

超高层建筑塔冠悬挑钢桁架体系施工关键技术研究

周生惠 汤从洋 吴同

上海建工二建集团有限公司 上海 200080

【摘要】：近年，人们对超高层建筑美观及使用功能追求提升，悬挑钢桁架结构因能满足此需求而备受青睐，但因其超高超重，施工复杂。本文以桃浦606项目T1塔楼塔冠悬挑钢桁架施工为例，研究悬挑钢桁架体系施工关键技术，根据结构特点、施工难度和项目实际情况，确定钢桁架施工工艺、桁架分段原则，提出桁架层施工总体流程。项目采取支撑胎架法、高空散装法、工厂预拼装法等措施保证现场安装质量与安全，还采用有限元软件Midas gen进行建模施工分析，确保整体结构施工安全可靠。本文施工技术和项目施工经验对类似项目有借鉴意义。

【关键词】：超高层塔冠；超高层悬挑钢桁架；悬挑桁架卸载；施工模拟

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.082

1 引言

随着超高层建筑普及，超高层造型美观及使用空间要求提高，顶部塔冠结构渐趋异型、多样、复杂。为追求大空间，塔冠常采用悬挑钢桁架结构。但施工中，钢结构桁架层形成完整结构前受力与变形复杂，需提高施工工艺，保证现场施工质量以达设计要求。

本文依托桃浦智创城606地块商办项目，该项目33层采用无柱悬挑钢桁架结构，桁架材质高、板超厚，自重大、规格大。因吊装机械起重能力和高空操作限制，将钢桁架上下弦拆解成片状吊装单元，用高空散装法拼装。为保证安装精度和压缩变形，精细设计施工流程，采取临时支撑胎架措施，优化厚板焊接工艺，用计算机有限元模型分析施工变形，桁架形成完整结构后对胎架分级精确卸载，确保结构质量和施工安全。

2 工程概况

桃浦智创城606地块商办项目位于上海市普陀区桃浦镇，项目总占地面积269891.68平方米，由三座办公塔楼、9座多层商业办公群楼、地下二层车库组成，其中T1办公塔楼担纲桃浦中央绿地的中轴地标。

T1塔楼悬挑钢桁架位于34层楼面，由8榀桁架结构组成，其分为4榀悬臂桁架和4榀环形桁架，悬臂桁架从核心筒内穿过，最长悬挑长度为10.85m，核心筒内设置4根立柱下插进核心筒剪力墙中，核心筒内桁架跨度为22.70m。桁架总重580吨。

钢桁架采用钢材型号为Q355B、Q420GJC；，其中最大板厚为8cm。悬臂钢桁架上下弦为箱型截面、环形桁架上下弦为H型截面；钢桁架位于高空159m处，施工复杂，施工难度较大。

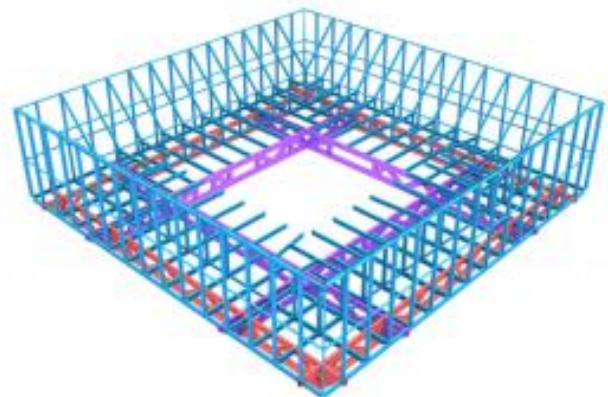


图1 塔冠模型示意图

3 悬挑钢桁架施工重难点分析

3.1 钢桁架自重大，需进行合理分段

本项目钢桁架结构复杂，工程体量大且安装高度高。施工现场塔吊吊装能力有限，钢桁架需要根据起重机械性能要求及运输能力进行合理分段。

3.2 悬挑钢桁架安装精度控制要求高

本项目钢结构悬挑桁架是该楼层主要受力结构，整体结构复杂，内部杆件错综交叉，且杆件的安装精度会影响其他杆件的安装和后续施工。同时，钢结构自身重量和基础变形等因素均会导致钢结构收缩变形。因此，通过模拟施工变形分析结合计算结果，减弱竖向构件压缩变形对安装精度的影响是本工程的重难点^[2]。

3.3 悬挑钢桁架安装完成后安全卸载

本项目悬挑钢桁架安装采用临时胎架支撑，在胎架拆除阶段，已安装完成悬臂桁架会因为自身结构自重而下挠，每个胎架卸载点受力和传力途径比较复杂，如果没有组织卸载，可能

会出现桁架因为应力集中导致的变形过大的问题,影响结构安全。

4 悬挑钢桁架施工流程

塔冠桁架钢结构平面施工时,本工程结构特征及钢结构施工特点,现场平面布置分为核心筒内桁架施工阶段、外框塔冠桁架施工阶段,施工共2个阶段。T1塔楼顶部塔冠桁架安装施工,按照“核心筒内悬臂桁架施工安装先行,外部环形桁架安装随后,桁架其他钢梁安装跟随。”的施工顺序进行。塔冠桁架共计8榀桁架,桁架按照塔吊性能高空散拼进行安装。核心筒悬臂单榀桁架从中间断开分为12节进行“高空散装拼装”吊装。单榀环形桁架采用“分段加工厂拼装焊接出厂,现场高空分段拼装吊装”,分为8节,高空进行分段拼装安装。

核心筒内桁架及混凝土施工阶段:33层-34层之间层高为8m,核心筒剪力墙分两段进行浇筑施工,先浇筑施工至核心筒内桁架下方1m处,在已浇筑完的剪力墙上方设置临时支撑,然后再安装核心筒内桁架,桁架安装完成后,拆除临时支撑,绑扎剩余剪力墙钢筋,浇筑第二段混凝土。

外框桁架施工阶段:外框桁架钢结构随外框钢柱钢梁安装进度进行施工,外框桁架由钢结构钢梁构件和钢桁架构成。外框安装完成33层楼面后,在外框33层楼面上设置临时支撑,进行外框桁架结构的安装,根据塔吊性能,环形单榀桁架分为4~6段,采用“散装+分段”的方式进行吊装。

5 施工模拟分析

模拟分析采用有限元软件Midas gen进行建模分析,通过计算分析得出塔冠钢桁架各施工步骤中的应力及变形情况。塔冠钢桁架施工过程中,桁架杆件最大变形和杆件最大应力均出现在桁架卸载完成胎架拆除后。

桁架卸载完成胎架拆除后,标准组合下,由位移图可知,最大位移值为39.94mm。

$39.94\text{mm} < 21850/400 = 54.62\text{mm}$,满足《钢结构设计标准》GB50017-2017要求。

桁架卸载完成胎架拆除后,基本组合下,由应力图可知,构件的最大应力比为0.29,满足《钢结构设计标准》GB50017-2017要求。

6 钢桁架与混凝土剪力墙组合施工

该项目悬臂桁架从核心筒内穿过,核心筒内设置4根立柱下插进核心筒剪力墙中,钢柱向下延伸4m,向上延伸1m。核心筒内桁架跨度为22.70m。该层核心筒高度8m,分两次浇筑,先浇筑施工至核心筒内桁架下方1m处,在已浇筑完的剪

力墙上方设置临时支撑,然后再安装核心筒内桁架。校正完成后,绑扎第二段剪力墙钢筋,拆除临时支撑,浇筑混凝土。

6.1 施工流程

安装剪力墙内劲性柱→绑扎第一段剪力墙钢筋→浇筑混凝土→吊装核心筒内钢桁架→校正后焊接固定→绑扎第二段剪力墙钢筋→拆除临时支撑→浇筑第二段混凝土。

6.2 内埋钢柱安装

待32层核心筒混凝土强度达到后,安装剪力墙内钢柱,通过地脚螺栓与核心筒连接。内埋钢柱向下延伸4米,向上延伸1米,立柱施工完成后进行33层钢筋混凝土施工。

6.3 核心筒内桁架拼装

临时支撑设置完成后,先进行桁架柱安装,随后从南侧开始顺时针吊装桁架。各构件吊装至指定位置后进行测量定位,通过千斤顶进行调整,符合要求后,进行焊接固定。同时为防止桁架倾覆,于桁架安装时,采用BOX300*300*10*10刚性方管斜支撑进行支撑,在核心筒桁架整体拼接并焊接完成后,即可拆除。

6.4 核心筒剪力墙施工

钢桁架安装校正完成后,拆除临时支撑,绑扎剪力墙钢筋。钢桁架按深化要求预留灌浆孔保证混凝土浇筑密实。钢桁架与剪力墙钢筋通过焊接及预留套筒形式有效连接。钢筋验收合格后封板浇筑混凝土。

7 悬挑钢桁架安装精度控制措施

7.1 构件出场前预拼装保证施工精度

为确保现场安装精度,所有钢桁架构件在出厂前均需完成加工厂内整体预拼装流程。针对多腹板式钢桁架截面高度显著大于宽度的结构特性,创新采用水平侧卧拼装工艺:通过将桁架主体沿地面横向放置完成地面组合作业,相较传统直立拼装方式,该技术可减少78%的高空作业量,施工安全性提升42%,同时实现毫米级拼装定位误差控制与起拱值精准调节,满足《钢结构工程施工质量验收标准》中关于复杂空间桁架的形位公差要求。

7.2 厚板焊接质量控制

悬臂钢桁架现场焊接作业包括:桁架箱型钢柱对接、H型钢梁对接、桁架箱型钢梁对接。焊接方式为:横焊、平焊、立焊。焊缝形式主要为全熔透焊缝,焊缝质量等级要求达到一级。钢构件材质主要为Q355B、Q355GJC、Q420GJB、Q420GJC,最大对接板厚为80mm。

在室外施工,当环境温度较低(低于 0°C)、环境风速较大(焊条电弧焊时,风速大于 8m/s ;气体保护焊时,风速大于 2m/s)、下雪或下雨等天气,必须在焊接区域设置防护棚,以提高施焊环境温度,并且防风防雨防滑^[1]。

针对钢桁架焊接工艺控制,采用双焊工同步对称分段逆向焊接技术,对腹杆焊缝实施分层堆焊工艺:每道焊缝按多层多道焊顺序施焊,各焊道接头错位间距 $\geq 50\text{mm}$,单层焊道完成后立即进行清渣检查,缺陷消除后方可继续堆焊;腹杆端部对接接头采用四角包绕焊工艺(绕焊长度 $\geq 50\text{mm}$),严格遵循"错时焊接"原则(相邻接头焊接间隔 ≥ 2 小时),焊接完毕后,采用岩棉被保温缓冷至环境温度(降温速率 $\leq 15^{\circ}\text{C/h}$),全过程符合GB 50661-2011《钢结构焊接规范》第8.6条工艺要求。

7.3 桁架低扰动分批卸载技术

在临时支撑卸载前,监理单位验收合格后,方可进行临时支撑拆除。支撑胎架拆除是悬臂桁架受力转换过程,为保证结构变形可控及卸载安全,卸载严格遵循"分批卸载,逐级操作"的卸载原则,每一级整体卸载数值 5mm ,待结构监测数据稳定后,再进行下一级卸载操作^[3]。

8 实施效果检验

根据现场实际施工变形值与计算机有限元模型理论变形值两者对比示,第一阶段卸载过程中实测最大位移值为 30.10mm ,模拟施工中最大变形值为 30.13mm ,两者相差 0.03mm ;第二阶段卸载过程中实测最大位移值为 31.11mm ,模拟施工中最大变形值为 31.13mm ,两者相差 0.02mm ;第三阶段卸载过程中实测最大位移值为 29.86mm ,模拟施工中最大变形值为 29.89mm ,两者相差 0.03mm 。各阶段实际较理论略有降低,理论与实践变形值均在规范范围内。

参考文献:

- [1] 涂家豪,纪晓龙,王路,等.悬臂钢桁架的临时支撑胎架安装与拆除工艺[J].建筑施工,2020,42(07):1197-1199+1207.
- [2] 万炜凡.高层大悬挑钢桁架结构关键施工技术研究[D].华南理工大学,2019.
- [3] 谢惠庆,大悬臂钢桁架结构高空施工综合技术研究.四川省,成都市第四建筑工程公司,2015-07-14.

通过有限元模型对施工流程进行模拟分析,变形最大位移值为 39.94mm ,施工中吊装顺序优化、低扰动分段卸载等技术举措实施后,最终实测桁架最大变形值为 32mm ,比预估降低 7.94mm 。



图2 塔冠施工完成现场照片

本项目塔冠结构顺利施工完成,通过桁架变形监测数据、现场实施质量以及悬臂桁架安全实施三个方面可以有效的证明本方案所提及的各项施工技术对超高层悬臂桁架安装有着很好的指导作用。

9 结语

本文以桃浦606项目T1塔楼塔冠悬臂钢桁架施工为研究背景,结合该项目的施工特点详细的介绍了该项目悬臂钢桁架施工流程、桁架吊装单元划分、临时胎架设计施工等多项施工举措,并总结出临时支撑优化设计、临时支撑分级卸载多项悬臂钢桁架施工关键技术措施。同时利用计算机有限元分析,最终保证T1塔楼塔冠保质保量的顺利实施。本文所述的各项施工技术合理有效,对其他类似项目有着很好的借鉴意义。