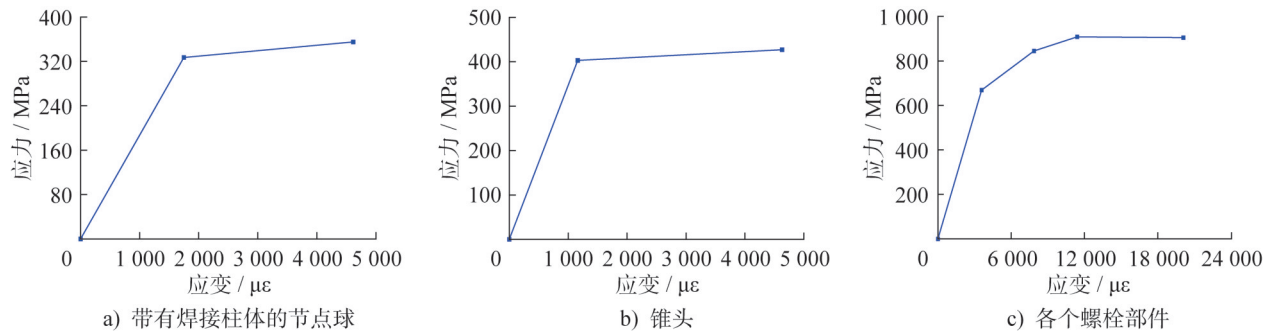


图2 碗式节点和喷头式节点各部件的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of various components in socket joint and new sprayer joint

为了比较新型喷头式节点与传统碗式节点的抗弯性能,喷头式节点的带有焊接柱体的节点球尺寸与碗式节点的节点球尺寸保持一致,喷头式节点各部件材性与传统碗式节点相同,在施加荷载时,两者荷载工况保持一致。喷头式节点各部件尺寸详见图 3。

节点各部件均采用二次缩减积分实体单元 C3D8R 进行模拟,划分网格后的节点模型如图 4 所示,单元数共计 42 472 个、节点数共计 65 104 个。考虑到节点的实际受力情况,在焊接柱体与垫片 2 之间、节点球与垫片 1 之间、锥头与垫片 2 之间及螺栓与各部件之间共建立了 17 个接触对,接触属性为面面接触,摩擦系数设为 0.3 (图 4)。为减少计算工作量,因新型喷头式节点具有对称性,故将有限元模型的一半(左半侧)施加固定约束。将钢管杆件的端部截面与截面形心施加 MPC 约束,荷载施加在 MPC 控制点上。依据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)、《空间网格结构技术规程》(JGJ 7-2010),螺栓预紧力取为 100 kN^[23]。

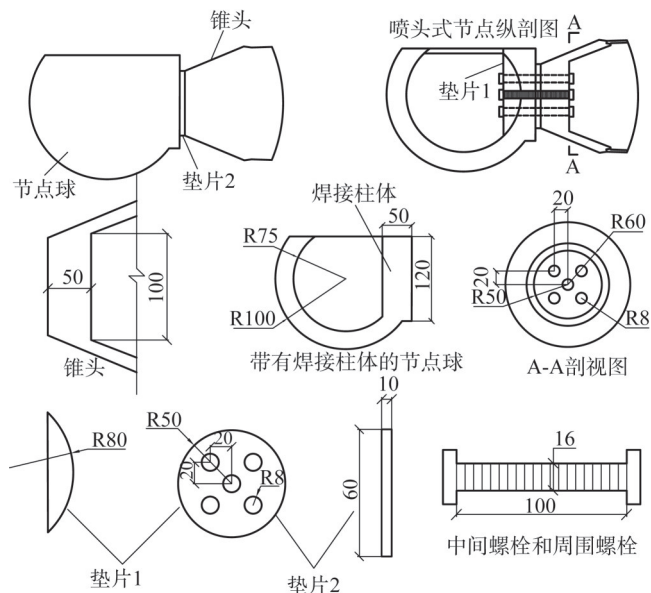


图3 新型喷头式节点各部件尺寸及其装配图
(单位: mm)

Fig. 3 Dimensions and assembly of the new sprayer joint (unit: mm)

为验证有限元模型计算精度,在碗式节点和喷头式节点杆端截面施加转角。图 5 为传统碗式节点弯矩-转角曲线的试验结果^[3]与数值模拟结果的对比。从图中可以看出,二者吻合良好、节点失效模式相同,均为锥头一侧与节点球体脱开,从而验证了有限元计算结果的准确性。图 6 将传统碗式节点与新型喷头式节点的弯矩-转角曲线进行了对比,从图中可以看出,新型喷头式节点与传统碗式节点相比,抗弯性能更优,初始刚度提高了 21.71 倍,极限弯矩值提高了 5.42 倍,而用钢量仅增加了 15%。其原因为新型喷头式节点受弯时,一侧周围螺栓受拉,而焊接柱体上部区域受压,这样就形成一个较

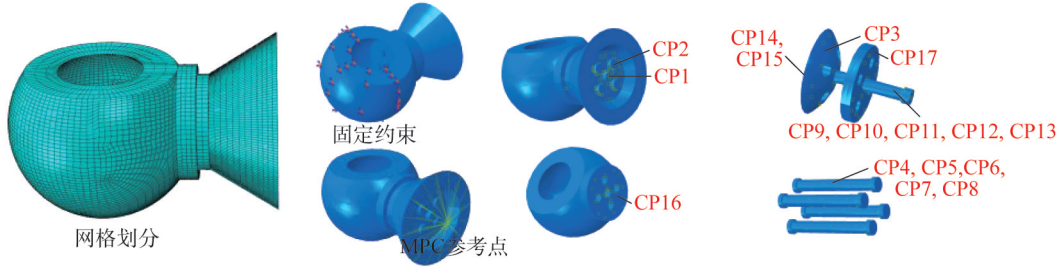


图4 新型喷头式节点精细化模型

Fig. 4 Refined finite element model of the new sprayer joint

大的抵抗弯矩(图1),从而大幅提升了节点的抗弯性能。

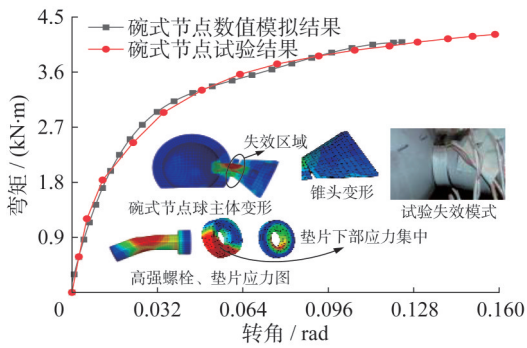


图5 传统碗式节点数值模拟与试验弯矩-转角曲线对比^[3]

Fig. 5 Comparison the bending moment-rotation curves of traditional socket joint between numerical simulation and experimental results

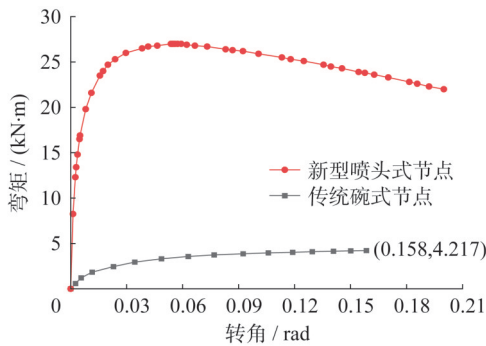


图6 新型喷头式节点与传统碗式节点弯矩-转角曲线对比

Fig. 6 Comparison the bending moment-rotation curves between new sprayer joint and traditional socket joint

3 喷头式节点参数分析

3.1 周围螺栓半径对节点抗弯刚度的影响

因新型喷头式节点的周围螺栓对节点抗弯性能的影响更为显著,故将喷头式节点周围螺栓半径分别选取为7 mm、8 mm、9 mm、10 mm、11 mm、12 mm,节点的其他参数保持不变,中间螺栓半径取为定值8 mm,以研究周围螺栓半径对节点抗弯性能的影响。

研究获得的弯矩-转角曲线如图7所示,Mises云图如图8所示,表1给出了不同周围螺栓半径下喷头式节点的初始刚度和极限弯矩值。从图7与表1可以看出,与碗式节点相比,周围螺栓半径为8 mm的喷头式节点极限弯矩值提高了21.71倍,初始刚度提高了5.42倍,而用钢量仅增大了15%,可见新型喷头式节点具有优良的抗弯性能;由图7可知,随着周围螺栓半径的增大,喷头式节点的初始刚度缓慢增大而极限弯矩值显著增加,原因为随着周围螺栓半径的增大,在节点拉伸阶段周围螺栓可以承受更大的拉力,从而形成了更大的抵抗弯矩。由图7和表1可知,与周围螺栓半径为7 mm喷头式节点相比,周围螺栓半径为8 mm、9 mm、10 mm、11 mm、12 mm的喷头式节点的初始刚度分别提高了0.14%、1.54%、2.36%、2.44%、3.64%,极限弯矩值分别提高了17.87%、38.05%、57.23%、74.84%、93.40%,表明提高周围螺栓半径可以大大提高节点的抗弯性能。

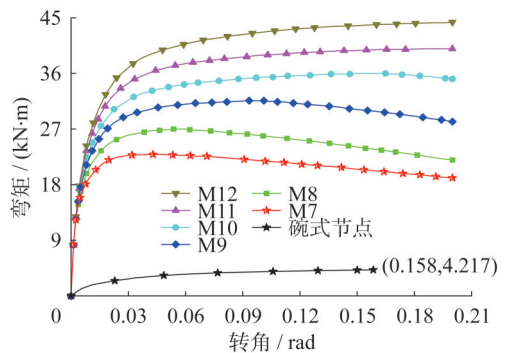


图7 不同周围螺栓半径下的喷头式节点的弯矩-转角曲线

Fig. 7 Bending moment-rotation curves of sprayer joints with different surrounding bolt radii

图8给出了节点的应力云图,从图中可以看出,在喷头式节点一侧的锥头与焊接柱体发生分离之前,同侧的周围螺栓已经发生了颈缩。由图8a)~c)可以看出,周围螺栓半径从7 mm增大到9 mm的过程中,颈缩点从A转移到B再转移到C,表明螺栓半径不同时其受力状态发生了变化;当周围螺栓半径大于9 mm时,螺栓无明显的

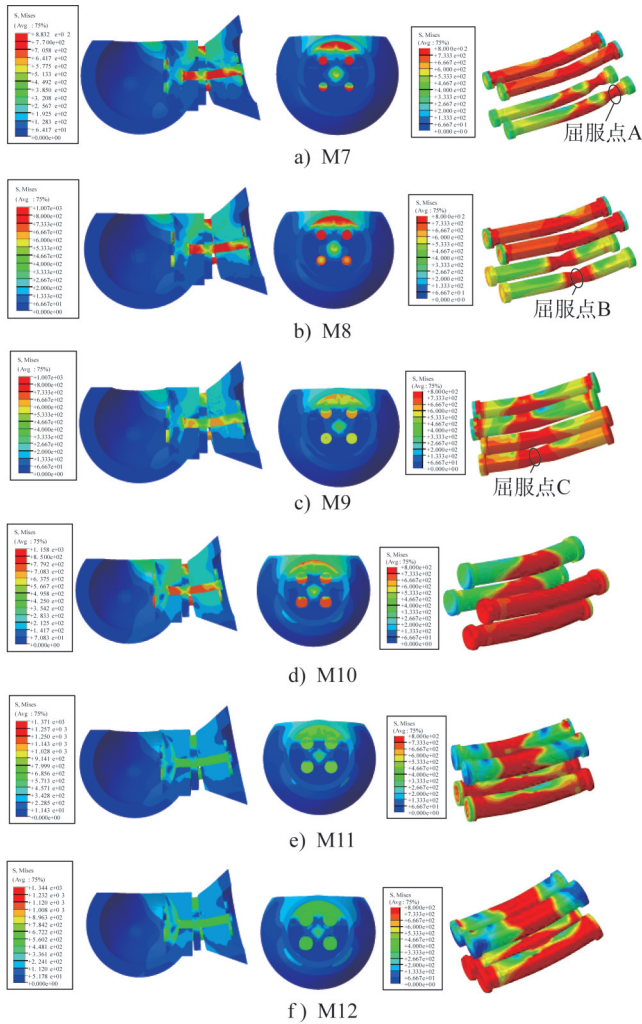


图8 不同周围螺栓半径下的喷头式节点的应力云图 (单位:MPa)

Fig. 8 Stress contours of sprayer joints with different surrounding bolt radii (unit:MPa)

颈缩现象。由此可知,周围螺栓半径对节点的失效模式有一定的影响。

3.2 轴向压力对节点抗弯刚度的影响

为了研究压弯作用下节点的抗弯刚度,将节点的轴向压力分别取 100 kN、200 kN、300 kN、400 kN、500 kN 时,计算得到的节点弯矩-转角曲线如图 9 所示。从图中

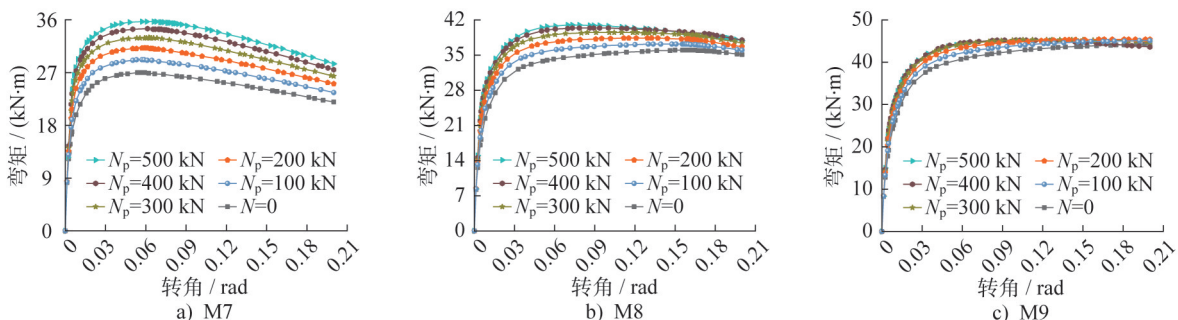


表1 不同周围螺栓半径的喷头式节点的初始刚度和极限弯矩值

Table 1 The initial stiffness and ultimate bending moment of sprayer joints with different surrounding bolt radii

试件名	初始刚度 $K_i / (\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	极限弯矩值 $M_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$
碗式节点	227	4.22
M7	4 921	22.89
M8	4 928	26.98
M9	4 997	31.60
M10	5 037	35.99
M11	5 041	40.02
M12	5 100	44.27

可以看出,随着轴向压力的增大,节点初始刚度及其极限弯矩值均逐渐增大,其中极限弯矩值的增加更为明显。表2给出了不同轴压力作用下节点的初始刚度和极限弯矩值,结合图9b)可知,对于周围螺栓半径为 8 mm 的螺栓,与节点纯弯相比,施加轴向压力为 100 kN、200 kN、300 kN、400 kN、500 kN 的节点初始刚度分别提高了 5.52%、10.31%、14.39%、17.78%、27.33%,极限弯矩值分别提高了 8.19%、15.57%、22.13%、27.69%、32.32%。表明轴向压力会明显提高节点的抗弯性能,原因为当节点受弯时,周围螺栓下部首先受拉,当节点受到轴向压力时,锥头与焊接柱体呈压紧状态,导致周围螺栓不易受拉屈服,从而提高了节点抗弯刚度。

图 10 给出了压弯作用下喷头式节点的应力云图,从图中可以看出,随着轴向压力的增大,屈服点 B 处的颈缩现象明显减弱。当轴向压力小于 400 kN 时,垫片 1 发生了明显的滑动,而当轴向压力大于 400 kN 时,垫片 1 无明显的滑动,同时随着轴向压力的增大喷头式节点的应力分布发生了变化,表明轴向压力对喷头式节点的失效模式有明显影响。

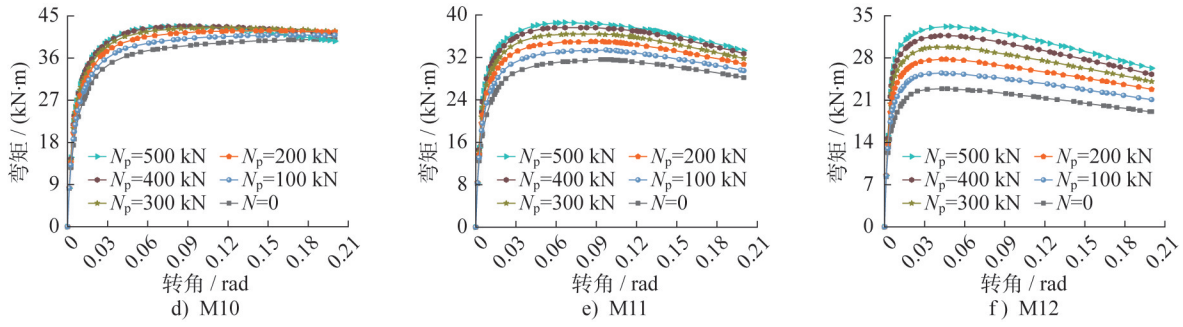


图9 不同轴向压力下的喷头式节点的弯矩-转角曲线

Fig. 9 Bending moment-rotation curves of sprayer joints under different axial compressive forces

表2 不同轴向压力作用下喷头式节点的初始刚度和极限弯矩值

Table 2 The initial stiffness and ultimate bending moment of sprayer joints under different axial compressive forces

试件名	N_p /kN	K_i /($kN \cdot m \cdot rad^{-1}$)	M_u /($kN \cdot m$)	试件名	N_p /kN	K_i /($kN \cdot m \cdot rad^{-1}$)	M_u /($kN \cdot m$)	试件名	N_p /kN	K_i /($kN \cdot m \cdot rad^{-1}$)	M_u /($kN \cdot m$)
M7	100	5 215	25.46	M8	100	5 200	29.19	M9	100	5 249	33.35
M7	200	5 470	27.76	M8	200	5 436	31.18	M9	200	5 468	34.96
M7	300	5 687	29.82	M8	300	5 637	32.95	M9	300	5 659	36.43
M7	400	5 868	31.66	M8	400	5 804	34.45	M9	400	5 822	37.65
M7	500	6 017	33.22	M8	500	6 275	35.70	M9	500	5 956	38.56
M10	100	5 283	37.22	M11	100	5 262	40.92	M12	100	5 919	45.09
M10	200	5 503	38.38	M11	200	5 467	41.83	M12	200	4 578	45.40
M10	300	5 693	39.53	M11	300	5 649	42.47	M12	300	4 055	45.34
M10	400	5 856	40.42	M11	400	5 803	42.79	M12	400	3 954	45.21
M10	500	5 990	40.99	M11	500	5 929	42.78	M12	500	3 606	44.71

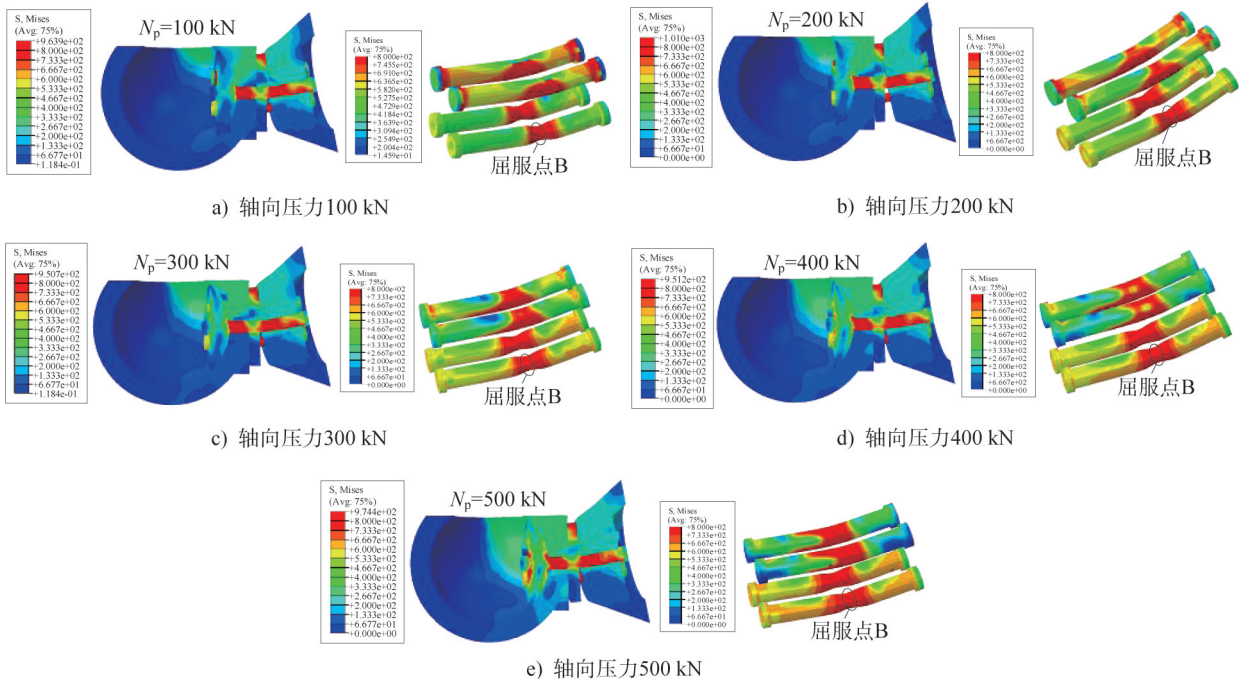


图10 不同轴向压力作用下M8试件Mises应力云图(单位:MPa)

Fig. 10 Mises stress contour of M8 specimen under different axial compressive forces (unit: MPa)

3.3 轴向拉力对节点抗弯刚度的影响

为了研究拉弯作用下节点的抗弯性能,本节将节点的轴向拉力分别取为100 kN、200 kN、300 kN、400 kN、500 kN时,弯矩的施加方法与上一节相同,计算得到的节点弯矩-转角曲线如图11所示。从图中可以看出,随着轴向拉力的增大,节点初始刚度及极限弯矩值逐渐减小,如表3所示。由图11b)与表3可知,对于周围螺栓半径为8 mm的螺栓,与节点在纯弯作用下相比,施加轴向拉力为100 kN、200 kN、300 kN、400 kN、500 kN的节点初始刚度分别降低了6.35%、13.51%、21.43%、30.05%、38.59%,极限弯矩值分别降低了8.86%、

18.49%、28.06%、39.84%、52.59%,表明轴向拉力会明显降低节点的抗弯性能,原因为当节点受到轴向拉力时,周围螺栓受拉,导致弯矩作用下受拉一侧的周围螺栓更易受拉屈服,从而降低了节点的抗弯性能。另外,由图11可以看出,当轴向拉力较大时,拉弯作用下节点的弯矩-转角曲线出现先下降后上升的现象,原因为该节点并非关于中心轴对称,故施加轴向拉力时已产生了初始偏心,轴向拉力过大会造成周围螺栓提前屈服,当周围螺栓受拉屈服后,中部螺栓、焊接柱体和锥头会形成新的抵抗弯矩,进而曲线会继续上升,节点能承受更大的弯矩。

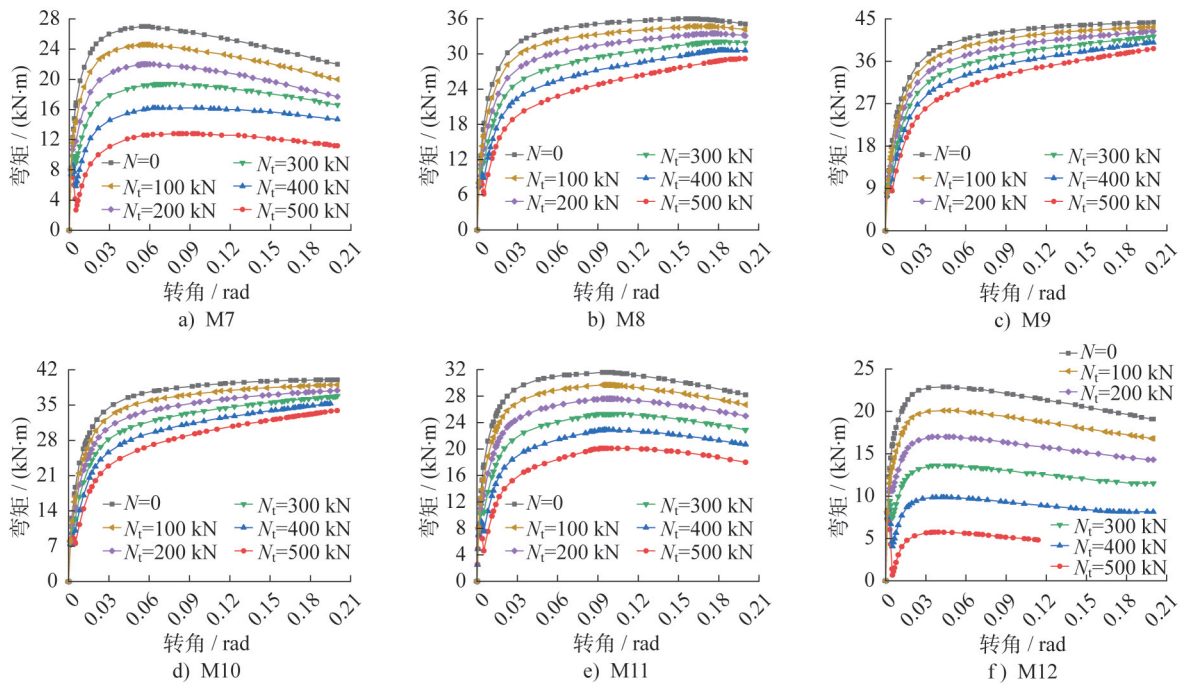


图 11 不同轴向拉力作用下喷头式节点的弯矩-转角曲线

Fig. 11 Bending moment-rotation curves of sprayer joint under different axial tensile forces

表 3 不同轴向拉力作用下喷头式节点的初始刚度和极限弯矩值

Table 3 The initial stiffness and ultimate bending moment of sprayer joint under different axial tensile forces

试件名	N_i/kN	$K_i/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	试件名	N_i/kN	$K_i/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	试件名	N_i/kN	$K_i/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$
M7	100	4 579	20.09	M8	100	4 615	24.59	M9	100	5 249	29.69
M7	200	4 198	16.98	M8	200	4 262	21.99	M9	200	5 468	27.62
M7	300	3 777	13.58	M8	300	3 872	19.41	M9	300	5 659	25.35
M7	400	3 307	9.87	M8	400	3 447	16.23	M9	400	5 822	22.86
M7	500	2 782	7.22	M8	500	3 026	12.79	M9	500	5 956	20.15
M10	100	4 761	34.74	M11	100	4 774	39.04	M12	100	5 919	43.35
M10	200	4 453	33.47	M11	200	4 489	37.93	M12	200	4 578	42.38
M10	300	4 114	32.07	M11	300	4 174	36.77	M12	300	4 055	41.27
M10	400	3 747	30.64	M11	400	3 836	35.29	M12	400	3 954	40.05
M10	500	3 352	29.24	M11	500	3 472	33.95	M12	500	3 606	38.68

图12给出了拉弯作用下M8喷头式节点的应力云图,从图中可以看出,随着轴向拉力的增大,周围螺栓的颈缩位置由B处转移至A处。当轴向拉力小于300 kN时,周围螺栓在B处发生颈缩;当轴向拉力大于300 kN时,周围螺栓在A处发生颈缩。另外,随着轴向拉力的增大,喷头式节点的应力分布发生了明显改变,表明轴向拉力会影响喷头式节点的失效模式。

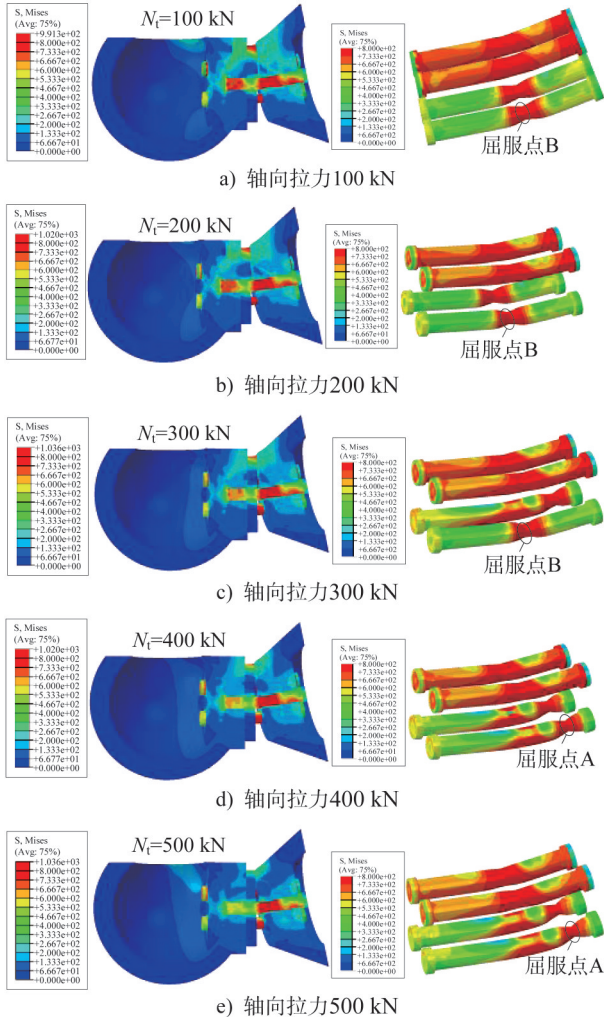


图12 不同轴向拉力作用下M8试件Mises应力云图
(单位:MPa)

Fig. 12 Mises stress contours of M8 specimen under different axial tensile forces (unit: MPa)

4 喷头式节点弯矩-转角曲线数学模型的建立

4.1 幂函数模型

节点弯矩-转角曲线模型的建立参考文献[18]中的幂函数模型,该模型表达式如下:

$$\theta = \frac{M}{K} \cdot \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^\lambda\right]^{1/\lambda}} \quad (3)$$

式中: λ 为弯矩-转角曲线的形状参数,决定了幂函数模型的曲率; M_u 为极限弯矩值; K 为节点的初始刚度。幂函数模型具有连续且平滑的特点,与其它弯矩-转角模型相比,幂函数模型所需模型参数更少,可通过调节 λ 逐渐逼近原始弯矩-转角曲线。

图13为本文拟合出的新型喷头式节点试件弯矩-转角曲线的幂函数模型。从图中可以看出,随着 λ 的变化,曲线曲率随之改变;以 $N_t=100$ kN下的M10节点为例,曲率系数 $\lambda=1.05$ 时,幂函数模型与精细化模型的原始弯矩-转角曲线吻合最好,该曲率系数下的幂函数模型称为最优幂函数模型。由式(3)和图13可以看出,随着 M_u 和 K 的变化,最优幂函数模型的曲率系数 λ 随之改变,故建立不同周围螺栓半径和荷载工况下的新型喷头式节点幂函数模型的关键是确定曲率系数 λ 。

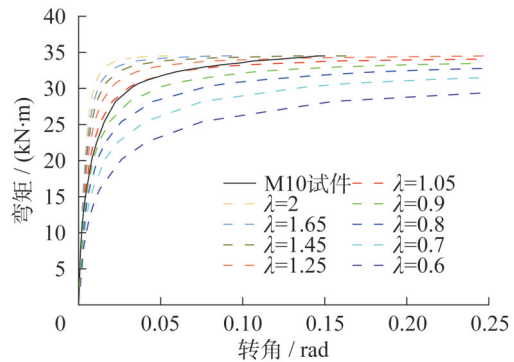


图13 幂函数模型示意图

Fig. 13 Power function model diagram

4.2 周围螺栓半径和荷载工况对初始刚度与极限弯矩值的影响系数

将M8试件在纯弯作用下的抗弯性能作为标准,周围螺栓半径和荷载工况对新型喷头式节点初始刚度和极限弯矩值的影响系数分别记作 C_1 和 C_2 ,即

$$C_1 = K/K_0 \quad (4)$$

$$C_2 = M_u/M_{u0} \quad (5)$$

式中: K 为节点的初始刚度, K_0 为试件M8的初始刚度, M_u 为节点的极限弯矩值, M_{u0} 为M8试件的极限弯矩值。周围螺栓半径和荷载工况对新型喷头式节点的初始刚度和极限弯矩值的影响系数可用式(6)~(7)表示:

$$C_1 = a_{20}m^2 + a_{02}n^2 + a_{11}mn + a_{10}m + a_{01}n + a_{00} \quad (6)$$

$$C_2 = b_{20}m^2 + b_{02}n^2 + b_{11}mn + b_{10}m + b_{01}n + b_{00} \quad (7)$$

式中: a_{20} 、 a_{02} 、 a_{11} 、 a_{10} 、 a_{01} 、 a_{00} 、 b_{20} 、 b_{02} 、 b_{11} 、 b_{10} 、 b_{01} 、 b_{00} 为多元非线性回归系数。 m 为螺栓半径归一化指标, $m=R/R_{\max}$,其中 R 为螺栓半径, R_{\max} 为螺栓半径的最大值。 n 为荷载工况归一化指标, $n=N/N_{\max}$,其中 N 为轴压力或轴拉力, N_{\max} 为轴压力或轴拉力的最大值,当 n 为正时表

示节点受压,当 n 为负时表示节点受拉。利用多元非线性拟合可以得到上述回归系数的值如表4所示。

表4 幂函数模型初始刚度和极限弯矩值的影响系数

Table 4 The influence coefficient of initial stiffness and ultimate bending moment of power function model

系数	a_{20}	a_{02}	a_{11}	a_{10}	a_{01}	a_{00}
C_1	0.402	-0.004	-0.108	-0.707	0.151	1.356
系数	b_{20}	b_{02}	b_{11}	b_{10}	b_{01}	b_{00}
C_2	-0.045	-0.004	-0.296	1.669	0.307	0.013

C_1, C_2 与无量纲量 m 和 n 的拟合曲面如图14所示,从图中可以看出,拟合效果较好。图15给出了不同周围螺栓半径下的影响系数实际值与预测值之比 C/C_{fit} 的散点图,式中, C 为初始刚度或极限弯矩的影响系数, C_{fit} 为初始刚度或极限弯矩的影响系数的拟合值。从图中可看出, C/C_{fit} 的值均不超过1.15,所有数据点拟合误差均不超过15%,数据点分布在1附近,说明影响系数拟合较好。其中螺栓半径较大的节点试件两个影响系数的拟合效果更好,表明影响系数可以应用于幂函数模型。

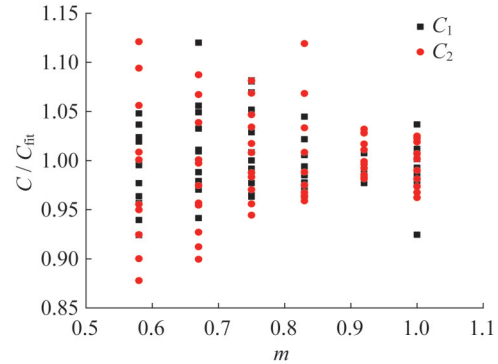


图15 不同周围螺栓半径节点的影响系数拟合优度评价

Fig. 15 Fitting goodness evaluation of influence coefficient of joint with different surrounding bolt radii

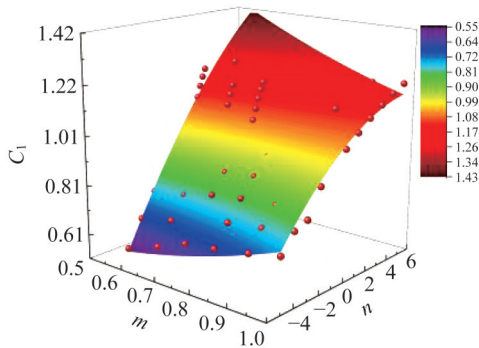
角样本点与幂函数模型曲线之间的欧式距离,该法可获得最优幂函数曲线。计算步骤如下:

- 1) 建立目标函数,即样本点与幂函数曲线之间的欧式距离 $F(x)$;
- 2) 参考图13,设定初值 $\lambda = 2$;
- 3) 参数初始化。设定变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$,其中 X 为 λ 的 k 阶矩阵。然后对设计变量和当前解进行初始化,得到 $X_1^0 = (X_1^0, X_2^0, \dots, X_k^0), \min[F(X^0)]$,同时初始化迭代次数限值 Ω 、起始点温度 T 及其衰减系数 $k = 0.999$;
- 4) 在迭代次数等于 t 的条件下,得到目标函数的新解 $\min[F(X)]$,其中 X' 表示为 $X_t = (X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^k)$,即迭代 t 次获取的 λ 值, t 的取值介于 $(1, \Omega)$ 范围内;
- 5) 利用式(8)对解的增量 ΔF 进行计算:

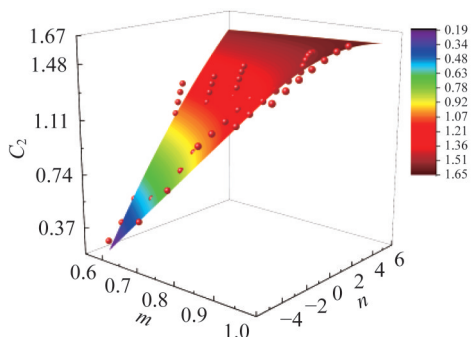
$$\Delta F = F(X_{t+1}) - F(X_t) \quad (8)$$

- 6) 依据Metropolis接受准则,当 ΔF 小于0时,采用最新解替换当前最优解,同时使 $t = t + 1$,当 ΔF 大于等于0时,判断不等式 $\text{rand}() < e^{(-\Delta F/T)}$ 是否成立,其中 $\text{rand}()$ 为 $(0, 1)$ 范围内的随机数,若成立,则使用当前较差解替换当前最优解,同样使 $t = t + 1$,若不成立,则跳转到步骤(4)。

采用上述方法,求得幂函数模型的曲率系数详见表5。为了简便幂函数模型的计算,本文取 $\bar{\lambda} = 1.24$ 作为幂函数模型的曲率系数。结合式(4)~(8)、表4可得弯矩-转角曲线的幂函数模型,见式(9)。



a) 初始刚度影响系数拟合曲面图



b) 极限弯矩值影响系数拟合曲面图

图14 初始刚度和极限弯矩值影响系数的拟合曲面图

Fig. 14 Fitting surface diagram of influence coefficients of initial stiffness and ultimate bending moment

4.3 喷头式节点幂函数模型的建立

模拟退火算法是一种通用概率算法^[24-25],可以用来在一个大的搜寻空间内寻找问题的最优解(全局最优解)。幂函数模型的影响系数由上一节确定,本节利用模拟退火算法搜索最优曲率系数,目标函数设定为弯矩-转

表5 幂函数模型曲率系数λ

Table 5 Curvature coefficient of power function model

	M7	M8	M9	M10	M11	M12		M7	M8	M9	M10	M11	M12
$N=0$	1.41	1.36	1.41	1.33	1.21	1.27	$N_t=100$ kN	1.36	1.35	1.3	1.29	1.02	1.01
$N_p=100$ kN	1.15	1.19	1.12	1.05	0.95	0.96	$N_t=200$ kN	1.48	1.39	1.34	1.28	1.22	1.06
$N_p=200$ kN	1.41	1.33	1.28	1.21	1.18	1.07	$N_t=300$ kN	1.42	1.39	1.21	1.2	1.04	1.02
$N_p=300$ kN	1.46	1.17	1.14	1.06	1.03	1.01	$N_t=400$ kN	1.5	1.36	1.31	1.27	1.23	1.06
$N_p=400$ kN	1.43	1.3	1.22	1.09	1.04	1.02	$N_t=500$ kN	1.45	1.44	1.38	1.19	1.18	1.07
$N_p=500$ kN	1.49	1.31	1.31	1.18	1.12	1.01							

$$\theta = \frac{M}{1981\left(\frac{R}{120}\right)^2 - 17.6\left(\frac{N}{100}\right)^2 - 532\left(\frac{R}{120} \cdot \frac{N}{100}\right) - 3486 \cdot \frac{R}{120} + 742 \cdot \frac{N}{100} + 6680} \quad (9)$$

$$\left[1 - \left(\frac{M}{-1.21\left(\frac{R}{120}\right)^2 - 0.1\left(\frac{N}{100}\right)^2 - 7.98\left(\frac{R}{120} \cdot \frac{N}{100}\right) + 45.04 \cdot \frac{R}{120} + 8.29 \cdot \frac{N}{100} + 0.358} \right)^{1.24} \right]^{\frac{1}{1.24}}$$

式中： R 为喷头式节点周围螺栓半径； N 为轴向力，正值表示受压负值表示受拉。利用式(9)可计算出喷头式节

点的弯矩-转角曲线，并与数值分析模型对比如图16所示。

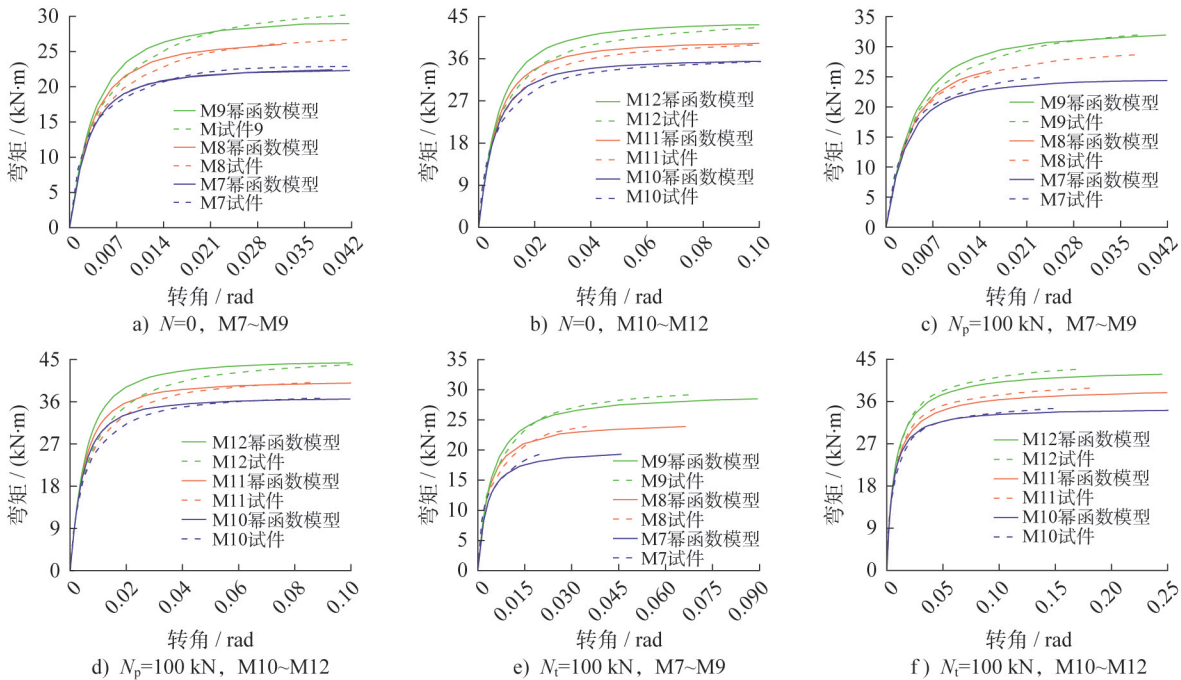


图16 幂函数模型与数值模拟结果的弯矩-转角曲线对比

Fig. 16 Comparison of bending moment-rotation curves between power function model and numerical simulations

从图16中可以看出，建立的幂函数模型与数值模型的弯矩-转角曲线吻合较好。另外，值得注意的是，当 $N_t=100$ kN时，M7试件幂函数模型在达到屈服点后吻合效果一般。原因为较小螺栓直径的喷头式节点在拉弯作用下出现了提前屈服的现象，这导致了试件实际屈服点早于理论屈服点。结合图14、图15可知，幂函数模型的各项特征参数及其影响系数拟合较好，故本文建立的喷头式节点的幂函数模型能很好地描述节点的抗弯性能，该模型可以为该节点的实际工程设计和计算提供参考。

项特征参数及其影响系数拟合较好，故本文建立的喷头式节点的幂函数模型能很好地描述节点的抗弯性能，该模型可以为该节点的实际工程设计和计算提供参考。

5 结论

本文对传统碗式节点进行了改进，提出了一种新型

喷头式节点,研究了周围螺栓半径、轴向压力和轴向拉力对新型喷头式节点抗弯性能和失效模式的影响,并建立了新型喷头式节点的幂函数模型。主要得出如下结论:

(1) 与传统碗式节点相比,新型喷头式节点抗弯性能更好。在相同尺寸和材性参数下,与碗式节点相比,喷头式节点的初始刚度提高了21.71倍,极限弯矩值提高了5.42倍,而用钢量仅增加了15%。

(2) 新型喷头式节点周围螺栓对节点抗弯性能的影响更为显著。随着周围螺栓半径的增大,喷头式节点的初始刚度缓慢增大而极限弯矩值显著增加。螺栓直径不同,则失效模式不同。当螺栓半径为7 mm时,受拉侧周围螺栓A处发生颈缩;当螺栓半径为8 mm时,受拉侧周围螺栓B处发生颈缩;当螺栓半径为9 mm时,受拉侧周围螺栓C处发生颈缩;当螺栓半径大于9 mm时,节点破坏时螺栓并未发生明显的颈缩现象。

(3) 轴向压力和轴向拉力对节点抗弯性能有较大的影响。随着轴向压力的增大,节点初始刚度及极限弯矩值均逐渐增大,其中极限弯矩值的增加更为明显;随着轴向拉力的增大,节点初始刚度及极限弯矩值逐渐减小。当轴向拉力达到一定的值后,节点会发生周围螺栓提前屈服,进而降低了节点的刚度。随着轴向拉力的增大,受拉侧周围螺栓的颈缩位置由B处转移至A处。当轴向拉力小于300 kN时,受拉侧周围螺栓在B处发生颈缩;当轴向拉力大于300 kN时,受拉侧周围螺栓在A处发生颈缩。另外,随着轴向拉力的增大,喷头式节点的应力分布发生了明显改变。

(4) 本文建立了喷头式节点弯矩-转角的幂函数模型,该模型能很好地吻合节点的实际弯矩-转角曲线,幂函数模型的各项特征参数及其影响系数拟合效果较好。

(5) 与传统碗式节点相比,新型喷头式节点具有更大的抗弯刚度,其丰富了钢管杆件连接节点形式,拓宽了装配式网壳结构的应用范围。该节点形式具有较好的应用前景与潜力。

参考文献:

[1] FAN F, MA H H, CAO Z G, et al. Direct estimation of critical load for single-layer reticulated domes with semi-rigid joints [J]. International Journal of Space Structure, 2010, 25(1):15-24. DOI:10.1260/0266-3511.25.1.15

[2] 张晓磊,李会军,喻晓晨,等. 嵌入式毂节点刚度及其双线性模型研究[J]. 空间结构, 2022, 28(2): 56-62, 86. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.02.056.

ZHANG Xiaolei, LI Huijun, YU Xiaochen, et al. Research on stiffness and bilinear model of hub-shape inlay joints [J]. Spatial Structures, 2022, 28(2): 56-62, 86. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.02.056. (in Chinese)

[3] FAN F, MA H H, CHEN G B, et al. Experimental study of semi-

rigid joint systems subjected to bending with and without axial force [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 68(1): 126-137. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.07.020.

[4] LAN X Y, WARDENIER J, PACKER J A. Design of chord sidewall failure in RHS joints using steel grades up to S960 [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 163: 107605. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107605.

[5] SHI M Z, XIANG P, WU M E. Experimental investigation on bending and shear performance of two-way aluminum alloy gusset joints [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122: 124-136. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.002.

[6] MA H H, JIANG Y Q, LI C R, et al. Performance analysis and comparison study of two aluminum alloy joint systems under out-of-plane and in-plane loading. An experimental and numerical investigation [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110643. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110643.

[7] MA H, WANG W, ZHANG Z, et al. Research on the static and hysteretic behavior of a new semi-rigid joint (BCP joint) for single-layer reticulated structures [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2017, 58(2): 159-172. DOI: 10.20898/j.iass.2017.192.817.

[8] 马越洋. 新型齿式半刚性节点静动力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

MA Yueyang. Static and dynamic performance of gear semi-rigid joint systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[9] ZHAO C Q, WANG G, ZHENG T T. Research on the hysteretic performance of flower-gusset composite joints for single-layer aluminium alloy lattice shell structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(1): 171-187. DOI: 10.1177/13694332211046341.

[10] LI H J, TANIGUCHI Y. Effect of joint stiffness and size on stability of three-way single-layer cylindrical reticular shell [J]. International Journal of Space Structures, 2020, 35(3): 90-107. DOI: 10.1177/0956059920931019.

[11] 李会军,何双华. 考虑杆件失稳的半刚接网架稳定性研究[J]. 空间结构, 2019, 25(4): 18-26, 34. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2019.04.018.

LI Huijun, HE Shuanghua. Stability of semi-rigid jointed space truss considering member instability [J]. Spatial Structures, 2019, 25(4): 18-26, 34. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2019.04.018. (in Chinese)

[12] 范峰,马会环,沈世钊. 半刚性螺栓球节点受力性能理论与试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 92-99.

FAN Feng, MA Huihuan, SHEN Shizhao. Numerical simulation and experimental study on mechanical characters of bolt-ball joint system [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 92-99. (in Chinese)

[13] 张晓磊,李会军,陈旭,等. 嵌入式毂节点刚度及其单层球面网壳承载力研究[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 179-190. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.0388.

- ZHANG Xiaolei, LI Huijun, CHEN Xu, et al. Research on stiffness of hub-shape inlay joint and bearing capacity of single-layer spherical reticulated shell [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(9): 179-190. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.0388. (in Chinese)
- [14] 郭小农, 朱劭骏, 熊哲, 等. K6型铝合金板式节点网壳稳定承载力设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(7): 16-24. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.07.003.
- GUO Xiaonong, ZHU Shaojun, XIONG Zhe, et al. Design method for buckling capacity of K6 single-layer reticulated shells with aluminum alloy gusset joints [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(7): 16-24. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.07.003. (in Chinese)
- [15] CHEN W F, KISHI N. Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(1): 105-119. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1989)115:1(105).
- [16] FRYE M J, MORRIS G A. Analysis of flexibly connected steel frames [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1975, 2(3): 280-291. DOI: 10.1139/l75-026.
- [17] WU F H, CHEN W F. A design model for semi-rigid connections [J]. *Engineering Structures*, 1990, 12(2): 88-97. DOI: 10.1016/0141-0296(90)90013-I.
- [18] 喻晓晨, 李会军, 陈旭, 等. 螺栓球节点力学性能研究及弯矩-转角关系式的建立 [J]. *建筑钢结构进展*, 2022, 24(4): 57-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.008.
- YU Xiaochen, LI Huijun, CHEN Xu, et al. Mechanical properties of bolt-ball joints and establishment of moment-rotation relation formula [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24(4): 57-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.008. (in Chinese)
- [19] CHENAGHLOU M R, NOOSHIN H, HARDING J E. Proposed mathematical model for semi-rigid joint behaviour (M- θ) in space structures [J]. *International Journal of Space Structures*, 2014, 29(2): 71-80. DOI: 10.1260/0266-3511.29.2.71.
- [20] MA H H, REN S, FAN F. Parametric study and analytical characterization of the bolt-column (BC) joint for single-layer reticulated structures [J]. *Engineering Structures*, 2016, 123: 108-123. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.037.
- [21] 蔡健, 贺盛, 姜正荣, 等. 单层网壳结构稳定分析中初始几何缺陷最大值的研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(6): 86-92. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.06.011.
- CAI Jian, HE Sheng, JIANG Zhengrong, et al. Investigation on maximum value of initial geometric imperfection in stability analysis of single layer reticulated shells [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(6): 86-92. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.06.011. (in Chinese)
- [22] 张中昊, 付强, 范峰. 斜拉杆增强温室双向网格型单层柱面网壳稳定性 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 172-179. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.024.
- ZHANG Zhonghao, FU Qiang, FAN Feng. Tension members strengthening stability of two-way grid single-layer cylindrical shell in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 172-179. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.024. (in Chinese)
- [23] 戴国欣. 钢结构(第五版) [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2019: 64.
- DAI Guoxin. *Steel structures (5th Edition)* [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2019: 64. (in Chinese)
- [24] 缪晓宾, 陈昊. 模拟退火算法优化转运小车转向的梯形机构设计 [J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(5): 67-71. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2023.0195.
- MIAO Xiaobin, CHEN Hao. Optimization of trapezoidal mechanism design for transfer trolley steering by simulated annealing algorithm [J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(5): 67-71. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2023.0195. (in Chinese)
- [25] YANG K, DUAN Q X, WANG Y H, et al. Transiently chaotic simulated annealing based on intrinsic nonlinearity of memristors for efficient solution of optimization problems [J]. *Science Advances*, 2020, 6(33): eaba9901. DOI: 10.1126/sciadv.aba9901.