浅谈高海拔双闸室薄壁竖井开挖支护施工技术

钱凯旋[1]， 朱四辈[2]， 李 凯[2]， 史明泽[2]
（1.华电金沙江上游水电开发有限公司拉哇分公司，四川 巴塘 627650；
2.中国水利水电第四工程局有限公司西南分局拉哇水电站工程项目部，四川 巴塘 627650）

摘 要：为解决拉哇水电站双竖井作业空间小、垂直高度大、开挖尺寸多、竖井之间岩体厚度小、高海拔、环境复杂、安全系数要求高等难点，施工过程中通过采用合理机械化技术与优化后的传统工艺融合的方法，优化爆破设计，形成并总结了超深竖井开挖支护施工技术，保证了高海拔地区双闸室薄壁竖井快速、安全、优质、高效施工，为后续传统水电站、抽水蓄能电站、隧道交通、矿山施工等多个领域，类似竖井开挖支护工程提供重要的参考，具有广泛的利用价值及应用前景。

关键词：高海拔；双闸室；薄壁竖井；开挖支护；施工技术
中图分类号：U455.8 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2024)03-0106-05

Discussion on the High-altitude Double Gate Thin-walled Shaft Excavation and Support Construction Technology

QIAN Kaixuan[1], ZHU Sibai[2], LI Kai[2], SHI Mingze[2]
(1. Lawa Branch, Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., LTD., Batang Sichuan 627650;
2. Lawa Hydropower Station Project Department, Southwest Branch, Sinohydro Bureau 4 Co., LTD., Chengdu Sichuan 627650)

Abstract: In order to solve the difficulties of the double shaft of Lawa Hydropower Station, such as small operating space, large vertical height, large excavation size, small thickness of rock mass between the shafts, high altitude, complex environment and high safety factor requirements, the blasting design was optimized by adopting the method of integrating reasonable mechanization technology and optimized traditional technology in the construction process, and the construction technology of ultra-deep shaft excavation and support was formed and summarized, which ensured the fast, safe, high-quality and efficient construction of the thin-walled shaft of the double gate chamber in the high-altitude area. The experience can provide an important reference for similar shaft excavation and support projects in many fields such as pumped storage power stations, tunnel transportation, mine construction, and has a wide range of utilization value and application prospects.

Keywords: High altitude; Double gate; Thin-walled shaft; Excavation and support; Construction technology

0 引 言

竖井是指洞壁直立的井状管道，广泛应用于水利水电工程的输水、引水、通风、排风、溜渣、补气等。由于竖井施工工作面狭小、通排风困难、临边作业多、受到外部条件等不安全因素较多，历来都是重难点。笔者旨在通过比选竖井施工方法和原理，研究确定适用于高海拔地区双闸室薄壁竖井开挖支护施工技术并对其进行简要概述。

1 工程概况及施工难度

1.1 工程概况

金沙江上游梯级电站中的第 8 级为拉哇水电站，左岸毗邻四川，右岸毗邻西藏，上游为叶巴滩水电站，下游为巴塘水电站。

拉哇水电站属于大(1)型工程，总装机容量 2 000 MW。大坝施工采用 2 条隧道导流的方式。导流洞下闸均采用地下埋藏式闸门竖井，闸门竖井布置在导流隧洞中部直线段偏上游、溢洪道进水塔上游明渠右侧，竖井总高度约 148.796 m。闸门安装平台布置高程 2 635.00 m、启闭机安装平台高程 2 667.00 m。高程 2 635.00 m 以下，2 条导流洞闸门竖井之间岩体最小厚度 11.45 m；

收稿日期：2024-03-15

高程 2 635.00 m 以上，2 条洞闸门竖井之间岩体厚度 13.75 m；高程 2 667.00 m 以上 2 条洞闸门竖井连通，上部设桥机，两侧端部与⑧－1 交通洞连接。①号竖井开挖尺寸 29.1 m×9.3 m，②号竖井开挖尺寸 13.4 m×9.3 m；下部 2 条闸门竖井为小井，①号竖井开挖尺寸 27.10 m×5.20 m，②号竖井开挖尺寸 12.60 m×5.36 m，闸门井底部门槽段与导流洞连接。闸门竖井均为矩形断面，闸井之间的岩壁较薄，大井之间岩体厚度 13.75 m，小井之间距离为 15.15 m，导流洞闸门井之间岩体最小厚度 11.45 m。

表 1　双闸室竖井开挖支护断面类型一览表

序号	高程部位	高度 / m	开挖断面类型	初期支护断面	备注
1	①号竖井高程 2 666.800～2 663.500 m	3.300	29.10 m×11.30 m	28.80 m×11.00 m	—
2	①号竖井高程 2 663.500～2 635.000 m	28.500	29.10 m×9.30 m	28.80 m×9.00 m	—
3	①号竖井高程 2 635.000～2 566.409 m	68.591	27.10 m×5.20 m	26.80 m×4.90 m	—
4	①号竖井高程 2 566.409～2 563.409 m	3.000	(27.10～33.30)m×(5.20～10.30)m	(26.80～33.00)m×(4.90～10.00)m	—
5	①号竖井高程 2 563.409～2 560.134 m	3.275	33.30 m×10.30 m	33.00 m×10.00 m	—
6	②号竖井高程 2 666.800～2 663.500 m	3.300	13.40 m×11.30 m	13.10 m×11.00 m	—
7	②号竖井高程 2 663.500～2 635.000 m	28.500	13.40 m×9.30 m	13.10 m×9.00 m	—
8	②号竖井高程 2 635.000～2 555.900 m	79.100	12.60 m×5.36 m	12.30 m×5.06 m	—
9	②号竖井高程 2 555.900～2 554.900 m	1.000	(12.60 ～13.80)m×(5.36 ～10.30)m	(12.30 ～13.50)m×(5.06～10.00)m	—
10	②号竖井高程 2 554.900～2 552.848 m	2.052	13.80 m×10.30 m	13.50 m×10.00 m	—

1.2　施工难度

该工程竖井最小开挖断面为 12.60 m×5.36 m，开挖垂直高度约 148.796 m，顶部高程 2 683.150 m，双竖井之间岩体最小厚度 11.45 m，地理位置环境复杂、对施工运输及通讯影响较大。工程竖井具有作业空间小、垂直高度大、开挖尺寸多、竖井之间岩体厚度小、高海拔、环境复杂、安全系数要求高等作业特点，且由于双竖井之间岩体厚度薄，对开挖施工技术要求较高，施工过程中需加强爆破振动监测，优化爆破设计。

2　施工方案选择

2.1　方案比选

传统竖井施工多采用正井法或反井法开挖[1]，双闸室竖井开挖方法比选一览表见表 2。

表 2　双闸室竖井开挖方法比选一览表

竖井开挖方法	适用范围	缺点	备注
爬罐法	地质条件好；深度低于 300 m	爬罐为专用施工机械设备；底部平洞需具备通行条件；操作复杂；锚固施工质量要求高；生产厂家少，投资大，工期长；安全风险高	—
吊罐法	地质条件好；深度低于 50 m	吊罐为定制产品；投资大、工期长；安全风险高	—
深层分段爆破法	竖井导井或竖井全断面施工；安全性高、施工速度快、经济；深度低于 50 m	底部平洞需具备通行条件；对施工技术要求高；超欠挖不易控制；对结构要求较高的竖井不建议使用	—
反井钻机法	机械操作简单、高效、安全、优质、经济、环保，一般适用于垂直竖井	高度依赖设备	—

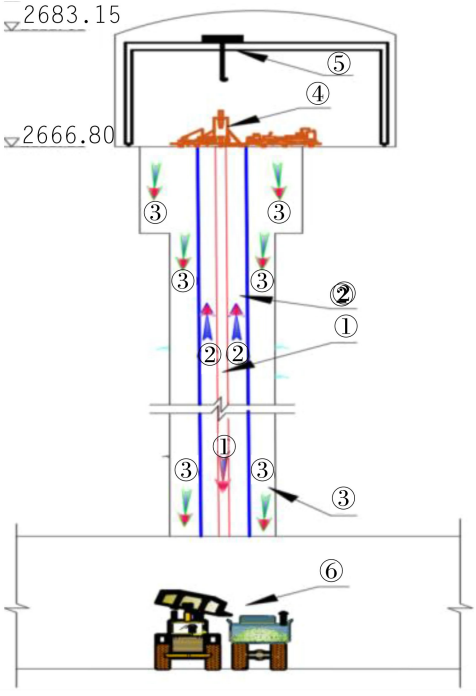
2.2　方案确定

通过上表数据对比分析，考虑到该工程为双闸室垂直竖井，综合使用反井钻机导井＋人工爆破扩挖施工施工对岩柱扰动小、施工速度快、机械化水平高，钻进效率高，相对于该工程缩短工期，降低成本且安全性较高。

3　施工工艺流程

该工程双闸室竖井施工工艺流程为：施工准备工作→竖井反井钻机先导孔施工（直径 27 cm）→竖井反井钻机反拉扩挖导井施工（直径 200 cm）→提升系统施工→溜渣井人工爆破一次扩挖（直径 400 cm）→提升系统施工→爆破振动监测试验→人工爆破二次至设计面扩挖→初期支护施工→施工期安全监测→二次混凝土结构施工。

反井钻机机械化施工①、②号竖井同步，使用爆破扩挖施工时采用台阶法，为保证两井之间的岩壁稳定性，周边采用手风钻预裂爆破，由于闸井之间的岩壁较薄，闸井开挖时，①、②号竖井开挖作业面错开 15 m，并在先开挖的竖井完成初期支护后再开挖相邻竖井。闸门竖井工程开挖施工程序见图 1。



①—导井开挖；②—反导井开挖及扩挖；③—二次扩挖至设计断面；④—反井钻机；⑤—门式起重机；⑥—石渣装运

图 1　闸门竖井工程开挖施工程序示意图(单位：m)

4　双闸室竖井开挖

4.1　竖井导井施工

(1)设备选型[2]。根据现场实际情况及钻孔深度、钻孔直径、岩石抗压强度，现场选用 LM－400 型反井钻机，双闸室竖井反井钻机主要参数及特点一览表见表 3。

(2)为保证施工工期，增加施工作业面，闸室竖井先导孔开挖及二次扩孔各配置 2 台 LM－400 反井钻机。LM－400 反井钻机位于竖井井口的中轴线上，自上而下钻出 ϕ27 cm 的导向孔，贯通后在底部已开挖完成的导流洞内更换刀头自下而上反拉扩孔，形成断面为 ϕ2.0 m 导井。为保证正常排渣及冷却钻头，导孔施工时用泥浆泵将泥浆(或水)压入孔内，石渣经排渣槽进入三级沉渣池[3]，经沉淀后人工捞至堆放位置。在施工过程中，如遇见塌孔、返水较小或不返水等异常情况，需采用泥浆护壁堵塞溶洞和裂隙[4]。为节约成本，反拉扩孔施工时，使用自流水冷却钻头和冲渣。

表 3　双闸室竖井反井钻机主要参数及特点一览表

项目	参数	特点
导孔直径	27 cm	该机械常用于煤炭及水利水电工程，其卓越的性能是可以在坚硬的岩石中施工深度达 400 m，一般适用于 ϕ1.4 m、ϕ1.7 m、ϕ2.0 m 等造孔直径的竖井和斜井导井工程；主机为 L 型框架结构，较为轻便，并且适用性及操作性强。两根拉杆分别固定在主机前后，为确保机械的整体可靠性并考虑其自重稳定性，钻架间用较大截面型钢固定；扩孔时，配置大扭矩小转速双液压马达驱动；为保证能够长时间连续、稳定的工作，该机设置高性能液压油过滤、冷却系统；通过加长钻杆，增加钻杆搬运与装卸辅助设备，提高钻杆特别是钻杆丝扣的寿命，优化并减少装卸扣长度及时间；使钻杆的装卸灵活、准确、更加机械化
扩孔最大直径	200 cm	
钻孔深度	400 m	
钻孔倾角	45～90°	
适用岩石	单轴抗压强度＜250 MPa	
额定推力	1 650 kN (25 MPa)	
额定拉力	2 400 kN (25 MPa)	
额定扭矩	101.5 kN·m (20 MPa)	

4.2　溜渣井施工

导井反拉施工完成后，为保证竖井扩挖至设计断面下渣顺畅，采用手风钻自下而上扩挖导井至 4.0 m 直径的溜渣井，竖井扩挖提升装置含载人系统、载物系统、井架、安全防护装置、安全通道等，爆破孔采用辐射孔方式自上而下造孔，向下倾斜，井壁需保证其平整度。双闸室竖井溜渣井开挖爆破施工参数见表 4。

表 4　双闸室竖井溜渣井开挖爆破施工参数

炮孔名称	炮孔深度	雷管段位	单孔装药量/kg	炸药单耗/(kg·m^{-3})
崩落孔	1.1 m	MS1～MS5	0.9	0.96

4.3　竖井扩挖施工

(1)提升系统优化。竖井扩挖前考虑材料运输、机械设备吊运、后续金属结构安装及二次结构施工等，对提升系统进行优化，根据整体部署综合考虑现场新增门式起重机 1 台，以满足后续施工进度。

(2)爆破设计及爆破振动监测试验。开挖闸门竖井采用手风钻分层、分区钻爆，采用 100E 潜孔钻机(或 D7 液压钻机)进行爆破孔钻孔，主爆破孔间距 2.0 m，排距 1.5 m，孔深 3.0～3.2 m，循环进尺约为 3.0 m，单耗 0.83 kg/m^3，人工装

药,非电毫秒雷管分段微差爆破。

根据竖井断面尺寸,采用预裂爆破及周边光面爆破相结合的方式开挖闸门竖井周边轮廓面,由手风钻钻孔,光爆孔及预裂孔间距 50 cm、孔深 3.0 m,线装药密度 150 g/m,采用非电毫秒延期雷管微差延时网络火花起爆。考虑到两竖井间岩石厚度较小且单竖井断面面积较大,为保证整体结构安全性和减少扰动,现场根据参考文献开展竖井爆破振动监测试验,在两竖井内分别布置监测点,通过对典型装药段爆破引起的三向振动速度分量分析,得出相邻井壁振动的传播规律与分布特征:隧道测试区域内三方向振动强度依次为垂直方向、水平径向、水平轴向随着爆心距离的增加,三方向间的振动强度差异化逐渐减小;掏槽炮孔爆破振动强度最大[5],优化得到双闸室竖井爆破试验参数,用于指导现场爆破开挖施工。扩挖过程中应根据岩石地质条件的变化及爆破振动监测数据随时调整开挖爆破参数。双闸室竖井扩挖至设计面爆破施工参数见表 5。

扩挖采用台阶法,②号竖井全断面一次开挖,①号闸门井分两次开挖完成。①号闸门井扩挖爆破孔位布置见图 2;②号闸门井扩挖爆破孔位布置见图 3。

表 5　双闸室竖井扩挖至设计面爆破施工参数

部位	炮孔名称	炮孔深度/m	雷管段位	单孔装药量/kg	炸药单耗/(kg·m^{-3})	线装药密度/(g·m^{-1})
①号竖井Ⅰ区	主爆孔	3.0～3.2	MS3－MS11	7.50	0.83	—
	施工光爆孔	3.0	MS13	2.00	—	800
	光爆孔	3.0	MS12－MS14	0.38	—	150
①号竖井Ⅱ区	主爆孔	3.0～3.2	MS3－MS11	7.50	0.67	—
	预裂孔	3.0	MS12－MS14	0.38	—	150
②号竖井	主爆孔	3.0	MS3－MS11	7.50	0.83	—
	光爆孔	3.0	MS12－MS14	0.38	—	150

(3)通风散烟及除尘。由于闸室距洞口较近采用自然散烟进行排烟通风,随着竖井不断下卧施工,考虑到通风排烟需求,现场配置风机或风筒把爆破后产生的烟尘、废气进行抽排,另工作面辅以喷淋系统进行降尘。

(4)安全处理。爆破完成后,进行排危,井壁上残留松散的危石及碎块人工撬除,专职安全员及技术员每次爆破后进行安全检查,发现问题及时处理,保证现场安全作业环境。

(5)扒渣。主要采用人工配合反铲扒渣,开挖渣料顺导井溜到竖井底部,装载机配自卸车出渣。

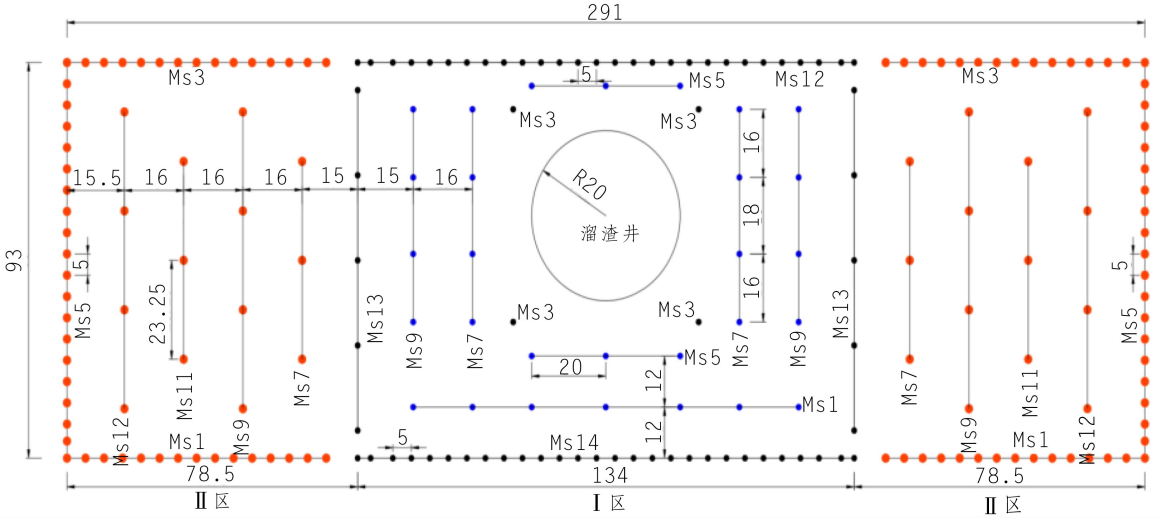


图 2　①号闸门井爆破设计示意图(单位:dm)

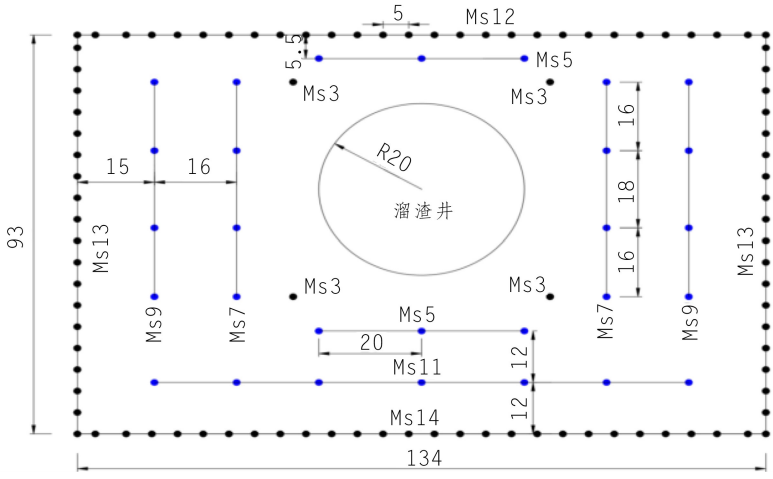


图 3　②号闸门井爆破设计示意图(单位:dm)

(6)围岩支护。爆破石方清除完毕后,参建四方根据工作面开挖揭露的井壁岩石情况,进行围岩地质素描,判定围岩类别,并根据成果按图纸要求进行浅层支护施工,待浅层支护及相关监测数据稳定后,方可进行下一循环施工。不良地质段的竖井需在开挖前采取超前加固措施,并及时跟进支护,必要时加密监测点位,以便实时动态监测并及时搜集数据,采取相关措施。

5　结　语

拉哇水电站双闸室竖井开挖过程中采用合理机械化技术与优化后的传统工艺融合的方法,优化爆破施工设计,减少周边岩体扰动,在双闸室间最小岩体厚度 11.45 m 的情况下得到运用。快速、安全、优质、高效地完成开挖支护[6],进一步为后续传统水电站、抽水蓄能电站、隧道交通、矿山施工等多个领域类似竖井开挖支护工程提供重要的参考,具有广阔的应用前景及较大的经济、利用价值。

参考文献:

[1]　王智,贺冲,胡伟成. 浅谈超深竖井开挖支护施工技术[J]. 湖南水利水电,2020(5):23-25+48. DOI:10.16052/j.cnki.hnslsd.2020.05.009.

[2]　刘俊英,刘志强. 反井钻机及反井钻井技术发展[J]. 水利科技与经济,2005(10):639-640.

[3]　潘福营,温学军. 抽水蓄能电站斜(竖)井导井开挖施工技术综述[J]. 水电与抽水蓄能,2021,7(1):91-93,108.

[4]　刘全鹏,赵宁,梁晓军. 坪头水电站 1～#竖井的开挖与支护[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(1):25-30.

[5]　冯路,于建新,丁书学,等. 两相近隧道竖井爆破振动监测与分析[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1314-1321.

[6]　李艳. 抽水蓄能电站竖井施工探析——以厦门抽水蓄能电站 Q1 标工程为例[J]. 低碳世界,2020,10(12):46-48. DOI:10.16844/j.cnki.cn10－1007/tk.2020.12.022.

作者简介:

钱凯旋(1995-),男,安徽蚌埠人,工程师,硕士,从事水利水电工程建设管理工作;

朱四辈(1988-),男,甘肃平凉人,工程师,本科,从事水电工程施工技术与质量管理工作;

李　凯(1997-),男,河南开封人,助理工程师,本科,从事公路隧道及水电工程施工质量与技术工作;

史明泽(1999-),男,河南开封人,本科,从事水电工程施工技术与质量管理工作.

(编辑:吴永红)

四川省水力发电工程学会承办《中国水力发电年鉴》2024 年编纂工作培训会

2024 年 5 月 25 日,由中国水力发电工程学会主办,中国电建成都院和四川省水力发电工程学会共同承办的《中国水力发电年鉴》2024 年编纂工作培训会在蓉召开。中国水力发电工程学会常务副秘书长、《中国水力发电年鉴》主编席浩主持会议并作工作报告,四川省水力发电工程学会理事长余挺出席会议并致辞。会议对《中国水力发电年鉴》编纂工作先进单位和代表进行了表彰。《中国水力发电年鉴》自 1983 年创刊以来,已顺利编纂出版了 27 卷,是我国水力发电行业的专业性年鉴,是水力发电行业重要的资料性工具书和系列性史册。学会多个会员单位的人员获评《中国水力发电年鉴》优秀撰稿人和编撰工作荣誉证书。

(学会秘书处　冯建明)