

# Q235B 钢螺栓球柱节点的受拉承载力

曾 强<sup>1</sup>, 郭小农<sup>1</sup>, 黄泽韡<sup>1</sup>, 彭 礼<sup>2</sup>, 陈 宇<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海泰大建筑科技有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 基于 3 个单向受拉螺栓球柱节点的试验, 采用 ABAQUS 软件建立单向受拉螺栓球柱节点的数值模型, 并将数值分析结果与试验结果进行对比, 验证了数值模型的有效性。随后建立了 87 个数值模型对螺栓球柱节点的单向受拉承载力影响参数进行了分析, 定义了节点单向受拉极限承载力的取值准则。数值计算结果表明, 圆柱筒径越小、壁厚越厚、筒壁高度越高, 节点的单向受拉承载力越高; 增大螺栓间距和尺寸对节点的刚度和强度有一定提高; 增设加劲肋可提高螺栓球柱节点的刚度和承载力; 当螺栓拧入深度不足时, 节点易发生螺栓拔出破坏, 实际工程中建议螺栓拧入弧形端板的深度大于螺栓直径。基于理论分析, 拟合得到了螺栓球柱节点单向受拉承载力的实用计算式。拟合算式计算结果与有限元分析结果及试验结果的相对误差均在 10% 以内。

**关键词:** 无檩网架; 螺栓球柱节点; 有限元分析; 单向受拉承载力; 公式拟合

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

## Uniaxial Tension Bearing Capacity of Q235B Steel Bolted Ball-Cylinder Joint

ZENG Qiang<sup>1</sup>, GUO Xiaonong<sup>1</sup>, HUANG Zewei<sup>1</sup>, PENG Li<sup>2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai T&D Architechral Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the uniaxial tension experiments on 3 bolted ball-cylinder (BBC) joints, the finite element (FE) models of the tension specimens were established by using ABAQUS and were proved by comparing with experimental results. Then 87 FE models were established to analyze the influence parameters of the uniaxial tension bearing capacity of the joint. Meanwhile, the ultimate bearing capacity of the joint under uniaxial tension was defined. The FE results indicate that with the drop of the

diameter of the cylinder and the length of the chord member, and the increase of the thickness of the cylinder wall, the height of the cylinder, the spacing and the size of the bolts, the bearing capacity of the joint increases. The joints with rib stiffeners produce a better stiffness and bearing capacity than ordinary ones. The insufficiency of the screw-in length of high strength bolts will cause the evulsion of bolts. Therefore, it is suggested that the screw-in length of bolts should be larger than the bolt diameter. Based on theoretical analysis, practical calculation formulae for the bearing capacity of BBC joints under uniaxial tension were proposed. The relative errors between the fitting formulae calculations and the numerical and experimental results are less than 10%.

**Key words:** non-purlin gird structure; bolted ball-cylinder joint; finite element (FE) analysis; uniaxial tension bearing capacity; formulation fitting

网架结构因其受力合理、刚度大、质量轻、造型美观等优点, 被广泛应用于各类大型公共建筑中<sup>[1-2]</sup>。其中, 无檩网架体系将上弦杆兼作檩条, 进一步降低了材料用量, 并降低了建筑净高; 郭小农等针对该体系提出了一种新型螺栓球柱节点<sup>[3]</sup>。有学者指出, 节点作为空间网格结构中的重要部件, 对网格结构的承载性能有着重要的影响<sup>[4-7]</sup>。为此, 郭小农等完成了 13 个螺栓球柱节点在单向受压、单向受拉、强轴受弯及弱轴受弯下的试验研究<sup>[8]</sup>, 建立了单向受压节点的数值模型并展开参数分析, 进而提出了节点单向受压承载力的计算式<sup>[9]</sup>。

当网架结构具有悬挑部分或受风吸力时, 上弦杆可能承受拉力, 使网架节点受拉。因此, 有必要对螺栓球柱节点的受拉承载性能进行研究。本文在文献<sup>[8]</sup>的研究基础上, 建立了 3 个单向受拉螺栓球柱

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(50908168, 51478335)

第一作者: 曾 强(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: 1710700@tongji.edu.cn

通信作者: 郭小农(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构、空间钢结构.

E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

节点试件的数值模型,并通过对比破坏模式、荷载-位移曲线,验证了数值模型的有效性。随后通过87个单向受拉数值模型,分析了节点圆柱筒径、筒壁壁厚和高度、弦杆宽度和长度、螺栓尺寸及间距、加劲肋尺寸、螺栓拧入深度等对节点单向受拉承载性能的影响,并通过回归分析得到螺栓球柱节点单向受拉承载力的实用计算式。

## 1 节点数值模型建立

### 1.1 几何尺寸与材料本构关系

螺栓球柱节点的详细构造见图1。试验试件的模拟及分析采用有限元软件 ABAQUS 6.11/Standard 进行。数值分析模型各部件的几何尺寸均与文献[8]中的3个受拉螺栓球柱节点试件相对应,见表1。表中 $D$ 为圆筒外径, $H$ 为圆筒高度, $t$ 为圆筒壁厚, $w_s$ 和 $t_s$ 为加劲肋宽度和厚度。

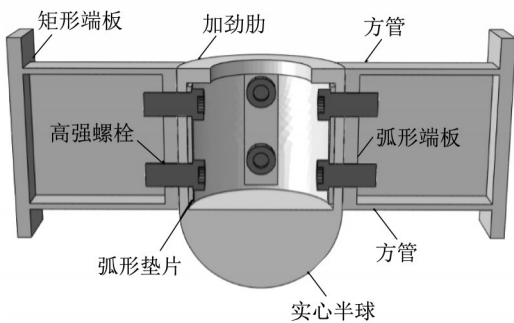


图1 螺栓球柱节点构造详图  
Fig. 1 Details of BBC joint

文献[8]中节点及杆件材料为Q235B,并采用10.9级M20高强螺栓。模型中节点材料采用双线性强化弹塑性模型,根据试验得到的材性数据换算成真实应力和真实应变进行定义,见表2。

表1 文献[8]中的螺栓球柱节点试件尺寸

Tab. 1 Size of BBC joint specimens in Ref. [8]

试件编号	$D$ / mm	$H$ / mm	$t$ / mm	$w_s$ / mm	$t_s$ / mm
JD7	140	120	8		
JD8	180	160	8		
JD9	140	120	8	20	12

表2 模型材料本构关系

Tab. 2 Material properties of models

位置	名义应力/ MPa	名义应变	真实应力/ MPa	真实应变
屈服点	215.67	0.001	215.89	0.001
峰值点	449.73	0.194	536.98	0.177

### 1.2 边界条件与荷载施加

试验中对试件施加通过中心线的单向拉力,考虑到螺栓球柱节点的几何尺寸、边界条件和加载具有对称性,建立了1/4节点模型,见图2a,并在 $Oxy$ 平面和 $Oxy$ 平面施加对称约束,见图2b。在加载板中部设置凸起的肋板,并对肋板施加反对称约束,以模拟试验中加载系统对试件的约束作用,见图2c。

为模拟试验中的加载条件,将荷载施加在肋板表面,见图2d。加载过程分为5个分析步,具体实施内容如下。

分析步1:设置临时约束固定节点、弧形垫片与杆件,同时螺栓半模型设置10N预紧力;分析步2:螺栓预紧力不变,释放临时约束;分析步3:调整螺栓预紧力为5000N;分析步4:将螺栓预紧力由“施加螺栓荷载”改为“固定在当前长度”;分析步5:施加位移荷载。

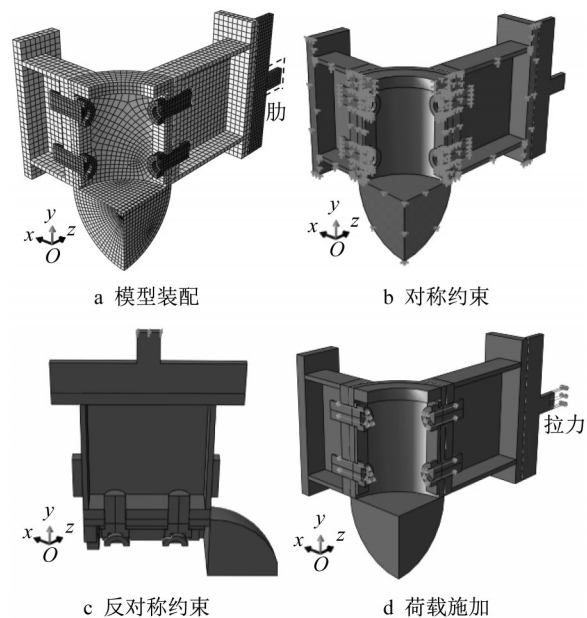


图2 螺栓球柱节点有限元模型

Fig. 2 FE model of bolted ball-cylinder joint

### 1.3 网格划分与接触关系设置

试验中节点部分的变形均以筒壁弯曲变形为主,由于非协调模式单元能克服剪切自锁问题,在单元扭曲较小的情况下可以较小代价获得精确的计算结果,适用于弯曲问题的求解,故采用C3D8I单元进行网格划分,并在筒壁螺栓孔附近局部加密了网格,见图2a。

模型中的接触对设置见表3。由于可能发生螺栓拔出,螺杆与弧形端板螺栓孔的接触对设为面与面接触;其切向定义为罚摩擦,摩擦系数为0.2;其法

向设置为硬接触,并在过盈量设置中选择“计算单线螺栓”,线半角为 $30^\circ$ ,螺距为2.5mm。加载板与矩形端板的接触设置为绑定,用于模拟试验中受拉试件加载板与矩形端板之间的等强焊接。

表3 接触对设置

Tab. 3 Contact pairs of models

接触对	相互作用类型	主面	从面
加载板与加载杆矩形端板	绑定	加载板	矩形端板
弧形端板与节点筒壁	表面与表面接触	节点筒壁	弧形端板
弧形垫片与节点筒壁	表面与表面接触	节点筒壁	弧形垫片
螺栓头与弧形垫片	表面与表面接触	弧形垫片	螺栓头
螺栓螺杆与弧形垫片螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	弧形垫片螺栓孔
螺栓螺杆与节点筒壁螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	节点筒壁螺栓孔
螺栓螺杆与弧形端板螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	弧形端板螺栓孔

## 2 模型验证与分析

### 2.1 破坏模式对比

试件与数值模型的破坏模式见图3~5。JD7试件和有限元模型的圆柱筒壁均发生明显变形;试件杆件与弧形端板的焊缝发生撕裂,由于模型中受拉弦杆与弧形端板是一个部件,无法模拟出焊缝撕裂的现象,但连接处明显的应力集中现象能够推断出此处将发生焊缝撕裂。

JD8试件和有限元模型的圆柱筒壁均发生明显塑性变形;试件靠近半球的螺栓发生拔出破坏,杆件的连接焊缝随后发生撕裂,模型JD8成功模拟出了弧形端板与筒壁脱开的现象,从模型变形情况及应力分布可推断出节点塑性区出现在受力方向螺栓连接处,并向杆件连接焊缝处发展。

带肋试件JD9圆柱筒壁未见明显变形,杆件与弧形端板的焊缝发生撕裂破坏。模型JD9节点刚度较大,变形不明显,端板与筒壁的脱开现象较无肋节点更明显,焊缝处存在应力集中现象,由此可以判断在加载后期将发生螺栓拔出或焊缝撕裂破坏现象。

### 2.2 荷载-位移曲线对比

图6对比了试验及数值分析得到的荷载 $F$ -节点管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线。经过反复检查试验结果后发现,由于带肋试件JD9初始阶段变形过小,试验过程中的位移测量存在一定失误,导致荷载-位移曲线不可靠,故对2个无肋单向受拉试件进行荷载-位移曲线的验证。由图6可知,数值分析所得的节点管口拉伸变形的荷载-位移曲线与试验结果吻合良好。JD7的2条曲线几乎重合;JD8的2条曲线在弹性阶段和塑性阶段初期2条曲线吻合良好,在加载后期数值分析所得的承载力较高,但误差仍在可接受范围内。

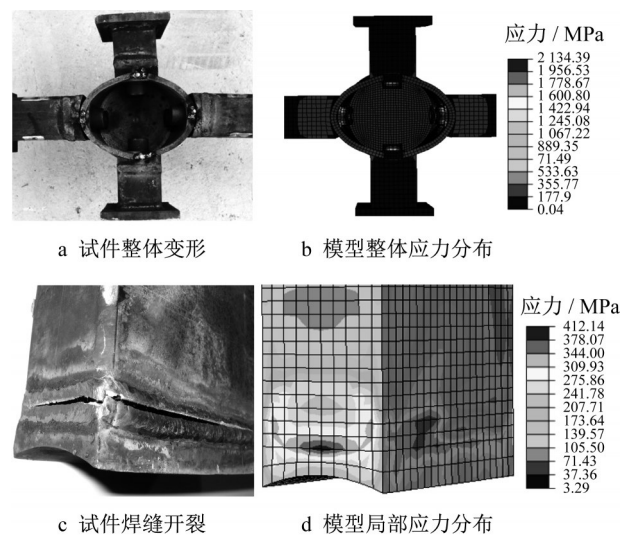


图3 JD7破坏模式对比

Fig. 3 Comparison of failure modes of JD7

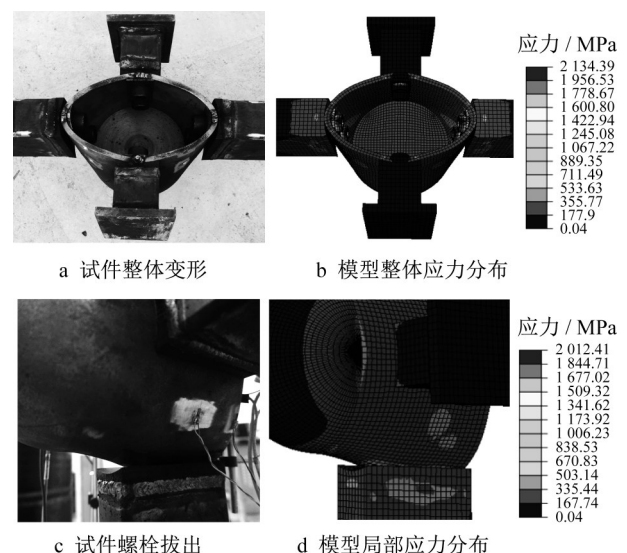


图4 JD8破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of failure modes of JD8



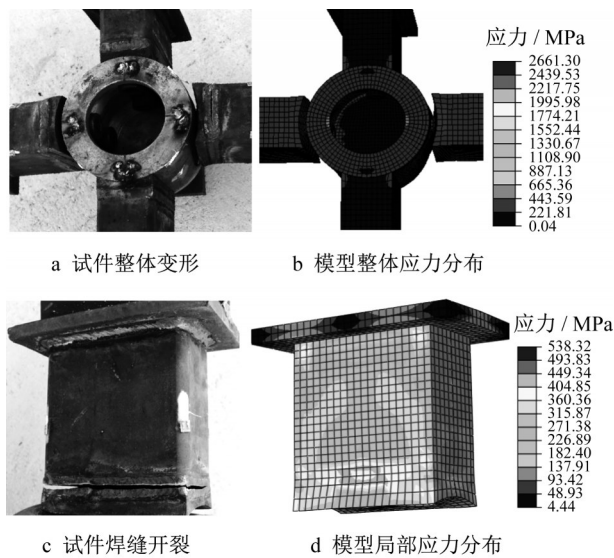


图 5 JD9 破坏模式对比

Fig. 5 Comparison of failure modes of JD9

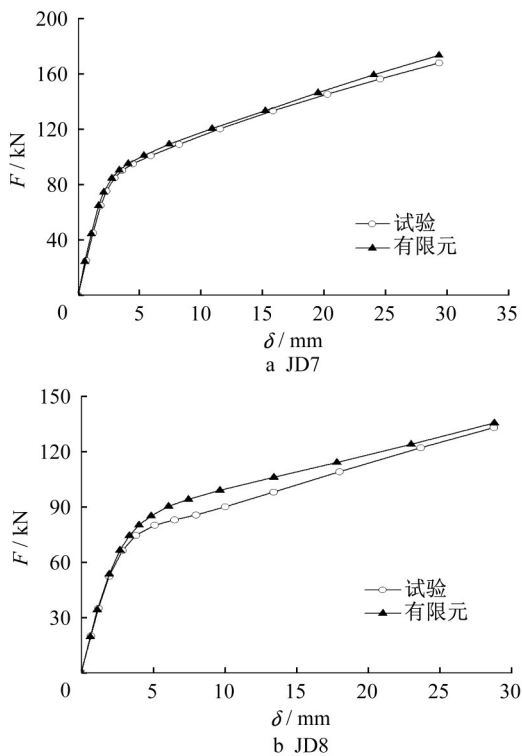


图 6 荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves

### 2.3 螺栓内力分析

螺栓球柱节点单向受拉时,螺栓是传递荷载的主要部件之一。现提取试件 JD7 受拉侧 2 颗螺栓的螺栓内力随分析步的变化关系,见图 7。

由图 7 可知,第 1、2 分析步(横坐标 0~2)作为平稳建立各接触关系的分析步,螺栓内力在这两步中几乎为零;第 3 分析步(横坐标 2~3)为施加螺栓预

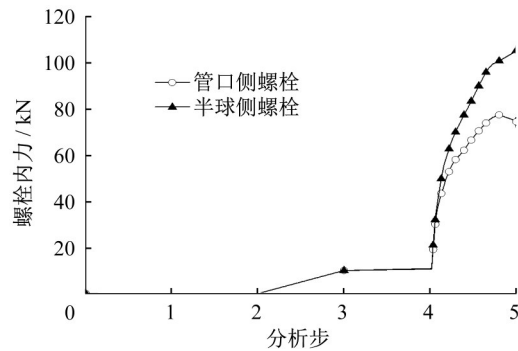


图 7 加载端螺栓内力随分析步的变化

Fig. 7 Step history curves of bolt forces

拉力的分析步,螺栓内力随时间线性增加至预设值;第 4 分析步(横坐标 3~4)为固定螺栓长度的步骤,螺栓内力维持不变;第 5 分析步为施加荷载的分析步,受拉侧螺栓的内力随着外荷载的增加逐渐上升,且靠近实心半球侧的螺栓内力增长更快。这是因为节点筒壁靠近半球侧的变形受到了实心半球的约束,导致半球侧螺栓的拉伸变形较小,与试件 JD8 靠近半球侧螺栓发生拔出现象一致。

## 3 节点单向受拉承载力影响参数分析

### 3.1 节点单向受拉承载力取值准则

通过试验及有限元分析结果可知,螺栓球柱节点单向受拉时,荷载通过弧形端板螺孔传至螺杆,再由螺栓头传至弧形垫片,最后由弧形垫片传递至节点筒壁。因此,单向受拉节点可能发生 4 种破坏模式:①螺栓拔出破坏;②螺栓拉断破坏;③圆柱筒壁剪切破坏;④节点筒壁变形过大破坏。

为确定螺栓球柱节点受拉承载力取值准则,建立了 87 个单向受拉节点数值模型,数值模型的尺寸规格见表 4。表中  $H_0$ 、 $b_r$ 、 $t_r$  分别为配套矩形管的截面高度、宽度及厚度; $d$ 、 $t_b$  分别为螺栓直径及拧入深度; $w_w$ 、 $t_w$  分别为弧形垫片宽度及厚度。

现有研究发现螺栓拧入缺陷会降低螺栓球节点的承载力<sup>[10-12]</sup>。因此,参考《空间网格结构技术规程:JGJ7—2010》<sup>[13]</sup>中关于螺栓球节点螺栓拧入深度的建议,规定模型 J1~J71 的螺栓拧入深度均大于 1.1 倍螺栓直径,以避免螺栓拔出破坏。但由于试验中螺栓拧入深度未满足要求,且加筋肋对节点刚度和承载力有较大影响,故建立了模型 J72~J79、J80~J87 分别研究螺栓拧入深度对不带肋节点及带肋节点单向受拉承载力的影响。



数值模型的各种破坏模式对应的极限承载力见表 5。表中  $F_{u,FE}$ 、 $F_{b,max}$  为  $\delta=1.5\%D$  时有限元计算所得的节点承载力及最大螺栓内力;  $F_{u,Eq}$  为式(9)计算所得的节点单向受拉承载力;  $e_r$  为拟合算式计算值与有限元模型计算值的相对误差。由表 5 可知,当

节点筒口的相对变形  $\delta$  达到  $1.5\%D$  时,模型 J1~J71 的最大螺栓内力小于螺栓拉断荷载及圆柱筒壁剪切破坏荷载。因此,定义节点筒口的相对拉伸变形  $\delta=1.5\%D$  时受到的荷载为节点单向受拉极限承载力。

表 5 数值模型各种破坏模式对应的极限承载力

Tab. 5 Ultimate loads of different failure modes of FE models

编号	$N_u^b$ / kN	$N_r$ / kN	$F_{b,max}$ / kN	$F_{u,FE}$ / kN	$F_{u,Eq}$ / kN	$e_r$ /%	编号	$N_u^b$ / kN	$N_r$ / kN	$F_{b,max}$ / kN	$F_{u,FE}$ / kN	$F_{u,Eq}$ / kN	$e_r$ /%	
J1	87.70	99.74	55.63	83.99	82.86	-1.36	J45	163.00	184.14	108.52	168.93	169.98	0.62	
J2	120.00	116.36	69.65	100.75	96.14	-4.57	J46	163.00	184.14	107.53	165.54	166.39	0.52	
J3	163.00	143.22	88.47	122.64	113.15	-7.73	J47	163.00	184.14	104.22	162.11	163.00	0.55	
J4	87.70	115.09	67.46	108.77	107.09	-1.54	J48	163.00	184.14	102.34	157.53	159.79	1.44	
J5	120.00	134.27	80.38	124.84	124.26	-0.46	J49	315.00	309.45	185.67	279.23	283.87	1.66	
J6	163.00	163.68	97.25	145.87	145.48	-0.26	J50	315.00	309.45	180.57	271.38	278.79	2.73	
J7	120.00	152.17	95.58	155.26	153.78	-0.95	J51	315.00	309.45	180.26	262.42	269.34	2.64	
J8	163.00	184.14	110.39	175.17	179.30	2.36	J52	315.00	309.45	175.89	258.45	264.93	2.51	
J9	255.00	255.75	147.15	217.96	217.10	-0.40	J53	315.00	309.45	178.14	254.51	260.70	2.43	
J10	163.00	184.14	110.74	173.68	173.78	0.06	J54	315.00	309.45	174.54	250.58	256.66	2.42	
J11	255.00	255.75	144.83	208.80	210.42	0.77	J55	255.00	255.75	143.14	203.92			
J12	315.00	281.32	168.28	228.82	229.51	0.31	J56	255.00	255.75	145.18	209.51			
J13	163.00	204.60	129.43	212.61	208.59	-1.89	J57	255.00	255.75	144.30	209.07			
J14	255.00	281.32	155.90	244.46	251.16	2.74	J58	255.00	204.60	134.68	189.36	185.90	-1.83	
J15	315.00	309.45	182.41	268.02	273.95	2.21	J59	255.00	230.17	138.94	197.47	198.46	0.50	
J16	87.70	84.40	50.21	79.53	81.10	1.98	J60	255.00	281.32	150.97	221.32	221.85	0.24	
J17	120.00	98.46	60.52	91.18	90.86	-0.35	J61	163.00	225.06	135.53	227.51	235.93	3.70	
J18	163.00	122.76	82.12	109.89	104.66	-4.75	J62	315.00	309.45	177.78	253.85	257.96	1.62	
J19	87.70	99.74	64.08	116.69	115.93	-0.65	J63	367.00	337.58	202.09	260.19	264.34	1.59	
J20	120.00	116.36	73.18	128.72	129.89	0.91	J64	477.00	379.78	245.47	268.64	273.21	1.70	
J21	163.00	143.22	89.65	148.43	148.56	0.08	J65	163.00	163.68	96.18	136.64	140.40	2.75	
J22	120.00	134.27	94.07	176.85	172.76	-2.31	J66	163.00	163.68	97.20	147.58	135.66	-8.08	
J23	163.00	163.68	108.19	196.29	196.55	0.13	J67	163.00	163.68	101.31	167.40	171.41	2.40	
J24	255.00	230.17	141.32	237.80	233.89	-1.64	J68	163.00	163.68	118.29	230.19	216.58	-5.91	
J25	163.00	163.68	103.46	184.76	190.26	2.98	J69	163.00	163.68	102.56	174.01	181.39	4.24	
J26	255.00	230.17	135.28	218.77	226.41	3.49	J70	163.00	163.68	105.14	185.33	189.77	2.40	
J27	315.00	253.19	156.50	238.25	241.83	1.50	J71	163.00	163.68	110.61	206.25	202.26	-1.93	
J28	163.00	184.14	128.66	237.73	237.19	-0.23	J72				94.94	93.50	-1.52	
J29	255.00	255.75	154.18	270.66	280.33	3.57	J73				124.02	127.42	2.74	
J30	315.00	281.32	171.44	291.11	299.42	2.85	J74				153.09	152.06	-0.67	
J31	163.00	143.22	86.09	107.74	108.59	0.79	J75				162.17	167.41	-0.37	
J32	163.00	143.22	85.34	102.36	105.08	2.66	J76				168.03	173.50	0.37	
J33	163.00	143.22	84.13	103.37	102.27	-1.07	J77				171.30	173.68	-0.25	
J34	87.70	99.74	56.53	83.66	79.51	-4.95	J78				172.85	160.89	-0.78	
J35	87.70	130.43	78.07	138.43	137.72	-0.51	J79				174.12	171.62	0.19	
J36	87.70	145.78	86.09	170.27	171.41	0.67	J80				178.87			
J37	120.00	134.27	85.27	134.06	131.41	-1.98	J81				179.26			
J38	120.00	134.27	82.52	129.04	127.70	-1.04	J82				180.29			
J39	120.00	134.27	78.02	121.29	121.07	-0.18	J83				181.79			
J40	120.00	134.27	76.39	118.62	118.08	-0.45	J84				183.20			
J41	120.00	134.27	75.32	116.28	115.29	-0.85	J85				184.03			
J42	120.00	134.27	74.01	114.43	112.67	-1.54	J86				184.51			
J43	163.00	184.14	118.99	186.99	182.13	-2.60	J87				185.08			
J44	163.00	184.14	115.18	180.35	177.82	-1.40								

3.2 节点单向受拉承载力参数分析

基于表 4 中建立的螺栓球柱节点数值分析模型,根据 3.1 节中提出的节点单向受拉承载力取值准则,进一步对圆柱筒体、弧形垫片、螺栓、加劲肋的

几何尺寸以及螺栓拧入深度对节点受拉承载力的影响进行分析。

3.2.1 圆柱筒体尺寸的影响

模型 J3、J31~J33 的荷载  $F$  与管口相对拉伸变

形 $\delta$ 曲线见图8a。节点承载力随着圆柱筒径 $D$ 增大而下降;但当 $D$ 增大到一定程度时,节点承载力与 $D$ 的相关性减小。其原因是随着 $D$ 的增加,弧形垫片及弧形端板对筒壁变形的约束作用下降,节点刚度及承载力下降。

模型J4、J34~J36的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图8b。节点刚度及承载力随着圆柱筒壁壁厚 $t$ 增大而提高。当圆柱筒径相同时,筒壁抗弯刚度随着壁厚增大而提高,其承载力也随之提高。但随着筒壁厚度的增大,筒壁承载力可能高于螺栓拔出承载力,节点的破坏模式将由筒壁塑性变形破坏变为螺栓拔出破坏,因此节点延性有所下降。

模型J5、J10及J37~J41的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图8c。当杆件截面尺寸相同时,随着圆柱筒体高度 $H$ 的增加,其与上弦杆件截面高度 $H_0$ 的差值 $\Delta H$ 增加,弧形端板及实心半球对圆柱筒壁的约束减弱,节点刚度及承载力下降。

### 3.2.2 弧形垫片尺寸的影响

模型J11、J55~J60的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图9。随着弧形垫片厚度 $t_w$ 的增加,节点承载力上升,其原因是节点单向受拉时,弧形垫片作为传递荷载的主要部件,会对筒壁的变形产生一定的约束;同时弧形垫片厚度的增加会提高圆柱筒壁螺栓孔附近的抗弯刚度。由图9b可知,弧形垫片宽度对节点受拉性能的影响可以忽略。

### 3.2.3 螺栓直径及拧入深度的影响

模型J14、J61~J64的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图10。当其他参数不变时,节点受拉承载力随螺栓直径 $d$ 的增加而提高。其原因是随着螺栓直径 $d$ 的增加,螺栓预紧力增大,弧形垫片与圆柱筒壁能更好地共同变形,筒壁的抗弯刚度增大。

模型J10和J72~J79、J25和J80~J87的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图11。由图11a可知,对于不带肋节点,当螺栓拧入深度 $t_b$ 小于螺栓直径 $d$ 时,随着拧入深度增加,节点刚度和承载力不断上升;当 $t_b$ 大于等于 $d$ 时,节点的承载力和刚度基本不变。由图11b可知,对于带肋节点,由于节点刚度很大,螺栓拧入深度对节点刚度和承载力的影响可以忽略。部分不带肋节点的端板变形见图12,当螺栓拧入深度不足时,弧形端板在荷载作用下翘曲变形,

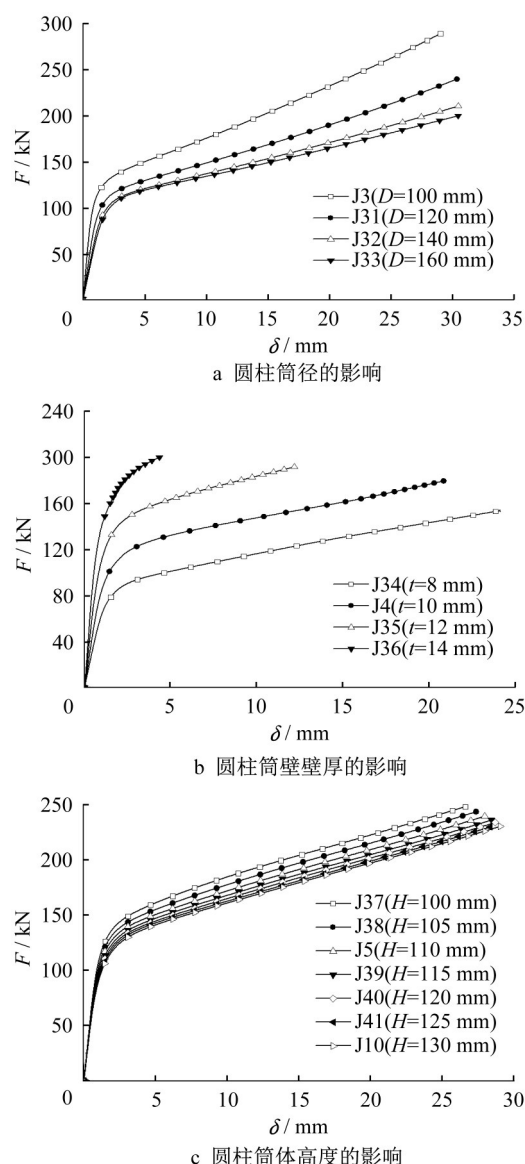


图8 圆柱筒体尺寸对节点性能的影响

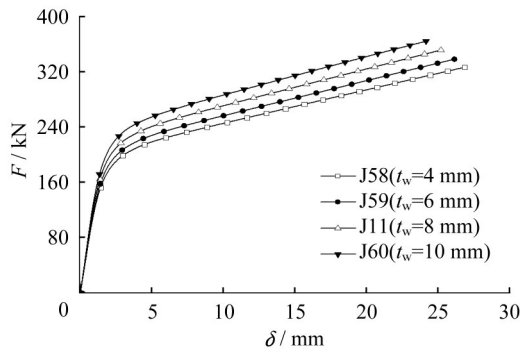
Fig. 8 Influence of dimensions of hollow cylinder

与圆柱筒壁脱开,即发生螺栓拔出破坏;而当 $t_b$ 大于等于 $d$ 时,弧形端板与节点筒壁的变形基本一致,节点的破坏由圆柱筒壁变形控制。

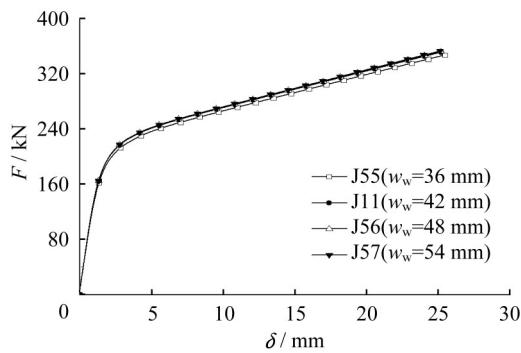
### 3.2.4 加劲肋尺寸的影响

模型J23、J65~J71的荷载 $F$ 与管口相对拉伸变形 $\delta$ 曲线见图13。设置加劲肋对节点的刚度和承载力有明显的提高作用。由图13a可知,随着加劲肋宽度 $w_s$ 增大,节点的刚度与承载力均大幅提高,但同时节点的延性下降;对比无加劲肋与加劲肋宽度 $w_s=6$  mm的曲线可以发现,加劲肋需要达到一定宽度才能明显提高节点刚度和承载力。由图13b可知,随着加劲肋厚度 $t_s$ 增大,节点的刚度与承载力均有所提高。





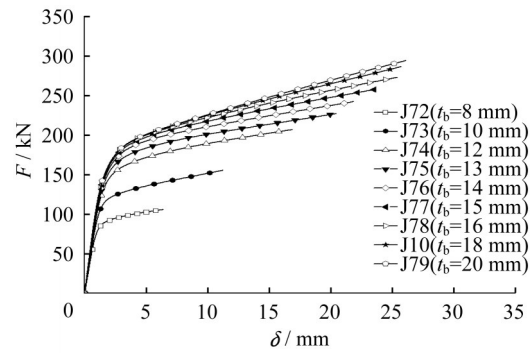
a 弧形垫片厚度的影响



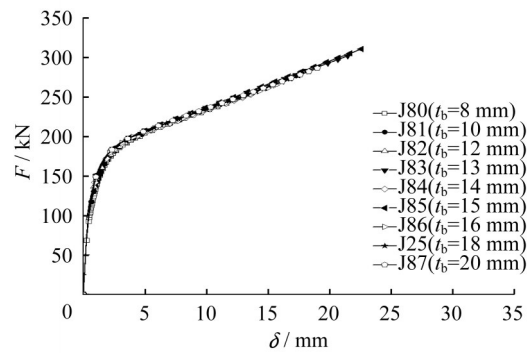
b 弧形垫片宽度的影响

图 9 弧形垫片尺寸对节点性能的影响

Fig. 9 Influence of size of convex washer



a 不带肋节点



b 带肋节点

图 11 螺栓拧入深度对节点性能的影响

Fig. 11 Influence of screw-in depth of bolt

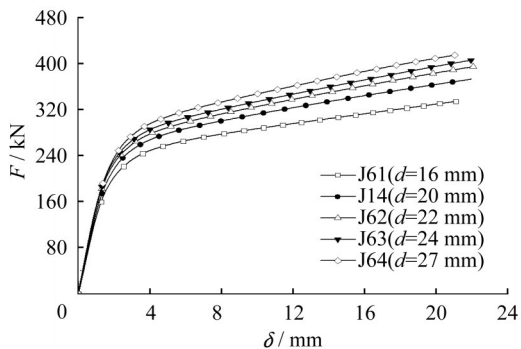
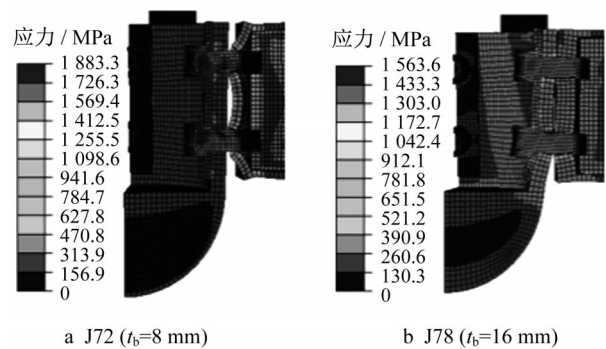


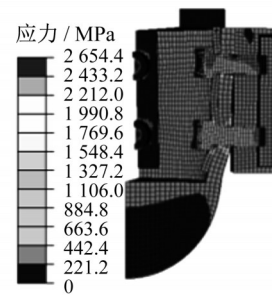
图 10 螺栓尺寸对节点性能的影响

Fig. 10 Influence of size of high strength bolts



a J72 (tb=8 mm)

b J78 (tb=16 mm)



c J79 (tb=20 mm)

图 12 弧形端板变形情况

Fig. 12 Deformation of concave endplate

## 4 节点单向受拉承载力计算式

### 4.1 承载力计算式推导

由于螺栓球柱节点的对称性,可取 1/4 结构进行分析。由于节点受力后弧形端板与圆柱筒壁脱开,可忽略其对节点的约束作用,将节点筒壁简化为一曲梁,见图 14。

当达到极限状态时,筒壁在对称面处出现 2 个塑性铰,由此可得

$$\frac{F_u}{2} \cdot \frac{D-t}{2} = 2M_u \quad (3)$$

$$M_u = \frac{H_0 t^2 f_y}{4} \quad (4)$$



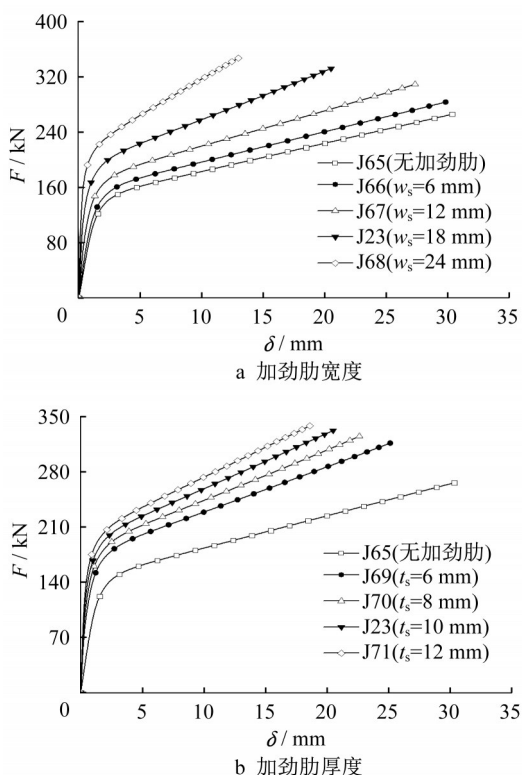


图13 加劲肋尺寸对节点性能的影响

Fig. 13 Influence of size of ribbed stiffener

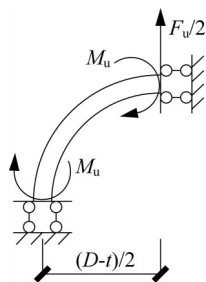


图14 节点承载力计算示意

Fig. 14 Calculation diagram of joint under uniaxial compression

由式(3)、(4)可得

$$F_u = \frac{2H_0 t^2 f_y}{D-t} \quad (5)$$

式中:  $F_u$  为螺栓球柱节点的单向受拉极限承载力, N;  $M_u$  为圆柱筒壁的塑性弯矩, N·m;  $H_0$  与  $t$  分别为受力弦杆的截面高度及圆柱筒壁壁厚, mm;  $f_y$  为钢材的屈服强度, MPa。

考虑与圆柱筒体相连部件及加劲肋对节点承载力的有利影响, 引入系数  $\gamma$ 、 $\eta$  对式(5)进行修正, 可得

$$F_u = \eta\gamma \cdot \frac{2H_0 t^2 f_y}{D-t} \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为螺栓球柱节点承载力提高系数, 该系数的

物理意义为无肋螺栓球柱节点的单向受拉极限承载力与高度为  $H_0$  的圆管节点单向受拉极限承载力之比, 即节点螺栓半球和杆件对空心圆柱部分受拉承载力的提高作用系数;  $\eta$  为加劲肋对节点的承载力提高系数, 其物理意义为带肋螺栓球柱节点与同尺寸无肋螺栓球柱节点承载力的比值。

#### 4.2 承载力计算式回归

根据参数分析结果, 选取节点圆柱筒外径与壁厚的比值  $D/t$ 、圆柱筒壁高度与外径的比值  $H/D$ 、弧形垫片加强区厚度与节点壁厚的比值  $(t_w+t)/t$ 、螺栓直径与对应冲切壁厚的比值  $d/(t_w+t)$  作为  $\gamma$  的影响参数; 选取加劲肋与圆柱筒壁塑性弯矩截面模量之比  $(t_s w_s^2)/(H_0 t^2)$ 、加劲肋宽度与圆柱筒壁弯曲段长度之比  $w_s/(D-t)$  作为  $\eta$  的影响参数进行回归分析。将承载力提高系数  $\gamma$ 、 $\eta$  与影响参数的关系表达为幂函数形式, 回归结果如下:

$$\gamma = 1.03503 \left(\frac{D}{t}\right)^{0.26669} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.58635} \quad (7)$$

$$\left(\frac{t_w+t}{t}\right)^{0.83551} \cdot \left(\frac{d}{t_w+t}\right)^{0.2804}$$

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{无加劲肋} \\ 1.80042 \left(\frac{t_s w_s^2}{H_0 t^2}\right)^{0.15714} \cdot \left(\frac{w_s}{D-t}\right)^{0.0232}, & \text{有加劲肋} \end{cases} \quad (8)$$

对于不带肋节点, 当螺栓拧入深度不足时, 还应考虑螺栓拧入深度的折减系数  $\xi$ , 此时式(6)应写为

$$F_u = \xi \eta \gamma \cdot \frac{2H_0 t^2 f_y}{D-t} \quad (9)$$

式(9)中  $\xi$  可由模型 J10、J72~J79 的计算结果进行回归分析得出:

$$\xi = \begin{cases} 1, & d/t_b < 1 \\ -1.70939 \left(\frac{t_c}{d}\right)^2 + 3.48524 \left(\frac{t_c}{d}\right) - 0.77692, & d/t_b \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $t_b$  为螺栓拧入深度, mm。

#### 4.3 计算式与数值分析结果对比

根据式(6)~(10)计算表4中螺栓球柱节点的极限承载力, 并与数值分析计算结果进行对比, 见表5和图15。由图15a可知, 计算式计算结果  $F_{u,Eq}$  与数值分析结果  $F_{u,FE}$  离散度小, 两者吻合良好。由图15b可知, 90.79%的节点采用计算式计算得到的单向受拉极限承载力与数值模型计算结果相对误差在  $\pm 4\%$  以内, 所有节点最大相对误差为 8.08%。

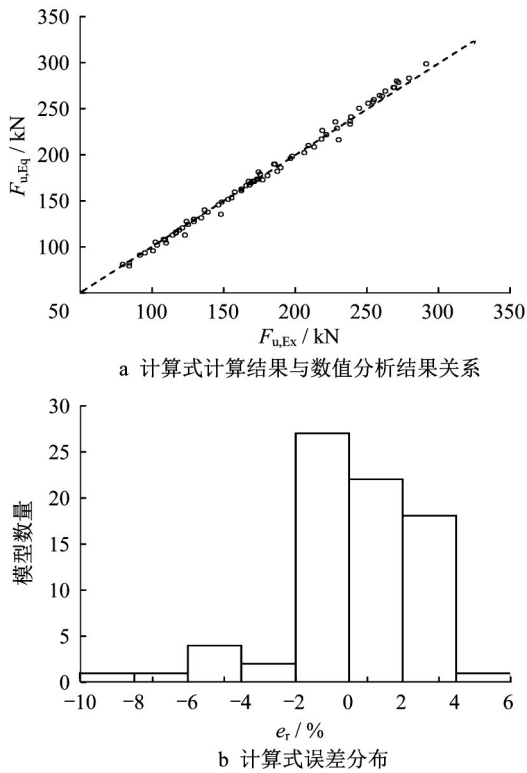


图 15 计算式与数值分析结果对比

Fig. 15 Comparison of formulae calculations with FE results

4.4 计算式与试验结果对比

文献[8]中试验试件的最大荷载  $F_{Ex,max}$ 、在  $\delta=1.5\%D$  时的承载力  $F_{u,Ex}$  以及  $F_{u,Ex}$  和拟合算式计算

所得的节点承载力  $F_{u,Eq}$  的相对误差  $e_r$  见表 6。试验结果与式(6)~(10)计算结果的相对误差在  $\pm 10\%$  以内,相对误差绝对值平均值为 6.41%,说明回归分析得到的计算式能较好地估算螺栓球柱节点的单向受拉承载力,具有良好的工程使用价值。

表 6 拟合公式计算结果与试验结果对比

Tab. 6 Comparison of formulae calculations with test results

试件	$F_{Ex,max}/kN$	$F_{u,Ex}/kN$	$\xi$	$F_{u,Eq}/kN$	$e_r/\%$
JD7	167.70	71.35	0.699	75.216	5.42
JD8	133.80	66.25	0.699	60.423	-8.80
JD9	186.10	181.36	1.000	172.272	-5.01

4.5 节点单向受拉承载力与单向受压承载力对比

将本文计算所得的标准螺栓球柱节点产品 J1~J30 的单向受拉承载力  $F_{u,FE}$  与文献[9]中对应的节点单向受压承载力  $F_{u,C}$  进行对比,见表 7,表中  $F_{u,C}$  为文献[9]中标准螺栓球柱节点产品 J1~J30 的单向受压承载力; $F_{u,Eq}/F_{u,C}$  为节点单向受拉承载力与单向受压承载力的比值。通过对比发现,对于规格相同的无肋螺栓球柱节点和带肋螺栓球柱节点,其受拉承载力与受压承载力的比值的平均值分别为 0.784、0.737,均明显小于 1。因此,当网架结构具有悬挑部分或受风吸力时,应保证节点的受拉承载力满足要求,以确保整体结构的安全性。

表 7 节点单向受拉承载力与单向受压承载力对比

Tab. 7 Comparison of tension bearing capacity with compression bearing capacity

编号	$F_{u,Eq}/kN$	$F_{u,C}/kN$	$F_{u,Eq}/F_{u,C}$	编号	$F_{u,Eq}/kN$	$F_{u,C}/kN$	$F_{u,Eq}/F_{u,C}$	编号	$F_{u,Eq}/kN$	$F_{u,C}/kN$	$F_{u,Eq}/F_{u,C}$
J1	82.86	101.523	0.816	J11	210.42	271.254	0.776	J21	148.56	185.491	0.801
J2	96.14	133.704	0.719	J12	229.51	321.549	0.714	J22	172.76	243.688	0.709
J3	113.15	139.943	0.809	J13	208.59	278.914	0.748	J23	196.55	246.654	0.797
J4	107.09	132.135	0.810	J15	251.16	320.481	0.784	J24	233.89	286.41	0.817
J5	124.26	163.958	0.758	J15	273.95	369.692	0.741	J25	190.26	270.703	0.703
J6	145.48	171.594	0.848	J16	81.10	105.357	0.770	J26	226.41	309.141	0.732
J7	153.78	201.065	0.765	J17	90.86	132.799	0.684	J27	241.83	357.643	0.676
J8	179.30	210.41	0.852	J18	104.66	134.438	0.779	J28	237.19	340.539	0.697
J9	217.10	251.294	0.864	J19	115.93	153.896	0.753	J29	280.33	380.714	0.736
J10	173.78	231.028	0.752	J20	129.89	183.245	0.709	J30	299.42	428.854	0.698

5 结论

在文献[8]单向受拉螺栓球柱节点的试验研究基础上,建立了节点的数值模型,定义了节点的受拉承载力,并讨论了节点单向受拉时承载力的影响因素,得出以下结论:

(1)单向受拉的螺栓球柱节点数值模型能有效

模拟试件的破坏模式、荷载-位移曲线、螺栓内力分布。

(2)对于设计合理的螺栓球柱节点,其单向受拉承载力主要由节点筒壁变形控制,定义筒口相对拉伸变形  $\delta=1.5\%D$  时节点所受的荷载为螺栓球柱节点的单向受拉承载力。

(3)通过参数分析发现,圆柱筒径越小、壁厚越

厚、筒体高度越高,节点的单向受拉承载力越高;螺栓尺寸及拧入深度对节点单向受拉承载力有一定影响,但对带肋节点可不考虑螺栓拧入深度的影响;增设加劲肋可提高节点的刚度和承载力,且增加加劲肋宽度对承载力的提高较增加加劲肋厚度更明显。

(4)节点的单向受拉承载力可根据式(6)~(10)计算,算式计算结果与数值分析结果及试验结果的相对误差均在 $\pm 10\%$ 以内,该式能较好地估算节点单向受拉承载力,具有良好的工程使用价值。

(5)对于规格相同的螺栓球柱节点,其单向受拉承载力明显小于单向受压承载力,在实际工程中应保证节点的受拉承载力满足要求,以确保整体结构的安全性。

#### 参考文献:

- [1] 董石麟, 邢栋, 赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J]. 空间结构, 2012, 18(1):3.  
DONG Shilin, XING Dong, ZHANG Yang. Application and development of modern long-span space structures in China[J]. Spatial Structures, 2012, 18(1):3.
- [2] 沈世钊. 大跨空间结构的发展——回顾与展望[J]. 土木工程学报, 1998(3):5.  
SHEN Shizhao. Development of long-span structures: a review and prospect[J]. China Civil Engineering Journal, 1998(3):5.
- [3] 彭礼, 郭小农. 网架结构: 中国, 2013201723390[P]. 2013-04-08.  
PENG Li, GUO Xiaonong. Non-purlin gird structure of bolted-ball-cylinder joints: China, 2013201723390[P]. 2013-04-08.
- [4] 郭小农, 熊哲, 罗永峰. 空间网格结构节点刚度研究现状综述[J]. 结构工程师, 2014(4):185.  
GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng. State-of-the-art of research on the joint stiffness of the spatial structures[J]. Structural Engineers, 2014(4):185.
- [5] 郭小农, 沈祖炎. 半刚性节点单层球面网壳整体稳定性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(3):10.  
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan. Analysis of stability of single-layer spherical reticulated shells with semi-rigid joints [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(3):10.
- [6] LÓPEZ A, PUENTE I, SERNA M A. Direct evaluation of the buckling loads of semi-rigidly jointed single-layer latticed domes under symmetric loading [J]. Engineering Structures, 2007, 29(1):101.
- [7] MA H, FAN F, ZHONG J, *et al.* Stability analysis of single-layer elliptical paraboloid latticed shells with semi-rigid joints [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 72:128.
- [8] 郭小农, 黄泽韡, 杨商飞, 等. 新型螺栓球柱节点静力承载性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11):1626.  
GUO Xiaonong, HUANG Zewei, YANG Shangfei, *et al.* Experimental study of static bearing behavior of bolted ball-cylinder joint [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11):1626.
- [9] 郭小农, 黄泽韡, 彭礼, 等. 螺栓球柱节点单向受压承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2018(12):98.  
GUO Xiaonong, HUANG Zewei, PENG Li, *et al.* Study of uniaxial compression bearing capacity of bolted ball-cylinder joint[J]. Journal of Building Structures, 2018(12):98.
- [10] 黄炳生, 付宜东, 陈焯, 等. 螺栓球节点高强度螺栓拧入深度试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(4):28.  
HUANG Bingsheng, FU Yidong, CHEN Ye, *et al.* Experimental study on the depth of high strength bolt into bolt-sphere joint [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(4):28.
- [11] 付宜东, 陈焯, 毛泽亮, 等. 高强度螺栓不同拧入深度对螺栓球节点受拉承载力的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(1):106.  
FU Yidong, CHEN Ye, MAO Zeliang, *et al.* Effects of the screwed depth of high strength bolt to tension capacity of bolt-sphere joint [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(1):106.
- [12] 吴琼尧, 王化杰, 钱宏亮, 等. 拧入缺陷对螺栓球节点受力性能影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12):53.  
WU Qiongyao, WANG Huajie, QIAN Hongliang, *et al.* Study on influence caused by bolt-connection defect on mechanical properties of bolt-ball joint [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12):53.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规范: JGJ7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ7—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [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. 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱: GB/T 3098.1—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Mechanical properties of fasteners - Bolts, screws and studs: GB/T 3098.1—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [15] 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. 内六角圆柱头螺钉: GB/T 70.1—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 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. Hexagon socket cap head screws: GB/T 70.1—2008 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.