

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.006

老挝南公1水电站非衬砌溢洪道岩体爆破开挖技术*

吴世然¹, 刘广鑫², 陈育权³, 卢文波², 张珂¹, 陈明²

(1. 中国电建集团 中国水利水电第三工程局有限公司, 西安 710024;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

3. 中国水利电力对外有限公司, 北京 100120)

摘要: 溢洪道的开挖成型质量对后期工程的运行安全有着重要影响, 基于老挝南公1水电站非衬砌溢洪道岩体开挖, 针对溢洪道开挖中的四个关键部位, 提出并采用了不同的爆破开挖技术, 取得了良好的开挖效果并积累了丰富的工程经验。现场开挖结果表明: 深孔预裂爆破技术能够很好地解决溢洪道高边坡的轮廓开挖成型控制难题, 爆后轮廓面清晰可见、开挖成型质量优良, 且半孔率和最大起伏差均满足设计要求; 消能-聚能联合控制爆破技术在消力池底板开挖中得到成功应用, 获得良好开挖成型效果的同时, 大大加快了施工进度; 对于消力池尾坎这种特殊部位的岩体开挖, 上下游面采用深孔预裂一次开挖成型、顶部水平面采用水平预裂+垂直孔的轮廓开挖技术, 能够很好地解决尾坎的开挖成型控制难题; 对于类似闸室跌坎段这样具有开挖成型质量要求的小台阶爆破区域, 大孔径小梯段的爆破技术并不是很适宜, 应优先采用小孔径小梯段的控制爆破技术。

关键词: 溢洪道; 爆破开挖; 关键部位; 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(2021)03-0031-07

Rock Blasting Excavation Technology for Unlined Spillway of Namkong 1 Hydropower Station in Laos

WU Shi-ran¹, LIU Guang-xin², CHEN Yu-quan³, LU Wen-bo², ZHANG Ke¹, CHEN Ming²

(1. Powerchina Sinohydro Bureau 3 Co., Ltd., Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China International Water &

Electric Corp., Beijing 100120, China)

Abstract: The quality of spillway excavation has an important influence on the safety of the later project operation. Based on the rock mass excavation of an unlined spillway of Namkong 1 Hydropower Station in Laos, different blasting excavation techniques were proposed and adopted for four key parts. The field excavation results show that the deep hole pre-splitting blasting technique can well solve the problem of excavation shaping control of spillway high slope. The profile is clearly visible after blast with the half hole ratio and the maximum fluctuation meeting the design requirements. In addition, the energy dissipation-accumulation control blasting technique has been successfully applied in the stilling basin floor excavation, which has achieved good excavation shaping effect and greatly accelerated the construction progress. For the excavation of the special part of the tail of the stilling basin, the deep-hole pre-splitting one-time excavation shaping technique is adopted for the upstream and downstream surface, while the horizontal pre-splitting and vertical hole contour excavation technique is adopted for the top horizontal surface, which can solve the excavation shaping control problem of shaping of the tail sill. For the small bench blasting area with the requirements of excavation quality, such as the drop sill section of gate chamber, the blasting technique of small diameter and small bench is preferred than that of large diameter and small bench.

Key words: spillway; blasting excavation; key parts; excavation shaping effect

在过去的三十年内,我国及世界范围内的坝工技术得到了快速发展,其中,面板堆石坝由于具有经济实惠的独特优势,这种坝型也得到了广泛的应用^[1,2]。为了宣泄洪水,常常需要在堆石坝坝体的两岸开挖一条岸边溢洪道,作为坝体泄洪通道,溢洪道对坝体运行安全有着举足轻重的作用。岸边溢洪道的主要特点是露天,同时一般结构都较为复杂,存在岩体开挖量巨大且开挖成型质量控制困难等特点。

钻孔爆破作为一种经济高效的破岩方式,已经被广泛地应用到溢洪道开挖中^[3,4]。然而,在完成爆破破岩的同时,会对保留岩体造成破坏、产生爆破振动、爆破损伤等负面影响^[5-7],并且局部会有超欠挖存在,难以获得平整的轮廓面,存在开挖成型控制的难题,因此开挖成型控制和爆破损伤控制也一直是研究的热点问题。

溢洪道的岩体开挖主要包括了岩石边坡和水平基础的开挖,轮廓成型的关键控制部位为:岩石高边坡、消力池岩石基础,尾坎和闸室段跌坎等。对于岩石边坡,为了保证边坡轮廓的开挖成型质量和最小地减少爆破损伤,诸如预裂爆破和光面爆破的轮廓爆破技术应用较为广泛^[8,9];对于水平基础,通常采用预留保护层的开挖技术,通过三十年的工程实践,目前已经积累了一系列的保护层开挖技术^[10],同时近年来也有专家学者提出了新型的保护层开挖技术^[11,12]。

结合老挝南公1水电站溢洪道开挖,对岩石高边坡、消力池岩石基础,尾坎和闸室段跌坎等关键部位的轮廓成型开挖技术进行了详细地总结,介绍了具体的爆破方案和钻爆参数,并给出了详细的开挖效果,为其他类似工程的岩体开挖提供了良好的借鉴。

1 工程背景

南公1水电站位处老挝、越南、柬埔寨三个国家交界区域的南公河上,是我国建设“一带一路”的示范工程,也是打造“东南亚蓄电池”的骨干工程。工程由首都枢纽和引水发电系统组成,其中首都枢纽主要包括

面板堆石坝,左岸溢洪道和右岸电站进水口等。南公1水电站溢洪道位于坝体左岸,其枢纽布置如图1所示。溢洪道的总体土石方开挖量达260万 m^3 ,开挖高程分布为:EL. 325 ~ EL. 244 m(其中引渠段:EL. 325 ~ EL. 300 m;闸室段:EL. 325 ~ EL. 276 m;泄槽段:EL. 325 ~ EL. 244 m),开挖高差较大。同时溢洪道的设计泄洪流量为8000 m^3/s ,采用无混凝土衬砌的结构形式,后期泄洪运行时需要承担巨大的动水压力,对开挖成型质量的控制也不言而喻。同时,在满足开挖成型质量控制要求的前提下,又需要实现溢洪道的快速高效开挖,由此可见南公1水电站溢洪道施工具有开挖强度大,工期任务紧等特点。综上所述,溢洪道开挖成型已成为制约南公1水电站建设的关键技术难题。



图1 南公1水电站首部枢纽及溢洪道布置图
Fig. 1 Layout of head hydroproject and spillway of Namkong 1 Hydropower Station

2 关键部位岩体爆破开挖技术

2.1 边坡轮廓成型控制爆破技术

溢洪道边坡总体的开挖方案为:自上而下、分台阶开挖。考虑到施工工期的紧张性,在边坡轮廓开挖时,采用了一次预裂成型的爆破技术,其中以引渠段的边坡开挖高差最大,下面以引渠段边坡开挖成型为例,介绍南公1水电站溢洪道边坡轮廓成型爆破技术。引渠段边坡的最大开挖高度为25 m,预裂孔钻孔深度达28 m,其典型开挖方案见图2。

如图2所示,引渠段的设计开挖坡比为1:0.5,自上而下、共分成三次台阶爆破,其中预裂孔钻孔深度为28 m,采用一次预裂到底的深孔预裂爆破技术。在第一次台阶爆破中预裂孔和主爆孔、缓冲孔一次起爆,起爆顺序依次为:预裂孔→主爆孔→缓冲孔;第二次及第三次台阶爆破均是在上一台阶开挖完成后进行,仅起爆主爆孔和缓冲孔。炸药采用2#

收稿日期:2021-04-09

作者简介:吴世然(1966-),男,陕西平利人,高级工程师,从事水利水电工程项目管理工作,(E-mail)932884087@qq.com。

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);中国博士后科学基金项目(2020M672311、2020T130569)

岩石乳化炸药,其中预裂孔采用底部 $\phi 65 \text{ mm}$ 药卷加强, $\phi 32 \text{ mm}$ 药卷间隔装药,堵塞 1.5 m;缓冲孔采用 $\phi 65 \text{ mm}$ 药卷连续装药,堵塞 2.0 m;主爆孔采

用 $\phi 90 \text{ mm}$ 药卷连续装药。炮孔典型装药结构如图 3,主要钻爆参数如表 1。

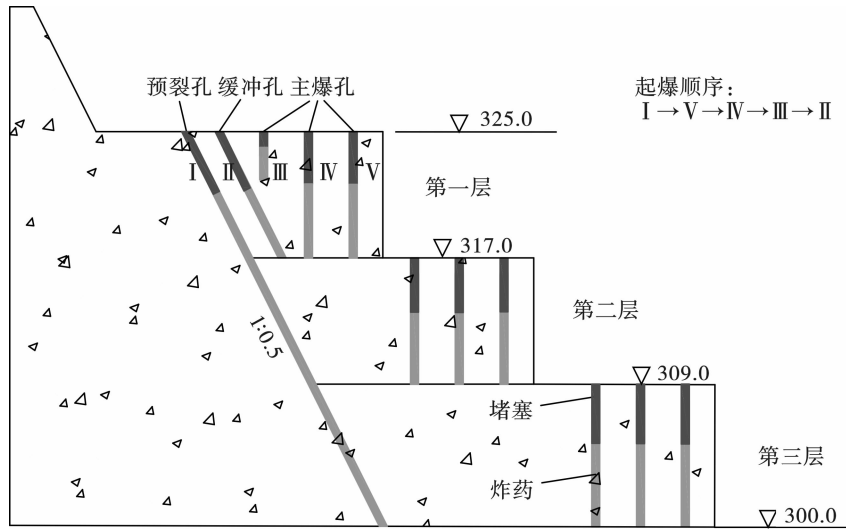


图 2 引渠段边坡典型开挖方案示意图(单位:m)

Fig. 2 Typical excavation scheme of approach channel slope(unit:m)

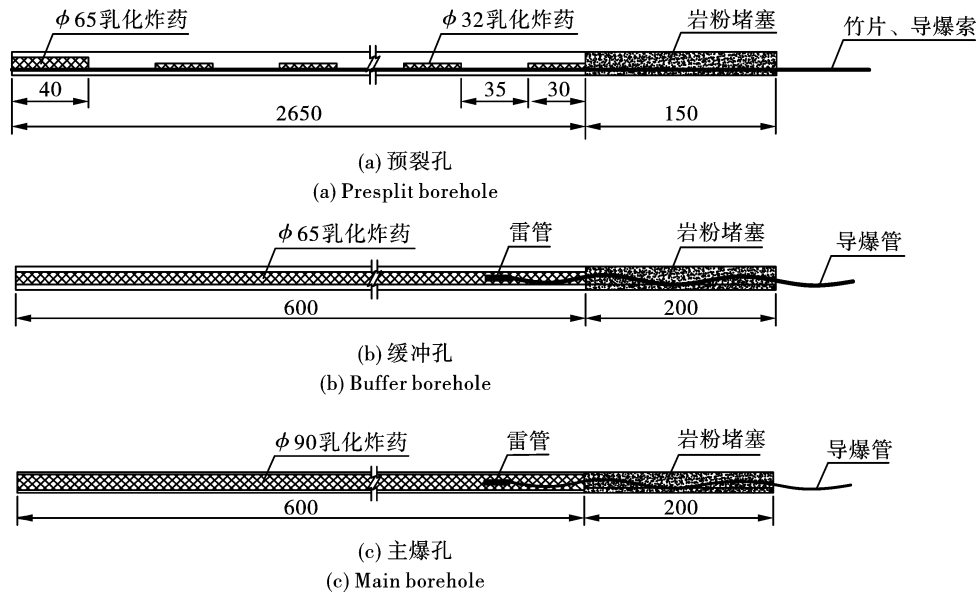


图 3 炮孔典型装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 3 Schematic diagram of typical charge structure of borehole(unit:cm)

表 1 引渠段边坡轮廓爆破钻爆参数统计表

Table 1 Statistics of drilling and blasting parameters of slope contour blasting in approach channel section

炮孔	孔径 d/mm	孔深 L/m	药卷直径 d_e/mm	不耦合系数	孔距 a/m	堵塞长度 L_2/m	线装药密度 $\Delta_{\text{线}}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-1})$
预裂孔	120	28.0	32/65	3.75	1.0	1.5	360
缓冲孔	120	9.0 ~ 10.0	65	1.85	2.5	2.0	/
主爆孔	120	4.0 ~ 8.0	90	1.33	2.5	2.0	/

爆破清渣完成后,利用人工对预裂面进行了清理,得到引渠段边坡的轮廓开挖效果如图 4。

如图 4 可知,引渠段边坡预裂面清晰可见,开挖成型质量优良,另外爆后对预裂面进行了检查和测

量,残孔率达 100%,半孔率高达 90%,最大起伏差仅为 10 cm,由此可见深孔预裂爆破技术成功地解决了引渠段边坡开挖成型控制难题。另外,一次预裂成型的深孔预裂爆破技术在消力池边坡轮廓开挖中也取得了良好的开挖成型效果,现场的开挖效果如图 5。



图 4 引渠段边坡深孔预裂爆破效果图
Fig. 4 Excavation effect of deep-hole presplit blasting on approach channel slope

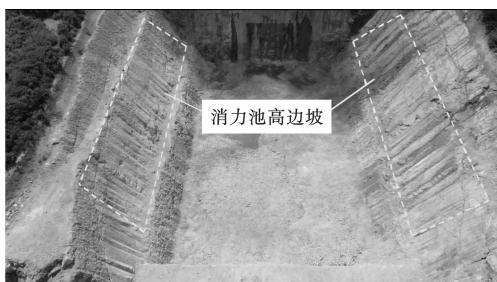


图 5 消力池边坡深孔预裂爆破效果图
Fig. 5 Excavation effect of deep-hole presplit blasting on stilling basin slope

2.2 消力池岩体快速开挖成型控制技术

溢洪道消力池的总体开挖方案为:自上而下,分区域开挖。在临近建基面时,采用预留保护层的开挖方式,保护层的厚度一般为 2 ~ 6 m,保护层上部岩体采用常规的梯段爆破技术(10 m 一个梯段),保护层开挖则需要采用特殊的控制爆破技术、以减少对基础岩体的扰动与破坏。消力池的具体开挖过程如图 6。

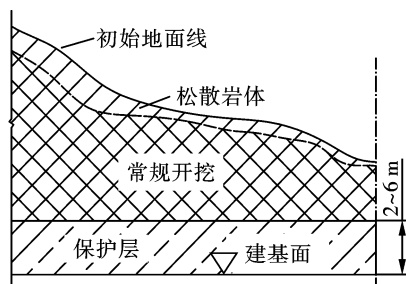


图 6 消力池开挖过程示意图(单位:cm)
Fig. 6 Schematic diagram of stilling basin excavation process(unit:cm)

如图 6 所示,制约消力池岩体快速开挖成型的关键环节为保护层的开挖,传统的保护层开挖技术已经不能满足溢洪道的快速高效施工需求。近年来,武汉大学卢文波教授团队提出的消能-聚能联合控制爆破技术由于具有施工速度快、开挖质量可控等优势,在众多工程岩石基础开挖成型中得到了推广应用,解决了众多开挖难题的同时取得了良好的开挖效果。南公 1 水电站在进行溢洪道消力池保护层开挖时,引进了此技术,并结合溢洪道的现场生产性爆破,开展了一系列科研试验,并对消能-聚能结构进行了优选^[13],得到了适用于南公 1 水电站溢洪道保护层开挖的钻爆参数,具体参数与开挖方案见图 7 和表 2,消能-聚能爆破炮孔装药结构如图 8。

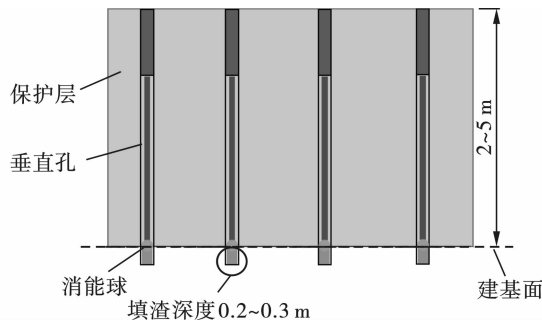


图 7 消力池保护层开挖方案示意图
Fig. 7 Schematic diagram of protection layer excavation scheme for stilling basin

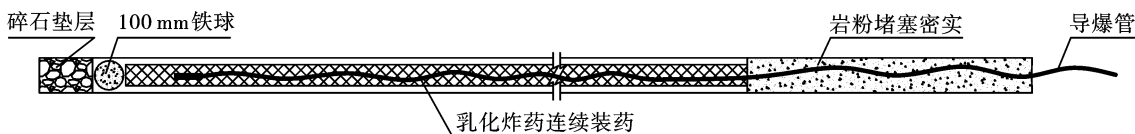


图 8 消能-聚能爆破装药结构示意图
Fig. 8 Schematic diagram of charge structure of energy dissipation-accumulation boreholes

在保护层开挖完成后,现场对消力池底板进行了清渣处理,得到了底板开挖效果如图 9,利用 RTK 进行了平整度测量,结果显示,底板的超欠挖主要控

制在 ±30 cm 范围内,无明显的爆坑和凸起,满足设计要求,开挖成型效果良好。

表 2 溢洪道保护层消能-聚能联合控制爆破钻爆参数
Table 2 Drilling and blasting parameters of spillway protective layer energy dissipation-accumulation control blasting

消能-聚能结构	消能球直径/mm	炮孔直径/mm	保护层厚度/m	间排距/m × m	碎石垫层/m
铁球	100	120	2.0 ~ 5.0	2.5 × 2.0	0.2 ~ 0.3

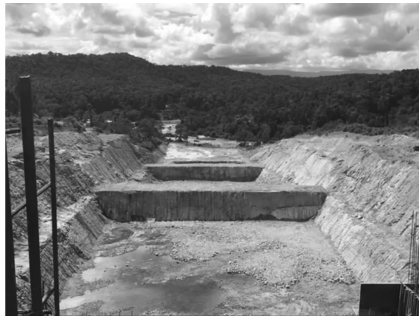


图 9 溢洪道消力池开挖效果示意图
Fig. 9 Schematic diagram of spillway stilling basin excavation effect

2.3 尾坎岩体开挖成型控制技术

消力池的尾坎作为辅助消能结构可以有效解决底流水跃消能不充分的问题,同时能够避免因消能不充分带来的严重冲刷、磨蚀破坏问题。南公 1 水电站的溢洪道消力池采用无衬砌的结构形式,其设计流量达 8000 m³/s,尾坎的最大开挖高差为 28 m,预裂孔的钻孔深度达 31.3 m,开挖成型难度大,同时超挖会带来额外的混凝土浇筑成本,开挖成型质量不言而喻。

南公 1 水电站溢洪道消力池在尾坎开挖时,为做到精细控制,专门成立了 QC 小组进行攻关,加强了对钻孔爆破过程的监控与指导。其中,尾坎的上下游面均采用深孔预裂一次开挖成型的爆破技术,顶部水平面采用水平预裂 + 垂直孔的轮廓开挖技术,下面以一级消力池的尾坎开挖为例来概括说明具体的开挖成型控制技术,尾坎的开挖方案示意图如图 10。

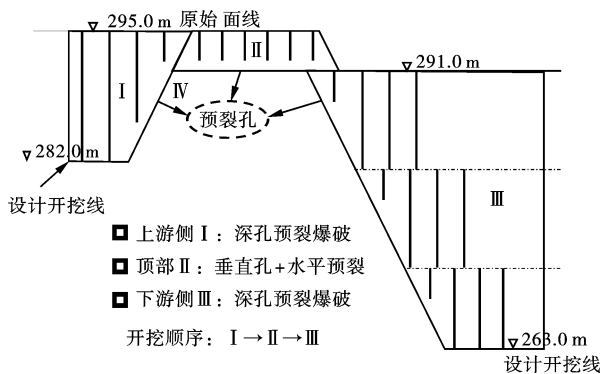


图 10 溢洪道一级消力池尾坎开挖方案示意图
Fig. 10 Schematic diagram of tailsill excavation scheme of spillway primary stilling basin

由图 10 可知,尾坎上游侧 I 和顶部区域 II 均采用一次预裂爆破完成,下游区域 III 则是先进行预裂爆破,然后分三个台阶来完成常规岩体的开挖,其开挖顺序为: I → II → III。三个区域轮廓开挖时预裂孔的钻爆参数及装药结构与引渠段边坡深孔预裂边坡的参数相同,在此不做赘述。

现场开挖结束后,对尾坎的上下游面和顶面进行了清渣处理,得到了尾坎的轮廓开挖效果如图 11。

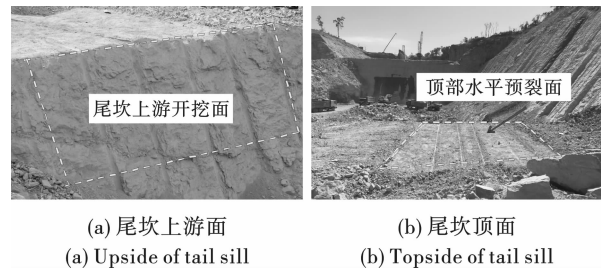


图 11 消力池尾坎轮廓开挖效果

Fig. 11 Excavation effect of stilling basin tail sill contour

由图 11 可知,一级消力池尾坎的轮廓面清晰可见,开挖成型质量优良,同时爆后对轮廓面进行了检测,半孔率高达 90%,最大起伏差仅为 15 cm,由此可见:所提出的尾坎开挖成型控制技术确保了溢洪道尾坎开挖质量,加快了施工进度,成功地解决了消力池尾坎的开挖难题。

2.4 闸室跌坎岩体开挖成型控制技术

溢洪道闸室段跌坎作为开挖基础面,后期要浇筑混凝土,与混凝土形成有机整体,共同受力抵挡泄洪动水压力,因此,其开挖成型质量直接影响了混凝土的浇筑与后期的运行稳定,重要性不言而喻。南公 1 水电站在闸室跌坎开挖时,上游轮廓面采用了大孔径小梯段预裂爆破技术,底部平台的开挖则是采用消能-聚能联合控制爆破技术,取消了之前采用预留 0.5 m 保护层的开挖方案(保护层后期采用小孔径手风钻钻孔爆除),大大提升了施工效率。下面以第三级跌坎开挖为例,阐述说明闸室段跌坎具体的开挖成型控制技术,其开挖方案示意图如图 12。

由图 12 可知,本次轮廓爆破爆区共设置预裂孔、变深孔及主爆孔三种炮孔,预裂孔采用间隔装药结构,变深孔和主爆孔均采用连续装药结构(其中

在待开挖的第三级台阶处的三排主爆孔在孔底安放了消能-聚能结构)。试验区炮孔直径均为 120 mm, 其中:预裂孔的孔距为 1 m;变深孔的孔距为 2 m、与预裂孔的排距为 1.5 m;主爆孔的间排距为 2.4 m × 2.2 m。钻孔装药参数见下表 3,典型的装药结构见图 13。

爆破完成后,对闸室段跌坎处进行了清渣处理,得到了跌坎的整体开挖轮廓效果如图 14。

由图 14 可知,由于台阶宽度较小、同时局部区域由于节理裂隙等影响,溢洪道跌坎的设计开挖轮廓并未完全地开挖成型,整体的开挖成型效果一般。跌坎段的开挖实践表明:对于类似具有开挖成型质量要求的小台阶爆破区域,大孔径小梯段的爆破技

术并不是很适宜,取而代之的是应采用小孔径小梯段的控制爆破。

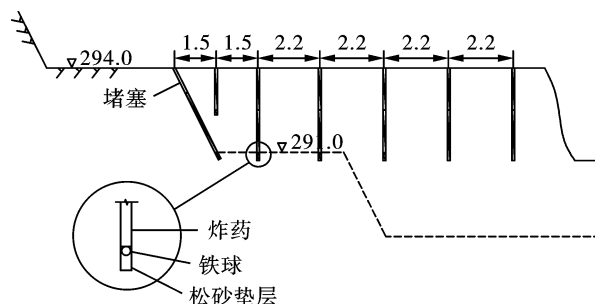


图 12 闸室段第三级跌坎开挖方案示意图(单位:m)
Fig. 12 Schematic diagram of excavation scheme for the third level drop sill of lock chamber section(unit:m)

表 3 闸室段跌坎开挖钻爆参数统计

Table 3 Statistics of drilling and blasting parameters of drop sill excavation in lock chamber section

钻孔类型	孔径/mm	孔深/m	药卷直径/mm	孔距/间排距/m	单孔药量/kg	堵塞长度/m
预裂孔	120	3.3~3.6	65/32	1	2.5~3.0	0.3~0.5
变深孔	120	1.5~2.5	90	2	1.5~3.0	1.2~1.5
主爆孔	120	1.2~3.6	90	2.4×2.2	3.0~12.0	0.8~1.5

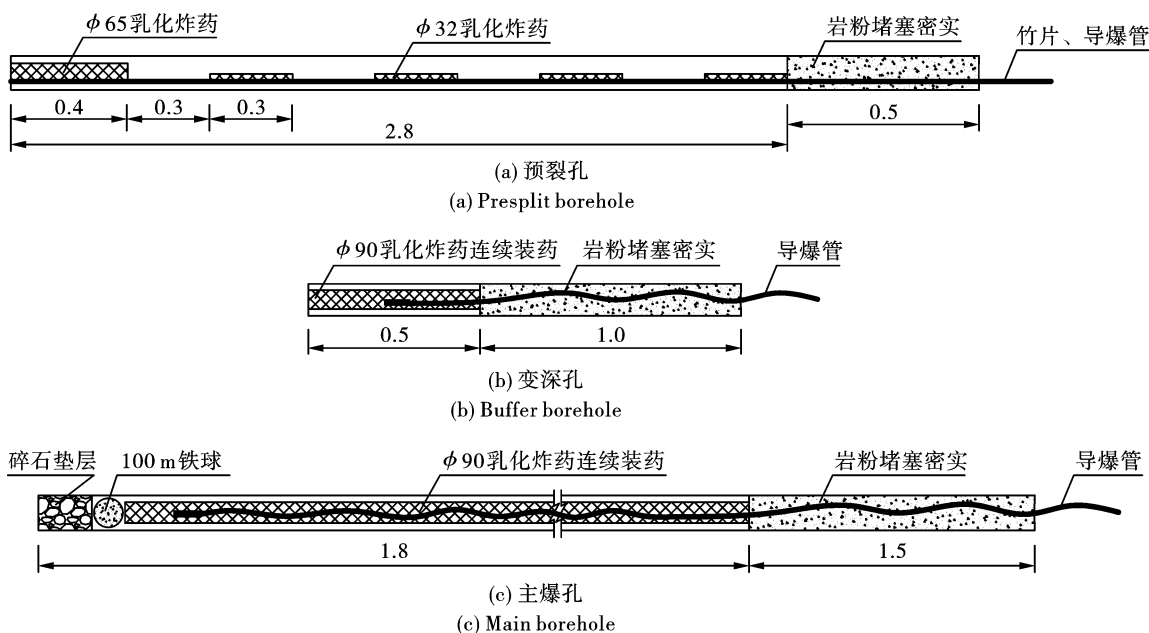


图 13 典型炮孔装药结构图(单位:m)

Fig. 13 Schematic diagram of typical borehole charge structure(unit:m)

3 结论与认识

在老挝南公 1 水电站溢洪道开挖过程中,针对不同的开挖部位采用了不同的开挖技术,经过精心的组织和现场实践,溢洪道获得了良好的开挖成型效果,在满足设计要求的前提下,又大大地加快了施工进度,经济社会效益显著,并得到了以下结论与认识:

(1)深孔预裂爆破技术在溢洪道高边坡和尾坎开挖中取得了良好的开挖成型效果,其中预裂孔半孔率达 90% 以上,痕迹均匀、平行,起伏差控制在 15 cm 以内,预裂面未受到爆破损伤破坏,满足设计要求。

(2)消能-聚能联合控制爆破技术在消力池底板保护层开挖中取得了良好的开挖成型效果,其中建基面整体超欠挖控制在 ± 30 cm 以内,无明显的爆

坑与凸起,满足设计要求。

(3) 闸室跌坎段的开挖实践表明,对于类似具有开挖成型质量要求的小台阶爆破区域,大孔径小梯段的爆破技术并不是很适宜,应优先采用小孔径小梯段的控制爆破技术。

(4) 本工程中溢洪道不同部位的开挖方案与钻爆参数可为今后同类工程的施工提供了很好的经验和借鉴。



图 14 溢洪道闸室段跌坎整体开挖效果图
Fig. 14 Overall excavation effect drawing of spillway sluice chamber section drop sill

参考文献 (References)

- [1] 钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1):104-111.
- [1] NIU Xin-qiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1):104-111. (in Chinese)
- [2] 马洪琪. 我国坝工技术的发展与创新[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6):1-10.
- [2] MA Hong-qi. Development and innovation of dam construction technology in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6):1-10. (in Chinese)
- [3] 倪军, 张进. 糯扎渡电站左岸溢洪道大面积底板保护层开挖控制[J]. 四川水力发电, 2010, 29(S1):57-60.
- [3] NI Jun, ZHANG Jin. Excavation control of large area floor protection layer of spillway on the left bank of Nuozhadu Hydropower Station [J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(S1):57-60. (in Chinese)
- [4] 耿鹏宇, 张滕飞, 易磊, 等. 溢洪道安山玢岩基面保护层一次爆破开挖技术[J]. 人民黄河, 2020, 42(8):150-153.
- [4] GENG Peng-yu, ZHANG Teng-fei, YI Lei, et al. Blasting excavation technology without protective layer on andesitic porphyrite foundation surface [J]. Yellow River, 2020, 42(8):150-153. (in Chinese)
- [5] 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, 38(S1):2997-3007.
- [5] 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)
- [6] 林博闻, 舒大强, 陈明, 等. 扩机工程基坑开挖爆破振动效应及控制措施研究[J]. 爆破, 2019, 36(4):56-61.
- [6] LIN Bo-wen, SHU Da-qiang, CHEN Ming, et al. Blasting vibration effect and vibration control measure of foundation pit excavation in installed capacity expansion project [J]. Blasting, 2019, 36(4):56-61. (in Chinese)
- [7] 胡英国, 吴新霞, 赵根, 等. 严寒条件下岩体开挖爆破振动安全控制特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11):2139-2146.
- [7] HU Ying-guo, WU Xin-xia, ZHAO Gen, et al. Investigation of safety control for rock blasting excavation under cold condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11):2139-2146. (in Chinese)
- [8] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. 不同开挖方式下岩石高边坡损伤演化过程比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6):1176-1184.
- [8] HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Comparison of damage evolution process of high rock slope excavated by different methods, 2013, 32(6):1174-1184. (in Chinese)
- [9] 闫永平, 程树清. 预裂爆破在顺层岩石高边坡施工中的应用[J]. 爆破, 2002, 19(2):25-27.
- [9] YAN Yong-ping, CHENG Shu-qing. Application of presplit blasting in implementation on consequent layer rock high-slope[J]. Blasting, 2002, 19(2):25-27. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, LU W, CHEN M, et al. Dam foundation excavation techniques in China: A review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(6):460-467.
- [11] 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.
- [11] 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, 37(S1):3143-3152. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 陈育权, 刘广鑫, 柯昌佳, 等. 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[J]. 爆破, 2020, 37(4):10-17.
- [13] CHEN Yu-quan, LIU Guang-xin, KE Chang-jia, et al. Study on optimization of energy dissipation-accumulation structure at bottom of borehole in protective layer excavation of Namkong 1 Hydropower Station [J]. Blasting, 2020, 37(4):10-17. (in Chinese)