

天长全民健身中心体育场钢屋盖结构 铸钢节点施工阶段力学性能分析

计康生¹, 谢 坚¹, 王明花¹, 童颜决², 杨世昱¹

(1. 安徽中亚钢结构工程有限公司, 安徽 合肥 230051; 2. 浙江理工大学科技与艺术学院 建筑工程学院, 浙江 绍兴 312369)

摘要: 大跨度管桁架结构弦杆数量多、交错连接, 传统的相贯节点由于截面限制、连接刚度不足、相贯线不足等原因, 无法满足复杂大跨度管桁架钢结构杆件间连接要求。铸钢节点具有一次浇筑成型、形状适应性强、材质均匀等优势, 被广泛用于空间结构中。以天长全民健身中心体育场钢屋盖项目为背景, 对 8 种典型铸钢节点进行了力学分析, 铸钢节点所连接杆件数量从 4~12 根不等, 共分为支座铸钢节点与空间铸钢节点两类。分析时共考虑了合拢和卸载 2 个主要施工工况, 卸载工况考虑了内外圈临时支撑卸载的顺序对铸钢节点的影响, 对比了各个工况下铸钢节点的应力云图。分析结果表明: 外圈临时支撑完全卸载和内圈临时支撑卸载一半时, 最大 Von-Mises 应力仅为 22 MPa, 完全卸载时最大应力约为 51 MPa。8 种典型铸钢节点在 5 个主要施工工况下, 应力分布较为均匀, 节点与杆件连接处应力过渡合理, 节点核心区域应力分布较小, 能够保证大跨度管桁架主结构各杆件之间的有效连接和内力传递。

关键词: 大跨度钢结构; 铸钢节点; 施工工况; 多尺度有限元

中图分类号: TU761.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0571-07

Mechanical properties analysis of cast steel joints in the construction stage of the steel roof structure of Tianchang national fitness center stadium

JI Kangsheng¹, XIE Jian¹, WANG Minghua¹, TONG Yanyang², YANG Shiyu¹

(1. Anhui Zhongya Steel Structural Engineering Co., Ltd., Hefei 230051, China;

2. School of Civil Engineering, KeYi College of Zhejiang SCI-Tech University, Zhejiang Shaoxing 312369, China)

Abstract: Because of the large number of strings and staggered connections, the traditional intersecting joints cannot meet the connection requirements of the rods in the complex long-span pipe truss steel structure due to the limited section, insufficient connection stiffness and insufficient intersecting lines. Cast steel joints are widely used in space structures due to their advantages of one-time casting, strong shape adaptability and uniform material. In this paper, the mechanical analysis of 8 typical cast steel joints is carried out for the steel roof project of Tianchang National Fitness Center Stadium. The number of rods connected to cast steel joints ranges from 4 to 12, which can be divided into two types: support cast steel joints and space cast steel joints. In the analysis, two main construction conditions of closure and unloading are considered. In the unloading condition, the influence of the unloading sequence of the temporary support of the inner and outer rings on the cast steel joint is considered, and the stress cloud maps of the cast steel joint under each working condition is compared. The analysis results show that the maximum Von-Mises stress is only 22 MPa when the outer ring temporary support is completely unloaded and the inner ring temporary support is half unloaded, and the maximum stress is about 51 MPa when the outer ring temporary support is completely unloaded. Under five main construction conditions, the stress distribution of eight typical cast steel joints is relatively uniform, the stress transition at the joint and bar joint is reasonable, and the stress distribution in the core area of the joint is small, which can ensure the effective connection and internal force transfer between the bars of the main structure of long-span pipe truss.

Key words: long span steel structure; cast steel joints; construction conditions; multi-scale finite element method

收稿日期: 2022-06-15

修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(52178161); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022-YF106); 合肥水泥研究设计院有限公司开发项目(GG03-2021)

第一作者: 计康生(1976—), 高级工程师, 主要从事钢结构项目管理。E-mail: 363811919@qq.com

通信作者: 谢 坚(1994—), 硕士, 工程师, 主要从事钢结构设计与研发。E-mail: jianxie1994@163.com

钢结构因其强度高、延性好、自重轻、工业化程度高、施工速度快等优点,被广泛应用在大跨度屋盖结构中.近年来,新建的大型体育场馆、航站楼、会议中心屋盖结构形式大多为管桁架、网架(壳)、预应力钢结构,在建筑造型和计算能力提高的影响下,弦杆布置方案变得丰富多样,如何实现弦杆间有效连接,成为钢结构工程研究的热点问题^[1-2].

铸钢节点作为一种节点形式,只需制作好模型,可浇筑成任意形状 of 节点样式,具有可塑性强、造型美观、设计灵活、施工方便等优点,成为解决大跨度钢结构工程中弦杆连接节点的首选.《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[3]和《铸钢结构技术规程》(JGJ/T 395—2017)^[4]中规定对于复杂钢结构节点,推荐采用有限单元法进行分析计算.我国近年来新建的大型钢结构工程中(如:北京大兴国际机场、国家速滑馆、西安奥体中心等),复杂节点均采用铸钢节点^[5-12].

多尺度问题是一个涉及多学科多领域的问题,从物理学角度分析,对物体进行不同尺度的研究就会得到不同精度的结果.在结构工程中,如何将简化的结构分析模型和精细化建模的节点模型一体化协调化,是多尺度分析方法研究的核心问题.多尺度有限单元法通过对大型结构整体进行粗略建模,对结构关键部位进行精细化建模,通过刚性连接将各单元耦合,既提高了计算的精度,又提高了计算效率,并能准确地反映关键部位在整体结构中的边界条件和荷载传递^[13-18].

本文对天长全民健身中心体育场钢屋盖进行多尺度模型建立,对结构合拢和卸载 2 个主要施工过程中铸钢节点力学性能进行分析.

1 工程概况

1.1 项目概况

天长全民健身中心体育场项目位于安徽省天长市,南至兴业大道,北至天宁大道,东至二凤南路,西至园林路.体育场结构东西纵向长度约 213 m,南北横向长度约 243 m,屋盖最高点完成面标高约为 32.945 m.钢屋盖建筑造型呈钻石形状,如图 1 所示.

1.2 铸钢节点概况

本项目钢屋盖共有 20 组悬臂桁架子结构,每组悬臂桁架子结构共有 8 个铸钢节点,其中 2 个支



图 1 天长全民健身中心

Fig. 1 Tianchang national fitness center

座节点,6 个下弦节点,分别位于支座节点平面桁架和支座两侧平面桁架上,本文选取一组典型悬臂桁架子结构进行分析,节点编号如图 2 所示.

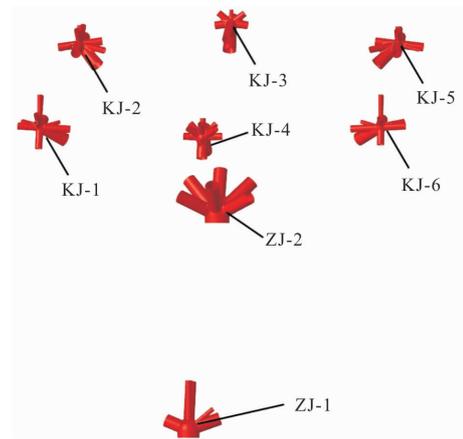


图 2 铸钢节点编号

Fig. 2 Cast steel joint number

本项目所用铸钢节点连接杆件数量为 4~12 根不等,共分为支座铸钢节点与空间铸钢节点两类,其形貌、相连肢数、数量、所连肢管截面规格如表 1 所示.本文所研究的节点连肢管数量不小于 10 根,节点多达 5 个,空间节点最小连接肢管数为 8 根,空间节点属于超多肢节点,其尺寸构造、受力特性极其复杂,可通过有限元方法进行分析计算.

2 有限元模型

2.1 几何模型和本构关系

铸钢节点外形和尺寸如表 2 所示,本文选用的 G20Mn5QT 铸钢材性参数参照《铸钢结构技术规程》(JGJ/T 395—2017)^[12]规定,力学参数如表 2 所示.本构关系采用多折线各向同性强化模型,见图 3. ϵ_s 取 0.02,强化模量取 0.005E, ϵ_s 根据强化模量计算得出.

表 1 铸钢节点概述图

Tab. 1 Summary diagram of cast steel joint

| 节点编号 | ZJ-1 | ZJ-2 | KJ-1 | KJ-2 |
|--------|--|--|--|---|
| 节点类型 | 支座节点 | 支座节点 | 空间节点 | 空间节点 |
| 连接肢数 | 5 | 6 | 11 | 10 |
| 连接肢管截面 | $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 240 \times 10$ 、 $\phi 408 \times 12$ 、 $\phi 480 \times 20$ | $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 500 \times 20$ | $\phi 152 \times 6$ 、 $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 273 \times 10$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 500 \times 20$ | $\phi 152 \times 6$ 、 $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 240 \times 10$ 、 $\phi 299 \times 12$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 500 \times 20$ |
| 节点形貌 |  |  |  |  |
| 节点编号 | KJ-3 | KJ-4 | KJ-5 | KJ-6 |
| 节点类型 | 空间节点 | 空间节点 | 空间节点 | 空间节点 |
| 连接肢数 | 8 | 12 | 10 | 10 |
| 连接肢管截面 | $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 299 \times 12$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 500 \times 20$ | $\phi 152 \times 6$ 、 $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 273 \times 10$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 408 \times 12$ | $\phi 152 \times 6$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 240 \times 10$ 、 $\phi 299 \times 12$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 480 \times 20$ 、 $\phi 500 \times 20$ | $\phi 152 \times 6$ 、 $\phi 180 \times 6$ 、 $\phi 240 \times 10$ 、 $\phi 273 \times 10$ 、 $\phi 377 \times 16$ 、 $\phi 500 \times 20$ |
| 节点形貌 |  |  |  |  |

表 2 G20Mn5QT 铸钢材性参数

Tab. 2 G20Mn5QT cast steel property parameters

| f_y /MPa | f_u /MPa | f_y/f_u | E /GPa | δ /% | ν |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|-------|
| 300 | 500 | 0.60 | 175 | 22 | 0.30 |

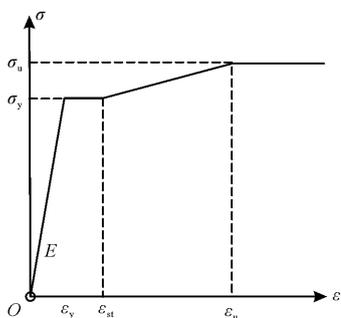


图 3 G20Mn5QT 铸钢单向拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Unidirectional tensile stress-strain curve of

G20Mn5QT cast steel

2.2 多尺度模型概况

本文研究对象为天长全民健身中心体育场钢屋盖项目, 以一个典型子结构中的 8 个铸钢节点进行实体模型建模, 杆件采用梁单元建模, 铸钢节

点端部与杆件通过刚性连接将梁单元端部节点与铸钢节点肢端截面节点自由度耦合在一起, 建立多尺度有限元模型. 多尺度有限元模型与节点独立建模分析相比, 铸钢节点肢端边界条件更加真实, 内力变形传递更加合理, 与结构实际模型吻合度更高, 更能真实模拟出节点的受力状态. 本文所研究多尺度模型如图 4 所示.

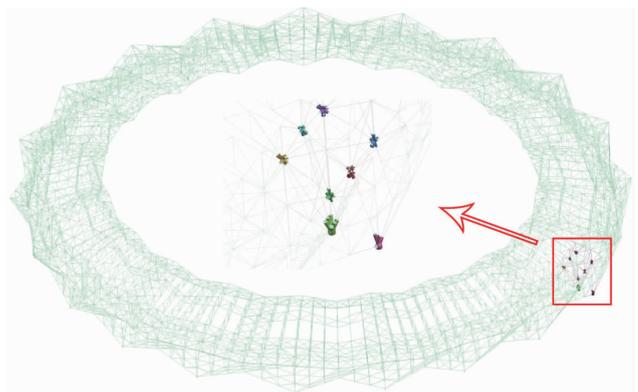


图 4 多尺度模型示意图

Fig. 4 Schematic of the multi-scale model

铸钢节点采用四面体实体单元进行划分,尺寸选取5~30 mm不等,节点交界处尺寸较小,单元采用四面体单元。

2.3 荷载及加载

本文研究体育场钢屋盖在施工过程中,各铸钢节点的应力应变状态。由于钢屋盖主结构施工时,屋面围护系统暂未安装,分析时不考虑风荷载作用,施工分析时考虑了恒载、活载、温度作用。对钢屋盖合拢、卸载工况进行分析,其中卸载工况根据内外环临时支撑拆除顺序及数量共分为9个施工步,如表3所示。

表3 卸载施工步临时支撑数量

Tab.3 Number of temporary supports for unloading construction step

| 施工步 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 内环支撑数 | 80 | 80 | 80 | 80 | 60 | 40 | 30 | 20 | 0 |
| 外环支撑数 | 60 | 40 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

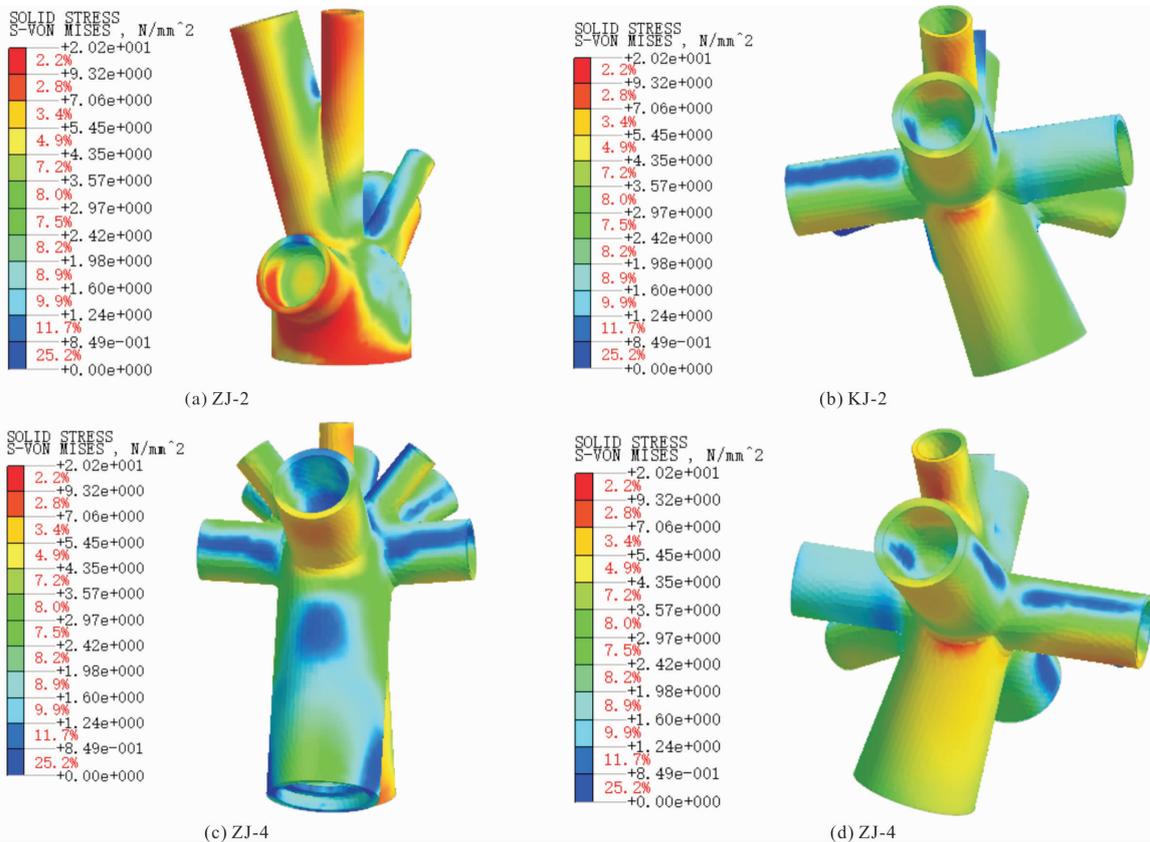


图5 合拢时铸钢节点应力云图

Fig.5 Stress cloud diagram of cast steel joint during closing

3.2.1 外圈临时支撑卸载

外圈卸载时,临时支撑卸载数量按照:80→60→40→20→0的顺序进行,卸载时对称均匀卸载。外圈全部卸载后铸钢节点的 Von-Mises 应力云图如图6所示。所有节点的应力分布均匀,应力水平较低,应力最大处发生在 ZJ-2 靠近柱顶预埋

3 计算结果分析

3.1 合拢分析结果

体育场钢屋盖合拢时,内外圈分别设置了80个临时支撑,此时结构支撑点较多,构件和节点内力较小。图5为管桁架合拢时铸钢节点的 Von-Mises 应力云图,从图5可知,合拢时支座节点和空间节点的应力较小,最大应力约为20 MPa,发生在 ZJ-2 靠近柱顶预埋件位置。空间节点的应力较大处发生在肢管相贯处或者靠近节点与弦杆连接处。

3.2 卸载分析结果

临时支撑卸载顺序为先外后内对称卸载,具体施工步如表3所示。本节对外圈和内圈临时支撑卸载的顺序进行分析,以多尺度有限元模型为基础,研究铸钢节点的应力分布,对卸载时铸钢节点安全性做出判断。

件和节点与弦杆连接处附近,此时最大 Von-Mises 应力仅为22 MPa,远小于 G20Mn5QT 屈服强度。外圈临时支撑卸载工况下,铸钢节点安全可靠,满足施工过程中的承载力需求。

3.2.2 内圈临时支撑卸载

待外圈卸载后,开始卸载内圈临时支撑,内

圈临时支撑卸载数量按照: 80→60→40→20→0 的顺序进行, 卸载时对称均匀卸载。内圈仅剩最后

40 个临时支撑时的铸钢节点的 Von-Mises 应力云图如图 7 所示。

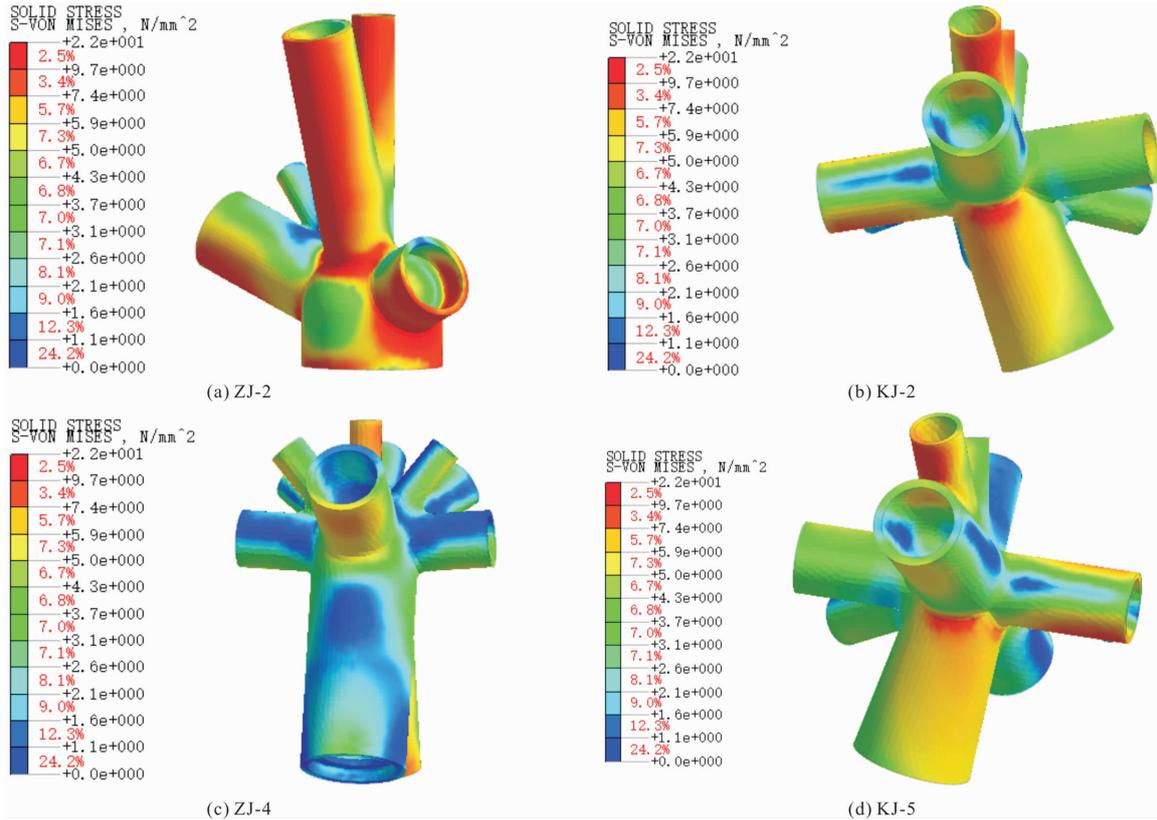


图 6 外圈全部卸载时铸钢节点应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram of cast steel joint when all outer rings are unloaded

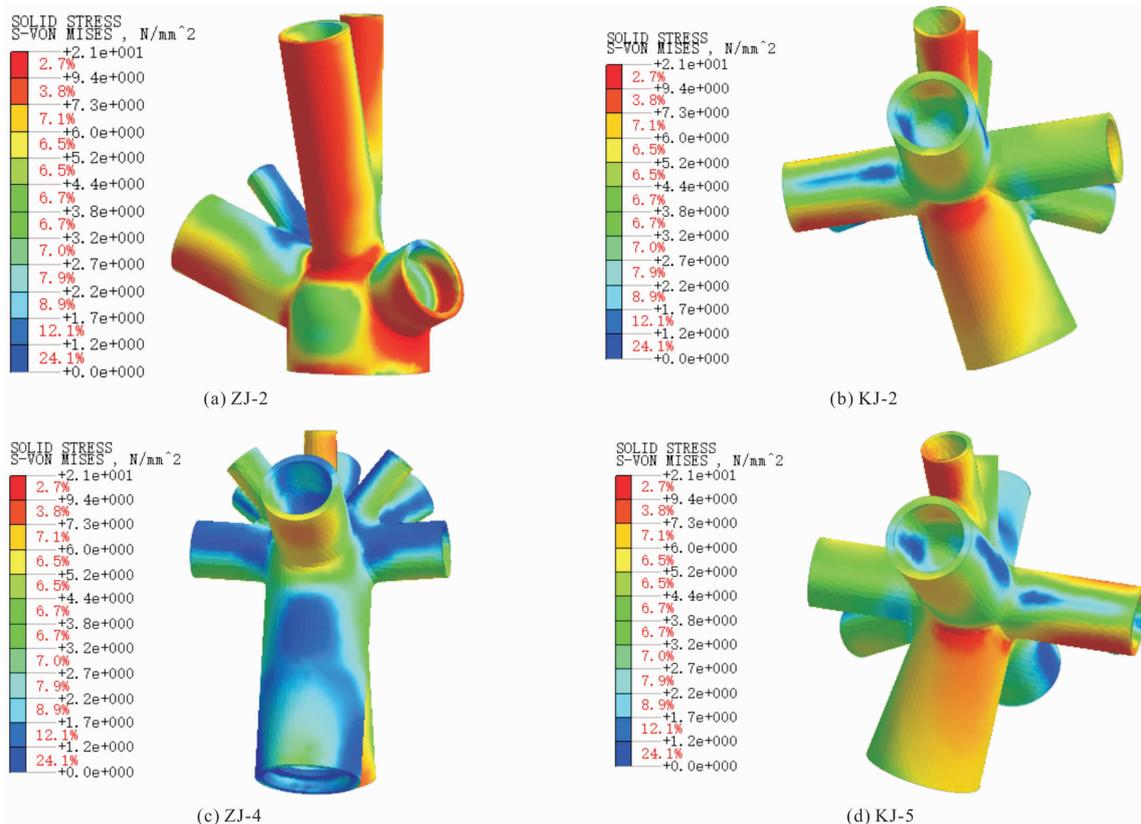


图 7 仅剩内圈 40 个临时支撑时铸钢节点应力云图

Fig. 7 Stress cloud diagram of cast steel joint with only 40 temporary supports in inner ring

外圈全部卸载,内圈拆除一半时,所有铸钢节点最大应力约为 21 MPa,远低于 G20Mn5QT 屈服强度. ZJ-2 应力最大,与其位置处于悬臂桁架最远端支座有关,主要承受拉应力. 其余各节点在与弦杆相连处附近应力较大.

3.2.3 完全卸载分析结果

图 8 列出了完全卸载后支座节点和空间节点的 Von-Mises 应力云图,从图中可知,各节点应力分

布均匀,最大应力约为 51 MPa,远小于 G20Mn5QT 的屈服强度 300 MPa,各节点均处于弹性受力状态. KJ-2、KJ-3 和 KJ-5 在大直径肢管相连处应力较大, KJ-1 和 KJ-6 在较小管径相连肢应力较大. 本文所研究节点在完全卸载后应力分布均匀,且远小于材料屈服强度,能够保证本项目各弦杆的有效连接,为结构的整体性、安全性提供保障.

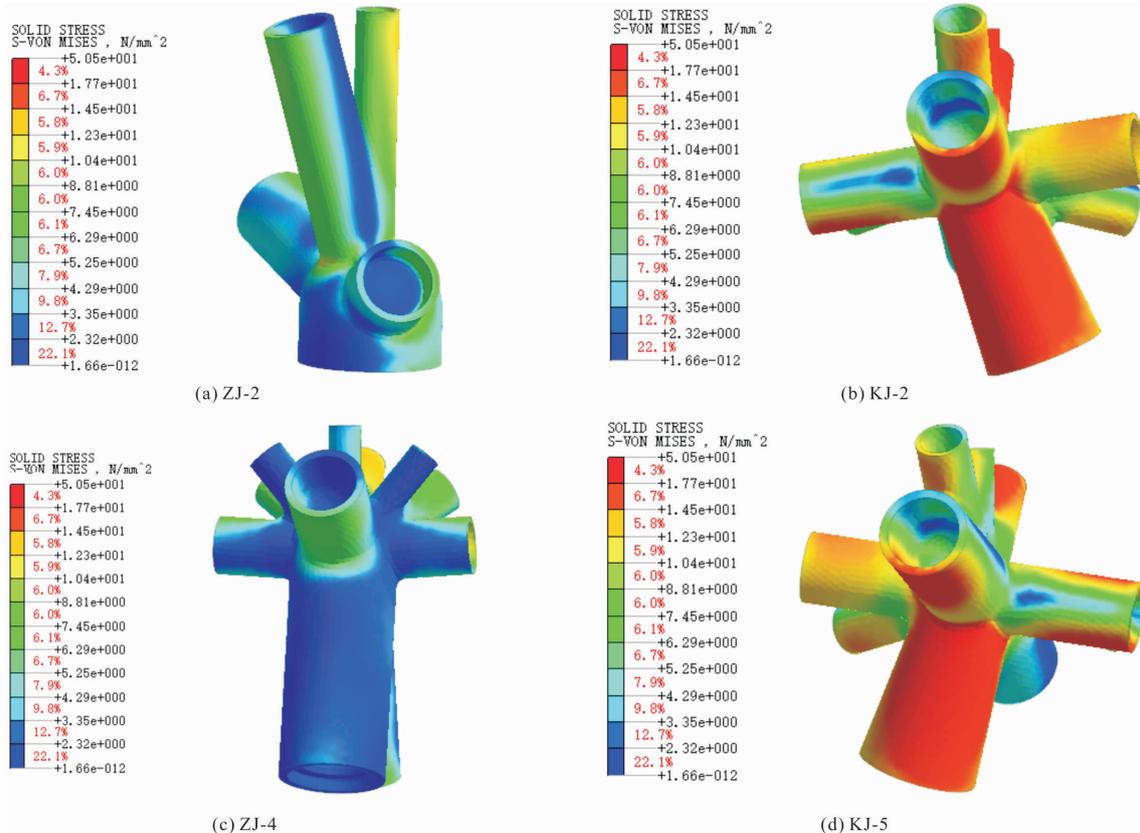


图 8 完全卸载后铸钢节点应力云图

Fig. 8 Stress neogram of cast steel joints after complete unloading

4 结论与建议

(1) 本文所建立多尺度有限元模型,节点与弦杆连接处用刚性连接耦合,能准确地模拟节点各肢连接处的边界条件,且能清晰地将要连弦杆的内力、位移传递给与之相连的各弦杆;

(2) 钢屋盖合拢、卸载和卸载后施工过程中,铸钢节点应力水平较低,远小于铸钢屈服强度,铸钢节点安全可靠,满足施工过程中的承载力需求;

(3) 钢屋盖合拢时支座节点和空间节点的应力较小,最大应力约为 20 MPa,远小于铸钢的屈服强度,最大应力发生在 ZJ-2 靠近柱顶预埋件位置. 空间节点的应力较大处发生在肢管相贯处或者靠近节点与弦杆连接处;

(4) 外圈和内圈卸载时应力最大处发生在 ZJ-2 靠近柱顶预埋件和节点与弦杆连接处附近,此时最大 Von-Mises 应力约为 22 MPa,远小于 G20Mn5QT

屈服强度;

(5) 完全卸载时,各节点应力分布均匀,最大应力约为 51 MPa,各节点均处于弹性受力状态; KJ-2、KJ-3 和 KJ-5 在大直径肢管相连处应力较大, KJ-1 和 KJ-6 在较小管径相连肢应力较大.

参考文献 References

- [1] 刘占科,靳璐君,周绪红,等. 钢构件整体稳定直接分析法研究现状及展望[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8):1-12.
LIU Zhanke, JIN Lujun, ZHOU Xuhong, et al. State-of-the-art on research of direct analysis method of steel members with global instability[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8):1-12.
- [2] 韩乐雨,杜文凤,夏壮,等. 四分之一铸钢节点的衍生式智能设计研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 325-334.
HAN Leyu, DU Wenfeng, XIA Zhuang, et al. Re-

- search on generative intelligent design of four-branch cast-steel joint [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(5):325-334.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for classification of steel structures; GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 铸钢结构技术规范:JGJ/T 395—2017. [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for cast steel structures; JGJ/T 395—2017. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [5] 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.
- [6] 张爱林,王小青,刘学春,等. 北京大兴国际机场航站楼大跨度钢结构整体缩尺模型振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(3):1-13.
ZHANG Ailin, WANG Xiaoqing, LIU Xuechun, et al. Shaking table test on overall-scale model of long-span steel structure of Beijing Daxing International Airport terminal [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(3): 1-13.
- [7] 王哲,白光波,陈彬磊,等. 国家速滑馆钢结构设计[J]. *建筑结构*, 2018, 48(20):5-11.
WANG Zhe, BAI Guangbo, CHEN Binlei, et al. Steel structural design of National Speed Skating Oval [J]. *Building Structures*, 2018, 48(20):5-11.
- [8] 隋庆海,张亚伟. 西安奥体中心体育馆结构设计及若干技术介绍 [J]. *建筑钢结构进展*, 2020, 22(6): 136-142.
SUI Qinghai, ZHANG Yawei. Structural design and technical introduction of the stadium of Xi'an Olympic Sports Center [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2020, 22(6): 136-142.
- [9] 王金歌. 大跨钢结构施工卸载过程力学分析[J]. *中国建筑金属结构*, 2024, 23(1):7-9.
WANG Jingge. Mechanical analysis of unloading process of long span steel structure [J]. *China Construction Metal Structure*, 2024, 23(1):7-9.
- [10] 刘戈,杨凯丞. 大跨度空间钢结构施工卸载过程模拟分析与监测 [J]. *天津城建大学学报*, 2023, 29(4): 241-247.
LIU Ge, YANG Kaicheng. Simulation analysis and monitoring of unloading process in construction of large span space steel structure [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2023, 29(4):241-247.
- [11] 魏晓斌,郭建祥,汤东婴,等. 大跨度桁架结构卸载模拟及监测技术研究 [J]. *建筑技术*, 2024, 55(4): 417-422.
WEI Xiaobin, GUO Jianxiang, TANG Dongying, et al. Study on unloading simulation and monitoring technology for long-span steel truss structure [J]. *Architecture Technology*, 2024, 55(4):417-422.
- [12] 田黎敏,郝际平,郑江,等. 大跨度复杂钢结构施工力学模拟的研究与应用 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 44(3):324-330.
TIAN Limin, HAO Jiping, ZHEN Jiang, et al. Study and application of mechanical simulation of large-span complex steel structure in construction process [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2012, 44(3):324-330.
- [13] 李帅斌. 基于多尺度有限元方法的大跨度钢箱提篮拱桥极限承载力研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.
LI Shuaibin. Analysis of ultimate load-bearing capacity of long-span steel-box handle basket arc bridge based on multi-scale finite element method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [14] ARMERO F, OLLER S. A general framework for continuum damage models. I. Infinitesimal plastic damage models in stress space [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(48/50): 7409-7436.
- [15] BROUGHTON J Q, ABRAHAM F F, BERNSTEIN N, et al. Concurrent coupling of lengthscales: Methodology and application [J]. *Physical Review*, 1999, B60(4): 2391-2403.
- [16] 孙正华,李兆霞,陈鸿天. 大型土木结构的结构行为一致多尺度模拟——模拟方法与策略 [J]. *计算力学学报*, 2006, 26(6): 886-892.
SUN Zhenghua, LI Zhaoxia, CHEN Hongtian. Concurrent multi-scale modeling of structural behavior for response analysis of large civil infrastructure: modeling methodology and strategy [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 26(6): 886-892.
- [17] FISH J, SHE K. Multi-scale analysis of large scale nonlinear structures and materials [J]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2000, 1(1), 79-90.
- [18] 李兆霞,孙正华,郭力,等. 结构损伤一致多尺度模拟和分析方法 [J]. *东南大学学报*, 2007, 37(2): 251-260.
LI Zhaoxia, SUN Zhenghua, GUO Li, et al. Concurrent multi-scale modeling of structures and damage analyses [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(2): 251-260.