狭窄陡峻库盆抽水蓄能电站高效开挖施工技术研究

陈彩霞

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘　要】：抽水蓄能电站多选址于高山峡谷区域，特殊的地形地貌致使库盆开挖施工普遍存在地形狭窄陡峻、地质环境复杂多变、作业空间受限、高边坡施工风险突出等诸多施工难题，极大制约工程施工质量、进度与安全管控。本文以河南辉县九峰山抽水蓄能电站下水库工程为实际研究载体，针对性整合并应用无人机航空摄影测量影像快速处理、库盆边坡瘦身开挖、高陡边坡免脚手架快速支护、填筑料爆破直采、连续缓边坡建基面控制开挖一系列成套高效施工技术。工程实践结果表明，多项创新施工技术的集成应用，有效攻克了狭窄陡峻库盆的施工痛点，显著提升库盆开挖施工效率，大幅降低高陡边坡高空作业安全风险，精准把控工程施工成本，全方位优化工程施工效益。研究成果能够为国内同类型复杂地形条件下抽水蓄能电站库盆开挖工程的施工优化、技术落地提供可靠的实践参考与技术借鉴。

【关键词】：抽水蓄能电站；狭窄陡峻；库盆；高效开挖；施工技术

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.037

1 引言

相关数据统计，截至 2023 年底，我国已投运抽水蓄能装机规模达 5094 万 kW，核准在建规模约 1.5 亿 kW[1]，到“十四五”末，全国抽水蓄能运行装机容量超过 6600 万 kW[2]，行业发展势头强劲。而抽水蓄能电站的规划选址受到补给水源、地形地貌等诸多自然条件的严格制约。在补给水源得以保障的前提下，经济水头与距高比成为决定电站建设经济性与布置可行性的关键指标，正常情况下距高比一般在 3~10 之间，越小越好[3]，越小通常意味着输水系统投资越省，但过小的距高比必然要求上、下水库相距极近，工程结构高度集中，因此场址一般选在地形落差显著的高山峡谷区域。此类地形具有山体高差悬殊、岸坡陡峻、沟谷狭窄等典型特征，给库盆开挖施工带来极大困难。在无特殊约束条件下，施工单位采用常规爆破开挖工艺虽可完成库盆开挖作业，但施工效益与成本控制空间有限。为在激烈的市场竞争中获取合理收益，施工单位往往需要积极引入先进施工技术以降低工程成本、提升综合效益。因此，在复杂地形条件下如何科学选择并优化施工技术方案，实现工程质量、安全、进度与成本的多目标协同最优，已成为抽水蓄能电站建设领域亟待深入研究的重要课题。

2 工程概况与施工难点

2.1 工程概况

河南辉县九峰山抽水蓄能电站位于新乡市辉县市黄水乡境内，是河南省目前在建装机容量最大的抽水蓄能电站，其下水库库盆整体处于狭窄陡峻的沟谷中，地形条件极为苛刻。电站下水库库盆边坡最大开挖高度 135 m，环库道路以下 40m 边坡一坡到底、坡比 1：1.7，坡面斜长 68m，施工难度极大。

2.2 地形地质条件与施工难点

库坝区地势西南高、东北低，平均比降 14%，河谷蜿蜒曲折，宽窄不一，局部呈“一线天”，谷底宽 3～70m。冲沟羽状分布，短浅且近垂直河谷。坝址河床近东西向，左岸坡度 15°～30°（下陡上缓），右岸 470m 以下 15°～30°、以上 60°～75°；库盆左坡 30°～50°，右坡 35°～60°，局部有近垂直陡壁。这种地形及设计方案虽有利于减少工程占地和投资，却给施工带来了极大挑战，具体如下：（1）68m 斜坡一次钻孔深，地质变化易漂孔，致孔斜偏差，预裂钻孔精度难以保证；（2）高陡边坡采用传统双排脚手架支护用料多、工期长，高处作业风险高。（3）场地狭窄，开挖、支护、出渣相互制约，多工序交叉组织困难。（4）料源管理与成本控制要求高，需爆破直接产出合格填筑料，减少弃渣及二次倒运。

3 关键技术研究与应用

3.1 无人机航空摄影测量影像数据快速处理技术

传统测量方式外业主要依赖全站仪或 RTK 进行人工数据采集，不仅工作繁重、耗时费力，在地形复杂区域更面临采集困难与安全风险突出的问题。内业

作者简介：陈彩霞，女（1985.03-），甘肃张掖人，中国水利水电第十一工程局有限公司，工程师，从事水利水电工程管理工作。

则采用等高线法、断面法及方格网法计算土石方量，计算效率相对较低。而下水库库盆施工中需多次测量以满足土石方平衡计算要求，传统方法无法在短期内完成数据获取，直接影响施工进度。为此，本工程引入无人机航空摄影测量与三维实景建模技术。以无人机为搭载平台，集成激光扫描、惯性导航与全球定位系统，对地表进行快速、大面积、非接触式扫描，直接获取高精度三维坐标信息；结合三维浏览软件实现实景模型的快速加载、显示与标注分析。该方案有效突破地形条件限制，显著提升了外业采集与内业处理效率。现场应用表明，该技术大幅减轻了测量外业工作量，单次测量时间较传统方式显著缩短，在多次重复数据采集中均能稳定高效输出成果。通过快速生成库盆各阶段开挖与填筑工程量数据，为土石方动态平衡计算提供了高精度、高时效性的可靠支撑，有效指导了施工组织与料源调配。同时，该方案避免了复杂地形下的人工涉险作业，切实保障了下水库施工进度与作业安全，成功解决了传统方法精度不足、效率低下及安全风险突出等问题，在本工程中展现出良好的适用性与推广价值。

3.2 库盆边坡“瘦身”开挖技术

针对本工程场地狭窄、岸坡陡峻、作业面受限的施工特点，传统库盆开挖多采用先支护后开挖、自上而下分层逐序施工的固化模式。该工艺各核心工序依次推进，无法开展平行交叉作业，工序衔接间隙长、等待耗时久。受狭小沟谷空间制约，现场设备布设、施工通行、物料及渣料转运均受限，各工序相互干扰严重，整体施工效率偏低。在坝体高强度连续填筑的施工需求下，传统开挖方式石料产出效率不足，无法适配填筑高峰期连续供料需求，易导致开挖与填筑进度脱节，引发工期滞后、资源浪费等问题，无法满足狭窄陡峻库盆的高效施工要求。为此，本工程采用库盆边坡“瘦身”开挖技术，灵活利用地形，确立“整体分区、横向分层、水平分块”作业模式。开挖区域划为若干小区块，流水同步推进；前沿先行瘦身，及早形成施工平台，为后续作业创造条件，山体较厚部位多次瘦身。工艺采取分区爆破、集渣蹬渣、锚杆挂网、出渣循环，一个梯段一次预裂爆破，主爆区分层开挖，每层再分 2~3 层出渣。利用渣体作操作平台，交叉完成锚杆挂网，随后出渣，实现多工作面平行高效开挖。实际应用表明，该技术通过“预留保护层+前沿瘦身”开挖方式，创造了多作业面同时施工的条件，有效解决了狭窄场地工序相互制约问题，边坡开挖效率显著提升，单循环作业时间大幅缩短，为填筑高峰期料源供应提供了有力保障，实现了开挖与填筑工序的无缝衔接，在确保安全的前提下显著加快了施工进度。该方案无需额外搭设施工平台，充分利用渣体作为操作平台，降低了材料与人工成本。

3.3 高陡边坡免脚手架快速支护技术

传统高陡边坡支护施工多采用双排脚手架搭建高空作业施工平台，该施工模式存在明显弊端，不仅钢管、扣件等周转材料消耗量极大，脚手架搭设与拆除工序周期冗长、施工效率低下，还存在极高的高空临边作业安全隐患。同时，边坡支护作业需等待脚手架搭设验收合格后方可开展，导致开挖与支护工序存在较长施工间歇，无法形成连续流水作业，严重制约整体施工进度，难以适配狭窄陡峻库盆的高效施工需求。

为有效弥补传统边坡支护工艺的诸多缺陷，本工程创新性应用高陡边坡免脚手架快速支护技术，确立了科学高效的施工核心原则：“一层预裂、二层主爆、分层出渣、快速锁口、速喷封闭、随层支护、系统跟进”。施工过程中，各级边坡预裂爆破工序一次性整体成型，开挖区域依据施工规范划分多级梯段开展分层爆破作业。首级梯段爆破高度严格控制为 7.5m，整体采用自上而下的分层出渣方式，分层厚度结合锚杆排距、钻机性能、现场实际工况综合确定，确保锚杆钻孔、边坡挂网等工序具备充足安全作业空间。梯段出渣完成后，利用反铲设备对掌子面进行平整修整，潜孔钻机直接依托现场渣堆平台开展钻孔施工，无需额外搭设作业架体；同时依托反铲设备配合人工完成锚杆安装与边坡挂网作业。施工采用上下层交叉流水作业模式，上层挂网支护施工同步推进下层出渣作业，循环完成全段锚杆、挂网支护施工。待单级边坡锚杆、挂网支护工序全部验收合格后，采用湿喷台车一次性完成坡面混凝土封闭喷射施工，有效保障边坡成型质量与整体稳定性。

现场应用证实，免脚手架快速支护技术摒弃双排脚手架搭设流程，消除脚手架搭拆带来的高空作业安全风险，开挖与支护工序实现零间歇衔接，形成开挖作业与支护作业相互穿插流水施工模式。单级边坡整体施工周期明显压缩，锚杆成孔质量、挂网施工效率同步提高，减少支护施工材料以及人工投入，有效降低高陡边坡施工安全风险，为同类高陡边坡快速施工提供可靠技术方案。免脚手架快速支护施工程序见下图 1。

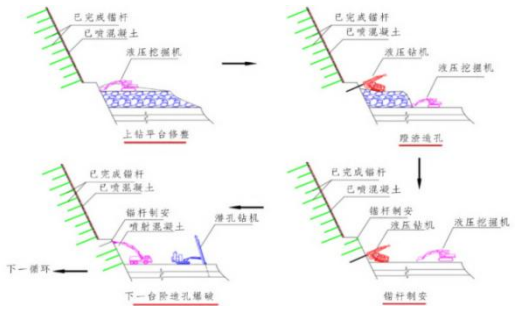


图 1 免脚手架快速支护施工程序图

3.4 填筑料爆破直采技术

传统库盆开挖与坝体填筑往往分属不同工序，开挖爆破所得石渣料级配不可控，大量渣料因不满足填筑级配要求而成为弃渣，需转运至弃渣场堆放，填筑所需合格料则需另行从料场开采或对弃渣进行二次加工，不仅增加了中转倒运环节和施工成本，而且延长了施工工期，经济性与时效性均不理想。

为此，本工程依据土石方平衡原理，以“挖填结合”为目标，通过多次爆破试验优化，建立了针对不同岩性的差异化爆破参数体系。根据地质资料，库盆主要分布片麻岩与细～粗粒浅变质石英砂岩，两种岩石强度相近，但爆破后级配特征截然相反：片麻岩爆破后细粒径渣料极少，而石英砂岩爆破后粗粒径渣料较少。针对这一差异，工程采取了如下措施：片麻岩通过提高爆破单耗、选用高爆速炸药、减小钻孔孔距等方式增加细颗粒含量；石英砂岩则降低单耗、选用低爆速炸药以减少细颗粒产生。全断面采用数码电子雷管联网爆破，根据各孔位情况优化延时设计，降低单响药量以减少爆破振动对边坡影响。每次爆破均依据地质地形及前期筛分资料进行参数设计，每孔测量放样、严控钻孔精度，爆后及时筛分以指导后续生产。

现场应用表明，差异化爆破参数体系有效实现了“挖填结合”，爆破所得石渣直接满足坝体填筑料级配要求，大幅减少了不合格料产生及中转倒运环节，为快速筑坝创造了条件，同时显著降低了施工成本，经济与环境效益俱佳。

3.5 连续缓边坡建基面控制开挖技术

传统长缓边坡预裂爆破施工中，设计坡面斜长 68m、一坡到底不设马道，若采用全坡面一次性钻孔方式，钻孔深度大，在穿越地质变化带时极易发生漂孔现象，导致孔斜与孔向偏差，直接影响建基面成型质量。同时，深孔作业对钻机精度和操作要求极高，一旦出现偏差难以补救，不仅增加技术性超挖量，还会导致后期垫层料超填，造成成本浪费。

针对这一难题，本工程创新采用局部超挖钻孔与参数优化相结合的施工方案。具体措施为：在孔底部沿坡面法线方向超挖 20cm，形成水平宽度约 40cm 的施钻平台，以满足 100E 潜孔钻机作业空间。在此基础上，开展缓边坡预裂爆破钻孔试验，按不同钻孔角度设定多种工况进行对比试验，爆破后逐孔测量分析，从中筛选最佳爆破参数。经反复试验优化，最终确定采用 100E 潜孔钻，钻孔间距 80cm、孔径 90mm、钻孔角度与水平面交角 31°、线装药密度 375g/m 的参数组合。在此参数条件下，爆破成型面平整度满足设计要求，预裂面半孔率达 90%以上。现场应用表明，该技术通过合理的钻孔超挖设计及系统的爆破参数优化试验，有效解决了长缓边坡预裂钻孔精度控制难题。实际施工中钻孔偏差显著减小，技术性超挖量大幅降低，相应减少垫层料超填方量，节约了施工成本。

4 结语

河南辉县九峰山抽水蓄能电站下水库库盆边坡最大开挖高度 135m、面积约 25 万 m^2，施工条件极为复杂。工程集成创新了成套开挖支护技术：无人机航测技术有效提升了复杂地形下工程量核算精度，为土石方动态平衡提供可靠数据支撑；“预留保护层+前沿瘦身”开挖技术破解了狭窄场地工序制约，形成多作业面协同格局；免脚手架快速支护技术实现了开挖与支护流水互促，显著压减工期并降低安全风险；差异化爆破直采技术使石渣直接满足坝体填筑级配，有效减少弃渣与转运成本；缓边坡预裂控制技术通过优化钻孔超挖设计，节约了超挖超填费用。成套技术的成功应用，减少库盆超挖约 6000m^3，节约施工成本约 70 万元，施工过程中未发生安全事故，为类似复杂地形条件下抽水蓄能电站施工技术体系提供了有益借鉴，具有重要的理论价值和推广意义。

参考文献：

[1] 张永先,赵源,周建平.当前抽水蓄能电站运营经济性分析概要[J].水电与抽水蓄能,2024(3):6~8.

[2] 郭炬.抽水蓄能“十四五”发展综述和“十五五”形势分析[J].水电与抽水蓄能,2026(1):12.

[3] 吴泰兵.抽水蓄能电站选点规划要点探讨[J].福建水力发电,2023(1):7.