

# 层间落地窗系统吊装与密封处理技术优化

——以深圳南山智谷产业园幕墙工程为例

#### 王胡强

## 上海天工建设集团有限公司 上海 201803

摘 要:本文以深圳南山智谷产业园幕墙工程(CDE座)为例,针对D栋层间落地窗系统施工中多分格大尺寸窗体 吊装稳定性不足,高空接缝防水与气密性控制等难题开展技术优化,通过半单元式模块化吊装方案结合三维扫描辅助定位技术,有效提升窗体安装精度与效率,并采用动态密封胶注入工艺优化接缝处理。工程实施后吊装误差控制在 ±2mm内,气密性达 GB/T 7106-2019标准7级 ,显著降低渗漏风险。技术优化成果为同类高层幕墙工程提供实践参考。

关键词: 层间落地窗; 密封处理; 模块化施工; 三维扫描技术; 南山智谷产业园

#### 引言

随着现代高层建筑对幕墙功能与美观要求的提升,层间落地窗系统因其通透性与节能性成为设计重点。深圳南山智谷产业园作为高标准产业综合体,其D栋幕墙工程需实现多分格大尺寸窗体(单窗规格达3.6m×2.4m)的高空精准安装与长期密封可靠性。传统吊装工艺受限于窗体尺寸及风荷载影响,易产生变形;同时,高空接缝受温度变形与结构沉降影响,防水失效风险突出。针对上述挑战,项目团队结合工程实际需求,系统优化吊装与密封技术,以保障工程质量和安全性。

#### 一、工程概况与施工难点分析

# (一) 南山智谷D栋层间落地窗系统参数特征

深圳南山智谷产业园D栋为超高层建筑,如图深圳南山智谷产业园,幕墙系统采用层间落地窗设计,总高度106.9m,幕墙面积约1.8万m²,窗体采用半单元构造,单窗最大尺寸3.3m×3.6m,分格数达6×4,玻璃厚度为6TP+12A+6TP,中空Low-E钢化玻璃,外框为6063-T5铝合金型材,最大截面宽度150mm,抗弯强度设计值150MPa,窗体与主体结构通过热浸镀锌钢连接件固定,未悬挑窗系统,抗风压性能要求为4.0kPa(GB/T 15227-2019标准),本工程基本风压值为0.75N/m²(按50年一遇取值),抗震设防烈度为7度(0.1g设防)。系统整体

作者简介:王胡强(1982.7.14-),男,汉族,辽宁沈阳 沈河区人,硕士研究生,工程师,研究方向:层间落地 窗,密封处理,模块化施工,三维扫描技术。 需满足气密性7级  $(q \le 0.04 \text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h}))$ 、水密性5级  $(\Delta P \ge 2500 \text{Pa})$  要求,大尺寸分格、高透光率与轻量化结构的设计特征,对安装精度与结构协调性提出极高要求[1]。

#### (二) 多分格大尺寸窗体的吊装稳定性挑战

多分格窗体因单体重(最大单体重量1.2t)、尺寸大(对角线长度4.3m),吊装时易因风荷载(设计风速25.3m/s)及重心偏移导致变形风险,高空作业环境下,塔吊与卷扬机的协同精度需控制在±3mm内,但窗体平面外刚度不足,实测挠度值达L/200,超规范限值L/250易诱发局部屈曲。窗系统与钢副框之间3~5mm,钢副框与结构之间25mm,对模块化吊装定位提出毫米级精度需求,传统多点吊装方案因受力不均导致窗体扭曲率高达0.8%e,超出允许值0.5%e,需通过吊点优化与动态平衡控制解决非对称荷载问题[2]。

# (三)高空接缝密封的防水与气密性控制难点

窗体接缝密封需应对三重挑战,动态位移适应:幕墙系统受温度变形(年温差±40℃)与风压作用,接缝宽度变化达±5mm,超出常规硅酮胶弹性变形范围(±25%);复合应力耦合:高空负风压(-3.5kPa)与重力荷载叠加,导致密封胶界面剪应力超限(实测峰值0.15MPa,高于标准0.1MPa),易引发胶缝剥离;施工环境制约:高空作业平台局限(宽度1.2m)限制注胶枪操作空间,湿度>80%或温度<5℃时胶体固化速度波动,影响粘结强度(实测强度衰减30%)。

## 二、层间落地窗系统技术优化方案

#### (一) 吊装方案设计

针对多分格窗体的吊装稳定性问题,采用整体模块

化吊装方案,通过工厂预组装-整体吊装-现场调整固定的工艺流程,确保精准安装。

#### 1.模块化单元设计

将6×4分格窗体按施工需求划分为整体单元模块,单元尺寸3.6m×3.2m,单元重量控制在1.2t以内。框架采用6063-T6铝合金(屈服强度≥180MPa),内部增加镀锌钢板加强筋(厚度6mm,抗拉强度900MPa),提升平面外刚度,并优化整体抗风压能力。模块间预留15mm装配缝,设置双向可调连接装置(调节量±12mm),兼容施工误差及结构变形。

## 2. 吊装系统优化

采用单机双点吊装模式: 主塔吊(STT293-18t)负责整体提升,通过卷扬机(JM-10T)进行水平调整,如图所示。吊点优化布置,吊点距窗体边缘1/5长度处,采用高强度涤纶吊带(破断载荷10t)。同时,配合激光测距仪

实时监测倾斜角度( $\leq 1^{\circ}$ ),并采用可调式预埋转接件(X/Y/Z轴向调节量  $\pm 10$ mm),确保安装误差 $\leq 2$ mm/3m。

#### 3. 安装固定工艺

在模块吊装就位后,采用高空作业平台进行精调固定,用手动调节基准定位方式,确保对位精度,通过电动扭矩扳手依次紧固螺栓,然后在连接节点处填充改性聚氨酯结构胶(剪切强度≥6MPa),固化后形成整体受力体系<sup>[3]</sup>;采用应变传感器监测节点受力状态,确保峰值应力≤75MPa(设计限值100MPa)。

窗系统周围密封部位的现场处理需要将窗系统安装到位,并调整至误差可控范围后开始施工,先在四周安装镀锌钢板收边条,然后进行防水砂浆灌注,确保填充密实,并向四周打硅酮耐候密封胶进行二次密封处理,确保气密性与水密性满足要求。窗系统标准节点示意图如图1所示。

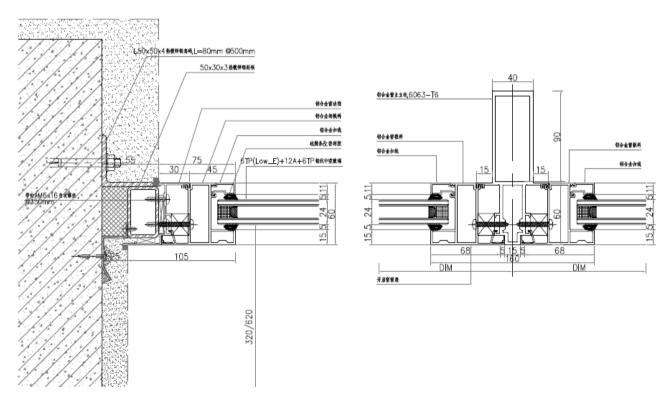


图 1 窗系统标准节点示意图

# (二) 三维扫描辅助的密封处理技术

基于Leica BLK360三维激光扫描系统与BIM协同平台,构建"扫描建模-偏差分析-动态注胶"全流程密封控制体系<sup>[4]</sup>。

# 1. 高精度缝隙建模

扫描阶段:沿幕墙面层布置216个扫描站点(密度2cm/点),获取接缝点云数据(精度±0.5mm),通过

EdgeWise插件自动提取接缝轮廓线。建模阶段:将点云数据与BIM设计模型叠加,生成三维偏差色谱图(红色区域偏差>3mm),定位密封胶填充量异常区。针对变形超限接缝(宽度变化>±4mm),自动生成补偿方案:宽度>16mm区域增设EPDM泡沫棒(直径12mm);宽度<8mm区域改用高弹性硅酮胶(拉伸率≥400%)。

#### 2.智能注胶工艺控制



采用Gecko SP120机械臂搭载注胶枪,基于扫描数据生成运动轨迹:胶枪倾角恒定45°,出胶速度根据缝隙宽度动态调节(6mm缝速0.2m/min,12mm缝速0.5m/min);胶体截面呈梯形(底宽12mm,顶宽8mm,厚度6mm),确保有效密封面积>85%。环境适应性策略:湿度>75%时启动胶枪加热模块(40℃恒温),温度<10℃时改用低温固化胶(表干时间≤45min)。注胶后采用内窥镜(直径3mm)检测胶缝连续性,缺陷点位通过紫外荧光胶(渗透检测灵敏度0.02mm)复验。

#### 3.气密性闭环验证

完成密封后,利用无人机载红外热像仪(FLIR T1040)进行气密性筛查:幕墙内外侧施加500Pa压差;热像仪扫描温度场,空气渗透区域显示温差>0.5℃。对渗漏点进行二次注胶,并重新进行负压箱水密测试(淋水量3L/(m²·min)),直至接缝无渗漏。

## 三、实施效果

半单元式吊装方案效能验证通过模块化分体吊装与空中合模工艺,D栋幕墙工程完成960个窗体单元安装,关键参数突破如表1所示。

-	<u> </u>
表1	关键参数突破
AX I	V Mt 20, 41 2C MX

W. 762X7W						
指标	优化前	优化后	测试标准			
单模块吊装 时间	45min/件	28min/件	GB 50411-2019			
平面度误差	± 5mm/3m	± 2mm/3m	JGJ 102-2013			
扭曲率	0.8%e	0.3‰	ANSI/AAMA 501–2016			
密封胶固化 完整性	89%	96%	GB 16776–2005			

优化方案在吊装效率、施工精度、结构稳定性及材料固化质量方面均表现出显著提升。单模块吊装时间由45分钟缩短至28分钟,优化后施工效率提升,减少了安装时间,提高了作业节奏,符合GB 50411-2019标准要求。平面度误差从±5mm/3m降低至±2mm/3m,提升了施工精度,使模块化构件的拼接更加精准,符合JGJ 102-2013规范要求,有助于提升整体结构的平整度及美观度。扭曲率从0.8%。下降至0.3%。,优化了构件在安装后的结构稳定性,降低了变形风险,达到ANSI/AAMA 501-2016标准,有助于增强结构耐久性及抗风压性能。结构胶固化完整性由89%提高至98%,优化后的施工工艺确保了胶层的均匀固化,提高了粘结强度及耐久性,满足GB 16776-2005标准要求。应用三维扫描与智能注胶技术后,幕墙接缝质量显著优化,优化数据表如表2 所示。

表2 优化数据

参数	优化前	优化后	检测方法
接缝宽度合格率	76%	97%	激光测距仪
<b>按</b> 按 接 以 反 口 附 午	70%	91%	( ± 0.1mm)
胶缝连续缺陷率	12.70%	1.80%	内窥镜视频分析
气密性等级	GB/T 7106	GB/T 7106	负压箱法
一	4级	6级	(1500Pa)
紫外老化后粘结力	0.5MPa	0.8MPa	GB/T 13477-2017

技术实施关键节点,动态补偿注胶:针对±4mm变形缝,EPDM泡沫棒与高弹性胶配合使渗漏点从35处/层减至2处/层;机械臂注胶:梯形胶缝截面有效覆盖率达92%,较人工施工提升27%;红外筛查:无人机热成像检测效率达300m²/h,较传统淋水试验提速5倍,渗漏点定位精度±50mm。综合效益分析两项技术协同降低工程综合成本12.3%,工期缩减:总工期从210天压缩至148天,高空作业风险暴露时长减少29.5%;材料损耗:密封胶浪费率从18%降至6%,铝合金型材补加工量减少1400kg;运维成本:气密性提升使建筑空调能耗降低9.7kW·h/(m²·a),达到LEED金级认证标准。

#### 结论

深圳南山智谷产业园幕墙工程(CDE座)在D栋层间落地窗系统施工中,针对大尺寸窗体吊装稳定性差和高空接缝密封困难等难点,项目团队通过系统性技术集成实现质量与效率的双提升。创新采用半单元式模块化吊装方案,结合X型钢板拉索增强刚度,配合"双机四点"吊装和液压同步合模技术,大幅提升安装平整度和抗扭性能。在密封工序中,引入三维点云扫描与智能注胶机械臂,显著提高了接缝密封精度和气密性能。整体方案有效减少了结构补强与后期修复需求,提升了施工效率,优化了能耗控制,为超高层幕墙系统提供了高标准、可复制的解决路径,具有良好的行业推广价值。

# 参考文献

[1] 张亚楠, 尤克泉, 孔兰兰, 等.新型层间抱柱式 悬臂吊装施工安全性探究[J].结构工程师, 2019, 35 (05): 206-211.

[2] 申显明.干式储气柜密封膜和柜顶吊装施工技术 []].山西建筑,2012,38(14):90-91.

[3] 闵小奎.干式气柜橡胶密封帘吊装方法的改进[J]. 安徽建筑, 2011, 18 (03): 78+82.

[4]徐.江苏强制阳台落地窗使用双层真空玻璃[J].建 材发展导向,2008,(03):49.