

# 宽大平底板结构石方开挖施工工艺探讨

张国平, 徐晶, 李鑫越

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要:**针对建基面石方开挖采用的传统施工工艺普遍存在的钻爆工艺难控制、一次开挖难成型且成型质量差、超挖超填严重等一系列难题,笔者阐述了杨房沟水电站 EPC 联合体通过工艺对比试验,为大坝河床坝段宽大平底板石方开挖创造技术条件、提供工艺参数,并将其成功应用于工程实际的过程,保证了工程质量、安全、进度、成本控制,所取得的经验对类似工程大规模平底板石方开挖具有指导意义。

**关键词:**宽大平底板;石方开挖;施工工艺;杨房沟水电站

**中图分类号:**TV52;TV7

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2184(2023)增 2-0040-06

## Discussion on Construction Technology of Rock Excavation for Wide Flat Floor Structure

ZHANG Guoping, XU Jing, LI Xinyue

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

**Abstract:** In view of a series of problems commonly encountered in the traditional construction technology used in foundation rock excavation, such as difficult control of drilling and blasting process, difficulty in forming and poor forming quality during one-time excavation, and serious over-excavation and over-filling, this paper explains the process by which the EPC consortium of the Yangfanggou Hydropower Station created the technical conditions for the stone excavation for wide flat floor structure through process comparison test, provided the process parameters, and successfully applied them to the actual project, ensuring the quality, safety, progress and cost control for the project, and the experience gained has important guiding significance for stone excavation for wide flat floor structure.

**Key words:** Wide flat floor; Rock excavation; Construction technology; Yangfanggou Hydropower Station

### 1 概述

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内,是雅砻江中游河段一库七级开发中的第六级,上距待建的孟底沟水电站 37 km,下距待建的卡拉水电站 33 km。电站坝址距成都约 590 km,距西昌约 236 km,距木里县城约 156 km。工程的开发任务为发电,库容为 4.558 亿  $m^3$ ,总装机容量为 1 500 MW,为一等工程,工程规模为大(1)型。枢纽主要建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物及引水发电系统等组成。挡水建筑物采用混凝土双曲拱坝,最大坝高 155 m;引水发电系统布置在河道左岸山体内,地下厂房采用首部开发方式。混凝土双曲拱坝、泄洪及消能建筑物、引水发电系统等主要水工建筑物为 1 级建筑物,坝后水垫塘及其他次要建筑物为 3 级建筑物。该电站采用 EPC 模式,由中国水电七局与华东勘测设

计研究院组成联合体共同承建(以下简称联合体)。

按照传统的施工工艺,水电工程宽大平底板建基面开挖存在钻爆工艺难度大、一次成型率偏低、建基面破坏严重、超挖超填量大等难题,尤其是一次成型实属罕见,几乎为空白领域,迫切需要研究探讨

杨房沟水电站大坝 7~11 号核心坝段坝基岩体为 II~III 类花岗闪长岩,设计为平底板结构,面积为 3 570  $m^2$ 。施工前,联合体开展了评估工作,如果采用传统方式开挖,不但面临工期压力,而且在成本控制、质量和安全管理方面均得不到有效管控。为此,总承包项目部要求职能部门依托 EPC 模式,发挥设计施工一体化优势,优化施工措施,通过工艺试验取得经验参数并加以合理运用,为大坝石方开挖安全、质量、成本、进度控制总结经验。

### 2 工艺试验

收稿日期:2023-06-30

## 2.1 平底板建基面竖向孔钻爆开挖试验

通过踏勘,联合体选择了与核心坝段类似条件的进水口底板作为工艺试验段。该试验段岩体为Ⅱ~Ⅲ类花岗闪长岩,平底板结构,试验开挖面积为 $20\text{ m}^2$ ,设计开挖深度为 $3.5\text{ m}$ ,开挖方量为

$60\text{ m}^3$ ,选用2台JK590履带式液压潜孔钻机造竖向爆破孔。根据花岗闪长岩物理力学特性经验参数,按照单孔药量进行了试验爆破设计。进水口试验段底板第一次竖向孔钻爆试验参数见表1,竖向主爆孔造孔工艺见图1。

表1 进水口试验段底板第一次竖向孔钻爆试验参数表

孔径 /mm	孔深 /m	孔距 /m	排距 /m	药卷直径 /mm	单耗 /kg·m <sup>-3</sup>	装药结构	堵塞长度 /m
102	3.5	3.5	3	70	0.32	连续	1.5

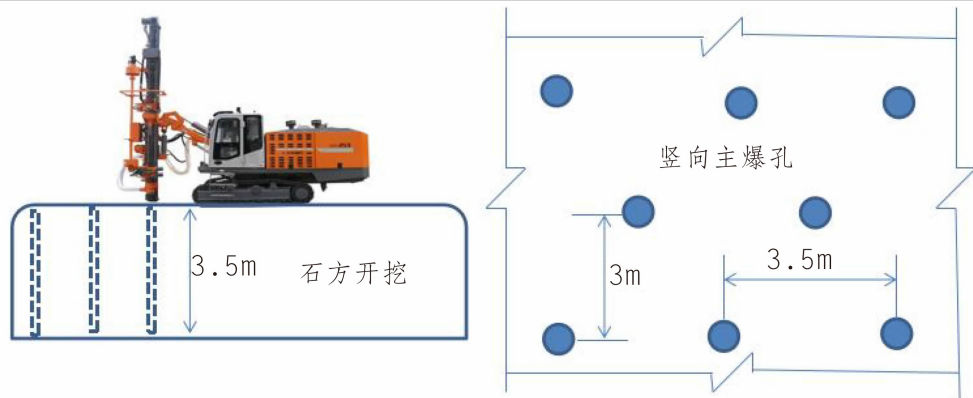


图1 竖向主爆孔造孔工艺示意图

第一步,测量放点。测量人员根据爆破设计用全站仪测放炮孔间排距、高程、孔深并做出明显的标识记录和交底告知。

第二步,钻孔。使用2台JK590履带式液压潜孔钻机根据测量点线标识造竖向爆破孔,每钻进 $1.0\text{ m}$ 后由质检员用线锤配靠尺复核角度与孔深。

第三步,清孔、验孔。使用高压风吹净孔内的残渣,由质检人员检测钻孔质量,待其孔位、孔向、孔径、孔深、间距等指标检验合格后方可通过验收,准许进行下一步作业<sup>[1]</sup>。

第四步,装药联网。采用人工连续装药、黏土堵塞炮孔,堵塞长度不小于 $1.5\text{ m}$ ,非电雷管与导爆索搭接网络手工连接。

第五步,起爆。爆破联网后,经检查确认无误后使用磁电雷管起爆。

第六步,出渣。爆破后其渣料由CAT336D( $2.0\text{ m}^3$ )大型反铲挖装 $32\text{ t}$ 自卸汽车运输至指定料场。

第七步,效果检查与评估。进水口底板试验区完成后,经现场联合检查后进行评估。进水口底板建基面竖向孔钻爆试验检查统计情况见

表2。

进水口试验段底板面积 $6.8\text{ m}^2$ 的欠挖处理。经测量点线测放、标识后,钻工采用2台Y28手风钻造孔28个,孔径为 $28\text{ mm}$ ,孔深为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 。爆破孔经检验合格后装 $\Phi 25\text{ mm}$ 乳化炸药,单孔药量在 $0.25\text{ kg}$ 内,非电雷管起爆完成。进水口底板建基面竖向孔钻爆二次处理统计情况见表3,进水口底板工艺试验开挖效果见图2。

根据进水口底板试验区取得的结果,联合体评价认为:

一是开挖面积为 $20\text{ m}^2$ ,设计开挖方量为 $60\text{ m}^3$ ,投入2台JK590履带式液压潜孔钻、2台Y28手风钻造孔,累计施工时间为 $19\text{ h}$ ,平均小时产量为 $3.16\text{ m}^3$ ,产量偏低。

二是超挖量合计为 $52.69\text{ m}^3$ ,超挖比例达 $87.8\%$ ,超挖石渣清运费为 $1\,317.25$ 元,超填C25二级配混凝土所需费用为 $25\,238.51$ 元,单位面积超挖超填成本为 $442.596$ 元/ $\text{m}^2$ ,超挖超填成本太高。

三是尽管爆破质点振动速度和爆破松弛监测结果符合设计要求,但其成型外观凹凸不平,给后续基础清理和混凝土浇筑带来不利影响。

表 2 进水口底板建基面竖向孔钻爆试验检查统计表

检查项目	单位	检查统计	评价
开挖面积	m <sup>2</sup>	20	符合爆破设计
竖向孔总数	孔	9	符合爆破设计
竖向孔间排距	m	3.5×3.0	符合爆破设计
孔深	m	3.5	符合爆破设计
单孔药量	kg	3.6	符合爆破设计
装药长度	m	2.0	符合爆破设计
总装药量	kg	32.4	符合爆破设计
质点振动速度	cm/s	9.41	满足设计值≤10 m/s
爆破松弛监测	%	≤10%	满足孔口 1 m 波速衰减率≤10%
实际投入时间	h	11	(60/11)×24=130(m <sup>3</sup> /d)
石方实测开挖量	m <sup>3</sup>	106.5	超挖量=106.5-60=46.5(m <sup>3</sup> )
一次成型面积	m <sup>2</sup>	13.2	6.8 m <sup>2</sup> 欠挖,石方量为 4.76 m <sup>3</sup>
超挖石渣清运费用	元	1 162.5	46.5×25 元/m <sup>3</sup>
超填 C25(二)混凝土	元	22 273.5	46.5×479 元/m <sup>3</sup>

表 3 进水口底板建基面竖向孔钻爆二次处理统计表

检查项目	单位	检查统计	评价
开挖面积	m <sup>2</sup>	6.8	符合爆破设计
爆破监测值	/	9.41	满足设计要求
实际投入时间	h	8	手风钻 2 台, 钻工 4 名
石方实测开挖量	m <sup>3</sup>	10.9	超挖量=10.95-4.76=6.19(m <sup>3</sup> )
二次成型面积	m <sup>2</sup>	6.2	0.6 m <sup>2</sup> 欠挖采用人工处理
二次超挖石渣清运费用	元	154.75	6.19×25 元/m <sup>3</sup>
超填 C25(二)混凝土	元	2 965.01	6.19×479 元/m <sup>3</sup>



第 1 次



第 2 次

图 2 进水口底板工艺试验开挖效果图

四是竖向爆破和二次处理爆破具有的不规则性、不安全因素较多,安全防护和警戒协调难度较大,影响范围较广。

联合体认为进水口底板采用竖向钻爆传统工

艺不符合联合体的精细化管理要求,应补充水平预裂工艺试验并视其效果决定取舍。

## 2.2 平底板建基面水平预裂钻爆开挖试验

联合体职能部门通过对勘测和设计文件进行

分析研究后决定选择二道坝底板作为水平预裂工艺试验段。二道坝底板岩体为Ⅱ~Ⅲ类花岗闪长岩,施工条件与进水口类似。除底部纵横廊道基础为齿槽结构开挖外,其余大面均为平

底板结构。试验段开挖长度为15 m,宽10 m,开挖深度为3.2 m,设计面积为150 m<sup>2</sup>,开挖方量为450 m<sup>3</sup>。二道坝试验段底板水平钻爆试验参数见表4,水平预裂爆破孔造孔工艺见图3。

表4 二道坝试验段底板水平钻爆试验参数表

类别	孔径 /mm	孔深 /m	孔距 /m	排距 /m	药卷直径 /mm	单耗 /kg·m <sup>-3</sup>	装药结构	堵塞长度 /m
水平预裂孔	90	10	0.7	1.5	32	0.32	间隔	1.2
竖向主爆孔	102	2.5	3.5	3.0	70	0.40	连续	1.2

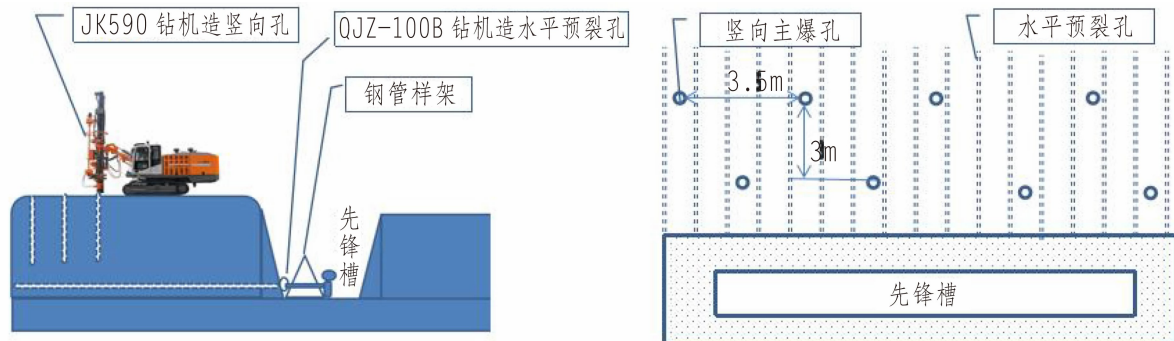


图3 水平预裂爆破孔造孔工艺示意图

第一步,先锋槽施工。为便于水平钻施工操作,拟先完成先锋槽施工,利用二道坝纵横廊道齿槽基础作为水平造孔先锋槽。齿槽基础的开挖深度深于底板3 m,宽度为3 m,横向间距为15 m,纵向间距为30 m,呈方形衔接闭合。齿槽开挖不改变原有方案,采取中间楔形掏槽、周边光爆方式施工完成。齿槽开挖完成后形成先锋槽,随即进入水平预裂钻爆试验施工。

第二步,测量放点。测量人员根据爆破设计方案用全站仪测放炮孔间排距、高程、孔深并做出明显的标识记录和交底告知<sup>[2]</sup>。

第三步,样架搭设。搭设人员根据测量控制点线和标识记录,采用Φ48.3 mm×6.0 m 钢管搭设水平样架并将其加固稳定、可靠。样架经验收合格后在样架上正确测放每个预裂孔的孔位、孔深、孔距等并用标签和油漆标识,同时样架在外侧2.0 m 定出相应孔位方向点<sup>[3]</sup>。

第四步,钻孔。钻孔顺序为竖向主爆孔超前、水平预裂孔紧随其后的方式。其中水平钻孔依据样架上的标识和测量点线严格控制,沿开挖设计线钻进,每进尺1.5 m 内必须用水平尺和孔位方向点复核水平方向、角度与孔深。

第五步,清孔、验孔。用高压风吹净孔内的残

渣,由质检人员检测钻孔质量,待其孔位、孔向、孔径、孔深、间距等指标检验合格通过验收后方准许进行下一步作业。

第六步,装药联网。先装水平预裂孔,再装竖向主爆孔。水平预裂孔采用竹片绑扎、间隔装药;竖向主爆孔采用连续装药,黏土堵塞炮孔,堵塞长度不少于1.2 m,非电雷管与导爆索搭接网络采用手工连接。

第七步,起爆。起爆顺序为先预裂、再主爆。爆破联网经检查确认无误后使用电磁雷管起爆。

第八步,出渣。爆破后的渣料由CAT336D (2.0 m<sup>3</sup>)大型反铲挖装32 t 自卸汽车运输至指定料场。

第九步,效果检查与评估。试验段施工完成后须经现场联合检查评估。二道坝底板建基面钻爆试验检查结果见表5,二道坝底板工艺试验开挖效果见图4。

### 2.3 试验结果对比研究

联合体职能部门将二道坝与进水口底板工艺试验结果进行了对比统计。二道坝与进水口底板工艺试验结果对比统计结果见表6。

根据进水口和二道坝底板段的两次试验结

表 5 二道坝底板建基面钻爆试验检查统计表

检查项目	单位	检查统计	评价	
地质类别	/	Ⅱ~Ⅲ类花岗岩闪长岩	符合设计勘测结果	
开挖面积	m <sup>2</sup>	150	符合爆破设计	
水平 预裂孔	孔总数	孔	21	符合爆破设计
	间排距	m	0.7	符合爆破设计
	孔深	m	10.0	符合爆破设计
	单孔药量	kg	3.6	符合爆破设计
	装药长度	m	8.8	符合爆破设计
	竖向 主爆孔	孔总数	孔	38
间距		m	3.5	符合爆破设计
排距		m	3.0	符合爆破设计
孔深		m	2.5	符合爆破设计
单孔药量		kg	3.2	符合爆破设计
装药长度		m	1.3	符合爆破设计
单耗药量	kg	0.35	符合爆破设计	
质点振动速度	cm/s	9.41	满足设计值≤10 m/s	
爆破松弛监测	%	≤10%	满足孔口 1 m 波速减率≤10%	
实际投入时间	h	28	(450/28)×24=385(m <sup>3</sup> /d)	
石方实测开挖量	m <sup>3</sup>	458.2	超挖量=458.2-450=8.2(m <sup>3</sup> )	
一次成型面积	m <sup>2</sup>	150	无欠挖	
超挖石渣清运费	元	205	8.2×25 元/m <sup>3</sup>	
超填 C25(二)混凝土	元	3 927.8	8.2×479 元/m <sup>3</sup>	



图 4 二道坝底板工艺试验开挖效果图

表 6 二道坝与进水口底板工艺试验结果对比统计表

比较项目	单位	进水口 底板	二道坝 底板
超挖率	%	87.8	1.8
一次成型率	%	66	100
小时产量	m <sup>3</sup> /h	3.16	385.00
单位面积超挖成本	元/m <sup>2</sup>	442.596	27.552
石方开挖实际成本	元/m <sup>3</sup>	35.8	33.9

果,结合现场踏勘检查的实际情况,EPC 联合体提出了实施意见和建议:在进水口竖向主爆传统工艺试验的基础上,对二道坝新增了水平预裂工艺,其工艺试验结果基本能满足平底板石方开挖质量、安全、进度、成本控制要求,但在爆破设计、工艺控制方面还有上升的空间,后续应认真总结,结合地质条件的实际状况进一步优化爆破工艺参数,加强工艺控制,要求在大坝 7~11 号核心坝段

面积为 $3\,570\text{ m}^2$ 宽大底板的开挖中取得更加明显的效果。

### 3 宽大平底板石方开挖施工工艺在杨房沟大坝取得的实施效果

杨房沟大坝7~11号坝段建基面平底板设计开挖面积为 $3\,570\text{ m}^2$ ,以Ⅱ~Ⅲ类花岗闪长岩为主,裂隙与隐裂隙发育,局部为断层和软弱结构,贯通性较差<sup>[4]</sup>。基于二道坝工艺试验结果和联合体实施意见,杨房沟大坝直接采用了宽大平底板石方开挖施工工艺。其施工效果总结评估如下:

(1)进度控制比较:2018年9月25日开始施工,分段分班流水作业,至2018年10月22日全部开挖完成,历时28 d,一次成型率达99.8%,平均每天完成 $127.5\text{ m}^2$ ,每班石方开挖完成量为 $382.5\text{ m}^3$ ,开挖工期节点目标比原计划提前9 d完成。

(2)直接成本控制比较:经现场实测,建基面超挖量为 $120\text{ m}^3$ ,平均每 $\text{m}^2$ 的超挖量为 $0.077\text{ m}^3$ ,单位面积超挖成本为 $37.51\text{ 元}/\text{m}^2$ ,较进水口试验段传统工艺节约成本 $405.086\text{ 元}/\text{m}^2$ 。7~11号坝段累计避免直接成本损失144.6万元。

(3)质量及安全控制。

①开挖轮廓面上残留炮孔的半圆痕迹均匀分布,残留炮孔痕迹保存率为95.5%,满足设计文件完整性较好岩石85%以上的要求。

②相邻两炮孔间岩面的不平整度实测量最大为11.3 cm,最小为2 cm,平均值为7.3 cm,满足设计文件不平整度不大于15 cm的要求,实测最大超挖量为9.1 cm,最小为0 cm,平均为5.2 cm。满足设计文件无欠挖要求。

③残留炮孔壁无明显的爆破裂隙,开挖成型面无裂隙张开、错动及层面抬动现象<sup>[5]</sup>,满足设计文件爆破裂隙不大于0.5 mm的要求。

④质点安全振动速度实测26点,且均控制在 $10\text{ cm}/\text{s}$ 范围内。爆前爆后声波衰减实测26点,控制在1 m内,均满足10%的基岩厚度不大于1 m(建基面高程以下1 m)的设计要求。

⑤河床坝段建基面合计6个单元,其结果全部优良,优良率为100%。

⑥未发生任何环保、水保及安全事故,满足安全文明标准化要求。

⑦宽大平底板石方开挖已获建设单位质量样

板A级;《提高坝肩槽开挖成型质量优良率》获水利工程质量优秀管理Ⅱ类成果,证书编号为SL-OC20184302032;《花岗闪长岩宽大底板建基面水平预裂开挖施工方法》获企业工法,编号为QJGF40-2018。

### 4 经济与社会效益分析

#### 4.1 经济效益

平底板石方开挖普遍存在一次成型率偏低、成型外观差,基础损伤、超挖超填量大等一系列弊端。杨房沟水电站联合体通过试验研究,在传统工艺上新增了水平预裂爆破施工技术,不但保证了工程工期、质量、安全目标,而且大幅度降低了管理成本和超挖超填成本。其7~11号核心坝段开挖面积为 $3\,570\text{ m}^2$ ,采用新工艺后,其开挖工期节点目标比原计划提前9 d完成,超挖量为 $120\text{ m}^3$ ,平均每 $\text{m}^2$ 的超挖量为 $0.077\text{ m}^3$ ,单位面积超挖成本为 $37.51\text{ 元}/\text{m}^2$ ,较进水口试验段传统工艺节约成本 $405.086\text{ 元}/\text{m}^2$ ,累计避免直接成本损失144.6万元。

#### 4.2 社会效益

目前我国基础设施建设持续发展,工程规模呈增大趋势,政策利好,但工程的施工环境和条件复杂多变。杨房沟水电站大坝宽大石方基础研究采用的开挖工艺可广泛应用于水利、水电、铁路、交通及矿山等行业中的基础石方开挖,具有借鉴及参考意义。

### 5 结语

杨房沟水电站采用EPC模式建设,设计与施工联营承建,其优势互补,所取得的效果立竿见影。针对传统施工工艺石方开挖存在的不足之处,联合体大胆实践优化,为大坝河床坝段 $3\,750\text{ m}^2$ 平底板石方开挖取得了实用的工艺参数并予以成功应用,有效化解了传统工艺造孔偏位大、成型难保证、质量难控制、成本难削减等一系列突出难题。该工艺可广泛应用于水利、水电、铁路、交通及矿山等行业中的基础石方开挖。

#### 参考文献:

- [1] 孟顺,张国平,周建平.提高拱坝坝肩槽开挖质量的控制措施[J].人民长江,2018,49(24):72-75.
- [2] 张国平.浅谈杨房沟水电站大坝坝肩槽开挖质量管控要点[J].四川水力发电,2018,37(4):173-174.
- [3] 梅晓丽,陈杰,刘伟.某工程超大深基坑地基与基础施工技术[J].施工技术,2014,43(1):53-56.(下转第72页)

每班平均工作时间为6~8 h。使用YGZ-90钻机进行中深孔凿岩的速度约为80~120 m/d;项目自引进中深孔台车后,中深孔的凿岩速度为300~400 m/d。中深孔台车的施工速度比传统YGZ-90钻机凿岩一排炮孔的速度快70%~80%,为YGZ-90钻机工作效率的3.5倍。

### 5.3 施工质量对比

中深孔施工过程中,炮孔的方位、倾角、孔深及偏斜率直接影响到采场损失及贫化率,进而影响到采出矿石的品位。传统YGZ-90钻机中深孔凿岩工作时,由于设备自身的原因(工作机构的定位、控制、运动精度不足等),岩层的裂隙、岩层的变化或其他原因容易导致钻头跑偏而造成钻杆弯曲、凿岩成孔偏斜,进而降低了钻机的凿岩精度<sup>[5]</sup>。

在项目引进中深孔台车后,由于中深孔台车采用了独特的底架式落地支撑、坚固的大臂和前后顶尖上下支撑,其推进梁的推进力高达31 kN,使用了更利于提高钻孔精度的T45-MF钻杆,使台车的钻孔精度大大提高。传统的YGZ-90钻机在施工中深孔前,要求台车的操作手做好凿岩的准备工作,按照中深孔设计图纸和测量人员施放的中深孔排位标记。使用中深孔台车施工中深孔时可以采用两侧安装的红外线光笔确定施工排面的排位和机高,利用上部安装的红外线光笔确定中深孔台车凿岩机的位置是否居中,由此可以更方便快捷地精确定位凿岩排位、机高及对中<sup>[6]</sup>。中深孔施工过程中,操作手可以根据中深孔台车的信息显示屏实时监控炮孔施工的方位、倾角、孔深等情况,及时采取降低推进压力、改进钻杆结构等措施以降低中深孔的施工偏斜率,提高凿岩精度<sup>[7]</sup>。

### 5.4 小结

在中深孔采场设计过程中,由于所使用的中深孔台车施工的炮孔直径增大使得中深孔排位间距、孔底距加大,延米崩矿量提高,从而减少了钻工的工程量,进而降低了现场作业人员的劳动强度。YGZ-90钻机的最大孔深约为20 m,而中深

(上接第45页)

- [4] 熊淑刚. 水利水电工程土石方施工技术[J]. 河南水利与南北水北调, 2019, 48(9): 51-52.
- [5] 王晓艳. 露天煤矿土石方剥离施工技术研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(18): 42-43.

作者简介:

孔台车的最大孔深可达38 m,其回转角度为360°,更适用于厚、大型矿体的开采。

在中深孔采场施工过程中,中深孔台车的转场相比YGZ-90钻机更加方便、灵活。中深孔台车采用柴油机驱动四轮可以方便地实现自行行走转场,单人即可操作;而传统的YGZ-90钻机则需要装载机配合移动机器设备、人工牵设高压风管、人工校准机芯位置、手动更换增添钻杆等,导致其施工效率低,作业人员劳动强度大。

### 6 结语

为了提高中深孔采场的钻孔施工效率和施工质量,塔矿项目引进了中深孔台车,使该项目中深孔凿岩施工速度大大提高,炮孔合格率提高了9%,施工效率、施工质量得到了明显的提升,满足了项目施工要求,为操作手的工作环境带来了极大程度的改善,实现了中深孔施工的自动化和机械化作业,降低了现场人员的劳动强度。所取得的经验可为类似地下金属非金属矿山中深孔施工提供参考。

### 参考文献:

- [1] 张明峰,姜仁义,苏建军. 阿尔登-拓普坎铅锌矿采矿方法的选择[J]. 金属矿山, 2012, 41(11): 49-51, 55.
- [2] 刘温泉. Boomer 281 凿岩台车在紫金山金铜矿的应用[J]. 现代矿业, 2015, 32(10): 191-194.
- [3] 杨光照, 栾洪海, 赵洪岩. 正确设置凿岩台车的工作参数[J]. 煤矿机械, 2015, 30(7): 74-76.
- [4] 周叶. 塔吉克斯坦阿尔登-托普坎矿区地质特征和储量估算[J]. 有色金属, 2010, 64(4): 122-125.
- [5] 何小平, 李东明, 闫杰. 潜孔钻机深孔凿岩偏斜率控制技术研究[J]. 采矿技术, 2013, 13(2): 78-80.
- [6] 赵立群. 凿岩台车定向定位自动控制系统[J]. 冶金自动化, 2006, 31(1): 56-58.
- [7] 王小林, 陈永祺, 程国华. 镜铁山矿提高 Simba 1354 台中深孔凿岩精度试验研究[J]. 金属矿山, 2018, 37(4): 63-66.

### 作者简介:

李超(1986-),男,河南浚县人,项目总工程师,副高级工程师,学士,从事工程建设施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

张国平(1976-),男,四川乐山人,项目副经理,副高级工程师,一级建造师,注册安全工程师,从事工程项目管理工作;

徐晶(1979-),女,四川眉山人,工程师,从事工程项目管理工作;

李鑫越(1998-),男,四川遂宁人,项目安全环保部副主任,助理工程师,学士,从事工程项目管理工作。

(责任编辑:李燕辉)