

现代钢结构施工关键技术与质量管控研究

张思元

上海建工四建集团有限公司 上海 201103

摘要: 钢结构凭借强度高、自重轻、工业化程度高等优势,在现代建筑工程中得到广泛应用。然而,钢结构施工涉及深化设计、构件加工、现场拼装、焊接连接等多个环节,技术要求高,质量控制难度大。本文系统分析了现代钢结构施工的关键技术环节,包括深化设计技术、高强螺栓连接技术、焊接质量控制技术及整体提升安装技术,并探讨了以全过程追溯和动态监测为核心的质量管控体系。研究表明,采用BIM技术进行深化设计和施工模拟,配合完善的质量管控措施,可有效提升钢结构安装精度和焊接质量。本文成果可为类似工程提供技术参考。

关键词: 钢结构;施工技术;质量管控;焊接工艺;BIM技术

引言:随着城市化进程加速和建筑高度不断提升,钢结构凭借其优良的力学性能和施工效率,在大跨度场馆、超高层建筑、工业厂房等领域占据主导地位。我国钢结构年产量持续增长,应用范围不断扩大。然而,钢结构施工环节复杂,涉及设计、加工、运输、安装、焊接等多道工序,任一环节出现偏差均可能导致整体结构安全隐患。钢结构施工中常见的焊接缺陷、安装偏差、高强螺栓连接失效等问题,迫切需要系统性的技术解决方案。因此,系统研究钢结构施工关键技术,建立科学有效的质量管控体系,对保障工程结构安全、提升施工效率具有重要意义。

1 钢结构施工关键技术分析

1.1 深化设计技术

深化设计是钢结构施工的技术基础。复杂钢结构的节点构造、构件分段、焊缝布置等均需在深化设计阶段详细确定。传统二维图纸难以直观表达空间几何关系,易造成加工与安装偏差。当前主流技术采用BIM三维建模软件进行深化设计,可自动生成构件详图、材料清单和数控加工代码。深化设计阶段需重点把控以下内容:构件分段位置应避免应力集中区,分段长度需满足运输限界要求;焊接节点应保证施焊空间,预留操作孔;高强螺栓连接板需准确定位,螺栓孔径偏差控制在0.5mm以内。深化设计完成后,应由原设计单位进行复核确认,确保结构受力安全。

1.2 构件加工制作技术

构件加工精度直接影响现场安装质量。钢结构加工包括下料、组立、埋弧焊接、矫正、制孔、预拼装等工序。下料采用数控等离子切割或激光切割设备,切割面垂直度偏差不超过板厚的5%。组立工序中,H型钢翼缘板与腹板的垂直度应控制在1mm/m以内。埋弧焊接是主

焊缝的主要连接方式,焊接电流、电压、速度需根据板厚和焊丝直径严格匹配。焊接完成后需进行火焰矫正或机械矫正,矫正后的构件弯曲度不超过长度的1/1000。制孔精度是控制螺栓连接质量的关键,采用数控三维钻床加工,孔距偏差不超过1mm。重要构件出厂前应进行自由状态预拼装,检验匹配精度。

1.3 高强螺栓连接技术

高强螺栓连接是钢结构现场装配的主要方式,具有施工速度快、受力可靠的特点。高强螺栓分为大六角头型和扭剪型两种,施工工艺差异明显。大六角头型螺栓采用扭矩法施工,需使用标定后的扭矩扳手,终拧扭矩值按设计预拉力确定,施工扭矩偏差应控制在 $\pm 10\%$ 以内。扭剪型螺栓以梅花头剪断为终拧标志,操作相对简便,但需保证电动扳手性能稳定。螺栓连接施工应遵循“初拧-终拧”两步程序,大型节点需增加复拧步骤^[1]。初拧扭矩为终拧扭矩的50%左右,终拧应按一定顺序从节点中央向四周进行,避免螺栓群受力不均。连接板接触面需进行喷砂或抛丸处理,摩擦系数应满足设计要求,抗滑移系数试验值不低于设计值的1.1倍。

1.4 焊接质量控制技术

焊接是钢结构安装中最关键连接方式,焊缝质量直接决定结构安全。常用焊接方法包括手工电弧焊、二氧化碳气体保护焊和埋弧自动焊。手工电弧焊灵活性强,适用于现场定位焊和修补焊,但焊接质量受操作人员技能影响大。二氧化碳气体保护焊效率高、成本低,在厚板焊接中应用广泛,但需注意防风措施,风速超过2m/s时应设挡风棚。焊接质量控制需把握三个环节:一是焊前准备,包括坡口清理、预热处理和焊接工艺评定。预热温度根据钢材牌号和板厚确定,Q355钢材板厚超过30mm时预热温度宜为80-120℃。二是焊接过程控

制,多层多道焊时层间温度应控制在规定范围内,每道焊缝厚度不宜超过4mm。三是焊后检测,包括外观检查 and 无损检测。超声波探伤是常用无损检测方法,一级焊缝需100%探伤,二级焊缝抽检20%。表1列出了不同焊缝等级的质量要求。

表1 钢结构焊缝质量等级与检测要求

焊缝等级	适用范围	外观检查要求	无损检测比例	合格等级
一级	受拉构件对接焊缝	无裂纹、气孔、夹渣	100%超声波	B I 级
二级	受压构件对接焊缝	裂纹、气孔不允许	20%超声波	B II 级
三级	角焊缝及一般焊缝	可见缺陷有限度	外观检查为主	—

1.5 整体提升与滑移安装技术

对于大跨度屋盖结构和高层连体结构,整体提升和滑移安装技术可大幅减少高空作业,提高施工安全性。整体提升技术利用液压同步提升系统,将地面拼装完成的屋盖整体提升至设计标高。提升点布置需根据结构重心和刚度分布确定,一般每100m²设置一个提升点。液压提升器的额定荷载应为计算提升力的1.5-2.0倍。提升过程中需通过位移传感器和压力传感器实时监测各点的提升高度和荷载,不同步偏差控制在10mm以内。整体滑移技术适用于长条形结构,将结构在搭设的滑移轨道上分段滑移就位。滑移轨道应平整光滑,高差不大于3mm。滑移牵引力按滑动摩擦系数0.1-0.15计算,采用计算机控制的液压爬行器同步牵引。

2 钢结构施工质量管控体系

2.1 质量管控的总体框架

钢结构施工质量管控贯穿设计、加工、运输、安装全过程,构建“事前预防、事中控制、事后检验”的闭环体系。事前预防阶段,重点完成图纸会审、施工方案编制、焊接工艺评定、检测仪器标定等工作。事中控制阶段,对每道工序实施“三检制”,即班组自检、工序交接检和专职质检员检验。事后检验阶段,完成结构几何尺寸复核、焊缝无损检测和高强螺栓扭矩检验^[2]。

2.2 全过程质量追溯系统

信息化手段是实现质量精细化管理的有效途径。采用二维码或射频识别技术,为每个构件赋予唯一身份标识,记录从原材料进场到安装完成的全过程信息。追溯系统应包括以下内容:钢材炉批号、焊接材料型号及批号、操作人员信息、焊接工艺参数、无损检测报告、安装位置坐标等。通过移动端现场扫码,可实时查询构件信息和检验状态,对不合格品进行追溯和处置。某大型体育场钢结构工程应用质量追溯系统后,质量问题处

理响应时间由平均2天缩短至4小时,安装精度合格率由88%提升至96%。

2.3 施工监测与预警机制

施工过程中的结构形态和内力监测是保证施工安全的重要手段。监测内容主要包括:构件安装标高和轴线偏差、支撑结构变形、关键杆件应力应变、环境温度和风速等。标高和轴线测量采用高精度全站仪,测量精度控制在1mm以内。应力监测采用振弦式应变计,数据采集频率在关键施工阶段应加密至每分钟一次。监测数据应实时上传至管理平台,当变形或应力超过预警阈值时自动报警,提示施工人员暂停作业并分析原因。某超高层钢结构施工监测数据显示,核心筒与外框柱的竖向压缩变形差最大达到12mm,通过调整安装顺序和临时支撑措施控制在设计允许范围内^[3]。

3 工程案例分析

3.1 工程概况

选取一处大型交通枢纽建筑的钢结构屋盖工程作为分析案例。该屋盖体系采用空间桁架结构形式,平面轮廓尺寸达到360m×180m,结构覆盖面积逾六万平方米,总用钢量约为2.8万吨。屋盖桁架最大跨度达到72m,最大悬挑长度约为28m,屋面最高点标高为42m。该工程钢结构主要采用Q355B和Q390GJC两种牌号的低合金高强度结构钢材,其中高受力部位采用强度等级更高的Q390GJC钢材。节点连接形式根据受力特点分别采用相贯焊接节点和铸钢节点,其中铸钢节点用于受力复杂、几何形态特殊的关键部位。该工程建筑功能定位重要,结构跨度大、构件截面尺寸大、节点构造复杂,对施工技术和质量控制提出了较高要求。

3.2 关键技术应用

该工程在钢结构施工中应用了多项关键技术。深化设计阶段全面采用BIM三维建模技术,建立包含全部构件几何信息和工艺参数的结构信息模型,完成各类复杂节点设计3000余个,自动生成构件加工详图12000余张,有效减少了设计冲突和现场返工。构件加工制作阶段引入自动化生产线,采用数控切割设备进行板材下料,下料精度控制在0.5mm以内,保证了构件的加工质量和互换性。屋盖安装采用分区拼装与整体提升相结合的施工方案,将整个屋盖划分为6个提升分区,在地面完成分区拼装后依次提升就位,单次最大提升重量达到4200t。提升过程采用计算机同步控制系统进行全程监控,16个提升点的位移同步偏差平均值控制在5mm以内。

3.3 质量管控措施与效果

针对该工程建立了覆盖设计深化、构件加工、现场

安装、检测验收全过程的质量管理体系。焊缝质量控制方面,现场施焊焊缝总长度约18千米,其中受力关键的一级焊缝按照规范要求进行100%超声波探伤检测,一次焊接合格率达到95.8%,经局部返修处理后最终合格率达到100%。高强螺栓连接质量控制方面,全工程共使用M20和M24规格的高强螺栓约24万套,按照扭矩法施工后进行扭矩抽样检测,扭矩合格率达到98.5%。安装精度控制方面,屋盖整体安装完成后进行的全站仪测量结果显示,轴线偏差最大值为8mm,相邻桁架高差最大值为5mm,均满足相关验收规范的要求^[4]。该工程质量管控效果良好,获得行业权威奖项。

3.4 数据统计汇总

表2 钢结构工程质量管控关键指标

管控项目	控制指标	实际达成值	规范要求
深化设计差错率	< 0.5%	0.003	< 1%
构件加工尺寸偏差	±2mm	1.5mm	±3mm
一次焊接合格率	> 95%	0.958	> 90%
高强螺栓扭矩合格率	> 98%	0.985	> 95%
安装轴线偏差	< 10mm	8mm	15mm
相邻构件高差	< 5mm	4mm	10mm

4 常见质量问题的成因与防治

4.1 焊接缺陷及防治

焊接缺陷主要包括裂纹、气孔、夹渣、未熔合等。裂纹是最危险的缺陷,多由焊接应力过大或母材碳当量过高引起。防治措施:严格控制焊接顺序,采用对称焊、分段倒退焊等方法降低约束应力;焊前预热、焊后缓冷,控制冷却速度;对碳当量大于0.45%的钢材采取低氢型焊条和严格的烘干制度。气孔多由坡口油污、水分或保护气体不足引起,焊前清理坡口、保持焊剂干燥可有效预防^[5]。

4.2 安装偏差及控制

安装偏差包括标高偏差、轴线偏差和垂直度偏差,产生原因主要有测量误差、构件变形、支座沉降等。控制措施:建立统一的测量控制网,定期复核基准点;对长细比较大的构件设置临时支撑,防止吊装变形;对支座不均匀沉降进行监测,必要时采用垫板调整。安装过程中应跟踪测量,发现偏差及时纠正,避免累积误差扩大。

结束语

钢结构施工是一项涉及多环节、多工种的复杂系统工程,施工质量直接关系到结构安全和使用寿命。本文系统分析了深化设计、构件加工、高强螺栓连接、焊接控制、整体提升等关键技术要点,提出了以全过程追溯和动态监测为核心的质量管控体系。研究表明,采用BIM深化设计、自动化加工、计算机同步提升等关键技术,配合全过程质量追溯系统,可显著提升钢结构施工质量水平。未来钢结构施工应进一步向智能化方向发展,应用机器人焊接、无人机巡检、数字孪生等新技术,实现施工过程的可视化、可追溯和可预测,推动钢结构行业高质量发展。

参考文献

- [1]刘耀鹏,张紫娟,白睿,等.使用无形变单元的复杂钢结构施工分析方法[J].建筑钢结构进展,2022,24(4):92-100.
- [2]张汝超,张云鹏,孟令鸿,等.超高层建筑钢结构施工技术研究与应[J].建筑结构,2023,53(S2):1841-1845.
- [3]刘嘉.钢结构施工关键技术及质量保证[J].建材发展导向,2024,22(13):24-26.
- [4]崔晓旺.土木工程中大跨度钢结构施工关键技术及质量控制[J].模型世界,2025(11):183-185.
- [5]郑建敏,贾仁勇.某高层悬吊钢结构施工方案设计与模拟分析[J].建筑结构,2025,55(15):22-27.