

复杂地质条件长竖井与地下厂房洞室群施工安全技术管控实践——以礼河四级电站重建工程实践

冀丰伟

云南华电清洁能源有限公司 云南 曲靖 654200

摘要: 以礼河四级电站重建工程属西南山区重点小水电易地改造项目,总装机130MW,长竖井、大跨度地下厂房等构筑物施工难度大。场区地质条件复杂,多重高危作业交织,施工安全风险显著。项目创新采用竖井盾构掘进工艺,定制配套专用设备,实施全过程安全管控,有相关施工安全技术和管理经验,可为同类深长竖井及地下水工程提供参考。

关键词: 小水电;长竖井;盾构掘进;地下厂房;提升系统

引言: 以礼河四级电站重建工程因白鹤滩工程淹没影响易地重建,地下工程占比高、竖井深度大、厂房结构高、地质条件差,常规施工工艺安全管控压力极大。项目施工中创新性引入竖井盾构掘进技术,替代传统爆破开挖,专项设计竖井提升系统、封口盘、分层作业平台,实现深井施工机械化、标准化、本质化安全管控。本文依托该工程实践,系统总结长竖井与负责地质情况地下厂房的安全技术及管理经验^[1]。

1 工程概况及主要安全风险

1.1 工程概况

以礼河四级电站重建工程总装机容量130MW,装设4台立式冲击式水轮发电机组。主要地下工程包括:280m深出线竖井、两条230m深引水竖井、地下厂房(尺寸151.5m*19.5m*38m)及配套交通洞、通风洞、引水洞室群。厂区围岩类别以Ⅳ类为主,局部Ⅲ类,断层破碎带为Ⅴ类,围岩整体稳定性差。工程场区狭窄、山体边坡陡峭,进场道路坡陡弯急、临崖险段多,设备运输、材料转运及现场施工安全管控难度极大。

1.2 主要安全风险特征

1.2.1 深长竖井施工风险集中

出线竖井最大垂深280m,引水竖井最大垂深230m,作业空间狭小、垂直高差大,传统工艺易出现围岩掉块、局部坍塌、高空坠落、物体打击、受限空间缺氧等风险。

1.2.2 大跨度地下厂房失稳风险高

厂房最大高度38m,开挖分层多、跨度大、临空面高,破碎围岩条件下易产生拱顶下沉、边墙收敛、岩体脱落等隐患。

1.2.3 地质条件动态多变

施工过程中围岩破碎、软弱夹层交替出现,风险隐

蔽性强、预判难度大,易突发险情。

1.2.4 山区综合风险叠加

高边坡危岩落石、雨季滑坡泥石流、狭窄山区交通运输风险,进一步加剧工程整体安全管控压力。

2 工程安全管理重难点

一是深长竖井传统爆破开挖扰动大,破碎围岩区域极易诱发坍塌、掉块,安全控制难度高;二是深井垂直运输频次高、高差大,常规提升系统防护标准低、安全冗余不足;三是井下作业空间封闭、通风排烟困难、作业环境恶劣;四是地下厂房多工序交叉施工,干扰大、风险叠加;五是山区交通、高边坡、不良地质形成多重风险耦合,应急处置难度大。

3 专项安全技术与设备创新应用

针对本工程深长竖井施工痛点,项目摒弃传统粗放式施工模式,采用盾构机械掘进+专项提升系统设计制作+成熟地下安全防护体系的本质安全施工体系,从设备源头降低安全风险。

3.1 竖井盾构掘进工艺应用

本工程280m出线竖井采用竖井掘进机和人工辅助扩挖的施工方法,施工程序:施工准备→人员进场→安全教育培训→井筒底部基础处理→地质钻机270mm导孔施工→原开挖井筒中心预留6m井筒后回填至原地面且井圈高出地面50cm→反井钻机1.4m导井施工→直径5.8米竖井井口系统布置→竖井掘进机5.8m导井施工→竖井掘进机拆除及井内井口系统拆除→井口锁口段全断面开挖、支护、衬砌→井口布置提升机及卷扬机、凿井绞车安装、试车→井身段开挖、支护→检查验收。两条230m引水竖井在导孔和导井施工完成后,采用盾构正井掘进机一次成型施工。竖井掘进机替代传统钻爆法,盾构施工实现

机械化连续开挖、同步出渣、实时支护,有效解决破碎围岩爆破扰动大、超挖量大、围岩受损严重等问题。盾构设备刀盘均匀切削围岩,施工扰动小、成型质量高,井壁围岩完整性好,大幅降低掉块、坍塌、渗水等安全隐患;封闭式掘进作业有效控制粉尘,改善深井通风作业环境,从工艺层面提升竖井施工安全性与稳定性。

3.2 竖井提升系统专项设计

针对百米深井垂直运输存在的安全隐患,本项目专项设计竖井提升系统,摒弃传统简易运输设备,按照深井重载、高安全冗余标准完成整体设计。系统对卷扬运行参数、制动机构、防坠装置、限位预警模块进行全面优化,集成限速、限位、过载、失电等多重安全防护功能,从根源规避跑车、坠物、运输失控等典型安全风险。设备安装完成后,依次开展专项验收、载荷试验与试运行检测,全面保障人员及物料垂直运输安全。

3.2.1 提升系统安全保护措施及验证

本系统安全保护功能完备,依托安全回路实现运行逻辑闭锁与故障分级处置:安全回路对提升机运行条件进行联锁管控,仅当外部配套设备工况正常、满足运行要求时,提升机方可启动;系统检测到重故障信号时,立即触发紧急制动;出现轻故障时,允许完成当前提升循环,故障排除后方可继续作业。系统共设置十五项核心安全防护功能,具体包括:速度手柄零位联锁、制动闸手柄联锁、测速断线保护、电气传动故障保护、制动油压超限保护、运行错向保护、等速超速保护、减速过速保护、PLC安全制动继电器、过卷保护及过卷切换开关、深度指示失效保护、闸瓦磨损监测、松绳保护、调闸联锁,形成全方位、多层次的安全防护体系。

整套安全保护体系均经过现场实体工况实际验证,并非仅理论配置。设备安装调试完成后,严格遵循深井重载设备安全规范,开展专项安全验收、分级载荷试验及整机试运行核验工作。验证过程全面覆盖全部安全回路与所有防护功能,通过空载、额定重载等真实施工工况,实测校验限速、限位、过载、失电、过卷、过速、松绳、制动闭锁等核心保护的触发逻辑、响应速度与动作可靠性,同时完成重故障紧急制动、轻故障容错运行等极端工况核验。所有安全保护装置动作精准、联锁逻辑合规、防护性能达标,充分验证了整套系统安全防护结构的冗余性、运行稳定性与工况适应性,可有效抵御深井垂直运输各类安全风险,设备核验合格后正式投入现场施工作业。

3.2.2 提升系统组成与结构参数

出线竖井提升系统为工程施工核心垂直运输设施,

整体由提升绞车、凿井绞车、卷扬机、专用井架、天轮、封口盘、施工吊盘及悬吊钢丝绳等构成。配套特制井架结构刚度大、稳定性强,整体总高9.2m,天轮平台尺寸9.0m×6.1m,底部跨度11.5m×5.7m,可满足全工况悬吊与提升荷载需求。

现场采用模块化分区布置,实现竖井各作业面独立运行:选用2JTP-1.6×1.2P提升绞车负责人员升降作业;吊笼防坠绳由10T卷扬机采用双绳悬吊;施工吊盘由2台JZ-10/800A凿井绞车悬吊固定;风、水、喷浆等管路则由2台JZ-16/800A凿井绞车统一悬吊布设。

3.2.3 提升运输作业配置

人员及轻型物料依托2JTP-1.6×1.2P绞车、专用钢丝绳与Φ1.6m主天轮驱动吊笼完成转运;吊笼两侧布设Φ20mm防坠绳,通过10T卷扬机双绳张紧,并搭配Φ0.65m天轮实现导向与限位。施工期间小型挖掘机随施工吊盘同步升降,300kg及以内小型机具、物料均通过吊笼统一转运,实现竖井人员、物料分区规范化垂直运输。如图1吊盘示意图

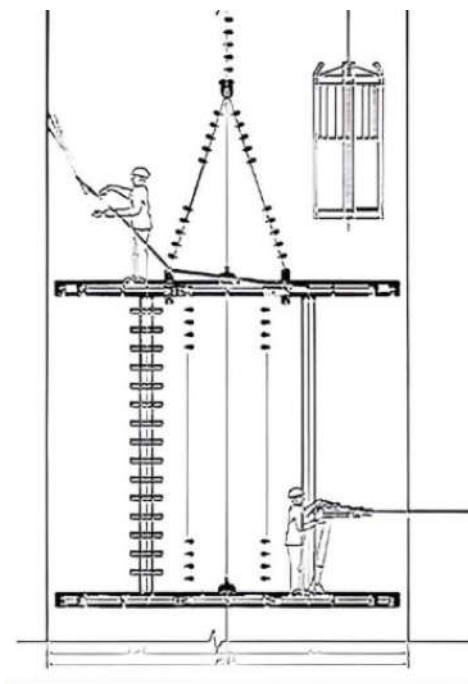


图1 吊盘示意图

3.3 完善地下作业安全防护体系

借鉴煤矿深井标准化、高可靠性安全管理体系,全面配套煤矿常用成熟安全设备。重点完善井下通风除尘、瓦斯监测、有害气体检测、应急通信、声光预警、防爆照明等系统,实现井下环境实时监测、异常自动报警。针对受限空间作业,配齐自救器、应急逃生设施、强制通风设备,极大提升深井作业环境安全性和应急处

置能力。

3.4 封口盘、作业平台专项设计施工

针对竖井施工存在的井口坠物、防护体系薄弱、作业平台稳定性差等安全问题,本次工程对封口盘及井下作业平台开展专项结构与受力验算。井口设置全封闭式高强度封口盘,按功能分区预留提升、通风、管线孔洞,各孔洞均配置防护盖板与联锁装置,实现井口临空面全封闭,有效规避坠落风险。井下依据施工高程分层布设作业平台,平台配套防护、防滑及防坠结构,可为竖井衬砌、围岩支护、设备安装等工序提供稳定作业工作面,保障深井施工安全。

4 现场安全管控措施

4.1 动态地质风险分级管控

施工全过程坚持超前探测、动态研判,结合盾构掘进揭露围岩情况,实时更新地质风险清单,对破碎带、渗水段、软弱夹层实行重点管控,及时调整掘进参数、支护参数,避免围岩失稳。落实风险分级管控、隐患排查治理双重预防机制,实现隐患动态清零。

4.2 地下厂房及洞室群开挖支护安全管控

38m高地下厂房采用分层分部开挖、随挖随支施工模式,严控开挖步距,及时施作锚杆、钢拱架、喷混凝土联合支护。布设围岩收敛、拱顶下沉监测点,实时监控围岩变形稳定情况。严格划分开挖、出渣、支护、衬砌作业分区,落实硬质隔离,杜绝交叉作业干扰,规范地下临时用电、通风排水管理,保障大型地下洞室施工安全。

4.3 地下厂房结构混凝土安全管控

以礼河四级重建工程地下厂房基础、主副厂房及岩壁梁混凝土施工,围绕高处作业、施工用电、交叉作业、脚手架、孔洞防护五大风险落实安全管控:高处立模、岩壁梁浇筑全员系挂安全带,临边布设防护栏杆,防坠网,严防坠物坠落;施工用电执行三级配电两级保护,电缆架空布设并做好洞内防潮防护,机电设备漏电装置完好,由持证电工定期检修;多工种上下交叉施工区域设置硬质隔离挡板,错开垂直作业时段,现场安排专人值守;脚手架严格依照专项方案搭设,完工验收合格后方可投入使用,常态化检查扣件、立杆稳固性,禁止超荷载堆放建材;厂区内孔洞采取防护措施并明确警示标识,谨防坠落,从源头防范各类安全隐患。

4.4 高边坡与山区交通安全管控

厂区高边坡严格执行分层开挖、分层支护、先排水后开挖原则,完善截排水系统,布设主动、被动防护网,雨季加密监测、恶劣天气停工避险。针对山区狭窄

道路,完善警示防护设施,严控重型设备运输,落实专人指挥、错车通行,严禁雨雪、大雾天气重型运输作业,保障进场运输安全。

4.5 全员安全教育与应急管理

现场严格落实三级安全教育、专项安全技术交底,针对竖井盾构掘进、深井提升、井下爆破作业开展专项培训。定期开展坍塌、坠物、触电、临时断电等应急演练,完善应急物资、应急通道管理,提升现场应急处置能力。建立日常隐患台账闭环管理制度,实现隐患排查、整改、复核、销号全过程管控。

5 工程实施成效

通过引入竖井盾构机正向掘进工艺、专项竖井提升系统设计、井口封口盘与多层作业平台结构专项优化设计等一系列安全技术措施,以礼河四级电站重建工程从根本上解决了深长竖井稳定性较差围岩施工风险高、深井运输不可靠、作业环境差、防护薄弱等行业难点。项目施工全过程未发生坍塌、高空坠落、物体打击、触电及设备安全事故,施工过程安全生产形势持续稳定,顺利完成全部竖井、地下厂房及洞室群施工任务,工程按期优质投产运行。新工艺、新设备、专项安全设施的应用,显著提升了复杂地质长竖井井水电工程的机械化、规范化、本质安全水平,有力的保证了以礼河四级重建工程的顺利建设^[2]。

结束语

以礼河四级电站重建工程具有竖井埋深大、厂房结构高、地质条件破碎、高危工况集中、山区环境复杂等多重难点。项目通过创新应用竖井盾构掘进技术,设计深井提升系统、封口盘及作业平台,借鉴引入煤矿成熟深井安全防护体系,从设备、工艺、结构、管理多维度构建了深长竖井地下工程本质安全管控体系。工程实践证明,机械化掘进替代传统爆破、专项设备提质增效、成熟安全装备落地应用,可有效规避复杂地质深部地下工程各类安全风险,显著改善作业环境、降低事故概率。本次总结的技术措施与管理经验,可为西南山区同类深长竖井、大型地下厂房水电工程安全施工提供可靠的实践参考。

参考文献

- [1]国家矿山安全监察局. GB/T 50511-2022 煤矿井巷工程施工标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [2]杜彦良. 盾构设计施工管理关键技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2025.