

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.016

老木孔航电枢纽砂泥岩互层齿槽边坡 预裂爆破技术研究

于庆¹, 肖灿明¹, 韦海超²

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 成都 610010; 2. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 乐山 614000)

摘要: 为了提升老木孔航电枢纽砂泥岩互层齿槽预裂爆破成型效果, 结合地质勘探、岩石力学性能测试结果以及预裂爆破成缝机理, 对齿槽边坡预裂爆破方案及参数进行了精心设计, 提出了适用于复杂地质条件的线装药密度单孔个性化设计方法, 并且通过研发钻杆定位装置、控制装药细节及研制新型密封材料等措施来保障爆破作业质量。然后在此基础上, 开展预裂爆破的有限元数值模拟, 并且结合施工现场的预裂爆破试验, 进一步验证爆破参数设计及施工方案的合理性。数值模拟结果表明: 按照设计爆破参数实施齿槽边坡预裂爆破时, 相邻炮孔之间爆炸应力波能够有效叠加, 实现良好的爆生裂纹贯穿效果, 保留岩体基本无损伤破坏; 现场试验结果显示, 通过爆破参数精心设计与现场施工质量管控, 老木孔航电枢纽齿槽边坡预裂爆破成型效果优良, 平均半孔率超过90%, 平均平整度为6.5 cm; 优良的预裂成缝效果可以显著降低爆破振动, 各测点的振动速度及主振频率均控制在安全阈值范围内。研究结果验证了前期爆破方案及参数设计的合理性, 并且可以为同类复杂地质条件下的矿山边坡预裂爆破工程提供技术与实践参考。

关键词: 齿槽边坡; 砂泥岩互层; 预裂爆破; 老木孔航电枢纽; 数值模拟

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0160-09

Pre-splitting Blasting Technology for Tooth Groove Slopes in Sandstone Mudstone Interlayer of Laomukong Navigation Hydropower Hub

YU Qing¹, XIAO Can-ming¹, WEI Hai-chao²

(1. Sinohydro Engineering No. 5 Bureau, Chengdu 610010, China; 2. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China)

Abstract: Pre-split blasting serves as a critical technology in control blasting operations, with its superior formation quality contributing significantly to construction safety and project economic efficiency. To optimize pre-splitting blasting performance for tooth groove slopes within the sandstone-mudstone interlayer at Laomukong Navigation Hydropower Hub, this study integrates geological surveys, rock mechanics testing data, and theoretical analysis of blasting mechanisms. The research systematically develops comprehensive blasting plans with detailed parameters, while introducing customized linear charge density design methodology for individual blast holes adapted to complex geological environments. Quality control protocols were established for drilling operations, charging procedures, and stemming processes to guarantee blasting quality, involving the development of drill pipe positioning devices, precise charge control measures, and innovative stemming material formulations. Finite element numerical simulation of pre-splitting blasting was conducted using the dynamic analysis software ANSYS/LS-DYNA, complemented by field blas-

收稿日期 (Date of reception): 2025-04-21

网络首发日期 (Published online): 2025-12-22

作者简介: 于庆 (1990-), 男, 河南兰考人, 本科、工程师, 从事水利水电工程研究, (E-mail) 2312378702@qq.com。

About the author: YU Qing (1990-), male, born in Lankao city, Henan province, bachelor degree, engineer, mainly engaged in water resources and hydropower engineering, (E-mail) 2312378702@qq.com.

ting tests to validate the rationality of parameter design and construction methodology. Simulation results demonstrate that the designed parameters enable effective superposition of stress waves between adjacent blastholes during tooth-groove slope blasting, thereby achieving optimal fracture propagation while maintaining intact rock conditions in preserved zones with minimal damage. Field test results demonstrate that meticulous blasting parameter design and rigorous construction quality control achieved exceptional pre-splitting performance for the tooth-groove slopes at Laomukong Navigation Hydropower Hub, with average half-hole preservation exceeding 90% and surface flatness maintained at 6.5 cm. This optimized blasting effect effectively mitigated vibration impacts, maintaining all monitoring points' vibration velocities and dominant frequencies within established safety limits. The concrete left guide wall exhibits a maximum vibration velocity of merely 1.10 cm/s, significantly below the safety threshold of 3.5 cm/s. Its vibration frequency exceeds 10 Hz, surpassing typical structural natural frequencies (1 ~ 10 Hz). These findings validate the rationality of the initial blasting scheme and establish technical references for pre-splitting blasting projects under analogous complex geological slope conditions.

Key words: tooth groove slope; sandstone mudstone interlayer; pre-splitting blasting; Laomukong Navigation Hydropower Hub; numerical simulation

目前,钻爆法仍然是矿山开采、水电开发等基建领域的主要施工手段^[1-3]。其中,预裂爆破作为一种高效精准的控制爆破方法,其主要目的是通过调整爆生裂纹扩展方向,在主爆区与保留区岩体之间形成一条预裂缝实现有效隔离,从而提高保留岩体的稳定性和完整性。由此可见,预裂爆破作为矿山控制爆破的关键技术,其良好的成型质量有助于保障施工安全和提高工程效益^[4]。

近年来,围绕预裂爆破的破岩机理与工程应用,研究人员开展了诸多研究。例如,袁康等基于弹性力学基本原理构建了预裂爆破理论模型^[5],分别从应力叠加角度分析了起爆时差对裂纹定向贯穿效果的影响机制。马泗洲等基于理论分析和数值模拟^[6],揭示了地应力水平对预裂爆破成缝效果的影响机制,为复杂地质条件下的预裂爆破设计提供了理论依据。李恒等以某水电站边坡预裂爆破受到地应力影响为背景^[7],采用数值仿真软件构建了多孔不耦合装药爆破模型,研究了地应力作用下的预裂爆破破岩效果随不耦合系数变化规律。钟冬望等针对涉水边坡预裂爆破开展了爆破参数优化^[8],通过相似模型试验探究了不同炮孔直径和炮孔间距下的预裂爆破成缝效果。徐菲菲等为解决露天边坡超欠挖问题^[9],利用有限元模拟软件构建了不同炮孔间距的三维预裂爆破模型,基于对应力场演化和裂纹扩展的模拟结果分析,得到了炮孔间距的合理取值区间,并在爆破施工现场获得了较高半孔率和良好平整度。崔立明等采用高精度电子雷管保证预裂孔中炸药的同时起爆^[10],进而使得相邻炮孔应力波能够有效叠加,从而显著提升了预裂爆破成型质量,同时避免了使用传统导爆索带来的爆破危害效应。陈啸林等通过数值模拟室内试验构建了双孔预裂爆破

模型^[11],采用极差分析法探究了不同爆破参数对定向破裂效果的影响程度,并在此基础上确定了最佳的爆破参数组合。夏治园等通过理论分析阐明了预裂爆破成缝原理^[12],然后利用数值分析软件构建了多孔爆破模型,模拟了不同爆破参数下的孔间裂纹演化历程和最终成型特征,并在闸墩拆除爆破中取得了良好应用效果。阿旺加措等为保障白鹤滩水电站配套拱坝坝肩的安全高效开挖^[13],研究了不同预裂爆破参数下岩体的损伤分布情况,并在此基础上构建了一套复杂环境拱坝坝肩控制爆破技术。

基于上述分析可知,学者们针对预裂爆破已经开展诸多研究工作并取得了丰富成果。然而,每个工程所处的具体地质环境并不相同,爆破方案和参数的设计必将存在显著差异。因此,通常需要针对不同预裂爆破项目开展爆破设计与施工研究。本研究以老木孔航电枢纽砂泥岩互层齿槽边坡预裂爆破为例,通过现场实践,探索总结复杂地质条件下的预裂爆破设计与施工技术,以期类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 工程基本情况

岷江港航电综合开发项目是长江经济带综合立体交通走廊规划的重点项目,是四川深度融入“一带一路”建设、长江经济带发展、成渝地区双城经济圈建设等国家战略的重点工程。项目包括4级航电枢纽和岷江(龙溪口枢纽至宜宾合江门)航道整治工程、乐山港等子项目。老木孔航电枢纽是岷江乐山~宜宾河段4级航电中的第1级,开发任务以航运为主、结合发电,工程等别为二等,规模为大(II)型。

老木孔航电枢纽左岸一期一枯工程,建设主要内容包括岷江左岸1#~13#泄洪闸工程。13孔泄洪

闸在一期一枯围堰围护之下施工,必须在 2024 年汛前完成既定工作内容,满足安全度汛要求。齿槽作为坝体基础承力、抗滑、抗淘的重要结构及先行施工

内容,其开挖与混凝土浇筑是保证工期及安全度汛的关键工作之一。老木孔泄洪闸基础典型开挖断面见图 1。

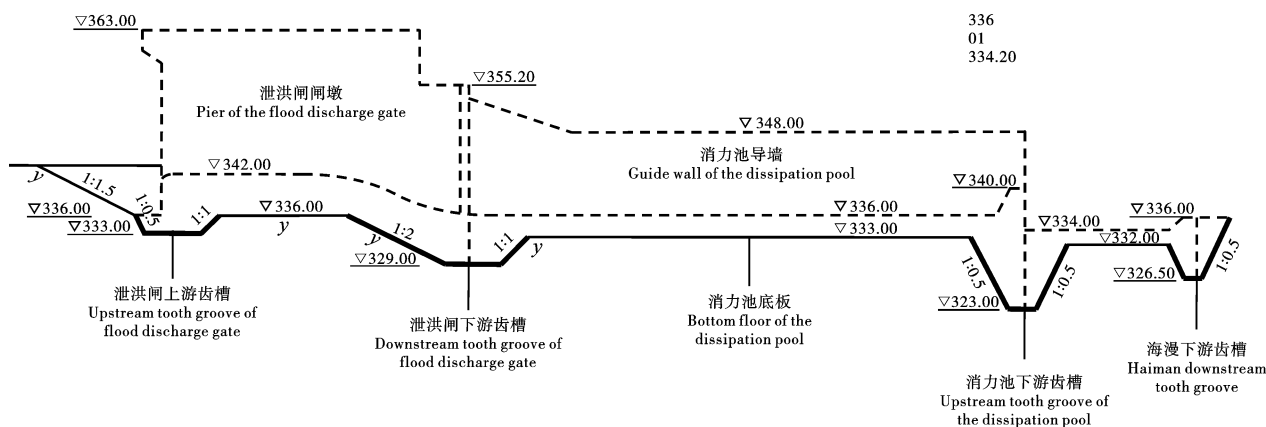


图 1 泄洪闸基础典型开挖断面

Fig. 1 Typical excavation section of floodgate foundation

1.2 地质条件与岩石性质

对于重要的工程爆破项目,在进行方案设计之前,需要清楚掌握地质情况。本项目对现场进行了地质补勘,具体是将施工地质补勘检测孔布置于齿槽中部,每一个坝段上下游齿槽各布置 1 个钻探孔,平均探孔深度 23 m,孔底进入弱风化岩体下限 3 ~ 4 m。在左岸 1 ~ 13#泄洪闸、左岸挡水坝及枯期纵向导墙均匀选取 6 个坝段共 10 个孔进行测试。通过施工地质补勘,基本摸清了齿槽砂泥岩空间分布、岩层厚度等基本情况,典型地质钻孔孔内电视全景图像如图 2 所示。可以看出,齿槽开挖范围内大部分岩层呈现砂泥岩互层现象。

在实验室对现场所取各类岩样进行取芯、切割、打磨,制成符合测试要求的标准试件,然后开展密度

测试、单轴压缩和拉伸试验。每次对 5 组试件进行测试,再计算其平均值,测得的岩石物理力学参数如表 1 所示。可以看出,不同类型岩石之间强度存在差异,岩石强度从高到低依次为:砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。

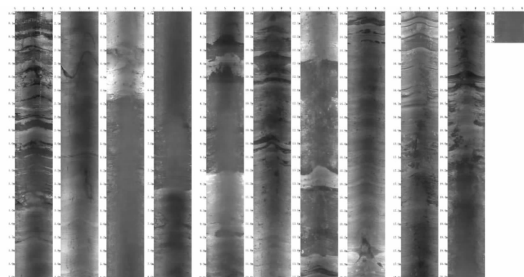


图 2 典型地质钻孔孔内电视全景图像

Fig. 2 TV panoramic image in a typical geological blasthole

表 1 各类岩石物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of rocks

岩石类型 Rock type	取值类型 Value type	密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度 Compressive strength/MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa	弹性模量 Elastic modulus/ GPa
砂岩 Sandstone	范围值 Range value	2.61 ~ 2.66	54.0 ~ 85.9	4.10 ~ 7.99	21.0 ~ 31.5
	平均值 Average value	2.64	69.07	6.14	25.92
泥质粉砂岩 Pelitic siltstone	范围值 Range value	2.69 ~ 2.74	29.8 ~ 53.9	3.62 ~ 5.10	15.56 ~ 22.50
	平均值 Average value	2.71	41.64	4.16	19.07
粉砂质泥岩 Silty mudstone	范围值 Range value	2.76 ~ 2.78	15.0 ~ 28.22	1.04 ~ 2.10	6.90 ~ 9.00
	平均值 Average value	2.77	19.10	1.60	7.78

2 预裂爆破参数设计

2.1 总体方案

为保障齿槽两侧边坡开挖的成型质量,齿槽双侧边坡采用预裂爆破技术;齿槽中间区域采用楔形掏槽方式,为后排炮孔提前创造临空面;齿槽主体部分采用深孔微差爆破技术实施开挖;预留水平保护层采用机械凿除工艺,确保建基面施工质量。整体起爆顺序设定为:预裂孔率先起爆,随后依次为掏槽孔、开挖孔。预裂爆破使用二号岩石乳化炸药,规格为200 mm×32 mm×200 g,起爆器材使用工业电子雷管。

2.2 预裂爆破成缝原理

预裂爆破的成缝机理是应力波与高压爆生气体协同作用完成的:在应力波作用阶段,相邻两个炮孔同时起爆,应力波向中间区域传播并发生叠加效应,由于两孔间距较小,叠加后的拉应力集中于两孔连线中点区域(如图3所示),直接拉断该区域岩体,使得两炮孔的径向初始裂隙连通初步形成预裂缝。在爆生气体作用阶段,高压气体会填充到应力波形成的初始裂隙中,成为后续成缝的主要驱动力,其作用是将初始裂隙扩展贯穿,最终形成满足工程要求的规整预裂缝。

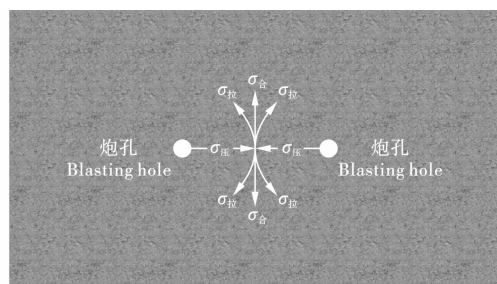


图3 相邻炮孔应力叠加示意图

Fig. 3 Diagram of stress wave superposition in adjacent blasting holes

为了实现良好的预裂爆破效果,通常采用密集布置炮孔方式,使炸药能量尽可能沿开挖轮廓均匀分布;同时采用不耦合装药降低爆炸载荷,既能保证开挖轮廓面平整,又能减小对保留岩体的损伤效应,提升围岩稳定性。此外,超前于主爆区形成的预裂缝,可以阻碍主爆区应力波与地震波的传播,减少主体爆破对保留岩体的破坏作用。

2.3 参数设计

老木孔左岸13孔泄水闸共有4条齿槽,下面以消力槽下游齿槽边坡为例,详述预裂爆破参数。

2.3.1 钻孔直径

国内爆破实践经验显示,开挖梯段高度小于4 m时,钻孔直径38~45 mm为宜;开挖梯段高度4~8 m,钻孔直径60~100 mm为宜。长江葛洲坝水利枢纽建设中,预裂爆破钻孔直径为60~170 mm,均取得较好效果。国外工程建设中一般采取53~110 mm。矿山工程实践证明,钻孔直径170~250 mm也是可行的。根据本工程齿槽最大深度10 m、砂泥岩互层、近似水平产状、工程进度及现场既有钻孔设备性能等边界条件综合考虑,齿槽边坡预裂爆破中的钻孔直径选定为115 mm。

2.3.2 炮孔间距

预裂爆破炮孔间距一般按钻孔直径的8~12倍。老木孔工程前期地质勘探成果显示,工程区域砂泥岩抗压、抗拉强度均较小,孔间距按预裂爆破经验公式取偏小值。最终,炮孔间距取1.0 m,即按8.7(孔距 1.0×10^3 mm/钻孔直径115 mm)倍钻孔直径进行取值。

2.3.3 炮孔角度

设计坡比1:0.5,即钻孔与水平面夹角63.4°。不过,为了避免钻孔过程中的前方“飘钻”引起坡脚欠挖,尽可能减少对工程进度与施工成本的影响。综合考虑齿槽深度、设计边坡坡比、岩层产状基本水平,以及钻杆相对较粗(钻杆直径70 mm)、其弯曲刚度相对较大等实际情况,将设计钻孔角度调整为64.5°。这样可以改善钻杆在钻进过程中的轴向受力状态,避免钻孔弯曲与钻孔偏斜,减小“飘钻”导致的坡脚欠挖,进而改善爆破破岩效果。

2.3.4 炮孔超深

超深是指炮孔深度超出底板设计标高的部分,其核心作用是克服根底,提升爆破完整性,精准控制底板标高,保障循环施工。超深的取值并非固定值,需结合岩体特性、工程参数、爆破要求等多因素综合确定。鉴于本工程中大部分属于软岩地层,最终炮孔超深取25 cm。

2.3.5 线装药密度

本工程中基岩性质为砂岩、泥岩,产状为水平互层。为确保预裂爆破效果,采用单孔个性化设计,对砂岩段、泥岩段的线装药密度分别进行计算,然后综合选用。预裂爆破线装药密度经验公式较多,涉及不同国家、不同行业、不同工程。经过调研,选择使用如下经验公式进行计算

$$Q_x = 2.75r^{0.38} \times \sigma_c^{0.53} \quad (1)$$

式中: Q_x 表示线状药密度,kg/m; r 表示炮孔半径,m; σ_c 表示岩石抗压强度,MPa。

采用上述公式计算线装药密度,结果如表 2 所示。在岩性地层相对明确条件下,按对应线装药密度进行装药,否则按综合平均线装药密度装药。

表 2 线装药密度计算结果

Table 2 Calculation results of line charge density

地层类型 Stratum type	线装药密度 Linear charge density/(g · m ⁻¹)
砂岩 Sandstone	303
泥质粉砂岩 Pelitic siltstone	246
粉砂质泥岩 Silty mudstone	158
砂泥岩互层 Sandstone mudstone interlayer	236

2.3.6 装药结构

预裂孔采用不耦合装药结构,炮孔直径为 115 mm,药卷直径为 32 mm,即径向不耦合系数取 $K=3.6$ 。将药卷捆扎在竹片上,用导爆索进行串联,通过导爆索进行传爆。由于炮孔底部夹制作用较强,需对其进行加强装药,加强装药段长度按炮孔堵塞长度计算,然后将堵塞段应计药量移到炮孔底部。

2.3.7 填塞长度

良好的炮孔填塞质量,可以提高爆炸冲击波压力,延长爆生气体的作用时间,进而提高预裂爆破成缝效果,同时减少有害气体泄漏以保证施工安全,以及节约爆破材料以降低施工成本。根据经验,预裂爆破炮孔填塞长度一般按钻孔直径的 10~20 倍。本工程中,设计堵孔长度按钻孔直径 17 倍控制,即 1.8~2.0 m。

2.3.8 起爆网路

在预裂爆破作业中,为确保预裂孔能先于主爆孔形成连续、平整的预裂面,从而隔离主爆区应力波对保留岩体的破坏,预裂孔的起爆时间通常需超前主爆孔 85~100 ms,具体时差需根据工程条件动态调整。根据初设地质资料及施工详勘波速测试成果,本工程按上限 100 ms 控制。预裂爆破与主体爆破使用工业数码电子雷管同步联网,然后进行一次性起爆。

3 数值模拟

ANSYS 有限元软件可以对基础物理中大部分问题进行模拟,是世界上最大的 FEA 结构分析程序,ANSYS 适合于求解耦合方面问题,但在动力分

析上稍显不足。鉴于此,后来将 ANSYS 与 LS-DYNA 软件结合,形成前后处理结合的瞬时动力分析模块 ANSYS/LS-DYNA,可以用于求解爆破和高速碰撞等复杂动力学问题。本研究中,采用 ANSYS/LS-DYNA 构建双孔预裂爆破模型,基于数值模拟结果分析所取预裂爆破参数是否合理。

3.1 构建数值模型

如图 4 所示,采用 ANSYS/LS-DYNA 构建宽度为 1.0×10^3 mm、长度为 2.0×10^3 mm 的爆破岩体模型,模型上设置有两个炮孔,炮孔间距为 1.0×10^3 mm,炮孔直径为 115 mm。炮孔中设置有 2 号岩石乳化炸药,两炮孔中炸药同时起爆,起爆时间采用 *INITIAL_DETONATION 关键字进行设定。炸药和空气作为流体材料,采用 ALE 多物质网格进行建模;岩石作为固体材料,使用 Lagrange 网格进行建模。两类材料之间通过流固耦合关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 进行绑定,以实现力学信息的传递^[14,15]。模型的四周还需要施加无反射边界条件,以减小边界应力波反射对数值模拟结果的影响^[16,17],所涉及的关键字包括 *Non-Reflecting_Boundary 和 *SET_SEGMENT。

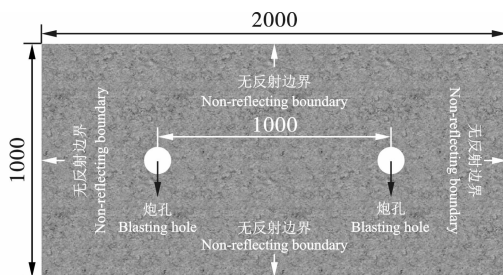


图 4 岩体模型示意图(单位:mm)

Fig. 4 Diagram of rock mass model(unit:mm)

3.2 材料模型与参数

炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL(Johnson-Wollman-Liu)状态方程进行模拟,其中 JWL 状态方程表达式为^[18,19]

$$P_e = A_e \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_e \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: P_e 表示爆轰压力, GPa; A_e 、 B_e 为炸药材料参数, GPa; R_1 、 R_2 、 ω 为炸药材料常数,无量纲; V 表示爆轰产物相对体积,无量纲; E_0 表示初始比内能, GPa。已知现场使用的是 2 号岩石乳化炸药,因此炸药材料参数可根据文献[17]进行设置,具体参数取值见表 3。表中: ρ_e 表示炸药密度; D 表示爆轰速度。

表 3 炸药材料与状态方程参数

Table 3 Parameters of explosive material and state equation

$\rho_e/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A_e/GPa	B_e/GPa	R_1	R_2	ω	P_e/GPa	E_0/GPa
1.10×10^3	4.00×10^3	2.14×10^2	18.2×10^{-2}	4.20	0.90	0.15	9.70	4.19

空气采用空材料模型 * MAT_NULL, 状态方程通过关键字 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 进行定义^[20], 空气材料及状态方程参数见表 4。表中: ρ_a 表示空气密度; E_a 表示单位体积内能; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 表示状态方程参数。

表 4 空气材料及状态方程参数

Table 4 Parameters of air material and state equation

$\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_a/GPa	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.25	2.50×10^{-3}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40	0.00

岩石材料采用 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 模型, 该模型考虑了固体材料在动载作用下的率效应, 广泛用于求解爆炸与冲击问题。在老木孔水电齿槽所在复杂地层, 粉砂质泥岩强度最低、最易受到扰动, 故按粉砂质泥岩及其对应线装药密度进行建模, 粉砂质泥岩的主要材料参数已列于表 1, 其他本构参数可根据文献[21]中强度相近的岩石参数进行设置, 具体见表 5。表中: A 、 B 、 C 、 N 为本构方程参数; K_1 、 K_2 、 K_3 为压力常数; D_1 、 D_2 为损伤常数。

表 5 岩石本构参数

Table 5 Constitutive parameters of rock

A	B	C	N	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	D_1	D_2
0.66	1.34	1.80×10^{-3}	0.84	0.85×10^2	-1.71×10^2	2.08×10^2	0.04	1.00

3.3 模拟结果分析

3.3.1 应力波叠加过程

图 5 所示是不同时刻的应力云图。可以看出, 当炮孔内的炸药引爆以后, 立即在炮孔周围岩体中激起产生爆炸应力波, 爆炸应力波以较高速度沿径向呈圆形向外传播, 此时相邻炮孔的爆炸应力波传播彼此不产生影响。当相邻炮孔的爆炸应力波传播至炮孔连线中心时, 随即产生应力波的叠加干涉效应。此时, 炮孔连线中心处的等效应力强度低于岩石抗压强度, 但高于岩石的抗拉强度, 叠加后的应力波有助于孔间拉伸裂纹的形成, 实现孔间裂隙的定向扩展和有效贯通。同时, 炮孔中心连线以外的区域因应力叠加效应较弱, 裂隙扩展将受到抑制, 有助于保护预留岩体。

3.3.2 爆生裂纹贯穿情况

HJC 材料模型中包含有损伤本构方程, 通过选定输出类型可以得到最终岩体损伤分布情况, 结果如图 6 所示。可以看出, 炮孔周围会产生高度损伤区域, 但高度损伤区扩展范围较小; 而在两炮孔中心连线上, 损伤区域彼此相连。现有研究认为, 当损伤值 $D > 0.3$ 时, 表示岩体破坏成缝^[22]。图 6 中显示

两炮孔之间损伤区域的损伤值超过了 0.3, 表明两炮孔之间爆生裂纹得到了贯穿, 因此可以初步预测木孔砂泥岩互层齿槽边坡预裂爆破成缝效果良好。而且在预裂缝两侧, 岩体几乎不发生损伤, 表明在该预裂爆破方案与参数下, 保护侧岩体损伤较小。

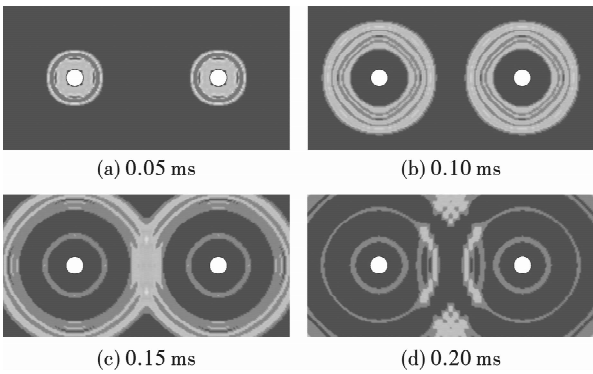


图 5 不同时刻应力云图
Fig. 5 Stress cloud map at different times

4 施工质量控制

4.1 钻孔质量控制措施

在控制爆破领域, 钻孔质量直接影响炸药能量

释放与岩体破裂全过程。对于预裂爆破而言,炮孔间距须按设计等间距分布;炮孔不得“前俯”、“后仰”,须按设计相互平行共面;炮孔孔底须位于相同高程。钻孔精度控制几何要素由孔口位置、孔的方向角及孔深组成,核心要素为钻孔方向角。对于钻孔角度精度控制,采取“特制三角形杆架+水平尺或万能量角器+测量方向点+钎尾悬挂垂球”,在开孔时进行钻杆定位,保证所有炮孔在设计坡面上的相互平行,具体的钻孔角度精度控制流程如图7所示。对于非顺直边坡预裂钻孔,可以参考上述基本控制理念与方法,结合坡面具体条件加以合理调整。预裂爆破钻孔实行逐孔验收管理,不合格钻孔不得装药且予以废除,在临近适当位置重新补钻,并再次验收,以保证钻孔精度、爆破效果。

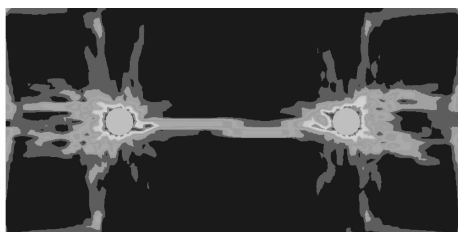


图6 爆生裂纹贯穿效果

Fig. 6 Penetration effect of blasting cracks



图7 典型齿槽边坡半孔分布情况

Fig. 7 Typical distribution of half holes on tooth groove slopes

4.2 装药质量控制措施

根据2.3.6可知,现场采用“药卷捆扎于竹片+导爆索串联”的装药方式,通过导爆索实现传爆。基于该工艺的传爆效率与预裂效果要求,施工前要对竹片进行筛选,使其满足以下技术条件:保持整体平直,横向无天然弧度、纵向无弯曲变形。其中,竹片横向无弧度的目的在于,避免对相邻炮孔间应力波叠加作用产生干扰,确保初始预裂成缝质量;竹片纵向无弯曲的目的在于,保证预裂药串在炮孔内居中布设,进而确保能量在预裂面两侧对称发散,保障预裂面的平整度。

4.3 封孔质量控制措施

炮孔封堵质量对预裂爆破及各类岩土爆破工程

的施工安全与爆破效果均具有关键影响。结合工程需求,设计采用“粘性土+粗砂+极少量水泥+水”按特定比例拌合形成封孔材料,该封孔材料具备充足的密实度与黏聚力,能够满足封堵强度要求。然后,封孔长度要严格按照爆破设计参数控制为180~200 cm,且施工中需分层捣实至密实状态。通过上述封孔质量控制措施,可以有效防止爆破过程中出现“冲炮”现象,避免因封孔不牢导致的爆炸能量过早泄漏以及爆破飞石等安全风险。

5 现场预裂爆破效果评价

5.1 齿槽边坡成型质量

齿槽爆破开挖后,对老木孔左岸13孔泄水闸全部4条齿槽进行预裂爆破半孔率现场统计,结果如表6所示。可以看出,4条齿槽的半孔率均超过了90%,表明预裂爆破成型效果良好。典型齿槽边坡半孔分布情况如图7所示。齿槽爆破开挖后,对老木孔左岸13孔泄洪闸全部4条齿槽进行预裂爆破坡面平整度测量、统计,平均平整度为6.5 cm,预裂爆破坡面平整度控制效果良好。而且孔口高程预留岩体无严重破碎现象,齿槽开挖到位后普遍未发现坡脚欠挖留根。

表6 齿槽边坡半孔率和平整度统计

Table 6

齿槽边坡位置 Position of tooth groove slope	半孔率 Half-hole rate/%	坡面平整度 Slope flatness/cm
泄洪闸上游齿槽 Upstream tooth groove of flood discharge gate	92.3	5.7
泄洪闸下游齿槽 Downstream tooth groove of flood discharge gate	91.2	6.8
消力池上游齿槽 Upstream tooth groove of the dissipation pool	93.1	7.2
海漫下游齿槽 Haiman downstream tooth groove	90.7	6.3
平均值 Average value	91.8	6.5

5.2 爆破震动监测情况

根据爆破现场环境与振动控制要求,实施了爆破振动监测。监测点包括临近村民房屋、项目部营地及已浇混凝土左导墙等,其中混凝土左导墙距爆破点最近,二者之间直线距离约10 m,因此是安全

防护的重点所在。齿槽爆破振动监测质点振动速度 监测结果见表 7。

表 7 爆破振动监测数据
Table 7 Blasting vibration monitoring data

测点编号 Measuring point number	径向 Radial direction		切向 Tangential direction		垂向 Vertical direction	
	峰值振速 Peak vibration	主振频率 Main vibration	峰值振速 Peak vibration	主振频率 Main vibration	峰值振速 Peak vibration	主振频率 Main vibration
	velocity/(cm · s ⁻¹)	frequency/Hz	velocity/(cm · s ⁻¹)	frequency/Hz	velocity/(cm · s ⁻¹)	frequency/Hz
P ₁	0.22	13.48	0.18	11.04	0.28	12.68
P ₂	1.10	8.55	0.09	12.21	0.10	14.65
P ₃	0.49	68.35	0.80	64.70	0.88	97.66

结合爆破安全规程,可以确定混凝土左导墙的安全允许振速为 3.5 cm · s⁻¹,而表 7 中的振动速度最大仅为 1.10 cm · s⁻¹;而且,建筑物自振频率通常在 1 ~ 10 Hz,而表 7 中的振动频率基本上都在 10 Hz 以上。可见,预裂缝可以起到明显的减震效果,振动速度和主振频率均符合安全要求。

6 结论

以老木孔航电枢纽砂泥岩互层齿槽边坡预裂爆破为例,探索总结复杂地质预裂爆破设计与施工技术,取得以下研究成果:

(1)针对复杂地层齿槽边坡预裂爆破,进行了爆破方案与参数的精心设计,提出了线装药密度单孔个性化设计方法;并且,为了提高爆破成型质量,制定了现场钻孔、装药和填塞质量控制措施,具体包括研发钻杆定位装置、把控装药细节、配制新型封堵材料。

(2)数值模拟结果显示,按照设计的爆破参数进行预裂爆破,相邻炮孔之间爆生裂纹贯穿效果良好,保留岩体几乎不发生损伤破坏;同时,也表明了工程爆破设计与施工中引入数值模拟,可以有力提升爆破设计水平,有利于保证工程爆破质量。

(3)现场试验表明,通过爆破参数精心设计与现场施工质量控制,老木孔齿槽边坡预裂爆破成型效果良好,4 条齿槽的半孔率均超过了 90%,平均平整度为 6.5 cm;而且,良好的预裂爆破成缝效果,可以起到明显的减震效果,振动速度和主振频率均符合安全要求。

参考文献 (References)

[1] 厉美杰,杜 军,王洪强,等. 爆破振动对露天矿山永久边坡稳定性的影响分析[J]. 爆破,2023,40(1):170-176.
[1] LI Mei-jie, DU Jun, WANG Hong-qiang, et al. Influence analysis of blasting vibration on stability of permanent slope in open-pit mine[J]. Blasting, 2023, 40(1): 170-

176. (in Chinese)
[2] 项 捷. 旭龙水电站导流洞出口围堰拆除施工技术总结[J]. 人民黄河,2024,46(S1):153-154.
[2] XIANG Jie. Summary of construction technology for removing the cofferdam at the outlet of the diversion tunnel of Xulong Hydropower Station [J]. Yellow River, 2024, 46(S1):153-154. (in Chinese)
[3] 程 兵,汪 泉,汪海波,等. 侧向环形切缝装药爆破效应及其在硬岩掏槽中的应用[J]. 含能材料,2023, 31(12):1245-1254.
[3] CHENG Bing, WANG Quan, WANG Hai-bo, et al. Blasting effects of lateral annular slit charge and application in hard rock cutting[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(12):1245-1254. (in Chinese)
[4] 李萍丰,张兵兵,谢守冬. 露天矿山台阶爆破技术发展现状及展望[J]. 工程爆破,2021,27(3):59-62.
[4] LI Ping-feng, ZHANG Bing-bing, XIE Shou-dong, et al. Development status and prospect of bench blasting technology in open-pit mine[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3):59-62. (in Chinese)
[5] 袁 康. 预裂爆破成缝及参数计算原理[J]. 爆破, 2013,30(1):58-62.
[5] YUAN Kang. Split forming and parameters calculation principle of presplitting blasting [J]. Blasting, 2013, 30(1):58-62. (in Chinese)
[6] 马泗洲,蒋海明,刘科伟,等. 地应力对岩体预裂爆破成缝过程的影响[J]. 爆炸与冲击,2025,45(9):162-182.
[6] MA Si-zhou, JIANG Hai-ming, LIU Ke-wei, et al. Effect of in-situ stress on fracture formation process of rock mass in presplit blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(9):162-182. (in Chinese)
[7] 李 恒,雷 振,李 卓,等. 初始地应力下不耦合装药对预裂爆破影响的数值研究[J]. 工程爆破,2023, 29(1):40-47.
[7] LI Heng, LEI Zhen, LI Zhuo et al. Numerical study on the influence of uncoupled charge on pre-splitting blasting under initial ground stress[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1):40-47. (in Chinese)
[8] 钟冬望,陶好好,李琳娜,等. 涉水边坡预裂爆破参数

- 优化试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 31-43.
- [8] ZHONG Dong-wang, TAO Hao-hao, LI Lin-na, et al. Experimental study on optimization of presplitting blasting parameters for water-adjacent slopes[J]. Blasting, 2025, 42(2): 31-43. (in Chinese)
- [9] 徐菲菲, 熊力, 郭丰, 等. 预裂孔间距对边坡爆破效果的影响模拟研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(8): 264-273.
- [9] XU Fei-fei, XIONG Li, GUO Feng, et al. Influence simulation of pre-split hole spacing on slope blasting effect[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(8): 264-273. (in Chinese)
- [10] 崔立明, 隋湘滨, 周义德. 数码电子雷管在预裂爆破中的应用研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 108-112.
- [10] CUI Li-ming, SUI Xiang-bin, ZHOU Yi-de Study of digital electronic detonators used in pre-splitting blasting[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 108-112. (in Chinese)
- [11] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 181-194.
- [11] CHEN Xiao-lin, ZHANG Zhi-yu, WANG Kai et al Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in a certain open-pit mine[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 181-194. (in Chinese)
- [12] 夏治园, 高朋飞, 杨帆, 等. 进洪闸闸墩爆破切割技术及数值模拟分析[J]. 工程爆破, 2025, 31(3): 82-91.
- [12] XIA Zhi-yuan, GAO Peng-fei, YANG Fan, et al. Blasting cutting technology and numerical simulation analysis for sluice piers of flood diversion gates[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(3): 82-91. (in Chinese)
- [13] 阿旺加措, 冯佳佳, 刘美山, 等. 白鹤滩特高拱坝坝肩柱状节理玄武岩开挖爆破试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(2): 63-74.
- [13] NGAWANG Gyatso, FENG Jia-jia, LIU Mei-shan, et al Experimental study on blasting of columnar jointed basalt of Baihetan High Arch Dam[J]. Blasting, 2022, 39(2): 63-74. (in Chinese)
- [14] 杨洋, 卢文波, 王洋, 等. 水下钻孔爆破激发水中冲击波的机制研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(12): 269-278.
- [14] YANG Yang, LU Wen-bo, WANG Yang, et al. Research on the mechanism of underwater drilling blasting to excite shock waves in water[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(12): 269-278. (in Chinese)
- [15] 程兵, 汪海波, 宗琦, 等. 基于切缝装药定向预裂的中深孔掏槽爆破研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 322-329.
- [15] CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi, et al. Mid-deep hole cutting blasting technology based on slit charge directional presplitting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 322-329. (in Chinese)
- [16] 毛翔, 何成龙, 陈大勇, 等. 主动围压下岩石爆破裂纹扩展及邻近巷道动态响应[J]. 兵工学报, 2024, 45(12): 4323-4338.
- [16] MAO Xiang, HE Cheng-long, CHEN Da-yong, et al. Rock blasting crack propagation and dynamic response of adjacent roadway structure under active confining pressure[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(12): 4323-4338. (in Chinese)
- [17] 陈帮洪, 陈星明, 武尚荣, 等. 基于LS-DYNA的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用[J]. 矿冶工程, 2025, 45(2): 47-53.
- [17] CHEN Bang-hong, CHEN Xing-ming, WU Shang-rong, et al. Numerical simulation of blasting with wedge cut based on LS-DYNA software and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(2): 47-53. (in Chinese)
- [18] 张鑫, 刘泽功, 常帅, 等. 爆破荷载作用下煤岩本构模型参数特性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(5): 263-277.
- [18] ZHANG Xin, LIU Ze-gong, CHANG Shuai, et al. Parametric characteristics of coal rock constitutive model under blasting load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(5): 263-277. (in Chinese)
- [19] 林继凯, 孙梦迪, 刘增辉, 等. 中部空气间隔不同比例装药对炮孔孔壁受力及碎石块度的影响[J]. 爆破器材, 2023, 52(6): 55-64.
- [19] LIN Ji-kai, SUN Meng-di, LIU Zeng-hui, et al. Influence of charge with different proportions under the condition of middle air separation on the stress on the blasthole wall and the rock fragmentation[J]. Explosive Materials, 2023, 52(6): 55-64. (in Chinese)
- [20] 段继超, 宗琦, 汪海波, 等. 起爆顺序对露天台阶爆破效果影响的数值模拟及现场试验[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 109-116.
- [20] DUAN Ji-chao, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Numerical simulation and field test on influence of blasting sequence on open-pit bench blasting effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 109-116. (in Chinese)
- [21] 程兵, 叶福, 汪泉, 等. 孔内分层装药爆破破岩成腔机理及应用[J]. 含能材料, 2025, 33(7): 714-724.
- [21] CHENG Bing, YE Fu, WANG Quan, et al. Mechanisms of rock breaking and cavity formation of hole-inner layered charge blasting[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2025, 33(7): 714-724. (in Chinese)
- [22] 傅师贵, 刘泽功, 邱进伟, 等. 深部隧道切缝装药爆破岩体损伤演化及致裂特征[J]. 工程科学学报, 2025, 47(6): 1191-1206.
- [22] FU Shi-gui, LIU Ze-gong, QIU Jin-wei, et al. Study on the evolution of rock damage and blasting characteristics of deep tunnel splitting and drilling with explosives[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(6): 1191-1206. (in Chinese)