

500 m 级超深竖井开挖方案的比选与施工

唐 雄，代 强

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川 成都 610066)

摘 要:在水电工程领域,500 m 级超深竖井工程极为少见,而对于 500 m 级超深竖井的开挖施工,目前还没有一个完全成熟的施工技术和经验可供借鉴。通常竖井可选的开挖方案主要有反井法、正井法、正反井相结合开挖法等。因此,如何合理地选择竖井开挖方案是保证竖井施工安全、施工质量、施工进度的重要前提之一。以中东抽水蓄能电站 500 m 级竖井工程为例,介绍了超深竖井开挖方案的比选与施工,可为今后类似竖井工程施工提供参考。

关键词:500 m 级;超深竖井;开挖方案;比选与施工

中图分类号:TV7;TV52;TV51;TV554

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2019)03-0049-03

Selection and Construction of Excavation Scheme for 500m Ultra-Deep Shaft

TANG Xiong, DAI Qiang

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610066)

Abstract: In the field of hydropower engineering, 500m ultra-deep shaft engineering is very rare. However, there is not a fully mature construction technology and experience for the excavation of 500 m ultra-deep shaft. Usually, the main alternative excavation schemes of the shaft are the reverse shaft method, the normal shaft method and the combination of the normal and reverse shaft methods. Therefore, how to reasonably select the excavation scheme of the shaft is one of the important preconditions to ensure the safety, quality and progress of the shaft construction. Taking the 500m shaft project of Middle East Pumped Storage Power Station as an example, this paper introduces the selection and construction of excavation schemes for ultra-deep shaft, which can provide reference for similar shaft construction in the future.

Key words: 500 m grade; ultra-deep shaft; excavation scheme; selection and construction

1 工程概述

中东抽水蓄能电站(以色列克卡夫哈亚邓抽水蓄能电站)是中国电建在发达国家高端市场斩获的首个 EPC 水电项目,该工程具有地质条件复杂、工期紧、质量要求高等特点。电站由上水库、输水系统、地下厂房系统、下水库及地面开关站等组成,总装机容量 344 MW。该电站引水竖井和引水调压井垂直方向在一条直线上,上部调压井深 69.46 m,高压竖井深 438.14 m,竖井总深度为 507.6 m。高压竖井上下弯段分别与引水上、下平洞相接,调压井上部 14.6 m 开挖支护后直径为 18.1 m,衬砌后直径为 16.1 m;下部 54.86 m 开挖支护后直径为 15.6 m,衬砌后直径为 14 m;高压竖井开挖支护后直径为 5.2 m,钢衬内直径为 4 m。竖井开挖支护型式包括系统锚杆、挂网喷混

凝土、钢格栅等。

引水竖井处地质条件极为复杂,调压井岩体以Ⅳ、Ⅴ类围岩为主,其中Ⅱ、Ⅲ类围岩占比约 40%,Ⅳ、Ⅴ类围岩占比约 60%。高压竖井以Ⅳ类围岩为主,其中Ⅱ、Ⅲ类围岩占比约 35%,Ⅳ、Ⅴ类围岩占比约 65%,且高压竖井Ⅳ、Ⅴ类围岩均存在挤压变形。引水竖井布置在玄武岩、火山碎屑岩互层地层(bs+pyr)、玄武岩地层(bs)、角砾岩和集块岩混合地层(cgl)、火山碎屑岩地层(pyr)、泥灰土地层(Marl)及粘土层(Clay)等地层。

2 可选开挖方案论述

根据引水竖井的地质情况、结构布置及施工条件,初选方案有反井法、正井法、正反井相结合的施工方法。笔者分别介绍于后。

2.1 反井法施工分析

收稿日期:2019-05-08

反井法施工方案是在调压井顶部采用反井钻机先施工导孔,待引水下平洞开挖至引水竖井底部后,将反井钻机钻头更换为扩孔钻,然后自下而上进行导井施工;导井施工完成后,再利用导井作为溜渣井进行调压井上部 7 m 的开挖,浇筑锁口混凝土,安装井口载人提升系统和井口门机(用于井内吊运材料),最后自上而下进行竖井爆破扩挖及支护的施工方案。

2.2 正井法施工方案

深竖井正井法施工在水电行业极为少见,而在煤矿行业,深竖井均采用正井法施工,是传统的矿山竖井施工方法,该方法可以实现边开挖、边衬砌,是一种快速施工竖井的方法。

正井法施工方案是先进行调压井上部 7 m 开挖,浇筑锁口混凝土,然后继续开挖调压井至 14.6 m,再进行调压井大井 14.6 m 结构混凝土衬砌施工,安装“正井法”提升系统及配套设备,利用正井系统自上而下进行调压井下部开挖,调压井开挖完成后进行调压井下部的衬砌施工。调压井开挖及衬砌施工完成后,再利用正井系统自上而下完成高压竖井的开挖及支护施工。

2.3 正反井相结合的施工方案

正反井相结合的施工方案是先采用正井法进行调压井上部 7 m 开挖,浇筑锁口混凝土,然后继续调压井开挖至 14.6 m,再进行调压井大井 14.6 m 结构混凝土的衬砌施工,安装井口载人提升系统和门机(用于井内吊运材料)。提升系统形成后,再自上而下进行调压井下部小井的开挖及衬砌施工。在引水下平洞开挖至引水竖井底部之前,将反井钻机吊至调压井底部先施工导孔,待引水下平洞开挖至引水竖井底部后,将反井钻机钻头更换为扩孔钻,然后自下而上进行导井施工,最后利用导井作为溜渣井自上而下进行高压竖井的爆破扩挖及支护的方案。

3 三种开挖方案之对比分析

根据上述 3 种方案,项目部从施工可行性、施工安全性、施工难度、施工优缺点、施工工期、施工费用等方面进行了对比分析,分析成果见表 1。

4 开挖方案的选择与施工

根据对上述方案进行的综合比较和分析,项目部将正井法施工方案作为首选方案向业主进行了申报并通过了业主工程师的审批。目前,中东

抽水蓄能电站引水调压井上部大井 14.6 m 的开挖及衬砌已完成,正井提升系统业已安装完成并投入使用。

4.1 开挖施工程序

引水竖井开挖施工程序为:施工准备→调压井上部 7 m 井挖→调压井锁口混凝土施工→调压井井挖至 14.6 m→调压井上部 14.6 m 结构混凝土衬砌→正井法提升系统安装→调压井下部小井开挖→调压井下部小井混凝土衬砌→高压竖井开挖。

4.2 开挖施工

4.2.1 调压井施工

(1)调压井上部施工。

调压井大井高度为 14.6 m,分为两部分施工。先施工锁口段开挖及支护施工(7 m),再进行锁口段混凝土衬砌施工,最后进行调压井大井剩余部分施工(7.6 m)。

由于该引水竖井位于该国国家森林公园,同时受调压井边高压线塔的影响(距调压井约 30 m),调压井大井开挖只能采用机械开挖的方式施工。调压井上部 7 m 属于半挖半填,其施工方法是先用液压锤分台阶凿挖,分层高度为 1 m,每层凿挖后再采用液压反铲装自卸汽车运至渣场,开挖高度达到 2 m 时作为一个开挖循环进行支护,直至开挖完成。

当锁口混凝土衬砌完成后,调压井大井下部 7.6 m 的开挖是采用吊车将液压锤吊至井内进行全断面分层凿挖,分层高度为 0.5 m,出渣由井内反铲装 3 m³ 吊桶、然后采用吊车提升吊桶出渣,每开挖 2 m 高度进行一次支护。调压井大井开挖的施工人員上下井利用井壁上设置的爬梯,施工设备、材料的井内吊运采用吊车。

(2)调压井下部施工。

调压井上部大井施工完成后,进行正井法提升系统的安装,经当地工程师验收合格后投入使用。调压井小井开挖支护后直径为 15.6 m,分为 3 个区进行光面爆破施工,开挖循环进尺为 2 m,开挖钻孔采用 T35 液压钻机、YT-28 手风钻钻孔,人工装药联网爆破;出渣采用小型液压反铲配合正井系统抓岩机装吊桶出渣。调压井小井施工人員上下井利用载人提升系统上下,施工设备的吊运采用吊车,施工材料的运送采用载物提升系统。

表 1 中东抽水蓄能电站引水竖井开挖方案对比分析表

序号	对比项	反井法	正井法	正反井相结合法
1	施工可行性	经查阅国内外竖井施工文献,国产反井钻机无 500 m 级竖井施工实例,国外类似工程 CCS 电站竖井工程采用 RHINO1088DC 反井钻机施工,钻机性能参数显示其偏斜率 $\leq 0.5\%$ 。而该工程竖井深 507.6 m,开挖支护后的直径为 5.2 m,且竖井地质条件极差,存在挤压变形段,导孔偏差控制难度极大,故反井法施工可行性低	该工程拟引进矿山正井法施工技术,该技术应用于超过 500 m 级竖井的实例较多,是一项成熟的施工方法,故正井法施工可行。例如:(1)近年建成的甘肃兰州水源地通气井工程,井深 649.465 m,直径 6 m,最高月进尺 153 m;(2)江门中微子实验站配套基建竖井工程,井深 611.3 m,直径 6.2 m,平均进尺 3 m/d 以上	该方案是调压井采用正井法施工,高压竖井采用反井法施工。虽然缩短了竖井高度,但 400 m 级竖井反井法施工仍不多见,其导孔偏差控制仍存在较大的难度,故可行性较低
2	施工难度	反井法施工的难度主要体现在两个方面:(1)导孔偏差控制;(2)导井过深且地质条件复杂,导井易出现堵井、塌井情况,一旦出现堵井、塌井,处理难度极大,甚至无法处理,不仅会造成工期延误,而且会造成重大损失	正井法自上而下施工,不受竖井下部通道等条件制约,施工易把控,且该法系统设备比较成熟,施工难度较低	调压井正井施工,采用门机作为提升系统出渣,出渣施工较困难;正反井相结合法与反井法存在同样的问题
3	施工安全性	该工程地质条件极差,在开挖过程中,如果导井口出现塌井易造成安全事故,安全性较低	正井法施工是开挖一个循环,支护一个循环,施工人员均在安全的情况下施工,安全性较高	高压竖井施工同样采用反井法,安全性较低
4	施工工具的优点	施工具有的优点:出渣较方便,可直接通过溜渣井将爆破渣料溜至引水下平洞,然后采用装载机装渣,自卸汽车运至渣场。施工具有缺点:(1)需要将引水下平洞开挖至竖井底部后才能进行导井扩孔,竖井施工时间较晚,加之地质条件较差,施工工期不能保证;(2)导井施工难度大	施工具有的优点:(1)机械化程度较高,工序可控,爆破钻孔采用伞钻,装渣采用中心回转抓岩机,出渣采用矿用绞车提升吊桶;(2)系统设计有悬吊模板,可采用混凝土初衬代替喷混凝土,施工效率较高;(3)施工进度快,根据国内类似竖井工程,月平均进尺在 90 m 以上	调压井施工具有的优点:因调压井正井开挖采用 32 t 门机吊吊桶出渣,速度较慢且出渣较困难,影响施工效率。调压井施工具有的优点同反井法施工
5	施工工期	根据类似工程施工经验,估算导井扩孔需时约 2 个月,调压井开挖、锁口混凝土及提升系统安装工期 10 个月,高压竖井开挖工期约 11 个月,总工期约 23 个月。而合同工期仅为 20 个月,故反井法不满足合同工期	根据类似工程施工经验,估算调压井开挖、锁口混凝土及正井系统安装工期约 11 个月,高压竖井开挖工期约 6 个月,总工期约 17 个月。正井法施工工期满足合同工期要求	根据类似工程施工经验,估算调压井开挖、锁口混凝土及提升系统安装工期约为 10 个月,高压竖井开挖、导井扩孔 1.5 个月,开挖工期约 9 个月,总工期约 20.5 个月。而合同工期为 20 个月,反井法不满足合同工期
6	设备投入费用	考虑设备投入的费用,需要配置进口型 RHINO1088DC 反井钻机、门机、载人提升系统,进口钻机约需 2 500 万元,门机约 80 万元,载人提升系统 100 万元,总费用约 2 680 万元	根据国内类似工程正井系统建造费及国外的运输、验收等费用,估算总费用约 1 000 万元。	考虑设备投入的费用,需要配置进口型 RHINO1088DC 反井钻机、门机、载人提升系统、进口钻机约需 2 500 万元,门机约 80 万元,载人提升系统 100 万元,总费用约 2 680 万元
7	分析结论	方案可行性低,成本偏高	方案可行,成本相对较低	方案可行性较低,成本偏高

4.2.2 高压竖井的开挖施工

调压井开挖及衬砌施工完成后,利用井口布置的正井提升系统进行高压竖井的开挖。高压竖井的开挖采取全断面光面爆破开挖,将Ⅲ类围岩的进尺控制在 4 m 以内,Ⅳ类围岩的进尺为 2 m。爆破孔采用 SFJ4.5 型伞钻钻孔,人工装药光面爆破, HZ—6 中心回转抓岩机装 3 m³ 吊筒, JK—3 ×2.5 提升机提升吊桶出渣,最后采用人工清底,渣石升井经溜渣槽落地后,再由装载机装自卸汽

车运至弃渣场。为了加快施工进度,充分发挥矿用正井提升系统的优势,采用混凝土初衬代替喷锚支护。其施工流程:先钻孔爆破开挖第 1 个循环,然后进行第 2 个循环爆破不出渣,利用正井系统将整套钢模板落在第 2 个循环爆渣上进行第 1 个循环混凝土衬砌,衬砌完成后进行第 2 个循环出渣及第 3 个循环爆破不出渣、第 2 个循环衬砌等,依次循环施工。

(下转第 70 页)

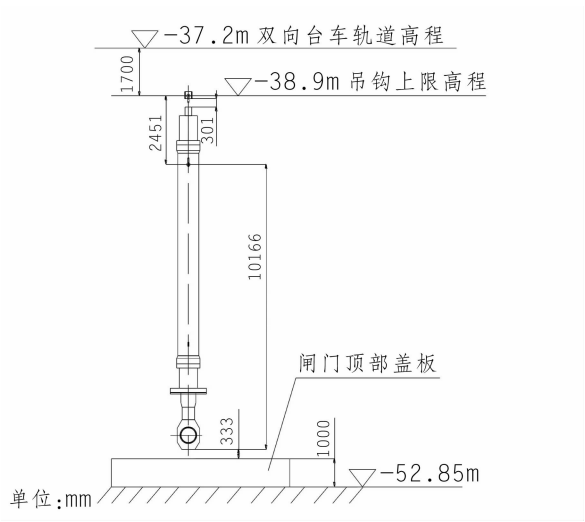


图5 吊具尺寸和高度校核图

钢丝绳连接平衡梁与启闭机,然后在-52.85 m 高程平台的集水坑上铺设两根 36# 工字钢,作为启闭机竖立旋转的支撑点,操作双向台车进行吊钩起升和大车行走,将启闭机从平躺状态翻转至竖立状态。启闭机翻转竖立情况见图 6。

(4)启闭机吊装就位以及与闸门顶部盖板的连接。

启闭机翻转至竖立状态后,起吊启闭机至闸门顶部盖板上方,调整好启闭机方位,下落就位至顶部盖板上,安装与顶部盖板的连接螺栓,解除钢丝绳与启闭机吊耳的连接,完成吊装工作。

4.3 液压启闭机与闸门的连接

启闭机与闸门的连接通过短拉杆进行,在闸门顶部盖板安装前,将短拉杆吊装与闸门进行连

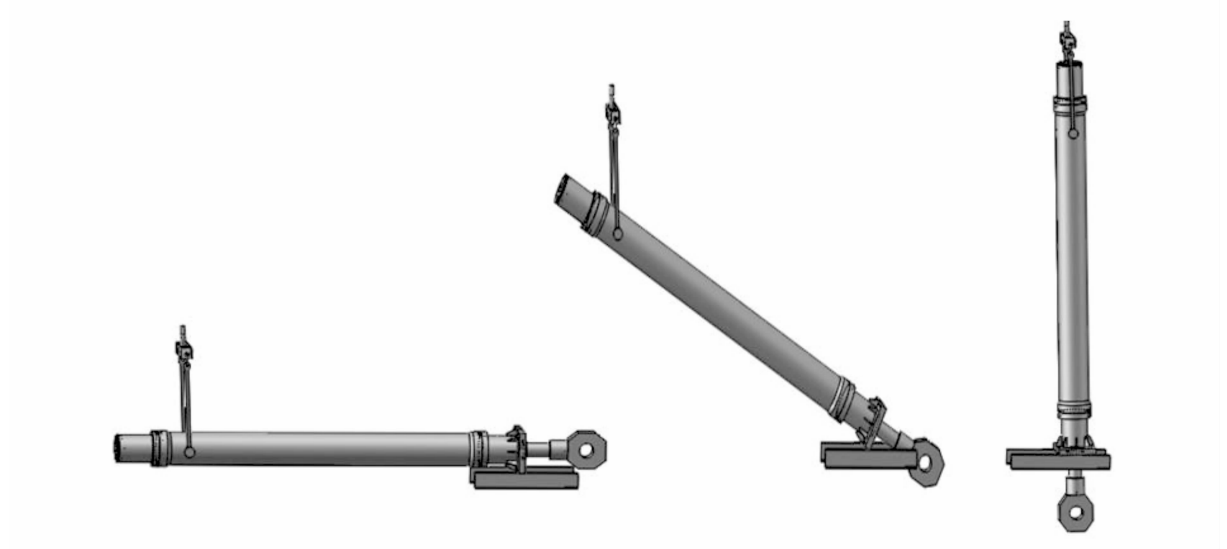


图6 启闭机翻转竖立示意图

接并临时支撑固定,待启闭机安装完成后,将启闭机活塞杆伸出与短拉杆进行连接。

5 结 语

笔者针对江苏溧阳抽水蓄能电站尾水闸门启闭机的布置和结构特点,合理制定了运输方案和启闭机安装工艺,采用 30 t 载重汽车运输和平衡

梁单钩翻身吊装技术,使启闭机顺利、安全地运输到位并安装完成,所取得的经验对类似的启闭机安装具有一定的借鉴意义。

作者简介:

陈林(1977-),男,重庆江北人,高级工程师,从事水电站机组安装与金属结构制作技术工作。(责任编辑:李燕辉)

(上接第 51 页)

5 结 语

深竖井的开挖施工历来是一个难题,其施工方案的选择尤为重要。通过比选分析,该工程选用国内成熟的正井法施工技术获得了业主的高度认可;同时,该工程也是国外水电项目首次采用

“正井法”施工的深竖井。

作者简介:

唐雄(1978-),男,四川成都人,项目经理,高级工程师,从事项目管理工作;
代强(1982-),男,河南信阳人,项目副总工程师,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工

(责任编辑:李燕辉)