

DOI: 10.7672/sgjs2025200029

某国际机场航站楼大悬挑大矢高网架施工技术

王建桥,许华姣,叶冬晨,丁毅,卢福生
(浙江精工钢结构集团有限公司,浙江 绍兴 312030)

[摘要] 针对西宁曹家堡国际机场航站楼钢屋盖高差大、南侧网架悬挑区受高架桥施工工作面干涉且存在大量铸钢节点等施工技术难题,开展创新性研究。针对钢结构旋转提升过程中的水平偏移问题,系统分析网架水平偏移机理,并提出理论模型及简化计算方法;针对施工工作面干涉问题,提出滑移-提升组合施工工艺,同时创新性地设计一种等强连接节点,通过延长焊缝搭接长度实现荷载分流,达到不同强度钢构件间的等强连接。通过有限元数值模拟和加载试验对理论模型和新型节点进行验证。结果表明:旋转提升网架水平偏移理论计算值与有限元分析结果吻合良好,偏差仅 6%;滑移-提升组合施工工艺有效解决了机场大悬挑区施工受高架桥施工工作面干涉的问题,确保了工程安全高效施工;新型连接节点满足等强连接要求,拉伸试件断裂点均发生在母材区域而非连接薄弱处。

[关键词] 机场;钢结构;屋盖;滑移;提升;焊接;数值模拟;试验

[中图分类号] TU745.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0029-07

Construction Technology of Large Cantilever and Large Height Difference Grid Frame for a International Airport

WANG Jianqiao, XU Huajiao, YE Dongchen, DING Yi, LU Fusheng
(Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312030, China)

Abstract: In response to the technical challenges of the steel roof of Xining Caojiapu International Airport, such as the large height difference of the steel roof, interference from the construction face of viaduct in the southern grid frame cantilever area, as well as a large number of cast steel joints, a series of innovative studies were carried out. Aiming at the problem of horizontal migration of steel structure in the process of rotating lifting, the mechanism of horizontal migration of grid frame is analyzed systematically for the first time, and the theoretical model and simplified calculation method are proposed. To address the interference problem of the construction face, a combined construction method of slipping-lifting was proposed. An innovative equal-strength cast steel joint was designed, which achieved load distribution by extending the weld lap length, thus realizing the equal-strength connection between steel components of different strengths. The theoretical model and the new type of cast steel joint were verified through finite element numerical simulation and loading tests. The results show that the theoretical calculation value of the horizontal migration of grid fame in the rotating lifting process is in good agreement with the finite element analysis results, with a deviation of only 6%. The combined construction method of slipping-lifting effectively solved the problem of interference from the construction face of viaduct in the construction of large overhang area of the airport, ensuring the safe and efficient progress of the project. The new connection joint meets the requirements of equal-strength connection in the specifications, and the fracture points of the tensile specimens all occurred in the base material area rather than at the connection weak points.

Keywords: airports; steel structures; roofs; slipping; lifting; welding; simulation; tests

[作者简介] 王建桥,资深交付经理,高级工程师, E-mail: wangjqiao@jgsteel.cn

[通信作者] 许华姣,工程师, E-mail: xuhuajiao@jgsteel.cn

[收稿日期] 2025-04-20

0 引言

伴随新型城镇化进程提速,大型公共建筑领域对大悬挑、大矢高自由曲面空间结构的工程需求显著增长。传统施工工艺如高空散装法、分区或累积提升法存在高空拼装高度大、焊接作业量占比高、累积提升误差放大效应显著等技术瓶颈。针对上述技术痛点,在北京大兴国际机场^[1]、西安咸阳国际机场^[2]、安庆西站枢纽^[3]、杭州西站枢纽^[4]等国家级交通枢纽工程中,创新应用旋转提升技术,通过三维空间姿态转换原理,将传统垂直吊装转化为平面旋转提升,实现了地面拼装→整体旋转→精准就位的技术跃迁。

1 工程概况

西宁曹家堡国际机场三期扩建工程新建 T3 航站楼工程建筑面积 15.8 万 m²,设计旅客吞吐量 1 622 万人次,地上 2 层、局部夹层,地下 1 层,最大建筑高度 44.7m。整个项目分为主航站楼(中央 C 区)、西指廊、北指廊及东指廊(见图 1),中央 C 区和指廊区下部为现浇钢筋混凝土框架结构,屋盖采用大跨空间钢网架结构;西连廊采用钢框架结构体系。鉴于部分施工区域网架高差较大,拟采用旋转提升安装方案。然而,由于拼装态与设计态不一致,在脱胎瞬间出现显著的水平偏移,脱离原拼装态,可能造成与邻近构件发生干涉碰撞,存在安全风险。为此,本文系统分析钢结构旋转提升过程中的网架水平偏移机理。同时,结合航站楼悬挑区施工受高架桥施工工作面干涉的难题,提出滑移-提升组合施工模式,并验证其在工程实践中的有效性。

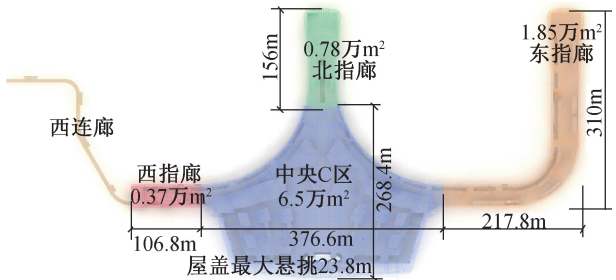


图 1 项目结构分布
Fig.1 Structural distribution of the project

此外,由于该项目屋盖自由曲面空间结构造型复杂,存在大量铸钢节点,面临铸钢节点与普通 Q355 钢焊接交接面强度不足的技术挑战。为克服该问题,创新性地提出一种新型铸钢件与高强钢间的等强连接节点,通过对低强度钢设置长坡口,延长焊缝搭接长度,实现荷载分流,进而实现不同强度钢构件间的等强连接。

2 钢结构旋转提升过程中结构水平偏移机理

张之浩等^[5]针对大跨异形曲面结构提出了基于最优化理论的单轴旋转法。拼装时,将该网架卧倒拼装,脱胎后,通过将每个提升吊点提升不同行程,使被提升结构缓慢旋转至设计姿态。然而,以往大量施工经验表明,旋转提升在脱胎瞬间会出现显著的水平位移,使旋转提升施工方法存在不可忽略的潜在安全风险。

本文针对此水平偏移问题提出了完整的理论模型及简化计算方法,以主航站楼屋盖旋转区为例进行验证分析,论证理论计算的准确性。所提出的计算模型可用于结构拼装姿态的分析及调整,从而减少脱胎时的水平位移,提高施工安全性。

2.1 旋转提升网架水平偏移问题

以图 2 为例阐述旋转提升过程中网架水平偏移问题,图中绿色部分表示钢柱,Z1,Z2,Z3,Z4 分别表示提升到位的结构设计态且位于设计标高、结构旋转至设计态、脱胎静置态及结构拼装态。

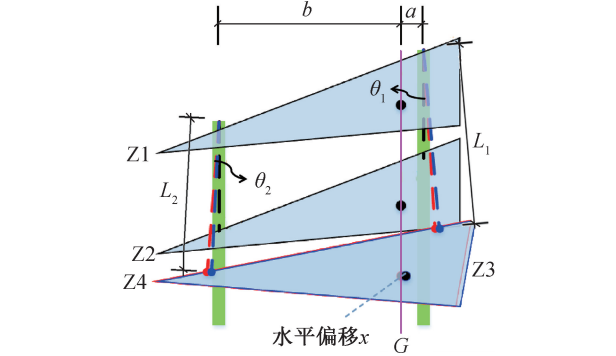


图 2 旋转提升全过程网架姿态变化
Fig.2 Posture changes of grid frame throughout the entire process of rotating lifting

旋转提升水平偏置计算参数如表 1 所示,由于脱胎态与拼装态高度接近,因此为便于计算,Z3,Z4 状态不考虑其在高度上的变化。

表 1 水平偏置计算参数							
Table 1 Horizontal offset calculation parameters							
状态	绳索拉力	绳索与垂直向角度	绳索长度	上提升点与网架设计态重心水平距离	水平偏移	网架自重	
Z4	F_1, F_2	θ_1, θ_2	L_1, L_2	a, b	x	G	
Z3	F'_1, F'_2	θ'_1, θ'_2					

脱胎后,网架发生水平位移,这是因为网架需在自重及提升钢索作用下处于受力平衡态。由此,列出结构受力平衡方程,如式(1)所示。该式中的方程组分别表示结构水平力平衡、竖向力平衡、以重心为支点的力矩平衡。

$$\begin{cases} F'_1\sin\theta'_1 - F'_2\sin\theta'_2 = 0 \\ F'_1\cos\theta'_1 + F'_2\cos\theta'_2 - G = 0 \\ (a + L_1\sin\theta'_1)F'_1\cos\theta'_1 - (b + L_2\sin\theta'_2)F'_2\cos\theta'_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

考虑到 θ'_1, θ'_2 较小, 因此对式(1)进行简化, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \cos\theta'_1 = 1 \\ \cos\theta'_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

由此可得:

$$\begin{cases} F'_1\sin\theta'_1 = F'_2\sin\theta'_2 \\ F'_1 + F'_2 = G \\ (a + L_1\sin\theta'_1)F'_1 = (b + L_2\sin\theta'_2)F'_2 \end{cases} \quad (3)$$

此外, 由几何关系可得:

$$\begin{cases} \sin\theta'_1 = \frac{L_1\sin\theta_1 - x}{L_1} \\ \sin\theta'_2 = \frac{L_2\sin\theta_2 + x}{L_2} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$\begin{cases} F'_1 \frac{L_1\sin\theta_1 - x}{L_1} = F'_2 \frac{L_2\sin\theta_2 + x}{L_2} \\ F'_1 + F'_2 = G \\ (a + L_1\sin\theta_1 - x)F'_1 = (b + L_2\sin\theta_2 + x)F'_2 \end{cases} \quad (5)$$

应注意式(5)方程组中, $\sin\theta_1, \sin\theta_2$ 为已知量, 其与结构旋转角度、拼装态与设计态距离相关。

根据式(5)可得:

$$\frac{b + L_2\sin\theta_2 + x}{a + L_1\sin\theta_1 - x} = \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{L_2\sin\theta_2 + x}{L_1\sin\theta_1 - x} \quad (6)$$

对式(6)作简化, 可得式(7)所示关于水平偏移量的一元二次方程, 并计算脱胎瞬时水平偏移量 x 。

$$(D - 1)x^2 + (E - A + C - BD)x + AE - BC = 0 \quad (7)$$

其中, $A = b + L_2\sin\theta_2, B = a + L_1\sin\theta_1, C = L_1\sin\theta_2, D = \frac{L_1}{L_2}, E = L_1\sin\theta_1$ 。

2.2 有限元计算验证

以主航站楼旋转区钢屋盖为例(见图3), 分析脱胎瞬时水平位移, 并与有限元计算结果进行比较。将表2、图4中参数代入式(7), 理论计算可得水平偏移量为-187.5mm, 方向向左。

由有限元计算结果(见图5)可知, 该分块4个角点水平位移分别为183.1, 201.5, 202.6, 209.8mm, 因此其平均水平位移为199.5mm, 与理论

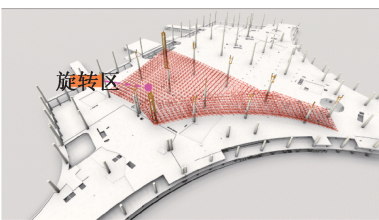


图3 旋转提升脱胎过程有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model for the process of rotating lifting and detachment from the jig

表2 脱胎瞬时水平偏置 x 计算参数

Table 2 Horizontal bias x calculation parameters for detachment from the jig

				mm
A	B	C	D	E
31 770. 8	42 279. 3	633. 4	1. 6	251. 3

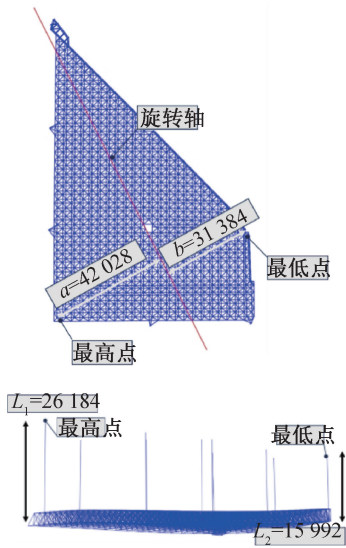


图4 网架旋转关键参数

Fig. 4 Key parameters of grid frame rotating

计算结果相差6%, 表明了理论计算的可靠性。

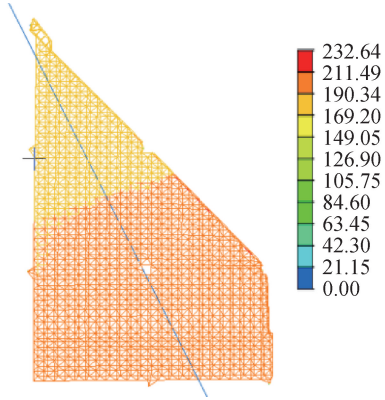


图5 旋转提升 x 向水平位移(单位:mm)

Fig. 5 x -horizontal displacement of rotating lifting process(unit:mm)

3 高架桥干涉环境下网架滑移-提升组合施工技术

主航站楼南侧网架存在大悬挑区,最大悬挑跨度为 23.8m。对于屋盖结构,该悬挑区起到“秤砣”作用,因此须与非悬挑区屋盖同步提升,在降低屋盖挠度的同时,可使屋盖受力与设计自重下基本一致。鉴于悬挑区以南区域正在进行高架桥施工(见图 6),为避免交叉作业干扰,创新性地采用滑移-提升组合施工工艺。

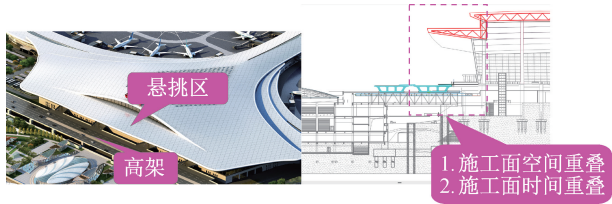


图 6 悬挑区施工受高架桥施工工作面干涉情况
Fig. 6 Construction interference of overhanging area by viaduct construction face

3.1 施工方案

滑移拼装区屋盖包括Ⓐ,Ⓑ轴间屋盖及Ⓐ轴以南屋盖两部分(见图 7)。Ⓐ,Ⓑ轴间屋盖下方 8.6m 楼板为洞口区域,南北宽 10.65m,Ⓐ轴以南屋盖为悬挑区域,最大南北宽度为 21.4m。

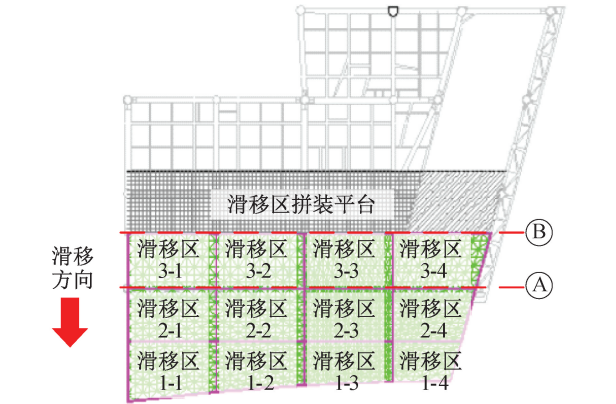


图 7 滑移单元分区
Fig. 7 Partition of slipping units

滑移拼装时,以Ⓑ轴以北 12m 范围以下 8.6m 楼面作为拼装平台,南北方向屋盖钢结构共分为 3 个拼装批次,屋盖宽度依次为 11.4,10,10.65m。东

西方向滑移屋盖于钢柱处分开。

滑移区采用累积滑移施工,分为 3 个批次:第 1 批次,滑移区 1-(1~4);第 2 批次,滑移区 2-(1~4);第 3 批次,滑移区 3-(1~4)。施工中同一批次滑移区于滑移拼装平台上同时拼装,并滑移推出,不同批次间按滑移批次 1~3 的顺序依次拼装与滑出。

滑移施工时,第 1 批次屋盖于拼接楼面上拼装完毕,沿滑移轨道向南滑动约 12m 脱离楼面至Ⓐ,Ⓑ轴间区域。此时,进行第 2 批次屋盖拼装,并与第 1 批次屋盖连接,拼装完成后再次向南滑出 10m。此时滑移区 1 滑出至楼板外侧悬挑区可进行补杆。随后进行第 3 批次屋盖拼装,并与第 2 批次屋盖连接,拼装完成后一并向南滑移至指定位置正下方,然后进行剩余东西滑移区单元间补杆作业。

3.2 带悬挑区提升的必要性

悬挑区网架与结构内网架形成相对应的平衡体系,为保障建筑施工过程整体稳定性和安全性,悬挑区网架与非悬挑区屋盖同步提升作业具有至关重要的意义。在减小屋盖挠度的同时,可使屋盖受力与设计自重下基本一致。

根据有限元分析结果(见图 8),带悬挑区提升时,结构内区域网架最大挠度下降 17%,最大结构应力比下降 0.07,进一步证明了带悬挑区同步提升作业的必要性。

3.3 滑移施工措施

由于悬挑区施工受高架桥施工工作面干涉,采用先滑移后提升的施工工艺,克服无工作面的不利施工因素。

每个屋盖滑移单元下设 2 条滑移轨道,滑移轨道与杆件延伸方向保持一致。滑移轨道连接Ⓑ,Ⓐ轴处混凝土结构及额外布置的支撑架。在Ⓐ,Ⓑ轴间布置 1 排支撑架,在Ⓐ轴以南悬挑区域布置 1 排支撑架,滑移轨道与支撑架布置如图 9 所示。滑移轨道结构在屋盖钢结构滑移过程中起到承重、导向和横向限制支座水平位移的作用。

铺设轨道时,可在滑移方向上弹出轴线,然后根据此轴线分开设 2 根定位分轴线,以控制滑移

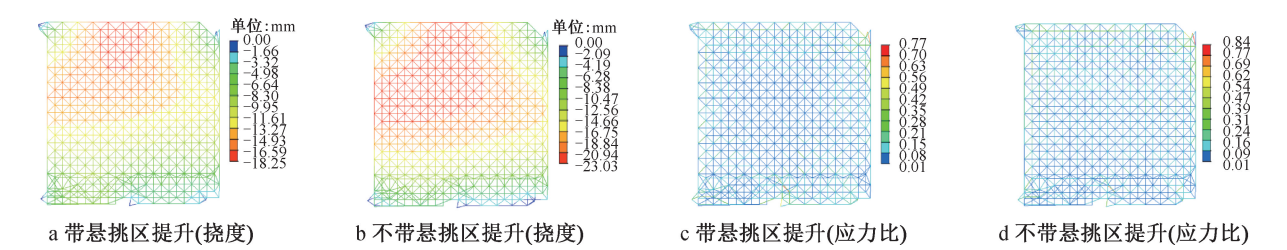


图 8 计算结果对比
Fig. 8 Comparison of calculation results

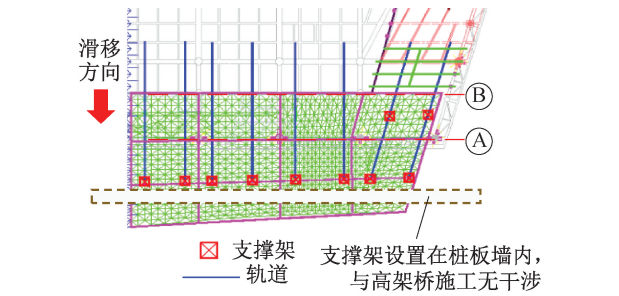


图9 滑移轨道与支撑架布置

Fig. 9 Layout of slipping tracks and support frames

轨道安装精度。现场滑移施工如图 10 所示。



图 10 现场滑移施工

Fig. 10 Sliding construction on site

4 不同强度钢材焊接等强连接技术

因主航站楼屋盖独特的复杂造型设计,在结构构造上采用铸钢件作为多杆交汇处的核心连接节点。选用 G20Mn5QT 为主要铸钢材料,其屈服强度标准值与常规 Q355 钢相近,但由于成型工艺等因素影响,其实际设计强度显著降低。这一特性使工程中必须重点解决 G20Mn5QT 铸钢件与 Q355 钢间的等强焊接连接技术难题,以确保整体结构安全可靠。针对这一技术难点,马洁烽等^[6]提出在钢构件接头处设置封头板,并通过端铣技术加大钢构件一侧连接焊缝厚度,以此实现铸钢件与钢构件间的等强连接,但该技术施工工艺复杂,质量控制较难保证。

为攻克上述难题,设计如图 11 所示等强连接节点构造形式。该做法是通过铸钢件管壁外伸一段,从而增加焊缝连接长度,起到分散荷载作用,从而使铸钢件与圆管接触面达到等强连接。该构造形式所采用的焊缝填充材料强度需与圆管壁保持等强,即与高屈服强度钢材强度匹配。

4.1 有限元弹性分析

通过分析焊缝受力,可获取传力路径 1 和传力路径 2 (见图 11)。为深入探究 2 种传力路径荷载分担特性,借助有限元分析方法,将圆管壁厚设为 t 、铸钢件壁厚为 $2t$ 、圆管及铸钢件长度为 $8t$,分别考虑当铸钢件外伸段长度为 $0.5t, t, 2t, 3t$ 时焊缝受力

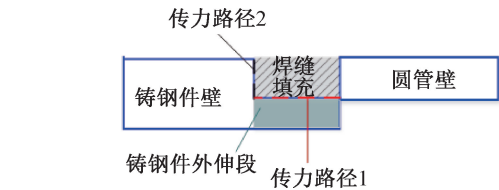


图 11 等强连接设计

Fig. 11 Design of equal strength connection

情况。

边界条件及荷载施加如下:圆管与铸钢件两侧各设置有参考点,参考点与其端面采用 Coupling 连接。焊缝各端面与圆管、铸钢件采用 Tie 连接。铸钢件端部参考点为固定点,圆管柱端点设置向外的位移荷载,有限元分析模型如图 12 所示。

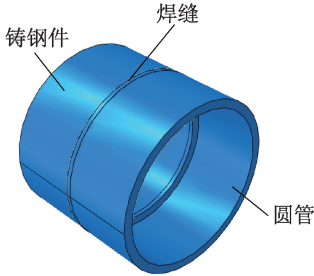


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

不同位置焊缝受力如表 3 所示,可以看到铸钢件端部传递荷载占比大,表明荷载主要通过路径 2 传递。此外,随着焊缝宽度增加,荷载传递到焊缝端部的荷载占比逐渐减小,表明通过传力路径 1 传递的荷载逐渐增大。

表 3 焊缝受力占总荷载比值(弹性分析)

Table 3 Ratio of the force on the welding line to the total load (elastic analysis)

位置	外伸段长度			
	0.5t	t	2t	3t
圆管端部	0.95	0.96	0.97	0.96
焊缝中部	0.86	0.85	0.78	0.75
铸钢件端部(传力路径 2)	0.84	0.78	0.73	0.66

根据计算结果,若要达到等强连接,不同铸钢件与圆管材料应选择不同铸钢件外伸段长度。该长度取值与材料强度相关,以铸钢件材料为 ZG300-500H、圆管材料为 Q355 为例,二者对应的屈服强度设计值分别为 235,305MPa,此时铸钢件端部受力占比 $<0.77(235/305=0.77)$ 。结合表 3 计算结果,当铸钢件外伸段长度为 $2t, 3t$ 时,均可满足等强连接的要求。

4.2 有限元塑性分析

在结构分析中,需充分考虑构件受力时的塑性

发展。因为随着荷载增加,结构内部发生内力重分布,这一动态过程显著影响结构整体性能。鉴于此,为更精准地模拟实际结构力学行为,在有限元模型中引入材料塑性分析模块,设定圆管屈服强度为 305MPa,铸钢件屈服强度为 235MPa,材料模型为理想弹塑性。计算结果如图 13 所示。

1) 铸钢件外伸段长度为 $0.5t$ 且铸钢件截面(传力路径 2)在外荷载为 967kN 时,基本达到全截面屈服,同时,圆管未达到全截面屈服,不符合等强连接需求。

2) 铸钢件外伸段长度为 t 且外荷载为 1 040kN 时,圆管基本达到全截面屈服,而铸钢件截面(传力路径 2)未达到全截面屈服,因此,认为其符合等强连接需求。

3) 铸钢件外伸段长度为 $2t$ 且外荷载为 1 081kN 时,圆管截面基本达到全截面屈服,同时铸钢件截面(传力路径 2)未达到全截面屈服,表明其满足等强连接需求。

4) 铸钢件外伸段长度为 $3t$ 时的情况与铸钢件外段伸长度为 $2t$ 时相同。

此外,铸钢件首次出现材料屈服时焊缝受力占比如表 4 所示。分析结果显示,当考虑材料塑性发展过程时,铸钢件端部焊缝受力占比呈降低趋势。当铸钢件外伸段长度为 t 时,焊缝受力占比为 0.72,满足等强连接的设计要求,与前文计算结果高度吻合。

表 4 焊缝受力占总荷载比值(塑性分析)

Table 4 Ratio of the force on the welding line to the total load (plasticity analysis)

位置	铸钢件外伸段长度			
	$0.5t$	t	$2t$	$3t$
圆管端部	0.95	0.96	0.95	0.97
焊缝中部	0.87	0.86	0.79	0.81
铸钢件端部(传力路径 2)	0.76	0.72	0.67	0.64

4.3 试验验证

试验选取 16mm 厚 Q355 钢板与 32mm 厚 G20Mn5QT 钢板开展焊接试验工作(见图 14),在焊接过程中,设定中部焊接间隙为 1 倍的钢板厚度(16mm)。

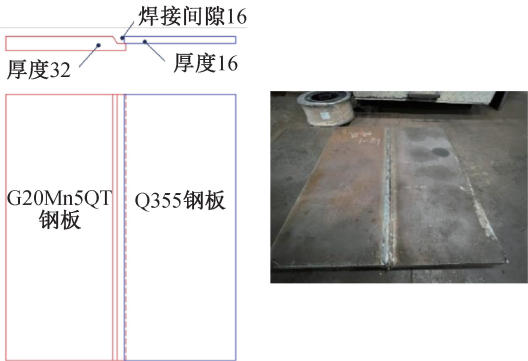


图 14 等强对接焊接试验

Fig. 14 Equal strength welding test

将试件切割为条状拉伸试件,如图 15 所示。

由试验结果可知,拉伸试件断裂点均未发生在薄弱环节(见图 16),即焊缝与铸钢件薄弱位置。这

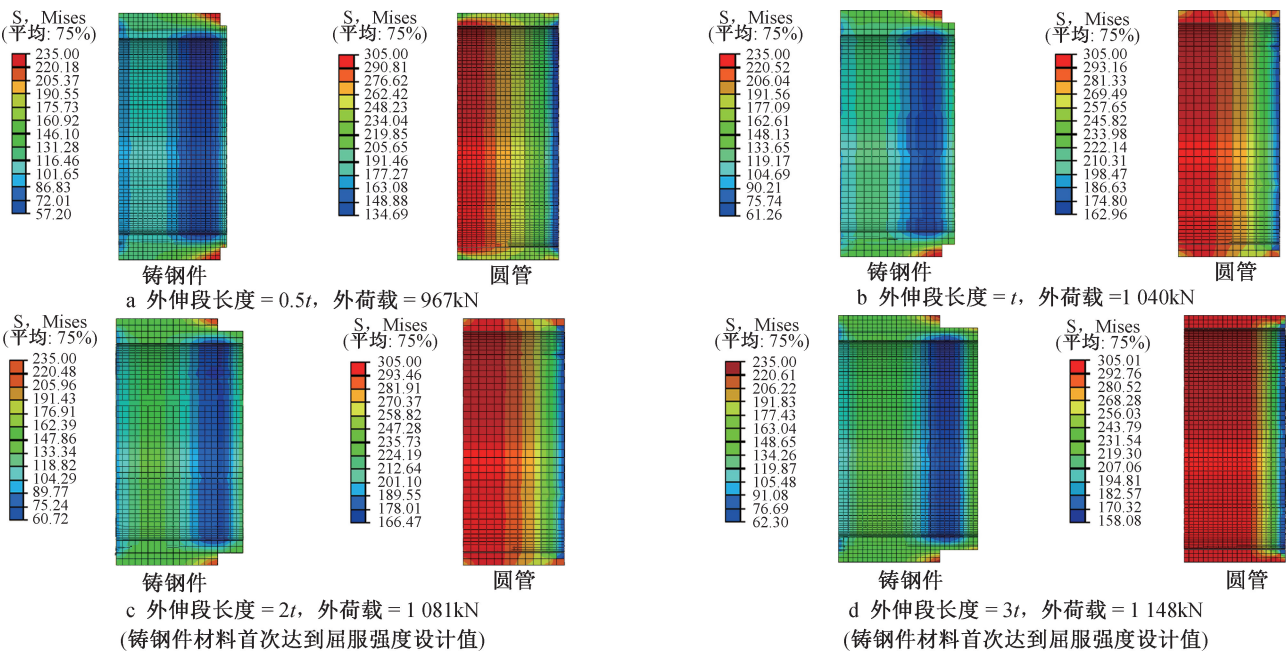


图 13 圆管与铸钢件应力云图(单位:MPa)

Fig. 13 Stress of round tube and cast steel(unit:MPa)



图 15 加载试验
Fig. 15 Loading test

一现象表明,焊接质量及整体结构在拉伸荷载作用下的表现均较理想。

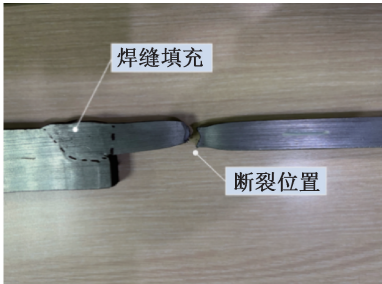


图 16 试验破坏现象
Fig. 16 Test failure phenomenon

5 结语

针对西宁曹家堡国际机场三期扩建工程新建T3 航站楼屋盖工程,通过新技术的开发和应用、合理的施工组织等方式,致力于实现该机场绿色与智慧建造目标,得到结论如下。

1)在总结以往旋转提升施工技术风险的基础上,针对脱胎瞬时网架水平位移导致的刚性水平偏移问题,建立了理论数学模型和有限元计算方法。以主航站楼旋转区为例,将计算结果与实测数据进行对比,误差仅为 6%,验证了计算分析的可靠性与准确性,具有良好的普适性和推广价值。

2)基于复杂的施工条件与结构形式,提出滑移-提升组合施工工艺,成功克服了大悬挑、与高架桥施工工作面干涉等不利因素,高效、经济、按期地完成了网架屋盖施工。

3)针对设计强度差异较大的钢种焊接等强连接问题,提出了铸钢件与高强钢间的新型等强连接节点方案。通过对低强度钢材设置长坡口,有效延长焊缝搭接长度,实现荷载合理分流,从而实现等强连接。该方法已通过有限元分析与试验验证,可行性得到充分证实,为不同钢种焊接等强连接提供了新的解决思路。

参考文献:

[1] 孙夏峰,武传仁,刘建强,等. 曲面焊接球网架旋转提升施工技术[C]//装配式钢结构建筑工程技术应用,2018.
SUN X F, WU C R, LIU J Q, et al. Application of rotary lifting construction technology of curved welded ball grid [C]// Assembled Steel Structure Construction Engineering Technology, 2018.

[2] 马洁峰,邢遵胜,吴楚桥,等. 西安咸阳国际机场 T5 航站楼钢屋盖旋转提升施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2):7-14.
MA J F, XING Z S, WU C Q, et al. Rotating lifting construction technology of steel roof for Xi'an Xianyang International Airport terminal T5[J]. Construction technology, 2024, 53(2):7-14.

[3] 钱少波. 安庆西站站房屋盖桁架提升施工关键技术[J]. 建筑科技, 2022, 6(5):85-88.
QIAN S B. Key technology of steel truss lifting construction for station building cover of Anqing West Station [J]. Building technology, 2022, 6(5):85-88.

[4] 张翔宇,崔强,朱文康,等. 杭州西站站房钢结构屋盖施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(6):139-142, 146.
ZHANG X Y, CUI Q, ZHU W K, et al. Construction technology of steel structure roof of Hangzhou West Railway Station [J]. Construction technology, 2022, 51(6):139-142, 146.

[5] 张之浩,贾尚瑞,叶冬晨,等. 基于最优化理论的大跨异形曲面结构单轴旋转法[J]. 钢结构(中英文), 2024, 39(4):10-16.
ZHANG Z H, JIA S R, YE D C, et al. Uniaxial rotation method for long span special-shaped curved surface structures based on optimization theory[J]. Steel construction, 2024, 39(4):10-16.

[6] 马洁峰,王文良,姚盼盼,等. 杭州亚运会棒(垒)球馆钢结构施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(24):9-12, 64.
MA J F, WANG W L, YAO P P, et al. Key construction technology of steel structure in baseball (softball) stadium of Hangzhou Asian Games [J]. Construction technology, 2022, 51(24):9-12, 64.