

冲击荷载下焊接空心球节点的动力响应研究

吴 长^{1,2}, 刘家乐^{1,2}, 王仁红^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程
防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘要: 为研究冲击荷载下节点刚度和冲击速度对焊接球节点动力响应的影响,对缩尺节点试件进行不同高度下的冲击试验;采用 ANSYS/LS-DYNA 软件中的 Shell163 壳单元模拟焊接球和杆件,采用 Solid164 实体单元模拟冲击物,建立焊接空心球节点精细化有限元模型。将试验结果和有限元分析结果进行对比,验证有限元模型的有效性。通过改变钢球冲击高度、球节点壁厚和直径,从节点的动应力、动应变、动位移、冲击力以及冲击能量 5 个方面,对焊接球节点开展动力响应分析。研究结果表明:动力响应随冲击能量的增加而增大;增加焊接球直径相当于削弱了节点的刚度,但削弱幅度不大;增加焊接球壁厚对于提升节点的抗冲击性能有一定作用。

关键词: 焊接空心球节点; 节点刚度; 冲击能量; 动力响应; 缩尺试验

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2021)11-0082-12

DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.010

A Study on the Dynamic Response of Welded Hollow Spherical Joints Under Impact Loading

WU Chang^{1,2}, LIU Jiale^{1,2}, WANG Renhong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

WU Chang;280863504@qq.com

Abstract: In order to study the influence of joint stiffness and impact velocity on the dynamic response of welded ball joints under impact loading, a set of scaled joint specimens are subjected to impact tests at different heights. Shell163 element in ANSYS/LS-DYNA software is used to simulate welded balls and rods. Solid164 element is used to simulate impact objects. A refined finite element model of welded hollow spherical joint is built. The test data are compared with the finite element analysis results to validate the model. By changing the impact height of the impact object, the wall thickness and diameter of ball joint, the dynamic response analysis of the welded spherical joint is performed from five aspects, including dynamic stress, dynamic strain, dynamic displacement, impact force and impact energy. The results show that the dynamic response is enhanced with the increase of impact energy. The increase in the diameter of welding ball is equivalent to weakening the stiffness of joint, but the magnitude is not large. Increasing the wall thickness has a certain effect to improve the impact resistance of the joint.

Keywords: welded hollow spherical joint; joint stiffness; impact energy; dynamic response; scaled test

自 20 世纪 60 年代天津大学刘锡良教授发明焊接空心球节点后,焊接空心球节点就以传力明确、高强轻质、造型简洁美观的特点在网壳和网格结构中得到了广泛应用,如大会议厅、博物馆、收费站、体育馆、歌剧院、飞机

收稿日期:2020-07-02;收到修改稿日期:2020-12-01

基金项目:国家自然科学基金(51608245)

作者简介:

吴 长(1981—),女,博士,副教授,主要从事大跨度空间结构、轻钢结构方面的研究。E-mail:280863504@qq.com。

刘家乐(1995—),男,硕士研究生,主要从事大跨度空间结构方面的研究。

库、雷达穹顶等。作为组成网壳和网格结构的重要单元,焊接空心球节点的刚度和受力性能对网壳、网格的整体刚度和受力性能有重要影响。众多学者也对其开展了一系列的研究:王星等^[1]提出了网格结构中关于焊接球节点刚度的轴力柔度系数和弯曲刚度系数的公式;韩庆华等^[2]通过分析拉压极限承载力下的焊接空心球节点,提出了强度破坏准则和极限准则;董石麟等^[3]对轴力和弯矩共同作用下的焊接空心球做了大量研究;曹正罡、范峰等^[4-7]对网壳和节点进行了大量的弹塑性稳定分析;顾磊等^[8-9]分析了节点刚度的变化对网壳动力极限承载力的影响;SREENATH等^[10]通过比较壳单元和梁单元在钢结构构件分析中的优缺点,提出了克服相应缺点的混合模型,研究其在结构单元上的强度性能并进行系统性的评估;DING等^[11]建立了空间网格焊接空心球节点的力学计算模型,通过数值计算模拟和试验结果对比分析的方法,得到了焊接球节点在强震等外力作用下的破坏机理;刘海锋等^[12]分析了焊接球节点的刚度对计算精度的影响;郭小农等^[13]通过系统总结空间网格结构节点刚度的研究现状,指出了节点刚度研究的新方向;王凡等^[14-15]揭示了节点刚度对网格结构整体稳定性的重要影响;闫翔宇等^[16]对焊接空心球节点刚度的研究成果进行了比较分析,认为应该考虑更多的影响因素以加强对节点刚度的试验研究;ZHAO等^[17]建立了不同尺寸的焊接空心球节点的网壳数值模型,通过比较不同模型的分析结果来验证所建立的网壳模型的精确性;李冬杰^[18]研究了考虑节点刚度的网壳结构在冲击荷载下的动力响应;苟宝龙^[19]分析了多个冲击物作用于网壳结构不同位置时结构的动力响应以及失效机理。

综上所述,目前大多采用刚性节点的空间梁单元来对单层网壳进行分析,未能考虑焊接球节点刚度的影响;而有关焊接球节点刚度的研究主要集中于节点刚度对整体结构的极限承载力和稳定性的影响,以及弹塑性分析上,关于偶然荷载(如地震、爆炸、冲击)作用下节点动力响应的影响分析较少。本文将对缩尺节点试件进行 5 种不同工况下的冲击试验,研究冲击速度对节点动力响应的影响;基于试验结果,采用 ANSYS 软件中的 Shell163 壳单元来模拟钢管杆件和焊接空心球,考虑几何非线性和材料弹塑性的双重非线性,建立试件的精细化有限元数值模型,研究冲击物的冲击速度、焊接空心球壁厚和直径对节点动力性能的影响。

1 焊接球节点冲击试验

1.1 试验目的

通过 5 组不同冲击高度下焊接空心球节点的冲击试验,观察节点的动力响应和破坏现象。提取各测点的位移、加速度等基本动力响应数据,验证有限元模型分析的有效性。

1.2 试验模型

冲击试验中的试验模型如图 1 所示。其中,钢材采用 Q235B,屈服强度和弹性模量采用 Q235B 的标准值,极限抗拉强度依据节点模型材料的材性试验结果取值,为 542.18 MPa^[19]。

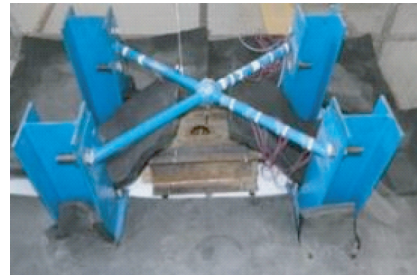
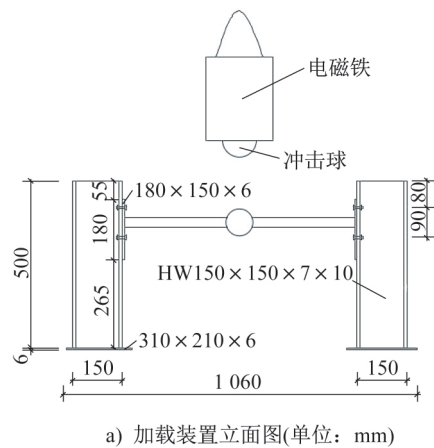


图 1 试验模型

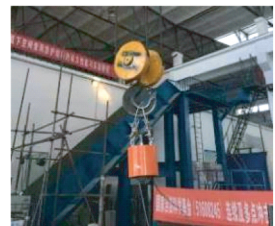
Fig. 1 Test model

1.3 试验装置

节点通过 M24 螺栓固定在 4 根尺寸为 HW150 mm × 150 mm × 7 mm × 10 mm 的 H 形钢柱上,H 形钢柱与地面通过螺栓连接(图 2a))。采用直径分别为 150 mm 和 200 mm 的实心钢球,由吸附装置电磁铁(图 2b))吸附,将电磁铁由吊车升高至所需高度,释放钢球,钢球以自由落体运动冲击节点(图 2c))。数据采集装置使用东华测试 DH5922,数据的记录和分析使用 DHDAS 动态信号采集分析系统(图 3))。



b) 吸附装置



c) 冲击装置

图 2 冲击试验装置

Fig. 2 Impact test device



图 3 数据采集装置

Fig. 3 Data acquisition device

1.4 试验工况

试验时主要通过改变冲击高度来分析冲击速度对焊接空心球节点动力响应的影响。试验共分为 5 组工况,采用直径为 150 mm、质量为 13.87 kg 的钢球,分别从 1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 的高度自由释放,从而对节点试件进行冲击荷载的施加。具体试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test loading conditions

工况编号	钢球直径 D/mm	冲击高度 h/m	焊接球 尺寸/ mm	杆件 尺寸/ mm
1-1	150	1	80×3	30×2
1-2		2	80×3	30×2
1-3		3	80×3	30×2
1-4		4	80×3	30×2
1-5		5	80×3	30×2

2 焊接球精细化有限元模型

2.1 有限元材料分析模型和参数的选取

焊接空心球节点采用 Shell163 单元模拟,钢球采用 Solid164 单元模拟。钢材采用分段线性塑性模型,该模型的主要特点是随着材料应变率的提高,材料的流动屈服应力也随之提高,即在高应变率下,材料的强度也更高。应变率与屈服应力的关系为:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}'}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] [\sigma_0 + f_n(\epsilon_{\text{eff}}^p)] \quad (1)$$

式中: σ_0 为常应变率处的屈服应力; $\dot{\epsilon}'$ 为有效应变率; C 、 P 为应变率参数,低碳钢分别取为 40、5; $f_n(\epsilon_{\text{eff}}^p)$ 为基于有效塑性应变的硬化函数。具体的钢材材料参数如表 2 所示。

2.2 动力响应分析冲击模型

采用直径为 150 mm、质量为 13.87 kg 和直径为 200 mm、质量为 32.88 kg 的钢球以匀速冲击的方式冲击网壳节点。节点模型如图 4 所示,此次模拟共分为 12 种工况,如表 3 所示。

表 2 钢材材料参数

Tab. 2 Material parameters of steel

钢材密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松比	屈服 强度/ MPa	失效 塑性 应变	C/s^{-1}	P
7 850	206	0.3	235	0.25	40	5

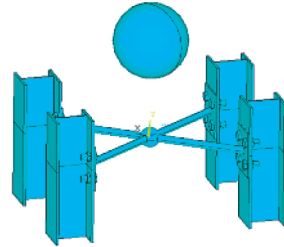


图 4 节点模型

Fig. 4 Joint model

表 3 模拟工况

Tab. 3 Simulation conditions

工况编号	钢球直径 D/mm	冲击高度 h/m	焊接球 尺寸/ mm	杆件 尺寸/ mm
1-1	150	2	80×3	30×2
1-2		4	80×3	30×2
1-3		6	80×3	30×2
1-4		8	80×3	30×2
2-1	150	6	70×3	30×2
2-2		6	80×3	30×2
2-3		6	90×3	30×2
2-4		6	100×3	30×2
3-1	200	6	80×3	30×2
3-2		6	80×4	30×2
3-3		6	80×5	30×2
3-4		6	80×6	30×2

3 试验和有限元结果对比

3.1 试验现象对比

直径为 100 mm 的钢球分别从 1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 的高度处冲击节点。当冲击高度较低时($h \leq 2$ m),焊接球冲击点处仅出现小变形,而整体无变化且处于弹性状态,如图 5a)所示。当冲击高度继续增加时($2 \text{ m} \leq h \leq 4$ m),焊接球凹陷区域继续增大,杆件发生局部弯曲,冲击完成后节点发生塑性变形,但是仍处于弹塑性范围内,具有一定的承载能力,如图 5b)所示。当冲击高度 $h \geq 4$ m 时,焊接球发生大面积凹陷,杆件弯曲严重,进入塑性阶段,如图 5c)所示。

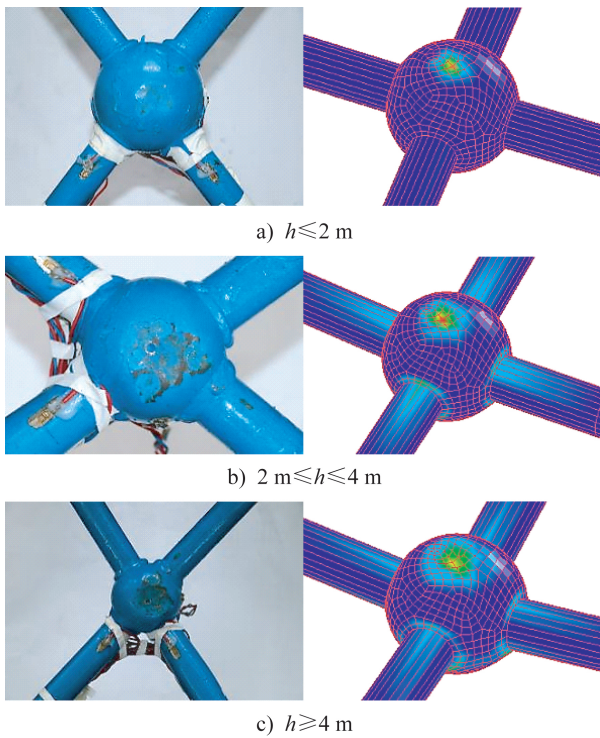


图 5 节点变形形态

Fig. 5 Joint deformation patterns

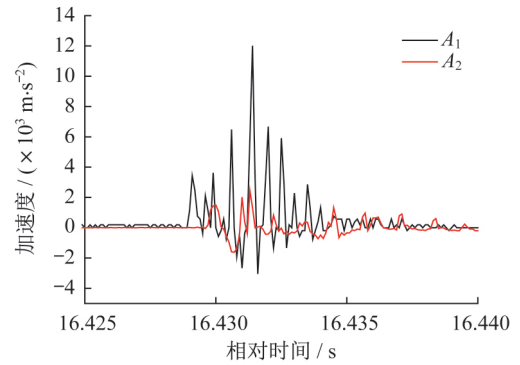
3.2 加速度对比

试验工况 1-2(表 1)和模拟工况 1-1(表 3)下的节点加速度时程曲线如图 6a)、b)所示。其中, A_1 为节点焊接球下侧中心点的竖向加速度, A_2 为杆件中间下侧点处的竖向加速度。由图 6 的对比分析可知:图 6a)中 A_1 和 A_2 几乎同时达到最大峰值, 分别为 $12\ 016.66\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $2\ 445.69\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; 图 6b)中 A_1 和 A_2 的最大峰值分别为 $12\ 320.51\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $2\ 353.47\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。焊接球的加速度峰值为杆件的加速度峰值的 5 倍, 焊接球的加速度响应要比杆件的加速度响应要强烈。试验测得的加速度峰值和有限元分析得到的加速度峰值较为吻合。

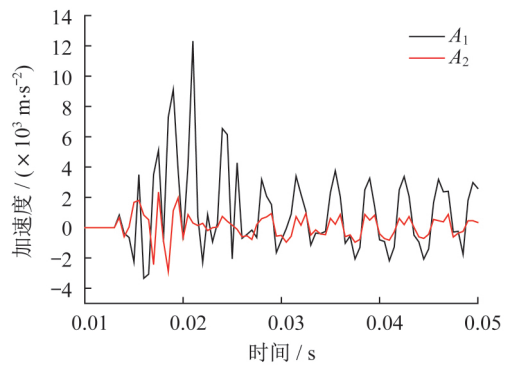
3.3 位移对比

试验中位移计测取的冲击高度分别为 2 m 和 4 m 时的位移值如图 7a)所示, 图 7b)为模拟得出的相同工况下的位移时程曲线。从极值和波峰的角度来分析, 试验得到的冲击高度为 2 m 和 4 m 时测点的最大位移分别为 19.6 mm 和 35.4 mm, 而有限元分析得到的节点最大位移为 15.9 mm 和 27.8 mm, 二者位移极值较为接近。在曲线反弹阶段, 冲击高度为 2 m 时试验和有限元得到的曲线的反弹幅度较为接近, 而冲击高度为 4 m 时二者的反弹幅度有一定偏差。

通过对比分析试验和有限元模拟的相同工况下节点变形形态、加速度峰值和位移峰值, 基本可以保证有限元模型的有效性。



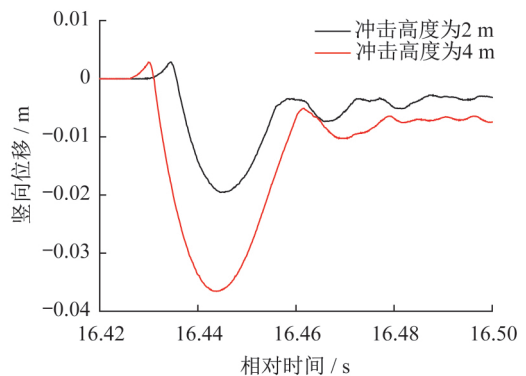
a) 试验工况 1-2



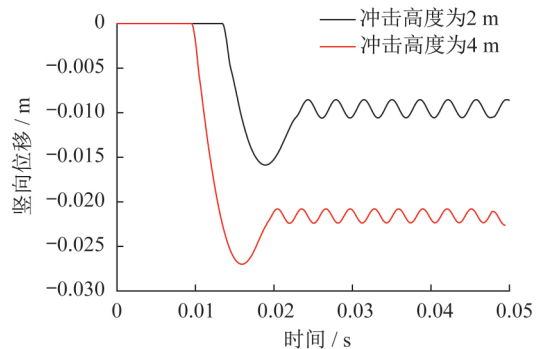
b) 模拟工况 1-1

图 6 加速度峰值对比

Fig. 6 Comparison of peak acceleration



a) 试验位移曲线



b) 模拟位移曲线

图 7 位移峰值对比

Fig. 7 Comparison of peak displacement

4 焊接球节点动力响应有限元分析

4.1 动力响应模式

根据模拟工况分析得到焊接球节点在竖向冲击荷载下的基本动力响应,主要分为 3 种响应模式:(1)除冲击点处有轻微变形外,其他部分没有太大变化,节点位移响应较小;(2)焊接球上部出现凹陷,冲击点周围进入塑性屈服状态,塑性应变接近塑性失效应变,节点位移响应变大;(3)焊接球大面积凹陷,焊接球和杆件连接处断裂,节点破坏。对尺寸为 80 mm×3 mm 的焊接空心球进行不同冲击高度下的参数分析,得到 3 种响应模式的位移云图,如图 8~10 所示。

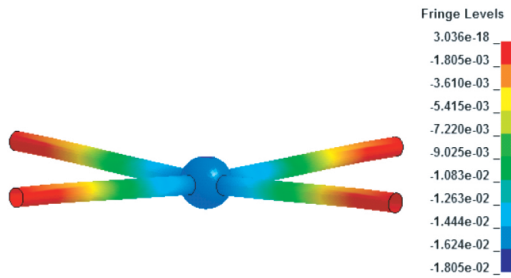


图 8 节点位移云图(模式 1: $D=150\text{ mm}$,
 $h=2\text{ m}$) (单位:m)
Fig. 8 Displacement contour of joint (mode 1:
 $D=150\text{ mm}$, $h=2\text{ m}$) (Unit:m)

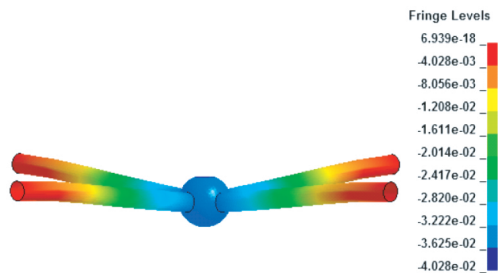


图 9 节点位移云图(模式 2: $D=150\text{ mm}$,
 $h=6\text{ m}$) (单位:m)
Fig. 9 Displacement contour of joint (mode 2:
 $D=150\text{ mm}$, $h=6\text{ m}$) (Unit:m)

4.2 冲击过程应变与应力分析

冲击过程中常伴随着塑性应变的变化,不同冲击高度下的节点最大塑性应变云图如图 11~14 所示。由图可知,冲击能量较小时,仅在冲击点处有较小塑性应变,冲击能量较大时,塑性应变由焊接球扩展到杆件上,除了焊接球上有明显的凹陷变形外,杆件也有较大的弯曲变形。2 m 的冲击高度下,节点在 0.018 5 s 时达到塑性应变最大值 0.121;4 m 的冲击高度下,节点在 0.016 5 s 时达到塑性应变最大值 0.176;6 m 的冲击高度下,节点在 0.015 s 时达到塑性应变最大值 0.229;8 m 的冲击高度

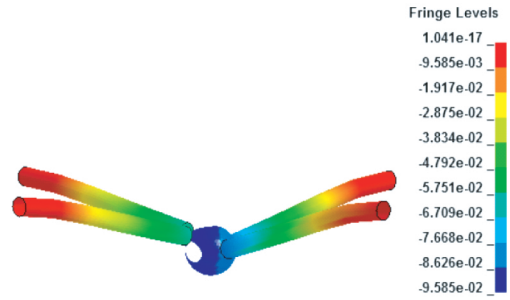


图 10 节点位移云图(模式 3: $D=200\text{ mm}$,
 $h=6\text{ m}$) (单位:m)
Fig. 10 Displacement contour of joint (mode 3:
 $D=200\text{ mm}$, $h=6\text{ m}$) (Unit:m)

下,节点在 0.012 5 s 时达到塑性应变最大值 0.250。因此,随着冲击高度的逐渐增加,冲击能量不断增大,焊接球和杆件的塑性应变不断增大,直至达到失效应变。

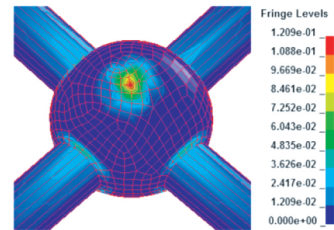


图 11 2 m 冲击高度下节点塑性应变云图
Fig. 11 Plastic strain contour of joint at impact
height of 2 m

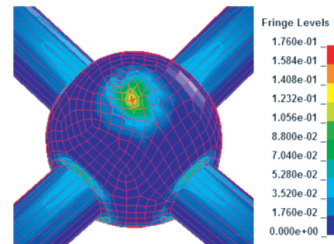


图 12 4 m 冲击高度下节点塑性应变云图
Fig. 12 Plastic strain contour of joint at impact
height of 4 m

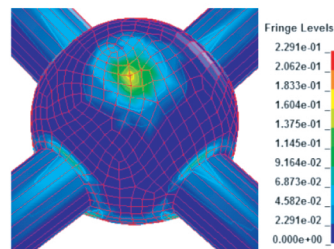


图 13 6 m 冲击高度下节点塑性应变云图
Fig. 13 Plastic strain contour of joint at impact
height of 6 m

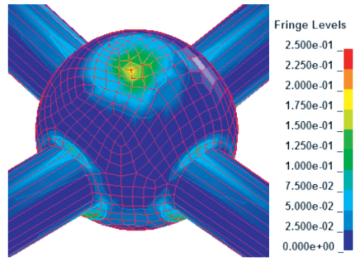


图 14 8 m 冲击高度下节点塑性应变云图
Fig. 14 Plastic strain contour of joint at impact height of 8 m

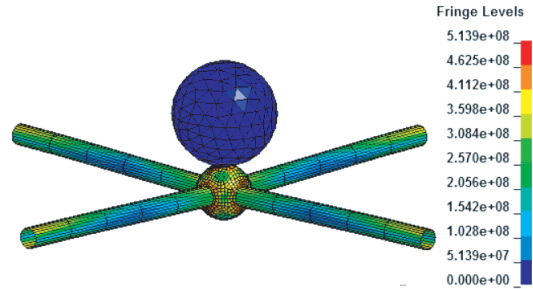


图 17 $t=0.015$ s 时 Mises 应力云图(单位:Pa)
Fig. 17 Mises stress contour at 0.015 s (Unit:Pa)

模拟冲击工况 1-1 在不同时刻的 Mises 应力云图如图 15~18 所示。从钢球冲击焊接球节点的过程中截取不同时间点的应力云图,从图中可以观察到特定时刻应力最大的单元与单元最大应力。可以看出,时间 $t=0.0135$ s 时,钢球与焊接球刚接触,应力最大值出现在碰撞点处。 $t=0.014$ s 时,应力急剧减小,此时节点尚处于弹性阶段,在钢球的继续冲击下,应力迅速扩展到整个节点。 $t=0.015$ s 时,应力停止减小,开始增长。从此刻开始,由于钢球和焊接球碰撞后节点在钢球冲击下一起运动,从而使节点进入了塑性变形阶段,应力减小,且随着时间的延长,应力最大值逐渐减小,此时应力最大值出现在焊接球和杆件端部。 $t=0.022$ s 时,撞击过程结束,钢球回弹,节点因撞击产生的应力最大值稳定在 309~365 MPa 之间。

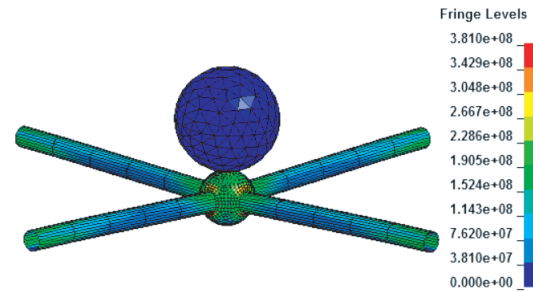


图 18 $t=0.022$ s 时 Mises 应力云图(单位:Pa)
Fig. 18 Mises stress contour at 0.022 s (Unit:Pa)

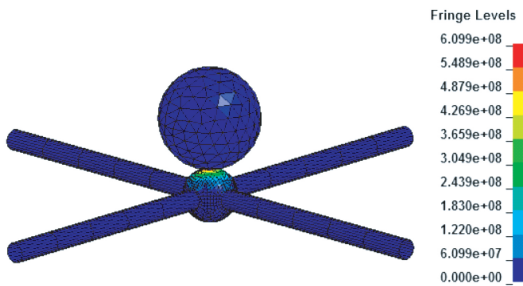


图 15 $t=0.0135$ s 时 Mises 应力云图(单位:Pa)
Fig. 15 Mises stress contour at 0.0135 s (Unit:Pa)

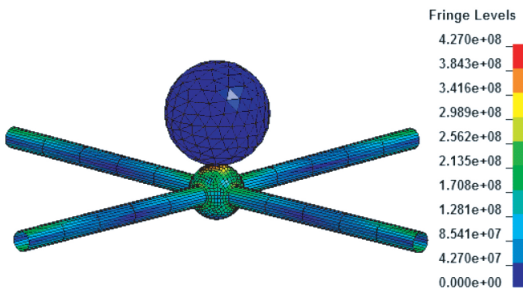


图 16 $t=0.014$ s 时 Mises 应力云图(单位:Pa)
Fig. 16 Mises stress contour at 0.014 s (Unit:Pa)

4.3 冲击力时程曲线分析

冲击荷载峰值的大小和出现的频次表明了钢球冲击节点的强烈程度和冲击次数,冲击力由多个三角形脉冲组成,在很短的时间内作用于节点,在达到几次波峰和波谷后趋于零。当冲击速度较小而节点刚度较大时,钢球与焊接球的接触时长较短;当冲击速度较大而节点刚度较小时,钢球与焊接球的接触时长有所增加,但幅度不大。

图 19 为不同冲击高度下的冲击力时程曲线,表 4 为不同冲击高度下的冲击力最大峰值和对应时间。由图表综合分析可以得出:当冲击高度逐步增加时,钢球从冲击节点到冲击力达到极值的时间逐渐提前,但接触时间基本为 0.009 s;冲击力时程曲线出现波峰和波谷的次数也在增加。钢球与焊接球接触的瞬间,冲击力在第 1 个波峰达到最大值,分别为冲击高度 2 m 时的 19 065 N、4 m 时的 21 479 N、6 m 时的 25 797 N 和 8 m 时的 29 217 N。冲击力最大值随冲击高度的增加而增大,且增幅保持在 10%~20% 之间。随着冲击高度的增加,最后一次波峰相较于前面的波峰更加明显,当冲击高度为 8 m 时,冲击力在 0.007 27 s 和 0.012 2 s 时达到最大峰值。冲击力在第 1 次达到峰值后,节点发生变形,冲击力时程曲线降到第 1 次波谷,且为冲击过程中的最大波谷。冲击高度的增加使得冲击力不断增大,节点由弹性变形进入塑性变形,4 种冲击高度下冲击力波谷值逐渐变大,表明钢球的反弹减小,节点出现较大变形。

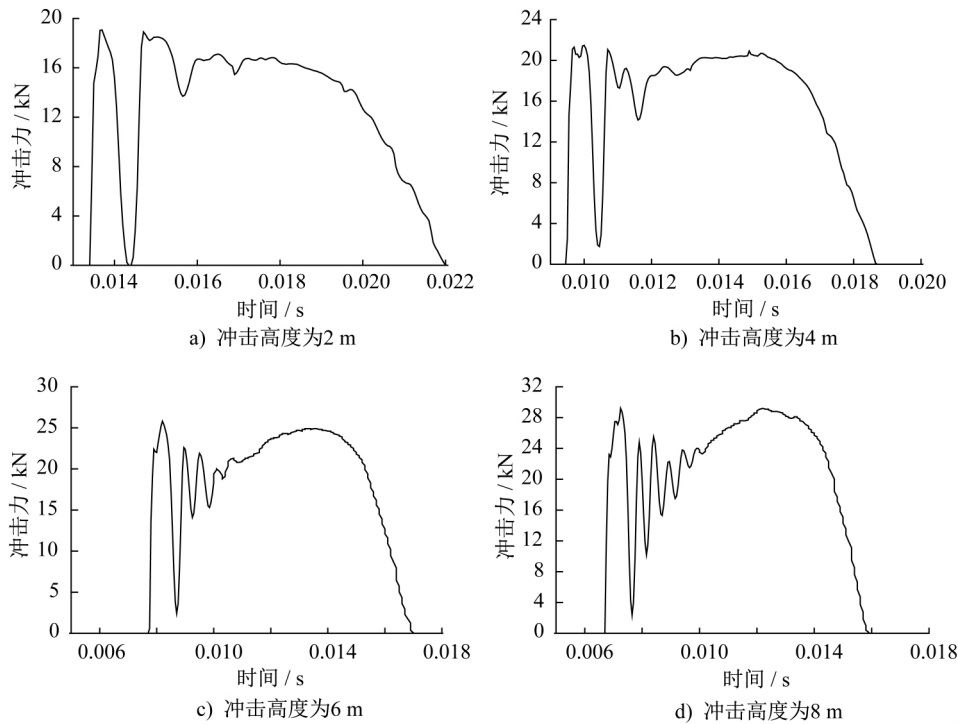


图 19 不同冲击高度下冲击力时程曲线

Fig. 19 Impact force-time curves under different impact heights

表 4 不同冲击高度下冲击力峰值和时间

Tab. 4 Peak value and time of impact force under different impact heights

冲击高度/ m	冲击力最大 峰值/N	最大峰值 出现时刻/s	接触时间/s
2	19 065	0.013 7	0.008 7
4	21 480	0.010 0	0.009 1
6	25 798	0.008 2	0.009 2
8	29 218	0.007 3	0.009 1

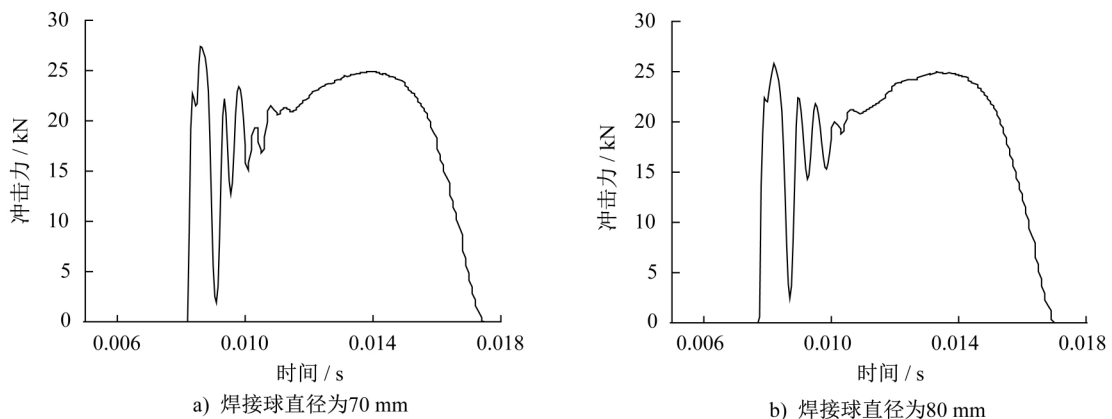
表 5 不同焊接球直径下冲击力峰值和时间

Tab. 5 Peak value and time of impact force under different welded ball diameters

焊接球直径/ mm	冲击力最大 峰值/N	最大峰值 出现时刻/s	接触时间/s
70	27 364	0.008 5	0.009 2
80	25 768	0.008 2	0.009 3
90	25 386	0.012 8	0.009 3
100	25 585	0.012 5	0.009 5

图 20 为不同焊接球直径下的冲击力时程曲线,表 5 为不同焊接球直径下的冲击力最大峰值和对应时间。从图表中可以看出:随着焊接球直径的逐步增加,冲击接触时间基本为 0.009 s。冲击力最大峰值基本保持不变,但

出现的时刻和位置发生了变化。当焊接球直径为 70 mm 和 80 mm 时,冲击力在第 1 个波峰分别达到最大值 27 364 N 和 25 768 N;当焊接球直径为 90 mm 和 100 mm 时,冲击力在最后一个波峰分别达到最大值 25 386 N 和



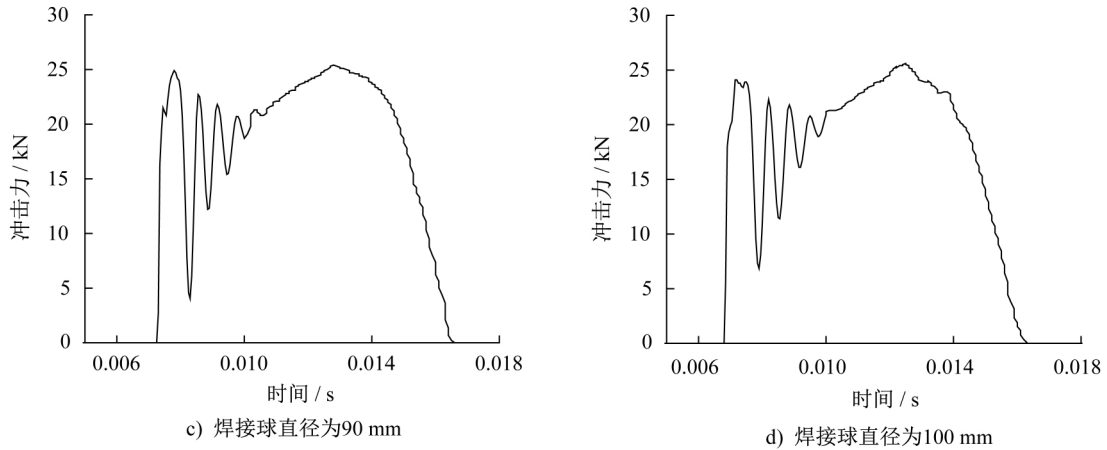


图 20 不同焊接球直径下冲击力时程曲线

Fig. 20 Impact force-time curves under different welded ball diameters

25 585 N。随着焊接球直径的增加,冲击力最后一次峰值逐渐大于第 1 次峰值,波峰出现的时间也往后推移;冲击力最大峰值逐渐减小,降低幅度最大为 7.2%;此外,焊接球直径为 100 mm 时的冲击力最大峰值相对于焊接球直径为 90 mm 时的冲击力最大峰值反而有所增加,因此焊接球直径对冲击力最大峰值影响不大。

图 21 为不同焊接球厚度下的冲击力时程曲线,表 6 为不同焊接球厚度下的冲击力最大峰值和对应时间。从图表中可以看出:当焊接球厚度为 3 mm 时,冲击接触时间较长,为 0.036 3 s,当焊接球厚度分别为 4 mm、5 mm

和 6 mm 时钢球和焊接球接触的时间较短,为 0.013 s,前者的接触时间大约为后者接触时间的 3 倍。这是由于焊接球受到冲击后,节点达到失效应变,焊接球出现大面积凹陷,杆件和焊接球连接处断裂。当焊接球厚度为 3 mm 时,冲击力最大峰值出现在冲击中间波峰段,为 34 939 N,随后冲击力因节点达到失效塑性应变破坏而快速减小;当焊接球厚度为 4 mm 时,冲击力最大峰值出现在冲击最后波峰段,为 45 154 N;当焊接球厚度为 5 mm 和 6 mm 时,冲击力最大峰值出现在第 1 个波峰段,分别为 52 055 N 和 67 876 N。由此可见:随着焊接球厚

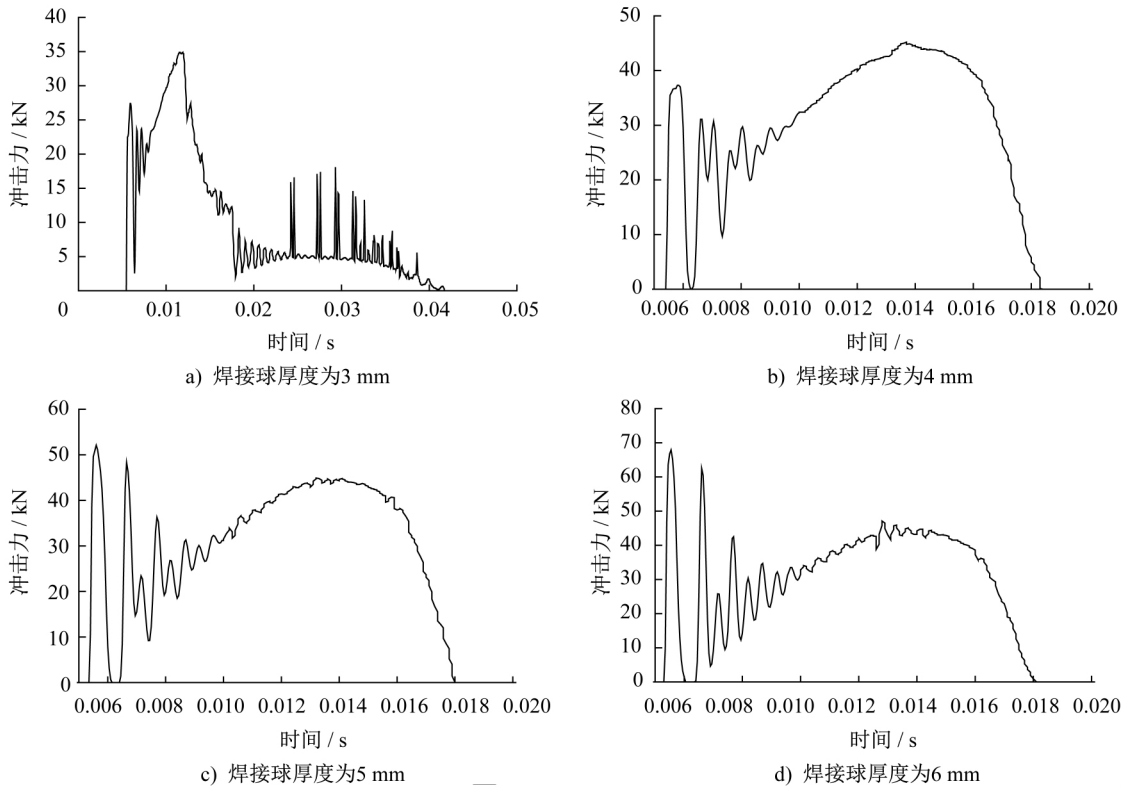


图 21 不同焊接球厚度下冲击力时程曲线

Fig. 21 Impact force-time curves under different welded ball thicknesses

表 6 不同焊接球厚度下冲击力峰值和时间

Tab. 6 Peak value and time of impact force under different welded ball thicknesses

焊接球厚度/ mm	冲击力最大 峰值/N	最大峰值 出现时刻/s	接触时间/s
3	34 939	0.011 6	0.036 3
4	45 154	0.013 6	0.012 8
5	52 055	0.005 6	0.012 5
6	67 876	0.005 5	0.012 7

度的增加,冲击力最大峰值也随之增大且出现的时间提前,峰值荷载出现的频次也在增加。增加壁厚使节点的整体抗冲击能力增强。

4.4 位移时程曲线分析

冲击荷载作用下节点动力响应最直观的表现就是位移。节点受冲击之后部分区域进入弹塑性状态,焊接球发生局部凹陷,杆件弯曲,位移在达到最大值后,节点发生回弹现象,之后位移减小到某一数值。

图 22 为不同冲击高度下节点的位移时程曲线,冲击高度为 2 m、4 m、6 m 和 8 m 时,节点的最大位移分别为 15.90 mm、27.83 mm、35.56 mm 和 43.11 mm。因此随着冲击高度的增加,冲击动能不断增大,最大位移和位移稳定值不断增大,加剧了节点的塑性失效。图 23 为不同焊接球直径下节点的位移时程曲线,焊接球直径为 70 mm、80 mm、90 mm 和 100 mm 时,节点的最大位移分别为 36.28 mm、35.47 mm、35.75 mm 和 34.83 mm,并且 4 种情况下的位移稳定值大致为 32.5 mm 左右,因此焊接球直径的变化对位移最大值和稳定值影响不大。图 24 为不同焊接球厚度下节点的位移时程曲线,焊接球厚度为 3 mm、4 mm、5 mm 和 6 mm 时,节点的最大位移分别为 87.91 mm、59.52 mm、60.40 mm 和 60.34 mm。焊接球厚度为 4 mm、5 mm 和 6 mm 时,位移稳定值大致为 57 mm 左右。焊接球厚度为 3 mm 时,节点位移持续增长,并在达到稳定值 57 mm 时继续增大,直至稳定在 80 mm 左右,此时焊接球和杆件的连接处断裂,节点因破坏而失效。除了焊接球厚度为 3 mm 时在冲击力作用下杆件连接处出现较大开裂位移,其他 3 种焊接球厚度下焊接球节点在受到冲击之后均处于塑性状态,位移没有明显变化。因此在节点处于塑性状态下改变焊接球厚度对节点的最大位移和位移稳定值影响不大,但增加焊接球厚度能减小节点的竖向位移。

4.5 冲击能量分析

根据机械能守恒,钢球的动能转化为了节点的动能和内能。节点从受到冲击开始到出现最大动力响应的全过程可以分为 3 个阶段:冲量施加、能量传递、能量转

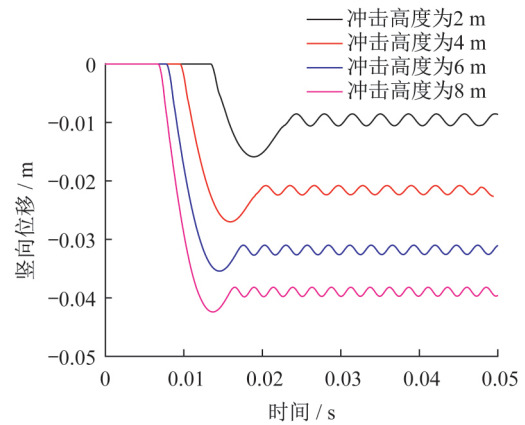


图 22 不同冲击高度下位移时程曲线

Fig. 22 Displacement-time curves under different impact heights

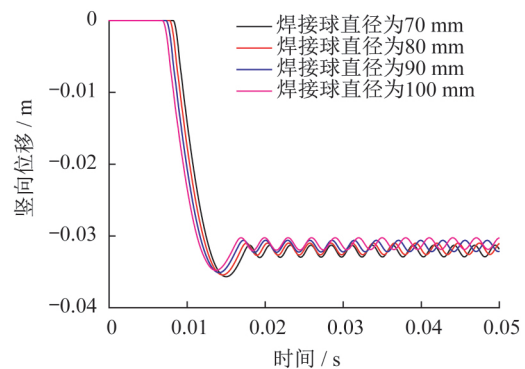


图 23 不同焊接球直径下位移时程曲线

Fig. 23 Displacement-time curves under different welded ball diameters

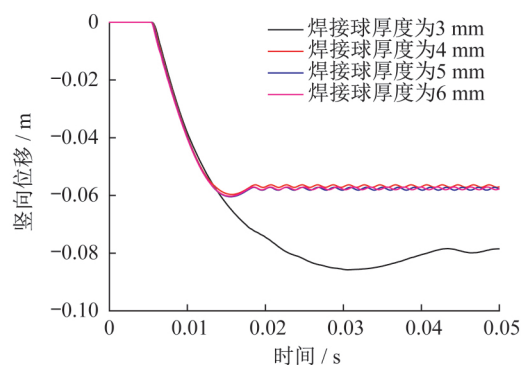


图 24 不同焊接球厚度下位移时程曲线

Fig. 24 Displacement-time curves under different welded ball thickness

换与消耗。冲量施加:即钢球与节点冲击区发生瞬时碰撞的阶段,该阶段完成了冲量由钢球到节点的转换,节点瞬间获得能量。能量传递:冲击区的焊接球进入弹塑性阶段,冲击区的能量向非冲击区传递,非冲击区的杆件动力响应显著增大,焊接球出现局部凹陷,焊接球和杆件的屈服消耗掉一部分能量,这部分能量转化为了节点内能。

能量转换与消耗:此阶段焊接球和杆件达到最大动力响应,钢球冲击节点之后反弹获得了部分动能,其他大部分动能转换为焊接球和杆件的内能。

选取模拟冲击工况 1-1 进行能量分析,其系统能量的时程曲线如图 25 所示。可以看出:系统的总能量为钢球的初动能,由于钢球和焊接球摩擦等形式耗散掉了小部分热能,因此总能量曲线呈略微下降的趋势。总能量包括动能和内能 2 个部分,整个冲击过程中,钢球的动能迅速减小,大部分动能转换为节点的内能,小部分动能转换为节点的动能,冲击结束后,钢球的动能减小至最小值。

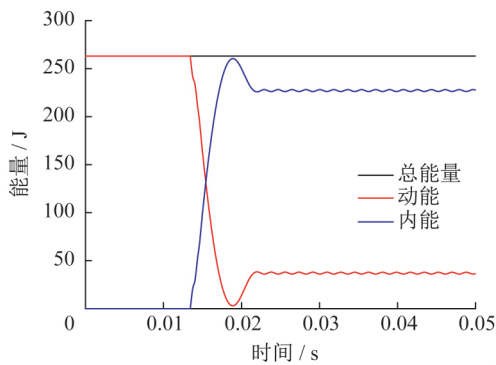


图 25 能量时程曲线

Fig. 25 Energy-time curves

冲击能量为钢球开始冲击节点时所具有的初始动能,本文中可以通过冲击高度和质量计算得到。在冲击过程中,冲击能量转化为节点的内能和动能,具体由焊接球和杆件获得。

现选取模拟冲击工况 1-1~1-4 作为能量分析对象,以冲击高度为参数,分析节点各部分的能量转化和传递,对应的节点各部分能量如表 7 所示。

表 7 节点各部分能量对比

Tab. 7 Energy comparison of each component of the joint

冲击高度 h/m	冲击能量 E_c/J	焊接球能量 E_h/J	杆件能量 E_g/J
2	271.89	121.20 (44.58%)	106.97 (39.34%)
4	543.74	236.87 (43.56%)	252.09 (46.36%)
6	815.62	343.96 (42.17%)	403.61 (49.48%)
8	1087.57	448.71 (41.26%)	557.89 (51.30%)

注:括号中的数值为节点各部分的能量占总能量的百分比。

随着冲击高度的逐渐增加,钢球所获得的初始动能也在增加,节点获得的能量占总能量的比例由冲击高度为

2 m 时的 83.92% 增加到冲击高度为 8m 时的 92.56%,增加冲击高度提高了能量传递率。由于钢球以冲击动能的形式将能量传递给节点,并转化为节点的动能和内能,最终以内能的形式存在于节点中,从能量传递的方面也可以看出节点内能的增加是通过节点自身的塑性变形实现的。随着冲击高度的增加,焊接球获得的能量在减少,杆件获得的能量在增加(图 26),表明应变由焊接球向杆件扩展,杆件逐渐成为了主要的储能部分,而杆件处的变形也是最大的,这也是节点的破坏首先从杆件的断裂开始的原因。

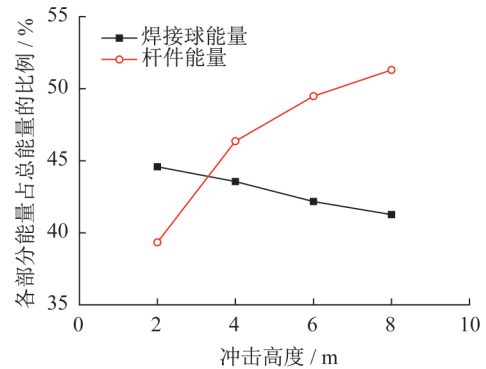


图 26 不同冲击高度下节点各部分能量传递

Fig. 26 Energy transfer of each component of the joint under different impact heights

5 结论

(1) 冲击能量对节点动力性能的影响最为显著。冲击能量较小时节点基本处于弹性状态;随着冲击能量的增大,塑性应变逐渐从焊接球向杆件扩展,焊接球发生屈服;当能量增大到一定程度时,焊接球出现大面积凹陷,塑性应变达到 0.25,焊接球和杆件连接处开始断裂。

(2) 冲击力随着冲击能量的增加而不断增大,冲击高度和焊接球厚度的变化对冲力的影响比较大,增加冲击高度和焊接球厚度,冲击力逐渐增大,冲击力最大峰值出现的时间提前;随着焊接球直径的增加,冲击力逐渐减小,最大降幅为 7.2%,冲击力最大峰值出现的时间延后。

(3) 冲击高度的变化对节点位移的影响比较大。随着冲击高度的增加,节点由弹性状态进入弹塑性状态,最后进入塑性变形状态,且位移不断增大;焊接球厚度的增加提高了节点的抗冲击能力。但在节点弹塑性变形范围内,焊接球厚度和直径的变化对节点位移的影响不大。

参考文献:

[1] 王星,董石麟,完海鹰.焊接球节点刚度的有限元分析[J].浙江大学学报(工学版),2000,34(1):77-82. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2000.01.016.
WANG Xing, DONG Shilin, WAN Haiying. Finite element analysis of welded spherical joint's stiffness[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, 34(1): 77-

82. DOI: 10. 3785/j. issn. 1008-973X. 2000. 01. 016. (in Chinese)
- [2] 韩庆华,潘延东,刘锡良. 焊接空心球节点的拉压极限承载力分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 1-6. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2003. 10. 001.
HAN Qinghua, PAN Yandong, LIU Xiliang. Analysis for the ultimate tensile and compressive bearing capacity of welded hollow spherical joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 1-6. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2003. 10. 001. (in Chinese)
- [3] 董石麟,唐海军,赵阳,等. 轴力和弯矩共同作用下焊接空心球节点承载力研究与实用计算方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 21-30. DOI: 10. 15961/j. tmgxcb. 2005. 01. 003.
DONG Shilin, TANG Haijun, ZHAO Yang, et al. Load-carrying capacity and practical calculation method for welded hollow spherical joints subject to combined axial force and bending moment[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 21-30. DOI: 10. 15961/j. tmgxcb. 2005. 01. 003. (in Chinese)
- [4] 曹正罡,范峰,沈世钊. 单层球面网壳的弹塑性稳定性[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 6-10. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2006. 10. 002.
CAO Zhenggang, FAN Feng, SHEN Shizhao. Elasto-plastic stability of single-layer reticulated domes [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 6-10. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2006. 10. 002. (in Chinese)
- [5] 曹正罡,范峰,沈世钊. K8型单层球面网壳的弹塑性稳定[J]. 工业建筑, 2007, 37(4): 69-72. DOI: 10. 13204/j. gyjz2007. 04. 019.
CAO Zhenggang, FAN Feng, SHEN Shizhao. Elasto-plastic stability of K8 single-layer latticed domes [J]. Industrial Construction, 2007, 37(4): 69-72. DOI: 10. 13204/j. gyjz2007. 04. 019. (in Chinese)
- [6] 范峰,马会环,沈世钊. 半刚性型螺栓球节点单层 K8 型网壳弹塑性稳定分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 45-52. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2009. 02. 015.
FAN Feng, MA Huihuan, SHEN Shizhao. Elasto-plastic stability analysis of K8 single-layer reticulated shells with bolt-ball joint system[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 45-52. DOI: 10. 15951/j. tmgxcb. 2009. 02. 015. (in Chinese)
- [7] 范峰,曹正罡,崔美艳. 半刚性节点单层球面网壳的弹塑性稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 1-6.
FAN Feng, CAO Zhenggang, CUI Meiyuan. Elasto-plastic stability of semi-rigidity joint single-layer reticulated domes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] 顾磊,丁茂强,傅学怡,等. 焊接球单层球面网壳精细化有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(8): 42-50. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 08. 006.
GU Lei, DING Maoqiang, FU Xueyi, et al. A refined finite element analysis on single layer latticed domes with welded hollow spherical joints[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 42-50. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 08. 006. (in Chinese)
- [9] 顾磊,张阳. 焊接球节点单层球面网壳精细化动力分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 130-140. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2018. 14. 018.
GU Lei, ZHANG Yang. Refined dynamic analysis of a single-layer reticulated dome with welded spherical joints [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 130-140. DOI: 10. 13465/j. cnki. jvs. 2018. 14. 018. (in Chinese)
- [10] SREENATH S, SARAVANAN U, KALYANARAMAN V. Beam and shell element model for advanced analysis of steel structural members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1789-1796. DOI: 10. 1016 /j. jcsr. 2011. 05. 003.
- [11] DING Y, QI L, LI Z X. Mechanical calculation model for welded hollow spherical joint in spatial latticed structures[J]. Advanced Steel Construction, 2011, 7(4): 330-343. DOI: 10. 18057/IJASC. 2011. 7. 4. 2.
- [12] 刘海锋,罗尧治,许贤. 焊接球节点刚度对网壳结构有限元分析精度的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 350-358, 364. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2011. 06. 0389.
LIU Haifeng, LUO Yaozhi, XU Xian. Rigidity of welded hollow spherical joints on finite element analysis precision of reticulated shells[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 350-358, 364. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2011. 06. 0389. (in Chinese)
- [13] 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, 30(4): 185-195. DOI: 10. 3969 /j. issn. 1005-0159. 2014. 04. 031.
GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng. State-of-the-art of research on the joint stiffness of the spatial structures[J]. Structural Engineers, 2014, 30(4): 185-195. DOI: 10. 3969 /j. issn. 1005-0159. 2014. 04. 031. (in Chinese)
- [14] 王凡,王星,孙晨辉. 双向荷载作用下焊接球节点刚度的有限元分析[J]. 宁波工程学院学报, 2015, 27(2): 15-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-7109. 2015. 02. 004.
WANG Fan, WANG Xing, SUN Chenhui. FEM analysis of stiffness of welded spherical joint under bi-directional loads [J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2015, 27(2): 15-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-7109. 2015. 02. 004. (in Chinese)
- [15] 王凡,王星,张薇. 节点刚度对单层网壳稳定性能的影响分析[J]. 钢结构, 2015, 30(8): 43-45. DOI: 10. 13206/j. gjg2015 08009.
WANG Fan, WANG Xing, ZHANG Wei. Analysis of the influence of joint stiffness on stability performance of single-layer reticulated shell[J]. Steel Construction, 2015, 30(8): 43-45. DOI: 10. 13206 /j. gjg201508009. (in Chinese)
- [16] 闫翔宇,齐国材,马青. 空间网格结构焊接空心球节点刚度研究综述[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(S1): 84-94. DOI: 10. 11784/tdxbz201704090.

- YAN Xiangyu, QI Guocai, MA Qing. State-of-the-art of research on the stiffness of welded hollow spherical joints in spatial grid structure [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50 (S1): 84-94. DOI: 10.11784/tdxbz201704090. (in Chinese)
- [17] ZHAO Z W, LIU H Q, LIANG B. Influence of welded hollow spherical joints on the mechanical behavior of single-layer reticulated shell structures [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(8): 386. DOI:10.1007/s40430-018-1308-0.
- [18] 李冬杰. 冲击荷载下考虑节点刚度的单层球面网壳结构动力响应分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- LI Dongjie. Dynamic response analysis of spherical reticulated shell considering joint stiffness under impact load [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 苟宝龙. 多点冲击荷载下考虑节点刚度影响的单层球面网壳结构失效机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- GOU Baolong. Failure mechanism of single-layer reticulated domes under multi-point impact considering the influence of joint stiffness [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)

征订启事

中国科技核心期刊 中文核心期刊要目总览 中国科学引文数据库来源期刊 《建筑钢结构进展》(月刊, CN31-1893/TU)

《建筑钢结构进展》全年 12 期, 每月月底出版, 国内外公开发行, 每期单价 20 元(海外 6 美元), 全年价 240 元(海外 72 美元)。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 4-723。也可直接汇款到本编辑部订阅。编辑部收到汇款及邮购单后, 将在三天内寄出杂志及发票。

《钢结构进展与市场》全年 6 期, 每双月月底出版, 不能单独订阅。获得方式: 订阅全年《建筑钢结构进展》和《钢结构进展与市场》杂志, 两本杂志全年价 360 元(含邮资)。

编辑部地址: 上海市四平路 1239 号同济大学土木大楼 A613 室 邮编: 200092

E-mail: steelpro@tongji.edu.cn 电话: 021-65980250/65980251 传真: 021-65980250

网址: <http://jzjz.cbpt.cnki.net>

银行汇款:

单位名称: 同济大学 纳税人识别号(税号): 12100000425006125J

开户银行: 中国农业银行股份有限公司上海翔殷支行 银行账号: 033267-00812000848