

隧道爆破作业对邻近既有线路安全影响的现场控制实践

张文奇

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘要】：隧道爆破作业安全控制的核心，在于有效防控其对邻近既有线路的各类不利影响。这需要通过系统化的现场管控策略来实现。文章结合爆破作业的施工特性与既有线路的运营要求，从规范流程、落实防护、动态监测等方面构建现场管控体系。该体系可有效降低爆破振动、飞石等对既有线路的威胁，保障其运营安全与隧道施工的顺利推进，为同类工程提供参考。

【关键词】：隧道爆破；既有线路；现场控制；安全影响；施工管控

DOI:10.12417/2811-0536.26.02.079

引言

隧道爆破作业与邻近既有线路的安全协调是关键课题。爆破产生的振动、冲击波等动力效应，易对既有线路的轨道结构、路基稳定及运营安全构成潜在威胁。既有线路的持续运营特性，对隧道爆破施工提出了严格的安全管控要求。因此，如何在保障施工效率的同时，最大限度降低对线路的不利影响，成为亟待解决的实践问题。基于爆破技术特点与工程实际，通过优化工艺、强化防护、完善监测等手段，可实现爆破作业与既有线路安全的协同，为工程提供可靠保障。

1 邻近既有线路隧道爆破安全风险识别

(1) 爆破振动对既有线路结构的影响分析：爆破振动是主要影响因素，其在岩土介质中传播，对既有线路的轨道、道床及路基结构施加持续动力荷载。振动波通过岩土介质传至线路基础，可能引发轨道扣件松动、道床下沉、路基土体密实度变化等问题。长期累积效应还可能致使轨道几何尺寸偏差超标，影响列车运行平稳性与安全性^[1]。不同岩性的地层对振动波的传导效果存在差异，硬岩地层中振动波传播距离更远、衰减较慢，软岩地层则易出现振动能量集中现象，进一步加剧对既有线路结构的影响程度。

(2) 爆破飞石及冲击波的安全隐患排查：隧道爆破作业中，飞石与冲击波的产生与炸药用量、爆破方式、地质条件密切相关。飞石可能突破防护体系，直接撞击接触网、防护栏等线路设施，造成设备损坏甚至中断行车；冲击波则会对线路附属结构产生作用，导致接触网支架变形、信号设备故障等。冲击波引发的空气扰动还可能影响列车运行时的空气动力学环境，增加行车安全风险。现场隐患排查应聚焦于爆心距、防护体系的有效性、爆破参数合理性等关键环节。

(3) 施工干扰引发的既有线路运营风险评估：隧道爆破施工中的物料运输、机械作业等环节，会对既

有线路运营产生间接干扰。施工车辆与列车通行的交叉作业区域易出现交通拥堵，影响列车调度效率；施工过程中产生的粉尘、噪声等污染物，可能影响既有线路的行车视线与设备正常运行。若爆破作业时段与线路运营高峰协调不当，可能导致列车避让或限速，降低线路通过能力。因此，需结合运营计划，全面评估施工干扰风险。

2 隧道爆破作业现场管控基础条件构建

(1) 施工前期现场勘察与环境调研工作：施工前期需开展全面的现场勘察与环境调研。一方面，应明确既有线路的轨道类型、路基结构、运营密度、限速标准等核心信息；另一方面，需详细勘察隧道与线路间的地形地貌、岩土性质、地下管线等地质环境条件。通过实地测量确定爆破作业面与既有线路的水平距离、垂直高差，分析地层岩性对爆破效应的影响规律，掌握既有线路周边的敏感设施分布情况，为后续管控策略的制定提供准确的基础数据支撑，确保管控措施更具针对性与可行性。

(2) 爆破施工方案的安全优化设计：爆破施工方案设计应基于爆破力学与振动传播理论，结合现场地质勘察数据与既有线路结构特征，进行精细化、量化设计。采用萨道夫斯基公式等经验模型预测爆破振动峰值速度，依据《爆破安全规程》(GB 6722-2014)确定不同距离与岩性条件下的允许振速阈值，从而反演计算最大单段起爆药量。通过数值模拟(如ANSYS/LS-DYNA)分析不同爆破参数下振动波的传播规律与能量分布，进而优化炮孔布置、起爆顺序与微差时间，实现振动能量的定向释放与有效衰减。针对邻近既有线路段，优先采用分层分部开挖、预裂爆破或静态破碎等低扰动工法，严格控制爆破规模与频次，从源头上降低对线路结构的动力影响^[2]。

(3) 现场安全管控责任体系搭建：搭建层级清晰

的现场安全管控责任体系,明确各参与方的安全职责,从施工单位、监理单位到建设单位形成闭环管理。施工单位需设立专职安全管理小组,负责爆破作业现场的日常管控、措施落实与隐患排查;监理单位需加强对爆破施工全过程的监督检查,重点核查爆破方案的执行情况、防护措施的实施效果;建设单位需统筹协调施工与既有线路运营单位的沟通对接,建立信息共享机制,及时处理施工过程中出现的安全问题,确保责任层层落实、管控无死角。

3 隧道爆破作业现场防护措施实施

(1) 爆破作业面针对性防护设施设置:针对隧道爆破作业面的具体情况,设置多层次的防护设施。在爆破掌子面后方设置柔性防护网,选用高强度的土工合成材料,有效阻挡爆破产生的飞石与碎石,防止其向既有线路方向飞溅;在隧道洞口处安装刚性防护棚,采用型钢骨架与钢板组合结构,增强对冲击波与飞石的抵御能力,防护棚的长度与宽度需根据爆破作业范围与既有线路距离合理确定。对隧道与既有线路之间的边坡、山体进行加固处理,采用锚杆支护、喷浆防护等方式,防止爆破振动引发边坡溜塌、落石等次生灾害。

(2) 既有线路周边防护强化措施落实:在既有线路邻近爆破侧,设置间距0.5米、厚度12cm的C30钢筋混凝土预制板或抗压强度 $\geq 120\text{MPa}$ 的钢化玻璃防护屏障,屏障底部嵌入路基深度30cm固定,顶部高出轨道顶面2.2米,形成连续防护带,可有效阻挡时速 $\leq 80\text{m/s}$ 的飞石冲击及90%以上的施工粉尘,避免线路设备与列车受侵。对既有线路轨道扣件(扭矩达标值 $45\text{--}50\text{N}\cdot\text{m}$)、鱼尾板螺栓(预紧力 $\geq 120\text{kN}$)等连接部件开展100%全覆盖检测,更换锈蚀率超30%或变形量 $> 2\text{mm}$ 的老化损坏部件,通过加密扣件间距(每根轨枕增加1组)增强轨道结构稳定性,提升其抵御爆破振动(峰值速度 $\leq 2.5\text{cm/s}$)的能力^[3]。在既有线路上方接触网(额定电压 25kV)关键区段安装厚度3mm的硅橡胶绝缘防护套,防护覆盖率达100%,防止爆破产生的粒径 $\geq 5\text{mm}$ 杂物触碰接触网引发短路故障。如图1:



图1 隧道爆破作业面机械清渣与人员监控场景

(3) 爆破粉尘与噪声污染防控手段:实施爆破粉尘与噪声的源头控制与传播阻断相结合的综合防控策略。采用水封爆破或孔内水介质间隔装药技术,利用水雾化作用吸附爆破瞬间产生的细微粉尘;在作业面30m范围内设置高压雾炮机组与洒水喷淋系统,爆破前后各实施10分钟喷雾降尘,使作业区粉尘浓度控制在 4mg/m^3 以下。噪声控制方面,在爆破孔口覆盖高分子吸声泡沫垫层,并于隧道洞口内侧安装阻抗复合式消声器,可将空气冲击波噪声衰减 $18\text{--}25\text{dB(A)}$ 。同时在隧道与既有线路之间设立双层穿孔板吸声屏障,屏障高度不低于6m,有效阻断噪声传播路径,确保爆破期间距线路30m处噪声值低于 70dB(A) ,满足《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB 12523-2011)要求。

4 隧道爆破作业动态监测与调整优化

(1) 爆破振动及环境参数实时监测实施:建立覆盖全作业区域的爆破振动及环境参数实时监测系统,在既有线路轨道扣件、路基边坡坡脚、隧道洞口及衬砌关键截面等核心位置科学布设监测点。选用分辨率达 0.001mm/s 的高精度振动传感器、激光位移计等设备,24小时连续捕捉爆破全过程振动速度、位移量的瞬时变化与累积效应,同步采用粉尘浓度检测仪、噪声声级计实时采集作业区域空气质量与声环境数据。所有监测数据通过5G无线传输技术毫秒级反馈至现场管控中心,技术人员依托数据可视化平台动态分析变化趋势,精准研判对既有线路结构安全与运营稳定的影响程度,一旦数据接近或超过预设安全阈值,立即触发声光预警信号,第一时间暂停爆破作业并启动应急处置流程。

(2) 监测数据反馈与施工参数调整机制:构建基于监测数据驱动的爆破参数动态反馈调控系统。利用递归最小二乘法(RLS)或人工神经网络(ANN)模型,建立爆破振速峰值(PPV)与单段药量、爆心距、岩体阻抗之间的非线性映射关系,实现振动效应的超前预测。每次爆破后,系统自动比对预测值与实测值,若误差超过15%,则启动参数校正程序:依据HARRIES爆破振动模型进行反演计算,优化下一循环的钻孔深度、孔径、堵塞长度及微差时间。对于复杂地质段,引入振动信号时频分析(如小波变换),识别爆破振动的主频分布与既有线路结构自振频率的耦合风险,及时调整起爆网路,避免共振效应。通过“监测-预测-优化”的智能闭环,实现爆破施工参数的实时自适应调整,将振动影响控制在安全允许范围内^[4]。

4.3 既有线路运营状态同步跟踪检查

在爆破作业全过程中,应对既有线路运营状态实施“定点监测与动态巡查”相结合的跟踪检查,以及及时发现并处置隐患。安排经过专业培训的检测人员,采用轨道几何状态测量仪定期对轨距、水平、高低、轨向等关键指标进行高精度测量,每2小时完成一次重点区段全覆盖检测,一旦发现指标偏差超出允许范围,立即组织人员进行养护调整;组建巡查小组对路基边坡、道床、挡护结构等进行不间断巡查,重点观察是否出现裂缝扩展、基础下沉、土体溜塌等异常情况,详细记录巡查数据并建立隐患台账;同时与铁路运营部门建立24小时联动沟通机制,通过列车运行监控系统实时获取列车行驶过程中的振动反馈、车体平稳性等信息,全面掌握爆破作业对列车运营的实际影响,根据监测数据与反馈信息及时优化施工管控措施,确保既有线路运营安全与施工进度有序推进。

5 隧道爆破作业安全管控效果巩固

5.1 施工过程安全隐患常态化排查治理

建立并严格落实施工过程安全隐患常态化排查治理机制。该机制要求以既定周期对隧道爆破作业现场实施系统化、全方位的隐患排查,其范围须全面覆盖爆破参数执行准确性、防护设施结构完好性、监测设备工作有效性及既有线路周边环境稳定性等关键领域。排查工作遵循“日常巡查与专项检查相结合”的原则:日常巡查每日不少于2次,侧重于对高风险作业环节的即时性监察;专项检查则每周组织1次,旨在针对特定风险点或复杂工艺段进行深度诊断与剖析。对于发现的各项隐患,严格执行“登记建档-责任指派-措施制定-限时整改-复核销号”的闭环管理流程,确保所有隐患得以彻底消除,从根本上杜绝因问题累积而引发安全事故的可能性。

5.2 管控措施执行情况专项监督考核

应开展全覆盖、常态化的专项监督考核,以刚性约束保障各项管控措施落地见效。由监理单位主导、

建设单位协同组成专项考核小组,制定量化考核指标体系,每半月对施工单位的管控措施执行情况开展全面检查评估,考核内容涵盖爆破方案现场落实精度、防护设施安装规范性、监测数据记录完整性与真实性、隐患整改闭环效果等核心环节^[5]。应建立考核结果与绩效挂钩的奖惩机制。对执行到位、效果突出的班组予以表彰奖励;对落实不力、存在违规的班组进行约谈、通报、扣罚绩效,并限期整改复查。通过考核强化施工单位责任意识,规范作业行为,确保管控措施全流程有效执行。

5.3 同类工程管控经验总结与推广应用

隧道爆破作业全面完成后,组织技术骨干、监理人员及行业专家开展专项复盘,系统总结项目实施全过程的管控经验,精准梳理成功做法与待改进方向。从前期风险识别清单制定、施工方案精细化设计、防护措施针对性配置、监测数据动态调整机制等关键环节入手,深入分析技术要点与管理逻辑,提炼形成具有普适性的管控要点、操作规范及应急处置流程,编制标准化管控手册。将总结的成熟经验通过行业研讨会、技术交流平台等渠道,推广应用于同类邻近既有线路的隧道爆破工程,为后续项目提供可直接借鉴的实践模式,持续完善隧道爆破作业现场管控体系,助力行业安全施工与精细化管理水平的整体提升。

6 结语

本文围绕隧道爆破作业对邻近既有线路安全影响的现场控制展开实践探讨,明确了风险识别、基础构建、防护实施、动态监测与效果巩固的全流程管控思路。通过科学的风险排查、完善的管控体系、针对性的防护措施与动态的监测调整,实现了爆破作业与既有线路安全的协同推进,有效降低了各类安全隐患。隧道爆破作业的现场控制需紧密结合工程实际,注重措施的针对性与可操作性,未来需在技术创新与经验积累中持续优化管控策略,为更多同类工程的安全施工提供可靠支撑,保障交通基础设施建设与既有线路运营的安全稳定。

参考文献:

- [1] 杜伟峰,李琳,陈双.复杂地质条件下隧道爆破超欠挖控制技术研究[J].山西建筑,2025,51(23):149-152.
- [2] 徐欢乐,王伟,孔庆霄,等.爆破荷载作用下隧道围岩振动衰减规律研究[J].公路,2025,70(11):76-82.
- [3] 谷慧颖,徐利辉,高鹏,等.隧道掘进爆破对临近高架桥的振动影响[J].公路,2025,70(11):65-70.
- [4] 汤吉良.临近既有铁路的高速公路隧道控制爆破方案设计与振动安全分析[J].四川水泥,2025,(05):240-242+251.
- [5] 李永力.大断面隧道爆破开挖施工对既有铁路的影响研究[J].山西建筑,2025,51(05):131-136+151.