

民爆器材与 BIM 技术融合在隧道爆破施工中的应用探索

李 强

中国葛洲坝集团易普力股份有限公司 重庆 400000

摘 要：隧道爆破施工中，民爆器材管理粗放与施工管控精准度不足的矛盾日益突出，BIM技术的数字化特性为破解这一难题提供了有效路径。本文聚焦民爆器材与BIM技术的融合应用，系统梳理二者融合的理论基础，阐述爆破参数优化、三维模拟等关键技术路径，结合施工全阶段实践分析应用价值，并提出结合AI、5G/6G的未来发展方向。研究表明，融合技术可实现民爆器材全生命周期可控与爆破施工动态管控，在天麻高速等工程中已实现超挖率降低25%以上的成效。推动二者深度融合，能从根源提升隧道爆破施工的安全性与效率，为川藏铁路等重大工程提供技术支持。

关键词：民爆器材；BIM技术；隧道爆破；施工安全；数字化管理

引言：隧道工程作为交通、水利等领域的核心基础设施，钻爆法仍是复杂地质条件下的主要施工方式。传统隧道爆破施工中，民爆器材从仓储、运输到使用的各环节依赖人工记录，易出现流向不明、管控脱节等问题；爆破参数设计则依托有限地质数据与经验判断，常导致超欠挖突出，仅超挖回填一项就可能增加数千万元成本。随着雅鲁藏布江下游水电工程、川藏铁路等重大项目推进，对隧道爆破的安全与效率提出更高要求。BIM技术的三维可视化、数据协同特性，与民爆器材全生命周期管理需求高度契合，二者融合成为推动隧道爆破从“经验驱动”向“数据驱动”转型的关键抓手，具有重要的理论与实践价值。

1 民爆器材与BIM技术融合的理论基础

1.1 民爆器材全生命周期管理需求

民爆器材的高危属性决定其必须实现全流程闭环管控，传统管理模式已难以适应现代隧道施工需求。从生产出厂到现场使用，民爆器材需经过仓储、运输、领用、起爆、残留物回收等多个环节，任一环节的疏漏都可能引发安全事故。传统人工台账管理方式易出现数据滞后、信息错漏问题，无法实时追踪器材流向与状态。隧道施工环境复杂，多班组交叉作业增加了器材管控难度，亟需建立数字化管理体系。全生命周期管理需求聚焦器材信息的全程可追溯，通过整合生产批号、运输轨迹、领用人员、爆破位置等数据，实现“来源可查、去向可追、责任可究”，为安全管控提供数据支撑，这一需求构成了与BIM技术融合的核心动因。

1.2 BIM技术的核心功能

BIM技术以三维数字化模型为核心载体，具备信息集成、可视化模拟、协同管理等核心功能，为隧道爆破施

工提供全方位技术支持。其参数化建模能力可构建包含地质条件、隧道结构、施工设备的一体化模型，将抽象的设计数据转化为直观的三维场景。可视化功能打破了传统二维图纸的信息壁垒，使施工人员能清晰掌握爆破区域的空间关系与地质特性。数据集成功能可融合地质勘察、器材参数、施工进度等多源信息，形成动态更新的数据库。协同管理平台支持设计、施工、监理等多方主体实时共享数据，实现跨部门高效协作^[1]。另外，BIM技术的模拟分析能力可预判施工风险，为参数优化与安全管控提供科学依据，这些功能与隧道爆破施工需求高度匹配。

1.3 融合技术路径

民爆器材与BIM技术的融合需构建“数据互通、流程协同、管控闭环”的技术路径，实现二者功能互补。首先通过数据接口开发，将民爆器材的全生命周期信息接入BIM模型，建立器材信息与隧道空间位置的关联映射，使每批器材的流向都能在三维模型中实时追踪。其次以BIM模型为协同载体，整合爆破设计、器材管理、施工执行等流程，实现设计参数向施工指令的精准传递。在技术实现上，采用“BIM平台+物联网”架构，通过RFID芯片、定位终端等设备采集器材实时数据，同步至BIM模型形成动态更新的数字化管控体系。最后构建分析预警模块，结合BIM模型的空间分析能力与器材的状态数据，实现风险的自动识别与预警，形成“数据采集-模型更新-分析预警-决策执行”的闭环管理流程。

2 民爆器材与BIM技术融合应用的关键技术路径

2.1 基于BIM的爆破参数动态优化

基于BIM的爆破参数优化打破了传统经验驱动模式，实现参数设计的精准化与动态化。首先在BIM模型中导

入详细地质勘察数据,通过智能机器人对围岩进行360度“CT式”扫描,重构爆破区围岩性态,形成精准的地质数字画像。结合民爆器材的性能参数,在模型中进行多方案爆破模拟,分析不同装药量、炮孔间距、起爆顺序对爆破效果的影响。通过数值仿真计算围岩应力变化与岩石破碎范围,优化参数以减少超欠挖。施工过程中,将爆破振动监测数据实时反馈至BIM模型,与模拟结果对比分析,建立参数修正模型。在天麻高速隧道工程中,该技术实现爆破参数厘米级优化,有效降低了超挖率与工程成本。

2.2 三维可视化爆破施工模拟

三维可视化模拟为隧道爆破施工提供了“预演”工具,显著提升施工精准度。利用BIM技术构建包含炮孔布置、器材安放、起爆网络的详细模型,直观展示爆破施工的全过程。通过动画模拟起爆顺序与岩石破碎过程,让施工人员清晰掌握各环节技术要求,替代传统二维图纸交底,提升技术传达效率。针对复杂地质区域,模拟不同地质条件下的爆破响应,预判可能出现的塌方、超挖等问题,提前制定应对措施。在施工前组织全员进行模拟演练,熟悉危险区域划分与应急处置流程。中交二航局在藻渡水库引水隧道施工中,通过BIM模拟优化炮孔布置方案,减少了现场返工,提升了施工效率。

2.3 施工安全管控与风险预警

融合技术构建了全方位的安全管控与风险预警体系,从源头降低爆破施工风险。在BIM模型中划定爆破危险区域并设置电子围栏,通过人员定位系统实时监测作业人员位置,当人员误入危险区域时,模型自动触发声光报警并锁定民爆器材使用权限。利用AI视觉识别技术对施工现场进行实时监控,自动检测人员安全帽佩戴、器材违规堆放等问题,同步反馈至BIM安全管控模块。将民爆器材的领用、起爆信息与模型关联,只有在符合安全条件时才能激活起爆权限,防止违规操作^[2]。通过传感器实时采集爆破振动、围岩变形数据,在BIM模型中动态展示风险指标,当数据超标时自动发出预警,为应急处置争取时间。

2.4 协同管理与数据共享

以BIM平台为核心构建的协同管理体系,打破了隧道爆破施工的信息壁垒。平台整合设计单位的爆破方案、监理单位的监管要求、施工单位的执行数据及民爆企业的器材信息,实现多方主体数据实时共享。设计变更可通过模型实时推送至各参与方,确保施工执行与设计要求一致。民爆器材的领用审批流程在平台上线上完成,结合BIM模型的施工进度节点自动核验领用合理性,避免

器材积压或缺。监理单位通过平台实时核查器材使用与爆破施工是否符合规范,同步上传验收数据。浙江新联民爆通过类似协同平台,实现了民爆全流程数字化监管,显著提升了管理效率与安全水平。

3 融合技术在隧道爆破施工各阶段的应用实践

3.1 施工准备阶段:方案优化与前期管控

施工准备阶段的融合应用聚焦方案优化与风险前置管控,为后续施工奠定基础。首先利用BIM技术构建隧道全断面三维模型,整合详细地质勘察数据与超前地质预报结果,精准识别软弱夹层、破碎带等不良地质区域。将民爆器材的性能参数库接入模型,针对不同地质分区模拟试算爆破参数,形成差异化的爆破方案,例如在硬岩区域优化装药量与炮孔深度,在软岩区域调整起爆顺序以控制围岩扰动。同时在模型中完成民爆器材存储区域规划与运输路线设计,避开施工主干道与人员密集区。通过平台完成器材领用流程标准化设计,将安全培训内容与BIM模型场景结合开展全员培训,确保施工人员掌握器材使用规范与应急措施,在川藏铁路部分隧道施工中,该阶段应用已实现方案优化效率提升40%。

3.2 施工实施阶段:过程管控与动态调整

施工实施阶段的融合应用实现民爆器材管理与爆破施工的动态协同。民爆器材运抵现场后,通过RFID技术快速完成信息核验与模型关联,在BIM平台上更新器材入库状态与存储位置,确保与实物一一对应。领用环节通过人脸识别与模型定位双重验证,施工人员在模型中指定爆破区域后,系统自动匹配所需器材类型与数量,生成电子领用单,杜绝违规领用。爆破作业前,在BIM模型中复核炮孔布置与器材安放位置,通过可视化模拟确认起爆网络连接正确性。起爆过程中,利用传感器将振动、声响等数据实时传输至BIM平台,与预设阈值对比分析,若出现异常立即触发预警。爆破后将实际超挖量、围岩稳定性等数据录入模型,与模拟结果对比,动态修正后续爆破参数,中交二航局通过该模式实现地质人员工作量减少80%,显著提升施工效率。

3.3 施工收尾阶段:验收评估与数据归档

施工收尾阶段的融合应用聚焦成果评估与数据沉淀,为后续工程提供经验支撑。爆破作业完成后,在BIM模型中标记实际爆破范围与效果,结合三维扫描技术获取隧道断面数据,自动对比超欠挖情况,生成量化评估报告。对民爆器材使用情况进行清算,在平台上完成剩余器材退库、残留物回收等流程的信息确认,形成完整的器材生命周期闭环记录。将施工全过程数据,包括地质勘察资料、优化后的爆破参数、安全监测数据、验收结果等,

与BIM模型深度融合,构建包含施工全信息的数字化档案。这些数据不仅为隧道后续衬砌施工提供依据,还可形成案例数据库,通过数据积累为同类工程的方案设计提供参考^[3]。在藻渡水库引水隧道工程中,归档的爆破数据已成为后续隧道施工的重要技术支撑。

4 未来研究方向

4.1 结合人工智能实现爆破参数的智能优化

人工智能与BIM技术的深度融合将推动爆破参数优化进入智能决策阶段,解决传统模拟分析的局限性。通过构建基于深度学习的预测模型,利用BIM平台积累的海量施工数据,包括地质条件、器材参数、爆破效果等,训练参数优化算法,实现从“数据输入”到“最优参数输出”的自动化决策。引入近场地质智能感知系统,通过随钻感知数据实时更新地质模型,AI算法可动态调整爆破参数以适应地质变化,解决传统方案“一刀切”的问题。结合计算机视觉技术,自动识别爆破后的岩石破碎程度与超挖情况,形成闭环反馈机制,持续优化算法模型。中科院武汉岩土所研发的“岩体力学+AI”体系已展现潜力,未来可进一步整合BIM数据,实现爆破参数的实时、精准优化,推动隧道爆破从“数据驱动”向“智能驱动”转型。

4.2 探索BIM+5G/6G在远程爆破监控中的应用

5G/6G技术的高带宽、低时延特性与BIM的融合,将突破隧道爆破监控的时空限制,实现远程精准管控。依托5G专网构建BIM协同平台,通过部署在隧道内的高清摄像头、传感器等设备,实时采集爆破振动、人员位置、器材状态等数据,以极低时延传输至远程控制中心。在BIM三维模型中同步展示现场实时画面与数据,管理人员可远程完成爆破前的安全核查、爆破过程的动态监控与爆破后的效果评估。结合VR/AR技术,远程人员可通过沉浸式场景直观掌握隧道内部情况,指导现场作业。山东移动在抽水蓄能电站项目中应用的5G+AI监控模式已验证可行性,未来融入BIM技术后,可实现“三维模型+实时数据+远程交互”的一体化监控体系,尤其适用于偏远

山区隧道或高风险区域的爆破施工^[4]。

4.3 推动技术标准制定与产业化推广

当前民爆器材与BIM技术融合应用缺乏统一标准,制约了产业化发展,亟需构建完善的标准体系与推广机制。应联合科研院所、施工企业、行业协会等多方力量,制定涵盖数据接口、模型构建、流程规范、安全标准的系列技术标准,明确器材信息接入BIM模型的数据格式,规范爆破模拟与参数优化的技术要求。建立融合技术的评价体系,从安全性、经济性、效率性等维度设定评价指标,为技术应用提供依据。推广“科研+施工”的协同模式,依托川藏铁路等重大工程开展技术示范,总结可复制的应用经验。搭建行业共享平台,整合优质技术资源与案例数据,培育专业技术服务团队,推动融合技术从试点应用走向规模化推广,最终形成中国“智能钻爆”标准体系。

结束语

民爆器材与BIM技术的融合是隧道爆破施工数字化转型的必然趋势,为解决传统施工中的安全管控难题与效率瓶颈提供了有效方案。从理论基础构建到关键技术突破,再到施工全阶段的实践应用,融合技术已展现出显著的安全效益与经济效益,在多项重大工程中实现了超挖率降低、成本节约的实际成效。随着技术不断成熟,这种融合模式将彻底改变隧道爆破施工的传统业态,推动行业从“经验驱动”向“智能驱动”转型,为我国重大隧道工程的安全高效建设提供坚实保障。

参考文献

- [1]孙悦.关于电子雷管应用中的安全技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(03):169-171.
- [2]杨红旗.电子雷管应用中的安全技术分析[J].化工管理,2020,(30):92-93.
- [3]王晓峰,杨柳青.民爆器材生产自动化技术应用与发展[J].爆破器材,2023,42(5):68-74.
- [4]陈建国,林海燕.智能制造在民爆行业的实践与探索[J].中国安全生产科学技术,2022,18(9):123-128.