

超大直径异型调压井开挖施工和稳定控制技术

Molobaly Dit Mahamadou DEMBELE¹, 姚强¹, 吴钰¹,
王千², 陈星良¹, 李洪涛¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘要: 赞比亚下凯富峡水电站调压井设计为圆形+扇形结构的异形断面, 最大开挖跨度 62.42 m, 具有断面面积大、结构复杂等特点, 开挖施工和稳定控制难度大。根据有限元分析, 提出了井口预固结灌浆和井口混凝土锁口加固措施, 大井扩挖采取浅层开挖、随层支护的方法, 在平面环向和立面纵向上钻爆、出渣、支护工序无缝衔接, 实现了围岩及时支护加固, 保证了调压井的成型精度和开挖施工过程中的稳定和安全。

关键词: 下凯富峡水电站; 调压井; 施工技术; 稳定控制

中图分类号: S758.5+5; TV732.5+1; U445.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2184(2023)02-0007-04

Excavation and Stability Control Technology for the Super-large Diameter Special-shaped Surge Shaft

Molobaly Dit Mahamadou DEMBELE¹, YAO Qiang¹, WU Yu¹, WANG Qian², CHEN Xinggen¹, LI Hongtao¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065;
2. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: The surge shaft of the Kafue Gorge Lower Hydropower Station in Zambia is designed in a circular + fan-shaped section with a maximum excavation span of 62.42m, which has the characteristics of large section area, complex structure, etc., making the excavation and stability control difficult. Based on the finite element analysis, the pre-consolidation grouting and concrete reinforcement measures in the shaft head are proposed. The shallow excavation and layer-by-layer support methods are adopted for the enlarging and excavation of the shaft, more over, the drilling and blasting, slag removal, and support processes in the horizontal and vertical directions are seamlessly connected, realizing the timely support and reinforcement of the surrounding rock, ensuring the shaping accuracy of the surge shaft and the stability during the excavation process.

Key words: Kafue Gorge Lower Hydropower Station; surge shaft; construction technology; stability control

0 引言

非洲的一些专家预测, 到 2050 年非洲大陆的人口将翻一倍^[1], 占世界人口的四分之一以上^[2], 快速的人口增长将进一步加剧水和能源供应的压力。赞比亚拥有丰富的水资源^[3], 但能源系统基础设施仍然薄弱, 导致该国只有 25% 的人口能够用上电力^[4]。40 年来, 赞比亚第一座大型水电工程下凯富峡水电站由赞比亚政府投资建设。该项目由中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司设计, 中国水利水电第五、第十一工程局有限公司承

建, 建成后将提高赞比亚现有电力的 38%。

1 工程概况

下凯富峡水电站位于赞比亚首都卢萨卡东南 90 km 处的卡富埃河上, 工程以发电为主, 枢纽建筑物包括 130.5 m 高的碾压混凝土拦河坝、坝身泄洪系统、右岸引水系统、调压井和地面式厂房。工程采用混合式开发, 引水发电系统主要建筑物包括进水塔、引水隧洞、调压井、发电洞。调压井为阻抗式调压井, 位于引水洞末端, 上游侧与 1 条引水隧洞相连, 水流方向右侧与永久交通洞相连, 下游侧与 5 条发电洞连接。

调压井开挖井口高程为 614.70 m, 井底高程

收稿日期: 2022-12-02
基金项目: 中国电力建设集团有限公司重点立项课题(项目编号: DJ-ZDXM-2019-09)

为481.50 m,开挖井深133.2 m。高程570.00 m以上井壁稳定性差,为Ⅳ类围岩,506~570 m段井壁稳定性一般,围岩为Ⅲ类,断层破碎带及裂隙密集带段为Ⅳ类围岩。调压井开挖断面设计为圆形+扇形结构的异形断面(图1),高程513.70 m以下由于内埋式闸室布置需要,下游侧闸室顶部开挖为倒悬圆弧穹顶形状,调压井剖面见图2,该部位岩石较破碎属Ⅲ类围岩。调压井竖井开挖断面面积上部为1458.9 m²,下部扩大为1999.7 m²,开挖量约21万 m³,最大开挖直径50.8 m,最大开挖跨度为62.42 m,是目前世界上已建成和在建的最大调压井。

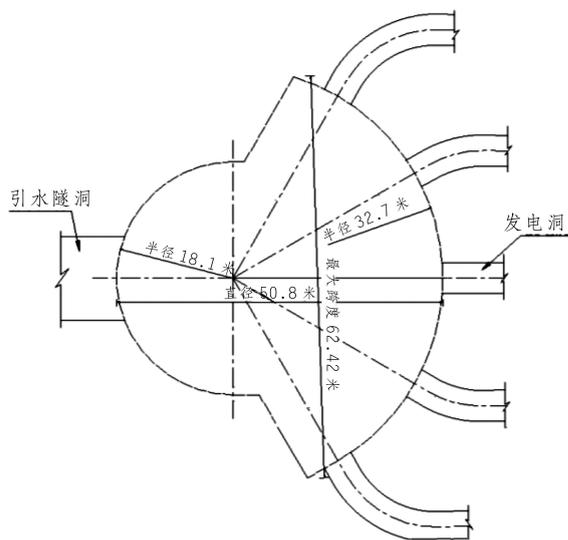


图1 调压井下部扇形结构的异形断面图

对于开敞式调压井工程开挖施工,普遍面临开挖尺寸大、穿越岩层多、地质条件复杂等问题^[5-6],不良地质条件下的围岩稳定性问题给调压井开挖和支护施工带来极大困难,对相关技术要求极高^[7-8]。调压井具有“开挖直径大、断面不规则、结构形式复杂”等特点,在开挖成型和围岩稳定控制等方面存在较大的难度。结合该工程,进行超大直径异型调压井开挖施工和稳定控制技术研究,不仅对保证工程安全、质量和进度具有重要的实际意义,同时可为类似工程提供借鉴和参考。

2 调压井开挖稳定控制技术方案及措施

2.1 调压井井口预加固

调压井开挖施工前,利用MIDAS GTS NX软件对开挖施工过程围岩变形和稳定进行了数值模拟分析,表明在调压井开挖施工过程中,井口一

定范围存在明显的塑性区,塑性区范围在6~10 m。根据分析结果,确定了对井口10 m范围内进行预固结灌浆,固结灌浆孔布置见图3,对井口3.5 m范围内按设计轮廓线扩挖50 cm后进行混凝土锁口加固,沿开挖轮廓线布置双层钢筋,混凝土强度为C25,混凝土顶部高出井口50 cm。另根据施工总体布置,在井口布置一台MG32+5-40双梁门机,在锁口混凝土施工的同时将门机钢箱梁基础一并施做。

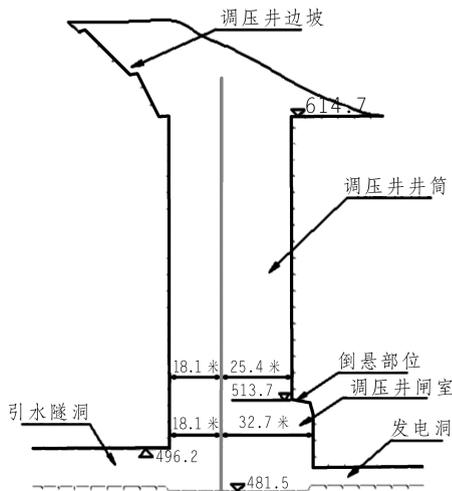


图2 调压井剖面图

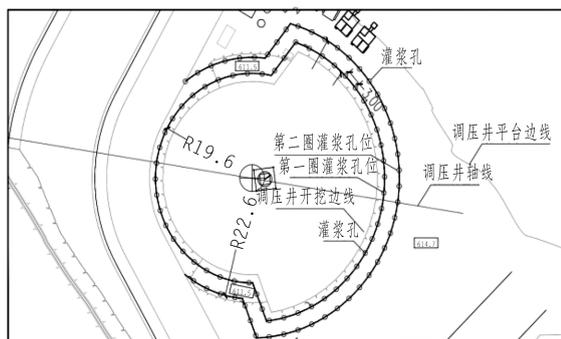


图3 固结灌浆孔布置示意图

2.2 特大断面竖井开挖分层分区规划与施工

调压井总体上采用反井法开挖,在采用反井钻机开挖出1.4 m导井后,进行导井扩挖,形成3.6 m的溜渣井,继而自上而下进行大井爆破开挖。现场施工配置1台阿特拉斯T35液压钻作为爆破钻孔设备,1台日立350作为出渣设备,1台阿特拉斯T35作为锚杆造孔设备。考虑到调压井开挖断面巨大,如采用全断面扩挖,不仅开挖工序耗时长,而且开挖暴露面积大,如支护不及时,不利于井壁稳定。因此,根据开挖支护的设备

资源配置,计算分析钻孔爆破、开挖出渣和锚喷支护各工序的施工强度及耗时,提出了调压井大井开挖的分层、分区开挖施工规划:竖井总体上按照 3 m 台阶高度进行开挖,平面上分三个相互独立的施工区域,分别进行钻孔爆破、出渣、支护施工,采用环向工序循环加纵向工序循环的方式进行开挖,调压井分区布置规划见图 4。

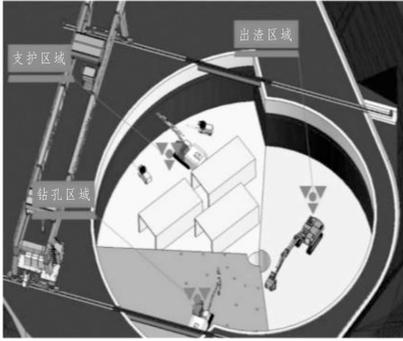


图 4 调压井分区布置规划图

同一时间三个区域分别进行钻孔、支护、出渣工序,对于单个施工区域来讲,同样遵循了钻爆→出渣→支护的施工工序循环。在一个循环完成后,三个区域进行工序转换,如此循环往复环螺旋形向下开挖。上述开挖分层分区规划实现了调压井开挖过程中的随层支护,最大程度上保证了围岩支护加固的及时性和安全性。

调压井中部梯段孔采用液压钻钻孔,钻孔孔径 $\Phi 76$ mm,间排距为 2.5 m,周边预留保护层采用小孔径光面爆破,光爆孔钻孔间距为 0.5 m。每一区完成开挖出渣后,立即转换进入支护工序,采用 $\Phi 32$ mm、 $L=9$ m 锚杆, $\Phi 6@20 \times 20$ cm 钢筋网片, C25 湿喷混凝土支护一层。上述浅孔台阶和周边光面爆破技术的采用,减小对围岩的扰动,保证了调压井成型精度和开挖施工过程中的稳定。

2.3 闸室圆弧穹顶开挖

由于闸室设置的位置和形状比较特殊,开挖、支护等施工程序安排上存在很大的困难。扩挖前对闸室倒悬部位进行预锚固,预锚固采用 T32 镀锌锚杆,长 12 m,入岩 11.9 m,共设置 5 排,间排距为 1 m。然后从闸室平面位置中部进行掏槽开挖,中部形成一个宽度约为 6 m 完整的调压井闸室临空面,由临空面环形双向递进开挖。每开挖一个循环即时采取锚喷支护直至整个闸室上部开挖支护完成后,闸室再跟随大井同时向下开挖。

由于工程属于国际工程,资源配置有一定难度,调压井部位施工未配备多臂钻等适用的钻孔设备。现场使用的 T35 液压钻机工作范围仅能满足水平到垂直向下钻孔需求,不能满足闸室顶拱锚杆凿孔需要。如采用人工搭脚手架配合手风钻造锚杆孔,支护时间过长,且不能起到及时对顶拱支护的作用。因此,通过研究,在已有的 T35 液压钻机基础上对钻臂活动关节部位进行改造,解决了向上一定角度钻设锚杆孔的难题,实现即挖即支,有利于异型闸室开挖的稳定控制。

3 调压井井壁开挖变形监测预警

调压井开挖过程中的围岩变形监测主要采用外观收敛监测,不同于平洞,竖井收敛观测存在一定的特殊性。调压井竖井开挖断面和深度较大无法采用全站仪或钢尺收敛仪进行收敛观测。因此,选用了可自动收集数据的激光测距仪,通过反射棱镜配合激光测距装置实现折线测距,用现场采集器进行数据采集,经由无线数据总线连接多个采集器与数据转换器,支持本地分析查询和通过网络发布至远程数据服务器,构成网络化自动测试系统。现场井口监控室配置一台电脑专门用于数据的收集和分析。该系统设置有报警功能,当数据变化达到设置的预警值时,发出报警信号到井壁监控室和远程访问软件上面。根据有限元分析,给出现场采用的收敛变形预警建议值为 12 mm。

对于竖井井壁变形的监测,上部Ⅳ类围岩段每隔 10 m 设置一个监测断面,下部Ⅲ类围岩段每 20 m 设置一个监测断面,共设置 7 个监测断面,每个断面采用 4 组激光测距仪。井壁收敛变形监测布置见图 5。

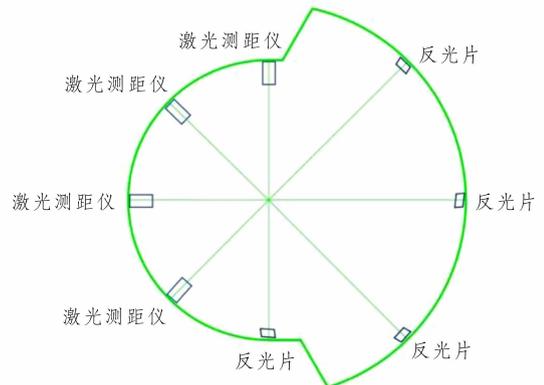


图 5 井壁收敛变形监测布置示意图

4 超大直径异形断面调压井开挖施工效果

由于采用井口预加固、浅台阶、随层支护等一系列措施,调压井开挖过程中始终保持安全稳定,现场未出现收敛变形报警的情况,施工过程中未出现任何安全事故。调压井开挖施工共进行了1

675次现场验收,一次验收合格率达到96.4%,平均超挖为12.3 cm,无欠挖;月开挖强度达到了 $3.9 \text{万 m}^3/\text{m}$,施工工期节约了45 d。调压井大断面异形轮廓结构和倒悬闸室开挖成型效果见图6。



图6 调压井大断面异形轮廓结构和倒悬闸室开挖成型效果见图

5 结语

赞比亚下凯富峡水电站调压井工程开挖断面大且不规则,结构复杂,开挖施工和稳定控制难度大,施工过程中采取了一系列工程技术措施,保证了调压井开挖成型和安全稳定。主要结论如下:

(1)有限元分析结果表明,在调压井开挖施工过程中,井口一定范围存在明显的塑性区,确定对井口10 m范围内进行预固结灌浆,对井口3.5 m范围内按设计轮廓线扩挖50 cm后进行混凝土锁口加固,以保障调压井井口和上部的围岩安全稳定。

(2)根据开挖支护的设备资源配置,计算分析各工序的施工强度及耗时,采取浅层开挖、随层支护的方法,大井扩挖时平面环向和立面纵向钻爆、出渣、支护三个工序无缝衔接,保证了开挖过程中围岩的及时有效加固。周边采用小孔径浅孔光面爆破技术,减少了爆破振动影响和围岩扰动,实现了大断面异形轮廓结构精准成型。

(3)对埋藏式闸室倒悬部位,在预加固后进行开挖,穹顶中部开槽、环向递进开挖,对液压钻机钻臂活动关节进行研究改造,解决了向上一定角度钻设锚杆孔的难题,实现即挖即支,有利于异型闸室开挖的稳定控制。

(4)选用了基于激光测距的收敛监测系统,对调压井开挖过程中的收敛变形进行实时监测和预警。由于井口预加固、浅台阶、随层支护等一系列措施的采用,调压井开挖过程中始终保持安全稳

定,现场未出现收敛变形报警的情况。

赞比亚下凯富峡调压井超大的开挖断面和“世界第一井”的特殊性,其施工安全、质量和进度获得了业主、咨询、赞比亚华人华侨总会、赞比亚总统以及当地社会等各个阶层的广泛关注和好评。

参考文献:

- [1] 王晓佳. 非洲城市化畜牧业发展概况[J]. 中国畜牧业, 2021, (14): 49-51.
- [2] Holeček J L, Cibils A F, Bengaly K, et al. Human Population Growth, African Pastoralism, and Rangelands: A Perspective[J]. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(3): 273-280.
- [3] 卢萨卡国际消费者团结与信托协会, 刘海方, 田欣, 等. 赞比亚农业发展及其对小农生计的影响[M]. 社会科学文献出版社, 2014.
- [4] Lyambai, Martin. Accelerating Energy Access Through Public-Private Partnership Investment in Zambia[J]. PAUWES Research-2-Practice Forum 2018, 2018.
- [5] 陈洪波, 张永, 成奇. 灵关水电站调压井竖井开挖施工技术[J]. 四川水力发电, 2017, 36(5): 6-8.
- [6] 冯荣球. 缅甸太平江二级水电站I调压井施工技术[J]. 红水河, 2014, (3): 19-24.
- [7] 李强. 某泵站调压井工程开挖及支护施工设计[J]. 东北水利水电, 2020, 38(4): 23-24, 41.
- [8] 刘罡. 大断面调压井施工方法优化[J]. 云南水力发电, 2018, 34(z1): 104-107.

作者简介:

Molobaly Dit Mahamadou DEMBELE(1995-),男,马里共和国人,硕士研究生,研究方向为水工结构及基础工程;

(下转第17页)

[5] Gong Fengqiang, Wang Yunliang, Luo Song. Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights [J]. Journal of Central South University, 2020, 27 (10): 2793-2821.

[6] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10):1973-1980..

[7] 魏新江, 陈涛涛, 王霄, 等. 岩爆灾害研究与进展[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2):1-12..

[8] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5):865-876..

[9] 黄润秋, 王贤能. 深埋隧道工程主要灾害地质问题分析[J]. 水文地质工程地质, 1998, (4):23-26..

[10] 谢杰辉. 岩石破裂过程的自组织临界特性及岩爆倾向性[D]. 南华大学, 2018:18-24..

[11] 冯涛, 谢学斌, 王文星, 等. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4):18-19..

[12] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(1):60-64.

[13] ZHOU Jian, SHI Xiuzhi, HUANG Rendong, et al. Feasibility of stochastic gradient boosting approach for predicting rockburst damage in burst-prone mines[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (7): 1938-1945.

[14] Kidybiński A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18 (4): 295-304.

[15] Zhou Jian, Li Xibing, Mitri Hani S, et al. Classification of rockburst in underground projects: comparison of ten supervised learning methods [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(5).

[16] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机理分析[J]. 煤炭学报, 1989, (2):57-67.

[17] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, (1):60-64..

[18] 邓林, 武君, 吕燕. 基于岩石应力应变过程曲线的岩爆能量指数法[J]. 铁道标准设计, 2012, (7):108-111.

[19] Yin Xiangchu, Wang Yucang, Peng Keyin, et al. Development of a New Approach to Earthquake Prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157 (11-12): 2365-2383.

[20] Gong Fengqiang, Wu Chen, Luo Song, et al. Load - unload response ratio characteristics of rock materials and their application in prediction of rockburst proneness[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2019, 78 (7): 5445-5466.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准 GB/T 50218-2014[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.

[22] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范. TB 10003-2016[S]. 北京: 国家铁路局, 2016.

作者简介:

唐登志(1977-),男,四川华蓥人,本科,高级工程师,主要从事高速公路项目管理工
白根铭(1992-),男,云南昆明人,硕士,工程师,主要从事高速公路项目管理工
陈爽(1993-),男,湖北荆州人,硕士,工程师,主要从事高速公路项目管理工
曲宏略(1984-),男,山东青州人,博士,副教授,主要从事岩土与地下工程方面的教学和研究工作;
李博文(1990-),男,四川达州人,硕士,主要从事岩土方面的研究工作;
蔡永灵(1998-),男,四川广安人,硕士,主要从事岩土方面的研究工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 6 页)

[8] HINTON D, HOTCHKISS R, AMES D P. Comprehensive and Quality - Controlled Bedload Transport Database[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(2), 89-93.

[9] RYAN S E, PORTH L S, TROENDLE C A. Defining phases of bedload transport using piecewise regression [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27 (9): 71-

75.

作者简介:

江雨润(1995-),男,四川眉山人,硕士研究生,主要从事泥沙输移方面的研究;
黄尔(1972-),男,四川营山人,研究员、博导,主要从事泥沙输移及河道演变规律等方面的研究.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 10 页)

姚强(1987-),男,陕西宝鸡人,副教授,博导,主要从事工程爆破、水电水利工程施工技术方面的研究;
吴钰(1996-)男,四川成都人,硕士研究生,主要从事三维激光技术在堆石坝施工中的应用研究;
王千(1992-)男,四川达州人,本科工学学士,工程师,主要从事

水利水电工程施工;

陈星艮(2000-)男,四川乐山人,硕士研究生,主要从事水工结构工程研究;
李洪涛(1979-),男,湖北仙桃人,教授,博导,主要从事工程爆破、水电水利工程施工技术方面的研究.

(责任编辑:卓政昌)