

超高层建筑钢结构施工中节点焊接质量控制与安装精度校准技术研究

安兵

411328*****1339

摘要: 超高层建筑作为现代城市天际线的重要构成, 其钢结构体系凭借高强度、轻量化及施工周期短等优势, 成为超高层建筑结构选型的主流方向。钢结构节点作为连接各构件的关键传力部位, 其焊接质量直接影响整体结构的承载能力与安全性能; 而安装精度则决定了构件间的协同工作能力与结构稳定性。超高层建筑钢结构施工面临高空作业环境复杂、节点形式多样、焊接工艺要求严格、安装累积误差控制难度大等挑战, 传统质量控制与校准技术难以满足其高精度、高安全性的施工需求。本文围绕超高层建筑钢结构施工中节点焊接质量控制与安装精度校准问题, 研究了焊接工艺参数优化、焊接过程监控及缺陷预防等质量控制策略, 探讨了基于测量-反馈-调整的精度校准技术体系与动态补偿方法, 为同类工程提供理论与实践参考。

关键词: 超高层建筑; 钢结构; 节点焊接; 质量控制; 安装精度; 校准技术

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.004

引言

在超高层建筑钢结构体系中, 节点是连接梁、柱、支撑等构件的关键部位, 承担着传递弯矩、剪力、轴力等复杂内力的作用, 其焊接质量直接决定了结构的整体承载能力与抗震性能。研究表明, 约 60%-70% 的钢结构失效事故与节点连接失效相关, 其中焊接缺陷(如气孔、夹渣、未熔合)是导致节点强度下降的主要原因。同时, 超高层建筑的钢结构安装精度要求极高(如柱轴线偏差需控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内, 层间垂直度偏差不超过 $H/1000$ 且不大于 15mm), 任何微小的累积误差都可能通过节点传递至整体结构, 引发应力集中、构件碰撞或连接失效等问题。然而, 超高层建筑钢结构施工面临诸多技术挑战, 在此背景下, 深化超高层建筑钢结构节点焊接质量控制与安装精度校准技术研究, 通过精细化工艺控制与智能化校准手段, 提升节点连接的可靠性与整体安装精度, 对保障超高层建筑结构安全、推动钢结构施工技术进步具有重要意义^[1]。

1 超高层建筑钢结构节点焊接质量控制的关键技术难点

1.1 焊接质量的主要影响因素

超高层建筑钢结构节点焊接质量受材料特性、工艺参数、环境条件及人员操作等多因素综合影响, 具体表

现为: (1)材料特性: 钢结构节点常用材料包括 Q345GJ、Q460GJ 等高强度低合金钢, 其碳当量较高(通常 $\geq 0.4\%$), 焊接时易产生冷裂纹; 厚板($\geq 50\text{mm}$)的焊接热影响区晶粒粗大, 导致接头韧性下降; 不同材质(如钢柱与钢梁的强度等级差异)或不同厚度构件的焊接, 需匹配差异化的工艺参数以避免应力集中。(2)工艺参数: 焊接电流、电压、焊接速度及热输入量是影响焊缝成型的核心参数。电流过小会导致熔深不足(未熔合缺陷), 电流过大引发咬边与烧穿; 电压不稳定会造成电弧偏吹(焊缝成形不均匀); 焊接速度过快会导致熔池冷却过快(气孔、夹渣), 过慢则增加热输入量(晶粒粗大、热裂纹)。对于厚板多层多道焊, 层间温度控制(通常需保持在预热温度范围内)直接影响焊缝的连续性与力学性能。(3)环境条件: 超高层建筑高空作业环境复杂, 风速超过 8m/s 时, 保护气体(如 CO_2 、氩气)易被吹散, 导致焊缝氧化(气孔、表面氧化物); 温度低于 5°C 时, 钢材脆性增加, 需采取预热与后热措施(如预热温度 $100\text{--}150^\circ\text{C}$)以防止冷裂纹; 湿度大于 90% 时, 焊条或焊丝易受潮, 焊接时释放氢气(引发氢致裂纹)^[2]。

1.2 典型焊接缺陷及其危害

超高层建筑钢结构节点焊接常见的缺陷包括气孔、

夹渣、未熔合、未焊透、裂纹等，这些缺陷会显著降低焊缝的承载能力与疲劳性能：气孔是焊接过程中熔池中的气体（如氢气、氮气）未及时逸出形成的空腔，多分布于焊缝表面或内部。气孔会减小焊缝的有效截面积（降低承载能力），并成为应力集中点（引发疲劳裂纹）。夹渣是熔池中的熔渣（如氧化物、硅酸盐）未完全浮出而残留在焊缝中，通常出现在焊道之间或焊缝根部。夹渣会破坏焊缝的连续性（降低抗剪能力），并在受力时成为裂纹源。未熔合指焊缝金属与母材或焊道之间未完全熔合，分为坡口未熔合（焊缝边缘与母材未结合）与层间未熔合（焊道之间未熔合）。未熔合区域的强度仅为母材的30%~50%，是节点失效的高风险区域。未焊透是焊缝根部未完全熔化形成的缺欠，常见于厚板焊接或坡口角度不足的情况下。未焊透区域的承载能力极低，在轴向拉力或弯曲应力作用下易首先开裂。裂纹是最危险的焊接缺陷，包括热裂纹（焊接冷却过程中形成，多分布于焊缝中心）、冷裂纹（焊接后数小时或数天出现，常见于高强钢或厚板焊缝）与再热裂纹（焊后热处理时产生）。裂纹会迅速扩展并导致节点断裂，直接威胁结构安全。

2 超高层建筑钢结构节点焊接质量控制策略

2.1 焊接工艺参数的优化设计

焊接工艺参数的精准匹配是控制焊接质量的基础。针对超高层建筑钢结构节点的特点（如厚板、高强度钢、多向焊缝），需通过工艺评定试验确定最优参数组合：对于厚板多层多道焊，采用“小电流、低电压、慢速度”的分层焊接原则，首层焊道电流控制在120~150A（避免烧穿），后续焊道电流逐步提高至180~220A（保证熔深）；焊接速度控制在3~5mm/s（确保熔池充分凝固）；层间温度通过红外测温仪实时监测，保持在预热温度（100~150°C）范围内，防止冷却过快导致裂纹。对于高强钢（如Q460GJ）节点，需采用低氢型焊条（如E5015）或气体保护焊丝（如ER50-6），并严格控制焊材的烘干温度（350~400°C）与保温时间（2小时），以降低焊缝中的氢含量（防止氢致裂纹）。对于多向焊缝交叉的节点（如箱型柱与梁的连接节点），需制定合理的焊接顺序——先焊接受力较小的次要焊缝（如节点板与柱的连接焊缝），后焊接主要传力焊缝（如梁翼缘与柱的对

接焊缝）；对称焊缝采用同步对称施焊（如箱型柱的四面焊缝同时焊接），减少焊接变形与残余应力^[3]。

2.2 焊接过程的实时监控与缺陷预防

焊接过程的动态监控是及时发现并纠正质量问题的关键。通过安装焊接参数记录仪（实时采集电流、电压、焊接速度数据），结合视觉传感器（监测焊缝成形状态，如熔池大小、熔渣浮动情况），对焊接过程进行全流程跟踪。当参数偏离预设范围（如电流波动超过±10%、电弧电压偏差超过±5%）时，系统自动报警并提示调整。针对高空作业环境的影响，采取针对性防护措施：风速超过8m/s时，采用防风棚（四周封闭、顶部透光）或气体保护罩（局部保护熔池）；温度低于5°C时，对母材与焊材进行预热（采用火焰加热或电加热板），并控制层间温度；湿度大于90%时，焊条或焊丝提前2小时放入保温筒（保持干燥），焊接前清理坡口表面的油污与铁锈（避免产生气孔）。加强焊工技能培训与考核，要求焊工熟悉超高层建筑钢结构节点的特殊工艺要求（如厚板多层焊的层间清理、高强钢的预热后热工艺），并通过模拟试验（如焊接试板检测力学性能）验证其操作能力。同时，实行“一人一档”管理制度，记录焊工的焊接参数、缺陷率及修复记录，作为质量追溯的依据。

2.3 焊接缺陷的检测与修复技术

焊接完成后，需采用无损检测技术（如超声波检测UT、射线检测RT、磁粉检测MT）对焊缝进行全面检查。对于一级焊缝（如梁柱节点的主要传力焊缝），检测比例不低于100%；二级焊缝（如次要连接焊缝）检测比例不低于20%。对于检测发现的缺陷（如气孔、夹渣），采用碳弧气刨或砂轮打磨清除缺陷后，重新焊接（需控制热输入量，避免产生二次缺陷）；对于未熔合或未焊透等严重缺陷，需切除缺陷区域（保证切除深度超过缺陷深度2~3mm），重新开坡口并焊接；对于裂纹（尤其是冷裂纹），需扩大检测范围（检查相邻焊缝），确认无扩展后，采用低氢焊接工艺进行修复，并进行100%无损检测复验^[4]。

3 超高层建筑钢结构安装精度校准技术体系

3.1 安装精度的主要影响因素

超高层建筑钢结构安装精度受构件制造误差、吊装

累积误差、测量误差及环境因素等多方面影响：构件制造误差包括切割偏差（如钢板下料尺寸误差±1-2mm）、焊接变形（如箱型柱焊接后截面尺寸缩小1-3mm）、运输损伤（如构件碰撞导致的局部弯曲）等，这些误差会通过节点传递至整体结构。吊装累积误差是安装过程中的主要误差来源，包括构件吊装时的摆动（如钢柱吊装时因风力或钢丝绳倾斜导致的偏移）、对接时的定位偏差（如梁与柱的连接板错位）、高空调整时的操作误差（如千斤顶顶升量控制不精确）。测量误差受仪器精度（如全站仪测距误差±2mm+2ppm）、观测条件（如高空视线遮挡、光线不足）及测量方法（如单次测量未进行闭合校验）限制，可能导致定位数据失真。环境因素包括高空风速（超过10m/s时影响构件稳定）、温度变化（钢材线膨胀系数约 $12\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，温度每变化 10°C ，100m高的钢柱伸缩约12mm）、日照辐射（单侧受热导致构件弯曲）等，这些因素会加剧安装误差的动态变化。

3.2 基于测量-反馈-调整的精度校准技术

超高层建筑钢结构安装精度校准采用“测量定位-误差分析-动态调整”的闭环控制技术体系：测量定位阶段，利用高精度测量仪器（如Leica TS30全站仪，测角精度0.5”，测距精度0.6mm+1ppm）对构件的轴线、标高及垂直度进行实时监测。对于钢柱安装，测量其柱顶轴线偏差（控制在±3mm以内）与层间垂直度偏差（不超过H/1000且不大于15mm）；对于梁安装，测量其与柱的连接节点偏差（如梁端距柱边的距离偏差±2mm）。误差分析阶段，通过BIM模型（建筑信息模型）将测量数据与设计坐标对比，计算各构件的累积误差分布（如某钢柱因吊装偏移导致柱顶轴线偏差5mm，需分析其对上层梁安装的影响）。同时，识别主要误差源（如吊装摆动、测量仪器误差），确定优先调整的构件与方向。动态调整阶段，采用“微调为主、整体协同”的校准方法：对于轴线偏差，通过千斤顶或手拉葫芦在柱底或梁端施加水平力（控制顶升量不超过5mm/次）；对于垂直度偏差，采用斜垫铁（厚度调整精度0.1mm）或激光垂准仪引导的微调装置；对于标高偏差，通过螺母调节器（调节精度0.5mm）或垫片组（厚度组合精度1mm）进

行补偿。调整后重复测量，直至误差满足规范要求（如《钢结构工程施工质量验收标准》GB50205-2020）。

3.3 动态补偿与误差预防技术

为减少高空作业环境对精度的影响，采用动态补偿技术：对于风速影响，在钢柱顶部设置风缆（通过张拉钢丝绳平衡水平力），或在吊装时选择风力小于6m/s的时段；对于温度变化，在清晨或傍晚（温度相对稳定时段）进行关键节点的安装与测量，或通过温度应力计算预留伸缩间隙（如钢柱连接节点预留2-3mm间隙）；对于日照辐射，在单侧受热构件背面设置遮阳棚，或对称安装构件以平衡热变形。此外，加强施工组织管理：构件吊装前进行预拼装（在地面模拟高空安装状态，检测并修正制造误差），减少现场调整量；吊装过程中采用“先主后次、对称安装”的顺序（如先安装核心筒钢柱，后安装外围框架梁），降低累积误差；测量人员与吊装班组实时沟通（通过无线对讲机传递调整指令），确保调整操作的协同性。

4 结束语

本文围绕超高层建筑钢结构施工中节点焊接质量控制与安装精度校准问题，系统分析了焊接质量的关键技术难点与精度影响因素，研究了焊接工艺参数优化、过程监控及缺陷预防等质量控制策略，探讨了基于测量-反馈-调整的精度校准技术体系与动态补偿方法，通过“焊接质量精细化控制+安装精度动态校准”的协同技术路径，可显著提升超高层建筑钢结构节点的连接可靠性与整体安装精度，为同类工程提供理论与实践参考。

参考文献

- [1]徐红日.超高层钢结构安装测量控制技术[J].工程建设与设计,2020(4):165-166.
- [2]段政新.超高层钢结构构件安装施工测量探讨[J].建筑技术开发,2020,47(3):1-2.
- [3]左春丽.超高层续建钢结构施工精度控制技术研究[J].陕西建筑,2020(10):50-58.
- [4]张新宁,胡文华.Q420C钢在建筑钢结构箱形梁柱焊接质量控制中的应用研究[J].土木工程,2021,10(12):1239-1246.