大跨度铝合金单层网壳结构安装技术

王存海[1] 史同庆[1] 李政宁[2] 庞贵宣[1] 郭小农[2,*]
（1.六冶（郑州）科技重工有限公司，郑州 452375；2.同济大学土木工程学院，上海 200092）

摘 要 针对大跨度铝合金单层网壳结构在施工中面临的安装难度大、节点连接精度要求高、变形控制严格等技术难题，本文以洛阳市奥林匹克中心田径训练馆屋面工程为依托，结合工程特点与施工实践，系统总结了椭球面铝合金单层网壳在分块吊装、节点精准定位、累计误差消除及安装挠度控制等方面的施工质量控制措施与关键技术要点。综合实践表明，采用由中心向四周环向分块拼装的施工方法，可显著降低施工难度并提高拼装质量；通过预起拱措施的实施，能够有效确保安装挠度的精准控制；而边缘钢环梁构造的合理设计，成功消除拼装过程中的累计误差。本文提出的部分安装技术可为类似大跨度网格结构的施工提供重要的技术参考和工程借鉴。

关键词 铝合金单层网壳，安装方案，累计误差消除，安装质量控制
中图分类号：TU745.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0020

Installation Technology of Large Span Aluminum Alloy Single-Layer Shell Structure

WANG Cunhai[1] SHI Tongqing[1] LI Zhengning[2] PANG Guixuan[1] GUO Xiaonong[2,*]
（1.LiuYe Technology Heavy Industry Company, Zhengzhou 452375, China;
2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China）

Abstract Large-span aluminum alloy single-layer shells often face the problems such as the difficult installation, high requirements for joint connection accuracy, strict deformation control requirements. In order to solve the problems, this paper summarizes the construction quality control measures and key points of the aluminum alloy single-layer reticulated shell based on The Athletics Training Hall of Luoyang Olympic Center. By integrating the project characteristics and practical construction processes, this study systematically summarizes the construction quality control measures and key technical points for elliptical aluminum alloy single-layer reticulated shells. These measures encompass block hoisting, precise node positioning, elimination of cumulative errors, and installation deflection control. The research findings indicate that the proposed methods provide valuable technical insights and practical references for the installation of similar large-span grid structures, offering effective solutions to the aforementioned challenges.

Keywords aluminum alloy single-layer reticulated shell, installation scheme, elimination of cumulative error, installation quality control

收稿日期：2024-11-25
基金项目：国家自然科学基金（51878473）
作者简介：王存海（1982-），男，本科，中级工程师，主要从事铝合金结构、有色金属加工设备方面的研究。E-mail：379029748@qq.com
[*] **联系作者**：郭小农（1977-），男，博士，副教授，从事铝合金结构和空间结构方面的研究。E-mail：guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

0　引　言

铝合金材料具有重量轻、耐腐蚀性好、强度高、可塑性强、外观金属质感强、免维护等优点，近些年在建筑行业中应用日益广泛，尤其在大跨度空间结构中应用效果甚佳[1]。铝合金板式节点单层网壳由铝合金节点板、铝合金杆件、不锈钢铆钉组成，可形成结构简洁、受力均匀、形式多变的大跨度空间结构[2]。近年来，铝合金大跨空间结构在北京大兴国际机场[3]、南京牛首山文化旅游区[4]、G60科创云廊[5]等多个工程中得到应用，其综合优势得到了充分的体现。

大跨度铝合金单层网壳结构通常应用于复杂形态的建筑中，此类结构不仅对节点连接的精度要求极高，还需严格控制整体变形，以确保结构的安全性和稳定性。因此其施工过程面临极大的挑战。

近年来，研究者们通过数字化建模和仿真分析，不断优化铝合金网壳结构的施工方法。例如，南京牛首山佛顶宫项目采用三维模拟放样、工厂精密数控加工、高空操作架搭设和分块曲面滑移技术，成功解决了地形复杂、构件种类多、曲率变化大等安装难题[6]。

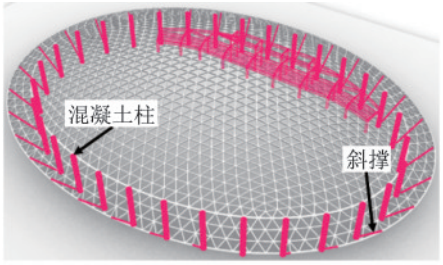
跨度相对较小的铝网壳可以采用地面拼装整体顶升的方式进行施工，如山西某商务中心项目，通过仿真分析确定了合理的安装顺序，并采用同步顶升法优化顶升点布置，解决了悬挑结构变形和支座固定时的温度影响问题[7]。这一研究为铝合金网壳结构的施工提供了新的思路和方法。

成都中国现代五项赛事中心游泳击剑馆项目则采用地面分组编号与高空逐跨拼装的方法，减少了累积误差，确保了施工精度[8]。该研究强调了构件分类编号、临时支撑及质量控制的重要性，推动了装配式施工方法的应用。

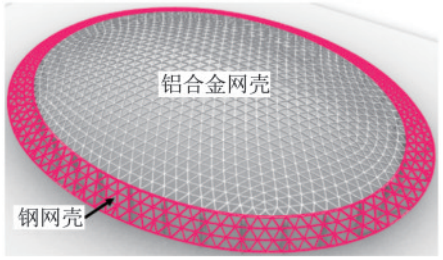
本文以洛阳市奥林匹克中心田径训练馆屋面工程项目为依托，总结了大跨度铝合金单层网壳的分块吊装安装技术，项目采用周边钢环梁消除了拼装误差，大幅提升了安装便捷性，可供类似工程参考。

1　工程概况

洛阳市奥林匹克中心田径训练馆工程，其屋面为椭圆抛物面单层网壳结构，网壳结构整体支承于32根钢筋混凝土悬臂柱顶，环向柱距约8.5 m，如图1(a)所示；上部网壳包括外围钢网壳与内部铝网壳，如图1(b)所示，外侧三环的钢网壳可以为内部铝网壳提供较强的面内约束作用，网壳结构整体呈椭球面，采用了三向网格，网格尺寸约3 m。结构安装完成的场景如图1(c)所示。



(a) 混凝土立柱及周围支撑



(b) 外围钢网壳及内部铝网壳



(c) 铝合金网壳安装完成场景

图1　结构形式示意图

Fig.1　Schematic diagram of structures

内部铝合金网壳结构的平面尺寸为86.2 m×106.4 m，结构顶标高为18.725 m，网壳矢高为11.3 m，铝合金材料牌号为6061-T6。杆件间采用板式节点进行连接[9]。铝合金杆件采用H450×180×8×10(mm)、H450×220×10×14(mm)两种工字型截面，共计2 796根。铝合金网壳共901个节点，每个节点通过上下两块铝合金拱形圆板及不锈钢环槽铆钉将杆件连接起来[10]，节点构造如图2所示。

铝合金网壳的安装是在周围土建工程、钢结构工程(外围钢网壳)完成的基础上进行。本文主要介绍铝网壳安装过程中的难点及安装控制措施。

2 难点分析

由于铝合金零部件均为工厂精密加工，不锈钢铆钉直径为9.6 mm，孔径为9.8 mm，因此孔距偏差仅为±0.1 mm，该项目共有25.2万颗不锈钢铆钉、构件和节点板上共开有50.4万个螺栓孔。铝合金零部件无法二次加工（不得扩孔、不得焊接），要顺利完成安装任务，就要确保每个节点精确定位，并且要克服土建工程、钢结构工程等其他工作面的偏差对铝合金网壳安装产生的不利影响。

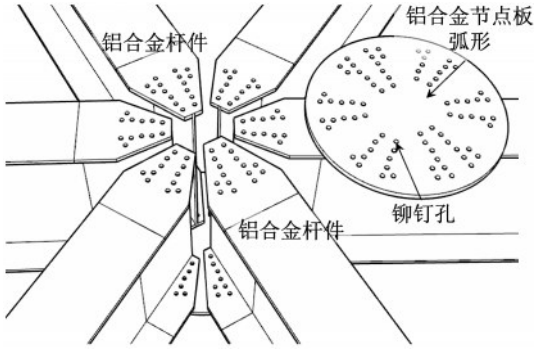


图2 铝合金网壳连接节点

Fig.2 Connection nodes of the aluminum alloy reticulated shell

铝合金网壳工程比较常见的安装方法是采用满堂支撑架，从屋面四周向中央散拼的施工方法。此种办法比较简单便捷，但施工前期定位难度较大，同时会在后期产生一定的累计误差导致最后的一部分杆件难以拼装。此外，逐根散装的方式导致吊装及测量定位的工作量巨大，使得工期增加。

与满堂架高空散装的施工方式相比，分块吊装法在铝合金网壳工程中展现出显著的优势。首先，地面拼装为施工质量控制提供了更为优越的条件，能够确保杆件和节点的精确对接，从而有效提升整体拼装质量。其次，地面拼装可以在多个作业面同步进行，与高空吊装工序形成流水作业，极大地优化施工组织，缩短工期。此外，分块吊装法将大量高空作业转移至地面，不仅显著减少吊装工作量，还可降低高空作业的安全风险，进一步提高施工效率。

经综合考虑，本工程方案采用由中心开始向四周环向分块拼装的方式，随着安装的进行根据测量结果对拼装进行校正；在铝合金网壳和钢网壳的交界处，铝杆件采用夹板和钢短梁连接，钢短梁与外围钢环梁焊接，其节点构造如图3所示，钢短梁的截面为H450×230×10×14（mm）。混凝土柱、钢结构环梁等其他工作面造成的偏差可采用网壳周边的钢短梁进行消除。铝合金杆件铆接完毕后H型钢按要求焊接到□450×400×16×16（mm）钢环梁上，焊接全部完成后拆除脚手架，完成本项目的安装任务。

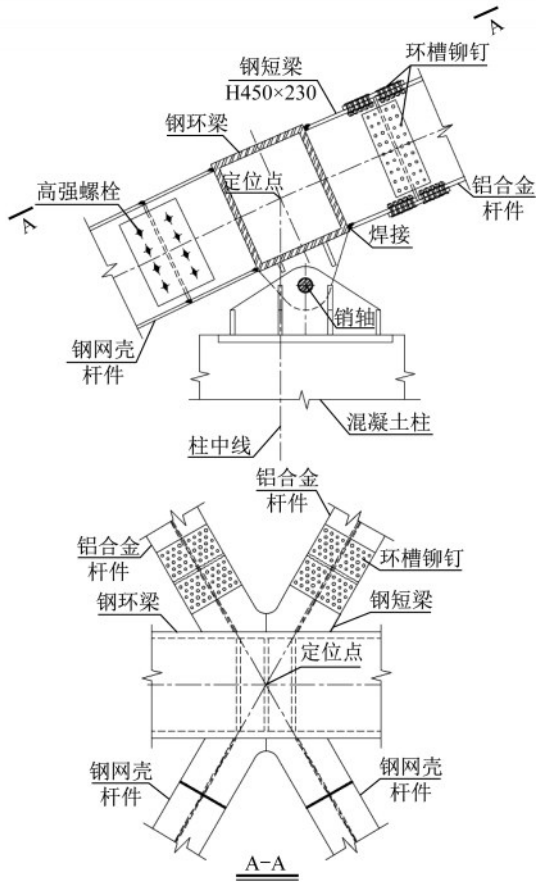


图3 支座处连接节点详图

Fig.3 Detail drawing of connection nodes at supports

3 安装进度控制措施

3.1 工艺流程

本工程内部铝网壳的安装过程如下：混凝土柱顶及钢环梁复测→基准点坐标引入、确定测站点→节点坐标位置定位→搭设满堂支撑架→搭设操作平台→调整定位丝杠→铝合金网片地面拼装→铝合金网片依次安装→钢短梁安装→铝合金网壳卸载→拆除满堂支撑架。

3.2 实施过程及要点

分块划分数量过多会使吊装效率降低，而数量过少会导致每个分块质量过大而难以吊装。综合考虑网壳规模及现场起吊能力后，本项目采用

的划分规则为每片横向及纵向不超过3个网格，每片重量不超过2 t，将铝网壳划分96个铝合金网片，各分块编号如图4所示。铝合金网壳所有材料按安装顺序分批运输至现场，安装过程及顺序如下。

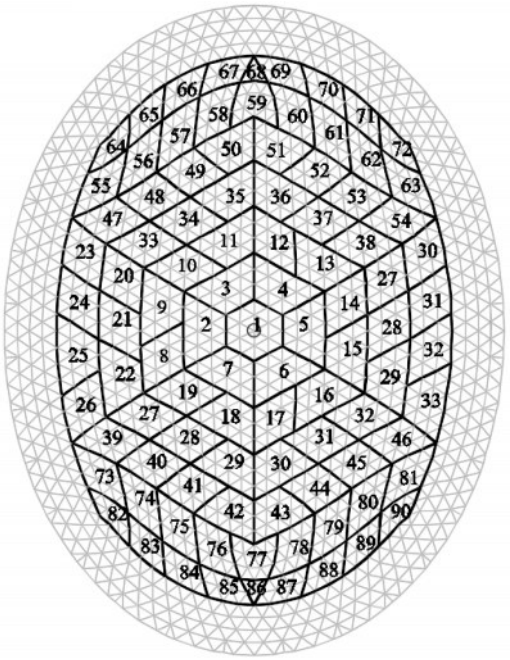


图4　铝合金网壳安装分区平面布置图

Fig.4　Plan layout diagram of installation zones for the aluminum alloy reticulated shell

（1）首先安装铝合金网壳中心部位构件，将1#铝合金吊装网片的杆件及节点板在地面操作平台预拼装，预拼装过程中，M10镀锌定位螺栓及不锈钢铆钉应自然穿入连接孔内以减小安装应力，并且铝合金杆件及节点板应随自身角度调整操作平台位置及标高，不得出现强扳硬扭、扩孔等不规范操作。每根杆件一端采用8颗M10镀锌螺栓临时固定，吊装网片边缘的杆件螺栓孔用M10不锈钢环槽铆钉穿入但不锁紧，而内部杆件随自身角度调整就位后用M10不锈钢环槽铆钉固定。用180 t履带吊车将杆件及节点板吊至中心位置，复测节点板中心及周边铝合金杆件中心与定位中心和轴线重合，调整就位后用脚手架钢管固定牢固，以此为中心展开后续铝构件安装任务。

（2）再依次环向对称安装2#—7#铝合金网片，安装过程中应随安装随测量随校正，严禁强扳硬扭、扩孔等不规范操作，确保铝合金网壳每个节点在满堂支撑架上准确就位。

（3）再以相同方式安装8#—33#铝合金网片，如图5所示整体呈六边形向外环向拼装。在安装边部区域铝合金网片时，实测该区域边部铝合金杆件与钢环梁连接的距离，根据实测结果切割相对应位置的如图6(a)所示的H型钢短梁，用以消除钢结构环形梁制作及安装偏差对铝合金网壳结构安装造成的不利影响，如图6(b)所示。铝网壳通过钢短梁与钢环梁焊接固定，使得1#—33#铝合金网片形成网壳，局部形成稳定受力体系，以减小对满堂支撑架的荷载。

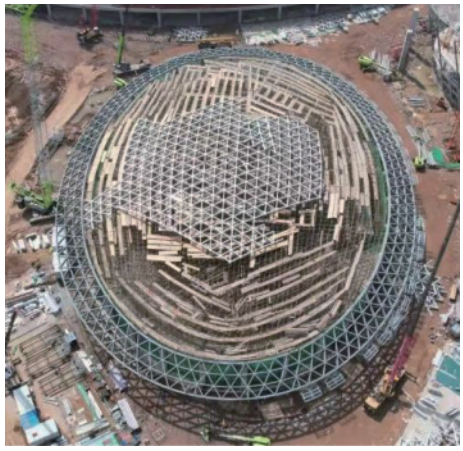


图5　8#—33#网片吊装就位

Fig.5　Integral state of hoisting in area No. 8–No.33



(a) 钢短梁调节端　　(b) 铝合金网壳边部区域安装

图6　钢短梁调节端

Fig.6　Steel short beam adjusting end

（4）最后安装34#—96#铝合金网片，南侧及北侧同时进行安装，铝合金构件及钢短梁安装完成后，最终测量允许偏差达到规范及设计要求后，所有M10镀锌临时螺栓替换成M10不锈钢环槽铆钉，并用专用工具由外环向内环逐环紧固，吊装完成后的结构如图7所示。

3.3　安装挠度控制

对于大跨度空间结构，可采取预起拱的方式减小其挠度。按《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)[11]中第4.4.3条，为改善外观和使用



图7 铝合金网壳吊装就位

Fig.7 Hoisting and positioning of the aluminum alloy reticulated shell

条件，可将横向受力构件预先起拱，起拱大小视实际需要而定，可为恒载标准值加1/2活载标准值所产生的挠度值。

本项目屋面设计荷载：恒载标准值（不含结构自重）为0.5 kN/m²，部分区域为0.75 kN/m²；活载标准值为0.5 kN/m²，喷淋荷载为0.3 kN/m²（仅部分区域），灯具荷载为0.02 kN/m²。采用3d3s Design v2020.0.7计算分析后，恒荷载+0.5活荷载下的变形图如图8所示。

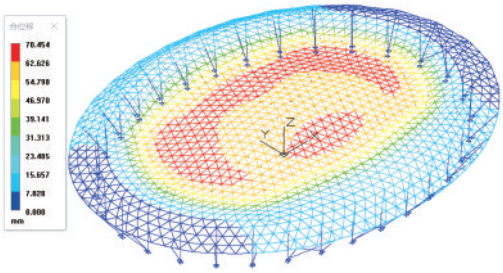


图8 “恒+0.5活”作用下的结构变形图

Fig.8 Structural deformation diagram under the action of "constant load + 0.5 live load"

本项目铝合金网壳安装过程中预起拱按上述要求进行，根据“恒荷载+0.5活荷载”作用下的变形图数据，铝合金网壳中心区域起拱60 mm、中部区域起拱70 mm、边部区域起拱15~30 mm。

根据计算得到的预起拱数值，在脚手架安装过程中，采用激光测距仪严格控制标高，通过调整脚手架与网壳单元的接触位置高度以实现预拱度修正。网壳安装完成并拆除所有脚手架后，对网壳变形进行测量，发现网壳最大下挠仅6~9 mm，符合设计及规范要求。

4 质量控制要点

为实现铝网壳结构的高质量安装，本工程遵循的质量控制要点如下：

（1）铝合金结构安装前，应根据定位轴线和标高基准点复核和验收土建施工单位设置的预埋件或牛腿的平面位置和标高。支承面的实际施工偏差应满足《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205—2020）[12]及《铝合金结构工程施工质量验收规范》（GB 50576—2010）[13]的相关要求。

（2）在施工前，应对构件的外形尺寸、板厚、孔径及位置、表面处理等进行全面检查，在确认其符合设计文件或有关标准的要求后，方能进行安装，验收后的构件要妥善保管。

（3）铝合金结构工程对施工质量的控制符合《铝合金结构工程施工质量验收规范》（GB 50576—2010）[13]及《空间网格结构技术规程》（JGJ 7—2010）[14]等国家现行标准中的相关要求。

（4）在铝网壳周边钢短梁与钢环梁焊接时应选用对称焊接、分段跳焊的焊接顺序，减少焊接应力和变形。焊接工艺应符合《钢结构焊接规范》（GB 50661—2011）[15]规定，并经评定、试焊后确定。

（5）为降低铝合金网壳结构的温度效应，构件安装合拢温度范围为15~25 ℃，铝合金结构对温度较为敏感，应严格执行。

5 结 语

铝合金单层网壳结构作为大跨度公共建筑常用的结构形式之一，安装难度较大。洛阳市奥林匹克中心田径训练馆是2022年第十四届河南省运动会赛事场馆之一，该场馆是洛阳市首座异形大跨度铝合金网壳工程。该项目采取分块吊装方案，地面拼装与吊装同步进行，提升了安装效率；通过网壳周边设置钢短梁的方式，有效消除了可能出现的累计误差；采用预起拱的方式有效控制了网壳安装完成后的变形，本项目的安装任务圆满完成。完成后的项目轻盈美观，同时也再一次证明了铝合金网壳结构具有安全、经济、可靠等优良性能。

参 考 文 献

[1] 沈祖炎，郭小农，李元齐.铝合金结构研究现状简述[J].建筑结构学报，2007，28(6)：100-109.
Shen Zuyan，Guo Xiaonong，Li Yuanqi.State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures[J].Journal of

Building Structures,2007,28(6):100-109.(in Chinese)

[2] 杨联萍,韦申,张其林.铝合金空间网格结构研究现状及关键问题[J].建筑结构学报,2013,34(2):1-19.
Yang Lianping, Wei Shen, Zhang Qilin. Aluminum reticulated spatial structures: state of the art and key issues[J].Journal of Building Structures,2013,34(2):1-19.(in Chinese)

[3] 冯若强,王希,朱洁,等.北京新机场装配式单层铝合金网壳结构整体稳定性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(4):11-18.
Feng Ruoqiang, Wang Xi, Zhu Jie, et al. Stability analysis of single-layer aluminium alloy reticulated shells with Temcor joints at Beijing New Airport[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 11-18.(in Chinese)

[4] 张雪峰,崔家春,尹建.南京牛首山文化旅游区佛顶宫大穹顶大跨空间自由曲面铝合金网壳结构设计[J].建筑结构,2018,48(14):8-13.
Zhang Xuefeng, Cui Jiachun, Yin Jian. Structural design on large-span space freedom surface aluminum shell of the roof of Fo Ding Palace large dome in Nanjing Niushoushan Culture and Tourism Zone[J]. Building Structure,2018,48(14):8-13.(in Chinese)

[5] 李志强,刘小蔚,欧阳元文.拉斐尔云廊大跨度铝合金屋盖结构施工模拟分析与方案对比[J].建筑结构,2020,50(S2):146-149.
Li Zhiqiang,Liu Xiaowei,Ouyang Yuanwen.Construction simulation and program comparison on large-span aluminum alloy structure of Rafael Roof[J].Building Structure,2020,50(S2):146-149.(in Chinese)

[6] 欧阳元文,孙晓阳,陈斌,等.大跨度多曲率异形曲面铝合金结构屋盖安装施工关键技术[J].施工技术,2016,45(14):58-63.
Ouyang Yuanwen, Sun Xiaoyang, Chen Bin, et al. Installation technology of large-span multi-curvature irregular curved surface aluminum alloy roof [J]. Construction Technology, 2016, 45(14), 58-63.(in Chinese)

[7] 郝贤哲,武启宇,闫亚杰,等.某单层铝合金网壳结构施工过程的关键问题研究[J].太原理工大学学报,2025,56(2):235-245.
Hao Xianzhe, Wu Qiyu, Yan Yajie, et al. Research on key problems in the construction process of a single-layer aluminum alloy lattice shell structure[J].Journal of Taiyuan University of Technology, 2025, 56(2): 235-245.(in Chinese)

[8] 薛庆,赵崇贤,高波,等.大跨度单层铝合金网壳结构安装技术[J].建筑施工,2011,33(12):1097-1099.
Xue Qing, Zhao Chongxian, Gao Bo, et al. Installation technology for long-span single-layer aluminum alloy reticulated shell structure[J]. Building Construction, 2011,33(12),1097-1099.(in Chinese)

[9] 郭小农,朱劭骏,王丽,等.铝合金板式节点平面内抗弯刚度研究[J].建筑结构,2018,48(14):34-39.
Guo Xiaonong,Zhu Shaojun,Wang Li.Study on in-plane bending stiffness of aluminum alloy gusset joint[J]. Building Structure,2018,48(14):34-39.(in Chinese)

[10] 郭小农,保文通,曾强,等.铝合金弧面节点板冲压成形回弹特性研究[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(10):1433-1441.
Guo Xiaonong, Bao Wentong, Zeng Qiang, et al. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate in stamping forming[J].Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(10): 1433-1441.(in Chinese)

[11] GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S].
GB 50429—2007 Code for design of aluminum structures[S].(in Chinese)

[12] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].
GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures[S].(in Chinese)

[13] GB 50576—2010 铝合金结构工程施工质量验收规范[S].
GB 50576—2010 Code for acceptance of construction quality of aluminum structures[S].(in Chinese)

[14] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S].
JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures[S].(in Chinese)

[15] GB 50661—2011 钢结构焊接规范[S].
GB 50661—2011 Code for welding of steel structures [S].(in Chinese)