

# 负载下焊接加固铁塔角钢轴压构件的受力性能

沈之容<sup>1</sup>, 苑士岩<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 为研究不同加固截面形式、初始负载大小对铁塔轴压角钢焊接加固后受力性能的影响, 选择了方形和 L 形两种加固截面形式, 在 4 档不同初始负载下进行了焊接加固角钢的轴压单调加载静力试验, 得到了焊接加固后角钢的荷载位移曲线、极限稳定承载力和破坏模式。针对试验试件建立了有限元模型, 进行了考虑焊接间接热力耦合方法的数值模拟计算。对比试验和数值计算结果表明: 两种加固截面破坏模式为整体弯曲失稳; 相对于方形加固截面试件, L 形加固截面试件对于热输入的影响更加敏感, 延性较差; 当初始负载名义应力比不超过 0.3 时, 可以忽略初始负载大小对加固后角钢轴压构件极限稳定承载力的影响。

**关键词:** 焊接加固; 负载; 角钢构件; 轴压; 截面加固形式; 有限元分析

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

## Mechanical Behavior of Angle Steel Axial Compression Members of Steel Tower Reinforced by Welding while Under Load

SHEN Zhirong<sup>1</sup>, YUAN Shiyan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China; 2. Northeast Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group Corporation, 130021, Changchun, China)

**Abstract:** In order to investigate the influences of different forms of reinforced section and initial load on mechanical behaviors of axial compression angle steel in steel tower following weld reinforcing process, two forms of reinforced section, square and L-shape, were selected. Under the four different initial load, the static load test of angle steel reinforced by welding was conducted. The load-displacement curve, the ultimate stability bearing capacity as well as the failure mode of reinforced angle steel were obtained. According to the static test, finite element models were established and the numerical simulation was carried out to take into account the indirect thermo-structure coupling analysis method. Both the test and analysis results show that

the failure mode of two reinforced sections are global bending buckling; Compared to the specimens with square cross section, L-shape specimens are more sensitive to the heat input, but ductility is poorer; If the nominal stress ratio of initial load is less than 0.3, the effect of initial axial compressive load on the ultimate stability bearing capacity of angle steel axial compression members reinforced by welding is negligible.

**Key words:** welding reinforcement; under load; angle section component; axial compression; form of reinforced section; finite element analysis

20 世纪 80 年代末, 我国移动通信事业得到了快速发展, 对于通信塔的需求也与日俱增, 其中四边形的角钢桁架塔以其价格低廉、连接方便、构造简单、加工及安装要求相对较低、施工质量容易控制等优点成为通信塔最常用的结构形式。随着时间的推移, 当时建造的大量桁架通信塔接近或达到其设计使用年限, 加上使用过程中工艺设备的更新换代、恶劣天气如风灾和雪灾的频繁出现、自然界各种腐蚀介质的侵蚀和设计标准的升级, 导致了塔架构件承载力不足, 整体可靠度下降。如果更换承载力不足的主要受力构件对冗余度不高的高耸塔架来说不仅难度大、费用高, 甚至影响安全, 而拆除后重建则会造成大量的资源浪费, 同时也会造成严重的环境问题, 合理利用和改造既有塔架则能获得较为明显的经济效益。

对于钢结构单根构件加固而言, 按加固时的施工方法不同主要有: 负荷加固、卸荷加固以及从原结构上拆下加固或更新部件进行加固<sup>[1]</sup>。为了在加固过程中尽量减少对人们生活和生产活动的影响, 大部分钢构件的加固改造都是在负载下进行的, 负载下对钢结构进行焊接加固增大截面面积的方法是当前工程中最常用的加固方法之一, 具有施工简便、良好的经济效益、耐久性及可靠性有保障等优点。

国内外学者对负载下钢构件焊接加固展开了大量的试验研究<sup>[2-5]</sup>和数值模拟分析<sup>[6-14]</sup>,但大都聚焦于以房屋建筑为代表的框架结构体系中的梁柱构件,且待加固构件截面形式为工字形或 H 型钢这类双轴对称截面,对于以塔桅结构为代表的空间桁架结构体系中常用的单角钢这类单轴对称截面的杆件来说焊接加固计算方法和研究基础则非常缺乏,基于此,本文针对通信塔结构常用单角钢构件展开焊接加固试验研究和数值分析,探讨不同加固截面形式和不同初始负载下对角钢轴压构件极限稳定承载力的影响,为塔桅结构加固工程设计和规范制订提供科学依据。

## 1 试验概述

### 1.1 试件设计

为研究初始负载对焊接加固后角钢极限承载能力的影响,选取了合理的截面加固形式<sup>[15]</sup>,加固后组成的截面形式分别为方形截面和 L 形截面,见图 1,加固前后角钢长细比在常用铁塔工程范围,试件设计的名义长度为 1.2 m。试验研究对象为两端铰支的角钢轴压构件,材料类型为 Q235B,被加固角钢规格采用 L80×6,加固角钢规格为 L62×6(为便于焊接对加固角钢 L80×6 两肢端部进行切割处理),考虑到避开支座装置中固定被加固角钢 L80×6 的卡槽,加固角钢长度比被加固角钢长度短 100 mm,即截面为 L80×6 的角钢长度为 1.2 m,截面为 L62×6 的角钢长度为 1.1 m。铁塔这类高耸结构不同于一般的房屋结构,风荷载起主要作用,因此加固时风的大小直接影响着铁塔构件的应力大小,为了减小待加固构件的初始负载,综合考虑负载大构件变形大不利于现场焊接施工和应符合《钢结构焊接规范》(GB50661—2011)<sup>[16]</sup>和《钢结构工程施工规范》(GB50755—2012)<sup>[17]</sup>关于焊接作业区风速不应超过  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的规定,铁塔加固施工一般在小风情况下进行,本次试验初始负载名义应力分为 4 档:0、0.1 $f_y$ 、0.2 $f_y$  和 0.3 $f_y$ 。试件命名作如下规定,JA 表示方形加固截面构件,JB 表示 L 形加固截面构件,数

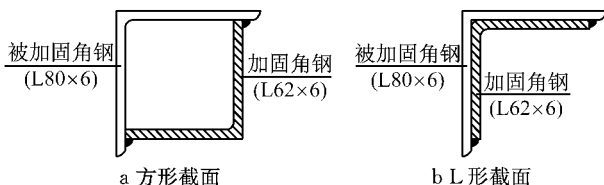


图 1 试件截面加固形式

字含义举例说明如下:试件 JA2-1 中第一个数字 2 代表初始应力水平为 0.2 $f_y$ ,第二个数字 1 代表被加固角钢。试件 JA3-2 中第一个数字 3 代表初始应力水平为 0.3 $f_y$ ,第二个数字 2 代表加固角钢,其余以此类推。设计的角钢试件实测尺寸和初始负载见表 1。

表 1 试件实测尺寸和初始负载  
Tab.1 Measured dimensions and initial loads of specimens

试件类型	试件编号	角钢规格	试件长度/mm	平均肢宽/mm	平均肢厚/mm	初始负载/kN
JA 系列被加固角钢	JA0-1	L80×6	1 200.4	80.1	5.92	0
	JA1-1	L80×6	1 199.5	80.3	5.84	21.71
	JA2-1	L80×6	1 199.3	80.5	6.00	43.43
	JA3-1	L80×6	1 199.6	80.3	5.94	65.14
JB 系列被加固角钢	JB0-1	L80×6	1 200.6	80.7	5.92	0
	JB1-1	L80×6	1 200.8	79.5	5.82	21.71
	JB2-1	L80×6	1 200.2	79.8	5.94	43.43
	JB3-1	L80×6	1 200.7	80.6	5.86	65.14
JA 系列加固角钢	JA0-2	L62×6	1 109.8	61.9	5.88	
	JA1-2	L62×6	1 109.6	62.8	5.82	
	JA2-2	L62×6	1 109.6	62.5	5.84	
	JA3-2	L62×6	1 109.1	62.8	5.96	
JB 系列加固角钢	JB0-2	L62×6	1 110.8	62.5	5.94	
	JB1-2	L62×6	1 109.3	62.3	5.94	
	JB2-2	L62×6	1 110.6	62.2	5.92	
	JB3-2	L62×6	1 110.5	62.8	5.88	

### 1.2 材性试验

材性试验样坯按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置和试样制备》(GB/T 2975—1998)<sup>[18]</sup>从试件母材上截取,见图 2a,根据《金属材料拉伸试验·第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[19]</sup>加工成试样,共加工了三个试样,试样具体尺寸见图 2b。通过液压式万能试验机进行静力拉伸试验得到了试样常温下力学性能。所得常温下主要力学性能平均值见表 2。

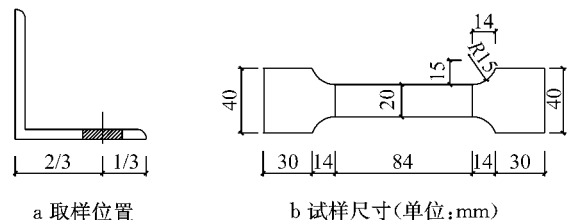


图 2 试件取样位置和尺寸  
Fig.2 Sampling location and size of specimen

表 2 材性试验结果  
Tab.2 Material performance parameters

屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	弹性模量/ $10^3$ MPa	伸长率/%
264.3	412.8	216.4	26.53

### 1.3 加载方案

试验在同济大学建筑结构实验室完成. 主要的试验装置为竖向反力架, 利用四根螺丝杆将 1 000 kN 的分离式千斤顶固定在竖向反力架横梁上, 加载装置如图 3 所示. 试件两端均采用卡槽的形式, 将被加固角钢试件端部直接卡于此槽内, 因而不需在角钢端部焊接端板, 可减小焊接应力对试验结果的影响. 在卡槽端板下部焊接具有半圆形凹槽的钢块体, 将其放置于球铰之上来模拟球铰支座, 用以释放构件的扭矩以及各个方向上的弯矩, 卡槽和球铰装置见图 4.

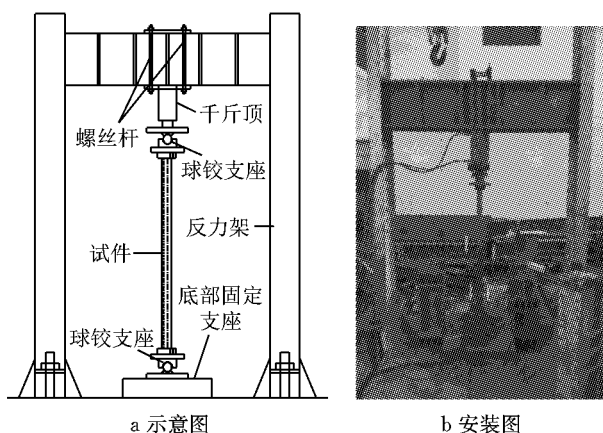


图 3 试验布置示意图和实物安装图

Fig.3 Test device diagram and test setup

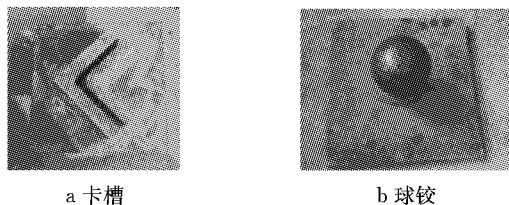


图 4 卡槽和球铰实物图

Fig.4 Slot and spherical hinge support

试件安装时先将试件进行几何对中. 为了确保数据采集装置工作正常, 使试验构件各部分接触良好, 提高所得数据的准确性, 在正式加载之前进行预加载, 预加载分两级加载到设计极限荷载的 30%, 预加载完成后, 对试件进行卸载, 进入正式加载.

试验加载制度如下: 在设计极限荷载的 0~50% 范围内, 每级加载值取极限荷载的 10%. 在设计极限荷载的 50%~80% 范围内, 每级荷载值取极限荷载的 5%. 当加载至设计极限荷载的 80% 以后时, 级距调整为 2%. 每级持荷时间为 2 min, 用数据采集仪采集每级荷载下的应变数据, 在试件临近破坏时, 依据试验过程中各仪表读数是否出现突变, 来判断试件的临界破坏状态, 试验进行到峰值荷载出现后, 荷

载下降至峰值荷载的 80% 为止. 对于未加载加固角钢构件 JA0、JB0 采用一次单调加载至破坏. 对于负加载下焊接加固的其他 JA 系列和 JB 系列试件, 首先加载至既定的初始负载水平, 然后保持负载水平不变, 按照相应的加固截面形式和焊接顺序对角钢试件进行焊接加固, 待所有焊缝充分冷却至室温后, 继续加载直至试件最终破坏为止.

### 1.4 测点布置及量测

采用拉丝连接的位移计测量试件的竖向压缩变形以及水平向弯曲变形, 卡槽端板两侧的位移计监测球铰支座的转角位移, 用于判断球铰转动是否符合要求. 在试件中部及其上下间距为 400 mm 位置处布置三层应变片, 用于监测构件破坏时, 各位置处的应变分布变化. 位移计以及应变片的布置如图 5 所示.

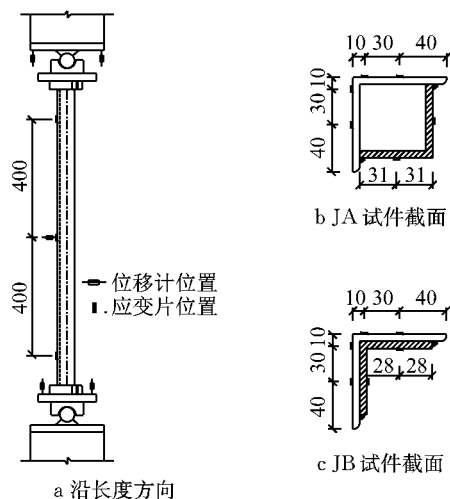


图 5 位移计和应变测点布置图(单位:mm)

Fig.5 Layout of displacement and strain gauges(unit:mm)

### 1.5 加固施焊方案

被加固角钢与加固角钢的连接采用沿全长角焊缝连接, 焊脚尺寸为 4 mm, 试验中焊缝施工采用手工电弧焊, 焊机采用 ZX7-315V 双电压 IGBT 逆变手工焊机. 焊接加固过程参照《钢结构加固技术规范》(CECS77:96)<sup>[1]</sup>和《钢结构检测评定及加固技术规程》(YB9257—1996)<sup>[20]</sup>的相关规定, 并考虑到焊工施焊方便等因素来确定, 焊条以及焊接过程符合《钢结构焊接规范》(GB50661—2011)<sup>[16]</sup>和《非合金钢及细晶粒钢焊条》(GB/T 5117—2012)<sup>[21]</sup>的相关要求.

在焊接加固前, 首先利用 G 型夹钳将加固角钢与被加固角钢沿全长夹紧, 然后在每间隔 300 mm 位置对试件进行点焊连接固定. 点焊固定后, 将 G 型夹钳拆除, 进行正式施焊. 施焊采用分区段、对称施

焊的方法,在点焊的 300 mm 区段范围内再细分为 10 道次,每道焊长为 60 mm;沿构件长度方向的施焊顺序为 A—D—B—C,其中 A、B 段是从下到上依次施焊,D、C 段是自上而下依次施焊,JA 和 JB 的焊缝分段以及 JA 的每段施焊顺序见图 6,试验现场焊接如图 7 所示。

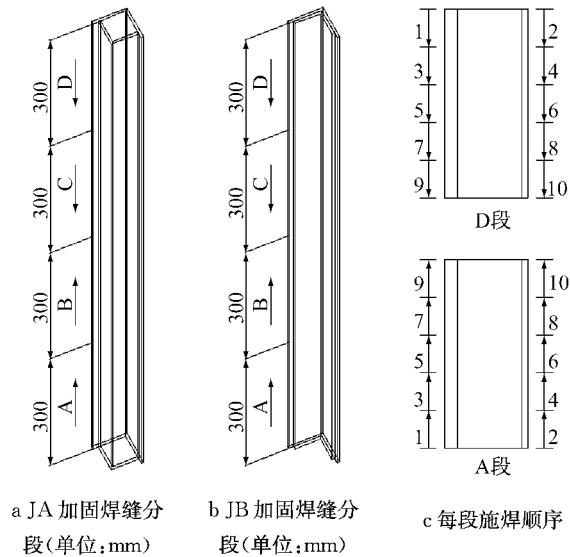


图 6 角钢试件焊接加固顺序

Fig.6 Welding process of reinforcing angle steel



图 7 加固焊接施工

Fig.7 Construction of weld reinforcement

## 2 试验结果及分析

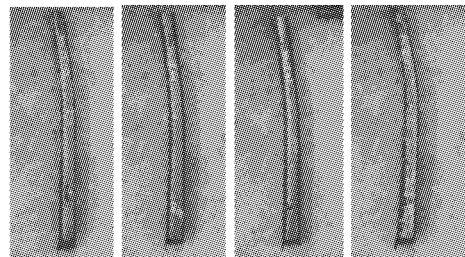
### 2.1 试验现象及破坏模式

从试件破坏形态上看,所有 JA 系列试件最终破坏模式均为整体弯曲失稳破坏,典型试件的破坏模式如图 8 所示。施加既定初始负载时,加载点位于被加固角钢形心,对于焊接完成后的整个试件截面而言,加载点并不位于加固后构件截面的形心,而是偏向于被加固角钢一侧,所以最终破坏模式表现为被

加固角钢受压、加固角钢受拉,整个杆件向加固角钢一边弯曲。



a JA 系列试件典型破坏模式

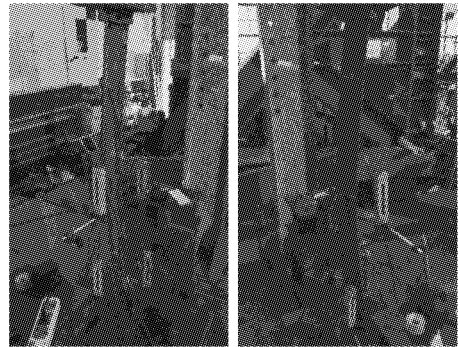


b 卸载后 JA 系列试件汇总

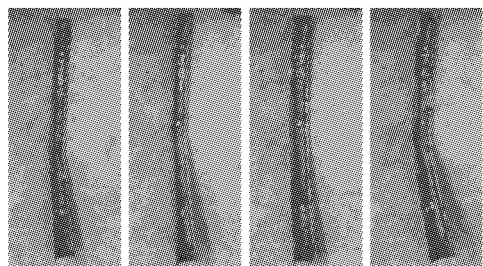
图 8 JA 系列试件破坏模式

Fig.8 Failure modes of JA specimens

试件 JB 系列的最终破坏模式也是整体弯曲失稳破坏,典型试件的破坏模式如图 9 所示。施加既定初始负载时,加载点位于被加固角钢形心,对于焊接加固完成后的整个试件截面而言,加载点并不位于加固后构件的形心,也是略偏向于被加固角钢一侧,



a JB 系列试件典型破坏模式



b 卸载后 JB 系列试件汇总

图 9 JB 系列试件破坏模式

Fig.9 Failure modes of JB specimens

但是由于焊接热输入的影响,焊接完成并充分冷却后,整个试件形成较为明显地向被加固角钢一侧的初弯曲,随着荷载的增大,试件最终破坏模式表现为向被加固角钢一侧弯曲失稳破坏。

## 2.2 荷载-位移曲线

试验得到的 JA 系列和 JB 系列各试件的荷载和竖向位移关系曲线如图 10 所示。

从图 10a 中可以看出,JA 系列试件随着初始荷载的增大,焊接热输入对试件的变形影响也逐渐增

大,表现为曲线中的水平段长度逐渐增长。随着初始荷载的增加,各试件荷载-竖向位移曲线增长趋势基本一致,极限承载力基本接近,都在 200 kN 左右波动。各个试件的初始刚度基本相同,这是因为在焊接加固之前,试验都是对单角钢试件在弹性范围内进行的加载。而在焊接加固并充分冷却后,试件的刚度普遍高于最初刚度,这是由于加固后试件的受力面积增大的缘故。

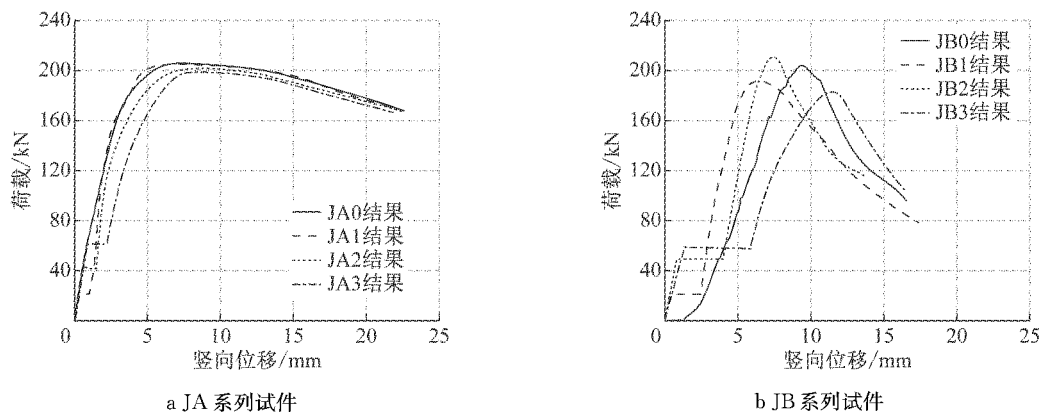


图 10 JA 和 JB 试件荷载-竖向位移曲线

Fig. 10 Load-vertical displacement curves of JA and JB specimens

从图 10b 中可以看出,与 JA 系列试件的情况类似,JB 系列试件随着初始荷载的增大,焊接热输入对试件的变形影响也逐渐增大。随着初始荷载的增加,各试件荷载-竖向位移曲线出现了差异,极限承载力变化没有明显的规律,相对于 JA 系列试件出现了较大波动。各个试件的初始刚度基本相同,经焊接加固并充分冷却后,试件的刚度普遍高于最初刚度,这是由于加固后试件的受力面积增大的缘故。从图中还可以看出,试件 JB0 的刚度小于其他试件,这是由于其初始荷载为零的缘故,当试件有一定的初始荷载,其刚度会略有提高。

比较 JA 系列试件和 JB 系列试件的变形形态以及荷载与位移曲线可以看出,前者的延性要好于后者,而且前者的极限承载力较为稳定,随着初始荷载的增大表现出一定的规律,后者的极限承载力却出现较大的波动,这是因为 JB 系列试件相对于 JA 系列试件而言,对焊接热输入的影响更加敏感。

## 3 有限元分析

### 3.1 有限元模型

目前国内外学者对钢构件在负载下焊接加固数

值分析方法主要分为两种:第一种方法是不考虑焊接热影响,仅采用生死单元技术模拟加固过程<sup>[6-8,22]</sup>。第二种方法是在方法一的基础上,考虑焊接热过程和随温度变化的钢材材性的有限元分析方法<sup>[9-14]</sup>。本文运用通用有限元分析软件 ANSYS 采用第二种方法进行数值分析。

有限元模型采用 ANSYS 中的热-结构单元: SOLID70 和 SOLID185 单元。SOLID70 单元为 3D 实体热单元,用于进行焊接过程中随时间变化的温度场分析,可以获得不同时间有限元模型各个节点处的温度荷载。SOLID185 单元为 8 节点固体结构单元,用于读取温度场分析获得结果进行应力场分析。在采用 L 型截面形式加固的构件中,考虑到被加固角钢与加固角钢之间是相互接触的,采用支持大变形的 TARGE170 单元和 CONTA174 单元模拟被加固角钢与加固角钢之间接触摩擦,接触面摩擦系数  $\mu$  取为 0.3。为了避免支座端部的应力集中,采用多点刚性约束(MPC)的方法来模拟杆件端部球铰支座,有限元模型考虑初弯曲为  $L/1000$ ,按特征值屈曲分析得到的第一阶屈曲模态特征值向量将初始几何缺陷施加到构件上,并施加 1.2 倍特征屈曲荷载以“激发”非线性屈曲分析<sup>[8]</sup>。

在焊接过程中,焊件的温度变化非常剧烈,因此在焊接温度场和应力场的模拟计算中必须要给定材料的各种物理性能参数随温度的变化值,各温度下钢材的应力-应变关系如图 11 所示。常温下(20 °C)钢材弹性模量和屈服强度见表 2,泊松比  $\nu=0.3$ ,密度  $\rho=7.85 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其他温度时材料热物理参数<sup>[23-24]</sup>见表 3。

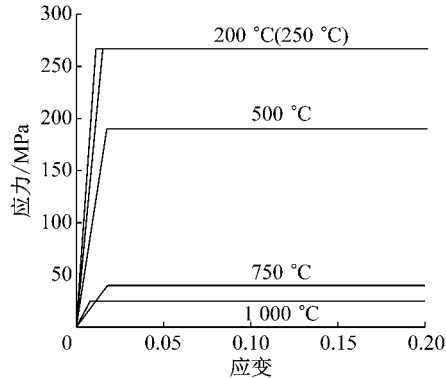


图 11 各温度下 Q235B 钢应力-应变关系

Fig. 11 Stress-strain relationship for Q235B at elevated temperatures

表 3 Q235B 钢热物理参数

Tab.3 Thermo-physical parameters of Q235B steel

温度/ °C	线膨胀 系数/ $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	弹性模 量/ $10^5 \text{ MPa}$	屈服应 力/ MPa
20	1.2	460	50	2.16	264.3
250	1.3	480	47	1.87	264.3
500	1.4	530	40	1.50	186.9
750	1.4	675	27	0.70	38.3
1 000	1.4	670	30	0.20	25.0
$\geq 1 000$	1.4	660	35	0.19	0.1

利用 ANSYS 中的函数加载功能,采用高斯移动热源模型对焊件进行热流密度、对流热等的加载,以实现焊接过程中温度场的模拟。具体分析步骤如下:首先对整体模型进行热分析,获得不同时间点、各个单元节点处的温度,之后将热单元转化为结构单元,并进行应力场分析。其次,应力场分析时,在第一荷载步中,利用生死单元技术杀死加固角钢的全部单元,并对被加固角钢施加初始负载,紧接着在第二荷载步中,维持第一荷载步中施加的初始负载不变,激活加固角钢的全部单元,并读入每个子步的单元节点温度,进行初始负载下整体模型焊接残余应力的计算。最后,在初始负载基础上继续加载,直至构件达到极限状态。

### 3.2 计算结果及分析

图 12 分别给出了 JA 系列试件以及 JB 系列试件的有限元模型典型破坏模式与试验破坏模式的对

比。从图中可以看出,两者破坏模式基本一致。

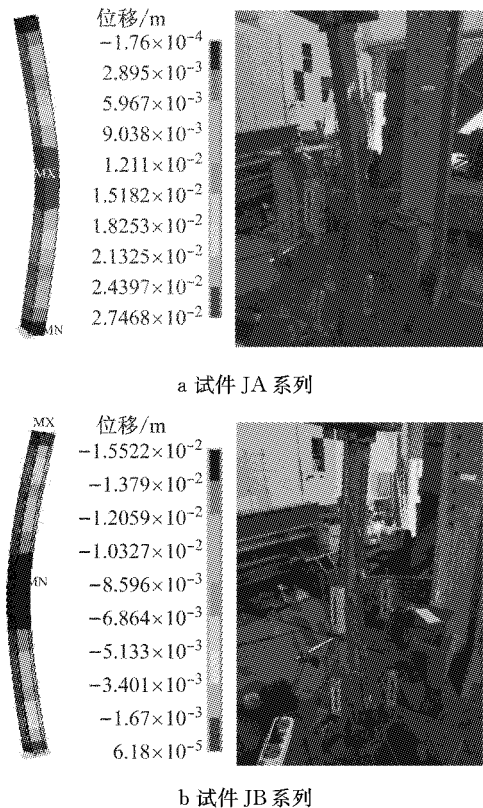


图 12 典型试件有限元和试验破坏模式对比(单位:m)

Fig. 12 Comparisons of typical failure modes between finite element calculation results and test results(unit: m)

有限元计算得到的 JA 系列试件荷载-位移曲线与对应的试验结果的对比如图 13 所示。

从图 13a 中可看出,在无初始负载的情况下,焊接加固方形截面试件 JA0 的有限元计算结果与试验结果对比曲线吻合较好。有限元计算结果曲线的杆件刚度比试验结果曲线获得的试件刚度略大,原因是:有限元计算过程中,模型的约束条件、加载过程以及施加的温度荷载都比较稳定,而试验过程中试件的支座条件、试件的加载以及焊接加固过程等受试件加工情况和人为因素的影响较大。

从图 13b 中可看出,0.1 $f_y$  负载下焊接加固方形截面试件 JA1 的有限元计算结果与试验结果对比曲线吻合较好,只是由于热输入影响产生的平台段长度略有差异,产生这一差异的主要原因可能包括以下几点:试验过程中负载下焊接加固的施工条件复杂多变,焊机的输出电流电压、焊接电弧的移动速度以及施焊人员的操作工艺等都会对结果产生影响;有限元模型在高温的情况下,其材性会产生较大变化,而目前关于钢材在高温条件下的材性数据与真实情况还存在一定的差异;有限元模拟加固角钢参

与整个构件受力情况时,采用了生死单元技术,这与 真实试验过程中的情况略有不符.

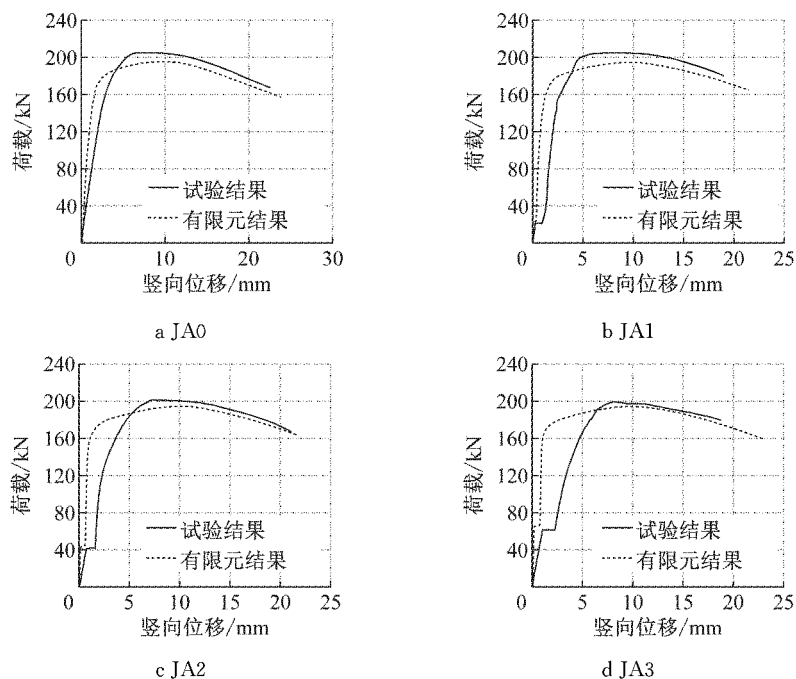


图 13 JA 系列试件荷载-位移曲线有限元和试验结果对比

Fig.13 Comparisons of load-displacement curves of JA specimens between finite element calculation results and test results

从图 13c、13d 中可以看出,加固完成后 JA2 和 JA3 试件的刚度在有限元结果和试验结果之间相差较大,有限元分析获得的试件刚度更高,这主要是由于有限元模型计算过程相对于试验过程而言各种条

件比较稳定,相关因素可以得到很好地控制.

JB 系列试件利用热-结构间接耦合有限元分析方法获得的荷载-位移曲线与相应的试验结果的对比如图 14 所示.

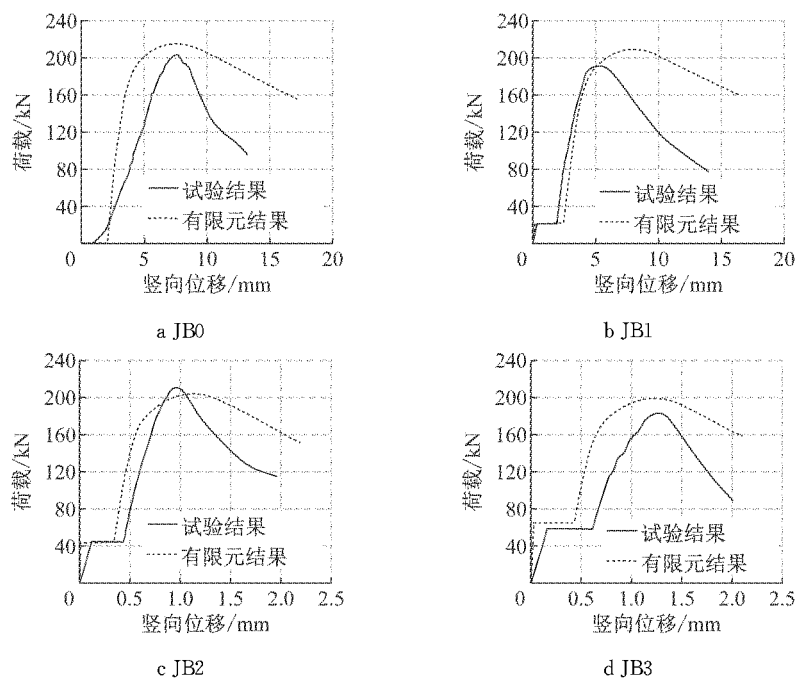


图 14 JB 系列试件荷载-位移曲线有限元和试验结果对比

Fig.14 Comparisons of load-displacement curves of JB specimens between finite element calculation results and test results

从图 14a 中可以看出,JB0 有限元计算得到的杆件刚度比试验获得的试件刚度大;有限元计算得到的极限承载力和试验结果较为接近.从图 14b、14c、14d 中可以看出,各试件由于热输入影响产生的平台段长度略有差异,造成这一现象的原因与 JA 系列试件情况类似.此外,有限元分析获得的加固试件的延性要好于试验的结果,这可能与试验过程中可变因素无法被有效控制有关.

加固后角钢极限承载力的有限元计算结果与试验结果对比见表 4.表中, $P_{u,EXP}$  和  $P_{u,FBA}$  分别为极限承载力的试验值和有限元计算值.

表 4 加固后角钢极限承载力的有限元计算与试验结果对比  
Tab. 4 Comparisons of ultimate bearing capacity of reinforced angle steel between finite element calculation results and test results

试件 编号	试验结果 $P_{u,EXP}/kN$	有限元结果 $P_{u,FEA}/kN$	$P_{u,EXP}/$ $P_{u,FEA}$	结果偏 差/%
JA0	205.46	195.08	1.053 2	5.32
JA1	204.72	194.76	1.051 1	5.11
JA2	201.62	194.42	1.037 0	3.70
JA3	198.51	194.05	1.022 9	2.29
JB0	204.49	215.48	0.948 9	5.37
JB1	192.91	209.88	0.919 1	8.79
JB2	211.02	204.58	1.031 5	3.15
JB3	188.57	199.38	0.945 8	5.73

由表 4 可以看出,对于这两种加固截面形式来说,初始负载应力比不超过 0.3 时,初始负载的大小对焊接加固后试件的极限承载能力的影响较小,所以当加固前角钢初始负载应力不超过  $0.3f_y$  时,可以忽略初始负载大小对构件极限稳定承载力的影响.此外试验结果与有限元分析结果较为接近,最大偏差为 8.79%.JA 系列试件的极限承载力试验结果普遍略高于有限元计算结果,这可能是由于试验中的支座条件达不到理想情况的球铰支座;JB 系列试件试验结果有较大波动,这是由于 L 形加固截面为开口截面,受到焊接热输入的影响更为敏感.

本文建立的有限元模型并利用间接的热-结构耦合方法进行有限元分析可以较准确地模拟出试验试件的破坏形式,得到了与试验值相近的极限承载力,因此该分析方法具有一定的可行性和可靠性.

## 4 结论

本文进行了负载下焊接加固铁塔角钢轴压构件的单调静力加载试验和利用 ANSYS 建立考虑焊接

热输入的有限元模型来模拟负载下焊接加固角钢构件受压的试验过程,将试验结果与有限元结果进行对比分析,得到了主要结论如下:

(1)无论是方形截面还是 L 形加固截面形式,破坏模式均为整体弯曲失稳.

(2)当初始负载应力比不超过 0.3 时,加固后试件的极限稳定承载力接近,初始负载的大小对焊接加固后试件的极限承载能力的影响较小,所以当加固前角钢构件初始负载名义应力不超过  $0.3f_y$  时,可以忽略初始负载大小对这两种截面形式加固后构件稳定承载力的影响.

(3)由于方形截面试件加固完成后为闭口截面,角钢各肢形成相互支撑,使得焊接热输入对其受力性能的影响较小,极限承载力增长比较稳定,且加固后延性好,而 L 形加固截面试件不具备这样的优点,在铁塔焊接加固工程中优先选用方形截面加固形式.

(4)利用考虑热输入的热-结构间接耦合数值分析方法,能够模拟出焊接加固过程中的平台段,可以较真实地反映出试件从承受初始负载、焊接加固直至最终破坏整个受力过程.

(5)采用 MPC 多点刚性约束的方法模拟球铰支座,可以避免试件端部的应力集中现象;从最终试件的破坏模式来看,这种施加约束的方法可以较真实地反映试件的实际支座条件.

## 参考文献:

- [1] 清华大学土木工程系. CECS77:1996 钢结构加固技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2005.  
Department of Civil Engineering of Tsinghua University. CECS77:1996 Technical specification for strengthening steel structures[S]. Beijing:China Planning Press,2005.
- [2] NAGARAJ RAO N R, TALL L. Columns reinforced under Load[M]. [S. l.]: Fritz Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Lehigh University, 1962.
- [3] LIU Y, GANNON L. Experimental behavior and strength of steel beams strengthened while under load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(6): 1346.
- [4] 王元清,祝瑞祥,戴国欣,等. 初始负载下焊接加固工字形截面钢柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 78.  
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, et al. Experimental study on load-carrying behavior of I section steel columns strengthened by welding with initial load[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 78.
- [5] 王元清,蒋立,戴国欣,等. 负载下钢结构工字形压弯构件焊接加固试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 30.  
WANG Yuanqing, JIANG Li, DAI Guoxin, et al. Experimental study on I section steel beam-columns strengthened by welding



- while under load [J]. Journal of HARBIN Institute of Technology, 2016, 48(6): 30.
- [6] WU Z Q, GILBERT Y. Grondin. Behaviour of steel columns reinforced with welded steel plates[R]. Edmonton: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, 2002.
- [7] LIU Y, GANNON L. Finite element study of steel beams reinforced while under load[J]. Engineering Structures, 2009, 31(11): 2630.
- [8] 龚顺风, 程江敏, 程鹏. 加固钢柱的非线性屈曲性能研究[J]. 钢结构, 2011, 26(11): 15.  
GONG Shunfeng, CHENG Jiangmin, CHENG Peng. Nonlinear buckling behavior of reinforced steel columns [J]. Steel Construction, 2011, 26(11): 15.
- [9] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 荷载下焊接加固钢柱截面应力分布有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 577.  
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, *et al.* Finite element analysis on stress distribution on section of steel columns reinforced by welding under load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2013, 29(4): 577.
- [10] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 荷载下焊接加固受弯工形钢梁的受力特性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4): 112.  
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, *et al.* Analysis on load-carrying behavior of flexural I-section steel beams strengthened with welding under load [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(4): 112.
- [11] 王元清, 祝瑞祥, 戴国欣, 等. 工形钢柱荷载下焊接加固的受力特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(1): 25.  
WANG Yuanqing, ZHU Ruixiang, DAI Guoxin, *et al.* Analysis on load-carrying behavior of I section steel columns reinforced by welding with initial compressive load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(1): 25.
- [12] 牛犇, 刘晓珂, 陈志华, 等. 荷载下焊接加固过程对钢梁及钢支撑受力性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 87.  
NIU Ben, LIU Xiaoke, CHEN Zhihua, *et al.* Study on influence of welding reinforcement on mechanical behavior of steel beam and braces in load status [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 87.
- [13] 蒋立, 王元清, 戴国欣, 等. 焊接加固热作用对工形截面压弯钢构件承载性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(4): 96.  
JIANG Li, WANG Yuanqing, DAI Guoxin, *et al.* Analysis of welding heat effect on load-carrying behavior of I section steel beam columns strengthened by welding [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(4): 96.
- [14] 蒋立, 王元清, 戴国欣, 等. 荷载下焊接加固钢结构压弯构件受力性能的影响因素分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(5): 120.  
JIANG Li, WANG Yuanqing, DAI Guoxin, *et al.* Influence factor analysis of mechanical behavior of compression-bending member of steel structure strengthened by welding under load [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(5): 120.
- [15] 沈之容, 苑士岩. 荷载下焊接加固角钢截面形式对比分析[J]. 结构工程师, 2016, 32(5): 172.  
SHEN Zhirong, YUAN Shiyan. Comparative analysis on cross-section forms of angle strengthened with welding under load [J]. Structural Engineers, 2016, 32(5): 172.
- [16] 中冶建筑研究总院有限公司. 钢结构焊接规范: GB50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group. Code for welding of steel structures: GB 50661—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 中国建筑股份有限公司, 中建钢构有限公司. 钢结构工程施工规范: GB 50755—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
China State Construction Engineering Corporation, China Construction Steel Structure Corp. Ltd. Code for construction of steel structures: GB 50755—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [18] 中国钢研科技集团有限公司. 钢及钢产品力学性能试验取样位置和试样制备: GB/T 2975—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.  
China Iron & Steel Research Institute Group. Steel and steel products—location and preparation of test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—1998[S]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [19] 中国钢研科技集团有限公司. 金属材料拉伸试验. 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
China Iron & Steel Research Institute Group. Metallic materials—tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [20] 中冶建筑研究总院有限公司. 钢结构检测评定及加固技术规程: YB 9257—1996[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.  
Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group. Technical specification for inspection, assessment and strengthening of steel structures: YB 9257—1996[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [21] 哈尔滨焊接研究所. 非合金钢及细晶粒钢焊条: GB/T 5117—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
Harbin Welding Institute. Covered electrodes for manual metal arc welding of non-alloy and fine grain steels: GB/T 5117—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.
- [22] 高耀东, 何雪. 基于 ANSYS 单元生死技术的焊接模拟[J]. 热加工工艺, 2010, 39(7): 120.  
GAO Yaodong, HE Xue. Simulation of welding based on ANSYS unit birth and death technology [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7): 120.
- [23] 同济大学, 中国钢结构协会防火与防腐分会. 建筑钢结构防火技术规范: CECS200: 2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

Tongji University, Fire Retardant and Anticorrosion Branch of China Steel Structure Association. Technical code for fire safety of steel structure in buildings : CECS200; 2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.

[24] 丁发兴,余志武,温海林. 高温后 Q235 钢材力学性能试验研

究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 245.

DING Faxing, YU Zhiwu, WEN Hailin. Experimental research on mechanical properties of Q235 steel after high temperature treatment[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 245.

# (上接第 19 页)

[5] 尹晨光. 空间钢结构新型复式球节点性能分析与实验研究 [D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2016.

YIN Chenguang. Performance analysis and experimental research on a new type of compound spherical joints for steel structure [D]. Nanjing: Southeast University. College of Civil Engineering, 2016.

[6] 李浪, 王明洋, 周丰峻, 等. 组合多面体空间网壳结构拓扑分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增 1): 114.

LI Lang, WANG Mingyang, ZHOU Fengjun, *et al.* Topological analysis of space reticulated shell structures of combinatorial polyhedron [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 114.

[7] HWANG K J. Advanced investigations of grid spatial structures considering various connection systems [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2010.

[8] KUBIK M L, KUBIK L A. An introduction to the CUBIC space frame [J]. International Journal of Space Structures, 1991, 6 (1): 41.

[9] 董石麟, 郑晓清, 白光波. 一种由四边形平面六杆四面体单元连接组合的球面网壳[P]. 中国专利, ZL201210079062.7. 2014-7-23.

DONG Shilin, ZHENG Xiaoqing, BAI Guangbo. A novel lattice shell composed of six-bar tetrahedral units [P]. Chinese Patent, ZL201210079062.7. 2014-7-23.

[10] 董石麟, 白光波, 郑晓清. 六杆四面体单元组成的新型球面网壳及其静力性能[J]. 空间结构, 2014, 20(4): 3.

DONG Shilin, BAI Guangbo, ZHENG Xiaoqing. A novel lattice

shell composed of six-bar tetrahedral units and its static characteristics [J]. Spatial Structures, 2014, 20(4): 3.

[11] DONG Shilin, BAI Guangbo, ZHENG Xiaoqing, *et al.* A spherical lattice shell composed of six-bar tetrahedral units: configuration, structural behavior, and prefabricated construction [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(7): 1130.

[12] 赵壁荣, 朱思荣, 冯远. 德阳市体育馆网壳屋盖设计[J]. 建筑结构, 1996, 7(1): 21.

ZHAO Birong, ZHU Sirong, FENG Yuan. Network roof design of Deyang Stadium [J]. Building Structure, 1996, 7(1): 21.

[13] 蓝倜恩, 赵基达. 北京体育学院体育馆双曲抛物面网壳屋盖结构[J]. 土木工程学报, 1992, 25(6): 10.

LAN Tien, ZHAO Jida. Roof structure of hyperbolic paraboloid reticulated shells for the gymnasium of Beijing Institute of physical education [J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(6): 10.

[14] 曹正罡, 孙瑛, 范峰, 等. 单层双曲椭圆抛物面网壳弹塑性稳定性能曹正罡[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 70.

CAO Zhenggang, SUN Ying, FAN Feng, *et al.* Elasto-plastic stability of single-layer elliptic paraboloidal reticulated shells [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 70.

[15] 中国建筑科学研究院. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

China Academy of Building Research. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.