

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.011

白鹤滩水电站泄洪洞大断面开挖 爆破参数优化与振动控制研究

秦 洋

(中国安能集团科工有限公司, 北京 102600)

摘 要: 针对大型水电站泄洪洞工程中存在的超挖控制难、围岩损伤敏感等技术瓶颈,创新性提出“三维分层控制-复合爆破体系-动态参数优化”三位一体的施工技术体系。首先基于白鹤滩水电站泄洪洞地质特性构建分层开挖模型,第Ⅰ层高度8 m采用中导洞先行与侧墙扩挖,第Ⅱ层高度9 m作为核心爆破层,第Ⅲ层高度3 m为底板保护层。其次,采用“预裂-缓冲-主爆”协同爆破技术,综合运用深孔台阶爆破、预裂爆破等多重爆破方式。主爆孔采用连续装药结构,单孔装药量为24 kg;缓冲孔采用等间距空气间隔非连续不耦合装药结构,单孔装药量为14 kg,可在主爆区与预裂面间形成有效缓冲带;起爆顺序采用预裂孔先起爆、主爆孔跟进、缓冲孔最后起爆的方式。实现最大单循环进尺10 m、单次爆破方量1377 m³的施工突破。现场监测数据显示:该体系将爆破振动速度有效控制在8.2 cm/s以内,平均超挖8.6 cm,半孔率91.8%,形成具有显著工程特色的地下洞室爆破施工工法。

关键词: 大断面; 分层爆破; 振动监测

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0114-06

Study on Blasting Parameter Optimization and Vibration Control for Large-section Excavation of Spillway Tunnels in Baihetan Hydropower Station

QIN Yang

(China Aneng Group Science and Industry Co., Ltd, Beijing 102600, China)

Abstract: To address technical bottlenecks in flood discharge tunnel projects for large hydropower stations, such as difficulty controlling over-excavation and vulnerability to surrounding rock damage, an innovative three-in-one construction technology system consisting of “three-dimensional layered control-composite blasting system-dynamic parameter optimization” was proposed. Firstly, based on the geological characteristics of the flood discharge tunnel at the Baihetan Hydropower Station, a layered excavation model was constructed. The first layer, with a height of 8 m, employed a pilot drift and side wall expansion excavation method; The second layer, with a height of 9 m, served as the core blasting layer; and the third layer, with a height of 3 m, was the floor protection layer. Secondly, the “presplitting-buffering-main blasting” coordinated blasting technology was adopted, incorporating multiple blasting methods such as deep-hole bench blasting and presplitting blasting. Meanwhile, the main blasting holes adopted a continuous charge structure with a single hole charge of 24 kg; the buffer holes utilized an equally spaced air-spaced discontinuous decoupling charge structure with a single hole charge of 14 kg, forming an effective buffer zone between the main blasting area and the presplitting surface. The detonation sequence involved presplitting holes detonating first, fol-

收稿日期 (Date of reception): 2026-04-27

网络首发日期 (Published online): 2026-05-15

作者简介: 秦 洋 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程建设管理工作, (E-mail) 312064852@qq.com.

About the author: QIN Yang (1986-), male, master, senior engineer, mainly engaged in the construction and management of water conservancy and hydropower projects, (E-mail) 312064852@qq.com.

lowed by main blasting holes, and then buffer holes detonating last. This achieved a construction breakthrough with a maximum single cycle footage of 10m and a single blasting volume of 1377 m^3 . Field monitoring data shows that this system effectively controls blasting vibration velocity within 8.2 cm/s , with an average over-excavation of 8.6 cm and a half-hole rate of 91.8% , forming an underground tunnel blasting construction method with significant engineering characteristics.

Key words: large section; layered blasting; vibration monitoring

水工隧洞作为水利水电工程的关键输水、泄洪构筑物,常具有大断面、高埋深、地质条件复杂等特点^[1]。结构安全性、平整度、过流性能等要求高,对开挖轮廓的精确控制、围岩扰动的最小化以及施工效率的提升提出了严峻挑战^[2,3]。特别是在大断面隧洞的开挖过程中,爆破作为经济有效的岩石破碎手段,其技术方案的合理选择与参数设计的精细化^[4],直接关系到围岩稳定性、超欠挖控制、施工进度及工程成本^[5]。

大断面宜采用自上而下分层分区开挖,分层高度、分区方法可结合设计断面尺寸、围岩地质条件、施工工艺等因素综合考虑^[6,7]。当前国内大断面隧洞爆破技术已形成一定应用基础,但仍存在局限性,难以适配白鹤滩水电站泄洪洞的特殊施工需求。国内大断面隧洞通常采用钻爆台车水平分层开挖,循环进尺一般在 4 m 左右^[8],无法满足大型水电站泄洪洞高效施工的实际需求。结合白鹤滩水电站泄洪洞上平段中下层开挖工程,采用深孔台阶预裂爆破施工工艺与方法,与传统钻爆台车水平分层开挖比较,深孔台阶预裂爆破采用 ROCD7 液压钻进行竖向钻孔作业,钻孔与装渣可同步作业,施工进度较快;钻爆台车水平分层开挖无法实现钻孔与装渣同时作业,其效率较低。

1 工程概况

1.1 结构特征

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内,上游距乌东德坝址约 182 km ,下游距溪洛渡水电站约 195 km ,控制流域面积 43.03 万 km^2 ,占金沙江以上流域面积的 91% 。白鹤滩水电站的开发任务以发电为主,电站正常蓄水位为 825.0 m ,水库总库容 206.27 亿 m^3 。

水电站左岸共计布置 3 条泄洪洞,自金沙江向山体侧并排一字布置,依次为 3#泄洪洞、2#泄洪洞、1#泄洪洞,相邻泄洪洞两洞轴线间距 51 m ;泄洪洞进口右邻左岸坝肩开挖区,进口正前方为引水系统进水口开挖区。泄洪洞洞身为无压隧洞,由上平段和龙落尾段组成,上平段洞身断面形式为城门洞型,

开挖断面尺寸约为 $17 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高)。泄洪洞上覆岩体厚度 $260 \sim 310 \text{ m}$,岩体完整性较好,沿线地层岩性为致密状玄武岩,围岩类型以 II、III 类为主。

1.2 施工难点及特点

泄洪洞上平段断面宽大、高度较高,开挖过程中需严格控制对围岩的扰动,保证开挖轮廓的规则性,避免过度破坏。泄洪洞无压段部分玄武岩柱状节理较为发育,岩体内有大量不规则微裂隙,开挖后易形成不稳定的块体结构,卸荷以后岩体易松弛,若未及时支护,会持续发生松弛卸荷破坏,且破坏会逐渐向岩体深部发展,导致发生松弛变形、脱落掉块、局部失稳、垮塌等不良地质现象。

针对上述问题,需通过精细化分区爆破技术,采用光面爆破、预裂爆破等手段,确保开挖形体较为规则。同时,由于断面尺寸较大,具备机械化作业条件,有利于快速、高效组织现场生产^[9]。

2 施工方法

2.1 施工分层

上平段分三层开挖,以洞身 II 类岩石开挖支护断面为例。综合考虑预裂孔施工钻机操作空间,将第一层分层开挖高度定为 8 m ,采用中导洞先行,上层两侧扩挖跟进的方式进行,中导洞开挖宽度 9.2 m ,左右侧墙保护层各厚 3.9 m 。为匹配大型机械施工能力,实现钻孔、出渣等工序效率最优,第二层开挖采用台阶梯段爆破,开挖高度 9 m ,开挖面积 153 m^2 。第三层为底板保护层开挖,开挖高度 3 m ,主要是保护底板岩体的完整性,可减少底板基础的爆破振动^[10,11]。此分层方式通过合理控制开挖高度与保护层厚度,兼顾爆破施工空间与效果。开挖分层如图 1 所示。

2.2 主要施工方法

第 I 层开挖时,中导洞按照设计断面尺寸开挖放样;左右侧墙保护层开挖时,为便于 II、III 层预裂施工,左右侧墙按照设计开挖结构轮廓线适当进行技术性超挖 15 cm ,以保证下层预裂爆破施工空间。

第 II 层开挖采用 ROCD7 液压钻和 100B 潜孔

耗,kg/m³; a 为孔距, m; b 为排距, m。根据同类工程经验数据和相关资料, 结合地质条件, 主爆孔炸药单耗取 $q = 0.5 \text{ kg/m}^3$, $a = 2.5 \text{ m}$ 、 $b = 2 \text{ m}$ 、 $H_1 = 9.5 \text{ m}$ 代入式(1), 经计算 $Q_1 = 23.75 \text{ kg}$, 结合爆破试验和药卷规格, 取 $Q_1 = 24 \text{ kg}$ 。

(2) 缓冲孔

根据不同的爆破参数组合, 与主爆孔采用的爆破参数协调进行调整, 缓冲孔负担的爆破区的单孔爆破单耗比主爆破区稍低, 通过缩小间排距来减少单孔装药量, 在主爆区和预裂面间形成一个缓冲带。

将 $q = 0.44 \text{ kg/m}^3$ 、 $a = 2.2 \text{ m}$ 、 $b = 1.5 \text{ m}$ 、 $H_2 = 9.5 \text{ m}$ 代入式(1), 经计算 $Q_2 = 13.79 \text{ kg}$, 结合爆破试验和药卷规格, 取 $Q_2 = 14 \text{ kg}$ 。

(3) 预裂孔

影响预裂爆破效果的因素很多, 包括地质条件和物理力学性能、孔间距、钻孔孔径、炸药特性和不

耦合系数等, 同时又影响着装药量。在影响预裂效果及装药量的因素中, 岩石性质、孔距和不耦合系数较为重要。预裂孔采用 2#岩石乳化炸药, 药卷规格为 $\phi 32 \text{ mm}$ 、长度为 200 mm , 重量为 0.2 kg , 不耦合系数为 2.81 。为克服底板夹制作用, 在孔底采用 2 卷 $\phi 70 \text{ mm}$ 药卷。

根据长江科学院经验公式^[12], 预裂孔装药线密度

$$q = 0.042(\sigma_{\text{压}})^{0.5} a^{0.6} \tag{2}$$

式中: q 为预裂孔装药线密度, kg/m; $\sigma_{\text{压}}$ 为岩石极限抗压强度, MPa, 根据岩石力学试验测定, $\sigma_{\text{压}} = 165.8 \text{ MPa}$; a 为预裂孔孔距, m, $a = 0.8 \text{ m}$ 。

经计算可得 $q = 0.47 \text{ kg/m}$, 预裂孔长度为 11 m , 单孔装药量 $Q_3 = 5.17 \text{ kg}$, 结合爆破试验和药卷规格, 取 $Q_3 = 5.4 \text{ kg}$ 。

第 II 层爆破设计参数见表 1。

表 1 第 II 层开挖爆破设计参数表
Table 1 Design parameters for excavation blasting of layer II

炮孔类型 Blast hole type	孔深 Hole depth/m	孔数 number of holes	药卷直径 Roll diameter/mm	单孔药量 Charge per hole/kg	药量合计 Total Charge/kg	雷管段别 Detonator delay
主爆孔 Main blast hole	9.5	25	70	24	600	1、3、5、7、9
缓冲孔 Buffer hole	9.5	12	70	14	168	11、13
预裂孔 Pre-split hole	11	26	32/70	5.4	140.4	/

3.3 装药结构

(1) 主爆孔采用连续装药, 单孔总药量 24 kg , 药卷为 $\phi 70$ 乳化炸药(每节长 0.5 m , 重量 2 kg), 药卷共计 12 节, 总长度为 6 m , 孔口堵塞长度为 2.5 m 。

(2) 缓冲孔采用等间距空气间隔非连续不耦合装药, 单孔总药量位 14 kg , 药卷为 $\phi 70$ 乳化炸药,

每节药卷间距 0.6 m , 孔口堵塞长度为 2 m 。

(3) 预裂孔采用 $\phi 32$ 乳化炸药(每节长 0.2 m , 重量 0.2 kg)间隔装药, 单孔总药量为 5.4 kg , 每节药卷间距 0.8 m , 孔底连续装两节 $\phi 70$ 乳化炸药, 孔口堵塞长度为 2 m 。装药结构如图 4 所示。

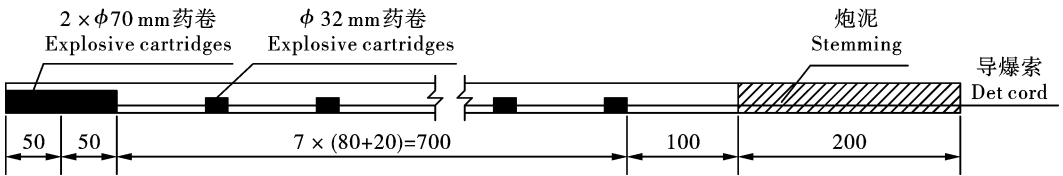


图 4 预裂孔装药结构示意图(单位:cm)
Fig. 4 Schematic diagram of presplitting hole charging structure(unit:cm)

3.4 网路设计参数

爆破网路采用预裂孔先于主爆孔最先起爆, 再主爆孔起爆, 缓冲孔最后起爆的方式。采用非电毫

秒微差导爆管雷管连接, 主爆孔按照 3~5 孔/段, 缓冲孔按照 7~8 孔/段, 控制最大单响药量不大于 120 kg , 起爆雷管选用磁电雷管, 爆破网路见图 3。

4 爆破振动影响监测

在 1#泄洪洞共布置 5 套质点爆破振动测试仪器,爆破振动监测成果见表 2,监测数据表明,测得

质点最大振动速度 8.2 cm/s,各爆破测点部位各方向的振动速度均小于地下洞室洞壁爆破振动安全允许标准(10 cm/s),说明各段位最大单响药量合理,对周边围岩和相邻部位爆破影响有限。

表 2 爆破振动监测成果表

Table 2 Blasting vibration monitoring results

测点编号 Measuring point number	距爆破中心距离 Distance from the blasting center/m	质点最大振动速度 Maximum vibration velocity of the mass point/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振幅 Main amplitude/Hz	结论 Conclusion
1	10.4	8.200	8.2	
2	25.4	8.092	12.3	低于安全允许值
3	100.1	3.876	31.7	Below the safety
4	196.4	1.607	328.7	allowable value
5	248.1	0.923	439.3	(10 cm/s)

5 实施效果

5.1 超欠挖

本工程共检测 939 个断面共 18 885 点,平均超挖(扣除地质超挖)8.6 cm。

5.2 不平整度和半孔率

不平整度共检测 224 个断面,最大值 20.6 cm,平均值 11.7 cm,检测点数 896 个,检测点合格率 91.2%;检查半孔 988 个,半孔率 91.8%。

5.3 单元工程质量评定

无压段共评定开挖单元 115 个,全部合格,合格率 100%,其中 109 个评定为优良单元,优良率 94.8%。

经过对边墙残留炮孔痕迹进行检查与统计分析,炮孔痕迹分布均匀,残留孔壁面没有明显的爆破裂隙。对节理裂隙不发育的完整岩体,半孔率 94.3%,高于 85%的规范标准;中等发育的岩体,半孔率 83.5%,高于 60%的规范标准;不平整度控制在 11.7 cm 内,优于规范的 15 cm 标准;各洞段的平均超挖均在 12 cm 以下,优于规范的 20 cm 标准;基本无欠挖。开挖效果如图 5 所示。

6 结论

针对大型水电站泄洪洞断面尺度大、地质结构复杂、围岩控制要求高等特点,提出并实施了分层爆破开挖技术。通过设计主爆孔、缓冲孔与预裂孔的爆破参数,引入明挖梯段爆破,提升了对大断面隧洞的成型控制与施工效率。工程应用表明,该方法适用于类似的大断面洞室爆破开挖,具有工程推广价值。



图 5 中层预裂爆破效果

Fig. 5 Effect of middle-level presplitting blasting

(1)构建大断面泄洪洞“智管融合”的分层开挖爆破模式。针对白鹤滩玄武岩地质特性,将露天梯段爆破理念引入洞室深孔爆破中,通过优化分层高度与孔网参数,实现了单循环 8~10 m 的超长进尺。实测证明,该模式显著提升了大型洞室的开挖效率,为类似工程提供了参考。

(2)揭示“预裂—缓冲—主爆”协同作用下的成型控制机理。通过设置缓冲孔衰减主爆区能量,结合不耦合装药结构的动态调整,有效降低了爆破对近区围岩的损伤。工程实测显示:平均半孔率达 91.8%,且轮廓清晰,实现了围岩扰动自边缘向深部的梯度递减。

(3)提出跨层连续预裂面形成技术。创新性采用 9 m 分层高度与 11 m 预裂深度配比,攻克了层间接缝处的岩石破碎难题,使Ⅱ层侧壁与Ⅲ层底板形成连续平整的预裂面。检测显示:平均超挖量仅为 8.6 cm,平整度误差控制在 11.7 cm 以内,显著优于现行水工标准规范。

参考文献 (References)

- [1] 周东平,王存成,罗文君. 超长特大导流洞洞室爆破开挖施工方法[J]. 四川水利发电,2022,41(3):41-45.
- [1] ZHOU Dong-ping, WANG Cun-cheng, LUO Wen-jun. Blasting excavation construction method for super-long and super-large diversion tunnel chamber[J]. Sichuan Water Power,2022,41(3):41-45. (in Chinese)
- [2] 龚伟毅,姚颖康,杜宇翔. 中等断面隧道长进尺直孔掏槽爆破开挖与超欠挖控制现场试验[J]. 爆破,2024,41(2):32-38.
- [2] GONG Wei-yi, YAO Ying-kang, DU Yu-xiang. Field test on long advance straight hole cut blasting excavation and over-excavation & under-excavation control of medium section tunnel[J]. Blasting,2024,41(2):32-38. (in Chinese)
- [3] 王振浩. 黄柏山隧道光面爆破技术[J]. 爆破,2022,39(2):100-106.
- [3] WANG Zhen-hao. Smooth blasting technology of huang-baishan tunnel[J]. Blasting,2022,39(2):100-106. (in Chinese)
- [4] 刘福生,蒋于波,王红霞,等. 特大断面TBM组装洞室爆破施工技术研究[J]. 水利水电技术,2017,48(12):70-77.
- [4] LIU Fu-sheng, JIANG Yu-bo, WANG Hong-xia, et al. Research on blasting construction technology of super-large section TBM assembly cavern[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(12):70-77. (in Chinese)
- [5] 杨玉银,杨仕杰,张艳如,等. 宽孔距爆破技术在大断面硬质岩石隧洞开挖中的应用[J]. 工程爆破,2024,30(1):66-72.
- [5] YANG Yu-yin, YANG Shi-jie, ZHANG Yan-ru, et al. Application of wide spacing blasting technology in excavation of large-section hard rock tunnel[J]. Engineering Blasting,2024,30(1):66-72. (in Chinese)
- [6] 熊祖钊,胡从骄,蔡路军. V级围岩大断面隧道爆破开挖技术[J]. 科学技术与工程,2018,18(17):279-284.
- [6] XIONG Zu-zhao, HU Cong-jiao, CAI Lu-jun. Blasting excavation technology of large-section tunnel in class V surrounding rock[J]. Science Technology and Engineering,2018,18(17):279-284. (in Chinese)
- [7] 官黎明,危 皓,冯志谦. 软弱围岩斜井大断面爆破开挖研究与应用[J]. 公路交通科技,2023,40(2):145-152.
- [7] GUAN Li-ming, WEI Hao, FENG Zhi-qian. Research and application of large-section blasting excavation for inclined shaft in soft surrounding rock[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(2):145-152. (in Chinese)
- [8] 易泽荣. 黄金坪水电站尾水隧洞特大断面爆破开挖施工技术[J]. 铁道建筑技术,2015(2):42-46.
- [8] YI Ze-rong. Construction technology of blasting excavation for super-large section tailrace tunnel of huangjinping hydropower station[J]. Railway Construction Technology,2015(2):42-46. (in Chinese)
- [9] 王 磊,高宇璠,傅洪贤. 小断面隧洞长短直眼组合掏槽爆破技术研究[J]. 爆破,2025,42(6):97-104.
- [9] WANG Lei, GAO Yu-fan, FU Hong-xian. Research on combined cutting blasting technology with long and short vertical holes in small-section tunnel[J]. Blasting,2025,42(6):97-104.
- [10] 李超斌. 大岗山水电站泄洪洞顶层大断面爆破开挖[J]. 工程爆破,2012,18(4):46-48. (in Chinese)
- [10] LI Chao-bin. Large-section blasting excavation at the top layer of dagan mountain hydropower station flood discharge tunnel[J]. Engineering Blasting,2012,18(4):46-48. (in Chinese)
- [11] 王 禹,崔正荣,王小兵,等. 适用于大断面马头门掘进的超前致裂分区爆破技术[J]. 爆破,2023,40(4):89-95.
- [11] WANG Yu, CUI Zheng-rong, WANG Xiao-bing, et al. Advanced fracturing zoned blasting technology suitable for large-section horsehead tunnel excavation[J]. Blasting,2023,40(4):89-95. (in Chinese)
- [12] 王玉杰,陈先锋,柴修伟. 爆破工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [12] WANG Yu-jie, CHEN Xian-feng, CHAI Xiu-wei. Blasting engineering [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press,2018. (in Chinese)

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。