

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.010

白鹤滩特高拱坝坝肩柱状节理 玄武岩开挖爆破试验研究*

阿旺加措^{1a,2,3}, 冯佳佳^{1a,1b}, 刘美山⁴, 郭增光³, 刘天斌⁴, 索朗欧珠⁵

(1. 西藏大学 a. 理学院; b. 工学院, 拉萨 850000; 2. 三峡集团 西藏能源投资有限公司, 拉萨 850000;
3. 中国三峡建设管理有限公司, 成都 610041; 4. 长江科学院, 武汉 430015; 5. 西藏地质调查所, 拉萨 850000)

摘要: 柱状节理玄武岩具有表面易破碎、易松弛等性状特点, 作为 300 m 级高拱坝坝肩基岩世界罕见。柱状节理玄武岩基岩面岩体施工处理, 经常出现边坡预裂面破坏, 预裂面超欠挖严重、预裂面半孔率低、岩体扰动等问题。为解决破碎岩体边坡开挖的稳定, 减少预裂爆破对建基面稳定的危害, 根据白鹤滩水电站左岸坝肩柱状节理玄武岩物理及力学特性, 通过预裂爆破与光面爆破对比试验, 以确定爆破类型; 并优化预裂爆破装药线密度、孔排距等参数。结果表明: 预裂爆破综合效果优于光面爆破。通过在爆前、爆后布置物探监测仪器对周围岩体损伤进行监测, 得出预裂爆破孔 0.6 m 的间距及线密度 240 g/m 装药参数, 对柱状节理玄武岩实现基岩面扰动最小, 达到最佳爆破效果。为强卸荷岩体高拱坝基础开挖提供了理论和实践借鉴。

关键词: 柱状节理玄武岩; 爆破试验; 参数优化; 物探监测

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0063-12

Experimental Study on Blasting of Columnar Jointed Basalt of Baihetan High Arch Dam

NGAWANG Gyatso^{1a,2,3}, FENG Jia-jia^{1a,1b}, LIU Mei-shan⁴,
GUO Zeng-guang³, LIU Tian-bin⁴, SUOLANG Ou-zhu⁵

(1. a. College of Science; b. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China;
2. Three Gorges Group Tibet Energy Investment Co., Ltd., Lhasa 850000, China;
3. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;
4. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430015, China;
5. Tibet Geological Survey, Lhasa 850000, China)

Abstract: As the characteristics of fragile surface and easy relaxation, it is rare that the columnar jointed basalt is the base rock of the 300 m high arch dam abutment. During the construction of bedrock surface on the columnar jointed basalt rock, some problems often occur, such as destruction of the pre-crack surface of slope, serious pre-excavation of the pre-crack surface, low half-hole ratio of pre-crack surface and rock mass disturbance. In order to solve the stability problem of the broken rock mass excavation and reduce the pre-splitting blast damage to the foundation surface stability, a blasting type was determined by comparison test of the pre-splitting blasting and smooth blasting according to the physical and mechanical characteristics of the columnar jointed basalt on the left bank of Baihetan Hydropower Station. Meanwhile, The parameters of charge line density and hole row spacing of pre-split blasting were optimized. The results show that the comprehensive effect of pre-splitting blasting is better than smooth blasting. The damage of surrounding rock mass was monitored by arranging geophysical monitoring instruments before and after explosion. The blasting parameters of 0.6 m spacing of pre-splitting blasting hole and 240 g/m linear density are obtained, which can minimize the disturbance to the bedrock surface of columnar jointed basalt and achieve the best

blasting effect. It provides theoretical and practical reference for foundation excavation of high arch dam with strongly unloaded rock mass.

Key words: columnar joint basalt; blasting test; optimization parameter; geophysical monitoring

白鹤滩水电站坝址位于四川省宁南县和云南省巧家县交界的河段;为金沙江下游四个水梯级—乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝中的第二个梯级,下游距离溪洛渡水电站约 195 km。白鹤滩水电站的开发任务以发电为主,兼顾防洪,并促进地方经济社会发展和移民群众脱贫致富。工程建成后可发展库区航运、具有改善下游通航条件和拦沙等综合效益。电站装机容量 16000 MW,是我国仅次于三峡电站的第二大水电站。拦河大坝为椭圆线型混凝土双曲拱坝,最大坝高 289 m,坝顶弧长 709 m,左右岸各布置 8 台 100 万千瓦水轮发电机组,左右岸引水发电系统均由进水口、压力管道、主副厂房、主变洞、尾水管检修闸门室、尾水调压室、尾水隧洞、尾水出口及地面出线场组成。

白鹤滩水电站左岸坝肩高程 695 ~ 585 m 出露柱状节理玄武岩,柱状节理玄武岩主要特征是岩体发育柱状体,柱体内发育有微裂隙,在坝肩开挖过程中爆破扰动对柱状节理玄武岩产生破坏性的影响,从而破坏坝肩稳定和大坝安全,为妥善解决坝肩开挖过程中柱状节理玄武岩的不利影响,开展了一系列针对性的爆破试验以获取最优爆破参数。基础开挖爆破采用多种爆破施工工艺,在柱状节理玄武岩强卸荷区域择优选取预裂爆破与光面爆破;预裂爆破和光面爆破均是爆破裂隙沿设计开挖面开裂的控制爆破方法,基岩面存在地质缺陷区域通常采用预裂爆破开挖技术,在完整硬质岩体的边坡预裂爆破开挖中,边坡开挖平整、美观、半孔率高。当破碎岩体基岩面施工处理不当时,经常会出现边坡预裂面破坏,预裂面超欠挖严重、预裂面半孔率低、岩体扰动等问题。保证破碎岩体边坡开挖的稳定和减少预裂爆破对建基面稳定的危害是爆破施工必须要面对的课题^[1]。爆破参数对预裂爆破效果产生巨大影响,它主要包括不耦合系数、炮孔间距等。本次预裂

爆破的参数设计主要是根据白鹤滩工程的岩体特征和爆破要求,综合分析并慎重选出比较合理的爆破计算参数^[2]。通过白鹤滩水电站工程实际地质情况,结合柱状节理玄武岩岩体自身的特点,论证优化参数预裂爆破技术在白鹤滩水电站建基面施工中的运用。

1 白鹤滩玄武岩性状与特征

白鹤滩水电站坝址主要利用 $P_2\beta_2$ — $P_2\beta_6$ 的玄武岩。玄武岩以隐晶玄武岩、杏仁玄武岩及变玄武质角砾熔岩为主,岩性坚硬,部分岩性段内柱状节理发育。各玄武岩层顶分布有厚薄不等的较软弱的玄武质凝灰岩或角砾凝灰岩夹层,下部一般厚 0.3 ~ 1.7 m。坝址断裂构造较发育,规模较大的主要有 9 条,除 F_{17} 为 NE 向外,其余均为 NW 向。断层延伸长,但宽度不大,上下盘错动不明显。在各岩流层之间发育凝灰岩夹层内,因构造应力作用,形成宽窄不一、延伸性较好的层间错动带。坝址左岸分布有层间错动带 C_2 、 C_{3-1} 、 C_3 ,右岸分布 C_2 ~ C_{11} ,其中 C_{3-1} ~ C_5 出露于坝基范围内。坝址两岸层内错动带发育,其中左岸较右岸发育,其走向以 $N40 \sim 50^\circ E$ 为主,与坝址岩层走向一致,倾角与岩层的倾角基本一致,以 $15 \sim 20^\circ$ 为主,延伸长度一般为 150 ~ 300 m。坝区及左右岸均发育 2 组陡倾角裂隙,1 组缓倾角裂隙。陡倾角裂隙平均方向为 $N35^\circ W$ 和 $N25 \sim 35^\circ E$,缓倾角裂隙优势方向为 $N30 \sim 50^\circ E$, $SE \angle 12 \sim 23^\circ$,坝址左岸缓倾角裂隙较右岸发育,如图 1 所示。

坝址两岸风化卸荷作用较强,左岸风化、卸荷深度普遍大于右岸^[3,4]。左岸强卸荷分布于水平深度为 0 ~ 109 m,弱卸荷带水平深度 27 ~ 183 m,弱风化下段下限水平埋深为 59 ~ 130 m。右岸强卸荷水平深 0 ~ 70 m,弱卸荷水平埋深 29 ~ 111 m,弱风化下段下限水平埋深为 27 ~ 115 m。河床弱风化下段下限垂直深度 20 ~ 57.7 m。

左岸高程 670 m 以下为 $P_2\beta_3$ 层一类柱状节理玄武岩,厚度约 70 m,柱体直径 13 ~ 25 cm,柱体长度 2 ~ 3 cm,柱体内微裂隙发育,切割块体 5 ~ 10 cm 左右;其下伏 $P_2\beta_2$ 层角砾熔岩及二类柱状节理玄武岩,节理发育不规则,未切割成完整柱体,主体较粗、短,柱体直径 25 ~ 60 cm、厚度 40 m,柱体长度 0.5 ~

收稿日期:2022-01-26

作者简介:阿旺加措(1992-),男,工程师、硕士,从事基础地质、工程地质、清洁能源开发与生态环境保护方面的研究,(E-mail)awang_jiacuo@ctgpc.com.cn/13164113455@163.com。

通讯作者:冯佳佳(1989-),女,讲师、硕士,从事地质工程、基坑工程、生态治理的研究,(E-mail)734843804@qq.com。

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(JG/18037Y);基于蒙特卡洛法考虑温度效应的台阶式边坡稳定性评价(XZ2019ZRG-16(Z));西藏大学研究生高水平人才培养计划项目(2020-GSP-B012)

2 cm。右岸高程 580 m 以下出露 $P_2\beta_3^3$ 层第一类柱状节理玄武岩,高程 545 m 陡坡以下为 $P_2\beta_3^{2-3}$ 层角砾熔岩^[4](见表 1)。

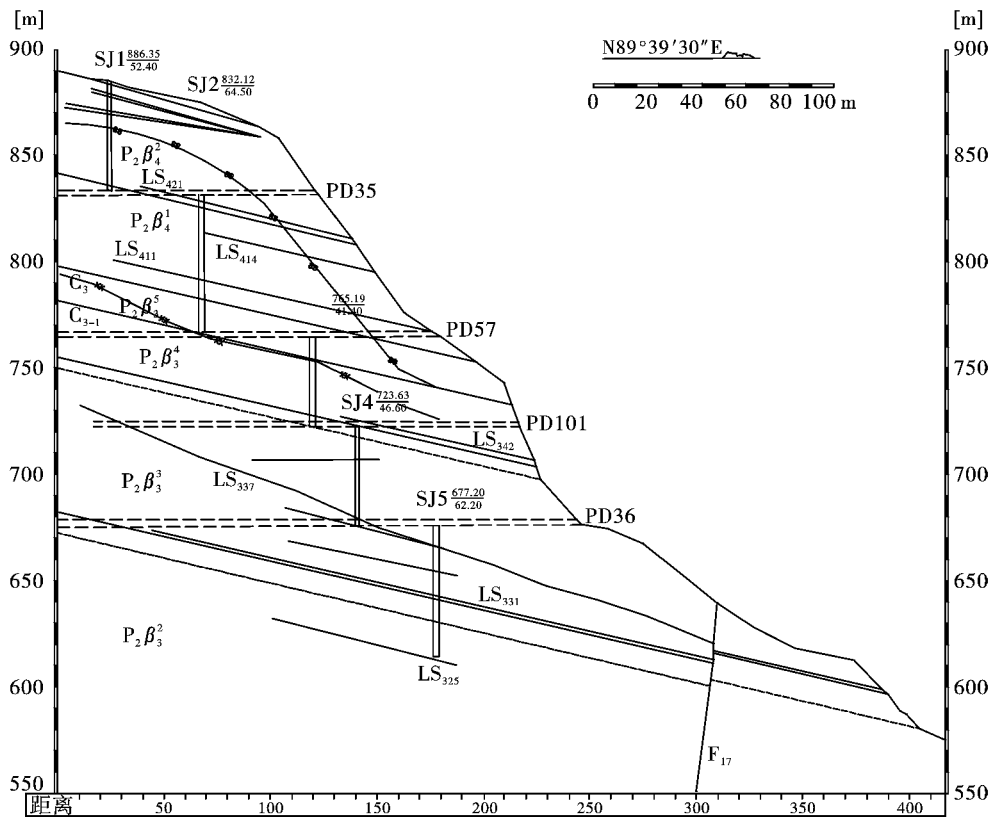


图 1 白鹤滩左岸柱状节理玄武岩区构造示意(单位:m)

Fig. 1 Schematic representation of the columnar jointed left bank basalt area of Baihetan(unit:m)

表 1 白鹤滩柱状节理玄武岩分布及岩性特征

Table 1 Distribution and lithologic characteristics of columnar jointed basalt in Baihetan

岩性	高程/m	岩性描述	柱体特征
块状玄武岩 $P_2\beta_4^1 \sim P_2\beta_4^2$	834 ~ 735	青灰色、块状结构,角砾熔岩夹层	/
角砾熔岩 $P_2\beta_3^5$	735 ~ 719	灰色、伴有块状玄武岩夹层	/
块状玄武岩 $P_2\beta_3^4 \sim P_2\beta_3^{3-4}$	715 ~ 769	青灰色、块状结构	/
第一类柱状节理玄武岩 $P_2\beta_3^3$	665 ~ 600	青灰色,柱体、块状结构,柱体发育不规整,柱面略显粗糙,柱体间嵌合紧密	直径:15 ~ 25 cm, 柱长:2 ~ 3 m
第一、二类柱状节理玄武岩 $P_2\beta_3^3, P_2\beta_3^2$	600 ~ 570	青灰色,柱状结构,柱面略显粗糙,柱体间嵌合紧密,柱体内微裂隙发育, $P_2\beta_3^3$ 层下伏地层为 $P_2\beta_3^2$ 层的角砾熔岩及第二类柱状节理玄武岩。	直径:15 ~ 25 cm, 柱长:2 ~ 3 m
角砾熔岩 $P_2\beta_3^2$	570 ~ 540	灰色,角砾状构造,岩石完整度较好	厚度在 4.3 ~ 17.0 m, 平均厚度 8.5 m

河床坝基部位基岩自上而下为 $P_2\beta_3^3$ 层一类柱状节理玄武岩、 $P_2\beta_3^{2-3}$ 层角砾熔岩及 $P_2\beta_3^{2-2}$ 层二类柱状节理玄武岩、 $P_2\beta_3^{2-1}$ 层杏仁状玄武岩。挖除部分第一类柱状节理玄武岩后,建基岩体为微新状态的角砾熔岩及第一类柱状节理玄武岩。左岸坡脚的

第 11[#]、12[#]坝段及河谷的第 18[#]坝段部分为柱状节理玄武岩,第 13[#] ~ 18[#]坝段利用角砾熔岩作为坝基,坝基岩体以 III₁ 类为主^[5]。

从总体上讲,左岸坝肩槽的柱状节理玄武岩较右岸发育,分布范围为左岸 630 ~ 595 m,柱状节理玄武

岩分布有不同断层、错动带及卸荷裂隙(见图2),故

本文从精细化爆破开挖方案和减少岩石扰动分析。

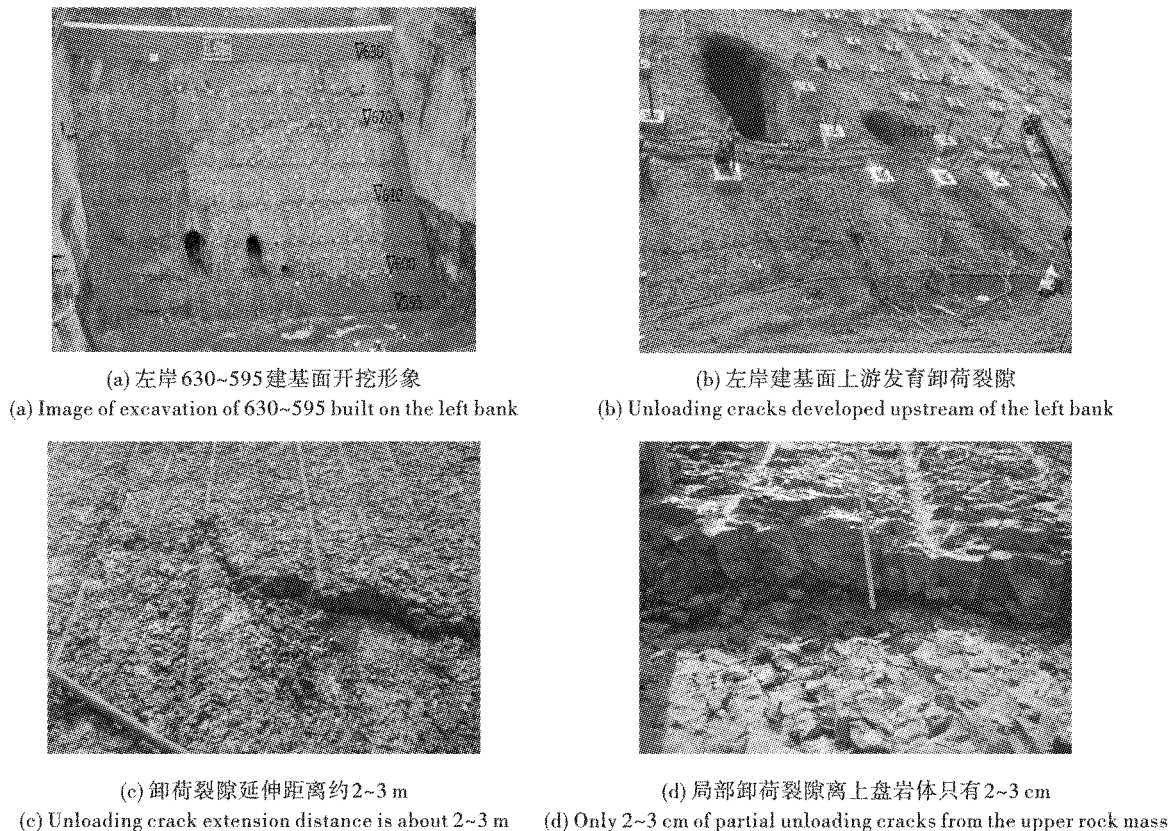


图2 柱状节理玄武岩产出及卸荷裂隙构造

Fig. 2 Columnar jointed basalt production and unloading fracture structure

2 柱状节理玄武岩爆破试验

白鹤滩工程坝基柱状节理玄武岩分布范围广,开挖处理难度大,因此对白鹤滩左岸柱状节理玄武岩分布范围进行开挖爆破试验,并监测爆破对基岩面的损伤,确保爆破试验参数达到最优效果,最大程度减少爆破对基岩面的损伤。

2.1 试验对象

试验区域在左岸高程660~580 m柱状节理玄武岩区,在左岸高程660 m以下正式进入柱状节理玄武岩的爆破开挖。柱状节理玄武岩的性状与普通的块状隐晶质玄武岩存在明显差别,前期块状隐晶质玄武岩的爆破参数已不再适用,因此开展专项爆破试验,以确定柱状节理玄武岩的爆破参数。围绕轮廓爆破方式的选择以及主体爆破参数的优化^[6],开展专项爆破试验,试验的规划示意如图3所示。

2.2 爆破施工工艺

建基面开挖主要程序包括:爆破设计编制、审批→监测岩石物理参数(坝肩槽上下游面质点振动测试、声波检测)→测量放点→预裂孔、缓冲孔、主爆孔造孔→检查造孔质量→预裂孔连接导爆索竹

片绑扎间隔装药→缓冲孔、主爆孔装药→连接延时非电及导爆管→联网准备→检查联网→起爆→爆后检查→石方挖掘、装自卸车→爆后岩石物理参数监测与爆前对比(坝肩槽上下游面质点振动测试、声波检测)^[7,8]。

预裂孔开钻前,对钻机样架的稳定性进行检查,保证每台钻机单机单架稳定牢固。钻入20 cm时,对倾角和方位做第一次校核调整;钻入50 cm时做第二次校核调整;钻入1 m时做第三次校核调整,钻孔完毕后对爆破区域内预裂孔、缓冲孔和爆破孔的孔深、倾角、方位进行验收。在爆区后冲向布置测点进行爆破振动监测。爆破为5 m保护层爆破,爆破装药结构如图4、5所示。

2.3 柱状节理预裂爆破与光面爆破试验对比

为了使柱状节理玄武岩的爆破参数控制精确^[9],在左岸高程650~645 m坝基中部毗邻保护层顶面上下游共40 m长范围内分别进行柱状节理玄武岩光面爆破和预裂爆破对比试验。在桩号0+47.6~0+87.9 m区域开展光面爆破试验,桩号0+87.9~0+104.2进行预裂爆破试验,试验过程中开展爆破振动监测及岩体声波检测,爆破试验区域如图6所示。

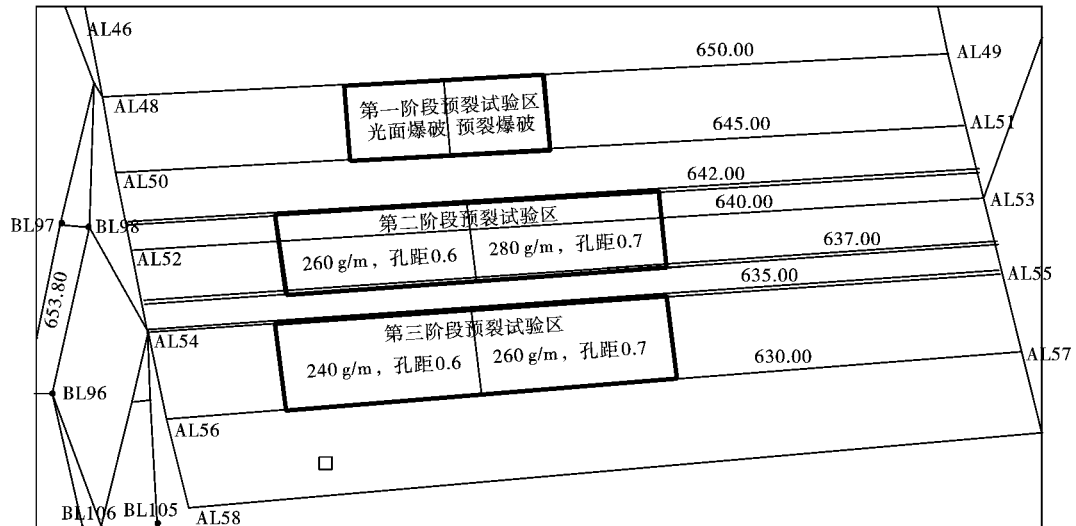
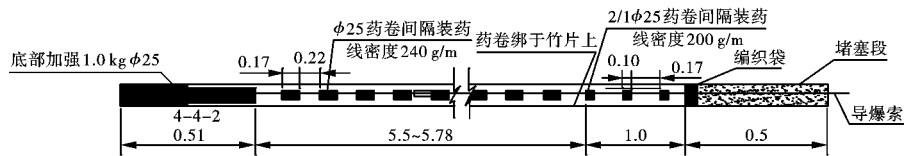


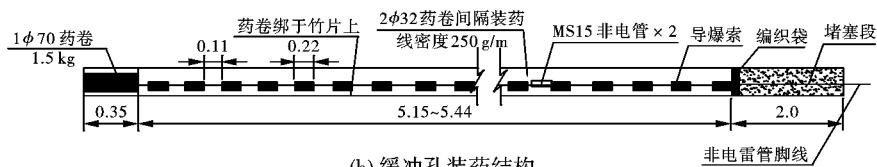
图 3 坝基柱状节理爆破试验分区示意(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of columnar joint blasting test (unit:m)



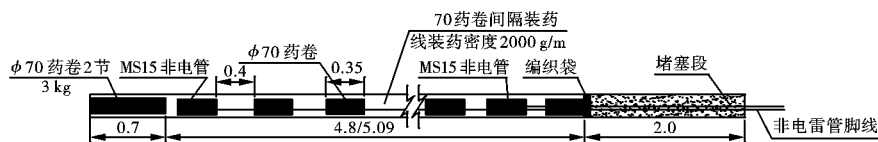
(a) 预裂孔装药结构

(a) Pre-cracked charge structure



(b) 缓冲孔装药结构

(b) Buffer hole charge structure



(c) 主爆孔装药结构

(c) Main blasting charge structure

图 4 装药结构示意图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of the charge structure(unit:m)

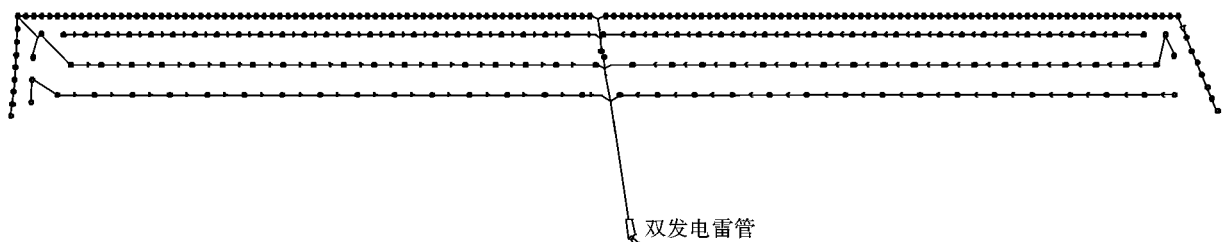


图 5 爆破起爆网路示意

Fig. 5 Signal of blasting detonation network

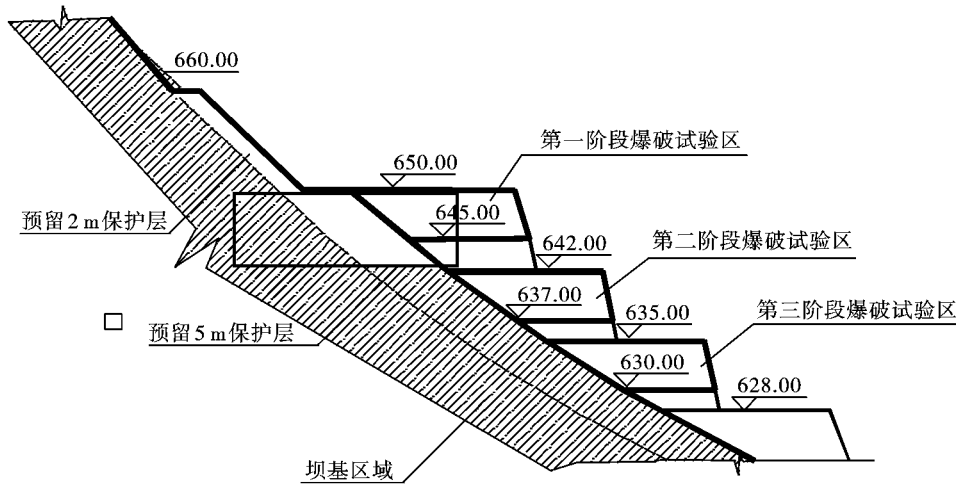


图6 预裂与光面爆破对比试验区域(单位:m)

Fig. 6 Pre-cracking and smooth blasting comparison test area (unit:m)

为保证比较变量的唯一性,预裂爆破和光面爆破采用的钻爆参数相同^[10,11],基于前期试验爆破积累的经验,选取的爆破试验区参数如表2所列。

通过预裂爆破与光面爆破的爆破效果对比,结合相关物探的测试统计结果发现,考虑爆区所有爆破孔的作用,光面爆破的振动与损伤深度均大于预裂爆破,光面爆破半孔率略高于预裂爆破半孔率,超欠挖值及平整度在两种试验工况下无明显区别。实物效果如图7所示。见表3。

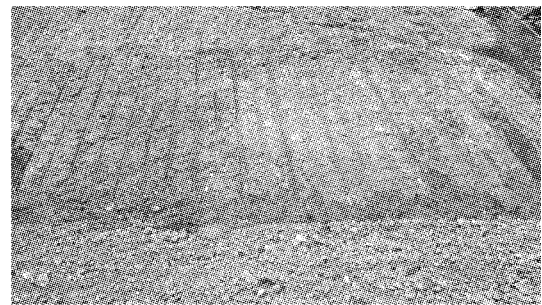


图7 爆破后的LS3319 错位带和轮廓面

Fig. 7 LS3319 displaced belt and contoured surface after blasting

表2 左岸高程660~645 m 试验区爆破参数

Table 2 Blasting parameters of the test area of the left bank elevation 660 ~ 645 m

爆破参数	预裂孔或光爆孔	缓冲孔	爆破孔
孔径/mm	76	90	90
间排距/m	0.60	1.8 × 2.2	3 × 1.7; 3 × 2.5; 3 × 2.0
线密度/(g · m ⁻¹)	280	/	/
堵塞长度/m	0.3 ~ 0.5	1.5	2.0
单孔药量/kg	3.3	15.1	18.5
最大单响/kg	13.2(4孔一响)	15.1(1孔一响)	18.5(1孔一响)
装药结构	预裂孔或光爆孔:竹片绑孔间隔装药,φ 25 药卷底部加强 1.4 kg。缓冲孔:φ 70 药卷绑孔竹片上间隔装药,底部 1.1 m 加强装药 4.5 kg。爆破孔:φ 70 药卷连续装药。		
爆破网路	孔内 MS15 段,孔间 MS2、MS3、MS4 段,排间 MS5 段,中间起爆。		

表3 爆破试验区检测(监测)成果

Table 3 Results of testing (monitoring) in the blasting test area

爆破试验	质点振动/(cm · s ⁻¹)	爆破损伤深度/m	开挖面超欠挖开挖面平整度合格率/%	开挖面半孔合格率/%
光面爆破	9.1	1.3 ~ 1.4	100	96.8
预裂爆破	6.8	1.0	100	98.7

2.4 柱状节理岩体预裂爆破的优化试验

基于上述试验结果,为获得更合理的预裂爆破

参数,在高程 642 ~ 637 m 坝基中部毗邻保护层顶面上下游共 40 m 长范围内进行柱状节理玄武岩两组

预裂爆破的对比试验^[12-15], 试验区域如同第二试验区图6所示。

试验预裂孔间距0.6 m、0.7 m两种, 线密度分别为260 g/m、280 g/m, 其它钻爆参数相同, 详细参

数如表4所列。

在试验过程中, 详细进行了爆破振动与岩体损伤深度的检测, 表5给出了此次预裂爆破对比试验的相关测试指标。

表4 左岸高程642~637 m试验区爆破参数

Table 4 Blasting parameters of the test area of the left bank elevation 642~637 m

爆破参数	预裂孔	缓冲孔	爆破孔
孔径	76	90	90
间排距/m	0.6(上游试验区四区) 0.7(下游试验区五区)	1.8×2.2	2.5×3.0
线密度/(g·m ⁻¹)	260(上游试验区四区) 280(下游试验区五区)	/	/
堵塞长度/m	0.5	2.0	2.0
单孔药量/kg	3.86~3.78	2.02~9.26	4.32~12.98
最大单响/kg	15.4(4孔一响)	9.3(1孔一响)	13.1(1孔一响)
装药结构	竹片绑扎间隔装药, 预裂孔: φ 25 药卷底部加强 2.0 kg。缓冲孔: φ 70 药卷绑扎竹片上间隔装药, 底部 1.1 m 加强装药 4.5 kg。爆破孔: φ 70 药卷连续装药。		
爆破网路	孔内 MS15 段, 孔间 MS2、MS3、MS4 段, 排间 MS5 段, 中间起爆。		

表5 爆破试验区检测(监测)成果

Table 5 Results of testing (monitoring) in the blasting test area

爆破试验区	预裂孔参数	质点振动/ (cm·s ⁻¹)	爆破损伤 深度/m	开挖面超欠挖 合格率/%	开挖面平整度 合格率/%	开挖面半孔 合格率/%
上游试验区	孔距: 0.6 m 线装药参数: 260 g/m	6.3	0.9~1.0	96.1	95.7	95.7
下游试验区	孔距: 0.7 m 线装药参数: 280 g/m		1.0~1.1	96.1	93.2	92.3

2.5 柱状节理预裂爆破的验证试验

预裂爆破优化试验结果显示上游试验区(孔距0.6 m, 线密度260 g/m)爆破振动与损伤深度较小, 半孔率, 超欠挖值及平整度在试验工况下效果更好。在高程635~630 m 坝基中部毗邻保护层顶面上下游共40 m 长范围内进行柱状节理玄武岩预裂爆破

的验证试验, 试验区域如同第三试验区图6所示。

试验预裂孔间距0.6 m, 线密度分别为260 g/m和240 g/m, 其它钻爆参数相同, 详细参数如表6所列。

表7显示此次预裂爆破试验的相关测试结果。结果表明, 当预裂孔的孔距为0.6 m、线密度为240 g/m 时满足各项控制标准。

表6 高程635~630 m试验区爆破参数

Table 6 Blasting parameters of 635~630 m test area

爆破参数	预裂孔	缓冲孔	爆破孔
孔径	76	90	90
间排距/m	0.6	1.6×1.7	1.9×2.5; 1.9×3.0; 2.5×3.0
线密度/(g·m ⁻¹)	260(下游试验区) 240(上游试验区)	/	/
堵塞长度/m	0.5	2.0	2.0
单孔药量/kg	3.79/3.89(下游试验区) 3.93/4.03(上游试验区)	16.4~17.2	6.0~17.57
最大单响/kg	16.1(4孔一响)	17.2(1孔一响)	17.6(1孔一响)
装药结构	预裂孔: 竹片绑扎间隔装药, φ 25 药卷底部加强 2.0 kg。缓冲孔: φ 70 药卷绑扎竹片上间隔装药, 底部 1.1 m 加强装药 4.5 kg。爆破孔: φ 70 药卷连续装药。		
爆破网路	孔内 MS15 段, 孔间 MS2、MS3、MS4 段, 排间 MS5 段, 中间起爆。		

表 7 高程 635 ~ 630 m 爆破试验区检测(或监测)成果表
Table 7 Results of inspection (monitoring) of 635 ~ 630 m blasting test area

爆破试验区	预裂孔参数	质点振动/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆破损伤 深度/m	开挖面超欠挖 合格率/%	开挖面平整度 合格率/%	开挖面半孔 合格率/%
上游试验区	孔距:0.6 m 线装药参数:240 g/m	7.4	0.9 ~ 1.0	97.6	95.0	93.0
下游试验区	孔距:0.6 m 线装药参数:260 g/m		1.0 ~ 1.1	98.9	95.8	90.3

3 爆破物探监测

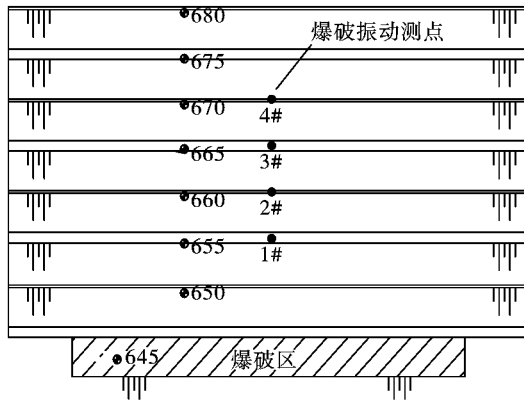
3.1 质点振动监测

在爆区后冲向沿高程共布置了 4 个地表测点(测点编号 1# ~ 4#), 每个测点均测试水平径向、竖

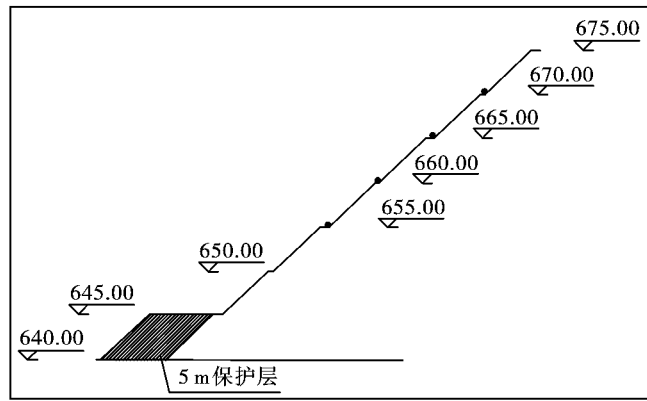
直向和水平切向三个方向的质点振动速度, 测点布置见图 8。

3.2 监测成果

爆破振动监测数据见表 8, 典型监测波形图见图 9。



(a) 测点布置俯视图
(a) Measuring point layout top view



(b) 测点布置剖视图
(b) Section layout view

图 8 爆破振动测点布置示意(单位:m)

Fig. 8 Schematic diagram of blasting vibration measurement points(unit:m)

表 8 爆破振动监测结果

Table 8 Blasting vibration monitoring results

爆破类型	测点编号	水平径向/R		水平切向/T		铅垂向/V		距离		单响药量/kg
		速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率/ Hz	速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率/ Hz	速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率/ Hz	水平/m	高差/m	
预裂 爆破	1#	5.4	37	3.6	45	3.8	51	12	10	14.6
	2#	3.6	48	2.0	51	2.9	46	18	15	14.6
	3#	1.6	41	1.1	40	1.7	42	24	20	14.6
	4#	1.0	29	0.7	31	0.8	30	30	25	14.6

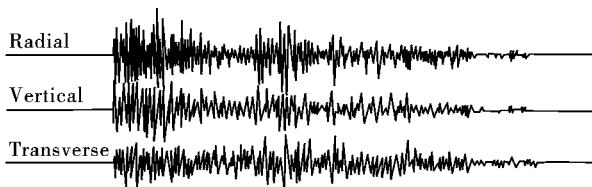


图 9 1#测点爆破振动监测

Fig. 9 1# measuring point blasting vibration monitoring

从实测资料分析, 1#测点位于爆区中部后冲向,

预裂爆破最大质点振动速度为 3.6 cm/s 。

3.3 声波观测

本部位为预裂爆破区, 爆前声波测试, 爆后声波测试, 爆前爆后间隔 2 d, 在预裂面上部布置两组声波测试孔(上、下游各一组, 每组三个孔)及一个单孔, 共 8 个孔。上游 4 个孔编号为 23-S1 ~ 23-S3、Z1; 下游 4 个孔编号为 23-X1 ~ 23-X3、Z2。设计声波孔垂直于预裂面, 孔径 $\phi 90 \text{ mm}$, 孔深入预裂面基岩面 10 m。孔位布置见图 10。

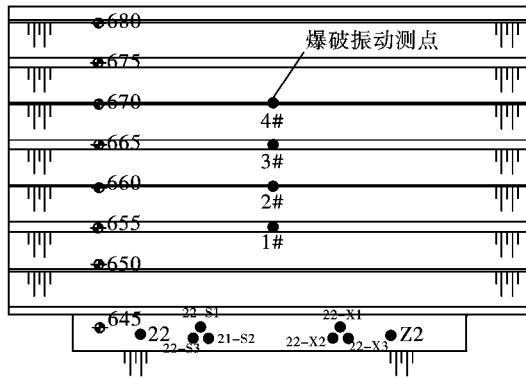


图 10 声波孔布置示意(单位:m)

Fig. 10 Schematic arrangement of sonic holes (unit:m)

3.4 声波测试成果分析

在爆破前后进行了单孔及跨孔声波测试,分析爆破前、后的单孔声波速度随孔深的变化曲线,在开挖轮廓面(预裂爆破面或光面爆破)附近,爆破后的声波速度出现了明显的下降段,这表明轮廓面附近的爆破导致了该处岩体产生了不同程度的损伤。根据爆破前、后波速衰减率大于 10% 损伤阈值的深度确定该处爆破损伤深度^[16]。其中跨孔法,因孔位偏差无法接收波形或有效波形,故没做统计。各测线孔深-波速关系曲线见附图 11,声波测试数据见表 9。

表 9 左岸坝肩槽边坡爆破前、后岩体声波检测统计

Table 9 Sound wave detection statistics of rock mass before and after blasting on the slope of the left bank abutment

部位	测试方法	测线编号	爆前波速/(m·s ⁻¹)			爆后波速/(m·s ⁻¹)			损伤深度/m	1 m 处波速衰减率/%
			平均波速	小值	大值	平均波速	损伤区平均值	未损伤区平均值		
上游建基面	单孔法	23-S1	4253	3599	4758	4193	3137	4283	0.8	2
		23-S2	4463	4137	4838	4315	3232	4458	1.0	11
		23-S3	4193	3707	4619	4074	3254	4150	0.9	7
		23-Z1	4696	4164	5071	4605	3314	4745	0.8	3
下游建基面	单孔法	23-S2-S3	4156	3593	4606	4028	2791	4155	0.9	8
		23-X1	4668	4420	4975	4566	3868	4630	0.8	4
		23-X2	4466	4000	4834	4382	3545	4464	0.9	7
		23-X3	4708	4505	4939	4546	4169	4565	0.7	3
	跨孔法	23-Z2	4295	3462	4919	4328	3202	4490	1.0	12
		23-X1-X2	4612	4006	5116	4451	3417	4580	0.9	7
		23-X2-X3	4370	3670	5008	4220	3046	4367	0.9	9

注:表中损伤深度为法线方向深度。

4 试验分析探讨

(1)从预裂爆破与光面爆破的作用机理角度分析,光面爆破试验效果较差原因可能有以下方面:①开挖面分别依次受到前缘主爆孔、缓冲孔、光爆孔的爆破叠加作用影响,导致爆破振动和损伤深度偏大,尤其是靠近光爆孔的缓冲孔影响尤为明显;②光面爆破开挖方式未提前形成预裂缝,预裂缝的隔振作用消失,导致爆破控制效果略差。

基于试验结果,工程参建各方通过分析后明确:不再进行光面爆破试验,进一步研究柱状节理玄武岩预裂爆破参数,主要针对预裂爆破参数的优化展开研究。

(2)优化试验结果表明,采用线装药密度

280 g/m、孔距 0.7 m 的预裂爆破爆破损伤深度偏大,线装药密度 260 g/m、间距 0.6 m 条件下的预裂爆破检测成果达到预期目标。确定线装药密度 260 g/m、间距 0.6 m 的预裂爆破的验证试验,同时探寻减小预裂孔线装药密度的可行性。

(3)根据物探监测分析表明,在严格控制爆破参数前提下,开挖爆破轮廓区附近岩体仍受到不同程度的损伤,但损伤深度范围在基岩浅部 0.9 m 范围内最强,随着基岩面深度增加损伤逐渐减小,基岩面 2 m 以下未受到明显的爆破损伤。

(4)基于以上试验结果,柱状节理开挖区域预裂孔的核心爆破参数选定:孔距 0.6 m、线密度为 240 g/m。综合以上多次试验,推荐的柱状节理玄武岩爆破参数如下,孔位参数如表 10 所示。

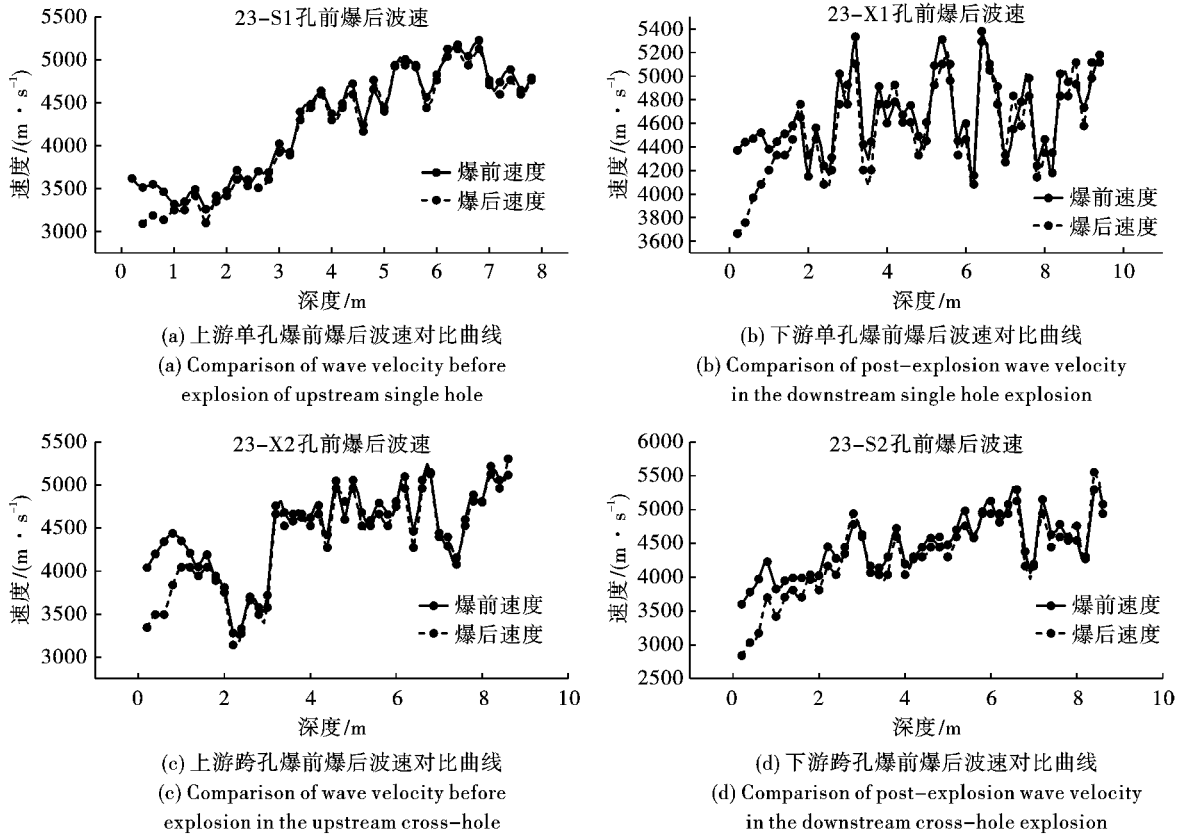


图 11 上、下游跨孔爆前爆后波速对比曲线

Fig. 11 Comparison curve of wave velocity before and after explosion of the upstream and downstream cross-holes

表 10 柱状节理玄武岩爆破参数

Table 10 Blasting parameters of columnar jointed basalt

参 数	
预裂孔	a 采用 YQ-100B 钻机进行预裂孔钻孔, 孔径 76 mm b 预裂孔孔间距 60 cm c 装药结构: 预裂孔采用间隔装药, 线装药密度为 240 g/m, 药卷直径 25 mm
缓冲孔	a 采用 CM-351 钻机进行缓冲孔钻孔, 孔径 90 mm b 缓冲孔孔间距 1.8 m, 距预裂孔的法向距离为 1.2 m c 装药结构: $\phi 70$ 药卷绑扎竹片上间隔装药, 底部 1.1 m 加强装药 4.5 kg
主爆孔	a 采用 CM-351 钻机进行缓冲孔钻孔, 孔径 90 mm; b 主爆孔孔间距 3 m, 排距为 2.5 m c 装药结构: $\phi 70$ 药卷连续装药
爆破网路	a 孔内采用 MS15 高精度雷管延迟 b 孔间采用 MS3 或 MS2 雷管
最大单响药量	预裂孔最大单响药量不超过 16 kg, 缓冲孔与主爆孔的最大单响药量不超过 20 kg

5 结论

(1) 白鹤滩坝址区域岩体较为复杂, 主要为峨眉山玄武岩出露区域, 其周围分布大断层及错动带, 其中位于坝肩部位的柱状节理玄武岩具有节理面多、开挖后表面快速卸荷, 易破碎特征, 由于此类岩体对开挖爆破较为敏感而直接影响整个坝肩稳定及开挖过程, 因此对此类岩体的连续开挖需要开展爆

破试验确定精确最优爆破参数。

(2) 通过数次试验分析表明, 爆破过程中根据柱状节理玄武岩岩性特征结合质点振动速度、声波等物探手段实时监测岩体松弛的特征及变化, 并针对监测数据分析来精确控制爆破参数, 可以有效降低松弛岩体损伤, 为坝肩开挖进度和质量提供技术保障。

参考文献(References)

- [1] 欧阳水芽,黄文,丁力. 预裂爆破在破碎岩体高边坡开挖工程中的应用[J]. 东北水利水电,2018(6):17-19.
- [1] OUYANG Shui-ya, HUANG Wen, DING Li. Application of pre-splitting blasting in high slope excavation of fracture rock mass[J]. Northeast Water Resources & Hydropower, 2018(6):17-19. (in Chinese)
- [2] 李新平,陈萍萍,罗忆,等. 非对称不耦合装药结构对预裂爆破效果的影响[J]. 爆破,2017,34(3):25-30.
- [2] LI Xin-ping, CHEN Ping-ping, LUO Yi et al. Impacts of asymmetric decoupling charge structure on presplitting blasting effect[J]. Blasting, 2017, 34(3):25-30. (in Chinese)
- [3] 石安池,徐建荣,刘美山,等. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究报告(第四篇)工程地质[R]. 杭州:华东勘测设计研究院,2011.
- [3] SHI An-chi, XU Jian-rong, LIU Mei-shan, et al. Feasibility study report of Baishatan Hydropower Station in Jinsha River(Part 4) engineering geology[R]. Hangzhou: East China Survey and Design Institute, 2011. (in Chinese)
- [4] 徐建荣,何明杰,刘美山,等. 金沙江白鹤滩水电站大坝工程建基面专项验收报告[R]. 杭州:华东勘测设计研究院,2017.
- [4] XU Jian-rong, HE Ming-jie, LIU Mei-shan, et al. Special acceptance report for the foundation of the dam project of Baihetan Hydropower Station in Jinsha River[R]. Hangzhou: East China Survey and Design Institute, 2017. (in Chinese)
- [5] 石安池,唐鸣发,周其健,等. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2079-2086
- [5] SHI An-chi, TANG Ming-fa, ZHOU Qi-jian, et al. Deformation characteristics of columnar jointed basalt rock mass in Baihetan Hydropower Station on Jinsha River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10):2079-2086. (in Chinese)
- [6] 正元福,刘天斌,刘美山,等. 金沙江白鹤滩水电站坝肩爆破安全监测报告[R]. 武汉:长江科学院,2016
- [6] ZHENG Yuan-fu, LIU Tian-bin, LIU Mei-shan, et al. Safety monitoring report for dam abutment blasting of Baihetan Hydropower Station in Jinsha River[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2016. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] LIU Fu-sheng, JIANG Yu-bo, WANG Hong-xia, et al. Study on blasting construction technology of TBM assembly tunnel in extra large section[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(12):70-77. (in Chinese)
- [8] 陈桂闵,陈翔,邓雨露. 白鹤滩水电站左岸地下厂房岩锚梁爆破试验参数研究[J]. 水利水电技术,2017,48(S2):14-21.
- [8] CHEN Gui-zhen, CHEN Xiang, DENG Yu-lu. Study on blasting test parameters of rock anchor beam in underground powerhouse of left bank of Baihetan Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(S2):14-21. (in Chinese)
- [9] 罗贯军,郭增光,张熊君. 白鹤滩水电站柱状节理玄武岩固结灌浆试验成果分析与建议[J]. 水利水电技术,2015,46(10):117-120.
- [9] LUO Guan-jun, GUO Zeng-guang, ZHANG Xiong-jun. Analysis and suggestion on consolidation grouting results of columnar jointed basalt in Baihetan Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(10):117-120. (in Chinese)
- [10] 张本铎,黄宏伟,唐君,等. 白鹤滩水电站大直径调压室井身段开挖爆破施工技术[J]. 水利水电技术,2017,48(S2):7-13.
- [10] ZHANG Ben-zhen, HUANG Hong-wei, TANG Jun, et al. Construction technology for excavation and blasting of large diameter surge chamber of Baihetan Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(S2):7-13. (in Chinese)
- [11] 高祥兵,毕卫国,孙明旭. 复杂环境下基坑开挖爆破技术[J]. 住宅与房地产,2017,48(S2):178-179.
- [11] GAO Xiang-bing, BI Wei-guo, SUN Ming-xu. Blasting technology of foundation pit excavation in complex environment[J]. Residential & Real Estate, 2017, 48(S2):178-179. (in Chinese)
- [12] 王永虎,李雷斌,金沐,等. 大型弧形高边坡预裂爆破设计与施工技术[J]. 爆破,2016,33(3):59-63.
- [12] WANG Yong-hu, LI Lei-bin, JIN Mu, et al. Design and construction technology of pre-splitting blasting for large curved high slope[J]. Blasting, 2016, 33(3):59-63. (in Chinese)
- [13] 陈明,张俊,郑炳旭,等. 基于现场混装的宽孔距空气间隔预裂爆破技术[J]. 爆破,2016,33(3):1-4.
- [13] CHEN Ming, ZHANG Jun, ZHENG Bing-xu, et al. Wide-pitch air-space pre-splitting blasting technology based on on-site mixing[J]. Blasting, 2016, 33(3):1-4. (in Chinese)
- [14] 周天刚,严鹏,郭增光,等. 白鹤滩水电站坝肩以上边坡开挖爆破负面效应控制[J]. 爆破,2016,33(1):124-130.
- [14] ZHOU Tian-gang, YAN Peng, GUO Zeng-guang, et al.

- Negative effect control of excavation blasting above the dam abutment of Baihetan Hydropower Station[J]. *Blasting*, 2016, 33(1):124-130. (in Chinese)
- [15] 郭正超,王红胜,李树刚,等. 预裂爆破弱化坚硬顶板技术在沿空留巷的应用[J]. *爆破*, 2017, 34(3):54-63.
- [15] GUO Zheng-chao, WANG Hong-sheng, LI Shu-gang, et al. Application of pre-splitting blasting weakened hard roof technology in retaining roadway along the goaf[J]. *Blasting*, 2017, 34(3):54-63. (in Chinese)
- [16] 高坛,周传波,蒋楠,等. 基坑开挖爆破下临近管道震动速度安全阈值研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6):2191-2195.
- [16] GAO Tan, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan, et al. Research on safety threshold of adjacent pipeline vibration speed under foundation pit excavation blasting[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6):2191-2195. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第35页)

参考文献(References)

- [1] 俞缙,钱七虎,赵晓豹,等. 岩体结构面对应力波传播规律影响的研究进展综述[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集(下册), 2009:238-250.
- [1] YU Jin, QIAN Qi-hu, ZHAO Xiao-bao, et al. Review in research progress of influence of rock joint on propagation rule of stress wave[C]//Jiaozuo, China: The 9th National Conference on Shock and Impact Dynamics, 2009:238-250. (in Chinese)
- [2] 王梦,范立峰. 岩体内应力波传播的研究进展与展望[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(7):13.
- [2] WANG Meng, FAN Li-feng. Research progress and prospect of influence of rock joint on propagation rule of stress wave[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(7):13. (in Chinese)
- [3] 李业学,范建辉,李铮. 岩体节理对应力波传播规律影响的研究进展[J]. *湖北文理学院学报*, 2015, 36(11):10-14, 22.
- [3] LI Ye-xue, FAN Jian-hui, LI Zheng. Research progress of influence of rock joint on propagation rule of stress wave[J]. *Journal of Hubei University of Arts and Science*, 2015, 36(11):10-14, 22. (in Chinese)
- [4] 杨仁树,许鹏,杨立云,等. 节理岩体中爆炸应力波传播规律的研究[J]. *金属矿山*, 2016(6):49-54.
- [4] YANG Ren-shu, XU Peng, YANG Li-yun, et al. Study of regularity of explosive stress wave propagation in jointed rock mass[J]. *Metal Mine*, 2016(6):49-54. (in Chinese)
- [5] 陈雪峰,赵孝学,汪海波,等. 节理充填岩体爆炸应力波传播规律模型试验与应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(12):130-134.
- [5] CHEN Xue-feng, ZHAO Xiao-xue, WANG Hai-bo, et al. Model tests and application research on propagation laws of blasting stress wave in jointed and filled rock mass[J]. *Journal of Rock Safety Science and Technology*, 2018, 14(12):130-134. (in Chinese)
- [6] 李鹏,周佳,李振. 爆炸应力波在层状节理岩体中传播规律及数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(5):97-102.
- [6] LI Peng, ZHOU Jia, LI Zhen. Blasting stress wave in layered jointed rock mass propagation law and numerical simulation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5):97-102. (in Chinese)
- [7] 刘洪宇,路世伟,孙金山,等. 节理岩体对P波传播的影响[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14):5929-5933.
- [7] LIU Hong-yu, LU Shi-wei, SUN Jin-shan, et al. Influence of jointed rockmass on P wave propagation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14):5929-5933. (in Chinese)
- [8] 董千. 不同地应力下节理岩体中爆炸应力波传播与衰减规律研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [8] DONG Qian. Study on propagation and attenuation law of blasting stress wave in jointed rock mass under different in-situ stresses[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 柴少波,李建春,赵均海,等. P波在非线性交叉节理岩体中的传播特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(6):1149-1157.
- [9] CHAI Shao-bo, LI Jian-chun, YANG Jun-hai, et al. Study on stress P-wave propagation across intersecting rock joints with nonlinear deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(6):1149-1157. (in Chinese)
- [10] 许林峰,张向阳,王鸿儒. 基于量纲分析的岩石相似材料配比研究[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(3):44-48.
- [10] XU Lin-feng, ZHANG Xiang-yang, WANG Hong-ru, et al. Study on proportion of rock similar materials based on dimensional analysis[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(3):44-48. (in Chinese)

英文编辑:陈东方