

大跨度采光顶幕墙施工质量控制策略分析

刘后伟

深圳市望华建设集团有限公司，广东深圳，518000；

摘要：大跨度采光顶幕墙作为现代建筑空间光环境与结构美学的关键载体，其施工质量直接关联建筑安全耐久、功能实现及能耗水平。当前该类工程存在结构变形控制复杂、密封系统失效风险高、安装精度保障难度大等行业共性问题。本文基于大跨度采光顶幕墙的空间受力特性与施工工艺难点，从设计协同优化、材料性能管控、工艺标准化实施、安全环境保障四个维度，系统构建涵盖节点构造深化、材料分级验证、三维定位技术应用、全过程监测预警的质量控制策略体系，为提升此类工程施工精度、降低渗漏风险、保障结构长期性能提供系统化解决方案。

关键词：大跨度；采光顶幕墙；施工质量；控制策略

DOI：10.64216/3080-1508.25.11.004

引言

大跨度采光顶幕墙（跨度 $\geq 30\text{m}$ ）凭借其通透的空间视觉效果与自然采光效率，广泛应用于交通枢纽、会展中心、商业综合体等大型公共建筑。该类构造多采用网架、桁架、索膜等空间结构体系，兼具建筑围护与结构承重双重功能，其施工质量控制面临三大核心挑战：一是钢结构焊接变形与温度应力引发的累计位移控制（温差 $\pm 30^\circ\text{C}$ 时伸缩量可达 50mm 以上）；二是玻璃面板与支撑结构间密封节点在长期风荷载（负风压吸力可达 1.5kPa ）与动态荷载作用下的性能衰减；三是超高空作业环境下（安装高度常超 20m ）的毫米级精度保障^[1]。

行业统计数据显示，该类工程施工质量缺陷中，渗漏问题占比达 42% ，结构变形超限占比 27% ，安装误差超标占比 19% ，已成为影响工程品质的主要因素。因此，构建科学系统的质量控制策略，对提升复杂幕墙工程建设水平具有重要工程价值。

1 施工质量现状与问题机理剖析

1.1 设计协同不足引发的构造缺陷

部分工程存在建筑方案与结构计算脱节现象，未充分考虑采光顶幕墙的风荷载非线性分布特性（边角区域风压系数可达 -2.5 ）与温度变形需求。节点构造设计存在以下问题：玻璃板块支撑点间距超过规范限值（常规应 $\leq 1.2\text{m}$ ），导致面板挠度超限；伸缩缝设置未按跨度 $1/400$ 预留变形间隙，引发结构开裂；采光顶与主体结构连接节点未进行有限元分析，难以评估复杂荷载工况下的应力集中现象^[2]。

1.2 材料性能劣化导致的质量隐患

钢结构构件存在材质不均匀问题，实测钢材屈服强度较设计值低 $8\%-12\%$ ，冲击韧性（ -20°C 时 A_{kv} ）不足 27J ；中空玻璃密封胶条选用普通三元乙丙橡胶（耐候性 ≤ 5 年），未采用硅橡胶材质（耐候性 ≥ 20 年）；点支式幕墙驳接爪件表面处理工艺不足，盐雾试验（ 500h ）后出现锈蚀斑点。材料进场检验仅停留在外观检查，未对关键性能（如钢材 Z 向收缩率、密封胶变位承受能力）进行抽样复验，导致不合格材料流入施工现场。

1.3 施工工艺偏差造成的精度缺失

现场焊接作业未按工艺评定参数执行，厚板焊接（板厚 $> 20\text{mm}$ ）未采用多层多道焊（层间温度未保持 $\geq 100^\circ\text{C}$ ），焊后未进行消应力处理（残余应力可达屈服强度的 30% ）；玻璃板块吊装时真空吸盘吸附力不足（安全系数 < 2.0 ），吊装过程出现 30mm 以上晃动；密封胶施工未控制环境湿度（常 $> 85\%\text{RH}$ ），胶缝内部气泡率 $> 10\%$ ，固化后粘结强度下降 30% 。施工测量未采用三维激光扫描技术，平面定位误差超 $\pm 3\text{mm}$ （规范要求 $\pm 2\text{mm}$ ），高程偏差超 $\pm 5\text{mm}$ （规范要求 $\pm 3\text{mm}$ ），导致安装精度不达标。

2 施工质量控制核心策略体系

2.1 设计协同与节点深化策略

多专业协同设计机制在三维协同设计平台搭建中，进一步引入参数化建模工具（如Grasshopper插件）与BIM碰撞检测技术，实现建筑形态、结构受力与机电管线的深度协同。例如，针对异形曲面采光顶，通过参数

化算法关联曲面曲率与桁架杆件截面尺寸,当曲面半径调整时,系统可自动优化杆件规格(误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内),避免人工计算偏差。同时,开展机电管线与幕墙龙骨的碰撞分析,重点排查消防喷淋、照明线路与钢结构支座的空间冲突,提前调整管线走向(如将喷淋支管偏移量控制在 $\leq 50\text{mm}$),减少现场返工^[3]。

2.2 关键节点构造优化

玻璃接缝节点除“两道密封+排水槽”外,在中空玻璃夹层内增设 $\geq 1.52\text{mm}$ 厚 PVB 夹胶片,使玻璃破损后具备安全性能;钢结构支座节点底部设置 U 型冷凝水收集槽(宽度 $\geq 80\text{mm}$,深度 $\geq 50\text{mm}$),槽内铺设导水海绵(吸水率 $\geq 300\%$),通过 $\phi 20\text{mm}$ PE 导水管将冷凝水引至屋面排水系统,避免积水侵蚀主体结构。

2.3 材料与构配件质量管控策略

2.3.1 材料性能分级验证体系

在“设计-采购-进场”三阶段基础上,强化特殊环境适应性验证:针对沿海地区工程,对钢结构构件开展中性盐雾试验(按 GB/T10125-2021, 5%NaCl 溶液,温度 35°C ,喷雾量 $1\text{--}2\text{ml}/80\text{cm}^2\cdot\text{h}$),要求 1000h 后钢材表面锈蚀等级 $\leq \text{Sa}2.5$ 级,涂层附着力 $\geq 5\text{MPa}$;针对严寒地区(最低温度 $\leq -30^{\circ}\text{C}$),对中空玻璃进行抗冻性测试(-40°C 冷冻 $4\text{h} \rightarrow 23^{\circ}\text{C}$ 水浴 2h ,循环 20 次),确保玻璃无破裂、密封胶无开裂。若工程采用光伏一体化玻璃,需额外验证光电转换效率(标准测试条件下 $\geq 18\%$)与耐候性(经 1000h 紫外老化试验后,效率衰减 $\leq 3\%$),并要求供应商提供第三方检测机构出具的 TÜV 或 CQC 认证报告。

2.3.2 构配件储运保护工艺

针对超大规格玻璃板块(尺寸 $\geq 4\text{m} \times 8\text{m}$),采用定制化“刚柔结合”运输支架:支架主体为 Q235 钢框架(截面尺寸 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$),内侧粘贴 50mm 厚高密度海绵(密度 $\geq 30\text{kg}/\text{m}^3$),并通过 4 组可调节液压顶紧装置(顶紧力 $\leq 5\text{kN}$)固定玻璃,防止运输过程中窜动。运输车辆配备三轴加速度传感器(测量范围 $\pm 5\text{g}$,采样频率 100Hz)与温湿度记录仪,实时上传数据至管理平台,当振动加速度超过 0.8g 或温度低于 5°C /高于 35°C 时,自动触发声光报警^[4]。

3 施工工艺与过程控制策略

3.1 钢结构安装精度控制技术

在“三维定位+分区拼装”工艺中,增加预拼装精度复核与残余应力控制环节:地面拼装完成后,采用三维激光扫描仪(如 FaroFocusS70,扫描精度 $\pm 0.1\text{mm}/\text{m}$)获取实际模型,与设计 BIM 模型进行偏差对比,重点核查桁架节点坐标(偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$)、杆件垂直度(偏差 $\leq H/2000$,H 为杆件高度),超差部位通过液压千斤顶(额定压力 $\geq 50\text{MPa}$)进行微调。液压提升阶段,在每个吊点设置位移传感器(测量范围 $0\text{--}500\text{mm}$,精度 $\pm 0.05\text{mm}$),并与同步控制系统联动,当某吊点位移偏差超过 5mm 时,系统自动调整该吊点提升速度(调整幅度 $\leq 5\text{mm}/\text{min}$),确保整体同步性。焊接工艺优化方面,厚板焊接(板厚 $>30\text{mm}$)采用“窄间隙埋弧焊”技术,焊丝选用 H08MnA(直径 $\phi 4\text{mm}$),焊接电流 $600\text{--}650\text{A}$,电压 $32\text{--}34\text{V}$,减少焊接层数(由传统 8 层减至 5 层),降低残余应力;焊后采用盲孔法检测残余应力(测试点间距 $\leq 200\text{mm}$),当应力值超过 150MPa 时,采用振动时效设备(激振频率 $20\text{--}100\text{Hz}$)进行消应力处理,处理后应力消除率 $\geq 40\%$ 。

3.2 玻璃面板安装标准化作业

在“五步骤”安装流程中,补充胶缝质量管控与耐久性验证:密封胶施工前,增加粘结性测试(按 GB/T16777-2008,采用“基材-胶-基材”拉伸试样,拉伸速度 $50\text{mm}/\text{min}$),确保粘结强度 $\geq 0.6\text{MPa}$;施胶过程中采用自动打胶机(定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$)替代人工操作,胶缝宽度偏差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 内,避免人工施胶的不均匀性。

3.3 安全环境与监测保障策略

3.3.1 高空作业风险

防控体系在“立体防护+智能监测”基础上,构建“预警-干预-应急”全链条管控:作业区域周边安装 AI 视频监控系统(识别精度 $\geq 95\%$),通过深度学习算法实时识别“未系安全带”“跨越临边”等违规行为,识别后 10 秒内触发现场声光报警(报警音量 $\geq 100\text{dB}$),并同步推送预警信息至管理人员手机端。高空作业平台(如电动吊篮)增设荷载传感器(测量范围 $0\text{--}10\text{kN}$,精度 $\pm 0.1\text{kN}$)与倾角传感器(测量范围 $\pm 15^{\circ}$,精度 $\pm 0.1^{\circ}$),当荷载超过额定值(如 630kg)或倾角超过 8° 时,平台自动断电并锁定,防止倾覆。个人防护装备升级为智能安全带,内置 GPS 定位模块(定位精度 $\leq 3\text{m}$)与心率传感器(测量范围 $40\text{--}200$ 次/分钟),若作业人

员出现心率异常(>120 次/分钟)或位置超出安全区域,系统自动触发救援预警,缩短应急响应时间^[5]。

3.3.2 环境因素

动态控制除温湿度、风速监测外,补充环保与特殊天气防控:施工区域设置粉尘在线监测仪(测量范围 $0\sim1000\mu\text{g}/\text{m}^3$,精度 $\pm10\mu\text{g}/\text{m}^3$)与噪声监测仪(测量范围 $30\sim130\text{dB}$,精度 $\pm1\text{dB}$),当 PM_{10} 浓度超过 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,自动启动雾炮机(喷雾量 $\geq30\text{L}/\text{min}$);噪声超过昼间 70dB /夜间 55dB 时,调整作业时间(如将焊接作业安排在 $8:00\sim18:00$),并在作业区周边设置隔声屏障(隔声量 $\geq25\text{dB}$)。雨季施工时,在钢结构支座、吊装设备等处安装临时接地装置(接地电阻 $\leq10\Omega$),并配备雷电预警仪(预警距离 $\geq30\text{km}$),当检测到雷电活动时,提前30分钟停止高空作业,将设备电源切断,防止雷击事故。冬季低温施工(环境温度 $<5^\circ\text{C}$)时,在密封胶施工区域搭建保温棚(内置电暖气,维持棚内温度 $\geq15^\circ\text{C}$),并采用低温型密封胶(适用温度 $-10^\circ\text{C}\sim-40^\circ\text{C}$),确保胶缝固化质量(固化时间较常温延长 $\leq50\%$)。

4 质量控制实施保障体系

4.1 组织与制度保障

4.1.1 成立三级质量管控组织

项目部设持一级建造师+质量工程师双证的专职质量工程师,制定“三检制”流程,其中作业班组100%检查并填写《工序自检记录表》完成自检,下道工序通过交接检查重点核查焊接质量与安装精度实现互检,项目部采用超声波探伤仪、塞尺等工具对 $\geq30\%$ 工序进行抽检完成专检;企业总部每月开展飞行检查,核查焊接工艺评定、淋水试验报告等关键工序验收记录。

4.2 技术与培训保障

4.2.1 开展分层分级培训

管理人员需学习GB50205《钢结构工程施工规范》、JGJ102《玻璃幕墙工程技术规范》,通过80分以上考核方可上岗;技术工人需参加焊接工艺实操培训(板厚 $\geq16\text{mm}$ 时需持AWSWI证书)及玻璃吊装模拟实训,确保实操考核通过率100%;特殊工种(焊工、架子工等)需持特种作业证上岗,每季度开展高空坠落救援、火灾扑救等应急演练。

4.3 信息化管理保障

4.3.1 构建BIM+IoT智慧管控平台

集成设计-施工-运维数据至BIM模型并生成“质量控制二维码”,扫码可查看节点构造、验收标准、责任人等信息;同时在钢结构关键节点布置应变计、倾角传感器,通过物联网监测实时上传数据至平台,当变形超预警值(设计值80%)时自动报警;此外建立构件“数字身份证”电子档案,记录材料批次、施工时间、检测结果等信息,实现质量可追溯至具体操作人员。

5 结论

大跨度采光顶幕墙施工质量控制需构建覆盖设计、材料、工艺、管理的全链条管控体系。本文提出的协同设计优化、材料分级验证、工艺标准化等策略,可有效解决结构变形、渗漏、精度不足等核心问题。工程实践中,需结合具体跨度($30\sim100\text{m}$)、地域气候(温差、风压)等条件细化控制参数,如北方地区需重点强化温度变形补偿(伸缩缝按 $\pm40^\circ\text{C}$ 温差设计)并采用低导热系数保温连接件,沿海地区需提高风荷载安全系数(1.8倍以上)同时加强钢结构防腐涂层体系(干膜厚度 $\geq200\mu\text{m}$)。

参考文献

- [1]周丹.椭圆型大跨度采光顶幕墙的施工技术创新与应用[J].北方建筑,2025,10(04):130-133.
- [2]田永灿,周雨晴,莫林昊,等.基于大跨度空间异形钢结构的双层采光顶幕墙设计施工关键技术[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2023年全国工程建设行业施工技术交流会议论文集(中册).中建三局集团有限公司;,2023:307-309.
- [3]钟昊书,柳一鸣,胡伟,等.采光顶索网软平台施工技术[J].建筑施工,2018,40(10):1768-1770.
- [4]朱静磊,柯子平,邢鹤遥.大跨度采光顶及临空侧邦精装修施工[J].天津建设科技,2022,32(5):56-58,67.
- [5]吴江滨,陈大鹏.北京地区双层幕墙应用分析[J].建筑技术,2011,42(10):892-895.

作者简介:刘后伟,(1990.01-),男,湖北石首人,汉族,助理工程师,大学本科,研究方向:建筑幕墙施工。