

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.002

南公1水电站溢洪道保护层开挖 孔底消能-聚能结构优选研究*

陈育权¹, 刘广鑫^{2a,2b}, 柯昌佳¹, 卢文波^{2a,2b}, 刘志鹏¹, 赵栋¹, 陈明^{2a,2b}

(1. 中国水利电力对外有限公司, 北京 100120; 2. 武汉大学 a. 水资源与工程科学国家重点实验室;
b. 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 岩石基础的开挖成型质量对工程建设及运行安全有着重要影响。基于老挝南公1水电站溢洪道保护层开挖, 在现场开展了不同消能-聚能结构的爆破试验, 结合试验数据研究了孔底不同消能-聚能结构对开挖成型效果的影响。结果表明: 相较于“铁精粉+松砂垫层”的消能-聚能结构, “铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构能够获得更加平整的建基面; “铁精粉+松砂垫层”的消能-聚能结构则能够更有效地缓冲消耗传递至孔底的爆炸能量, 更好地保护孔底岩体。综合开挖成型效果和残孔破坏分析结果, 现场优选了“铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构, 并在一级消力池的保护层开挖中推广了消能-聚能联合控制爆破技术, 取得了良好的开挖成型效果。

关键词: 消能-聚能结构; 岩石基础; 爆破试验; 开挖成型效果

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0010-08

Study on Optimization of Dissipation-accumulation Energy Structure at Bottom of Borehole during Protective Layer Excavation of Namkong 1 Hydropower Station

CHEN Yu-quan¹, LIU Guang-xin^{2a,2b}, KE Chang-jia¹, LU Wen-bo^{2a,2b},
LIU Zhi-peng¹, ZHAO Dong¹, CHEN Ming^{2a,2b}

(1. China International Water & Electric Corp, Beijing 100120, China;
2. a. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science;
b. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering,
Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The excavation shaping quality of rock foundation exerts a profound impact on the project construction and operation safety. Different blasting experiments of dissipation-accumulation energy structures at the bottom of boreholes were carried out during the excavation of the spillway protective layer of Namkong 1 Hydropower Station in Laos. The influence of the structures on the shaping effect was studied by the experimental data. The results show that the “iron ball + loose sand cushion” dissipation-accumulation energy structure can obtain a flatter foundation surface than that of the “iron powder + loose sand cushion” structure. However, the technology of dissipation-accumulation energy on iron powder and loose sand cushion structure can effectively buffer the explosive energy which is transmitted to the bottom of the borehole so that to protect the rock mass. Based on the analysis results of shaping effect and residual hole damage, the iron ball and loose sand cushion structure was selected. Furthermore, this controlled blasting technology by dissipation-accumulation energy was also applied in the excavation of the protective layer of the first-level stilling basin, achieving a good excavation shaping effect.

Key words: dissipation-accumulation energy structure; rock foundation; blasting experiments; excavation sha-

ping effect

在水利水电、矿山和交通等工程建设中,均会面临大量的岩石基础开挖问题。钻孔爆破作为一种经济高效的开挖手段,一直以来被广泛应用。但是在完成爆破破岩的同时,会产生一些诸如爆破振动和爆破损伤等负面效应,爆破损伤区内岩体的物理参数及承载能力均表现为一定程度的劣化,若处理不当将会影响工程的运行安全。因此,开挖损伤区的形成与控制一直以来都是岩石动力学的研究热点之一^[1-4]。为了减小爆破扰动对保留岩体的损伤破坏,临近基础面采用预留保护层的开挖方式^[5],保护层的厚度通常为2~6 m。

经过长期的开挖实践,我国发展了一系列的保护层控制爆破技术^[6],主要包括:分层开挖法^[7]、水平预裂法^[8]、水平光面爆破法和孔底设柔性垫层的小梯段一次爆除法^[9,10]。但是传统的分层开挖,层层“剥皮”法施工效率很低,不能满足开挖工期的正常需求;水平预裂和水平光爆,开挖整体效果较好,但是需要钻设水平孔,施工效率低下,同时往往会由于架钻的需要引起40 cm以上的超挖;孔底设柔性垫层的小梯段孔间顺序起爆法,由于柔性垫层材料对爆炸冲击波的缓冲作用有限,孔底损伤依然较大,开挖出的建基面起伏差较大,从而导致人工撬挖量较大。随着工程建设的不断推进,传统的保护层开挖方法已经无法满足快速高效的施工目的。因此,众多学者也对诸多新型开挖技术展开了研究。宗琦应用断裂力学理论提出了切槽爆破技术,并将其应用于光面爆破并获得了良好的成缝效果^[11];秦健飞等将具有聚能效果的双聚能槽药柱用于坝基预裂爆破开挖^[12];赵根等结合三峡水电站的坝基开挖,提出了切割型和射孔型两种不同的环向聚能药包爆破技术^[13]。但由于施工效率和开挖效果的限制,以上新型技术也未得到推广应用。

近年来卢文波等结合白鹤滩水电站坝基开挖^[14-16],提出了一种在孔底增设高波阻抗垫块和松砂缓冲层的消能-聚能联合控制爆破技术,成功地解决了白鹤滩水电站坝基快速高效的开挖难题,并成功推广应用于舟山绿色石化基地和深圳赤湾地铁项目

中^[17,18]。由于不同的岩石地质条件对消能-聚能结构具有不同的适应性,针对不同的开挖条件,需要寻求最优的消能-聚能结构,以便进一步简化施工工艺和获得良好的开挖成型质量,因此有必要研究消能-聚能结构形式对开挖效果的影响。结合老挝南公1水电站溢洪道保护层的爆破开挖,在现场开展了相关对比试验,重点研究了不同消能-聚能结构的开挖效果,并对消能-聚能结构进行了优选,同时在溢洪道一级消力池的保护层开挖中应用了消能-聚能联合控制爆破技术,获得了良好的开挖效果。

1 工程背景

南公1水电站位于老挝南部的阿速坡省内的南公河上,为老挝、越南、柬埔寨三个国家的交界区域。坝址距省城阿速坡公路里程约53 km,距万象约958 km,距越南岘港约464 km,距泰国曼谷约1167 km。南公1水电站工程等别为二等大(2)型,主要任务是发电,兼顾防洪、灌溉、交通、旅游、促进当地社会经济发展。工程由首部枢纽及引水发电系统组成,其中首部枢纽包括面板堆石坝、左岸溢洪道、左岸导流隧洞和右岸电站进水口。首部枢纽的溢洪道布置于大坝左岸,主要由引渠段、闸室段和泄槽段(共设三级消力池)等三部分组成,首部枢纽布置如图1(a)所示。溢洪道的总开挖长度为800 m,开挖宽度为140 m,保护层的开挖区域主要集中在引渠段和泄槽段,如图1(b),其中引渠段的开挖面积达15 000 m²,泄槽段的开挖面积达20 000 m²。保护层开挖具有开挖面积大、开挖工期紧的特点,同时溢洪道的设计泄洪流量为8000 m³/s,采用无混凝土衬砌的结构形式,后期泄洪运行时要承担巨大的水压力,其开挖质量的重要性不言而喻。采用传统的保护层开挖方法已无法满足其快速高效施工的需求,急需寻求一种新型的保护层开挖方案。

溢洪道位于坝址左岸山脊,地形较缓、地形坡度20°~30°,地表第四系覆盖层主要为坡积层,下伏基岩岩性单一、为中~下三叠统(T1-2)流纹岩。溢洪道开挖区域的流纹岩湿抗压强度为52.5~126.2 MPa,平均为106.2 MPa,软化系数为0.62~0.94,平均为0.82,属于典型的硬质岩。

2 不同消能-聚能结构对比

以往在现场施工布置消能-聚能结构时,高波阻抗铁球需要从厂家定做,同时铁球直径存在与炮孔直

收稿日期:2020-07-06

作者简介:陈育权(1983-),男,安徽安庆人,高级工程师,从事水利水电工程项目管理工作,(E-mail) chenyuquan@ctg.com.cn。

通讯作者:刘广鑫(1993-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事工程爆破及岩石动力学方面的研究工作,(E-mail) liuguangxin@whu.edu.cn。

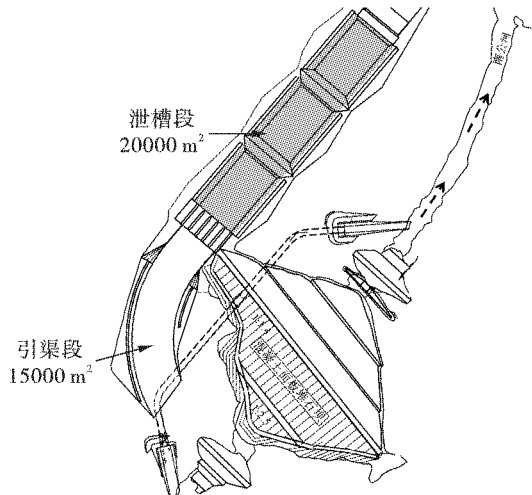
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51779190、51979205)

径的匹配系数问题,进而将会影响岩石基础的开挖成型效果。与铁球不同的是,铁精粉具有颗粒状结构优势,同样兼具高波阻抗特征,对不同直径的炮孔适应能力强、现场施工简便。为考虑铁球直径与孔径匹配

系数问题,本文结合老挝南公 1 水电站溢洪道保护层爆破开挖,进行了铁精粉全耦合对比试验。图 2 表示了铁球消能-聚能结构和铁精粉消能-聚能结构作用下炮孔内部应力波详细的透反射过程。



(a) 首部枢纽布置
(a) Layout of head hydroproject



(b) 开挖范围
(b) Excavation scope

图 1 南公 1 水电站首部枢纽及开挖范围布置图

Fig. 1 Layout of head hydroproject and excavation scope of Namkong 1 Hydropower Station

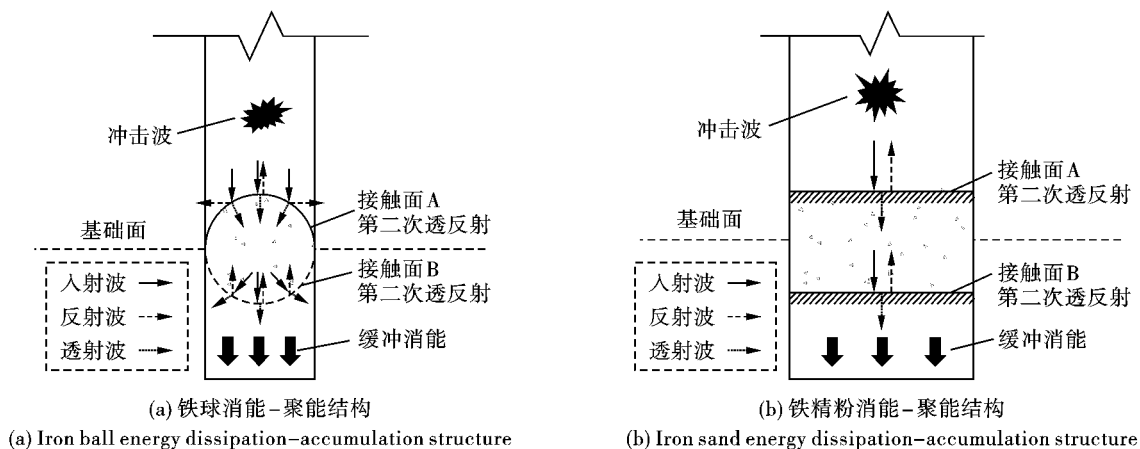


图 2 消能-聚能结构应力波透反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress wave transmission and reflection of energy dissipation-accumulation structure

由图 2 可知,当炮孔内的炸药起爆后,爆炸引发的爆炸冲击波在接触面 A 上将发生反射和透射,“铁精粉+松砂垫层”的消能-聚能结构与“铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构的不同点在于:在接触面 A 处,铁球可以向侧向反射爆炸应力波,由于铁球的波阻抗大于爆生气体,因此反射的应力波为加载波,此反射波能够帮助破碎侧向岩体;铁精粉仅能够在垂直方向反射应力波,但铁精粉为散粒体结构,在应力波作用下可以更大程度地缓冲变形,消耗爆炸能量,更好地保护孔底岩体。

3 应用效果分析

3.1 引渠段消能-聚能联合控制爆破试验

(1) 试验方案

为研究不同消能-聚能结构对岩石基础面开挖效果的影响,结合溢洪道爆破开挖,在引渠段开展了相应的现场试验。整个试验区共布置 16 排炮孔,炮孔孔内分别设置 MS1、MS3、MS5、MS7、MS9、MS11 非电导爆管雷管、孔间无延时,2~3 排一响,采用电雷管起爆。本次试验大部分炮孔直径为 120 mm,仅

少部分炮孔直径为 90 mm,考虑实际保护层厚度为 2~5 m 并参考以往消能-聚能爆破试验参数,本次试验中直径为 90 mm 的爆区采用 2.2 m×2.0 m 的间排距、直径为 120 mm 的爆区采用 2.5 m×2.0 m 的间排距,同时由于铁球存在与孔径匹配系数的问题,因此采用 LS-DYNA 显式动力分析软件进行了相

应的数值模拟研究,数值试验结果表明铁球直径越大、水平聚能效果越好,但当铁球直径增大到一定程度时,水平聚能效果提升有限,考虑施工可操作性,为了防止卡孔,现场试验时选择了 80 mm 和100 mm 直径的铁球,试验具体的钻爆参数见表 1,爆破方案如图 3。

表 1 钻爆参数统计表
Table 1 Statistics of drilling and blasting parameters

消能-聚能结构	孔径/mm	铁球直径/mm	孔深/m	间排距/(m×m)	单孔药量/kg	堵塞长度/m
铁精粉	120	/	0.9~1.5	2.5×2.0	2.0~4.0	0.5~0.6
铁球	90	80	0.7~3.0	2.2×2.0	2.0~8.0	0.2~1.0
铁球	120	100	0.7~3.0	2.5×2.0	2.0~8.0	0.2~1.0

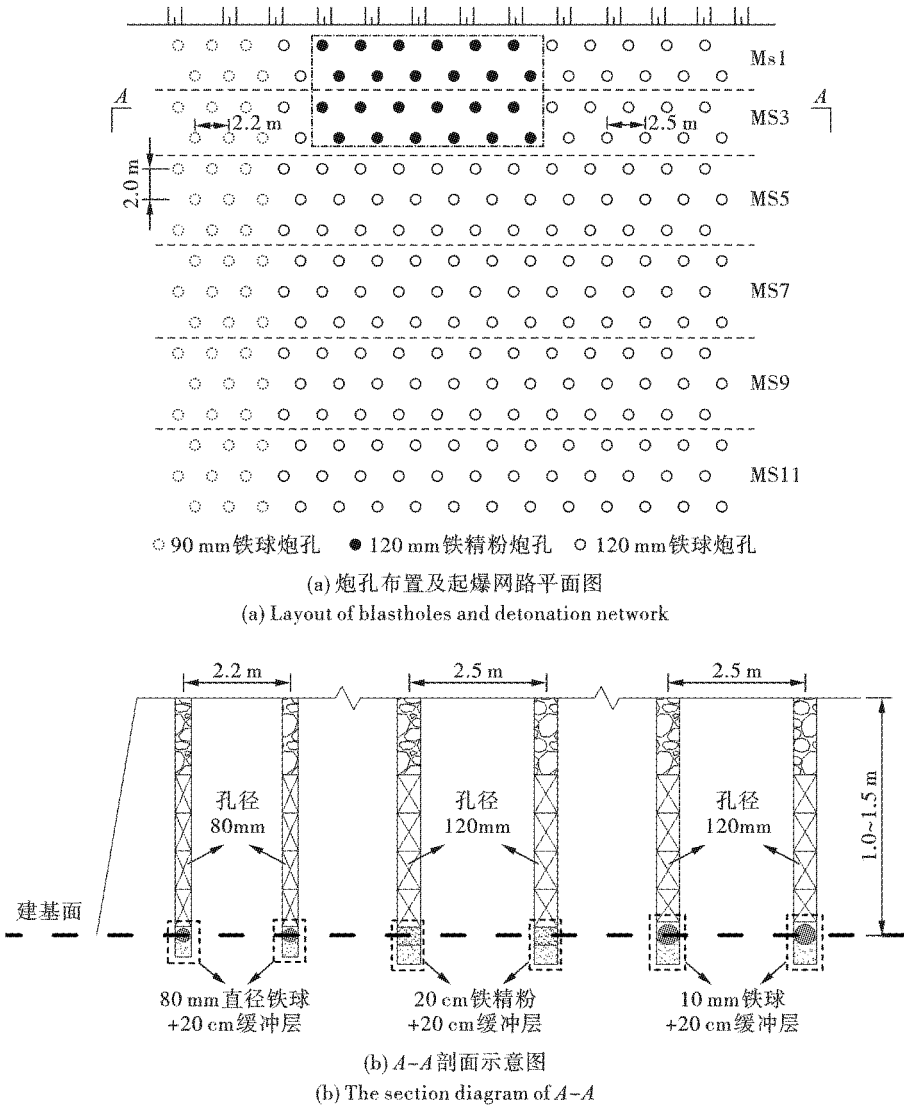


图 3 试验区爆破方案示意图
Fig. 3 Schematic diagram of blasting scheme in experiment area

(2) 试验结果
在试验结束后,将孔深范围分布相近的铁精粉爆区底板和与其相接的铁球爆区底板表面浮渣清理干净(孔深主要分布在 1.0~1.5 m),得到铁精粉爆

区和铁球爆区的底板开挖效果如图 4 所示。由图 4 可知,铁精粉爆区底板起伏不平、起伏差较大,而铁

球爆区底板则较为平整、起伏差较小。

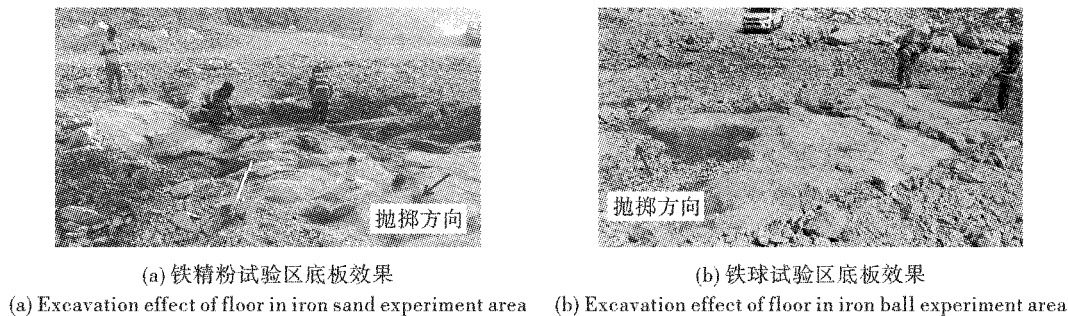


图 4 试验区底板开挖效果示意图

Fig. 4 Schematic diagram of floor excavation effect in the experiment area

爆堆清理干净后,采用 RTK 测量爆后试验区底板的高程,每隔 40 ~ 50 cm 布置一个测点,起伏差较大处加密测量。根据测量数据,利用 CIVIL-3D 建模软件,建立爆破试验区底板平整度三维模型,图 5 为根据测量的坐标所得到的试验区底板三维图。图 6 为以 300.0 m 的设计高程为基线,由图 5 所得到的试验区底板典型剖面图。

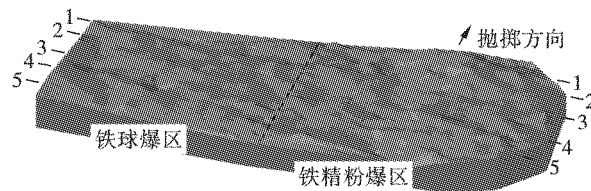
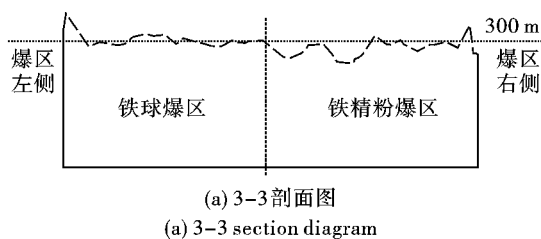
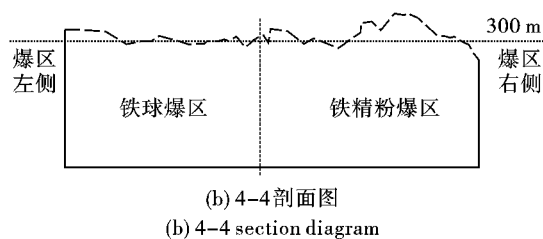


图 5 试验区底板三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of floor in experiment area



(a) 3-3剖面图
(a) 3-3 section diagram



(b) 4-4剖面图
(b) 4-4 section diagram

图 6 典型试验区底板剖面图

Fig. 6 Typical section diagram of floor in the experiment area

根据 RTK 测量的底板监测点高程数据,分别统计了铁精粉爆区和铁球爆区底板对应的超欠挖数据,见表 2。

表 2 试验区底板超欠挖实测数据
Table 2 Measured data of over-under break of floor in the experiment area

底板区域	超挖/cm		欠挖/cm	
	最大值	平均值	最大值	平均值
铁精粉爆区	38.0	9.5	28.0	7.3
铁球爆区	37.0	6.3	29.0	8.4

由图 5 ~ 图 6、表 2 可知,铁精粉爆区底板较铁球爆区底板超挖严重,而铁球爆区由于其左侧为溢洪道引渠段边墙,该区域受夹制作用导致底板欠挖较大,铁球爆区底板其它部位欠挖则明显小于铁精粉爆区。铁精粉爆区底板平整度较差、起伏差明显,

较大面积底板岩体沿缓倾结构面剥离形成若干浅坑;铁球底板则整体较为平整,仅局部存在较小面积沿缓倾结构面形成的浅坑。

试验区底板清理完成后,在两块试验区各找到 4 处残孔,如图 7 所示,各区残孔破坏形态存在明显差异:铁球试验区残孔存在明显的破碎带及拉裂带(如图 8),残孔深度 10 ~ 20 cm,残孔集中出现在第一排靠近边坡处;而铁精粉试验区残孔孔壁基本保留,未出现扩孔及破碎区(如图 9),残孔深度 10 ~ 20 cm,残孔底部基本保持原状,说明与铁球方案相比,铁精粉方案对底部岩体有很好的保护作用。

3.2 一级消力池保护层开挖推广应用效果

通过在溢洪道引渠段开展不同消能-聚能结构的对比试验,结合试验效果,分别从孔底保护效果、试验区底板超欠控制效果以及现场施工便捷性对“铁球 + 松砂垫层”和“铁精粉 + 松砂垫层”两种开

挖方案进行了对比,对比情况见表 3。



图 7 试验区残孔位置分布图
Fig. 7 Location distribution of the residual boreholes in the experiment area

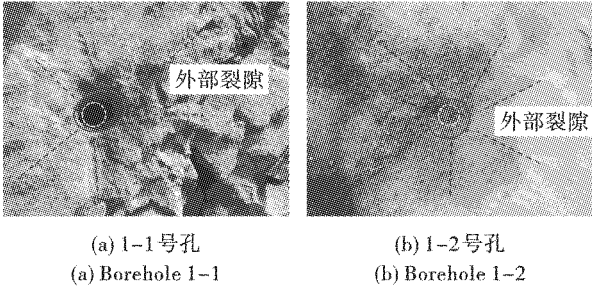


图 8 铁球试验区残孔破坏记录图
Fig. 8 Damage record of the residual boreholes in the iron ball experiment area

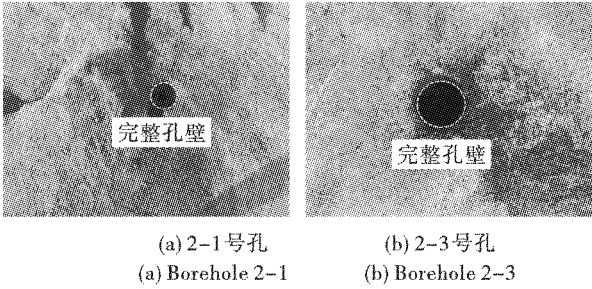


图 9 铁精粉试验区残孔破坏记录图
Fig. 9 Damage record of the residual boreholes in the iron sand experiment area

表 3 不同消能-聚能结构对比统计表
Table 3 Comparison of different energy dissipation-accumulation structures

对比指标	孔底保护效果	超欠挖控制效果	现场施工便捷性
对比情况	铁精粉方案略优于铁球方案	铁球方案控制效果更佳	铁球方案施工效率更高

根据表 3 中的对比情况,现场优选采用“铁球+松砂垫层”消能-聚能结构的保护层开挖方案,并确定了相应的消能-聚能联合控制爆破参数(保护层厚度 2~5 m,炮孔直径 120 mm,铁球直径 100 mm,

间排距 2.5 m×2.0 m)。依据此开挖方案及参数,在一级消力池保护层开挖中对消能-聚能联合控制爆破技术进行了推广应用。完成一级消力池保护层爆破开挖后,对表面的浮渣进行了清理,得到底板开挖成型宏观效果如图 10 所示。

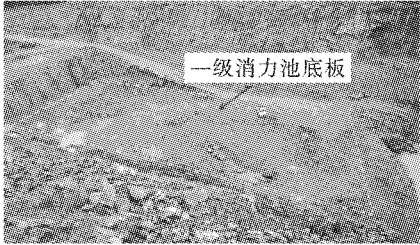


图 10 一级消力池爆后底板开挖成型情况
Fig. 10 Excavation shaping diagram of floor after blasting of the first stilling basin

由图 10 可知,一级消力池底板整体上较为平整,起伏差较小,局部区域出现了残留凸起岩埂和浅坑,超欠挖较大的局域主要是由于节理面的存在引起的。总体而言,底板基本达到了预期要求,开挖效果良好,排除不良地质因素、超挖区域可控,欠挖部分后期可采用液压破碎锤凿除。

现场清渣完毕后,采用 RTK 测量了底板的高程,图 11 为根据 RTK 测量的高程坐标所得到的开挖效果图。图 12 为以 282.0 m 高程为基线,由图 11 所得到的底板剖面图。

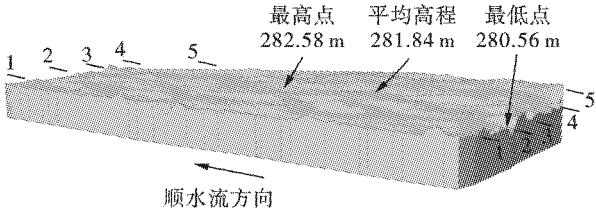


图 11 底板开挖效果图
Fig. 11 Excavation effect diagram of floor

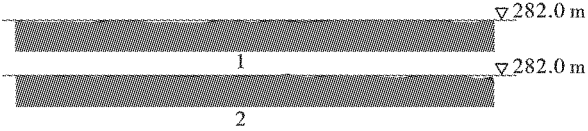


图 12 典型底板剖面图
Fig. 12 Typical section diagram of floor in the experiment area

根据现场 RTK 所测底板高程数据,将底板超欠挖结果统计如表 4。

由图 11~图 12、表 4 可知,一级消力池底板整体呈现为超挖状态,超挖深度主要分布在 0~30 cm 之间,超挖面积占比较大(约为 60%),平均超挖深

度为 24 cm;欠挖深度主要分布在 +30 cm ~ 0 之间,欠挖面积占比较小(约为 20%),平均欠挖深度约为 11.0 cm。南公 1 水电站招标文件中明确了建基面的超欠挖控制要求为:对于微风化、弱风化下部坚硬的岩体,建筑物以外的基础:超挖 ≤ 30 cm,欠挖 ≤ 30 cm;建筑物范围内的基础:超挖 ≤ 20 cm,欠挖 $\leq$

10 cm。以此作为评价标准可知,一级消力池底板超欠挖深度主要分布在 +30 ~ -30 cm 以内(占比 79.33%),底板高程基本控制在设计高程 EL.282.0 m 附近,说明底板开挖成型效果良好,满足设计要求。

表 4 一级消力池底板超欠挖各范围占比及均值统计

Table 4 Proportion and mean value of over-under break range of the first stilling basin floor

欠挖统计			超挖统计				平均深度
欠挖	欠挖	平均深度	超挖	超挖	超挖	超挖	
60 ~ 30 cm	30 ~ 0 cm		0 ~ 30 cm	30 ~ 60 cm	60 ~ 100 cm	100 cm 以上	
0.66%	20.77%	11cm	58.86%	17.60%	4.28%	0.06%	24 cm

为研究球形消能-聚能结构对孔底损伤的控制效果,结合溢洪道的生产性爆破,现场开展了有无消能-聚能结构的对比试验,对比试验结果表明:常规装药区孔底损伤深度为 1.46 m,铁球消能-聚能结构试验区孔底损伤深度为 1.28 m,由此可见,采用消能-聚能联合控制爆破技术可以控制爆破作用对基础的损伤破坏深度,使损伤深度减小近 15%。同时,在爆区清渣完成后对一级消力池底部岩体也进行了超声波损伤检测,监测结果显示:基础岩体的平均损伤深度为 1.3 m,基础岩体未见明显的拉裂和损伤破坏现象,说明一级消力池基础岩体损伤控制效果良好。

4 结论

基于南公 1 水电站溢洪道引渠段消能-聚能联合控制爆破试验,研究了不同消能-聚能结构对开挖效果的影响,并对孔底消能-聚能结构进行了优选,得到的结论如下:

(1)铁球可以向侧向反射应力波,有利于增强相邻炮孔间的岩体破碎,相比于“铁精粉+松砂垫层”的消能-聚能结构,“铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构能够获得更加平整的基础面。

(2)铁精粉为散粒体结构,在爆炸应力波作用下可以进一步地缓冲变形,相比于“铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构,“铁精粉+松砂垫层”的消能-聚能结构能够更有效地消耗传递到孔底的爆炸能量,更好地保护孔底岩体。

(3)综合不同对比指标,现场优选“铁球+松砂垫层”的消能-聚能结构,并在一级消力池的保护层开挖中推广应用了消能-聚能联合控制爆破技术,取得了良好的开挖成型和损伤控制效果。

参考文献 (References)

[1] HU Ying-guo, LU Wen-bo, WU Xin-xia, et al. Numerical and experimental investigation of blasting damage control of a high rock slope in a deep valley[J]. Engineering Geology, 2018, 237: 12-20.

[2] 杨建华, 吴泽南, 姚池, 等. 地下洞室爆破开挖诱发围岩损伤特性及 PPV 阈值研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 136-144.

[2] YANG Jian-hua, WU Zhe-nan, YAO Chi, et al. Characteristics and PPV thresholds of rock damages under underground blasting excavation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(02): 136-144. (in Chinese)

[3] 李允忠, 王志亮, 黄佑鹏, 等. 循环爆破载荷下岩石累积损伤效应研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 47-53.

[3] LI Yun-zhong, WANG Zhi-liang, HUANG You-peng, et al. Numerical study of cumulative damage effect of rock under cyclic blast loading[J]. Blasting, 2019, 36(2): 47-53. (in Chinese)

[4] 夏文俊, 卢文波, 陈明, 等. 白鹤滩坝址柱状节理玄武岩爆破损伤质点峰值振速安全阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(S1): 2997-3007.

[4] XIA Wen-jun, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Study on safety threshold of peak particle velocity about blasting damage of columnar jointed basalt rock mass in Baihetan Dam site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019(S1): 2997-3007. (in Chinese)

[5] 张正宇, 张文焯, 吴新霞, 等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[6] ZHANG Yu-zhu, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Dam foundation excavation techniques in China: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(6): 460-467.

[7] 张正宇, 张文焯. 水电站坝基开挖爆破技术[J]. 爆破, 1991(3): 42-48.

[7] ZHANG Zheng-yu, ZHANG Wen-xuan. Blasting technolo-

- gy for dam foundation excavation of hydropower station [J]. Blasting, 1991(3):42-48. (in Chinese)
- [8] 李 科. 预裂爆破技术在苏布雷水电站特殊部位的应用[J]. 四川水力发电, 2019, 38(3):55-57.
- [8] LI Ke. Application of presplit blasting technology in special parts of Soubre Hydropower Station[J]. Sichuan Water Power, 2019, 38(3):55-57. (in Chinese)
- [9] 赵纯迪. 手风钻水平光面爆破在三峡永久船闸建基面保护层开挖中的应用[J]. 水力发电, 2003(5):59-60.
- [9] ZHAO Chun-di. Application of the horizontal smooth blasting of pneumatic drill to the excavation of protective layer of foundation surface of Permanent Ship Lock in Three Gorges Project [J]. Water Power, 2003(5):59-60. (in Chinese)
- [10] 吴新霞, 赵 根, 张正宇, 等. 复合垫层理论研究及计算机优化设计[J]. 爆破器材, 2000(4):8-11.
- [10] WU Xin-xia, ZHAO Gen, ZHANG Zheng-yu, et al. A study of the theory of duplicate cushion and its optimized design by computer [J]. Explosive Materials, 2000(4):8-11. (in Chinese)
- [11] 宗 琦. 岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究[J]. 岩土工程学报, 1998(1):30-33.
- [11] ZHONG Qi. Investigations into mechanism of crack formation for grooved hole-well blasting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(1):30-33. (in Chinese)
- [12] 秦健飞, 秦如霞, 李必红. 双聚能槽药柱的研究与应用[J]. 工程爆破, 2009, 15(3):70-74.
- [12] QIN Jian-fei, QIN Ru-shuang, LI Bi-hong. Study and application of elliptical bipolar linear shaped charge [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3):70-74. (in Chinese)
- [13] 赵 根, 文德钧, 张正宇, 等. 环向聚能药包研制及其在建基面开挖中的应用[J]. 爆破, 2001(2):8-12.
- [13] ZHAO Gen, WEN De-jun, ZHANG Zheng-yu, et al. Preparation of the annular cumulative charge and its application in foundation excavation blasting [J]. Blasting, 2001(2):8-12. (in Chinese)
- [14] LIU Guang-xin, LU Wen-bo, NIU Xin-qiang, et al. Excavation shaping and damage control technique for the breccia lava dam foundation at the Bai-he-tan Hydropower Station: A case study [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(4):1889-1907.
- [15] HU Hao-ran, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. A new horizontal rock dam foundation blasting technique with a shock-reflection device arranged at the bottom of vertical borehole [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(4):481-499.
- [16] 卢文波, 胡浩然, 严 鹏, 等. 垂直孔复合消能爆破技术及其在建基面开挖中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1):3143-3152.
- [16] LU Wen-bo, HU Hao-ran, YAN Peng, et al. Vertical borehole shock-reflection blasting technique and its application in foundation excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018(S1):3143-3152. (in Chinese)
- [17] 岳志坤, 李瑞泽, 李福千, 等. 爆破方法对岩石爆破块度分布影响的试验研究[J]. 爆破, 2019, 36(3):9-15.
- [17] YUE Zhi-kun, LI Rui-zhe, LI Fu-qian, et al. Experimental study on influence of excavation method on rock blasting fragmentation distribution [J]. Blasting, 2019, 36(3):9-15. (in Chinese)
- [18] 王林桂, 孙鹏昌, 沙 广, 等. 基于孔内起爆位置调整的台阶爆破根底控制方法探讨[J]. 水电与新能源, 2019, 33(2):5-8.
- [18] WANG Lin-gui, SUN Peng-chang, SHA Guang, et al. On the control of toe rocks in bench blasting based on detonator position adjustment in blast holes [J]. Blasting, 2019, 33(2):5-8. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

新书介绍《爆破安全工程》

《爆破安全工程》以爆破工程知识体系为主线,将爆破安全知识融入和贯穿到各章节知识点中。主要内容包括:爆炸基本理论、工业炸药、起爆器材与起爆方法、岩石爆破理论、矿山与地下工程爆破技术及安全、爆破危害与安全预防、爆破安全管理等。

该书可作为高等院校安全工程、采矿工程、土木工程等专业爆破安全课程教材,也可作为煤矿类、非煤矿山类以及爆破企业相关技术人员的培训教材,同时可供相关专业的科研与设计人员参考。

同时,配套开发了与教材内容相应的虚拟仿真实验平台——《巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验》,实验内容包括:电雷管参数测定、导爆管爆速测定、巷道掘进爆破施工设计与网路设计连接、爆破危害监测等,可为相关高校和科研院所提供资源共享。

《爆破安全工程》由张飞燕编著,冶金工业出版社出版发行,定价39元,有需要的读者可扫二维码在冶金书店购买。

