

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.014

白鹤滩水电站尾水出口围堰拆除爆破设计与施工*

吴发名¹,段兴平¹,徐进鹏¹,杨招伟²,周涛³,彭正良³

1. 中国三峡建工(集团)有限公司,成都 610000;
2. 长江水利委员会长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010;
3. 中国水利水电第十四工程局有限公司,昆明 650041)

摘要: 白鹤滩水电站尾水出口围堰拆除爆破具有工期紧、任务重、岩石条件复杂、近距离靠近保护物、水流冲渣要求高等突出特点。针对施工中的重难点,采取“分期分区分层”爆破拆除方案,将单个围堰分为“两期三层八区”,通过预留经济围堰,提前拆除水上部分等措施,克服了工程量大、工期紧的难题;采用“大直径钻机造孔、孔内套管护孔”的方式,有效减少了复杂地质条件下塌孔的产生,提高了施工工效也确保了爆破效果;“高单耗、低单响”的药量设计、“孔间分段、孔内延时”的爆破网路设计,即能满足近距离爆破条件下质点振速安全控制要求,又确保了爆后渣料块度满足水流冲渣条件。工程应用结果表明,最不利工况下爆破诱发质点峰值振速为 11.85 cm/s,小于结构混凝土允许的安全控制标准 12 cm/s;实测水击波峰值压力为 0.12 MPa,小于水工钢闸门的安全允许控制值 0.4 MPa;爆后绝大部分渣料块度粒径控制在 40 cm 以内,大块率控制在 5% 以内,爆破效果良好,满足水流冲渣条件。

关键词: 围堰拆除;爆破设计;爆破施工;尾水出口;白鹤滩水电站

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)01-0100-08

Design and Construction of Demolition Blasting for Cofferdam at Tailrace Outlet of Baihetan Hydropower Station

WU Fa-ming¹, DUAN Xing-ping¹, XU Jin-peng¹, YANG Zhao-wei², ZHOU Tao³, PENG Zheng-liang³

1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610000, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
3. Powerchina Sinohydro Engineering Bureau 14 Co., Ltd., Kunming 650041, China)

Abstract: The demolition blasting of the tailrace outlet cofferdam of Baihetan hydropower station has obvious characteristics of tight construction schedule, heavy task, complex rock conditions, close proximity to protective objects and high requirements for slag washing by water flow. In view of the important and difficult points in the construction, a phased, partitioned and layered blasting demolition scheme was adopted, and thus the single cofferdam was divided into two phases, three layers and eight zones. By reserving an economic cofferdam and demolishing the part above water in advance, the difficulties of huge engineering quantity and tight construction schedule were overcome. The method of drilling with large-diameter drills and protecting the hole with casing effectively reduced the occurrence of hole collapse under complex geological conditions, improved the construction efficiency and ensured the blasting effect. The design of high powder factor, low single shot, inter-hole segmentation and intra-hole delay not only met the requirements of safety control of vibration velocity, but also ensured that the rock fragmentation after blasting

收稿日期:2022-09-10

作者简介:吴发名(1991-),男,硕士研究生、工程师,从事水利水电工程建设管理、工程爆破相关工作,(E-mail)771851834@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52109148)

can be washed away by water flow. The engineering application results showed that the peak vibration velocity of blasting under the most unfavorable conditions was 11.85 cm/s, which was less than the allowable safety control standard of 12 cm/s for structural concrete. The measured peak pressure of surge wave was 0.12 MPa, which was also under the allowable value of 0.4 MPa for hydraulic steel gates. The fragmentation after blasting was controlled mostly within 40 cm, and the boulder yield was controlled within 5%. The research results can provide reference for similar projects.

Key words: cofferdam demolition; blasting design; blasting construction; tailrace outlet; Baihetan hydropower station

围堰拆除一直是水电站施工中的重难点。一方面围堰爆破拆除临近闸门及明渠混凝土等永久建筑物,爆破飞石及振动冲击波易造成结构物损伤^[1]。另一方面,复杂难测的水下地形、纵横交错的节理裂隙、动态变化的江面水情等极大增加了钻孔困难,孔内渗水、卡钻、塌孔等现象时有发生^[2]。同时,能否形成良好的爆堆形态与合理的爆破块度也是影响冲渣过流的关键^[3]。因此如何快速、高效、干净地实施围堰爆破拆除显得至关重要。

近年来诸多学者围绕围堰爆破拆除以及相关课题进行了深入的研究,取得了系列研究成果。王红彬^[2]、孙云峰^[4]、彭少引^[5]、刘本森^[6]、廖成林^[7]、刘宇等采用分期分区拆除^[8]、预留经济断面、堰内充水平压、水下钻孔套管施工、控制爆破参数等方式进行围堰拆除,在多个项目上取得了良好的应用效果。刘美山^[9,10]、李汉涛等按照提高炸药单耗^[11]、降低单响药量的方式进行爆破网路设计,围堰拆除效果良好。赵中宇^[12]、袁江霞等采用精细化爆破方案^[13],通过分区设计炸药单响、单耗,结构面造孔预裂和延时起爆网路等方式将临近永久建筑物的实测质点振速控制在安全标准以内。张文煊^[14]、郭世明等采用堰内充水爆破方式研究了水击波传导的能量变化特性^[15]。李泉结合工程案例^[16],对水下爆破炸药单耗的计算方法进行了修正。张志波研究了气泡帷幕在水下爆破中的减震效果^[17]。陈明^[18]、李金河等研究了爆破块度^[19]、水流冲渣等相关课题。此外,樵平^[1]、张忠伟^[20]、邵晓宁等^[21],均针对不同工程开展了爆破方案优化研究。

综上所述,诸多学者在围堰拆除爆破等方面已经做过许多研究并取得了系列研究成果。由于每个工程所处的地质环境不一样,爆破参数的选择以及爆破方案的设计也因人而异,因此往往需要针对不同围堰拆除主体开展专项爆破设计及施工方案研究。以白鹤滩水电站尾水出口围堰拆除爆破为例,通过工程实践,探索总结大型围堰拆除爆破关键技术,力争为后续同类工程施工提供参考。

1 围堰拆除爆破设计

1.1 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游河段,电站装机容量位居世界第二。左右岸引水发电系统各布置有8台100万kW大型水轮发电机组和4条大型尾水隧洞。枢纽布置如图1所示。

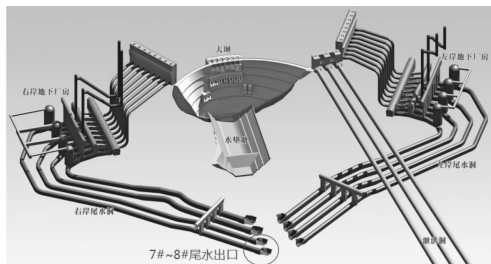


图1 白鹤滩水电站枢纽布置图

Fig. 1 Layout of Baihetan Hydropower Station

为确保2021年07月首批机组投产发电,需在汛前完成对右岸7#、8#尾水出口岩埂围堰的爆破拆除。该围堰为4级围堰,设计流量8446 m³/s,顶、底高程分别为EL. 609.00 m、EL. 580.00 m,高差达29 m。围堰拆除前整体情况如图2所示。



图2 尾水隧洞出口围堰布置图

Fig. 2 Layout of tail water tunnel cofferdam

7#、8#尾水出口围堰岩性整体偏差,裂隙及错动带发育,卸荷及风化作用较强,结构较为松弛,围堰外侧边坡稳定性不强。

1.2 围堰拆除方案

因围堰拆除工程量大,7#、8#围堰拆除方量分别为6.3万m³、6.2万m³,故考虑采取分期分区拆除方案,单个围堰分为“两期三层八区”进行拆除。

一期主要拆除水上部分(I、II层),二期拆除水下部分(III层)。二期围堰拆除时经历了汛前、汛

后两个枯水期。为减少拆除压力,堰内部分III-3层安排在汛前实施,同时预留经济围堰。经过一个汛期后尾水隧洞内已充水,故经济围堰及堰外部分均为水下爆破,待堰外部分拆除后再拆除经济围堰。围堰拆除分期分区如图3所示,各区爆破拆除工程量如表1所示。

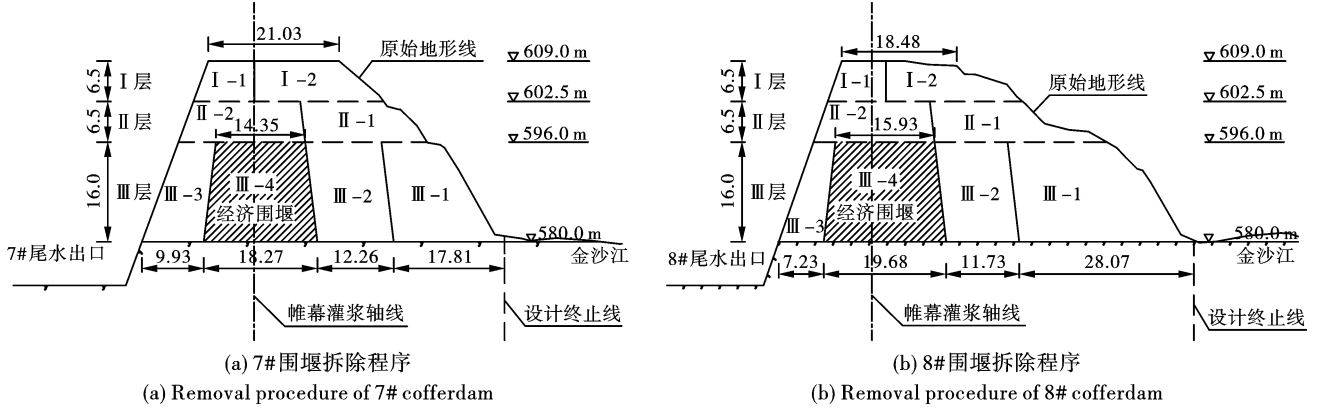


图3 围堰拆除规划图(单位:m)

Fig. 3 Cofferdam demolition plan(unit:m)

表1 围堰拆除工程量表

Table 1 The volume of cofferdam demolition

工程部位	分层	分区	工程量/m ³	分期
7#围堰	I	I-1	5922	一期
		I-2	10 929	一期
	II	II-1	6452	一期
		II-2	5584	一期
	III	III-3	7143	一期
		III-1	10 368	二期
		III-2	7840	二期
		III-4	9100	二期
8#围堰	I	I-1	4475	一期
		I-2	8311	一期
	II	II-1	7883	一期
		II-2	5146	一期
	III	III-3	5397	一期
		III-1	13 256	二期
		III-2	7152	二期
		III-4	10 224	二期

1.3 爆破参数设计

1.3.1 围堰一期水上拆除爆破

水上部分(I层、II层)及堰内III-3区拆除属于明挖爆破,梯段爆破典型参数如表2所示。距结构面约1.5m处设置1排缓冲孔,单孔药量较主爆孔适当减小。设计结构面处采用100E轻型潜孔钻造孔预裂,线装药密度控制在570~600g/m。

参照类似工程经验并根据现场爆破试验,将炸药单耗控制在0.45~0.50kg/m³,既能爆破石块,又能节省炸药用量,可以取得较好地爆破效果。

以8#围堰II-1区爆破开挖为例,典型梯段爆破设计参数如表2所示,布孔及装药结构如图4、图5所示。其他各区爆破参数参照执行。

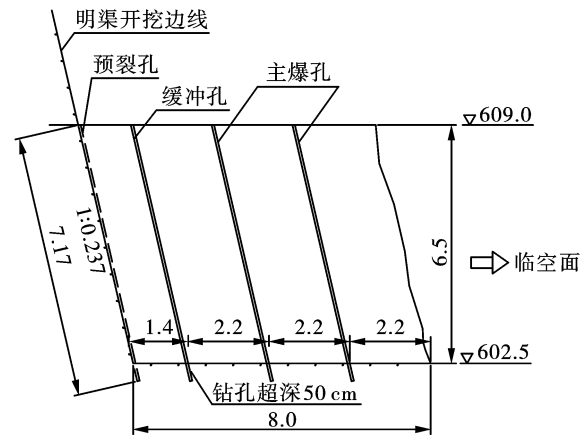


图4 8#围堰II-1区爆破布孔图(单位:m)

Fig. 4 Blasting design of II-1 area of 8# cofferdam(unit:m)

1.3.2 围堰二期水下拆除爆破

水下拆除范围包括III-1区、III-2区和经济围堰。下面以7#经济围堰水下拆除为例进行阐述。

(1) 炸药单耗确定

采用水下爆破经验公式计算炸药单耗^[16],其式

如下

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (1)$$

式中: q_1 为基础单耗,取值为 $0.8 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$;
 q_2, q_3, q_4 分别为考虑水压、覆盖层厚度和岩石膨胀

性能的增量单耗。其中 $q_2 = 0.01h_2, q_3 = 0.02h_3, q_4 = 0.03h_4$, h_2, h_3, h_4 分别表示水深、覆盖层厚度和梯段高度。

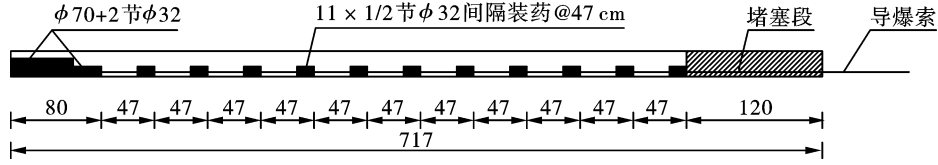


图5 预裂孔装药结构图(单位:cm)

Fig. 5 Charge structure of presplit blasting hole(unit:cm)

表2 8#围堰II-1区典型爆破参数表

Table 2 Typical blasting parameters of II-1 area of 8# cofferdam

孔名	钻孔参数			布孔及装药参数				
	孔径/mm	梯段高度/m	孔深/m	孔距/m	排距/m	药径/mm	堵塞长度/m	单孔药量/kg
预裂孔	φ 90	6.5	7.17	0.8	/	70 + 32	1.20	4.25
缓冲孔	φ 90	6.5	7.17	2.5	1.5	70	2.97	14.00
主爆孔	φ 90	6.5	7.17	2.5	2.2	70	1.77	18.00

经济围堰顶高程为 596 m,底高程为 580 m,拆除时堰外江水位最高达 595 m,则 $h_2 = 595 - 580 = 15 \text{ m}, h_3 = 0, h_4 = 596 - 580 = 16 \text{ m}$ 。按最不利工况考虑,则 $q = 1.2 + 0.01 \times 15 + 0 + 0.03 \times 16 = 1.83 \text{ kg/m}^3$ 。

为降低大块率并考虑水流冲渣需要,现场施工时可按 $1.8 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ 进行设计。

(2) 爆破振动控制及最大单响药量设计

围堰水下部分拆除时,需要保护的永久建筑物主要是水工闸门和尾水隧洞结构混凝土。根据规程规范并参照类似工程经验,确定闸门的爆破振动安全控制标准为 20 cm/s ,按 30 cm/s 进行校核;结构混凝土的安全控制标准为 12 cm/s ,按 15 cm/s 进行校核。

采用萨道夫斯基公式计算并校核爆破质点的振动速度 v [20,21]

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: v 为峰值振速, cm/s ; K, α 为相关系数; R 为保护体到爆破中心的直线距离, m ; Q 为最大单响药量, kg 。

参照白鹤滩水电站导流洞围堰拆除及类似工程施工经验 [2,11], K, α 取值分别为 130、1.4。

按最不利工况考虑,7#围堰经济断面爆区中心距尾水出口结构混凝土几何中心约 27 m,如图 6 所示。根据式(2),当最大单响药量 $Q \leq 119.3 \text{ kg}$ 时满足质点振速 $\leq 12 \text{ cm/s}$ 的设计标准;当最大单响药

量 $Q \leq 192.5 \text{ kg}$ 时满足质点振速 $\leq 15 \text{ cm/s}$ 的校核标准。



图6 最不利工况计算

Fig. 6 Calculation for the worst working condition

(3) 装药结构及爆破网路

水下爆破钻孔主要采用液压履带式潜孔钻,钻孔直径为 130 mm,同时为避免塌孔,采用 PVC-U 管进行套管护孔。套管后的内径尺寸需满足装药要求。结构面处造孔预裂,孔底 2 m 段加强装药,线装药密度约为 600 g/m 。主爆孔连续装药,单孔药量为 $38.4 \sim 73.6 \text{ kg}$ 。装药结构如图 7 所示。

采用 9 ms、17 ms、42 ms、65 ms 及 880 ms 高精度雷管微差起爆网路,如图 8 所示。上下游两侧预裂孔三/四孔一响,采用 9 ms 分段;主爆孔两孔一响(临空面方向部分三孔一响),孔间 9 ms/17 ms/42 ms 分段,孔内 880 ms 延时,排间 65 ms 接力,双发雷管起爆。最大单响药量 185.6 kg,控制在结构混凝土振动安全的设计值与校核值之间。

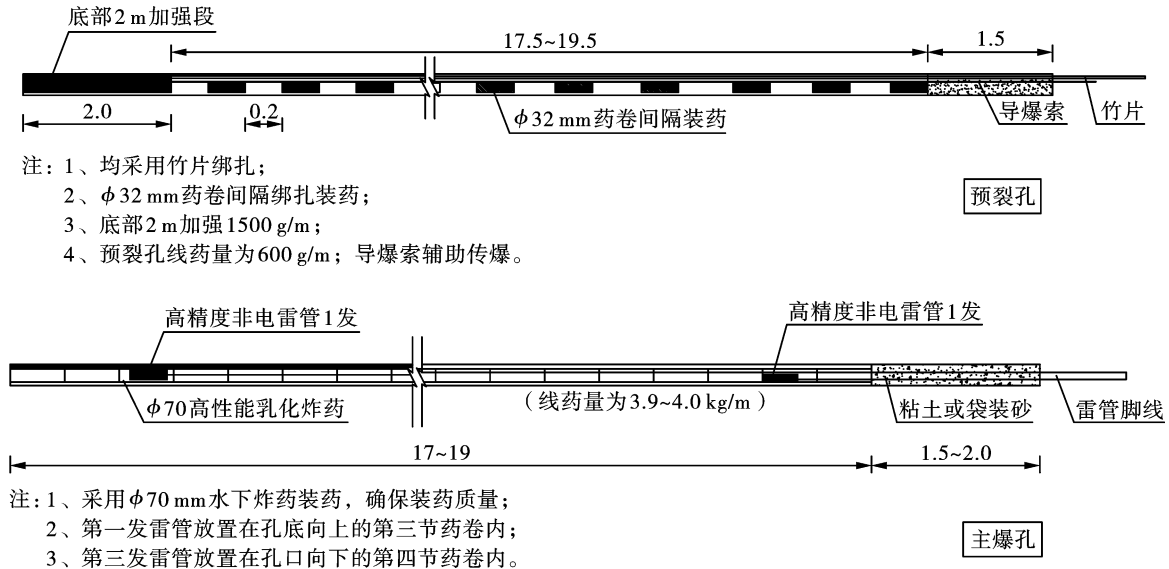


图7 装药结构图(单位:m)

Fig. 7 Charge structure of blasting(unit:m)

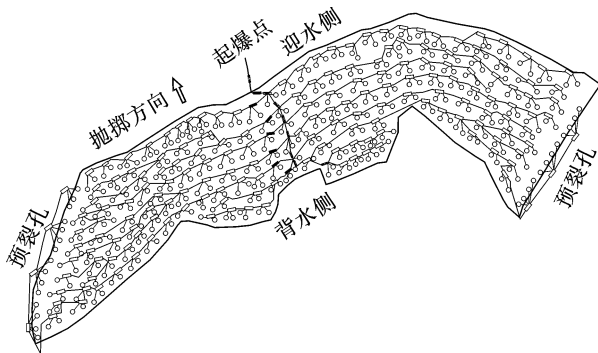


图8 起爆网路图

Fig. 8 Initiation network

(4) 爆渣块度预测

一般而言,爆破堆渣会淤积在尾水出口阻塞流道,对水流流态造成影响,同时清渣难度较大。

根据相关研究^[2],当爆后渣料粒径相对均匀,40 cm以下渣料占比超过60%,同时大块率控制在5%以内时,可以满足水流冲渣要求。

下面采用修正的KUZ-RAM模型预测水下爆破爆渣的块度尺寸^[18],其计算公式如下

$$\bar{X} = Aq^{-0.8}Q^{1/6}(115/k_D^2E)^{19/30} \quad (3)$$

式中: \bar{X} 为爆破渣料的平均块度,即 d_{50} ,cm; A 为岩石相关系数,本工程取 $A=8$; q 为爆破单耗, kg/m^3 ; Q 为最大单孔药量,kg; E 为炸药的相对威力,本工程为乳化炸药, E 取90; K_D 为水下炸药威力降效系数。

本工程中爆破单耗 q 取 $1.8 \sim 2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,主爆孔单孔药量设计为 $38.4 \sim 73.6 \text{ kg}$,预裂孔单孔药量设计为 $11.7 \sim 13.7 \text{ kg}$ 。考虑最不利工况(q 取

$2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 Q 取 73.6 kg),炸药水下性能降低率分别考虑未降低($K_D=1$)、降低10%($K_D=0.9$)、降低20%($K_D=0.8$)降低30%($K_D=0.7$)四种情况,则最不利工况下,爆渣的平均块度 \bar{X} 计算结果如表3所示。

表3 爆渣平均粒径计算

Table 3 Calculation of average particle size of blasting fragmentation

炸药水下性能降低率/%	0	10	20	30
爆渣平均粒径 \bar{X}/cm	10.99	11.74	12.65	13.77

从计算结果来看,即使炸药水下性能降低30%,爆渣的平均粒径也只有13.77 cm,满足粒径小于40 cm的水流冲渣要求。

2 安全防护及振动监测

2.1 闸门防护

为防止爆破水击波冲击闸门导致后续不能正常提闸冲渣,通过设置气泡帷幕对尾水隧洞检修闸门进行防护。

如图9所示,高压风管产生的高压气体会在空中形成一排浓密向上翻滚的气泡帷幕,当水击波通过时会压缩气体,从而将水击波动能转化为受压缩气体的内能,削弱水击波的能量,起到保护作用^[17]。

2.2 爆破振动及水击波监测

为监测尾水出口结构混凝土的爆破质点振动速度,分别在7#尾水隧洞出洞口左右侧及8#尾水出口左侧EL.602.5 m高程坡脚处布置3个测点。测点布置如图10所示。

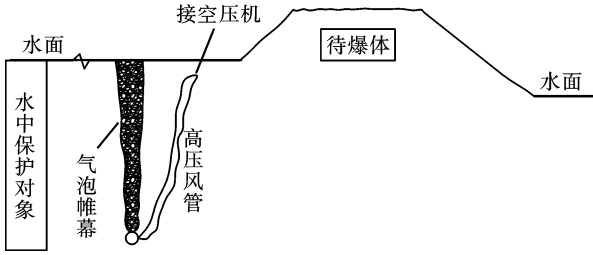


图 9 气泡帷幕形成示意图

Fig. 9 Sketch map of the formation the bubble curtain wall



图 10 爆破振动测点布置图

Fig. 10 Layout of vibration monitor

同时爆破拆除前还在 7#尾水隧洞检修闸门迎水面布置水下冲击波传感器用于开展水击波测试。

3 爆破效果分析

3.1 爆破过程分析

根据现场实拍影像资料显示,7#经济围堰爆破拆除时,炸药首先从围堰外侧迎水面中部打开缺口,然后从中间往两边、从外侧向内侧逐步爆破,爆破石渣抛掷方向朝围堰外侧。爆破过程如图 11 所示。

3.2 爆破振动分析

监测结果显示,爆破诱发质点峰值振速出现在 1#测点所在位置,其值为 11.85 cm/s,小于结构混凝土允许的安全控制标准 12 cm/s。振动监测数据如表 4 所示,1#测点峰值振速典型振动波形如图 12 所示。

表 4 爆破振动监测结果

Table 4 Blasting vibration monitoring results

测点编号	水平切向 PPV/ (cm · s ⁻¹)	水平径向 PPV/ (cm · s ⁻¹)	竖向 PPV/ (cm · s ⁻¹)
1#	10.88	11.85	11.55
2#	9.85	6.32	7.42
3#	7.11	6.36	4.91



(a) 爆破前
(a) Before blast



(b) 爆破瞬间
(b) During blast



(c) 爆破后
(c) After blast

图 11 爆破效果

Fig. 11 Blasting effect

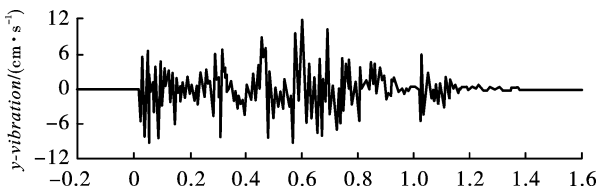


图 12 1#测点峰值振速典型振动波形图

Fig. 12 Typical vibration waveform on 1# measurement point

实测水击波峰值压力为 0.12 MPa,小于水工钢闸门的安全允许控制值 0.4 MPa,表明闸门受水击波影响较小。

3.2 爆堆块度分析

为降低水流冲渣压力,减少爆后堆渣对水流流态的影响,在枯水期又安排长臂反铲对 7#、8#经济

围堰拆除后的爆堆堆渣进行清理。清理出来的爆渣块度如图 13 所示。



图 13 爆堆块度实拍图

Fig. 13 Picture of blasting fragmentation

从图中可以看出,围堰整体爆破拆除效果较好,除少部分超径块石外,绝大部分渣料块度粒径控制在40cm以内,大块率控制在5%以内,满足水流冲渣条件。

4 结论

以白鹤滩水电站尾水隧洞出口围堰拆除爆破为例,探索总结大型围堰拆除爆破设计与施工技术,取得以下研究成果:

(1)针对围堰拆除工程量大、工期紧的难题,可采取“分期分区分层”的爆破拆除方案。首先将围堰分为水上爆破和水下爆破两个部分,并预留经济围堰。利用枯水期先期实施水上部分和经济围堰内、外侧减薄部分,最后再一次整体爆破经济围堰,从而实现化整为零,减轻工期压力,并可获得更好的爆破拆除效果。

(2)炸药单耗及最大单响药量的设计,要综合考虑爆区临近永久建筑结构的爆破振动控制要求及水流冲渣需要。水上明挖爆破炸药单耗一般控制在 $0.45 \sim 0.50 \text{ kg/m}^3$,水下拆除爆破考虑炸药降效及水流冲渣需要,炸药单耗可按 $1.8 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ 进行加强设计,同时最大单响药量要结合最不利工况进行计算。

(3)钻孔设备的选择要考虑水上旱地施工和下水下拆除爆破的差别。水上爆破一般采用常规钻孔设备即可。水下爆破为防止塌孔,可采用“大直径钻机造孔、孔内套管护孔”的施工方式,能有效降低塌孔率。

(4)高精度雷管微差起爆网路,孔间分段、孔内延时、双发雷管起爆等设计方式,保证了传爆网路的可靠性。采取设置气泡帷幕的方式可有效降低水击波的冲击动能,起到保护闸门的作用。

(5)监测成果表明,最不利工况下,最大峰值振速出现在距离爆区中心最近的1#测点,且峰值振速 11.85 cm/s 小于混凝土的安全控制标准 12 cm/s ,水击波峰值压力 0.12 MPa 小于闸门的安全允许控制值 0.4 MPa ,且爆后大部分渣料块度粒径小于 40 cm ,满足振动安全防护及水流冲渣条件。机组投产发电前顺利实现了提闸冲渣,研究成果可为类似工程提供参考和借鉴。

参考文献 (References)

[1] 樵平,卜俊锐,张维明,等.两河口围堰拆除爆破[J].爆破,2016,33(4):90-93.

- [1] QIAO Ping, BU Jun-ru, ZHANG Wei-ming, et al. Explosive demolition technology of cofferdam removal in complex environment[J]. Blasting, 2016, 33(4):90-93. (in Chinese)
- [2] 王红彬,王霄.白鹤滩水电站左岸导流洞围堰拆除技术研究[J].爆破,2017,34(1):108-112.
- [2] WANG Hong-bin, WANG Xiao. Explosive demolition technology analysis of diversion tunnel cofferdam at left bank in Baihetan Hydropower Station [J]. Blasting, 2017, 34(1):108-112. (in Chinese)
- [3] 刘美山,李丹,彭翠玲,等.大型水电站导流洞围堰拆除爆破关键问题分析[J].爆破,2006,23(2):80-84.
- [3] LIU Mei-shan, LI Dan, PENG Cui-ling, et al. Analysis of key problems of explosive demolition for cofferdam of water conveyance tunnel on large hydropower station [J]. Blasting, 2006, 23(2):80-84. (in Chinese)
- [4] 孙云峰,李冲,孟涛,等.某引水工程取水口围堰和预留岩坎拆除爆破[J].工程爆破,2020,26(3):38-44.
- [4] SUN Yun-feng, LI Chong, MENG Tao, et al. Demolition blasting for cofferdam and reserved rock ridge of intake in a water diversion project [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3):38-44. (in Chinese)
- [5] 彭少引.乌东德水电站左岸导流洞进口围堰爆破拆除技术[J].电力勘测设计,2019(12):45-50,74.
- [5] PENG Shao-yin. Demolish blasting technology on inlet cofferdam of left diversion tunnel in Wudongde Hydropower Project [J]. Electric Power Survey & Design, 2019(12):45-50,74. (in Chinese)
- [6] 刘本森,荣进松,孙全.乌东德水电站左岸导流洞进口围堰拆除施工技术[J].水利水电技术,2016,47(S2):113-116.
- [6] LIU Ben-sen, RONG Jin-song, SUN Quan. Technology for inlet cofferdam demolition of diversion tunnel construction on left bank of Wudongde Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(S2):113-116. (in Chinese)
- [7] 廖成林,杨玉银.隧洞出口围堰拆除控制爆破技术[J].水科学与工程技术,2020(3):44-49.
- [7] LIAO Cheng-lin, YANG Yu-yin. Controlled blasting technique for cofferdam removal at tunnel exit [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2020(3):44-49. (in Chinese)
- [8] 刘宇,肖灯勇,彭大勇,等.引水隧洞进口预留岩坎的爆破拆除[J].工程爆破,2016,22(3):58-60,64.
- [8] LIU Yu, XIAO Deng-yong, PENG Da-yong, et al. Blasting demolition of reserved rock ridge in diversion tunnel inlet

- [J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(3): 58-60, 64. (in Chinese)
- [9] 刘美山,张正宇,李永池,等. 乌江构皮滩水电站导流隧洞进口围堰爆破拆除[J]. *工程爆破*, 2005, 11(1): 25-29.
- [9] LIU Mei-shan, ZHANG Zheng-yu, LI Yong-chi, et al. Blasting demolition of cofferdam inlet of water diversion tunnel at Goupitan Hydropower Station [J]. *Engineering Blasting*, 2005, 11(1): 25-29. (in Chinese)
- [10] 刘美山,张正宇,沈嗣元,等. 小湾水电站导流洞进出口围堰及岩埂的爆破拆除[J]. *水力发电*, 2004, 30(10): 45-47.
- [10] LIU Mei-shan, ZHANG Zheng-yu, SHEN Si-yuan, et al. Explosive demolition of cofferdam and rock-dyke of water conveyance tunnel on Xiaowan Hydropower Station [J]. *Water power*, 2004, 30(10): 45-47. (in Chinese)
- [11] 李汉涛,陈稳科,王 辉,等. 乌弄龙水电站地下厂房尾水岩坎围堰拆除爆破[J]. *电力勘测设计*, 2018(12): 51-55.
- [11] LI Han-tao, CHEN Wen-ke, WANG Hui, et al. Demolition blasting of rock bar cofferdam at tail water of underground powerhouse of Wunonglong Hydropower Station [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2018(12): 51-55. (in Chinese)
- [12] 赵中宇,梁向前,温新平. 禹门口扩建泵站岩坎爆破拆除与安全控制[J]. *工程爆破*, 2017, 23(4): 82-85.
- [12] ZHAO Zhong-yu, LIANG Xiang-qian, WEN Xin-ping. Blasting demolition and safety control for rock ridge of Yumenkou Extension Pumping Station [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(4): 82-85. (in Chinese)
- [13] 袁江霞,许毓才. 中部引黄工程取水口预留岩坎围堰拆除爆破设计[J]. *中国农村水利水电*, 2020(8): 211-213, 220.
- [13] YUAN Jiang-xia, XU Yu-cai. The demolition blasting of the reserved rock ridge cofferdam for the intake of circulating water of Middle Yellow Projection [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(8): 211-213, 220. (in Chinese)
- [14] 张文焯,张正宇,凡昌宇,等. 大朝山水电站导流洞围堰及岩坎爆破拆除[J]. *爆破*, 2000, 17(S1): 207-210.
- [14] ZHANG Wen-xuan, ZHANG Zhen-yu, FAN Chang-yu, et al. Explosive demolition of cofferdam and rock-dyke of water conveyance tunnel on Dachaoshan Hydropower Station [J]. *Blasting*, 2000, 17(S1): 207-210. (in Chinese)
- [15] 郭世明,王文辉,刘 华,等. 大朝山水电站尾水出口围堰爆破拆除测试研究[J]. *水力发电*, 2001(12): 26-29, 67.
- [15] GUO Shi-ming, WANG Wen-hui, LIU Hua, et al. Test and study on the blasting removal of the cofferdam in the tailrace mouth of Dachaoshan Hydropower Station [J]. *Water power*, 2001(12): 26-29, 67. (in Chinese)
- [16] 李 泉. 几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式的分析与比较[J]. *爆破*, 2012, 29(1): 94-97.
- [16] LI Quan. Analysis and comparison of several calculation formulas of specific charge underwater drilling blasting [J]. *Blasting*, 2012, 29(1): 94-97. (in Chinese)
- [17] 张志波,李春军,李红勇,等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. *爆破*, 2003, 20(2): 75-76, 89.
- [17] ZHANG Zhi-bo, LI Chun-jun, LI Hong-yong, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting [J]. *Blasting*, 2003, 20(2): 75-76, 89. (in Chinese)
- [18] 陈 明,钟 权,卢文波,等. 导流洞进口围堰爆破拆除水流冲渣技术研究[J]. *爆破*, 2010, 27(3): 73-76, 80.
- [18] CHEN Ming, ZHONG Quan, LU Wen-bo, et al. Study on water flow impact residue technology of explosive demolition of diversion tunnel intake cofferdam [J]. *Blasting*, 2010, 27(3): 73-76, 80. (in Chinese)
- [19] 李金河,刘美山. 溪洛渡水电站导流洞围堰爆破技术及效果分析[J]. *工程爆破*, 2011, 17(3): 53-57.
- [19] LI Jin-he, LIU Mei-shan. Blasting demolition technology and effect analysis of the diversion tunnel cofferdam in Xiluodu Hydropower Station [J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(3): 53-57. (in Chinese)
- [20] 张忠伟,任 舸,李洪涛. 锦屏二级水电站导流隧洞进口围堰拆除爆破[J]. *爆破*, 2011, 28(4): 77-80.
- [20] ZHANG Zhong-wei, REN Ge, LI Hong-tao. Explosive demolition of intake cofferdam of diversion tunnel on Jingping II Hydropower Station [J]. *Blasting*, 2011, 28(4): 77-80. (in Chinese)
- [21] 邵晓宁,张道振,周恩泉,等. 电厂机组循环水取水口预留岩坎围堰拆除爆破[J]. *工程爆破*, 2014, 20(3): 25-28.
- [21] SHAO Xiao-ning, ZHANG Dao-zhen, ZHOU En-quan, et al. Demolition blasting of reserved rock ridge cofferdam for intake of circulating water of units in electric power plant [J]. *Engineering Blasting*, 2014, 20(3): 25-28. (in Chinese)