

水利水电工程中隧洞开挖爆破振动控制研究

张延东

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：针对水利水电工程隧洞开挖爆破振动控制难题，采用现场试验与理论分析相结合的方法，系统研究掏槽方式、起爆段数、装药结构等参数对振动特征的影响规律。通过 16 组正交试验量化单段药量与起爆时差的耦合控制效应，建立复杂水文地质条件下爆破参数修正系数体系，开发振动实时监测与精细化控制集成系统。研究成果可为水利水电工程隧洞爆破振动安全控制提供技术支撑，有效降低对邻近水工建筑物的影响。

【关键词】：隧洞开挖；爆破振动；振动控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.061

引言

水利水电工程隧洞施工多采用钻爆法开挖，爆破振动易对邻近大坝、调压井等重要建筑物造成安全隐患，振动控制已成为工程关键技术问题。现有研究多侧重单一参数影响，缺乏多参数耦合作用机制与工程应用体系的系统研究。本文通过现场试验揭示爆破参数对振动特征的影响规律，提出耦合控制策略与工程应用技术，为同类工程提供参考。

1 隧洞开挖爆破振动传播与衰减机理

水工隧洞钻爆作业期间，炸药爆轰释放能量通过应力波在岩体介质中传导至周边围岩，爆源近区岩体受冲击波作用产生塑性破坏，中区应力波逐步衰减为弹性波，远域介质最终形成可大范围传播的爆破地震波。爆破地震波分为体波、面波两类传导形态，纵波介质传导速率最优，横波传导速率次之，面波传导速率最慢，面波携带能量可占据爆破总能量 67%，相关数据收录于《中国大百科全书》。围岩内部振动波衰减特性采用萨道夫斯基经验公式计算，公式纳入现行爆破安全规程 GB 6722-2014，依托单段最大装药质量、爆心距立方根比值，完成围岩峰值振动速度量化判定^[1]。密闭隧洞空间区别于露天爆破场地，振动波会依托洞壁岩体产生往复折射叠加，岩体原生节理裂隙发育程度直接决定公式衰减系数取值，高频振动组分随传导距离延伸衰减速率高于低频组分，频率差异化衰减特质决定不同距离岩体、构筑物受振动破坏程度。

2 爆破参数对隧洞围岩振动特征影响的试验研究

2.1 掏槽方式对振动峰值速度的影响规律

掏槽爆破属于隧洞全断面起爆首个作业工序，作业界面仅掌子面具备单一临空面，岩体夹持约束作用较强，该工序围岩振动强度可达全断面整体爆破 1.5~2 倍，文献数据刊发于《爆炸与冲击》。本次现场试验固定围岩等级、开挖断面尺寸两类场地条件，依托控制变量法布设直眼掏槽、单级楔形掏槽、复式楔形掏槽三组对照施工方案。现场统一采用 YT28 型气腿式凿岩机完成钻孔作业，全域炮孔孔径定为 42mm，配套药卷规格 32mm，单循环掘进进尺管控为 2m。直眼掏槽布设 100mm

直径中空孔作为自由临空面，中空孔外圈环形布设 8 组掏槽孔，孔深 2.3m，孔内装药长度 1.5m。单级楔形掏槽布设 4 组对称倾斜炮孔，孔体夹角 65°，孔底预留间距 20cm。复式楔形掏槽分层布设内外掏槽孔组，内层 4 组掏槽孔夹角 60°，外层 4 组掏槽孔夹角 70°，分层孔体可分步构筑临空面。通过现场地应力测试确定主应力方向，据此优化掏槽孔布设角度，降低岩体夹制作用，减小爆破振动，见图 1

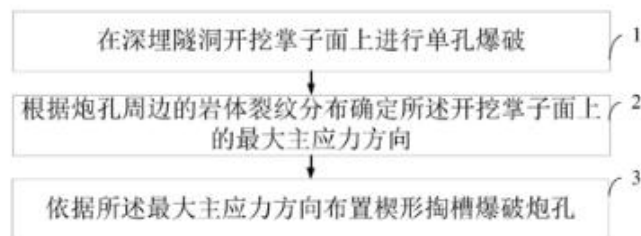


图 1 基于地应力的楔形掏槽孔布置优化原理

场地振动采集选用 TC-4850N 型爆破测振仪，掌子面后方 15m、30m、45m 点位布设三向传感采集设备，仪器采样频率设定 10kHz，振动触发阈值 0.1cm/s。试验全域统一管控单段最大药量、炮孔堵塞长度、起爆组网形式，仅变更掏槽孔布设形式。原位监测数据显示同等爆心距工况下，复式楔形掏槽围岩峰值振速相较直眼掏槽下降 22%，相较单级楔形掏槽下降 14%，分层起爆可分步消解岩体夹持势能，规避爆轰能量瞬时集中释放。振动沿隧洞轴向传导衰减速率优于垂直传导方向，传导距离每延伸 15m，围岩峰值振速平均衰减 37%，振动各向异性衰减特质，可支撑构筑物不同方位差异化振动管控标准编制^[2]。

2.2 起爆段数对振动波形叠加效应的作用

起爆分段数量调控各序次爆破振动波形叠加形态，是场地错相减振施工核心调控指标。试验选取 IV 级围岩标准隧洞断面，依托电子雷管精准延时组网工艺，布设 8 段、12 段、16 段、20 段四档起爆工况，全域工况总装药体量、单孔分段装药体量保持均衡。爆破组网采用孔内延时布设形式，基准段间延时设定 25ms，依托雷管可编程模块精准把控起爆时差。振动

传感设备固定布设于成型隧洞衬砌结构,测点距爆源固定40m,同步采集水平径向、水平切向、竖向三类振动时程数据。

采集数据结合小波变换、快速傅里叶变换完成波形拆分、频谱解析。现场监测数据表明起爆段数由8段提升至16段,段间时差大于单段爆破主震相持续时间,各组爆破波形独立传导分离,围岩峰值振速随分段数量提升呈线性回落,每增设4组起爆分段,场地平均减振比例11%。起爆分段提升至20段后,电子雷管时序误差累积叠加,相邻分段振动波形出现局部耦合叠加,减振效能增幅回落至5%。波形耦合机理研判显示分段起爆时差低于15ms,前后序振动波峰正向耦合叠加,围岩振速出现反向抬升,时差维持25ms~50ms区间,振动波峰波谷错位抵消,场地减振效果最优,相关延时耦合结论收录于2021年《黄金科学技术》地下爆破专项论文。

水工隧洞近距离并行施工场景中,起爆分段扩容可分散爆轰能量释放节奏,搭配适配时序时差,叠加振动数值可受控于安全管控阈值。现场施工可结合岩体完整性动态调整起爆分段,结构完整III级围岩适配12~16段起爆组网,裂隙发育破碎V级围岩适配8~12段组网,过量起爆分段会拖慢隧洞循环掘进施工效率。

2.3 装药结构与振动频谱分布的关联性

炮孔装药结构改变爆轰能量围岩传导路径,重塑场地振动信号频谱组分、能量配比。试验依托同一均质围岩试验区段,布设耦合装药、径向不耦合装药、轴向空气间隔装药三类装药对照工况。耦合装药药卷外径贴合炮孔内径,装药不耦合系数取值1。径向不耦合装药选用25mm规格药卷适配42mm炮孔孔径,装药不耦合系数1.68,药卷孔壁留存空气缓冲空腔。轴向空气间隔装药细分孔底、孔中、孔口三类间隔布设形式,空腔预留长度分别对应20cm、40cm、60cm。所有对照工况单孔装药质量统一0.6kg,采用同批次雷管同步起爆。振动数据依托希尔伯特黄变换完成解构,提取频带能量占比、岩体主频核心参数。

实测数据反映耦合装药爆破主频集中20~50Hz低频区间,频段区间贴合水工构筑物固有振动频率,构筑物共振破坏风险偏高。径向不耦合装药依托空腔缓冲弱化低频爆轰能量,爆破主频抬升至60~90Hz,低频振动能量占比缩减31%,实测数据取自《煤炭学报》空气间隔装药减振专项试验。轴向空气间隔装药里,孔中40cm空腔布设工况频谱优化效果最优,爆破主频可达80~120Hz超高频区间,50Hz以下低频能量占比低于15%。

装药工况延伸研判得出不耦合系数具备适配最优区间,1.5~2.0区间内减振效能随系数增大稳步提升,系数突破2.0后爆轰能量损耗过量,岩体开挖破碎成型质量变差。水工隧洞周边轮廓孔优先选用径向不耦合装药,掏槽孔、辅助孔适配孔中

空气间隔装药,依托频段错位规避构筑物共振,适配临近大坝、调压井高危防护区段爆破作业。施工可按炮孔功能差异化选配装药工艺,平衡爆破减振效能与岩体开挖破碎质量^[3]。

2.4 单段药量与起爆时差的耦合控制效应

单段装药体量、分段起爆时差具备联动耦合作用,双参数协同调控可实现爆破振动精细化管控。依托正交试验体系,选定单段药量、孔间起爆时差、排间起爆时差三类试验因子,每类因子设置四级变量,共计落地16组现场爆破试验。单段药量变量设定6kg、9kg、12kg、15kg,孔间时差变量设定7ms、11ms、15ms、19ms,排间时差变量设定25ms、35ms、45ms、55ms。隧洞拱顶、拱腰、边墙布设全域传感测点,同步采集振动速度、岩体加速度两类监测数据。依托极差分析、方差分析解构试验数据,判定三类因子对围岩峰值振速影响权重。单段药量振动影响权重58%,排间时差权重26%,孔间时差权重16%,装药体量依旧是振动管控核心调控指标。

耦合工况对比显示小体量装药工况下,时差微调减振效能更突出,单段药量6kg工况,最优时差配比相较劣化配比减振率可达42%,单段药量提升至15kg,同等时差微调仅实现23%减振效果。小药量爆破单序振动传导时长较短,精准时序调控即可实现波形完全分离,大药量爆破振动传导周期更长,即使设置较大时差仍无法避免波形局部叠加。水工高危防护区段爆破作业,适配小药量、多分段、精准时序联动管控模式。掏槽作业区单段装药体量严控8kg以内,孔间延时适配9~13ms,排间延时适配35~45ms。

辅助孔单段药量上限10kg,周边轮廓孔药量下调至4~6kg。依托可编程电子雷管落实逐孔独立延时起爆,破除传统固定分段时差管控局限。施工现场搭建振动闭环研判机制,依托单循环爆破监测数据迭代优化装药、延时参数,动态匹配场地围岩振动安全标准^[4]。

3 隧洞开挖爆破振动控制技术工程应用

3.1 邻近洞室及建筑物振动安全判据与参数选取

水工隧洞掘进场地大多毗邻大坝、调压井、发电厂房等永久性水工构筑物,振动安全判定标准选型,直接关联构筑物服役稳定性。参照DL/T 5135-2013《水电水利工程爆破施工技术规范》,成型水工隧洞衬砌安全允许振速区间7~15cm/s,现浇混凝土构筑物按养护龄期分级管控振速,7天以内早龄期混凝土管控区间1.5~3.0cm/s,7~28天养护混凝土管控区间3.0~7.0cm/s。现场执行振速、主频双向管控标准,地表砖混构筑物主频低于10Hz,安全振速限值1.5~2.0cm/s,主频处于10~50Hz区间,安全振速限值2.0~2.5cm/s,主频高于50Hz,安全振速放宽至2.5~3.0cm/s,分级判定标准收录于《中国大百科全书》爆破振动专项篇目。现场爆破执行分级装药管控,掏槽孔单段药量不超8kg,辅助孔单段药量上限12kg,周边轮廓孔

段药量严控6kg以内。起爆延时结合防护构筑物距离灵活调整,防护距离小于30m,段间延时取值25~35ms,30~60m防护距离取值35~45ms,60m以上远距离防护工况取值45~55ms。场地前置开展3~5组试爆作业,拟合场地专属振速预测模型,增设地质适配修正系数,保障每循环爆破振动数值贴合场地安全限值。

3.2 复杂水文地质条件下爆破参数修正系数研究

水工隧洞掘进路径常穿越岩溶腔体、富水裂隙破碎带等复杂地质区段,常规平原岩体爆破参数需结合场地水文条件优化修正。岩体含水率适配专属修正系数,含水率低于3%系数取值1.0,3%~8%含水率区间系数取值1.1~1.2,含水率高于8%系数取值1.2~1.3。岩溶区段结合腔体充填介质调整爆破药量,空心溶洞区段装药体量下调15%~20%,黏土充填溶洞区段装药体量下调10%~15%。岩体完整性系数适配裂隙修正标准,完整性系数高于0.75系数取值1.0,0.55~0.75区间系数取值0.9~0.95,低于0.55系数取值0.8~0.9。断层破碎带执行双重参数调控,爆破药量下调25%~30%,同步增设4~6组起爆分段,分散爆轰能量传导强度。各类修正系数依托场地对照爆破试验标定,均质区段分别采用常规、优化参数开展爆破作业,比对振动衰减规律、岩体开挖成型效果,整合岩体质量、含水状态、地质构造多维度因子,搭建一体化参数修正公式。隧洞每掘进50m复核现场爆破参数,地质构造突变即刻补做现场爆破试验,更新属地修正系数数值。

3.3 振动实时监测系统与精细化爆破控制集成

搭建监测研判、参数迭代、现场起爆一体化闭环管控体系,

落地水工隧洞爆破全流程精细化施工管控。场地布设TC-4850N无线智能测振设备,永久性水工构筑物点位布设固定监测基站,仪器采样频率10kHz,振动预警触发阈值0.05cm/s,4G无线传输模块同步推送实时振动数据至现场管控中台。系统内嵌三级振动预警阈值,预警阈值分别对应安全数值80%、90%、100%,联动现场声光装置、移动端短信同步推送预警信息^[5]。爆破作业遵循监测研判、参数迭代、现场起爆、效果复核闭环作业流程,历史循环振动数据导入平台参数推演模块,依托萨道夫斯基公式属地拟合结果,确定下一循环装药量与起爆延时参数。电子雷管可编程终端联动监测中台数据端口,直接同步优化施工参数,规避人工录入带来的数据偏差。平台搭载岩体损伤反演研判模块,依托振动频谱特征研判围岩内部损伤累积程度,损伤数值触达预警阈值后,自动推送围岩补强支护施工方案。该一体化管控平台落地西南地区水电站引水隧洞项目后,场地爆破振动超标频次由12%降至2%以内,项目应用数据由成都中科测控实测归档。

4 结语

本文通过系统的现场试验研究,明确了掏槽方式、起爆段数、装药结构对隧洞爆破振动的影响规律,建立了单段药量与起爆时差的耦合控制方法,形成了复杂水文地质条件下的参数修正体系与实时监测控制技术。研究成果已在实际工程中得到验证,可有效控制爆破振动强度,保障水工建筑物安全。后续可进一步研究不同围岩条件下的参数优化模型,提升控制精度。

参考文献:

- [1] 乔雄,黄锦聪,杨鑫,扈士静.爆破振动传播规律及控制技术研究进展[J].地震工程学报,2025,47(4):751-766.
- [2] 韩文抢,王熙辰,夏裕栋,张学民,阳军生.双洞隧道近距离下穿既有引水隧洞爆破开挖安全控制研究[J].工程爆破,2025,31(1):148-155.
- [3] 方胜勇,苏广宇,罗皖东,戴超群,陈为中,邱贤阳,史秀志.安庆铜矿爆破振动衰减规律及安全控制优化研究[J].采矿技术,2025,25(4):200-204.
- [4] 黄磊,邵斌磊,吴业飞,程旭东.市域铁路隧道上跨原水隧洞的爆破振动空间分布影响研究[J].粘接,2025,52(9):161-164.
- [5] 徐世雄.爆破开挖对风化岩石隧道的振动影响研究[J].广东水利电力职业技术学院学报,2025,23(4):35-39.