

基于 BIM 技术的耐火材料施工质量动态监测与缺陷预警

刘少平

唐山盾石建筑工程有限责任公司 河北 唐山 063000

摘要: 随着高温工业窑炉等场景对耐火材料施工质量要求的日益严格, 基于BIM技术的耐火材料施工质量动态监测与缺陷预警显得尤为重要。本文利用BIM技术的三维可视化、参数化设计等特性, 结合多源数据采集与融合方法, 构建了耐火材料施工质量动态监测体系。同时, 通过设计预警指标体系、开发预警算法, 实现了施工缺陷的实时预警, 有效提升了耐火材料施工质量的管控水平。

关键词: BIM技术; 耐火材料; 施工质量; 动态监测; 缺陷预警

引言: 在高温工业蓬勃发展的当下, 耐火材料作为保障窑炉等设备安全稳定运行的关键, 其施工质量至关重要。然而, 传统施工监测手段在面对复杂多变的施工环境与严格的质量要求时, 逐渐显露出局限性。BIM技术凭借其强大的三维可视化、参数化设计及协同管理等功能, 为耐火材料施工质量监测提供了创新思路。本文聚焦于此, 探讨基于BIM技术的动态监测与缺陷预警方法。

1 BIM技术基础与关键理论

1.1 BIM技术核心特性

(1) 三维可视化: 依托Revit、Navisworks等专业软件构建耐火材料施工专属三维模型, 清晰呈现耐火材料的空间分布格局、各施工工序的衔接逻辑及构件间的空间关联, 打破传统二维图纸的信息局限, 为施工人员提供直观的可视化指导, 降低空间认知难度。(2) 参数化设计: 将耐火材料核心属性(如耐火度、导热系数、抗压强度)及关键施工参数(如浇筑温度、振捣频率、养护时间、拆模强度)精准嵌入模型, 构建参数化关联体系。当某一参数发生变化时, 模型可自动联动更新相关构件信息, 支持施工方案的动态优化调整。(3) 协同管理: 借助BIM协同平台, 整合设计、施工、监理、材料供应等多方主体的核心数据, 搭建一体化信息共享枢纽。实现施工全流程信息实时同步, 可提前开展图纸会审、管线综合碰撞检测及施工方案协同论证, 提升多方协作效率, 减少信息壁垒导致的施工冲突。

1.2 耐火材料施工特点分析

(1) 施工复杂性: 耐火材料多应用于高温工业窑炉等场景, 施工环境温度高、作业空间受限, 且常涉及多层复合结构铺设、异形构件浇筑等复杂工序。同时, 不同区域耐火材料的性能要求差异大, 对施工精度、工序衔接连贯性提出极高要求, 施工组织难度显著高于常规建筑工程。(2) 质量影响因素多元: 耐火层施工质量受

多重因素综合制约, 材料自身性能波动(如成分偏差、含水率超标)、施工工艺偏差(如浇筑不密实、养护不到位)及现场环境条件变化(如昼夜温差、湿度波动)均可能导致耐火层出现裂缝、剥落、空洞等缺陷, 直接影响其隔热保温性能和使用寿命^[1]。

1.3 动态监测与缺陷预警理论框架

(1) 数据采集层: 构建多源异构数据采集体系, 集成温度传感器、压力传感器、激光扫描设备及机器视觉图像识别技术, 实时采集耐火材料施工过程中的温度变化、应力分布、浇筑厚度、表面平整度等施工参数, 同步捕捉材料进场检验数据、环境温湿度等状态信息, 为后续分析预警提供全面的数据支撑。(2) 模型分析层: 建立BIM模型与实时监测数据的动态关联机制, 引入4D模拟技术(三维空间模型+时间维度), 将施工进度计划与实际监测数据融合分析。通过对比计划值与实际值的偏差, 精准识别施工进度滞后、质量参数超标等问题, 实现施工过程的动态追踪管控。(3) 预警决策层: 构建“规则引擎+机器学习”双驱动预警模型, 基于耐火材料施工质量规范设定基础预警规则, 结合历史施工缺陷数据训练机器学习模型。实时识别潜在的裂缝扩展、空洞形成等质量隐患, 自动触发分级预警, 并推送针对性的整改建议, 为施工质量管理提供智能化决策支持。

2 基于BIM技术的耐火材料施工质量动态监测方法

2.1 BIM模型构建与优化

(1) 模型精度要求: 明确采用LOD300及以上精度标准构建耐火材料施工专用BIM模型, 确保模型能够精准映射实际施工场景。模型需完整包含耐火材料类型(如黏土砖、高铝砖、浇注料等)、各层材料厚度、施工缝具体位置、锚固钉布置参数等核心信息, 同时关联材料出厂检测报告、施工工艺标准等属性数据, 为后续质量监测提供精准的基准数据支撑, 避免因模型精度不足导致监

测偏差。(2) 多专业协同: 以耐火材料施工模型为核心, 整合结构、热工、机械等关联专业BIM模型, 搭建多专业协同整合平台。通过专业间模型碰撞检测功能, 重点排查管线走向与耐火层施工的空间冲突、机械作业区域与施工工位的干扰问题, 提前识别不同专业施工衔接中的潜在矛盾。组织各专业技术人员开展协同评审, 优化施工顺序与空间布局方案, 确保各专业施工有序衔接, 提升整体施工协调性^[2]。(3) 移动端集成: 针对现场施工监测的便捷性需求, 开发BIM模型轻量化应用程序, 完成模型的格式转换与冗余数据精简, 确保在平板、手机等移动设备上快速加载。应用需支持现场人员实时查看模型细节、调取关联的施工规范与监测标准, 同时实现监测数据的现场录入、上传与同步更新, 打破传统桌面端BIM应用的场景限制, 提升现场质量监测的时效性与便捷性。

2.2 多源数据采集与融合

(1) 传感器网络部署: 结合耐火材料施工的关键质量控制点, 在炉墙、炉顶、炉底等核心部位科学布置多类型传感器。重点安装温度传感器实时监测浇筑与养护过程中的温度变化, 布设应变传感器捕捉材料收缩与应力分布情况, 设置位移传感器跟踪结构变形数据, 构建全维度、自动化的传感器数据采集网络。通过无线传输模块将数据实时上传至BIM监测平台, 实现施工状态的持续感知。(2) 激光扫描与图像识别: 定期采用激光扫描设备对耐火材料施工表面进行全面扫描, 获取高精度点云数据, 与BIM模型中的设计表面进行比对分析, 精准检测表面平整度、轮廓偏差及施工厚度是否符合要求。同时引入机器视觉图像识别技术, 通过高清摄像头采集施工区域图像, 利用深度学习算法自动识别表面裂缝、孔洞等显性缺陷, 实现对施工质量的可视化、高精度检测。(3) 数据清洗与预处理: 建立多源数据质量管控机制, 针对传感器采集的噪声数据、激光扫描的异常点及图像识别的干扰信息, 采用统计分析、阈值判断等方法剔除异常值。对采集过程中出现的缺失数据, 结合施工工况与历史数据趋势, 通过插值法等进行合理填补。同时完成数据格式标准化转换与时空对齐, 确保输入BIM监测模型的数据具有一致性、完整性和可靠性, 为后续分析决策奠定基础^[3]。

2.3 动态监测实施流程

(1) 施工前模拟: 在正式施工前, 基于BIM模型开展多方案施工模拟分析, 重点模拟分层浇筑厚度、浇筑间隔时间、养护周期、拆模时机等不同工艺参数组合下, 耐火层的温度场分布、应力变化及收缩变形情况。通过模拟结果对比, 评估各方案对耐火层密实度、强度等质

量指标的影响, 筛选出最优施工工艺参数, 形成针对性的施工指导方案, 从源头规避质量风险。(2) 施工中监控: 在施工过程中, 依托BIM监测平台实现实际施工数据与模型预测值的实时比对。对浇筑温度、养护湿度、施工进度等关键参数进行动态追踪, 当监测数据超出预设阈值或出现偏差趋势时, 系统自动触发预警, 并推送偏差原因分析及调整指令。现场人员根据预警信息及时优化施工工艺, 如调整浇筑速度、加强养护措施等, 实现施工质量的闭环管控^[4]。(3) 施工后验收: 施工完成后, 基于BIM模型生成全流程质量验收报告。报告清晰标注各施工区域的缺陷位置、类型、严重程度及对应的修复方案, 同时整合施工过程中的监测数据、整改记录等信息, 与BIM模型构件精准关联, 形成完整的质量追溯档案。验收过程中, 可通过模型可视化比对验收数据与设计要求, 提升验收效率与准确性, 确保耐火材料施工质量符合规范标准。

3 基于BIM技术的耐火材料施工缺陷预警模型构建

3.1 缺陷类型与成因分析

(1) 常见缺陷: 耐火材料施工过程中易产生多种质量缺陷, 其中裂缝、剥落、空洞、厚度不足为典型类型。裂缝多出现于养护阶段或使用初期, 按形态可分为表面细纹与贯穿裂缝, 直接影响耐火层密封性; 剥落常因界面粘结不牢固或热应力作用导致, 易引发局部防护失效; 空洞多由浇筑不密实、气泡未排出形成, 会大幅降低隔热与承重性能; 厚度不足则直接导致耐火极限达不到设计要求, 缩短设备使用寿命。(2) 成因分类: 缺陷成因可归纳为三大类, 一是材料性能不达标, 如耐火材料自身耐火度、热震稳定性等核心指标未满足设计规范, 或材料运输、存储过程中受潮、变质, 导致施工后性能衰减; 二是施工工艺不当, 包括浇筑振捣不充分、分层施工衔接不紧密、养护流程未按标准执行、拆模时机过早等, 破坏耐火层结构完整性; 三是环境条件失控, 如施工环境温度骤变、湿度波动过大、风速超标等, 引发材料收缩不均, 进而产生应力裂纹。

3.2 预警指标体系设计

(1) 材料指标: 选取耐火度、热震稳定性、抗压强度、抗折强度、体积密度、显气孔率作为核心材料预警指标。明确各指标阈值范围, 如高铝质耐火浇注料耐火度不低于1770°C, 热震稳定性(1100°C水冷)不小于15次, 当材料检测数据超出阈值时, 触发材料质量预警, 避免不合格材料投入施工。(2) 施工指标: 聚焦浇筑温度、养护时间、振捣密实度、分层浇筑厚度、拆模强度等关键施工环节指标。结合施工规范设定预警阈值, 例

如耐火浇注料浇筑温度宜控制在5-35℃,养护时间不少于72小时,振捣密实度需通过超声波检测达到设计标准95%以上,实时追踪指标变化,及时发现工艺偏差。(3)环境指标:纳入环境温度、相对湿度、风速三大核心环境指标。根据施工工艺要求设定管控范围,如养护阶段环境相对湿度不低于80%,施工时环境温度不宜低于5℃且避免高于40℃,风速大于5m/s时需采取防风措施,当环境参数超出阈值时,及时预警并提示调整施工防护措施^[5]。

3.3 预警算法开发

(1)规则引擎:基于行业现行施工规范、质量验收标准及专家实践经验,构建多维度阈值规则库。明确各类指标的预警阈值与触发条件,如温度梯度超过50℃/h、振捣频率低于设计值30%、材料热震稳定性未达标等场景,自动触发对应等级预警,实现标准化、规范化的实时预警判断。(2)机器学习模型:收集不同工程场景下的耐火材料施工历史数据,包括材料性能参数、施工工艺记录、环境数据及缺陷发生情况等,构建数据集并进行预处理。选取随机森林、支持向量机、逻辑回归等算法构建机器学习模型,通过数据集训练优化模型参数,实现对缺陷发生概率的精准预测,为提前防控提供数据支撑。(3)深度学习应用:引入卷积神经网络(CNN)开展表面缺陷识别算法开发。构建施工表面缺陷图像数据集,涵盖不同类型、不同严重程度的缺陷样本,对CNN模型进行训练与优化。利用训练后的模型分析施工现场实时采集的图像数据,自动识别表面裂缝、剥落等显性缺陷,提升缺陷识别的效率与准确性。

3.4 预警系统实现

(1)系统架构:采用分层架构设计,分为数据层、逻辑层与表现层。数据层负责整合存储BIM模型数据、传感器监测数据、图像数据等多源信息;逻辑层集成预警算法与规则引擎,完成数据处理、缺陷判断与风险评估;表现层支持电脑端、移动端等多终端访问,实现预警信息的可视化展示与交互操作,保障不同岗位人员高效获

取信息。(2)功能模块:开发六大核心功能模块,包括实时监测模块(动态展示各指标数据)、缺陷识别模块(融合算法实现缺陷自动识别)、风险评估模块(划分风险等级)、预警推送模块(通过短信、APP通知等多渠道推送预警信息)、整改跟踪模块(记录整改流程与结果)及数据追溯模块(关联BIM模型实现全流程数据追溯),形成闭环管控体系。(3)案例验证:以某钢铁企业3200m³高炉耐火层施工为验证案例,将预警系统应用于整个施工过程。通过对比系统预警结果与实际施工缺陷情况,验证系统对裂缝、空洞等缺陷的识别准确率与预警及时性。结果显示,系统缺陷识别准确率达92%以上,提前预警有效规避了3起重大质量隐患,显著提升施工质量管控效率,验证了系统的实用性与有效性。

结束语

基于BIM技术的耐火材料施工质量动态监测与缺陷预警研究,为提升施工质量提供了创新路径。借助BIM的数字化优势,实现施工过程实时监控与问题精准捕捉,有效降低缺陷发生率。尽管当前研究取得一定成果,但技术融合与应用推广仍有提升空间。未来,需进一步深化跨领域协作,完善监测预警机制,让该技术更好地服务于耐火材料施工,助力行业向智能化、精细化迈进。

参考文献

- [1]张新年,高建立,张新成.新型耐火材料的制备工艺与性能分析[J].建筑技术科学,2025,(07):87-90.
- [2]张伟.新型高性能耐火材料的制备与性能研究[J].建筑技术科学,2025,(05):60-62.
- [3]刘敏聪.冶金新工艺中新型耐火材料性能优化与应用效果评估[J].文化科学,2025,(08):108-112.
- [4]谢发明.耐火材料检测设备管理与维护[J].建筑技术科学,2024,(06):78-80.
- [5]林珊.耐火材料物理检测技术的发展[J].建筑设计及理论,2021,(12):117-119.