

双耳板焊接空心球节点轴拉力学性能研究

焦晋峰^{1,2}, 刘佳敏², 马晋鲁³, 陈鹏程², 路国运²

(1. 吕梁学院建筑与土木工程系, 山西 吕梁 033001; 2. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024;
3. 山西潇河建筑产业有限公司, 山西 太原 030000)

摘要 目的 探究双耳板焊接空心球节点的受拉力学特性, 揭示破坏机理并探讨影响其承载力的主要因素。方法 针对8个双耳板焊接空心球节点进行轴心受拉极限承载力试验, 并采用 ABAQUS 有限元分析软件对节点进行参数化数值分析, 重点讨论节点几何尺寸对其承载力的影响。结果 在轴向拉力作用下, 双耳板焊接空心球节点破坏形式分为空心球开裂破坏, 耳板与空心球连接处焊缝失效, 且个别试件出现球面局部起皮; 空心球与耳板连接端部处应力集中明显, 随着荷载增大, 在空心球与耳板连接处沿径向逐步进入屈服阶段。结论 节点轴拉极限承载力, 与空心球直径、耳板宽度与球外径比、耳板厚度与球壁厚度比呈正相关, 与空心球径厚比呈负相关, 且上述影响因素中空心球壁厚与耳板厚度比对承载力影响相对较小。

关键词 双耳板; 焊接空心球节点; 轴心受拉; 破坏形式; 参数化分析

中图分类号 TU391.3

文献标志码 A

引用格式: 焦晋峰, 刘佳敏, 马晋鲁, 等. 双耳板焊接空心球节点轴拉力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 678-689. (JIAO Jinfeng, LIU Jiamin, MA Jinlu, et al. Research on axial tensile properties of hollow ball joints welded with double plates[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 678-689.)

Research on Axial Tensile Properties of Hollow Ball Joints Welded with Double Plates

JIAO Jinfeng^{1,2}, LIU Jiamin², MA Jinlu³, CHEN Pengcheng², LU Guoyun²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Lyuliang University, Lvliang, China, 033001; 2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 030024; 3. Shanxi Xiaohe Construction Industry Co. Ltd., Taiyuan, China, 030000)

Abstract: The tensile properties of the welded hollow spherical joints with double plates were investigated in this paper, and the failure mechanism was revealed and the main factors affecting

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(12172244); 山西省省筹资金资助回国留学人员科研项目(2023-175); 山西省基础研究计划基金项目(202203021211184, 202103021223105); 吕梁市高层次人才引进计划专项项目(2023RC15)

作者简介: 焦晋峰(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢结构与空间结构等方面研究。

the bearing capacity were discussed. The axial tensile ultimate bearing capacity of eight welded hollow spherical joints with double plates was tested, and the parametric numerical analysis of the joints was carried out using the finite element analysis software ABAQUS, focusing on the influence of geometrical dimensions of the joints on their bearing capacity. The failure modes of welding hollow spherical joints with double plates under axial tension can be divided into two categories: cracking failure of hollow spherical joints and failure of welds at the joint between plates and hollow spheres. Additionally, joints, and partial peeling of the spherical surfaces was also observed in some joints. The stress concentration is obvious at the end of the connection between the hollow sphere and the plate. With the increase of the load, the joint between the hollow sphere and the plate gradually enters the yield stage along the radial direction. The axial tensile ultimate bearing capacity of the joint is positively correlated with the diameter of the hollow sphere, the ratio of the width of the plate to the outer diameter of the sphere, the ratio of the plate thickness to the sphere wall thickness, and negatively correlated with the ratio of the hollow sphere diameter to wall thickness to the thickness of the plate. Among the above factors, the ratio of hollow sphere wall thickness to plate thickness has relatively minimal influence on the bearing capacity.

Key words: double ear plates; welded hollow spherical joints; axial tension; failure modes; parametric analysis

随着建筑技术的发展,结构的荷载、内力以及变形由二维的“平面结构”发展到三维“空间结构”^[1],节点是空间结构的重要组成部分,焊接空心球节点因其加工方便、承载力高而被广泛应用于各类空间结构中。近年来,随着空间结构形式不断更新,焊接空心球节点连接杆件形式趋于多样化,且节点受力更加复杂,学者针对不同形式焊接空心球节点力学性能做了大量研究。

针对圆钢管焊接空心球节点受拉破坏机理,众多学者做了大量研究。董石麟等^[2]假定球节点破坏时,环向冲切面上沿壁厚方向的剪应力均达到剪切强度,并根据这一假定推导节点承载力的简化理论解。刘红波等^[3]采用有限元数值模拟方法,发现抗拉节点焊接残余应力自平衡,对静力承载力无影响。近年来,随着结构形式的更新变化,出现了多种形式的焊接空心球节点,大量学者针对不同节点展开了研究。董石麟、邢丽等^[4-6]通过试验及有限元分析软件分别对国家游泳中心“水立方”所使用的方形、矩形钢管两种焊接空心球节点进行承载力研究,并得出其承载力公式。Liu Hongbo 等^[7]、Yan

Xiangyu 等^[8]、张玉轩^[9]分别对 H 型钢焊接空心球节点力学性能进行研究,得出其破坏形态,分析了 H 型钢的几何参数对其承载力的影响。陈志华等^[10]基于北方学院体育馆弦支穹顶结构,对索耳板焊接空心球节点进行优化,将耳板与焊接球肋板贯通,节点整体极限承载力提升。温锁林^[11]通过轴拉试验,发现单板焊接空心球节点因空心球剪切破坏而丧失承载力,并得到单板焊接空心球节点抗拉承载力公式。纪晗等^[12]针对 12 根杆件、2 个方向拉索相连的复杂受力焊接空心球节点,展开有限元与试验研究,认为在球体与杆件相贯处出现屈服,并发生较大的塑性变形产生破坏。刘红波等^[13]通过鼓形焊接空心球节点轴拉破坏试验,得出其破坏机理为球体开裂破坏。Liu Hongbo 等^[14]对腐蚀后焊接空心球节点试件分别进行轴压和拉伸试验研究,提出了腐蚀节点极限承载力降低系数。王秀丽等^[15]认为根据规范所设计的节点多是钢管先于空心球屈服,而空心球并未真正的破坏,对 800 mm 的空心球进行受压试验,提出了钢管壁厚增加量的参考值。Chen Yong 等^[16]针对跨越输电钢管塔中采

用的直径超1 m 加肋焊接空心球节点进行研究,通过分析破坏模式,讨论了加劲肋在球节点抗拉承载力中的贡献,获得拉承载力计算公式。

综上所述,大量学者已对不同形式焊接空心球节点进行了研究,但针对双耳板焊接空心球节点的研究较少,对于空间结构,节点力学性能直接影响结构整体安全。鉴于此,笔者以山西某国际会展中心屋盖结构所使用的双耳板焊接空心球节点为背景,针对双耳板焊接空心球节点开展轴向拉力试验,分析节点抗拉承载力性能及破坏模式,并建立相应的有限元模型,探讨不同几何尺寸参数对其承载力的影响规律;研究表明:在轴心拉力作用下,双耳板焊接空心球节点破坏主要表现为空心球开裂和连接焊缝失效两种形式,且其轴拉极限承载力与空心球直径、耳板宽度与球外径比、耳板厚度与球壁厚度比呈正相关,与空心球径厚比呈负相关。

1 工程背景

山西省某会展中心占地面积约51.2 万 m²,总建筑面积为28.1 万 m²,由北展、中展、南展组成。笔者以中展为研究背景(见图1),该建筑屋顶由中间圆形网壳结构与东、西、南、北四个方向的方形屋顶桁架钢结构组成,其中4 个方向的方形屋顶桁架结构连接处采用了双耳板焊接空心球节点(见图2),钢材材质为Q235B;结构双耳板焊接空心球节点具体布置位置如图3 所示。



图1 山西某会展中心
Fig.1 An exhibition centerr in Shanxi

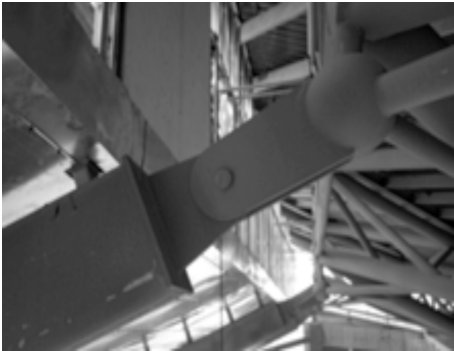


图2 双耳板焊接空心球连接节点
Fig.2 The hollow ball joint welded with double-ear plates

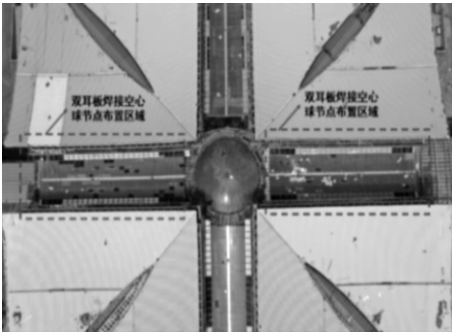


图3 双耳板焊接空心球节点布置区域
Fig.3 The layout area of the hollow ball joint welded with double-ear plates in the convention and exhibition center

2 试验研究

2.1 试件设计

为研究双耳板焊接空心球节点的受拉力学性能,根据实际工程常选用的节点规格,并考虑仪器的最大试验力,选取球径分别为160 mm、180 mm、200 mm 的焊接空心球节点。考虑球径、球壁厚度、耳板宽度和耳板厚度,共设计8 个试件,试件规格见表1。为使仪器夹头加持住试件,便于试验加载,试件上下两端各焊20 mm 厚钢板作为试件加持端,试件具体示意图见图4。试件各部分均采用Q235B 钢材,耳板与焊接空心球连接处采用角焊缝。

表 1 双耳板焊接空心球节点受拉试验试件规格

Table 1 Specification of tensile test specimens for hollow ball joints welded with double-ear plates

试件 编号	球径 D / mm	球壁厚 δ / mm	耳板厚度 t / mm	耳板宽度 B / mm
BQ-T1	160	8	6	114
BQ-T2	160	8	6	117
BQ-T3	180	6	8	108
BQ-T4	180	6	8	114
BQ-T5	180	8	8	114
BQ-T6	200	8	6	117
BQ-T7	200	6	8	108
BQ-T8	200	8	8	117

注:耳板宽度为梯形耳板与空心球连接长度的投影。

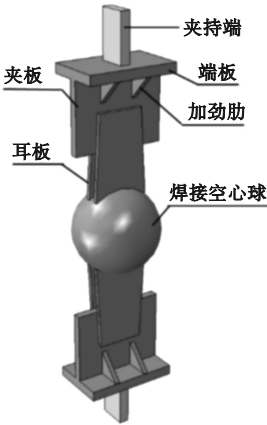


图 4 试件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the specimen

2.2 测点布置

为了有效测得应力分布规律,试件球面的应变采用三向应变花测量。耳板形状及布置方式均对称,在焊接空心球上选取 1/8 焊接球面进行测量,在耳板端部与耳板中心所在的两条经线上各布置 3 个三向应变片,共计布置 6 个应变片;在耳板形心处布置 2 个单向应变片。

为了使测量数据更加接近真实情况,粘贴应变片前将试件表面的焊锈打磨干净,并

将三向应变片粘贴位置更加靠近焊缝焊趾处。应变片的具体位置及序号示意如图 5 所示(T 表示三向应变片,S 表示单向应变片)。

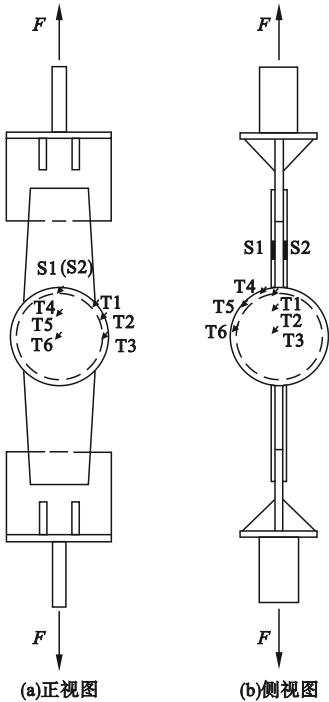


图 5 “板-球”节点应变片布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of strain gauge arrangement at the "plate ball" joint

2.3 加载方案

使用微机控制电液伺服万能试验机进行拉力加载,如图 6 所示。试验开始前进行预加载,预加载过程中,施加预估极限承载力 10% 左右的荷载,持荷 5 min,保证试件与试验机的安装缝隙密合,检查仪器和加载装置的工作状态及可靠度,记录初始读数,然后卸载。正式加载全过程采用位移加载,加载速率取 0.2 mm/min。当荷载达到极限荷载后继续增大位移,直至荷载下降至极限荷载的 80% 左右或构件出现过大不安全变形时停止加载。加载过程中观察并记录试验现象,保存数据后卸载。



图6 双耳板焊接空心球节点静力拉伸实验实景图

Fig. 6 Setup of static tension experiment for the hollow ball joint welded with double-ear plates

2.4 试验结果分析

2.4.1 试验现象

对8个试件进行拉力试验,各试件在试验过程中的现象基本相似,整个试验过程中未出现剧烈的响声,根据试验现象将试验分为以下四个阶段:

(1)加载开始阶段,由于试件加持端的板件加工存在对中误差,导致加载开始之前某一端先与仪器重合,另一端与仪器存在缝隙,试件与仪器未充分结合。导致加载初期试验曲线斜率较小,曲线接近水平。

(2)随着试验进行仪器两端夹头逐渐加紧试件,荷载随位移均匀增大,仪器记录的荷载-位移曲线斜率较大,接近于垂直,试件处于弹性阶段,未有明显变形,此阶段荷载变化较大,而位移变化较小。

(3)随着位移不断增大,试件逐渐进入塑性阶段,荷载-位移曲线斜率减小,试件发出响声,耳板端部处与空心球连接的焊缝开始出现开口,焊接空心球被明显拉长,逐渐变为两端扁平的梭形,球面因被拉长而开始出现纹路。

(4)达到极限承载力后,随着位移增大,空心球节点承受荷载逐渐减小,试件逐渐丧失承载力。

2.4.2 破坏模式

试件破坏模式主要分为两类,各试件破

坏模式统计见表2。第一种破坏模式是随着轴心荷载增大,耳板与焊接空心球连接焊缝端部处空心球首先开裂,裂缝继续沿与耳板呈45°角的方向扩展,最终因空心球开裂失效使节点丧失承载力,图7(a)、(b)为试件BQ-4与BQ-7的空心球断裂破坏情况。第二种破坏模式主要原因为焊缝存在一定的缺陷,使焊缝成为节点薄弱区域,导致耳板与空心球连接处焊缝在轴拉作用下失效,图7(c)为试件BQ-2焊缝失效情况;其中BQ-5节点连接处焊缝被完全拉开。除以上发现的破坏模式,个别试件由于对中误差,使荷载不能准确沿轴线加载,空心球局部起皮。

表2 双耳板焊接空心球节点破坏形式

Table 2 Failure modes of the hollow ball joint welded with double-ear plates

试件编号	破坏模式
BQ-1	焊缝失效
BQ-2	焊缝失效
BQ-3	空心球开裂失效 (球面局部起皮)
BQ-4	空心球开裂失效 (球面局部起皮)
BQ-5	焊缝失效
BQ-6	空心球开裂失效
BQ-7	空心球开裂失效
BQ-8	焊缝失效

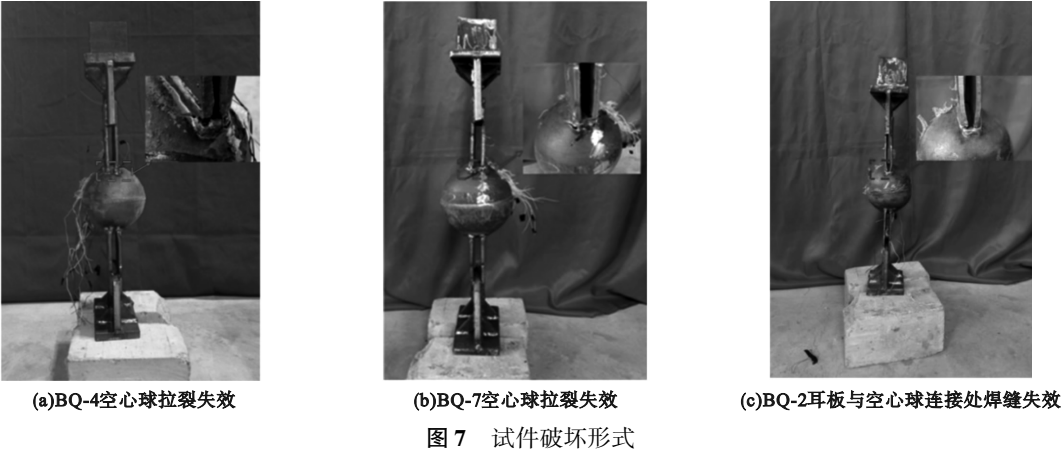


Fig. 7 The failure modes of specimens

试验结果表明,本次试验所有试件空心球均被拉成梭形,一半试件的破坏形式为空心球开裂破坏,一半为焊缝失效。参考温锁林^[11]对单板焊接空心球抗拉试验的研究,将两种节点抗拉试验结果进行对比,本试验部分试件空心球与耳板连接端部处开裂破坏,且试件最终被拉成梭形,与单板焊接空心球节点破坏形式相似。因此,在保证焊缝质量情况下,双耳板焊接空心球节点的主要破坏形式为空心球开裂使其丧失承载力。

2.4.3 荷载-位移曲线

试验得到的8个试件的荷载-位移曲线对比如图8所示。由图可知,8个试件曲线趋势大致相同,加载初期试验,由于试件与仪器未充分结合,曲线斜率较小,曲线接近水平;当试件与试验机充分结合后,曲线斜率增大,曲线接近竖直,此时试件处于弹性阶段;继续增大荷载,曲线逐渐平缓,节点进入屈服阶段;当节点达到极限承载力,由于节点出现不同形式的破坏,节点无法继续承受荷载,曲线发生下降。

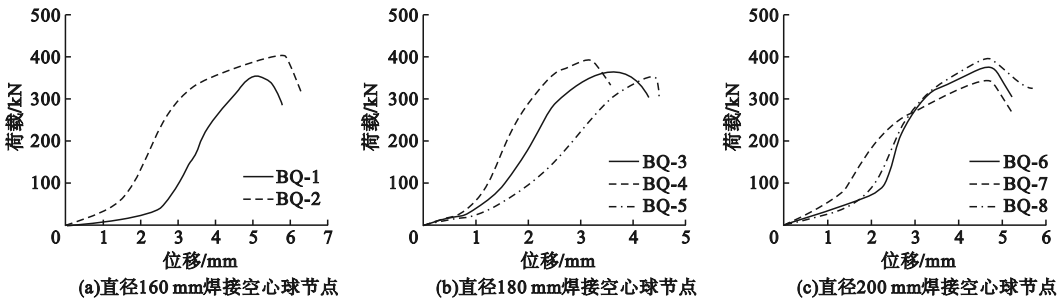


图8 焊接空心球节点轴拉试验荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of axial tensile test for welded hollow ball joints

2.4.4 应变分析

以试件 BQ-2 为例,分析双耳板焊接空心球节点受拉节点的应变,通过荷载-应变曲线对比球面两条经线上各应变花,如图9所示。加载初期,随着荷载的增大,球面各点应变迅速增长,与荷载呈线性关系,靠近焊缝的 T1、T4 应变花增长迅速,从与耳板连接处的测点沿球面径向递减,表明空心球上与耳

板连接处最先屈服,随后球面其他点发生屈服。对比两条经线处应变花的变化,耳板中心处经线上的各测点在最大荷载附近发生屈服,耳板端部所对应经线上的各测点在最大荷载前,约 300 kN 时已发生屈服,表明耳板端部所对应的球面比耳板中心所对应的球面更易发生屈服,与试验中耳板端部空心球首先开裂的破坏现象相符。

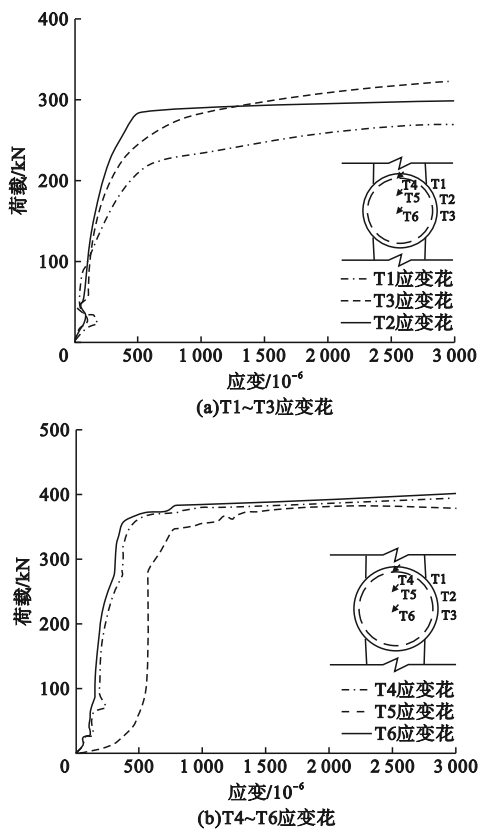


图 9 BQ-2 节点轴拉荷载-应变曲线

Fig. 9 The axial tensile load-strain curves of BQ-2 joint

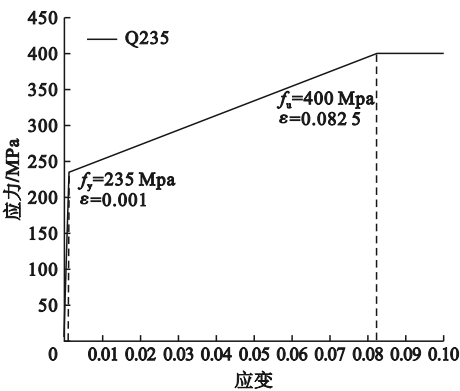


图 10 钢材 Q235B 材料本构

Fig. 10 The material constitutive of steel Q235B

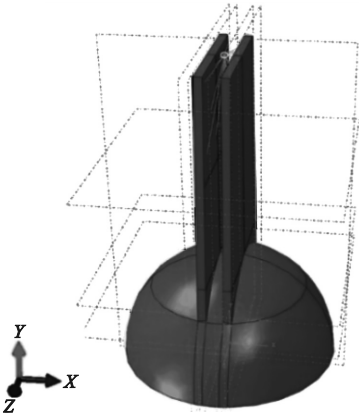


图 11 有限元模型整体图

Fig. 11 Overall view of the finite element model

3 数值模拟

3.1 有限元模型

利用 ABAQUS 有限元分析软件,根据试验试件尺寸,建立 8 个与试验试件尺寸相同的实体单元模型,考虑几何非线性。材料属性与实际节点一致,为 Q235B,本构关系采用理想的三折线模型^[17]如图 10 所示。钢材的弹性模量 E 取为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。

由于节点有很好的对称性,各模型选取 1/2 球体和双耳板进行分析,笔者研究重点为节点极限承载力,且焊接对节点抗拉承载力的影响较小^[3],故建模时不考虑焊缝影响,将各部件合并为一个整体,以模拟实际节点,约束后的模型在荷载作用下可共同受力、变形与实际焊接连接相同,有限元整体模型见图 11。

装配两耳板与焊接空心球,利用“合并”将各部件合为一个整体,各部件之间可传递荷载与焊接节点相似。忽略试件中两耳板间的夹板,将两耳板内表面耦合至一点,并将半球截面处施加固定约束,以模拟完整焊接空心球节点。在耦合点处施加一个足够大的竖直方向位移荷载,保证足够多的子步数量,采用非线性分析,最终因不收敛而中止计算并得到极限承载力。为更好地分析板-球连接部位的应变及应力,设置单元尺寸为 3 mm 的网格加密区,网格为 C3D10,其余部位网格选择 C3D8R 单元,总体单元尺寸为 7 mm,模型网格划分见图 12。

为确定节点的极限承载力,参考俞可权^[18]对焊接空心球极限承载力的研究,当球体变形达到球径的 1.2% 时,认为节点达到极限承载力。

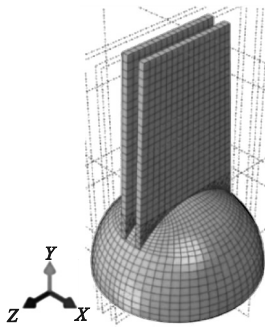


图 12 有限元模型网格划分图

Fig. 12 Mesh division diagram of the finite element model

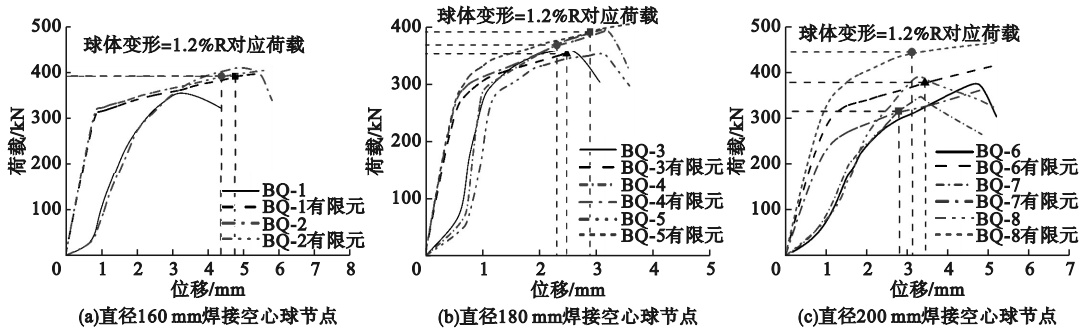


图 13 有限元与试验荷载 - 位移曲线对比

Fig. 13 The load-displacement curves of finite element simulation and experimental results

有限元计算得到的极限承载力与试验所达到的最大荷载对比见表 3。

表 3 受拉承载力数值模拟与试验对比

Table 3 The comparison of tensile bearing capacity between numerical simulation and experimental results

试验编号	承载力数值 模拟值/kN	承载力试 验值/kN	相对误差/ %
BQ-1	389.51	360.08	8.18
BQ-2	390.19	408.02	4.70
BQ-3	353.34	376.27	6.09
BQ-4	368.25	399.66	7.86
BQ-5	390.68	354.62	10.17
BQ-6	377.62	380.82	0.84
BQ-7	315.83	348.99	9.50
BQ-8	443.44	404.04	9.75

注:相对误差 = |试验结果 - 数值模拟结果| / 试验结果 × 100%。

试件试验数据小于数值模拟结果,是因为试件加工时上下两耳板与焊接空心球轴线

3.2 试验结果与有限元分析

3.2.1 承载力分析

有限元得到的荷载 - 位移曲线与试验结果对比见图 13,有限元所模拟得到的曲线与试验大致相同。在对比曲线绘制过程中,去除由仪器空隙所产生的曲线水平段,保证加载位移同步的情况下,发现试验与有限元刚度相差较小。由于有限元模型的试件为理想状态,故曲线不存在下降阶段。

不重合,导致荷载不能精准按轴心加载。部分试验结果大于模拟,是因为试验球节点极限承载力包含了钢材的线性强化对承载力的有利作用,而在模拟时未考虑这部分有利作用。有限元得到的结果与试验结果的误差范围为0.84% ~ 10.17%,能够较准确地模拟节点承载力。

3.2.2 破坏模式

数值模拟所得到节点应力云图与位移云图如图 14 所示。焊接空心球节点在受轴心拉力时,与空心球连接的耳板端部处球面最先达到极限应力,有明显应力集中现象,与试验中耳板两端处焊缝先发生开裂的现象相符合。达到极限承载力时,空心球球冠处位移最大,且半球被明显拉长,与试验结束后空心球被拉成橄榄球状相似。因此,数值模拟所得到的破坏模式及表现形式与试验相似,有限元分析可有效分析双耳板焊接空心球节点的破坏与变形。

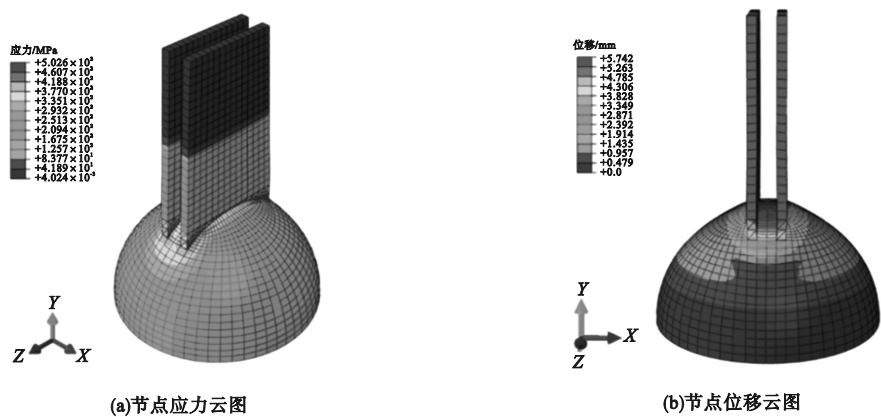


图 14 有限元分析结果

Fig. 14 The finite element analysis results

综上所述,笔者所建立的有限元模型精度较高,可有效模拟双耳板焊接空心球节点在轴向拉力作用下的受力性能及破坏模式。

3.3 参数化分析

根据《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)^[19]中对焊接空心球节点的要求以及工程常用节点尺寸,选择直径 200 mm、

300 mm、400 mm 三种焊接空心球。网架及双层网壳结构中 D/δ 取值范围为 25 ~ 45,而在单层网壳结构中 D/δ 取值范围为 20 ~ 35,故参数化分析 D/δ 取 20、25、40 三个水平; B/D 取 0.6、0.8、0.9 三个水平, t/δ 取 0.8、1.0、1.2 三个水平,如表 4 所示。

表 4 参数取值

Table 4 Parameter setting

材料	空心球直径 D/mm	空心球径厚比 D/δ	耳板宽度与球径比 B/D	耳板厚度与球厚比 t/δ
Q235B	200、300、400	20、25、40	0.6、0.8、0.9	0.8、1.0、1.2

为了便于数据分析,焊接空心球节点统一用以下格式命名:双耳板焊接空心球节点采用 BQ-A-B-C 命名,A 为空心球直径与径厚比,B、C 分别表示耳板宽度与球径比与耳板厚度与球厚比。如 BQ2020-2-3 表示直径为 200 mm,径厚比为 20,耳板宽度与球径比为 0.8,耳板厚度与球厚比 1.2 的双耳板焊接空心球节点。

3.3.1 空心球直径对承载力的影响

针对焊接空心球直径对节点极限承载力的影响进行分析,结果如表 5、图 15 所示。针对工程中常用的空心球规格建立模型,通过承载力对比,相同几何尺寸焊接空心球节点,球径自 200 mm、300 mm、400 mm 依次增大,承载力随直径增大而增大。由图 15 可知,球径自 300 mm 增大到 400 mm 时承载力

提升明显。

表 5 空心球直径对节点承载力的影响

Table 5 The influence of hollow ball diameter on joint bearing capacity

试件编号	空心球直径/mm	承载力/kN
BQ2020-1-1	200	543.1
BQ2025-2-2	200	549.5
BQ2040-3-3	200	359.6
BQ3020-1-1	300	1 242.6
BQ3025-2-2	300	1 234.6
BQ3040-3-3	300	807.5
BQ4020-1-1	400	2 216.0
BQ4025-2-2	400	2 192.8
BQ4040-3-3	400	1 439.1

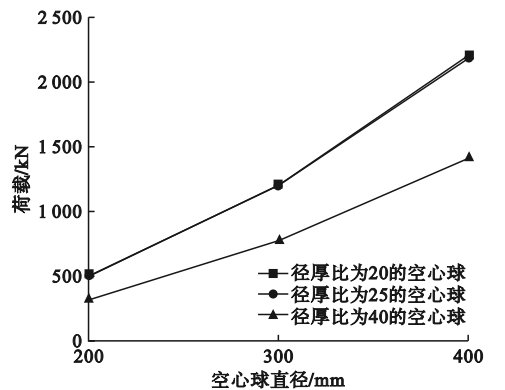


图 15 空心球直径对承载力影响曲线

Fig. 15 The influence of hollow ball diameter on bearing capacity

3.3.2 空心球径厚比对承载力的影响

根据规范对空间网格结构空心球径厚比的规定,选取径厚比为 20、25、40 时进行比较,结果如表 6、图 16 所示。

表 6 空心球径厚比对节点承载力的影响

Table 6 The influence of diameter-thickness ratio of the hollow ball on bearing capacity

试件编号	空心球径厚比	承载力/kN
BQ2020-1-1	20	543.1
BQ2025-1-1	25	396.3
BQ2040-1-1	40	212.2
BQ2020-2-2	20	742.5
BQ2025-2-2	25	549.5
BQ2040-2-2	40	297.4
BQ2020-3-3	20	893.2
BQ2025-3-3	25	661.7
BQ2040-3-3	40	359.6

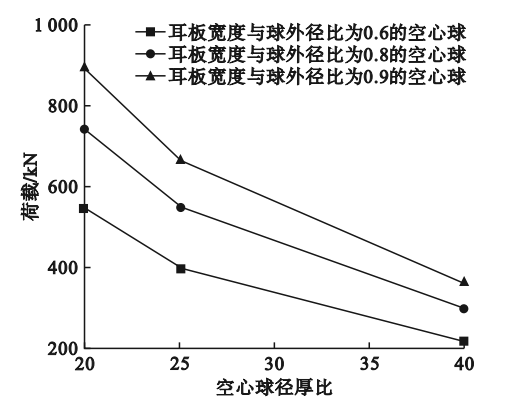


图 16 空心球径厚比对承载力影响曲线

Fig. 16 The influence of diameter-thickness ratio of the hollow ball on bearing capacity

选定球径均为200 mm的焊接空心球,耳板几何尺寸相同,随径厚比的增大,空心球壁厚减小,节点抗拉承载力减小。由图 16 可知,空心球径厚比由 20 增大到 25 时,承载力下降明显。

3.3.3 耳板宽度与空心球直径比对承载力的影响

耳板宽度为梯形耳板与空心球连接长度的投影尺寸,针对宽度比值对节点承载力进行分析。选定空心球直径均为 300 mm 的焊接空心球,径厚比为 20、25、40,宽度比选取 0.6、0.8 和 0.9,结果如表 7、图 17 所示。

表 7 耳板宽度与球外径比对节点承载力

Table 7 The influence of ear plate width-outer ball diameter ratio of the hollow ball on bearing capacity

试件编号	宽度比	承载力/kN
BQ3020-1-1	0.6	1 242.6
BQ3020-2-1	0.8	1 512.6
BQ3020-3-1	0.9	1 659.4
BQ3025-1-2	0.6	1 000.1
BQ3025-2-2	0.8	1 234.6
BQ3025-3-2	0.9	1 372.9
BQ3040-1-3	0.6	582.5
BQ3040-2-3	0.8	723.6
BQ3040-3-3	0.9	807.5

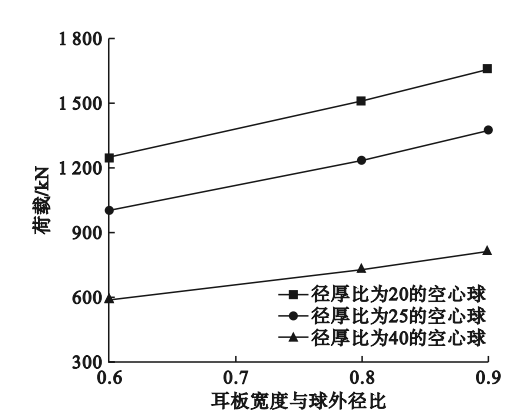


图 17 耳板宽度与球外径比对承载力影响曲线

Fig. 17 The influence of ear plate width-outer ball diameter ratio of the hollow ball on bearing capacity

随着宽度比的增大,耳板宽度接近球径大小,在承受轴向拉力时,荷载传递至球面更

加均匀,耳板端部处球面不易发生应力集中,节点承载力增大。由图 17 可知,随耳板宽度与空心球直径比变化,节点承载力均匀增大。

3.3.4 耳板厚度与空心球壁厚度比对承载力的影响

固定空心球直径为 400 mm,空心球径厚比为 20~40,选取耳板厚度与空心球壁厚度比为 0.8、1.0、1.2。探究耳板厚度小于空心球、耳板厚度等于空心球、耳板厚度大于空心球三种情况下,节点承载力的变化规律,结果如表 8、图 18 所示。

表 8 耳板厚度与空心球壁厚度比对节点承载力的影响

Table 8 The influence of ear plate thickness-wall thickness ratio of the hollow ball on bearing capacity

试件编号	厚度比	承载力/kN
BQ4020-1-1	0.8	2 216.0
BQ4020-1-2	1.0	2 413.7
BQ4020-1-3	1.2	2 629.3
BQ4025-2-1	0.8	2 004.5
BQ4025-2-2	1.0	2 192.8
BQ4025-2-3	1.2	2 384.7
BQ4040-3-1	0.8	1 230.8
BQ4040-3-2	1.0	1 374.8
BQ4040-3-3	1.2	1 439.1

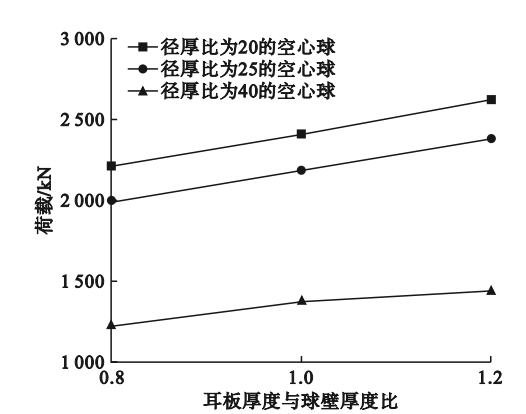


图 18 耳板厚度与空心球壁厚度比对承载力影响曲线

Fig. 18 The influence of ear plate thickness-wall thickness ratio of the hollow ball on bearing capacity

随着耳板厚度的增大,节点承载力增大,耳板厚于空心球时,空心球球冠处变形更均

匀,节点承载力最大。由图 18 可知,耳板厚度与空心球壁厚比每增大 0.2,承载力增大在 10% 以内,与其他参数相比,对节点承载力影响相对较小。

4 结 论

(1)节点破坏形式为两类,一种为耳板与空心球连接端部处开裂,裂缝沿与耳板呈 45°角方向发展;第二种为耳板与球面连接处焊缝失效,且个别试件加载偏差,节点球面局部范围起皮。

(2)双耳板焊接空心球节点在轴心拉力加载过程中,空心球与耳板连接端部处率先屈服,随着荷载增加,在空心球与耳板连接处沿径向依次屈服。

(3)基于参数化分析结果,该类节点极限受拉承载力与空心球直径 D 、耳板宽度与外径比 B/D 、耳板厚度与球壁厚度比 t/δ 呈正相关,与空心球径厚比 D/δ 呈负相关;上述影响因素中,耳板厚度与空心球壁厚度比 t/δ 对节点承载力影响最小。

参考文献

[1] 蓝天. 空间钢结构的应用与发展[J]. 建筑结构学报,2001,22(4):2-8.
(LAN Tian. Application and developments of steel spatial structures [J]. Journal of building structures,2001,22(4):2-8.)

[2] 董石麟,赵阳,邢丽,等. 焊接空心球节点承载力 3 力与实用计算方法的研究进展[C]//第十一届空间结构学术会议论文集. 南京:中国土木工程学会,2005:696-701.
(DONG Shilin,ZHAO Yang,XING Li,et al. Research progress on bearing capacity and practical calculation methods of welded hollow spherical joints [C]// Proceedings of the 11th space structure academic conference. Nanjing: Chinese Civil Engineering Society,2005:696-701.)

[3] 刘红波,高昊天,陈志华,等. 冲压成型过程对焊接空心球节点力学性能影响研究[J]. 建筑结构,2023,53(3):103-108.
(LIU Hongbo,GAO Haotian,CHEN Zhihua,et al. Study on influence of stamping and forming process on mechanical properties of welded hollow spherical joints [J]. Journal of building structure,2023,53(3):103-108.)

[4] 董石麟,邢丽,赵阳,等. 矩形钢管焊接空心球节点承载能力的简化理论解与实用计算方法

- 研究[J]. 土木工程学报, 2006(6): 12-18.
(DONG Shilin, XING Li, ZHAO Yang, et al. Simplified theoretical solution and practical calculation method for welded hollow spherical joints of rectangular hollow section members [J]. China civil engineering journal, 2006(6): 12-18.)
- [5] 邢丽. 方钢管、矩形钢管焊接空心球节点的承载力与实用计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
(XING Li. Load-carrying capacity and practical calculation method of welded hollow spherical joints connected with square and rectangular steel tubes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [6] 董石麟, 邢丽, 赵阳, 等. 方钢管焊接空心球节点的承载力与实用计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2005(6): 27-37.
(DONG Shilin, XING Li, ZHAO Yang, et al. Load carrying capacity and practical calculation method of welded hollow spherical joints connected with square steel tubes [J]. Journal of building structure, 2005(6): 27-37.)
- [7] LIU Hongbo, YING Jiaojie, CHEN Zhihua, et al. Ultimate tensile and compressive performances of welded hollow spherical joints with H-beam [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 150: 195-208.
- [8] YAN Xiangyu, DUAN Yan, ZHANG Yuxuan, et al. Study on compressive bearing capacity and axial stiffness of welded hollow spherical joints with H-shaped steel member [J]. Engineering structures, 2020, 203: 109821. 1-109821. 12.
- [9] 张玉轩. 复杂构造焊接空心球承载力及节点刚度研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
(ZHANG Yuxuan. Study on bearing capacity and joint stiffness of complex structural welded hollow spherical joint [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [10] 陈志华, 方至炜, 闫翔宇. 北方学院体育馆弦支穹顶撑杆上节点构造优化分析[C]//第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 天津市钢结构学会, 2016: 145-150.
(CHEN Zhihua, FANG Zhiwei, YAN Xiangyu. Optimization analysis of node structure on the string supported dome of the north university gymnasium [C]// Proceedings of the 16th national symposium on modern structural engineering. Tianjin: Tianjin Steel Structure Society, 2016: 145-150.)
- [11] 温锁林. 非常规焊接空心球节点力学性能与设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
(WEN Suolin. Study on mechanical properties and design method of unconventional welded hollow spherical joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.)
- [12] 纪晗, 熊世树, 黄丽婷. 大型焊接空心球节点的多轴加载有限元分析与足尺试验[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 173-178.
(JI Han, XIONG Shishu, HUANG Liting. Finite element analysis and full-scale testing of large welded hollow spherical joints under multi-axial loading [J]. Engineering mechanics, 2010, 27(4): 173-178.)
- [13] 陈志华, 温锁林, 刘红波, 等. 北京大兴国际机场大直径焊接空心球节点力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(1): 15-23.
(CHEN Zhihua, WEN Suolin, LIU Hongbo, et al. A study on the mechanical properties of large-size welded hollow spherical joints of Beijing Daxing international airport [J]. Progress in steel building structures, 2022, 24(1): 15-23.)
- [14] LIU Hongbo, CHEN Huiyun, CHEN Zhihua. Residual behaviour of welded hollow spherical joints under corrosion and de-rusting [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 167: 105977.
- [15] 王秀丽, 栾蔚. 大尺寸焊接空心球节点试验中极限承载力研究[J]. 空间结构, 2011, 17(3): 43-46.
(WANG Xiuli, LUAN Wei. Ultimate bearing capacity of large scale welded hollow spherical joint in tests [J]. Spatial structure, 2011, 17(3): 43-46.)
- [16] CHEN Yong, WANG Jiyang, GUO Yong, et al. Mechanical behavior of welded hollow spherical joints with diameter exceeding 1.0 m [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 159(11): 21-33.
- [17] 马晋鲁. 空间网格结构钢管-焊接空心球悬挂吊点静力及常幅疲劳性能试验和理论研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
(MA Jinlu. Experimental and theoretical study on static and constant amplitude fatigue behavior of pipe-hollow sphere suspension joints in space frame structures [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.)
- [18] 俞可权, 余江滔, 唐波. 焊接空心球节点极限承载力的试验与有限元分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(8): 85-90.
(YU Kequan, YU Jiangtao, TANG Bo. Experimental and finite element analysis of the ultimate bearing capacity of welded hollow spherical joints with ribbed stiffener [J]. Industry building, 2011, 41(8): 85-90.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: 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 grid structure: JGJ7-2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)