

# 幕墙工程施工高处作业安全防护技术的优化与应用

王健

南京继航装饰工程有限公司

DOI:10.32629/ems.v8i3.18759

**[摘要]** 随着城市化进程的加速,高层及超高层建筑兴起,幕墙作为其现代化发展的产物,应用日益广泛。然而,幕墙工程施工高度高、作业环境复杂、多工种交叉,导致高处坠落等安全事故风险居高不下,制约着行业的安全发展。传统的安全防护技术与管理模式已难以完全适应现代幕墙工程,特别是复杂异形幕墙施工的安全需求。因此,对高处作业安全防护技术进行系统性优化与创新性应用,具有极其重要的现实意义与理论价值。本文旨在深入分析当前幕墙高处作业安全防护存在的核心问题,探讨从技术装备、管理体系到人员培训的全方位优化路径,并结合实际工程案例,验证优化技术的应用成效,以期提升我国幕墙工程施工的安全性提供参考。

**[关键词]** 幕墙工程; 高处作业; 安全防护; 技术优化; 智慧安全

## 引言

建筑幕墙是集建筑技术、功能和艺术于一体的建筑外围护结构,其施工活动几乎全部属于高处作业范畴。根据国家统计局与应急管理部门的数据,建筑业安全事故中,高处坠落事故常年占比超过50%,而在幕墙施工专项中,这一比例更高。每一次安全事故,不仅造成生命财产的巨大损失,也对工程进度、企业声誉乃至社会和谐稳定产生严重冲击。

当前,幕墙施工安全防护主要依赖于安全带、安全网、防护栏杆等传统被动式防护措施,以及以经验为主的安全管理制度。这些措施在常规项目中发挥了一定作用,但也暴露出来防护设施标准化程度低、动态风险监控能力弱、一线作业人员安全意识与技能水平参差不齐等问题。特别是在单元式幕墙吊装、大型异形曲面幕墙安装、超高层施工等复杂工况下,更凸显出传统防护手段的局限性。

因此,推动幕墙工程施工高处作业安全防护技术的优化升级,从“被动防护”向“主动预防”与“智慧管控”转变,是实现行业安全生产长治久安的必然选择。

## 1. 工程高处作业安全防护的现状与挑战

当前,幕墙施工安全防护体系在长期实践中形成了一定基础,但面对新的建筑形式与施工要求,其内在缺陷与外部挑战并存,构成了严峻的安全形势。

### 1.1 主要依赖的传统防护技术及其局限性

目前,现场普遍采用的安全技术主要包括四种。第一,个人防护装备(PPE),如安全带、安全绳、防滑鞋等,这是最后一道防线,但其有效性依赖于作业人员的规范佩戴与正确使用。第二,基坑、洞口与临边防护,采用钢管扣件搭设防护栏杆、铺设脚手板或安装定型化防护网,但幕墙施工中,作业面随安装进度不断变化,此类防护常需临时拆除与恢复,容易形成防护缺口。第三,脚手架与操作平台,包括落地式、悬挑式脚手架以及各类吊篮、移动操作平台。它们提供了作业面,但其自身安全性至关重要。脚手架搭设不规范、吊篮

安全锁失效、平台超载等问题屡见不鲜。第四,安全平网与立网,用于防止人员坠落或坠物伤人,但其设置位置、安装强度常不满足要求,且容易因焊接、切割等作业而损坏。

这些技术的局限性体现在多个层面,比如多为“静态”防护,难以适应幕墙施工“动态”变化的作业环境;防护设施之间、防护设施与施工工艺之间常存在冲突,导致工人违规拆除;防护效果受材料质量、安装精度和后期维护影响大,易产生老化、损坏问题。

### 1.2 安全管理体系存在的普遍性问题

#### 1.2.1 风险预控不足

安全技术交底流于形式,针对特定工序、特定部位的专项安全方案缺失或可操作性不强,危险源动态辨识与评估机制不健全。

#### 1.2.2 过程监控薄弱

安全员配备不足或能力有限,难以对分散的、高空的作业点实施有效监督。安全检查多为定期、定性,缺乏实时、定量的数据支撑。

#### 1.2.3 分包管理混乱

幕墙工程专业分包常见,但总包与分包、分包与劳务队伍之间的安全责任界面不清,安全投入被层层挤压,标准难以统一落实。

#### 1.2.4 应急预案与演练实效性差

预案脱离实际,演练变成“演戏”,一旦发生险情,无法有效响应。

### 1.3 人员因素带来的关键挑战

人是安全生产中最活跃也最不确定的因素。幕墙施工一线作业人员多为农民工,流动性大,其安全意识、安全知识与操作技能虽经过培训,但时间过短,培训效果往往不理想。在实际工作中,为图方便、赶工期而冒险违章作业的现象时有发生,如不正确系挂安全带、擅自操作设备等。同时,管理人员的侥幸心理和麻痹思想,也是导致安全措施落实不到

位的重要根源。

#### 1.4 新技术、新工艺带来的新风险

随着建筑造型日益复杂, BIM技术、3D打印构件、机器人安装等新技术逐渐应用, 单元式幕墙、双层呼吸式幕墙、光伏幕墙等新工艺不断涌现。这些变革在提高效率的同时, 也引入了新的风险, 如超大超重构件的吊装风险、复杂节点安装的稳定风险、新设备操作的安全风险等, 对既有防护技术与管理模式提出了全新挑战。

### 2. 高处作业安全防护技术的优化路径

针对上述问题与挑战, 必须从技术硬实力和管理软实力两方面进行系统性、协同性优化, 推动安全防护向精细化、智能化、一体化方向发展。

#### 2.1 防护设施与装备的迭代升级

##### 2.1.1 推广定型化、工具化安全防护设施

大力研发和应用标准化、模块化的临边防护栏、洞口盖板、安全通道等。这些设施安装拆卸快捷、周转率高、防护可靠, 能有效减少因现场制作导致的防护缺失和强度不足问题。

##### 2.1.2 开发与施工工艺深度适配的专用防护平台

针对单元式幕墙安装, 优化设计带防坠落系统的轨道式或爬升式安装平台; 针对异形曲面幕墙, 开发可灵活调整的柔性作业平台。使作业平台不仅是施工载体, 更是集成了多重防护功能的“安全堡垒”。

##### 2.1.3 提升个人防护装备(PPE)的科技含量与人性化设计

推广使用带有双钩、缓冲包、定位报警功能的高性能安全带。研发集成通讯、照明、生命体征监测的智能安全帽, 使其在提供基础防护的同时, 成为人员状态感知终端。采用更轻便、更透气的高强度材料, 提高穿戴舒适性, 促进工人自觉使用。

##### 2.1.4 强化防坠系统的系统性应用

在施工前期设计中, 规划覆盖全作业区域的水平生命线或垂直生命线系统。生命线应选用耐腐蚀、高强度的不锈钢缆绳或轨道, 锚固点需经过严格计算和测试, 确保能承受冲击载荷。

#### 2.2 智慧安全技术的集成应用

##### 2.2.1 基于物联网的实时状态监测系统

在吊篮、操作平台、塔吊等设备上安装传感器, 实时监测载重、倾斜、风速、运行参数等, 超限时自动报警并锁止。在关键临边洞口设置电子围栏, 通过红外或UWB(超宽带)技术, 实现人员越界预警。

##### 2.2.2 人员智能定位与行为识别系统

利用UWB、蓝牙信标等技术, 实现作业人员的厘米级精确定位, 动态掌握其位置分布。通过视频监控AI算法, 自动识别未系安全带、攀爬危险区域、聚集超员等违规行为, 并实时向监控中心和管理人员推送警报。

#### 2.2.3 BIM技术与安全管理的深度融合

在施工前, 利用BIM模型进行施工全过程仿真模拟, 提前辨识碰撞冲突和安全隐患, 优化施工顺序和防护方案。施工中, 将BIM模型与进度、安全监测数据关联, 实现风险的4D动态可视化管控, 便于管理人员精准决策。

#### 2.2.4 数字化工地安全管控平台

整合各类监测数据、视频信号、人员信息、审批流程等, 构建统一的智慧工地安全管理平台。实现风险一张图、管理一条线、数据一个库, 支持远程监控、智能预警、应急指挥和溯源分析。

#### 2.3 安全管理体系的流程再造

##### 2.3.1 构建全员、全过程、全要素的风险预控机制

推行基于“JSA(工作安全分析)”或“HAZOP(危险与可操作性分析)”方法的精细化安全技术交底。对每一道关键工序, 明确风险点、防护要求和应急措施, 并通过可视化方式传达至每一位作业人员。

##### 2.3.2 实施网格化与清单化安全管理

将施工区域划分为若干安全网格, 明确每个网格的责任人、风险等级和检查清单。利用移动终端进行日常巡查, 发现问题及时上传、整改闭环, 实现痕迹化管理。

##### 2.3.3 强化分包单位安全一体化管理

将分包单位安全员纳入总包安全管理体系, 实施统一培训、统一标准、统一考核。在合同中明确安全投入比例和支付方式, 确保安全资金专款专用。

##### 2.3.4 建立基于数据的安全生产绩效评价体系

收集和分析智慧安全系统产生的数据, 如隐患整改率、违规发生率、设备安全运行时长等, 对项目部、班组乃至个人进行客观、量化的安全绩效评价, 与奖惩挂钩, 驱动安全行为的内生动力。

#### 2.4 人员安全素质的赋能提升

##### 2.4.1 革新安全培训模式

利用VR技术, 模拟高空坠落、物体打击等事故场景, 开展沉浸式、体验式安全教育, 极大提升培训的震撼力和记忆度。开发手机APP微课程, 利用碎片化时间进行学习与考核。

##### 2.4.2 推行“行为安全观察与沟通”

鼓励管理人员和班组长定期对作业人员的安全行为进行非指责性观察和指导性沟通, 培养良好的安全习惯, 营造积极的安全文化氛围。

##### 2.4.3 建立关键岗位技能认证制度

对吊篮操作工、起重信号工、高处作业人员等关键岗位, 实行严格的培训、考核与持证上岗制度, 并定期复审, 确保其技能持续符合要求。

### 3. 优化技术的工程应用实践与效果分析——以上海中心大厦为例

### 3.1 项目概况与安全难点

上海中心大厦高 632 米, 其标志性的螺旋上升造型与总面积约 14 万平方米的柔性幕墙系统, 带来了三大核心安全挑战: 其一, 极端风荷载, 超高作业面风力强劲且因建筑形态产生复杂风场, 严重威胁重物吊装稳定性; 其二, 异形单元安装, 超过 2 万块尺寸角度各异的幕墙单元, 需在数百米高空进行毫米级精密安装, 人员临边作业风险极高; 其三, 立体交叉施工, 幕墙安装与土建、机电等多工种长期同步进行, 坠物与作业冲突风险交织。

### 3.2 优化防护技术的综合应用

针对上海中心大厦面临的挑战, 项目团队成功研发并实施了“专用平台+智慧系统+精细管理”的综合安全方案, 将系统性优化技术落到实处。

#### 3.2.1 定制化轨道式安装平台: 构建“移动安全堡垒”

为解决异形单元在超高曲面立面上安装的难题, 项目摒弃了传统脚手架, 创新性地采用了“轨道式吊车+双层吊篮”集成作业系统。具体而言, 4 台设置于空中的轨道吊车负责幕墙单元的垂直与水平运输, 而安装工人则在分布于塔楼周边的 32 个双层吊篮中作业。这一系统形成了一个可随施工进度同步爬升的环形安装平台, 其本质是一个集全封闭防护、标准化作业分区与顶棚防坠物功能于一体的“移动安全堡垒”, 从根本上为高空作业提供了稳定、安全的可靠界面。

#### 3.3.2 集成化智慧安全监控系统: 实现风险事前预警与事中控制

项目构建了覆盖人、机、环境的全方位智慧监控网络。其中, 环境监测与预警子系统发挥了关键作用: 在 338 米高的顶层设置测风仪, 对高空风荷载进行实时监测, 并严格执行“风力超过 6 级即停止高空安装作业”的硬性规定, 通过预案将极端天气风险关在门外。同时, 项目作为国内首批全过程应用 BIM 技术的超高层工程, 利用 BIM 模型进行施工模拟与冲突检测, 从设计源头上规避了众多潜在的安全风险。

#### 3.3.3 基于 BIM 的协同与精细化管理: 贯穿施工全流程

精细化安全管理理念贯穿始终。通过 BIM 模型进行三维可视化交底, 使工人理解每一块异形单元的吊装路径和就位方法。现场实行近乎严苛的“地毯式”安全检查, 并将责任落实到具体人员, 确保各项防护措施到位。这套将超前模拟、实时监测与严格流程相结合的管理体系, 是优化技术得以有效运行的坚实基础。

### 3.3 应用效果分析

上述融合性方案的应用, 取得了超越行业标准的综合成效。

#### 3.3.1 卓越的安全纪录

在长达数年的幕墙安装周期内, 面对超高层施工的极端风险, 项目实现了“零重大高处坠落事故”的安全目标, 轻伤率远低于行业平均水平。智慧预警系统成功将多重风险前

置化、显性化并有效控制。

#### 3.3.2 质量、效率与管理的协同提升

专用平台保障了安装精度与效率; BIM 技术与精细化管理大幅减少了工序冲突和返工。尽管前期技术投入较高, 但由此节约的安全成本、工期成本与品牌价值带来了显著的长期综合效益。

#### 3.3.3 形成可复用的技术与管理范式

上海中心的实践雄辩地证明, 通过设计引领的硬件革新、数据驱动的智能预警与流程为纲的精细管控三者深度融合, 能够系统性地解决超高层异形幕墙施工的安全难题, 为行业树立了可借鉴、可推广的标杆。

## 四、结论

幕墙工程施工的高处作业安全, 是一个复杂的系统工程, 绝不能依赖任何单一的技术或管理手段。本文的分析表明, 当前的安全防护实践在技术、管理和人员层面都面临深刻挑战。解决问题的根本出路在于, 打破传统思维定式, 走一条以“技术革新为驱动、体系优化为保障、人员赋能为根本”的综合性优化路径。

通过推动防护设施的“定型化、集成化、智能化”升级, 深度融合物联网、BIM、人工智能等“智慧安全”技术, 重构基于风险预控和数字化的“精细化安全管理流程”, 并运用科技手段革新“安全培训与文化建设”, 可以系统性地提升幕墙高处作业的本质安全水平。工程实践表明, 这种优化组合应用能够有效降低事故率、提升风险管控效能, 并产生良好的综合经济效益。

幕墙工程施工高处作业安全防护的优化是一个持续迭代、永无止境的过程。唯有坚持技术创新与管理变革双轮驱动, 凝聚开发者、设计者、施工者、监管者与科技工作者的共同智慧, 方能构筑起坚不可摧的“空中安全长城”, 护航中国建筑业在高质量发展道路上行稳致远。

## [参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工高处作业安全技术规范 (JGJ 80-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 中国建筑装饰协会. 建筑幕墙工程安全管理规程 (T/CBDA 48-2021) [S]. 北京, 2021.
- [3] 王守清, 张水波. 工程安全管理理论与实务 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [4] 李惠强, 唐菁菁. 基于 BIM 的施工期建筑安全风险智能预警研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53 (S1): 212-218.
- [5] 刘辉, 等. 物联网技术在超高层建筑施工安全管理中的应用研究 [J]. 施工技术, 2021, 50 (15): 85-89.
- [6] 张坚. 超高层建筑幕墙防火策略——以上海中心大厦内幕墙为例 [J]. 建筑技术开发, 2016, 43 (6): 90-92.