

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.009

## 裂隙发育岩体水电工程地下洞室 预裂爆破试验研究\*

陈星良<sup>1</sup>, 关富儒<sup>2</sup>, 付兆凯<sup>1</sup>, 纳小平<sup>3</sup>, 郝利军<sup>3</sup>, 李洪涛<sup>1</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川水发勘测设计研究院有限公司, 成都 610065;  
3. 中国水利水电第五工程局有限公司, 成都 610066)

**摘要:** 硬梁包水电站地下厂房地质构造复杂, 围岩裂隙发育, 岩性杂乱, 岩体具有“硬、碎、杂”特点, 厂房开挖成型难度较大、预裂爆破效果差, 为解决此问题, 结合地下厂房第Ⅲ层中部拉槽施工预裂, 开展了系统的爆破试验。初期试验中, 预裂爆破线装药密度低于规范计算值近 100 g/m 的情况下, 两侧边墙岩体在爆破后十分破碎, 无法明显看到预裂孔的痕迹。开展的岩体声波测试和岩体完整性分析表明: 厂房岩体全孔平均纵波速度为 4.03 km/s, 整体完整性差; 岩体沿预裂孔轴向 0~1.5 m、1.5~3.9 m、3.9~7.4 m 深度的分段波速平均值分别为 2.59 km/s、3.58 km/s、4.70 km/s, 表现出在深度方向上的分段完整性差异。根据上述特点, 在厂房开挖施工过程中, 预裂爆破的平均单孔线装药密度取为 0.123~0.284 kg/m, 并针对不同深度选取不同的线装药密度, 各分段采用小药卷均匀间隔装药, 试验和应用效果良好, 保证了壁面基本成型, 半孔率显著提高。

**关键词:** 地下洞室; 裂隙发育岩体; 预裂爆破; 参数优化; 装药结构

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0067-08

## Experimental Study on Pre-splitting Blast of Underground Caverns in Fractured Rock Mass

CHEN Xing-gen<sup>1</sup>, GUAN Fu-su<sup>2</sup>, FU Zhao-kai<sup>1</sup>, NA Xiao-ping<sup>3</sup>, HAO Li-jun<sup>3</sup>, LI Hong-tao<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. Sichuan Water Development Investigation Design and Research Co., Ltd.,  
Chengdu 610065, China; 3. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

**Abstract:** The geological structure of the Ying Liang-bao hydroelectric underground power-house is complex due to the development of surrounding rock fissures, messy lithology, and a rock body with "hard, broken, miscellaneous" characteristics. Excavation and molding pose difficulties while pre-splitting blasting has poor effects. To address this issue, we conducted a systematic blasting test combined with pre-splitting for central groove construction on layer III of the power-house. In initial tests, both sides of the wall exhibited significant breakage after blasting and traces of pre-splitting holes were not clearly visible when linear charge density was nearly 100 g/m lower than standardized calculation values. Acoustic testing data revealed that average longitudinal wave velocity in the rock mass body was 4.03 km/

收稿日期 (Date of reception): 2023-09-22

网络首发日期 (Published online): 2024-01-03

作者简介: 陈星良 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构工程, (E-mail) chxinggen@163.com。

通讯作者: 李洪涛 (1979-), 男, 教授、博导, 研究方向为工程爆破、水电水利工程施工技术, (E-mail) lmyht@126.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3008305); 四川省国际科技合作计划项目 (2022YFH0078); 国家自然科学基金项目 (51809188)

**About the author:** CHEN Xing-gen (2000-), Male, Master's degree student, research interests in hydraulic structural engineering, (E-mail) chxinggen@163.com.

**Corresponding author:** LI Hong-tao (1979-), Male, Professor, Bo-director, research interests in engineering blasting, hydropower and water conservancy engineering construction technology, (E-mail) lmyht@126.com.

**Fund Programs:** National Key R&D Program of China (2023YFC3008305), Sichuan Provincial International Science and Technology Collaboration & Innovation Project (2022YFH0078), National Natural Science Foundation of China (No. 51809188)

s indicating overall poor integrity. Additionally, segmental wave velocities along axial depths from 0 ~ 1.5 m, 1.5 ~ 3.9 m and 3.9 ~ 7.4 m were found to be 2.59 km/s, 3.58 km/s and 4.70 km/s respectively suggesting segmented integrity differences in depth direction. Based on these findings an average single-hole linear charge density for pre-splitting blasts during excavation was determined to be between 0.123 ~ 0.284 kg/m with different densities selected according to varying depths while small charge rolls were evenly spaced for each section. The results obtained through testing and application have been positive ensuring basic formation of wall surfaces while significantly increasing half-porosity levels.

**Key words:** underground cavern; fractured rock; pre-splitting blast; parameter optimization; charge structure

随着西电东送、“双碳”目标等战略的陆续实施,西南地区已成为我国水电开发的中心<sup>[1,2]</sup>。西南地区河谷深、岸坡陡、构造应力高,地质条件复杂,因地形地质条件的限制,将引水和发电系统布置在山体内部的地下厂房成为了工程首选的布置形式<sup>[3,4]</sup>。对于大型水利水电工程,除地下厂房外,还包含调压室、主变洞、各种交通洞等大型洞室,多个洞室交错形成结构错综复杂的大型乃至超大型的地下厂房洞室群<sup>[5,6]</sup>。且随着装机容量的增加,地下洞室的规模也逐渐增大,往往伴随着断面大、跨度大、埋深大、高边墙和结构交叉的特点<sup>[7-9]</sup>。

大型地下洞室的开挖通常采用“两侧边墙预裂、中部梯段开挖”的施工方法,通过预裂爆破形成预裂缝,降低中部主爆区对边墙围岩的影响,起到减震阻裂作用,并保证岩体成型效果<sup>[10,11]</sup>。预裂爆破在地下洞室开挖施工中已取得良好应用效果,目前预裂爆破的设计施工一般参照相关规程或类似工程经验,但我国西部高山峡谷地区地下洞室受结构面及开挖卸荷等影响,裂隙岩体强度弱化,预裂爆破存在难以成型或效果不佳的问题<sup>[12,13]</sup>。硬梁包水电站地下厂房区域地质构造背景复杂,围岩裂隙发育,预裂爆破成型困难,为此开展了多场次爆破试验,进行了针对性的优化改进,获得了针对裂隙发育岩体地下洞室的预

裂爆破设计及参数。

## 1 工程地质与岩石力学性质

### 1.1 工程概况

硬梁包水电站位于四川省甘孜藏族自治州泸定县大渡河干流上,为四川省大渡河干流最新规划 28 级方案的第 14 级电站,上游为泸定水电站,下游梯级衔接大岗山水电站。硬梁包水电站为引水式开发电站,工程规模为二等大(2)型,采用混凝土闸和面板堆石坝、左岸引水系统、地下厂房的枢纽总布置方案。地下厂房总长 196.9 m,顶拱跨度 27.2 m,高 67.15 m,岩锚吊车梁以上开挖宽度为 27.2 m,以下宽度为 24.4 m。岩锚梁岩台覆盖整个安装间及主机间,上、下游边墙平行布置。

根据地下厂房的结构特点、围岩地质条件和爆破控制等要求,同时考虑岩锚梁开挖及混凝土施工需要,主副厂房及安装间总体分 7 层开挖,其中第 III 层为岩锚梁层,采取施工预裂、中部拉槽、两侧预留保护层开挖的施工方法。中部拉槽区分上、下两层,保护层分上、中、下三层,地下厂房第 III 层开挖分层分区见图 1。本爆破试验研究以硬梁包水电站主厂房第 III 层中部开挖为基础开展。

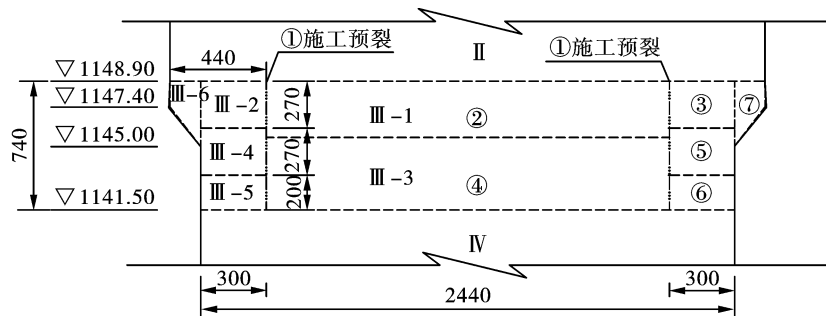


图 1 地下厂房第 III 层开挖分区横剖面(单位:cm)

Fig. 1 Cross-section of the excavation partition of the IIIth floor of the underground plant (unit: cm)

## 1.2 工程地质条件

硬梁包水电站地处青藏高原东南部川西北丘状高原东南缘向四川盆地过渡地带,为川滇南北向构造带北端与北东向龙门山断褶带、北西向鲜水河断褶带和金汤弧形构造带的交接复合部位,区域地质构造背景复杂。

开挖揭露地下厂房地质条件复杂,构造裂隙发育,且岩石普遍存在绿帘石化面蚀变现象。地下厂房中的岩石主要以灰黑色闪长岩、灰白色花岗岩、绿色蚀变岩为主,岩性较杂乱。根据岩石强度试验测试得岩石抗压强度为 24.05 ~ 129.13 MPa,岩石强度分布不均匀,软硬差异较大。同时地下厂房裂隙发育,多存在不利组合。在断层影响带、节理密集带、破碎带、分布广泛的成组缓倾角张开裂隙的影响下,岩体被切割得较破碎,具有“硬、碎、杂”特点(图2),对厂房开挖质量带来了很大的影响。厂房前期第Ⅱ层开挖过程中,做了大量的试验和尝试,但始终无法有效形成比较平整的边墙壁面,爆破后几乎无法见到预裂孔残孔。为解决预裂爆破难以成型的问题,在第Ⅲ层开挖时,结合中部拉槽施工预裂,开展了系统的爆破试验研究。



图2 硬梁包水电站开挖现场揭示地质  
Fig. 2 Geology revealed at the excavation site of the Yingliangbao Hydropower Station

## 2 初期预裂爆破及效果

### 2.1 爆破参数计算

预裂爆破的主要参数包括装药量、炮孔间距、炮

孔直径、岩石抗压强度、抗拉强度及炸药性质等。目前,主要可将前四项参数建立定量的关系,用以推求预裂爆破中的装药量。其装药量定量关系应满足两个关键条件,即在预裂爆破中,应保证预裂孔间岩体所受的拉应力大于岩石的动态抗拉强度,以确保孔间预裂缝的形成;同时需要保证预裂孔周围岩体的有效应力小于岩石的动态抗压强度,以确保预裂孔周围的岩体不会产生大范围的压缩破坏,从而获得理想的预裂爆破效果<sup>[14]</sup>。

根据《水工建筑物地下工程开挖施工技术规范》DL/T 5099—2011 建议<sup>[15]</sup>,对于极限抗压强度在 10 ~ 150 MPa 间的岩体可采用下式进行计算

$$Q = 9.32R^{0.53}r^{0.38}$$

式中:  $Q$  为预裂爆破的线装药密度, kg/m;  $R$  为岩石的极限抗压强度, MPa;  $r$  为预裂孔半径, mm。

地下厂房第Ⅲ层预裂爆破孔径 100 mm, 孔距设计为 70 cm, 线装药密度根据岩石抗压强度按上述公式估算, 同时考虑到第Ⅱ层预裂爆破半孔率低、超欠挖严重和预裂面破坏等情况, 实际使用过程中线装药密度相较于公式估算均相应降低。

### 2.2 试验参数

第 1 场次试验上游侧岩石抗压强度为 30 MPa, 采用 193 g/m 的线装药密度, 下游侧岩石抗压强度为 50 MPa, 采用 321 g/m 的线装药密度; 第 2 场次试验在岩石抗压强度为 50 MPa 处, 采用 243 g/m 的线装药密度, 在岩石抗压强度为 40 MPa 处, 采用 216 g/m 的线装药密度。预裂爆破采用均匀间隔装药, 使用单节 300 g 的  $\phi 32$  mm 药卷加工制作装药药卷。初期预裂爆破试验参数及装药情况如表 1 所示。

### 2.3 试验效果

在第 1 场次预裂爆破试验中, 尽管线装药密度在公式估算的基础上已经减少, 但无论是上游侧或是下游侧, 边墙岩体均在预裂爆破后十分破碎, 无法明显看到岩体表面预裂孔的痕迹, 预裂爆破效果差, 如图 3 所示。

表 1 初期预裂爆破试验参数及装药情况

Table 1 Initial pre-splitting blasting test parameters and charges

场次	岩石抗压强度	孔深/cm	孔径/mm	药径/mm	孔距/cm	堵塞长度/cm	线装药密度/(g·m <sup>-1</sup> )	装药结构
1	30 MPa	700	100	32	70	100	193.0	7 节 1/2 $\phi 32$ mm 药卷, 间隔 40 cm, 孔底 1 节 $\phi 32$ mm 药卷
	50 MPa	700	100	32	70	100	321.0	孔口 1 节 1/2 $\phi 32$ mm 药卷, 中部 5 节 $\phi 32$ mm 药卷, 间隔 55 cm, 孔底 2 节 $\phi 32$ mm 药卷
2	50 MPa	740	100	32	70	110	243.0	15 节 1/3 $\phi 32$ mm 药卷, 间隔 30 cm, 孔底 1 节 $\phi 32$ mm 药卷
	40 MPa	740	100	32	70	110	216.0	13 节 1/3 $\phi 32$ mm 药卷, 间隔 35 cm, 孔底 1 节 $\phi 32$ mm 药卷

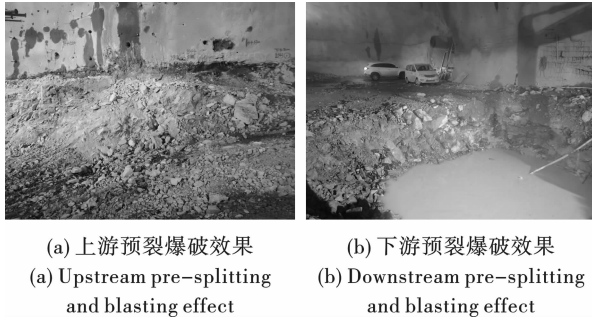


图3 场次1 爆破试验预裂爆破效果

Fig. 3 Field 1 blasting test pre-splitting blasting effect

在第2 场次预裂爆破试验中,进一步降低线装药密度,在岩石抗压强度 50 MPa 处,线装药密度由 321 g/m 减少到 243 g/m,但两侧边墙岩体在预裂爆破后仍十分破碎,无法明显看到预裂孔的痕迹,仅有少数能见到半孔,预裂爆破效果差,如图 4 所示。但较之场次 1 而言,整体效果有所改善,后续考虑对线装药密度和装药结构进一步优化。

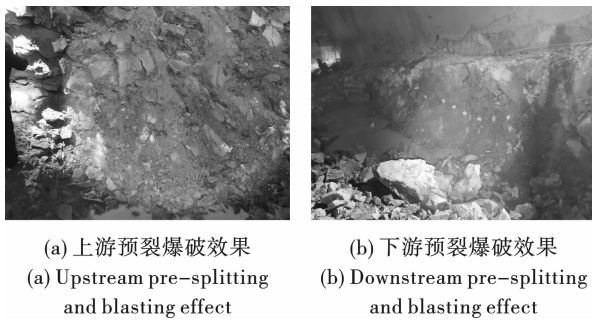


图4 场次2 爆破试验预裂爆破效果

Fig. 4 Field 1 blasting test pre-splitting blasting effect

### 3 改进试验

#### 3.1 改进试验参数

根据前两场次爆破试验结果,预裂爆破的改进应考虑降低线装药密度和提高装药均匀程度。第3 场次试验在上游侧岩石抗压强度为 60 MPa 处,节理面微张,泥质、岩屑充填,存在石化面蚀变现象,裂隙 3 组以上密集发育,以张开裂隙为主,岩体受裂隙切割较为破碎,采用 263.5 g/m 的线装药密度,在下游侧岩石抗压强度为 50 MPa 处,依旧采用 243 g/m 的线装药密度,但装药结构有所变化,上部使用 1/4 药卷均匀间隔装药,孔底装药量适当增大。第4 场次试验,岩石抗压强度为 50 MPa、60 MPa、70 MPa 和 80 MPa 处分别采用 243 g/m、263.5 g/m、283.8 g/m 和 304 g/m 的线装药密度。改进试验的设计参数及装药情况如表 2 所示。

#### 3.2 试验效果及分析

从第3 场次预裂爆破试验结果来看,上游侧岩体孔口部分破坏严重,中下部稍好,已可见岩体表面有几处预裂孔孔痕,但整体预裂爆破效果不佳;而下游侧岩体预裂效果显著提高,岩体表面有明显的预裂孔半孔孔痕,但部分区域仍破碎严重,如图 5 所示。可见下游侧的线装药密度虽未改变,但在调整装药结构后,预裂爆破效果显著提高,而上游侧仍存在局部装药量过大导致岩石破坏严重的情况。

第4 场次预裂爆破试验中,在装药更加均匀的情况下,上、下游侧的预裂爆破效果均明显提升,岩体表面有明显的预裂孔形状,半孔率显著提高,周围岩石的破坏情况也相对减少,如图 6 所示。

表 2 改进预裂爆破试验设计参数及装药情况

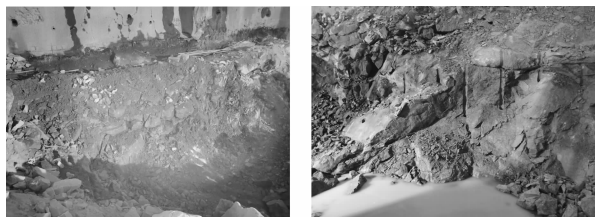
Table 2 Improvement of pre-splitting blasting test design parameters and charges

场次	岩石抗压强度	孔深/cm	孔径/mm	药径/mm	孔距/cm	堵塞长度/cm	线装药密度/(g·m <sup>-1</sup> )	装药结构
3	60 MPa	740	100	32	70	94	263.5	22 节 1/4 φ 32 mm 药卷,间隔 20 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷
	50 MPa	740	100	32	70	110	243.0	20 节 1/4 φ 32 mm 药卷,间隔 22 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷
4	50 MPa	740	100	32	70	110	243.0	20 节 1/4 φ 32 mm 药卷,间隔 22 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷
	60 MPa	740	100	32	70	115	263.5	17 节 1/3 φ 32 mm 药卷,间隔 25 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷
	70 MPa	740	100	32	70	110	283.8	12 节 1/2 φ 32 mm 药卷,间隔 35 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷
	80 MPa	740	100	32	70	125	304.0	13 节 1/2 φ 32 mm 药卷,间隔 22 cm,孔底 2 节 φ 32 mm 药卷

根据前四场次预裂爆破试验分析:前两场次爆破试验中,减小对应的装药量,但上、下游侧岩体在爆破后均十分破碎,而此时采用的线装药密度在工程经验中,已属于偏低的水平,说明预裂爆破中,预裂孔间贯穿裂缝还未形成时,周围岩体已经产生了大范围压缩破坏,该现象主要是岩体内发育的裂隙

对其进行切割,岩体完整性变差、岩体强度大幅度降低所导致。而第三、四场次爆破试验中,在岩石抗压强度相同处,保证装药量不变的前提下,调整了装药结构,装药更均匀,使得预裂爆破成缝效果显著提高,且对周围岩石的破坏也有所减少。根据多个预裂孔残孔观察结果,孔口处岩体易产生较大程度破

坏,而孔底处岩体仍存在成缝效果不佳的问题,相邻炮孔间难以形成贯穿裂缝,导致预裂孔虽然存在裂纹,但岩体无法裂开,底部存在一定程度的欠挖,如图7所示。

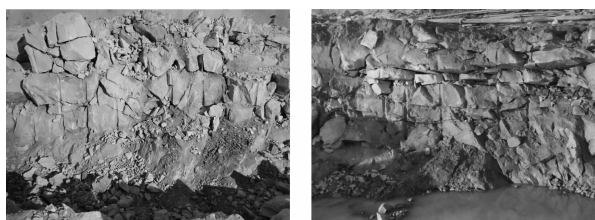


(a) 上游预裂爆破效果  
(a) Upstream pre-splitting and blasting effect

(b) 下游预裂爆破效果  
(b) Downstream pre-splitting and blasting effect

图5 场次3爆破试验预裂爆破效果

Fig. 5 Field 3 blasting test pre-splitting blasting effect



(a) 上游预裂爆破效果  
(a) Upstream pre-splitting and blasting effect

(b) 下游预裂爆破效果  
(b) Downstream pre-splitting and blasting effect

图6 场次4爆破试验预裂爆破效果

Fig. 6 Field 4 blasting test pre-splitting blasting effect

综合前四场次爆破试验结果可知,厂房不同区域和不同高程深度上,受裂隙切割和上层开挖卸荷及爆破影响,岩体完整性存在差异,从而对预裂爆破效果带来影响。因此,后续结合开挖后的地质素描和岩体声波检测,对岩体的完整性进行评价分析,为预裂爆破装药参数及结构设计提供依据。

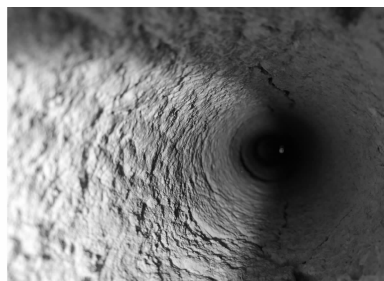


图7 预裂孔残孔孔内情况

Fig. 7 Pre-splitting hole residual hole condition

## 4 爆破参数优化

### 4.1 岩体声波检测和完整性分析

采用单孔声波检测法测试岩体的纵波速度,计

算得到岩体的完整性系数,从而对岩体的完整程度进行评价<sup>[16]</sup>。检测孔使用已钻好的预裂孔,孔深7.4 m,上下游两侧沿施工预裂设计边线每间隔10~15 m取一个孔进行检测,测试中用水作为耦合剂。

检测的28个预裂孔的全孔平均纵波速度为4.03 km/s,孔内最大波速、最小波速的平均值分别为5.95 km/s与1.85 km/s,对应的完整性系数范围为0.09~0.96,岩体平均完整性差异大。岩体纵波速度沿预裂孔轴向基本符合从上至下增大的规律性变化,孔深0~1.5 m、1.5~3.9 m、3.9~7.4 m的分段波速平均值分别为2.59 km/s、3.58 km/s、4.70 km/s。进而,通过计算岩体完整性系数可知,厂房岩体整体完整性差,但基本遵循从上至下增强的规律,孔深0~1.5 m、1.5~3.9 m、3.9~7.4 m处对应的完整性系数分别为0.18、0.35、0.60,平均岩体完整性分别为较破碎、完整性差和较完整。除8个孔的岩体完整程度为完整和较完整外,剩余20个预裂孔的岩体完整程度为完整性差、较破碎和破碎。在测试过程中,有多个孔因裂隙发育,孔内漏水严重,需要保持大流量补水才能保证声波测试顺利进行,个别预裂孔漏水过于严重,中上部无法完成测试,说明厂房该部位岩体总体完整性差。

### 4.2 爆破试验装药及效果分析

根据前期爆破试验和岩体完整性评价结果,调整预裂爆破参数:根据测试的预裂孔轴向完整性程度分段、线装药密度由孔口至孔底逐步增大。本场次试验根据岩石强度和声波测试情况:试验部位岩石裂隙减少,波速提高,完整性明显增强,采用了324.3 g/m、337.8 g/m和344.6 g/m三种线装药密度,考虑到前期孔口破坏严重,将堵塞适当弱化,距孔口50~60 cm处塞入纸团后用钻孔岩粉堵塞。地下厂房第Ⅲ层的优化爆破试验的装药参数及装药情况见表3,结构如图8所示。

优化爆破试验上、下游侧预裂爆破效果如图9所示。在优化爆破试验中,下游侧预裂爆破效果进一步提升,大部分区域可见半孔,周围岩石破坏减少。上游侧因岩体被裂隙切割破碎,岩体仍然明显松动呈块状,但预裂爆破效果较之前试验明显改善,可见岩体表面有明显的半孔残留。试验结果表明:采用根据预裂孔轴向完整性程度分段、线装药密度由孔口至孔底方向逐步增大的预裂爆破装药结构,保证了壁面基本成型,减小了对岩体损伤破坏影响,满足工程施工要求。

表3 优化爆破试验设计参数及装药情况

Table 3 Optimization of blasting test design parameters and charges

场次	线装药密度/ ( $g \cdot m^{-1}$ )	孔深/ cm	孔径/ mm	药径/ mm	孔距/ cm	堵塞长度/ cm	装药结构		
							上部	中下部	底部
5	324.3	740	100	32	70	50-60	6节 1/3 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 25 cm	8节 1/2 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 35 cm	2节 $\phi 32$ mm 药卷
	337.8	740	100	32	70	50-60	7节 1/3 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 25 cm	8节 1/2 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 30 cm	2节 $\phi 32$ mm 药卷
	344.6	740	100	32	70	50-60	3节 1/3 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 25 cm	11节 1/2 $\phi 32$ mm 药卷,间隔 30 cm	2节 $\phi 32$ mm 药卷

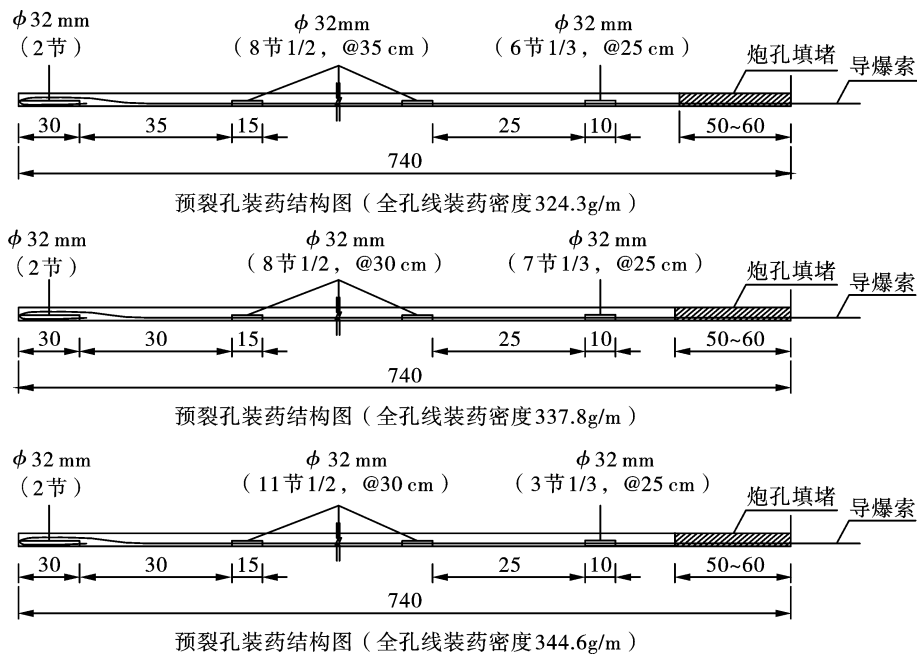


图8 优化爆破试验预裂爆破装药结构(单位:cm)

Fig. 8 Optimization of blasting test pre-splitting blasting charge structure(unit:cm)



(a) 上游预裂爆破效果  
(a) Upstream pre-splitting  
and blasting effect

(b) 下游预裂爆破效果  
(b) Downstream pre-splitting  
and blasting effect

图9 优化爆破试验预裂爆破效果

Fig. 9 Optimized blasting test pre-splitting blasting effect

## 5 工程应用及效果

根据各孔声波检测和完整性系数统计,结合爆破试验成果以及岩石力学性能参数,岩锚梁层施工预裂的平均单孔线装药密度取为 0.123~0.284 kg/m,采用根据预裂孔轴向完整性程度分段、线装药密度由孔口至孔底依次增大的装药结构。总体上孔深 0~1.5 m、1.5~3.9 m、3.9~7.4 m 处平均线装药密度

分别采用 0.136 kg/m、0.186 kg/m、0.245 kg/m,上部和中下部分别采用 1/3 $\phi 32$  mm 药卷和 1/2  $\phi 32$  mm 药卷间隔装药,底部采用 1~2 节  $\phi 32$  mm 药卷连续装药。实际施工中依据上述线装药密度和装药结构作为基础,再根据不同部位的岩体完整程度与破碎情况对装药参数进行优化。

在后续施工中,预裂爆破成缝效果良好,虽存在局部裂隙切割严重和未见明显预裂孔的区域,但在保证保护层边墙壁面基本成型的基础上,减小了对岩锚梁区域岩体的损伤破坏影响,保证了岩锚梁岩台的成型。

## 6 结论

(1) 硬梁包水电站地下厂房地处多构造带的交接复合部位,区域地质构造背景复杂,围岩裂隙发育,岩性杂乱,岩体具有“硬、碎、杂”特点。根据岩体声波检测结果,28 个预裂孔的全孔平均纵波速度

为4.03 km/s,岩体整体完整性差;岩体沿预裂孔轴向0~1.5 m、1.5~3.9 m、3.9~7.4 m深度的分段波速平均值分别为2.59 km/s、3.58 km/s、4.70 km/s,基本遵循完整性从上至下增强的规律。

(2)在硬梁包水电站地下厂房前期开挖过程中,做了大量的试验和尝试,装药量普遍低于规范计算值近100 g/m,但预裂爆破仍存在效果不佳的问题。为解决此问题,遵循降低线装药密度和提高装药均匀程度的思路,通过持续改进试验,使预裂爆破效果有所改善,但依旧存在上部破坏严重,下部预裂孔未能形成贯穿裂缝的情况。

(3)根据岩体声波测试、岩体完整性分析和前期爆破试验结果,开展了优化爆破试验,施工预裂的平均单孔线装药密度取0.123~0.284 kg/m,并针对不同深度选取不同的线装药密度,各分段采用小药卷均匀间隔装药,取得了良好的预裂爆破效果,并将此方法推广至厂房开挖过程中,实际应用效果良好。

### 参考文献 (References)

- [1] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等.高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J].水利学报,2021,52(12):1404-1417.
- [1] FAN Qi-xiang, LIN Peng, WEI Peng-cheng, et al. Intelligent construction of hydraulic engineering in high altitude areas: challenges and strategies [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1404-1417. (in Chinese)
- [2] 樊启祥,林鹏,蒋树,等.金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(7):537-556.
- [2] FAN Qi-xiang, LIN Peng, JIANG Shu, et al. Review on the rock mechanics and engineering practice for large hydropower stations along the downstream section of the Jinsha River [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(7): 537-556. (in Chinese)
- [3] HUANG S, DING X, ZHANG Y, et al. Field and numerical investigation of high wall stability with thin, steeply dipping strata in an underground powerhouse [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(6): 4020055.
- [4] 高乔.抽水蓄能电站地下厂房围岩损伤演化规律研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [4] GAO Qiao. Research on the damage evolution law of the surrounding rock of underground plant of pumped storage power station [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] MA K, ZHANG J, ZHOU Z, et al. Comprehensive analysis of the surrounding rock mass stability in the underground caverns of Jinping I hydropower station in Southwest China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103525.
- [6] 高乔,马克,唐春安,等.荒沟抽水蓄能电站地下厂房开挖过程微震活动特征与围岩稳定性研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(5):775-782.
- [6] GAO Qiao, MA Ke, TANG Chun-an, et al. Microseismicity and stability of underground powerhouse at Huanggou pumped-storage power station subjected to excavation [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 775-782. (in Chinese)
- [7] LUO D, LIN P, LI Q, et al. Effect of the impounding process on the overall stability of a high arch dam: a case study of the Xiluodu dam, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(11): 9023-9041.
- [8] LIN P, ZHOU Y, LIU H, et al. Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 189-204.
- [9] 林鹏,王仁坤,康绳祖,等.特高拱坝基础破坏、加固与稳定关键问题研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):1945-1958.
- [9] LIN Peng, WANG Ren-kun, KANG Sheng-zu, et al. Key problems of foundation failure, reinforcement and stability for superhigh arch dams [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 1945-1958. (in Chinese)
- [10] 李洪涛.大型地下厂房施工程序及开挖方法研究[D].武汉:武汉大学,2004.
- [10] LI Hong-tao. Study on construction procedure and excavation method of the large underground powerhouse [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [11] 袁光裕,胡志根.水利工程施工[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [11] YUAN Guang-yu, HU Zhi-gen. Construction of water conservancy project [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 璩世杰,刘际飞.节理角度对预裂爆破成缝效果的影响研究[J].岩土力学,2015,36(1):189-194,204.
- [12] QU Shi-jie, LIU Ji-fei. Numerical analysis of joint angle effect on cracking with presplit blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 189-194, 204. (in Chinese)
- [13] 刘际飞,璩世杰.节理走向角度对爆炸应力波传播影响的试验研究[J].爆破,2014,31(2):57-61,66.
- [13] LIU Ji-fei, QU Shi-jie. Experimental study of influence of joint angle of strike on explosive stress wave propagation [J]. Blasting, 2014, 31(2): 57-61, 66. (in Chinese)
- [14] 袁康.预裂爆破成缝及参数计算原理[J].爆破,2013,30(1):58-62.

- [14] YUAN Kang. Principles of seam formation and parameter calculation by precracking blasting[J]. *Blasting*, 2013, 30(1):58-62. (in Chinese)
- [15] 中国水利水电第十四工程局有限公司. DL/T 5099—2011 水工建筑物地下工程开挖施工技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [16] 中华人民共和国水利部. SL/T 264—2020 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

(上接第 59 页)

### 参考文献 (References)

- [1] 丁隆灼. 水下岩塞爆破及其在水电工程中的应用[J]. *四川水力发电*, 1998(3):12-16.
- [1] DING L Z. Underwater rock-plug blasting and its application in Hydropower engineering[J]. *Sichuan Water Power*, 1998(3):12-16. (in Chinese)
- [2] 李江,叶明. 厚淤泥条件下大型水下岩塞爆破施工技术[J]. *水利水电施工*, 2016(1):40-42,96.
- [2] LI J, YE M. Construction technology of large-scale underwater rock plug blasting under thick silt conditions[J]. *Shuili Shuidian Shigong*, 2016(1):40-42,96. (in Chinese)
- [3] 梁希林. 水下岩塞爆破有害效应控制措施及效果分析[J]. *爆破*, 2019,36(3):98-103.
- [3] LIANG X L. Control measurement and results analysis of harmful effects of underwater rock plug blasting[J]. *Blasting*, 2019,36(3):98-103. (in Chinese)
- [4] 赵根,吴新霞,周先平,等. 深水条件下岩塞钻孔爆破关键技术及应用[J]. *工程爆破*, 2016,22(5):13-17.
- [4] ZHAO G, WU X X, ZHOU X P, et al. Key technology and application of rock plug drilling blasting under deep water condition[J]. *Engineering Blasting*, 2016,22(5):13-17. (in Chinese)
- [5] 杨建喜. 隧洞环境双临空面条件下岩塞爆破试验与成果分析[J]. *人民珠江*, 2016,37(8):53-56.
- [5] YANG J X. Test and results analysis of rock-plug blasting under the condition of double-free face in tunnel environment[J]. *Pearl River*, 2016,37(8):53-56. (in Chinese)
- [6] 郝志信,赵宗棣. 密云水库水下岩塞爆破的设计与施工[J]. *水利水电技术*, 1982(4):37-46.
- [6] HAO Z X, ZHAO Z D. Design and construction of underwater rock-plug blasting in Miyun Reservoir[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1982(4):37-46. (in Chinese)
- [7] 楼望俊. 水下岩塞爆破技术的新发展-密云水库九松山隧洞岩塞爆破[J]. *北京水利*, 1995(2):36-39.
- [7] LOU W J. New development of underwater rock-plug blasting technology——Rock-plug blasting at Jiulongshan tunnel of Miyun Reservoir[J]. *Beijing Water*, 1995(2):36-39. (in Chinese)
- [8] 刘美山,童克强,余强,等. 水下岩塞爆破技术及在塘寨电厂取水工程中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2011,28(10):156-161.
- [8] LIU M S, TONG K Q, YU Q, et al. Technology of underwater rock plug blasting and its application in water intake project of Tangzhai Power Plant[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011,28(10):156-161. (in Chinese)
- [9] 杨国全,吴政江. 花溪水库扩建工程泄洪隧洞水下岩塞爆破设计与施工[J]. *贵州水力发电*, 2007(4):64-66.
- [9] YANG G Q, WU Z J. Design & construction of blasting for rock plug under water of spillway tunnel of Huaxi reservoir extension project[J]. *Guizhou Water Power*, 2007(4):64-66. (in Chinese)
- [10] 郑坚,张仁高. 引水隧洞进水口岩塞爆破[J]. *工程爆破*, 2003,9(2):69-72.
- [10] ZHENG J, ZHANG R G. Blasting of rock plug in water inlet of a diversion tunnel[J]. *Engineering Blasting*, 2003,9(2):69-72. (in Chinese)
- [11] 陈志刚,潘伟君. 循环水泵房进水口岩塞爆破设计与施工[J]. *工程爆破*, 2005,11(4):27-31.
- [11] CHEN Z G, PAN W J. Blasting design and construction of rock stopper of the water inlet of circulating water pump house[J]. *Engineering Blasting*, 2005,11(4):27-31. (in Chinese)
- [12] 杨杰,祈茂富,朱全环. 浅谈提高乳化炸药的抗冻性[J]. *煤矿爆破*, 2011(3):12-15.
- [12] YANG Jie, QI Mao-fu, ZHU Quan-huan. Discussion on improving the frost resistance of emulsion explosives[J]. *Coal Mine Blasting*, 2011(3):12-15. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家标准. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2014.