

After the Steel Grid Structure is Hoisted in Place, the Retaining Structure Connectors Welding Research

Xiaoge Chen¹, Lin Mao², Jinglei Li³

¹Xinxiang Huayuan Electric Power Survey and Design Co., Ltd., Xinxiang Henan

²Henan Tianfeng Steel Structure Co., Ltd., Xinxiang Henan

³Zhengyang Shouchuang Environmental Protection Energy Co., Ltd., Zhumadian Henan

Email: 877021042@qq.com

Received: Jun. 23rd, 2020; accepted: Jul. 20th, 2020; published: Jul. 27th, 2020

Abstract

Steel grid structure main body construction has been completed; its structure is already dead weight load stress state. The need for maintenance structure installation, namely on the stress state of body welding bracket or fittings, to implement the installation maintenance structure of wall and roof, through a trial to assess the effect of the main body structure in the welding process, to develop a welding plan, so as to guide the construction and provide reference for future similar projects.

Keywords

Frame Structure, Bracket, Joint, Welding

钢网架结构吊装就位后围护结构连接件的焊接研究

陈晓格¹, 毛琳², 李惊雷³

¹新乡华源电力勘察设计有限公司, 河南 新乡

²河南天丰钢结构有限公司, 河南 新乡

³正阳首创环保能源有限公司, 河南 驻马店

Email: 877021042@qq.com

收稿日期: 2020年7月3日; 录用日期: 2020年7月20日; 发布日期: 2020年7月27日

摘要

钢网架结构主体施工已经完成，其结构已经处于自重荷载受力状态，需要进行维护结构安装，即在受力状态下的主体机构上焊接牛腿或连接件，来实现安装墙面和屋面的维护结构，通过试验评估焊接过程对主体结构受力的影响，制定出焊接方案，从而指导施工或为以后类似工程提供借鉴。

关键词

网架结构，牛腿，连接件，焊接

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

安阳高陵本体保护与展示工程，工程位于安阳市殷都区安丰乡西高穴村高陵保护区内，是全国重点文物保护单位。本工程为地上一层，局部地下一层，地上为错台建筑，总用地面积 100,534 m²，总建筑面积 32,500 m²。根据建筑功能划分为三部分，A 区遗址博物馆采用钢结构框架结构，地上一层，局部地下一层，建筑高度 8.45 m；B 区遗址展厅采用混凝土框架柱 + 四边支撑的 119 m 大跨度正交正放钢桁架结构，地上一层，建筑高度 16.75 m；C 区能源中心采用混凝土框架结构，地上一层，建筑高度 8.45 m。其中 B 区钢桁架 + 混凝土框架结构见图 1 所示。

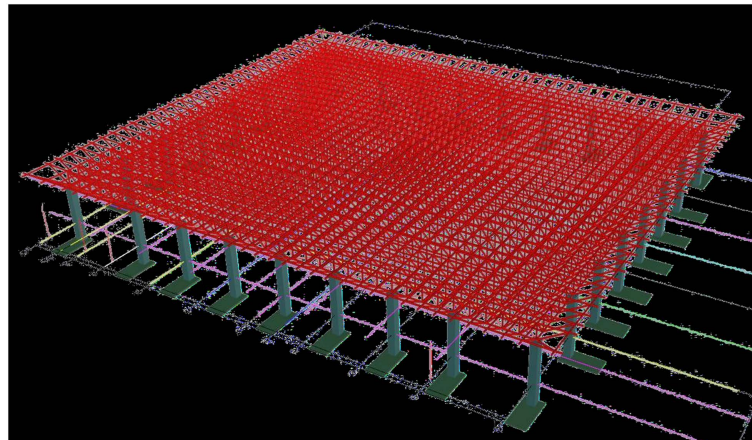


Figure 1. B steel truss + concrete frame structure

图 1. B 区钢桁架 + 混凝土框架结构

图 1 中 B 区安装钢网架结构主体施工已经完成，其结构处于自重荷载受力状态，下一步需要进行安装维护结构，即在受力状态下的主体机构的荷载的屋檩上和边柱上焊接檩托板连接件，以便将维护结构的屋面板和墙面板安装在屋檩和边柱上。为此需要通过实验评估焊接过程中对主体结构受力的影响[1]，从而设计出焊接方案来指导安装施工。

2. 试验研究

2.1. 试验构件设计

试验采用一根轴心受压柱和两根简支梁进行试验，主要研究主体结构在受力状态下焊接连接件对其结构受力性能的影响[2]。

2.1.1. 试验梁设计

对两根简支梁(beam 1、beam 2)在跨中施加集中力进行加载，当梁中截面的边缘应力达到屈服应力的 0.6 倍时停止加载，作为受力状态。保持载荷不变，在上、下翼缘分别焊接檩托连接件，研究梁的受力性能变化。

beam 1 在上翼缘焊接檩托，研究焊接对上部受压翼缘性能的影响。beam 2 在下翼缘焊接檩托，研究焊接对下部受拉翼缘性能的影响。图 2 为梁 beam 1 和梁 beam 2 的设计图，单位：mm。

为了保证梁在加载过程中具有足够的面外刚度，设计采用 H 型钢，规格为 H300 × 305 × 15 × 15。梁计算长度为 2.9 mm。材质为 Q345B 钢，其屈服强度 $F_y = 345 \text{ MPa}$ 。因在支座和跨中的位置剪力较大，故需要设置加劲肋，肋板厚度 12 mm。

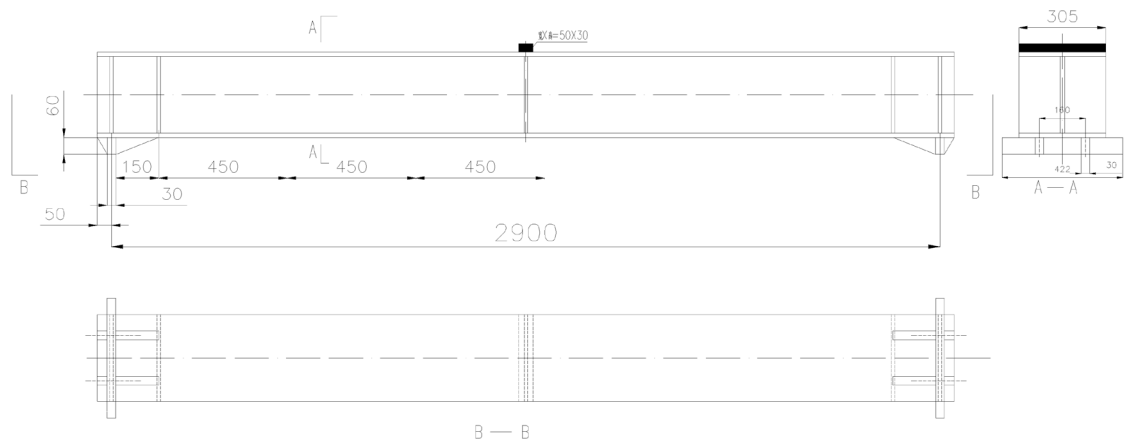


Figure 2. Test beam design drawing

图 2. 试验梁设计图

2.1.2. 试验柱设计

对柱子进行轴心受压加载，当荷载达到柱子屈服的 0.6 倍时保持荷载不变，之后在柱子的腹板上焊接牛腿。试验柱记作为 column，截面采用 H300 × 305 × 15 × 15 的 H 型钢，钢材采用 Q345B 钢。图 3 为 column 的设计图，单位：mm。柱高 2 mm，柱上下两端设置厚度为 30 mm 后端板，柱端头腹板处设置厚度为 20 mm 的加劲肋。

2.1.3. 连接件设计

焊接连接件采用根据实际工程尺寸按照一定比例缩小的构件，檩托和牛腿的设计如图 4 和图 5 所示(单位：mm)。檩托采用 8# 槽钢。牛腿采用两块钢板焊接成 T 形件。连接件均采用 Q345B 钢，并且连接件与构件的连接均采用角焊缝焊接连接，焊脚尺寸为 5 mm。

2.2. 加载装置与试件的安装

本试验在中国农业大学水利与土木工程实验室进行，采用吨位为 10,000 KN 的微机控制电液伺服压力试验机对柱子进行轴心受压加载；采用吨位为 1000 KN 的结构试验反力架对梁进行跨中加载。

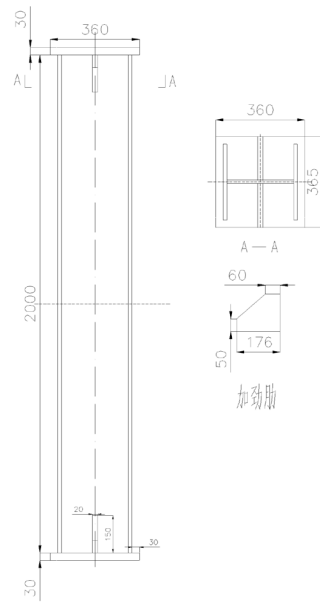


Figure 3. Test column plan
图 3. 试验柱设计图

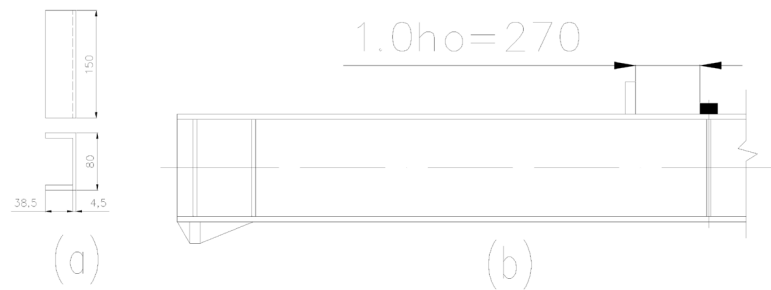


Figure 4. Purlin support plan
图 4. 檩托设计图

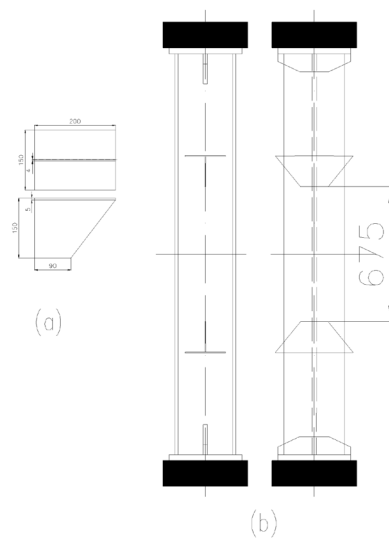


Figure 5. Design drawing of ox leg
图 5. 牛腿设计图

试验构件安装于加载仪器上，安装示意图和安装完成后的照片如图 6 所示。

图 7 给出测试点位置及编号。对于两根试验梁，先焊北边的標托，之后再焊南边的標托。梁一共有 5 个测试位置，每个位置均布置有一个位移计和两个应变片(以 beam 1 试验梁为例，如图 7(a))。对于试验柱，为了实现轴心受压加载，在柱顶形心垫一块钢板。柱子的压缩位移直接通过加载装置测得，无需架设位移计。跨中部位，在腹板的两侧和翼缘的外侧各贴两个应变片(见图 7(b))。此外，牛腿根据焊接顺序编号，其中 N1 为最先焊接，而 N4 为最后焊接的。

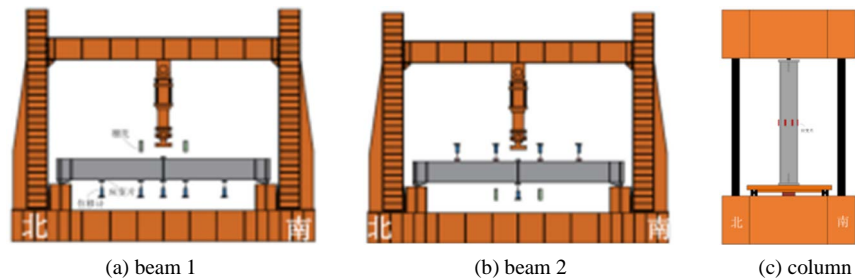


Figure 6. Schematic diagram of loading device for beam and column members

图 6. 梁与柱构件的加载装置示意图

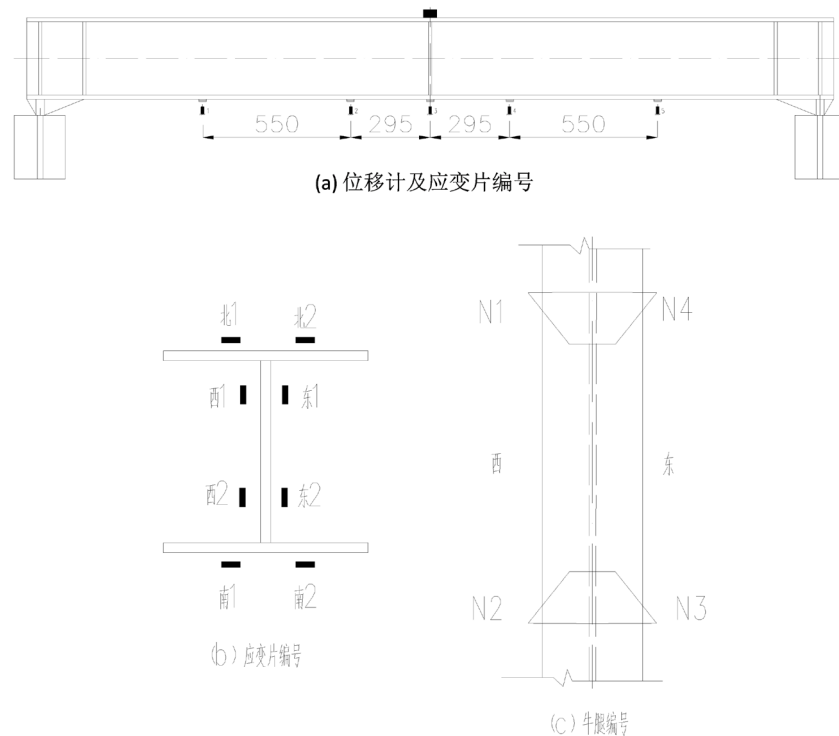


Figure 7. Position of welding test point of beam specimen

图 7. 梁试件焊接过程测试点位置

2.3. 试验及结果分析

2.3.1. Beam 1 梁焊接试验

图 8 分别为 beam 1 的应变和挠度随着焊接时间变化的曲线。表 1 为各连接件焊接时刻的应力和位移对应值，其中 F_y 为梁跨中边缘纤维达到屈曲应力时对应的集中力大小。从试验结果可以发现：

- 1) 由于梁的上翼缘受压，焊接升高了温度，使得上翼缘压缩应变减小。
- 2) 当在上翼缘完成標托焊接时，应变和挠度均有所减小，其下降幅度值在 6%之内。
- 3) 构件冷却后，应变和挠度与焊接完成时基本相同。

综上所述，在上翼缘进行焊接连接件对主结构的影响很小，且为有利影响。

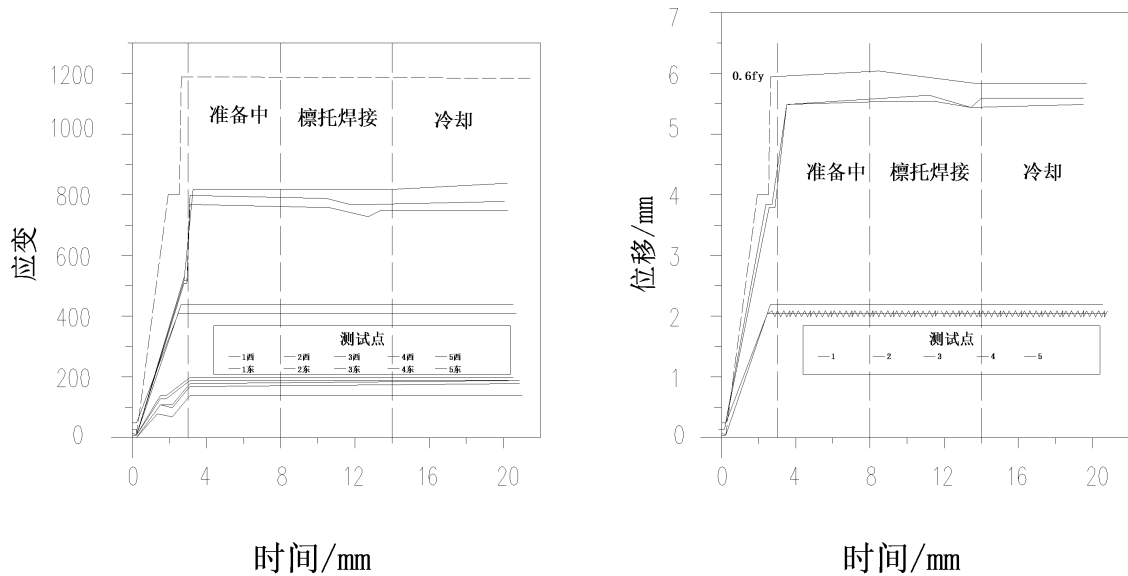


Figure 8. Beam 1 strain and deflection growth changes over time

图 8. Beam 1 应变与挠度随时间增长的变化

Table 1. Beam 1 strain and deflection of each test point at different time

表 1. Beam 1 各测试点在不同时刻的应变和挠度

测试点	达到 0.6 Fy	焊接完成	冷却后	
应变	1 西	229.1485	218.5971	218.991
	1 东	379.7665	370.1094	369.8416
	2 西	730.4819	715.2471	728.8302
	2 东	845.9724	830.2412	847.2188
	3 西	276.7848	265.3856	266.4784
	3 东	1181.13	1163.749	1161.886
	4 西	818.0319	800.2729	823.0316
	4 东	809.9022	797.3023	823.1115
	5 西	154.7219	147.3486	142.7611
	5 东	413.3649	405.60908	401.5352
位移/mm	1	3.49282	3.34858	3.31401
	2	5.59157	5.3332	5.37212
	3	6.28873	5.9605	6.03715
	4	5.7006	5.4351	5.48362
	5	3.66568	3.53931	3.56077

2.3.2. Beam 2 梁的焊接试验

图 9 分别为 beam 2 的应变和挠度随着时间的变化曲线。表 2 给出了各连接件焊接时刻对应的应力和位移值。从试验结果可以发现：

- 1) 当在下翼缘完成檩托焊接时，应变和挠度均有上升。焊接对应变的影响较小，应变的最大上升幅值仅为 4%。此外，在跨中焊接位置，挠度会随焊接时间而增大，其挠度上升幅值在 8% 值内。
- 2) 构件冷却后，应变基本无变化，挠度略有下降。

综上可知，由于梁的下翼缘受拉，温度的升高对结构有不利的影响。这一计算结果所反映的挠度变化规律是正确的。

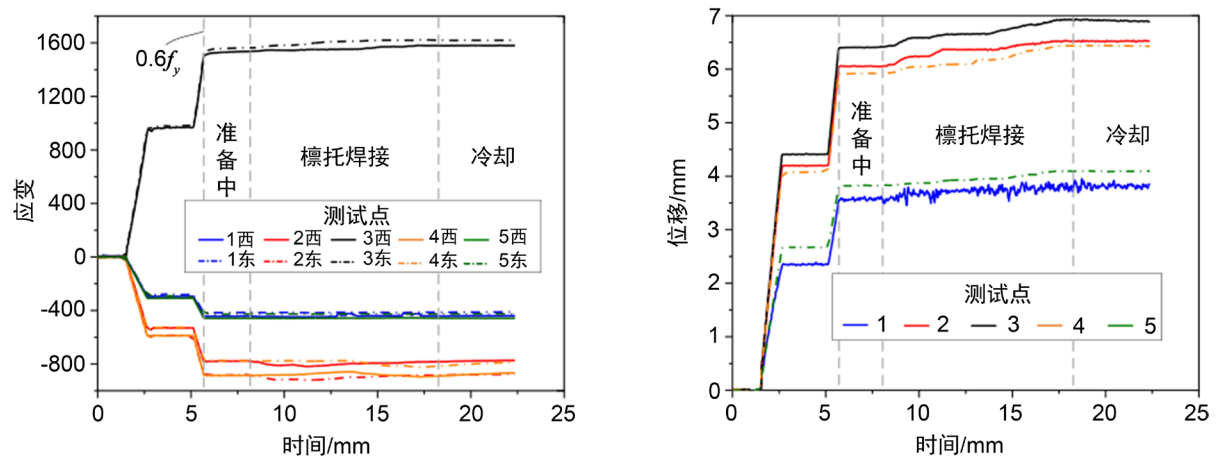


Figure 9. Beam 2 strain and compression displacement growth changes over time

图 9. Beam 2 应变与压缩位移随时间增长的变化

Table 2. Beam 2 strain and deflection of each measuring point different time

表 2. Beam 2 各测试点在不同时刻的应变和挠度

测试点	达到 0.6Fy	焊接完成	冷却后
应变	1 西	-445.708	-441.842
	1 东	-413.798	-413.359
	2 西	-783.654	-782.888
	2 东	-886.567	-883.432
	3 西	1537.237	1579.734
	3 东	1554.653	1620.765
	4 西	-888.076	-890.358
	4 东	-778.468	-815.705
	5 西	-458.290	-458.384
	5 东	-427.632	-425.955
位移/mm	1	3.53693	3.374316
	2	6.07433	6.52151
	3	6.43130	6.92254
	4	5.92962	6.43612
	5	3.84212	4.0887

2.3.3. Column 柱焊接试验

图 10 分别为柱子应变和压缩位移随着时间的变化曲线。表 3 给出了各连接件焊接时刻对应的应力和位移值，其中 N_y 为柱截面屈服力。跟踪每一步焊接过程可以发现：

- 1) 焊接时温度较高，使得压缩应变均有较明显的减小。
- 2) 当完成焊接牛腿 1 时，翼缘的应变几乎无变化，腹板应变变化较大，其西侧腹板的应变下降最多，变化在 5% 之内。
- 3) 当从开始完成焊接牛腿 2 时，腹板应变下降约 10% 之内，其应变的变化比上一步有所增加。
- 4) 但是当完成焊接牛腿 3 和牛腿 4 后，应变变化反而较小。
- 5) 与应变不同，压缩位移与焊接过程没有明确的变化规律，其变化幅值较小，在 3% 之内。

从试验结果可以看出，虽然压缩应变有显著下降，但位移的变化很小。应变变化较大，是因为且测试点的位置距离焊接位置较近，并且焊接产生的热量较大，故温度的提升对测试点应变的影响显著，焊接时测试得到的应变并不代表柱子的真实应变，见表 3 和图 10 所示。

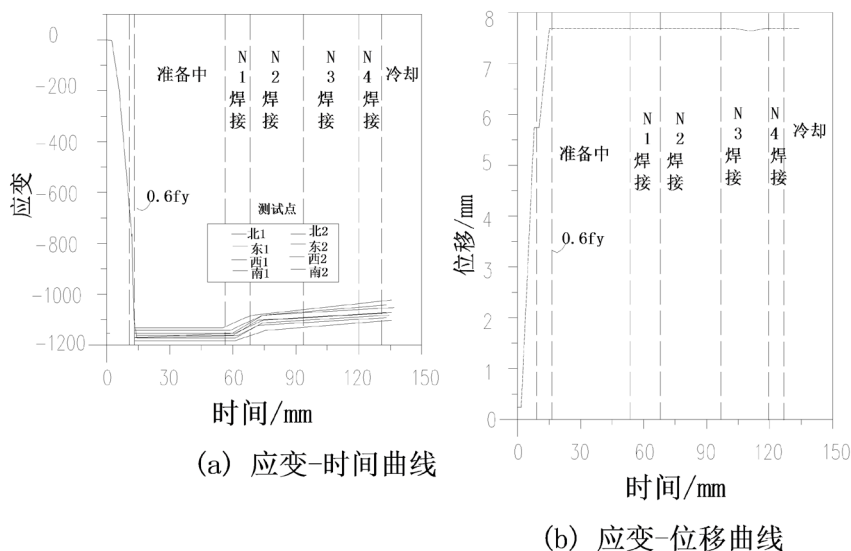


Figure 10. The column strain and compression displacement time growth age changes
图 10. Column 应变与压缩位移随时间增长的变化

Table 3. The column of each measuring point strain values at different times

表 3. Column 各测点在不同时刻的应变值

测试点应变	达到 0.6 N_y	牛腿 1 焊接完成	牛腿 2 焊接完成	牛腿 3 焊接完成	牛腿 4 焊接完成	冷却后
北 1	-1089.56	-1085.54	-1082.63	-1044.21	-1045.53	-1040.7
北 2	-1167.48	-1164.26	-1168	-1100.31	-1096.29	-1086.86
东 1	-1024.16	-1026.43	-996.754	-869.632	-860.334	-856.809
东 2	-1091.19	-1088.47	-1059.36	-867.279	-963.286	-958.197
南 1	-1108.68	-1108.86	-1108.48	-1046.08	-1039.94	-1033.72
南 2	-1036.64	-1035.31	-1028.98	-991.747	-993.192	-987.917
西 1	-1107.19	-1105.42	-1061.97	-978.112	-969.999	-964.753
西 2	-1058.48	-1056.15	-1012.45	-929.438	-920.855	-913.97
压缩位移/mm	7.893	7.972	7.943	7.857	7.957	7.999

3. 有限元分析

3.1. 分析方法

受力状态下连接件焊接的有限元分析采用热—弹塑性分析的方法[3]。首先,通过非线性热分析得到焊接结构在焊接过程中的瞬态温度场。在接下来的应力应变分析中,瞬态温度场作为初始热输入,施加于结构有限元模型,进行顺序耦合的热—结构分析,分析流程图见图 11 所示。

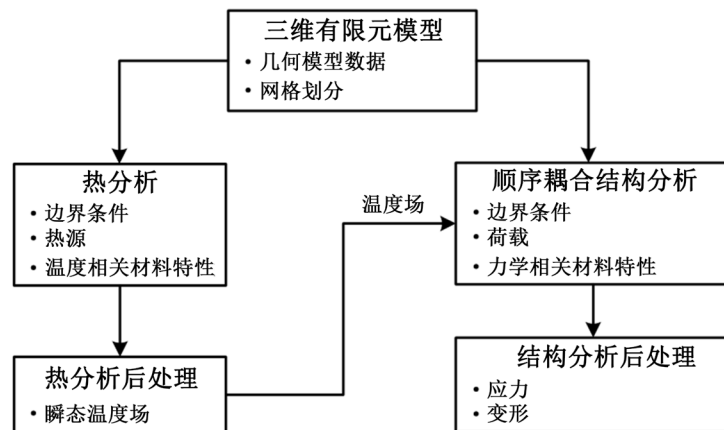


Figure 11. Flow chart of thermal elastoplastic analysis
图 11. 热弹塑性分析流程图

每一个试验只对一个连接件(檩托或牛腿)的焊接过程进行模拟。使用 ANSYS 进行热分析和应力分析。热分析时只建立焊缝、连接件和周围一小段 H 型钢的模型,其余部分近似认为其不受影响。在进行结构分析时,使用梁单元建立其远离焊接位置的 H 型钢的有限元模型,将两部分模型连接成整体,施加力荷载和温度荷载进行计算。其中温度荷载由热分析计算得到,施加在与热分析模型相对应的焊接区域内。

3.2. 有限元模型

3.2.1. 热分析模型

在热分析中,考虑焊机对于结构的热输入,钢材之间的热传导,钢材和环境之间的对流和辐射进行计算。使用热分析专用实体单元 SOLID70 建立模型[4],在梁上翼缘焊接檩托时,H 型钢的热分析长度为 200 mm。在腹板上焊接牛腿构件时,H 型钢模型中热分析长度为 300 mm。与梁柱焊接试验一致,檩托和牛腿的焊脚尺寸均为 5 mm,有限元网格划分如图 12 所示。

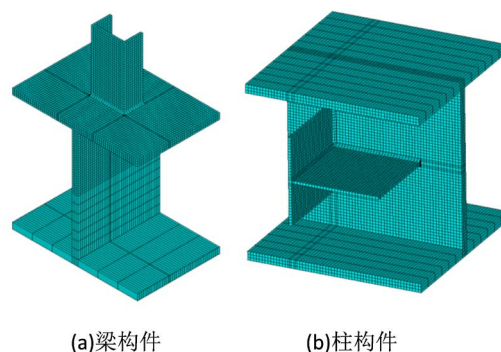


Figure 12. Finite element model and meshing of local thermal analysis
图 12. 局部热分析有限元模型及网格划分

材料选用 Q345 钢，其本构件模型仅包括热分析相关的参数，不包括结构相关的参数，且考虑材料的物理特性随温度而变化。材料的物理特性参数见表 4 所示。

Table 4. Thermal analysis of physical properties of materials
表 4. 热分析材料物理特性

温度(°C)	0	700	750	875	1502	2001
热导率(W/m·°C)	45	28	26	27	31	111
比热容(J/Kg·°C)	440	831	143	600	801	901
密度(Kg/m ³)	7800					

在本次分析中，焊缝输入功率和热源移动速度与试验相一致，设定的输入热功率为 3400 W，热源移动速度为 1.8 mm/s。

3.2.2. 结构分析模型

结构分析采用实体单元 SOLID185 和梁单元 BEAM188 同时使用。梁柱构件所加的荷载和边界条件都和试验保持一致。结构分析有限元模型示意图如图 13 所示。

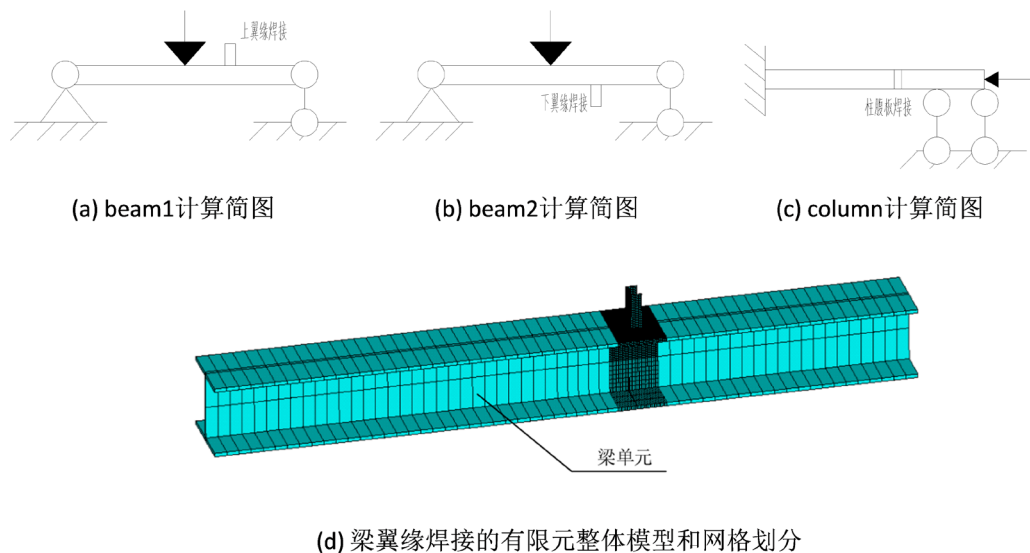


Figure 13. Finite element analysis model and mesh division of whole beam

图 13. 整体梁有限元分析模型及网格划分(热分析网格划分及两侧梁单元划分)

3.3. 分析结果

3.3.1. 热分析结果

计算得到的整个焊接过程中随时间变化的温度场，其中最为典型的温度场如图 14 所示。

从图上可以看到，在此计算条件下，焊点的最高温度可达到 3000 多摄氏度，在远离焊点的位置温度较低，焊点周围 10 mm 以内的区域有很大的温度梯度。梁构件和柱构件在焊接时的局部高温分布是一致的。由于焊接的高温十分局部化，因此焊点的温度计算受到单元划分等细节影响大，会存在一定的计算误差，与实际焊接温度存在差异。

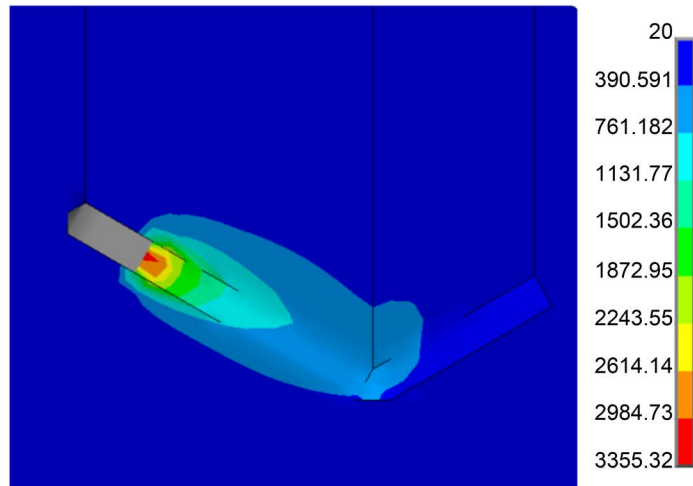


Figure 14. Typical temperature fields during welding
图 14. 焊接过程中的典型温度场

3.3.2. 结构分析结果

在焊接过程中，加载点的位移随着焊接的进行而不断变化，加载点竖向位移随焊枪行进位移增加而变化的曲线如图 15 所示。

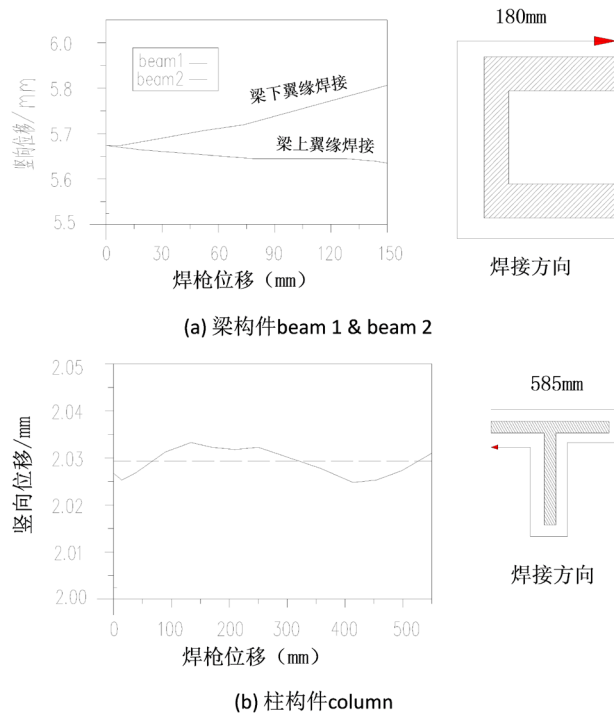


Figure 15. Vertical displacement curve of loading point
图 15. 加载点竖向位移变化曲线

从图可以看出，焊接部位受压还是受拉可以在一定程度上决定焊接时的位移变化。梁构件和柱构件在焊接时加载点的位移变化趋势与试验结果是吻合的。从整体来看，焊接导致的竖向位移变化同结构的弹性位移相比均较小，最大位移也不超过 5%，因此焊接对于结构的整体受力影响很小。

4. 结论

本试验轴心受压柱和简支梁进行加载后, 在保持外荷载不变的情况下, 在构件上进行连接件焊接, 研究后续焊接对主结构在受力状态下的影响。试验结论为:

1) 对于简支梁: 在上翼缘焊接檩托时, 由于上翼缘受压, 而焊接使温度升高, 因此梁的挠度略减小。

2) 当在下翼缘焊接檩托时, 由于下翼缘受拉, 温度的升高使得梁跨中和焊接位置的挠度增大约 8%, 说明在下翼缘焊接比在上翼缘焊接更应该一起关注。

3) 对于轴心受压柱, 由于测试点距离焊接位置较近, 使得其应变显著下降, 原因是热影响产生的结果, 测试的应变不是柱子的真实应变, 柱子挠度变化很小, 仅在 3% 之内。

4) 从焊接完成到完全冷却, 各构件的应变和位移几乎没有变化。

从有限元分析可以看出, 当结构在带应力焊接时, 对于结构宏观位移的影响很小, 无论是梁还是柱的变形增量都很小, 基本可以忽略不计。实际焊接产生的热量对于焊缝附近的应力有比较大的影响, 但是这种影响范围较小, 其作用仅是局部的, 因此焊接对于构件整体受力情况影响较小。

参考文献

- [1] 陈楚, 汪建华, 罗宇. 轴对称热弹塑性应力有限元分析在焊接中的应用[J]. 焊接学报, 1987, 8(4): 19-203.
- [2] 刘钟秀, 芦志涛, 徐忠良. 焊接应力与变形产生的原因及控制方法[J]. 科技创业家, 2011(3): 186.
- [3] 苏智良, 李红山. 建筑钢结构焊接应力变形控制[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(18): 1623-1623+1788.
- [4] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.