

抽水蓄能电站斜井扩挖风险及管控对策

薛广业

乌海抽水蓄能有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19067

[摘要] 在抽水蓄能电站建设中,斜井作为引水系统的核心组成部分,承担着水流输送的关键使命,其扩挖施工的难度与安全风险尤为突出。受工程选址地形地质条件限制,斜井多采用大倾角布置,普遍面临开挖深度大、围岩稳定性差、作业空间狭窄、交叉作业复杂等共性难题,极易引发高处坠落、提升系统失效、围岩失稳、有毒有害气体泄漏等安全事故。其中,提升系统作为人员、物料垂直及斜向运输的核心载体,其运行可靠性直接决定了项目重大安全风险的防控成效,成为斜井施工期安全管理的重中之重。本文以乌海抽水蓄能电站为工程实例,基于业主视角,系统梳理斜井施工安全风险,构建全方位安全管控体系,总结可复制、可推广的管理经验与技术路径,为国内类似大倾角斜井工程施工安全提供理论与实践借鉴。

[关键词] 斜井扩挖; 提升系统; 风险识别; 管控对策

中图分类号: TD55 **文献标识码:** A

Risks and Control Measures for Inclined Shaft Enlargement Excavation in Pumped Storage Power Stations

Guangye Xue

Wuhai Pumped Storage Co., Ltd.

[Abstract] In the construction of pumped storage power stations, the inclined shaft, as a core component of the water conveyance system, plays a critical role in water transport. The difficulty and safety risks associated with its enlargement excavation are particularly pronounced. Due to constraints imposed by the topographical and geological conditions of project sites, inclined shafts are typically designed with steep gradients, commonly facing challenges such as significant excavation depth, poor surrounding rock stability, confined working spaces, and complex cross-operations. These factors readily lead to safety incidents including falls from height, hoisting system failures, surrounding rock instability, and leakage of toxic or hazardous gases. The hoisting system, serving as the primary carrier for vertical and inclined transport of personnel and materials, has its operational reliability directly determine the effectiveness of major safety risk prevention and control, making it the foremost priority in safety management during inclined shaft construction. Taking Wuhai Pumped Storage Power Station as an engineering example, this paper systematically examines the safety risks of inclined shaft construction from the owner's perspective, constructs a comprehensive safety control system, and summarizes replicable and scalable management experiences and technical approaches, providing both theoretical and practical references for the construction safety of similar steeply inclined shaft projects in China.

[Key words] Inclined Shaft Enlargement Excavation; Hoisting System; Risk Identification; Control Measures

引言

抽水蓄能电站斜井是连接上下水库的关键输水通道,常穿越断层破碎带、高地应力区等不良地质段,施工环境复杂、作业空间受限,安全风险呈现出系统性、突发性、高危害性的显著特征。当前,国内同类工程施工安全管理多以施工单位经验管控为主,业主方作为项目安全责任主体,尚未形成从安全监察视角出

发,对施工期全链条风险进行系统识别、量化管控与闭环监督的成熟模式,尤其在提升系统本质安全设计、爆破作业参数优化控制、围岩动态支护技术应用等核心环节,监管力度与技术引导仍存在不足。本文结合乌海抽水蓄能电站斜井扩挖施工实践,依托业主方安全监察数据与现场风险事件研判结果,重点研究提升系统安全防控、爆破振动管控、应急响应机制完善等关键问题,

构建“技术防控引领、过程监督闭环、责任层层落实”的立体化管控体系,为深埋大倾角斜井安全高效施工提供系统性的业主主导型解决方案。

1 工程概况

乌海抽水蓄能电站坐落于内蒙古乌海市海勃湾区,枢纽工程主要由上水库、下水库、输水系统、地下厂房、地面开关站等核心构筑物构成。作为项目业主,乌蓄公司将本标段压力管道扩挖施工列为安全管控重点环节,施工范围涵盖自压力钢管起点至下斜井下弯段起点,具体包括上平段、上斜段、中平段、下斜段(不含下平段)。其中,1#、2#高压主管长度分别为878.742 m和903.364 m,水平间距介于37.68~43.30 m之间;上平段起始于事故闸门井下游35 m处,设计坡度8%,末端高程1577.68 m;中平段、下平段高程分别为1385.0 m和1112.0 m,形成高差悬殊的陡峻引水通道。上、下斜井设计倾角均为55°,属于典型的大倾角深埋斜井结构,围岩以Ⅲ~Ⅳ类为主,局部穿越断层影响带,岩体完整性差、力学强度不足,地质条件复杂多变,给施工安全管控带来极大挑战。

本工程斜井开挖断面采用马蹄形布置,其中压力钢管起点至下斜井上弯段末端,开挖尺寸为4.6 m×7.8 m,内径6.6 m;上弯段末端至下斜井下弯段起点段,断面收缩为4.6 m×7.0 m,内径5.8 m。结合工程实际地质与施工条件,乌蓄公司经全面研判,明确本工程斜井施工的三大控制难点:一是高倾角斜井段作业空间狭窄,大型施工设备布设难度大,出渣作业与支护作业交叉干扰严重,极易引发安全隐患;二是垂直提升高度超过300 m,对卷扬系统运行稳定性、信号传输同步性、防坠装置可靠性提出极高要求;三是多段衔接处曲率半径较小,弯段扩挖过程中易诱发应力集中现象,进而导致围岩失稳坍塌。基于上述难点,乌蓄公司明确要求施工单位依托精细化爆破设计、智能化提升监控、动态化围岩支护等先进技术手段,全面保障深埋大倾角斜井安全高效掘进,并将上述要求纳入施工单位安全履约考核核心内容,强化考核约束。

2 乌海抽水蓄能电站斜井扩挖核心风险识别

结合乌海抽水蓄能电站斜井“倾角大、埋深深、作业空间受限、地质条件复杂”的核心特点,作为项目安全责任主体,乌蓄公司依托JSA(作业安全分析)、LEC风险评估等科学方法,牵头组织监理、施工、设计单位开展全流程风险识别工作,聚焦施工单位管控薄弱环节,明确施工期间的重大安全风险,作为业主的核心重点内容:

(1)提升系统失效风险:作为业主重点盯控的核心风险,主要包括卷扬机制动失灵、钢丝绳断丝超标、防坠器响应延迟、信号传输中断等安全隐患,一旦发生失效事故,极易造成载人台车坠落,引发群死群伤恶性安全事故,是斜井施工安全的“头号威胁”,也是业主安全监察的重中之重。

(2)高处坠落及物体打击风险:重点排查井口临边防护缺失、作业平台搭设不规范、吊物捆绑不牢固、作业人员违章作业等问题,此类风险具有易发性强、防控难度大、覆盖面广的特

点,是业主日常巡查监察的重点内容,需实现常态化管控。

(3)围岩失稳与坍塌风险:针对斜井穿越Ⅲ~Ⅳ类围岩、断层影响带的地质特点,重点关注施工单位支护作业及时性、支护参数达标性,若支护作业不及时、支护措施不到位,极易诱发局部塌方,甚至扩大为整体坍塌事故,造成人员伤亡与财产损失。

(4)爆破作业风险:重点管控盲炮处理不当、爆破飞石超出警戒范围、爆破振动超标影响相邻洞室稳定等安全隐患,业主方全程旁站监督爆破作业方案落实、警戒区域设置、振动监测数据管控等关键环节,严防爆破作业引发安全事故,确保爆破作业安全可控。

3 业主主导的斜井扩挖安全管控对策

3.1 强化现场安全标准化布置,筑牢可视化监管基础

针对临边防护环节,业主方明确要求安全防护栏杆采用定型化钢制结构,高度不低于1.2 m,立柱间距≤2 m,底部设置20 cm高挡脚板,表面涂刷黄黑相间安全色,严格符合《建筑施工高处作业安全技术规范》(JGJ 80)相关要求;井口周边硬质封闭区铺设防滑钢板,所有临边、孔洞均加装双道防护设施,合理设置作业人员休息平台,夜间配置LED频闪警示灯,确保夜间作业安全;所有标识标牌均采用反光材质,全面提高低照度环境下的可视性,便于业主、施工人员及时识别风险、规避隐患^[1]。

同时,乌蓄公司创新构建“夜间调度+现场督导+一线驻守”三位一体全时段管控机制,将管理触角延伸至作业末梢,实现高风险作业动态闭环管理。通过夜间调度中心统筹次日危大工程施工计划,前置风险判断与资源调配,防范风险预判不足引发的安全问题;白天由业主专职安全工程师开展网格化现场督导,重点盯控提升系统运行、爆破作业、围岩支护等关键工序,及时发现并整改安全隐患;对连续作业面实施管理人员24小时轮值驻守,确保应急响应“零时差”,提升应急处置效率。引水系统压力管道洞室下斜井运输小车、扩挖台车布置平面示意图如下:

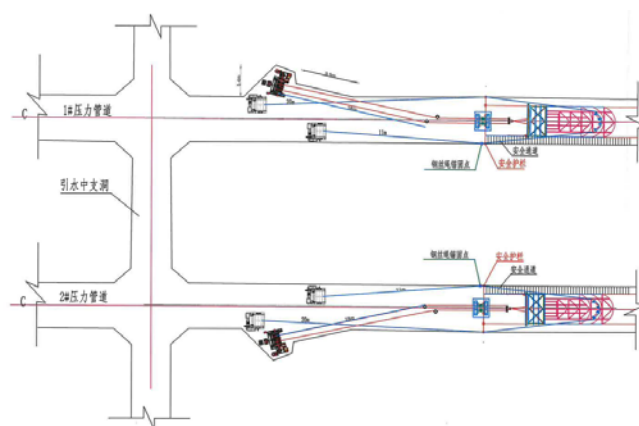


图1 引水系统压力管道洞室下斜井运输小车、扩挖台车布置平面示意图

3.2 严格专项安全技术方案审查,强化技术源头防控

在论证过程中,业主方结合工程实际情况,要求施工单位全面配齐斜井提升系统钢丝绳自动检测、过卷、过速、过负荷及

防坠器等安全防护设施,推动安全管理模式从“被动防控”向“主动预警”转变,提升本质安全水平^[2]。针对开挖爆破这一核心高风险环节,业主方明确要求施工单位严格执行“先探测、管超前、短进尺、弱爆破、强支护”的施工原则,结合现场地质条件动态优化爆破参数,降低爆破作业对围岩稳定性的影响。经多方论证,业主方针对原方案提出12项针对性优化建议,包括增设双回路制动系统、限定单段起爆药量、推行“短进尺、强支护”工法等,要求施工单位结合建议修订完善方案,经监理单位复核、业主方最终审批通过后方可实施,严禁未经审批擅自施工。方案审批通过后,乌蓄公司牵头组织业主、监理、设计、施工四方,开展一线作业人员专项安全技术交底工作,创新采用三维动画演示与实操演练相结合的方式,详细解读吊笼限载标识识别、信号联络手势、有害气体应急撤离路线、自救器使用要点等核心内容,确保每位作业人员熟练掌握岗位风险及应对措施^[3]。压力管道洞室斜井上弯段平台及通道平面布置图如下:

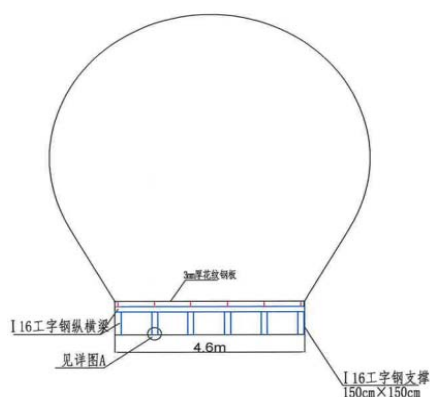


图2 压力管道洞室斜井上弯段平台及通道平面布置图

3.3 规范特种设备与人员管理,压实全周期管控责任

在设备准入环节,牵头组织业主、监理、设计、施工、第三方检测五方责任主体开展联合验收工作,重点核查设备安全性能、防护设施配置等情况,验收不合格的设备严禁投入使用,从源头把控设备安全关;在设备运行环节,引入基于风险分级的动态监管机制,针对制动距离、钢丝绳张力差、防坠器响应时间等关键安全参数设定预警阈值,一旦监测数据超限,系统自动触发停机指令,并及时推送告警信息至监理平台,确保隐患早发现、早处置、早清零^[4]。

为保障设备稳定运行,乌蓄公司要求施工单位推行“日检+周保+月评”三级维保制度,明确维保标准、维保流程与责任分

工,确保维保工作常态化、规范化:日检由操作班组执行,重点确认信号闭锁、限位开关等关键部件有效性,做好详细检查记录,发现问题立即整改;周保由专业维保团队实施,涵盖减速机油质分析、电控系统绝缘测试、钢丝绳磨损检测等核心内容,全面排查设备潜在隐患;月度由监理单位牵头、业主方全程监督,组织开展专项安全检查,结合设备运行记录、故障台账研判设备健康状况,所有维保数据同步录入数字化设备档案,实现设备全生命周期可追溯、可管控^[5]。在作业人员管理方面,乌蓄公司将人员资质管控作为安全监察重点内容,严格核查起重机械司机、井下提升作业人员等特种作业人员操作证的真伪、有效期,杜绝无证上岗、持证不符等现象。

4 结语

本文从业主视角出发,结合乌海抽水蓄能电站斜井扩挖施工实践,系统识别了提升系统失效、高处坠落、围岩失稳、爆破作业、临时用电与火灾等5类核心安全风险,聚焦技术防控、过程监督、责任落实三大关键环节,构建了业主主导、多方协同、全链条闭环的安全管控体系。通过业主牵头推行现场安全标准化布置、严格专项安全技术方案审查、规范特种设备与人员全周期管理等刚性管控措施,该项目施工期累计实现连续万工时级零安全事故,圆满完成斜井扩挖安全管控目标,验证了该管控体系的科学性与可行性。

[参考文献]

- [1]方万堂,刘军杰,罗琅琅.浅谈抽水蓄能电站斜竖井开挖风险及管控措施[J].水利水电施工,2025(5):146-149.
- [2]秦政,陈建伟,李功子,等.复杂环境下竖井掘进与局部爆破开挖组合施工技术研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(3):105-115.
- [3]邓鹏.阳蓄电站超深竖井开挖支护施工关键技术[J].中国新技术新产品,2021(5):83-85.
- [4]张毅.浅谈抽水蓄能电站引水系统斜井扩挖安全管理[J].四川水利,2025,46(4):149-153,165.
- [5]董树荣.缓坡斜井精准反导井正挖法施工技术分析[J].四川建材,2025,51(12):120-127.

作者简介:

薛广业(1995--),男,山西大同人,乌海抽水蓄能有限责任公司,研究生,助理工程师,研究方向:抽水蓄能电站建设管理。