

DOI: 10.7672/sgjs2026080046

# 高耸钢结构塔式起重机安装关键技术

段宇民, 寮涵博, 罗嘉迪

(陕西建工第五建设集团有限公司, 陕西 西安 710032)

**[摘要]** 以西安丝路欢乐世界地标塔工程为依托, 探讨高耸钢结构塔式起重机安装过程中的关键技术问题。通过分析工程结构特点, 确定合理的设备选型和吊装方案, 重点对 ZSL750X-50t 型动臂式塔式起重机的附墙安装进行研究。采用有限元模型对主体钢结构与塔式起重机在风荷载作用下的受力性能进行模拟验算, 验证施工安全性, 并提出针对性的加固方案。研究表明, 塔式起重机附着部位为圆柱体时, 弧形附墙焊接连接与 U 形端板分离式连接方式能有效提升塔式起重机附墙的稳定性和安装精度。

**[关键词]** 钢结构; 塔式起重机; 风荷载; 安装; 连接

**[中图分类号]** TU391

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)08-0046-07

## Key Installation Technology of Tower Crane for High-rise Steel Structure

DUAN Yumin, LIAO Hanbo, LUO Jiadi

(SCEGC No. 5 Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** Based on Xi'an Silk Road Happy World Landmark Tower project, the key technical problems in the installation process of tower crane for high-rise steel structure are discussed. By analyzing the characteristics of the engineering structure, the reasonable equipment selection and hoisting scheme are determined, and the wall attached installation of ZSL750X-50t boom tower crane is mainly studied. The finite element model is used to simulate and check the mechanical performance of the main steel structure and tower crane under wind load, which verifies the construction safety, and the targeted reinforcement scheme is put forward. The research results show that when the tower crane attachment part is a cylinder, the arc wall attachment welding connection and U-shaped end plate separation connection can effectively improve the stability and installation accuracy of the tower crane attachment wall.

**Keywords:** steel structures; tower cranes; wind load; installation; connection

### 0 引言

近年来, 国内外陆续兴建了许多形态各异的高耸钢结构(也称塔桅结构)<sup>[1]</sup>。这类空间结构设计兼具美学与功能性, 既能满足建筑的观赏性需要, 又能满足建筑的功能要求。但作为独特的空间钢结构, 其对垂直运输机械的选择提出了一定挑战, 既要满足吊装要求, 又要保证施工安全可靠<sup>[2]</sup>。

对于塔式起重机, 现有研究多针对其自身的受力特性<sup>[3-4]</sup>, 也有部分学者研究了其对主体结构的影响, 对结构加固问题进行了分析<sup>[5]</sup>。然而, 对于空间高耸钢结构塔式起重机的安装技术, 现有研究

仍较少。

本文结合西安丝路欢乐世界地标塔(见图1)工程, 对高耸钢结构塔式起重机安装过程中遇到的关键问题进行分析与总结, 为类似项目提供参考。

### 1 工程概况

西安丝路欢乐世界地标塔(简称“地标塔”)项目为全钢结构异形塔, 总体包括内外筒网壳、顶部莫比乌斯环、塔裙摆桁架及丝带, 如图2所示。主体结构采用筒中筒内外网壳+内筒框架联系杆结构体系, 楼面结构采用钢筋桁架楼承板+混凝土组合楼板。项目主体地下2层, 地上20层, 建筑总高度为139.21m。

### 2 总体吊装方案

根据工程结构特点, 并综合考虑施工的便利性

[作者简介] 段宇民, 高级工程师, 国家一级注册建造师, E-mail: 704099812@qq.com

[收稿日期] 2025-10-18

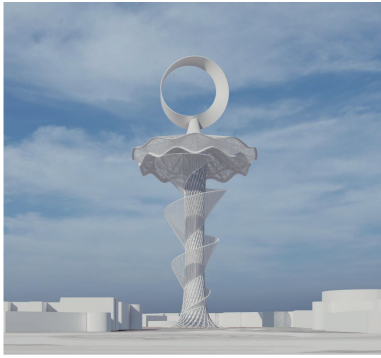


图1 丝路欢乐世界地标塔

Fig. 1 Silk Road Happy World Landmark Tower

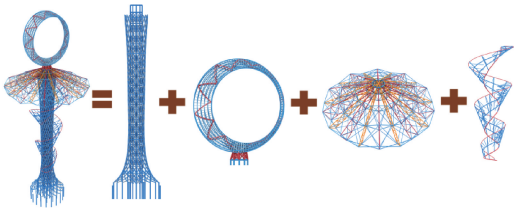


图2 丝路欢乐世界地标塔总体组成

Fig. 2 Overall composition of Silk Road Happy World Landmark Tower

和可靠性,确定丝路欢乐世界地标塔各组成部分的施工方法为:①地下室钢结构(-7.600~±0.000m),采用2台240t汽车式起重机进行钢柱吊装作业;②内外筒结构(±0.000~100.210m),采用1台ZSL750X-50t型动臂式塔式起重机作为主要吊装设备,同时采用1台W6012-6A型平臂式塔式起重机进行散杆补装;③莫比乌斯环(100.210~139.210m),施工前拆除W6012-6A型平臂式塔式起重机,直接采用ZSL750X-50t型动臂式塔式起重机进行8个分块的交替安装;④塔裙摆桁架结构为仅在内侧支撑的大悬挑轮辐式桁架结构(85.069~100.200m),采用液压同步提升装置进行塔裙摆桁架整体提升施工,提升到位后于外筒顶部进行固定;⑤丝带(17.245~87.080m)采用1台160t汽车式起重机进行吊装。具体施工步骤如表1所示。

ZSL750X-50t型动臂式塔式起重机外形尺寸和主要性能参数如图3所示,塔式起重机臂长为50m,平面布置应考虑以下因素:①塔式起重机起重能力分布合理,需要地面辅助机械少;②塔式起重机布置与平面结构无冲突,避免出现施工死角;③塔式起重机拆解和顶升所受影响和制约小;④动臂式塔式起重机和平臂式塔式起重机交叉作业影响;⑤塔式起重机附着部位应安全可靠<sup>[6]</sup>。

因平臂式塔式起重机平衡臂长度大于动臂式塔式起重机的平衡臂长度,为保证塔式起重机回转

表1 施工步骤

Table 1 Construction procedure

步骤	施工内容
1	进行地下室钢结构吊装
2	结构施工至±0.000,动臂式塔式起重机和平臂式塔式起重机安装完毕
3	安装内筒前2个分段与外筒钢柱
4	安装内筒第3分段与外筒第2分段
5	内筒与外筒持续向上交替安装,内外筒安装完毕
6	拆除平臂式塔式起重机,安装莫比乌斯环支座
7	安装莫比乌斯环前2个分块,并搭设临时支撑
8	莫比乌斯环其余分块安装,莫比乌斯环安装完毕
9	拆除动臂式塔式起重机,进行塔裙摆桁架整体提升作业
10	进行丝带结构施工,钢结构安装完成
11	进行膜结构安装,整个结构安装完成

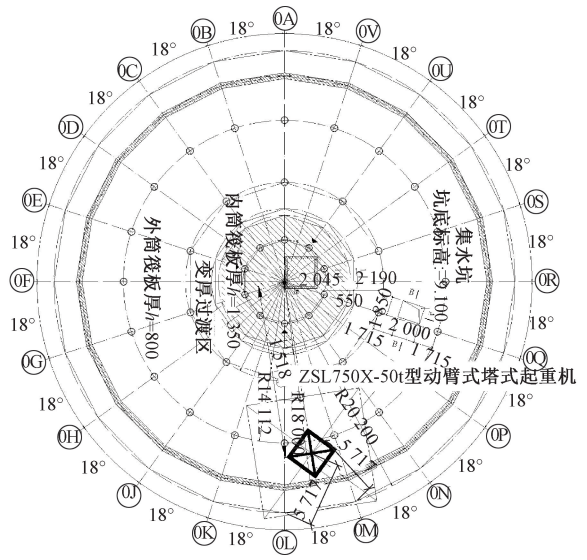


图3 塔式起重机定位

Fig. 3 Tower crane positioning

范围不超出项目红线,避免侵占市政道路,且与周围建筑保持安全距离,将平臂式塔式起重机布置在地标塔较为空旷的北侧。同时,为了降低塔式起重机交叉作业的影响,并根据工程结构特点、现场施工条件,综合考虑安全性、经济性和吊装效率,确定将ZSL750X-50t型动臂式塔式起重机布置于地标塔南侧,塔式起重机中心距地标塔钢结构中心15187mm,距①④轴线西5717mm、①④轴线偏东5717mm。主体钢结构安装过程中,为消除动臂式塔式起重机和平臂式塔式起重机的碰撞风险,要求动臂式塔式起重机的安装高度至少高于平臂式塔式起重机6m,同时明确划分各自的吊装区域和工作范围,指定明确的避让规则,并安装限位器与防碰撞系统确保主体钢结构吊装作业安全。

内筒地上分为7个阶段(见图4),每个阶段有3个吊装分段(每个分段由主杆及之间的联系杆组成,3个分段主杆数量分别为4,3,3根),吊装单元

分段最大长度为 15.3m,最大质量为 30t。塔式起重机考虑 15~20m 作业半径,20m 半径时起重量为 44.1t>30t,满足吊装要求。

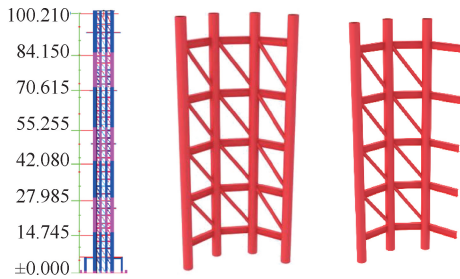


图 4 内筒拆分模型(单位:m)

Fig. 4 Inner cylinder split model(unit:m)

外筒竖向分为 8 个吊装阶段(见图 5),每个阶段有 5 个吊装分段,每个吊装分段由 4 根主管及之间的腹杆组成。吊装分段长度约 12m,最大分段质量约 33.8t,吊装半径约 22m;最远吊装分段质量约 25.6t,吊装半径约 27m。塔式起重机考虑 22~27m 作业半径,根据线性插值法,最大吊重工况起重量为 39.8t>33.8t,最远吊装工况起重量为 30.6t>25.6t,满足吊装性能要求。

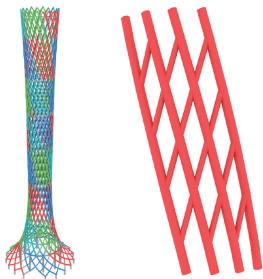


图 5 外筒拆分模型

Fig. 5 Outer cylinder split model

莫比乌斯环共分为 8 个吊装分段(见图 6),最大分段质量约 37.5t,此时吊装半径约 18m;最远吊装分段质量约 28t,此时吊装半径约 24m。塔式起重机考虑 18~24m 作业半径,最大吊重工况起重量为 50t>37.5t,最远吊装工况起重量为 35.5t>28t,满足吊装性能要求。

在总体钢结构安装过程中,ZSL750X-50t 型动臂式塔式起重机承担内外筒及莫比乌斯环(0.000~139.210m)的主要安装工作,是工程的主塔式起重机,本文对其安装及施工过程中遇到的问题进行总结分析。

### 3 塔式起重机安装

#### 3.1 塔式起重机基础安装

塔式起重机基础选用混凝土基础(见图 7),尺寸为 10m×10m×2.1m,基础顶标高和地标塔主体结

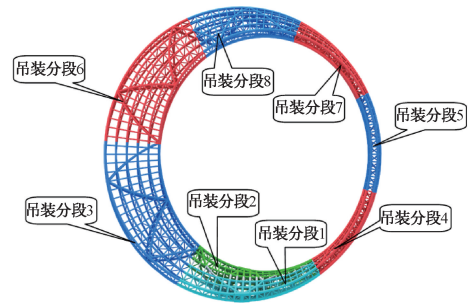


图 6 莫比乌斯环吊装单元划分及吊装顺序

Fig. 6 Mobius ring hoisting unit division and hoisting sequence

构的筏板基础顶标高齐平(-7.600m),基础下部天然地基满足地基承载力要求,无须进行额外地基加固处理。

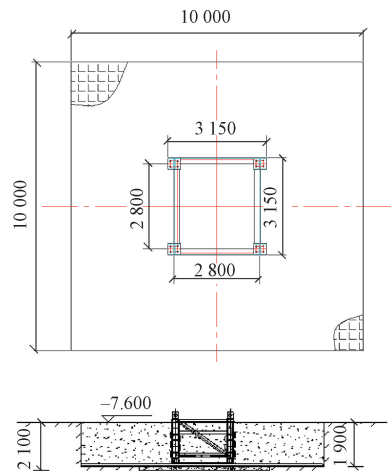


图 7 塔式起重机基础布置

Fig. 7 Layout of tower crane foundation

塔式起重机进行附墙连接前,塔身所受荷载均会传递到塔式起重机基础。塔式起重机工作状态(风力等级为 6 级,计算风速为 20m/s)和非工作状态(风力等级为 10 级,计算风速为 42m/s)时基础受力如表 2 所示。

表 2 塔式起重机基础所受荷载

Table 2 Load on the foundation of tower crane

风力等级/级	倾覆力矩/(kN·m)	水平荷载/kN	垂直荷载/kN
6	11 560	80	2 550
10	10 320	260	2 050

基于上述荷载和塔式起重机基础参数对塔式起重机基础进行抗倾覆、地基承载力、抗冲切、斜截面抗剪、配筋等力学分析,满足规范要求后方可进行塔式起重机基础施工和塔式起重机安装<sup>[7]</sup>。

#### 3.2 塔式起重机附墙安装

塔式起重机从自由高度 54m 依次顶升到最终高度 138m,需要安装 3 道附墙装置,附着于外筒主

管上, 附墙位置距  $\pm 0.000$  高度的距离分别约为 29.3, 59.3, 89.8m (见图 8)。

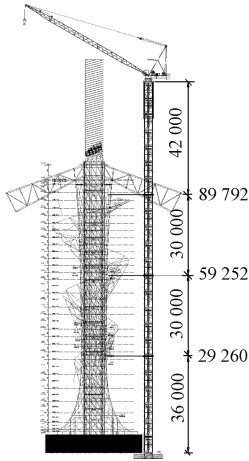


图 8 塔式起重机附墙位置

Fig. 8 Location of tower crane wall attachment

在塔式起重机的分析计算中, 通常仅考虑塔式起重机对所附着建筑物的作用力, 并将建筑物作为无反力提供的固定单元进行计算。

地标塔为异形超高钢结构, 在风荷载作用下会产生较大摆动位移。而塔式起重机通过附墙装置与塔身连接后, 两者均会对对方产生一定的作用力, 因此需对塔式起重机及地标塔进行整体模拟分析, 确保两者在施工过程中安全稳定。

### 3.2.1 荷载取值

露天工作的塔式起重机计算工作状态风荷载时, 认为所有高度上的计算风压不变, 计算非工作状态风荷载时, 应考虑不同高度上计算风压变化情况, 可沿高度方向划分成 10m 高等风压段, 也可取结构顶部的计算风压作为塔式起重机全高的定值风压。经试算, 取结构顶部 (138m) 的计算风压作为塔式起重机全高的定值风压进行仿真计算, 其结果较不利, 此处偏安全考虑, 按定值风压计算方法作为后续计算依据。考虑工作状态风力等级为 6 级, 非工作状态风力等级为 8~10 级。根据构件截面特性可估算风力等级、计算风压、风荷载对应关系, 如表 3 所示。

表 3 塔式起重机所受风荷载

Table 3 Wind load on tower crane

风力等级/级	计算风压/( $N \cdot mm^{-2}$ )	风荷载/( $kN \cdot m^{-1}$ )
6	330	1.21
8	670	2.45
9	910	3.35
10	1 220	4.48

塔式起重机所受弯矩主要组成为: ①工作状态时, 满载时起重力矩+起重臂最大吊重对应最大幅

度时的自重力矩+塔式起重机风荷载力矩-塔式起重机后部平衡力矩; ②非工作状态时, 仰角  $30^\circ$  时起重臂的自重力矩+吊钩的风荷载力矩+塔式起重机风荷载力矩-塔式起重机后部平衡力矩。塔式起重机所受竖向荷载 (除塔身外塔式起重机上部结构自重)、水平荷载 (塔式起重机上部结构在风荷载作用下产生的水平力)、弯矩如表 4 所示, 受力如图 9 所示。

表 4 塔式起重机所受竖向荷载、水平荷载、弯矩

Table 4 Vertical load, horizontal load and bending

moment on tower crane			
风力等级/级	竖向荷载/kN	水平荷载/kN	弯矩/( $kN \cdot m$ )
6	2 860	37	10 940
8	2 360	44	5 560
9	2 360	52	6 510
10	2 360	70	8 410

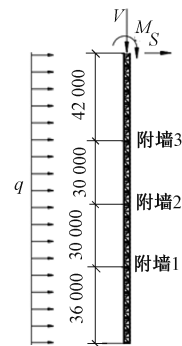


图 9 塔式起重机所受荷载

Fig. 9 Load on tower crane

### 3.2.2 模型验算

建立地标塔钢结构和塔式起重机结构整体有限元模型 (见图 10), 将荷载施加在塔身结构上。验算时, 恒荷载为地标塔钢结构和塔身自重; 活荷载有地标塔钢结构和塔身风荷载, 塔式起重机上部结构传至塔身的水平荷载、竖向荷载和弯矩。

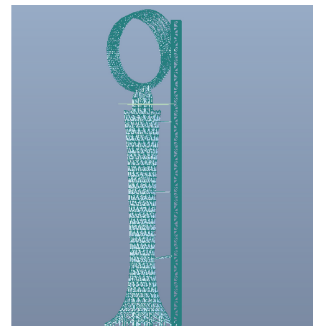


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

塔身处于独立状态的塔式起重机, 在额定起升荷载作用下, 起重臂根部连接处的水平静位移  $\leq 1.34h/100$  ( $h$  为起重臂根部连接处至直接支承整个

塔身的平面的垂直距离),此处表示塔式起重机悬臂高度 42m,则塔式起重机水平位移的极限值为 562.8mm。

工作状态且风力等级 6 级时,塔式起重机水平偏移量最大为 499.22mm<562.8mm(见图 11),地标塔钢结构最大应力比为 0.71<1(见图 12),均满足规范要求。其对应的计算风压为 330N/mm<sup>2</sup>,大于工程所在地西安 10 年重现期对应的风压(250N/mm<sup>2</sup>)。

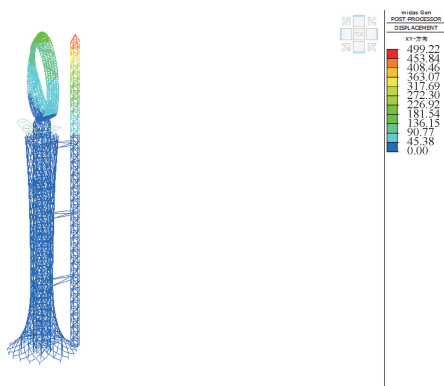


图 11 6 级风力水平位移(单位:mm)

Fig. 11 Horizontal displacement with level 6 wind force(unit:mm)

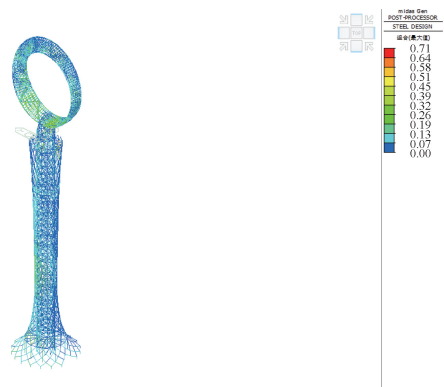


图 12 6 级风力应力比

Fig. 12 Stress ratio with level 6 wind force

非工作状态且风力等级 8 级时,塔式起重机偏移量 368.71mm<562.8mm(见图 13),地标塔钢结构最大应力比为 0.82<1(见图 14),均满足规范要求。

非工作状态且风力等级 9 级时,塔式起重机偏移量为 438.79mm<562.8mm(见图 15),地标塔钢结构最大应力比为 0.91<1(见图 16),均满足规范要求。其对应的计算风压为 910N/mm<sup>2</sup>,大于工程所在地西安 100 年重现期对应的风压(400N/mm<sup>2</sup>)。

非工作状态且风力等级 10 级时,塔式起重机偏移量 581.7mm>562.8mm(见图 17),地标塔钢结构最大应力比为 1.1>1(见图 18),均不满足规范

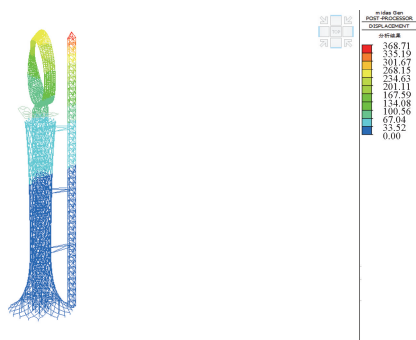


图 13 8 级风力水平位移(单位:mm)

Fig. 13 Horizontal displacement with level 8 wind force(unit:mm)

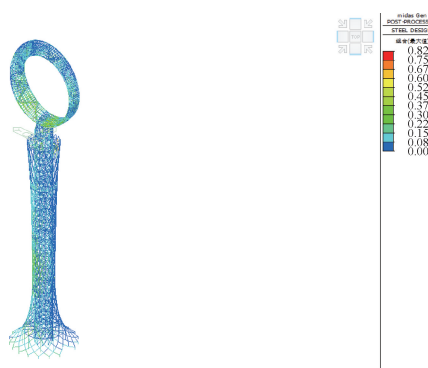


图 14 8 级风力应力比

Fig. 14 Stress ratio with level 8 wind force

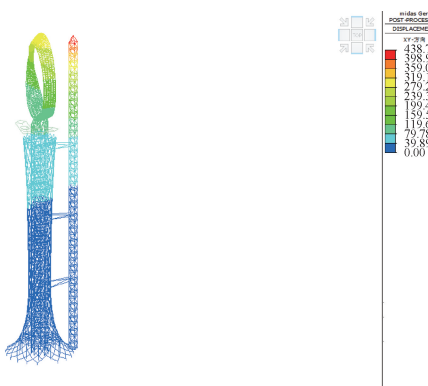


图 15 9 级风力水平位移(单位:mm)

Fig. 15 Horizontal displacement with level 9 wind force(unit:mm)

要求。

在工程施工过程中,采用全站仪对塔式起重机工作状态和非工作状态的偏移量进行监测,最大偏移量为 409.5mm<562.8mm,满足规范要求。

### 3.2.3 加固措施

由有限元分析可知,地标塔主体钢结构在塔式起重机附着部位处的应力比较大,为保证塔式起重机及主体钢结构受力稳定,塔式起重机附墙的外筒主管处采用 4 根  $\phi 299 \times 14$  圆管进行加固,4 根主管

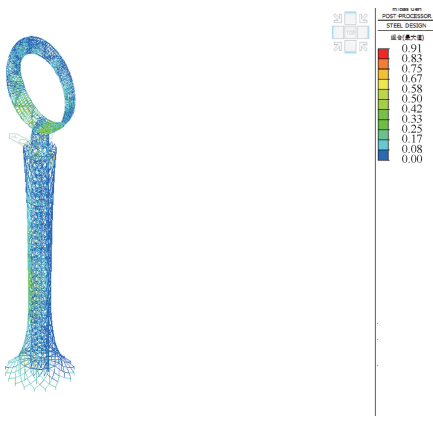


图 16 9 级风力应力比

Fig. 16 Stress ratio with level 9 wind force

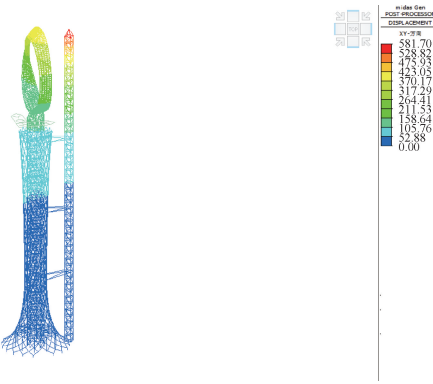


图 17 10 级风力水平位移(单位:mm)

Fig. 17 Horizontal displacement with level 10 wind force (unit:mm)

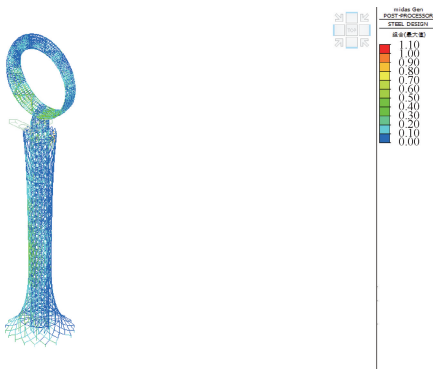


图 18 10 级风力应力比

Fig. 18 Stress ratio with level 10 wind force

一端连接外筒附墙位置,另一端分别与附墙位置处内筒上下楼层梁柱节点连接(见图 19)。同时,将内筒梁柱节点位置处的钢梁进行加宽,将原设计 H300×200×8×12 调整为 H400×200×10×14。

### 3.2.4 附墙连接装置设计

不同于传统“预埋螺栓+耳板组件”的附着方式,ZSL750X-50t 型动臂式塔式起重机附着应考虑以下因素:①地标塔主体结构杆件的截面类型多

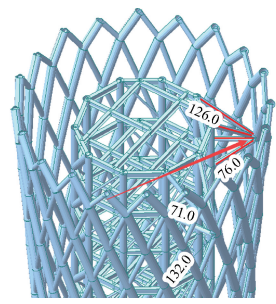


图 19 塔式起重机附墙加固措施

Fig. 19 Reinforcement measures for tower crane wall attachment

为圆管(圆柱体),非平面结构;②附墙件的张拉角度应满足设计要求;③附墙装置的设计应安全可靠;④附墙装置的安装应安全快捷。

结合工程结构特点,针对附墙连接装置的深化设计提出以下方案,如图 20 所示。

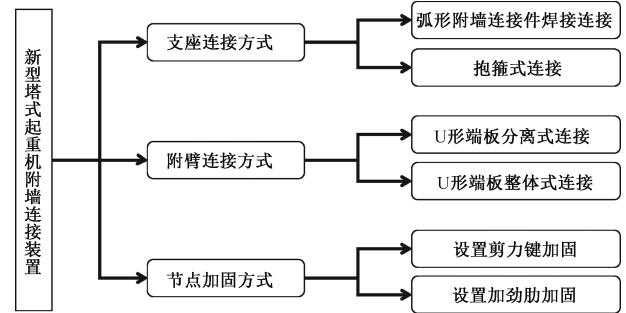


图 20 深化设计方案

Fig. 20 Detailed design scheme

对于弧形附墙连接件焊接连接(见图 21a),选用弧形附墙连接件,将弧形钢板采用四面围焊的方式焊接在钢管上。弧形连接钢板与外筒主管贴合处接触面积大,贴合密实,焊接连接方式整体完整性强、焊缝密度大,能承受较大施工荷载。对于抱箍式连接(见图 21b),抱箍内设置橡胶垫圈,采用螺栓将箍圈牢牢固定在竖向钢管上。抱箍连接方式对不同角度、不同大小钢管适应性差,安装偏差难调整,螺栓紧固在外部因素影响下易松动,抱箍结构的完整性不可控。因此,最终采用弧形连接件进行附墙连接。

对于 U 形端板分离式连接(见图 22a),U 形端板与弧形附墙连接件在地面通过销栓进行固定,形成组合件,组合件吊装至预定位置与主体结构焊接,塔式起重机附臂杆吊装至预定位置,端头与组合件端板焊接。分离式连接便于附墙连接件的角度调整,能达到预期效果,安装精度高。对于 U 形端板整体式连接(见图 22b),U 形端板与塔式起重机附臂杆端头在地面焊接固定成整体,整体吊装至

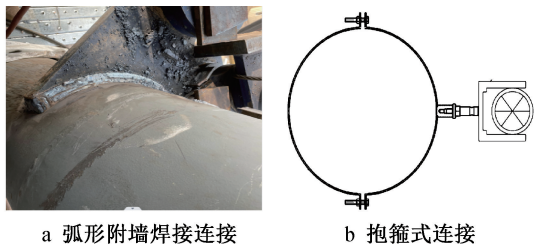


图 21 塔式起重机支座连接方式

Fig. 21 Connection mode of tower crane support

预定位置与弧形附墙连接件通过销栓连接。整体式连接安装精度稍差,如位置控制不当则需返工,费时费力。因此,最终选择 U 形端板分离式连接。

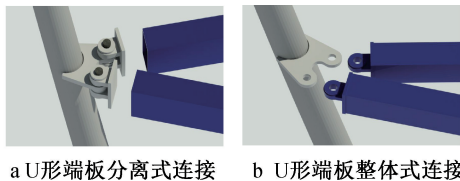


图 22 塔式起重机附臂连接方式

Fig. 22 Attachment arm connection mode of tower crane

对于设置剪力键加固(见图 23a),弧形附墙连接件与钢管焊接连接后,在端部、中部双面焊接剪力键。焊接剪力键时焊缝长度为 26cm,对钢柱和弧形附墙连接件损伤较小,易拆卸。对于设置加劲肋加固(见图 23b),弧形附墙连接件与钢管焊接连接后,在结合面通长双面焊接加劲肋。焊接加劲肋时焊缝长度为 46cm,并需根据钢管进行定制,焊接后对主体结构损伤较大。因此,最终采用剪力键加固。

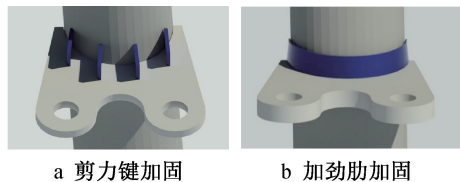


图 23 节点加固方式

Fig. 23 Joint reinforcement mode

确定最佳设计方案后,对附墙连接装置的材料、规格尺寸等参数进行进一步分析,并在力学计算复核通过后用于指导现场施工。

#### 4 结语

1)通过工序模拟,确定采用 ZSL750X-50t 型动臂式塔式起重机作为结构施工的主塔式起重机,满足不同工况下的吊装需求。

2)工作状态(6 级风力)和非工作状态(8,9 级

风力)塔式起重机变形和地标塔钢结构应力比均满足规范要求,且满足工程所在地 100 年重现期对应的风压要求;风力等级为 10 级时,塔式起重机变形和地标塔钢结构应力比均不满足规范要求。

3)针对风荷载的不利影响,通过加固外筒主管和优化内筒钢梁,提升附着部位的稳定性和安全性。

4)塔式起重机附着部位为圆柱体时,弧形附墙连接件焊接连接与 U 形端板分离式连接方式具有安装精度高、适应性强的特点,优于传统抱箍式和整体式连接方式。

#### 参考文献:

[ 1 ] 马人乐,梁峰,黄鑫.高耸钢结构施工方法的特点及发展[J].施工技术,2010,39(10):12-14,39.  
 MA R L,LIANG F,HUANG X. Construction characteristics and development of construction methods of steel high rising structures[J]. Construction technology, 2010, 39 ( 10 ): 12-14,39.

[ 2 ] 张猛,马人乐,梁峰,等.广电发射塔主吊装塔机安装施工技术[J].建筑机械,2009(6):78-81.  
 ZHANG M,MA R L ,LIANG F, et al. Construction technology of main tower crane used for broadcast and TV transmitting tower[J]. Construction machinery,2009(6):78-81.

[ 3 ] 张将,孙延龙,谢楠.内爬式塔吊临时支承竖向荷载分配系数研究[J].工业建筑,2021,51(9):161-165.  
 ZHANG J,SUN Y L,XIE N. Study on vertical load-distribution coefficients of temporary supports for internal climbing tower cranes[J]. Industrial construction,2021,51(9):161-165.

[ 4 ] 刘超.塔式起重机塔身钢结构损伤特征辨识方法研究[D].济南:山东建筑大学,2024.  
 LIU C. Research on the identification method of structural damage characteristics of tower crane mast [D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2024.

[ 5 ] 刘祥.某高层建筑施工塔吊基础改造与加固技术[J].建设机械技术与管理,2021,34(5):55-58.  
 LIU X. Reconstruction and reinforcement technology of tower crane foundation in construction of a high-rise building [J]. Construction machinery technology & management,2021,34(5):55-58.

[ 6 ] 徐爱水,李翠翠,张同波,等.塔式起重机布设典型问题与解决措施研究[J].施工技术,2021,50(9):96-98,116.  
 XU A S,LI C C,ZHANG T B, et al. Research on typical problems and solutions of tower crane layout [J]. Construction technology, 2021,50(9):96-98,116.

[ 7 ] 王晓敏,李江.复杂城市环境下大型塔式起重机基础设计与施工[J].施工技术,2021,50(17):28-33.  
 WANG X M,LI J. Design and construction of large tower crane foundation in complex urban environment [J]. Construction technology,2021,50(17):28-33.