

水利水电引水隧洞竖井开挖及支护施工技术

李浩

新疆水发建设集团有限公司，新疆昌吉，831899；

摘要：水电站引水隧洞竖井开挖内容包括上、下弯段及垂直段的挖掘，但由于竖井施工断面小、安全风险高以及工作环境受限等给工程带来很大的困难。因此，在实际工作中为确保水电站引水隧洞竖井的施工质量，要充分发挥当前的科学技术的优势，实现安全施工、质量和进度目标。本文基于相关实例对引水隧洞竖井开挖及支护施工技术进行针对性地研究，以期为相似工程建设提供参考。

关键词：水利水电；引水隧洞；竖井开挖；支护

DOI：10.69979/3060-8767.25.04.017

引言

随着社会主义市场经济的快速发展，对水利水电工程施工的安全性与稳定性提出了更为严格的要求，但由于施工条件的复杂性，如水电等大型工程中引水隧洞竖井开挖对施工及运营质量产生显著影响，因此相关施工人员必须基于具体工程项目进行考量，即在明确水电站引水隧洞竖井施工技术要点的基础上探索实施最佳控制方法与策略，对于保障水电站所在地区现代经济建设的稳定发展具有重要意义。

1 工程概况

某水电站共设计并实施 8 条引水隧洞，单洞长 526~583m，累计总长度 4412m。每个引水隧洞由上平段、上弯段、竖段、下弯段、下平段、渐变段及钢衬段构成，洞间轴线间距为 22~26m，开挖直径范围为 12.2~8.5m，洞间岩柱间距 9.8~15.8m，引水隧洞布局设计如图 1 所示。引水隧洞竖井的开挖截面呈环形结构，开挖除竖直断面外，还包括上部和下部的局部断面。竖井开挖深度为 80.47~87.85m，岩石类型主要为 II~III 型，以砂岩和砂泥岩为主。

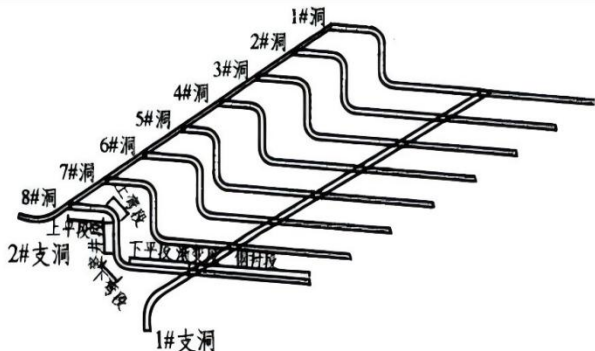


图 1 水电站引水隧洞布置

2 引水隧洞竖井开挖方案

为优化工程设计，导井布置于竖井中轴线。引水隧洞的上、下弯段均为 85°，坡度陡峭，反井钻机平台设于上弯段。根据 LM200 反井钻机尺寸及操作空间，选用 4.5m 施工高度的反井钻机并进行技术超挖^[1]。隧洞弯段施工设备的回转半径、动臂长度、高度、爬坡能力及建筑钢平台高度等因素分析后，提出两种施工方案：方案一。隧洞开挖至上弯段后，下部台阶坡度降低 30%，弯段上部适当扩挖；方案二。上台阶开挖至距离弯段 14m 处，下部按 25%斜率降坡，上游弯段起点后 37m 与竖井轴线相交位置，向下挖出 7.58m×3.8m×4.2m 的孔洞供反井钻机施工。

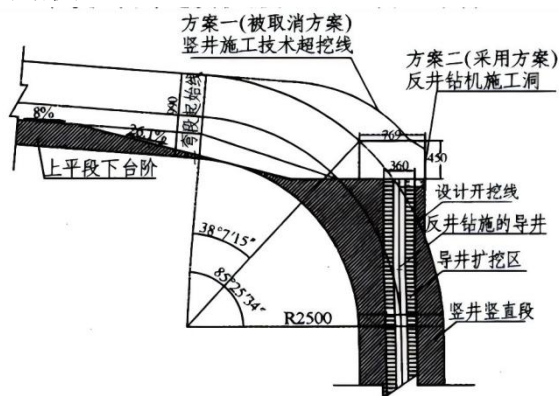


图 2 水隧洞上弯段及竖井导井开挖示意图

方案 1 与方案 2 的比较如表 1 所示。

表 1 方案 1 与方案 2 比较

项目	方案 1	方案 2
上弯段开挖	上拱段弧形较小，单圈爆破进尺较大且便于施工，有效缩短工期	由于上拱段弧度较大，反井钻孔洞径较窄，难以进行，爆破单循环进尺短，开挖量大，因此与方案 1 相比慢 3d。
技术超挖量	每条洞超挖量大，约 450m ³	每条洞超挖量相对小，约 100m ³

对竖井施工的影响	弯段底高窄给反井钻机运输、安装和布置带来困难;竖井施工中提升系统、风水电系统、喷护设备安装施工、竖井平台布置有限、物料运输困难;上弯段底部扩挖时,机械利用率低,人工扒渣多。	弯段底大,便于反井钻井设备建设导向井;竖井辅助系统布置和物料运输便利;上弯段扩挖时,反铲可将抛渣导入导井,减少人工扒渣,提升竖井安全性。
----------	--	--

在 8 号隧洞上弯段开挖中最初采用方案 1,优化后改为方案 2。虽然方案 2 在上弯段和反井钻机施工上耗时较长,但在后期竖井施工的便捷性、减少超挖量和提高效益方面有明显优势。根据方案 2 研究上平断面下台阶段施工对竖井施工的影响,由于上平段间距小、施工周期短,后续开挖阶段竖井空间更宽敞、坡度更平缓,提高了施工设备的作业效率并为附属体系建设提供了便利,同时减少了超挖量,若上部水平段较长,可从中部开始施工,预留长平缓斜坡,为竖井建设提供空间。

3 引水隧洞竖井开挖机械与施工工艺

3.1 引水隧洞竖井开挖机械

该工程使用 LM-200 型反井钻机。钻机包括主机、操作车、泵站、钻具、泥浆循环和冷却系统,泵站主油泵 75kW,辅油泵 7.5kW,泥浆泵为 90kW,冷却系统循环量为 $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。该钻机最大钻探深度为 316m,适用于 $1.4 \sim 2 \text{ m}$ 的工程化钻探。

3.2 引水隧洞竖井开挖施工工艺

反井钻机用于钻孔导井,工作原理是自上而下钻入导孔,与下部巷道贯通后再扩大钻孔至 1.5m 直径。施工包括建立施工孔、C25 混凝土灌注、安装反井钻机、钻孔锚固钢筋灌注、系统调试、治理断裂破裂区、拆除导孔钻头并扩大钻孔。

在反井钻机施工中应注意以下事项:第一,实施防斜措施并对导向孔的倾斜度进行有效控制,在测斜过程中对导向钻孔的倾斜度进行测定。第二,采用导向钻孔法对断层部位进行处理,钻孔到达断裂部位后增加循环流量,清洗断裂内的粘土,提起钻孔进行注浆:使用水灰比为 2:1 的泥浆进行注浆,逐步增加泥浆密度直至 0.5:1 停止注浆;随后再次钻进导向孔^[2]。通过全部断层及影响带后将钻具抽出,采用 1:1 水泥浆体灌注全钻孔,以加强地层稳定性,堵塞局部地层涌水并持续钻进。

鉴于反井钻机具备安全可靠、高施工效率、高施工质量、操作简便性能够降低工作人员的劳动强度的优点,具有综合效益,因此在隧洞竖井施工中得到广泛应

用。该水电站引水隧洞,在硬岩(灰色砂岩,硬度 240 MPa)、砂页岩互层、断层破碎带发育的条件下 8 条竖井的平均导井钻速为 0.65m/h,平均导井偏斜率为 0.26%。竖井开挖直径 9.6m/10.2m,导井直径 1.5m。4 号竖井上弯段扩挖时两个导井堵塞,调查分析排除了炮孔间距过大导致堵塞的可能性,分析堵塞原因是全断面漏斗式扩孔施工中大块及炉渣滑落,导井尺寸不足导致挤压堵塞^[3]。传统扩孔方法如直孔或小斜度钻孔爆破会增加剥岩量和施工风险,综合评估后决定采用扩大导井的施工方法如图 3 所示。

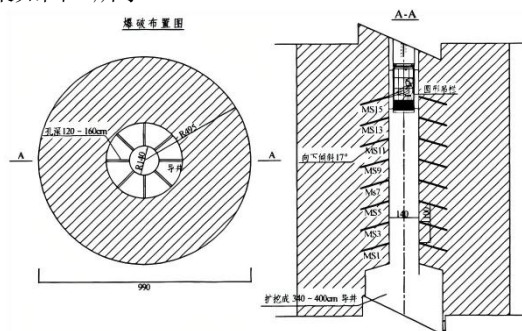


图 3 竖井导井自下而上扩挖钻爆示意图

在反井钻机施工中构建导井壁较为平整,通过自下而上的爆破方式实施扩孔作业更为安全,该方法无需进行挖掘渣土和支护作业可直接将爆破产生的渣土倾倒入至下弯断面。基于此,采用天锚与卷扬机组成的吊装系统,针对直径为 $\Phi 1.5 \text{ m}$ 的导井进行专门的导向井扩孔施工^[4]。对于爆破孔采用辐射状中心布置,横向倾斜 17° ,炮孔直径 43mm;根据岩体特性,每排 $8 \sim 10$ 个炮孔,上下层间距 $0.7 \sim 1.2 \text{ m}$;孔深 $110 \sim 150 \text{ cm}$ 时,先用短钻杆扩孔后用长钻具钻进;钻孔完成后装入 $\Phi 32$ 卷装乳化炸药的无电毫秒雷管,采用微差次序引爆技术,排间由下而上用非电雷管微差连接 8 排,通过导爆装置传递至导井口;将 $\Phi 1.5 \text{ m}$ 导向井扩增至 $\Phi 3.5 \sim 4 \text{ m}$ 。为防止 $\Phi 1.5 \text{ m}$ 狭窄空间中,起爆网络损坏,提出孔内高位雷管、孔外低位雷管方案,依次引爆。该水电站引水隧洞扩挖工程中开挖高 82m 竖井导井,工期 $4 \sim 5 \text{ d}$ 。将竖井中部导向井扩大至 $\Phi 3.5 \sim 4 \text{ m}$,改造成 36% 漏斗形,达到原设计截面;大尺寸导向钻孔增加爆破自由空间,炮眼爆轰率提升至 95% 以上;引井数量增加,结合岩体条件,炮间距增大至 2.6m 或 3.6m/排(原 2m/排)。爆破后大部分爆渣下滑至下部弯道,人工扒渣时间缩短至 3h。实施上述措施后有效弥补扩挖损失、缩短单竖井施工周期,减少材料消耗。

4 竖井全断面扩挖

在完成竖井导井扩挖后随即启动全断面扩挖工程并同步推进相关配套设施的建设工作,配套设施包括竖井平台、井盖、钢梯、休息平台以及风水电系统的安装与喷护管道的延伸等。

第一,测量作业。在对上下弯断面进行扩挖作业时,利用全站仪进行精确测量并对开挖后的超欠挖情况进行严格检测。竖直截面半径预先设定,因此只需确定中轴线,随后吊铅垂线。

第二,钻爆作业。在完成测量并确定开挖线路后随即开展爆破作业,爆破设备首先通过工具篮降至施工面覆盖导向井,施工人员通过铁梯抵达作业面。为确保爆破后炮渣能自然排出导向井,水电站竖井使用漏斗式开挖技术,即沿竖井周边向圆心倾斜 35° ,便于爆破后炮渣自动下漏至导井;将 $\phi 25$ 、 $\phi 32$ 规格的乳化炸药装填入导爆索孔中,装药量为 10g/m ;采用自顶向下的作业方式并利用非电导爆管在排群之间实施微差爆破。

5 支护施工方法

采用直径为 20mm 锚索,总长度为 2.3m ,其中 1.87m 嵌入岩石内部,锚杆的布置间距为 $1.4\text{m}\times 1.4\text{m}$ 。挂网混凝土的强度等级为C20,厚度为 10cm ,配合使用直径为 6mm 、网格间距为 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ 的钢筋网。

5.1 锚杆施工

锚杆施工过程中钻孔直径需较锚杆直径大 15mm ,应遵循“先注浆,后插杆”的施工技术流程。第一,钻孔。运用测量仪器在基坑周边依据设计间距进行定位放样,钻孔完成后采用气压法清理孔道并进行检查,确认无误后孔口应暂时封闭。第二,注浆。依据实验室提供的配比方案,配制M20级注浆材料,确保每次搅拌的砂浆必须在短时间内使用完毕,同时需避免混入石块及其他杂质。在钻孔灌注完成后立即插入锚杆且在水泥未凝固前严禁进行敲打、碰撞或拉拽^[5]。

对锚杆锚固质量进行非破坏性检测,确保各施工区域的锚固长度检验比例不低于 5% 且不得少于设计规定的长度。每 100 个工作区域应至少进行一次检测,检验

砂浆的密实度(最多 3 个样本),确保锚注物的密实度不低于设计要求。

5.2 混凝土喷射施工

喷射施工前清理喷射面,包括移除浮岩、石渣等并补充开挖未达标的区域;用高压风水冲洗喷射面;喷射混凝土应自下而上进行,保持稳定气压和连续物料供应,喷射混凝土终凝 2h 后及时进行洒水养护并保证至少 7d 湿润养护。

喷层厚度用钻孔法检测,需多个部门联合检验,喷射混凝土强度检测依据规范现场取样后送实验室分析。

6 结论

为应对岩屑沉降导致的阻塞问题,在水电站引水隧洞竖井施工过程中需依据施工具体情况,实施增大导井直径的策略。此外,针对测量、爆破及支护等环节,也应采取适宜的措施以降低不良地质条件对隧洞开挖施工的影响。水电站引水隧洞开挖中应加强工程现场调研,实施针对性的施工管理与控制措施,确保工程免受周边环境影响。

参考文献

- [1]李一樊.引水隧洞取水口闸门竖井开挖和支护施工技术[J].工程机械与维修,2021,(05):84-85.
- [2]杜红亮,常小兵,傅鹤林,等.深大竖井开挖稳定性数值模拟分析[J].科技通报,2024,40(09):93-98.
- [3]任浩亮,田永轩,兰雯竣,等.“深孔逆爆法”在开挖竖井施工中的研究及应用[J].价值工程,2024,43(26):96-99.
- [4]赵国栋.水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的运用[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(15):215-217.
- [5]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,(05):23-25+48.

作者简介:李浩,(1994.02-),男,汉族,四川中江人,本科,助理工程师,从事研究方向:水利水电。