抽水蓄能电站地下洞室交叉施工安全风险及管控对策

明晓波
中国水利水电第七工程局有限公司　四川　泸州　646001

摘　要：抽水蓄能电站地下洞室群结构复杂、作业环境恶劣，多维度交叉施工导致安全风险叠加，管控难度极大。本文梳理地下洞室交叉施工的类型与管控难点，从地质、操作、管理、环境四方面辨识核心安全风险，剖析人为、技术、管理等层面的致因。针对性从制度建设、工序优化、现场管控、动态监测应急等维度制定管控对策，为同类工程规避交叉施工安全隐患、筑牢施工安全防线提供参考。

关键词：抽水蓄能电站；地下洞室；交叉施工；安全风险；管控对策

引言：双碳目标推进下，抽水蓄能电站建设规模持续扩大，地下洞室作为核心工程结构，呈现群洞密集、立体交叉施工的显著特征。深埋洞室复杂的地质条件与多队伍、多工序并行作业模式，催生各类动态安全风险，易引发塌方、机械伤害、突涌水等事故。当前传统静态管控模式难以适配现场施工需求，为破解交叉施工安全管控难题，精准防控各类风险，本文系统分析施工风险并提出科学可行的管控对策。

1 抽水蓄能电站地下洞室交叉施工概述

1.1 地下洞室工程基本特征

（1）结构特征：抽水蓄能电站地下洞室群涵盖主厂房、主变洞、引水隧洞、尾水隧洞及施工支洞等，洞室数量多、空间布局密集，大跨度高边墙结构与小断面隧洞并存，平面交岔、立面叠置形成复杂立体洞室群，相邻洞室间岩柱厚度有限，施工扰动相互影响显著。（2）施工环境特征：洞室深埋于山体内部，地质条件复杂多变，断层破碎带、高地应力岩爆、地下水渗漏等不良地质问题突出；作业面封闭狭小，通风排烟困难，照明条件差，施工产生的粉尘、噪声及有害气体不易扩散，人员作业环境恶劣，安全施工面临严峻挑战。

1.2 交叉施工主要类型

（1）空间交叉施工：不同高程洞室同步开挖、支护及衬砌作业，上下层洞室垂直重叠区域产生施工干扰；相邻隧洞并行或交岔段因共用岩柱，一侧爆破作业易对另一侧围岩及支护结构造成振动损伤，空间作业面相互制约。（2）工序交叉施工：开挖、爆破、出渣、支护、灌浆及机电安装等工序在同一洞室或相邻区域平行、搭接推进，爆破振动影响支护结构养护质量，出渣运输与材料进场共用通道产生通行冲突，工序间相互制约、紧密耦合。（3）队伍交叉施工：土建、爆破、机电安装、安全监测等多家专业队伍同步作业，人员流动频繁，设备调配交错重叠，不同队伍作业节奏不一致，施工信息传递滞后，易产生交叉作业安全盲区[1]。

1.3 交叉施工安全管控难点

（1）风险叠加性强：单一施工环节风险（如爆破飞石、围岩掉块、机械伤害）在交叉条件下相互耦合，小隐患沿工序链条和空间关联迅速传导，易引发塌方、坠物、设备碰撞等连锁事故，系统性风险预判难度大。（2）现场协调难度大：多队伍、多工序、多作业面并行推进，施工计划调整、资源调配、运输路线规划及安全交底等协调工作量大，不同单位安全管理标准不统一，责任界面易模糊，调度指挥体系不畅时极易出现管理真空。（3）动态风险管控难：施工过程中围岩揭露状态、地下水位变化、爆破振动影响及工序转换节奏持续动态演变，风险等级和分布随施工进度实时变化，传统静态风险评估与刚性管控措施无法有效适配现场动态条件，亟需建立灵活高效的动态响应机制。

2 抽水蓄能电站地下洞室交叉施工安全风险辨识与成因分析

2.1 施工安全风险辨识原则与方法

（1）风险辨识原则：遵循全面性原则，覆盖人员、设备、环境、管理四大维度，不留盲区死角；坚持针对性原则，紧扣抽水蓄能地下洞室深埋、群洞、交叉作业等固有特征开展差异化辨识；贯彻动态性原则，随施工工序转换、地质条件变化及作业面调整实施全过程、分阶段动态更新风险清单；恪守科学性原则，以现场实测数据和工程类比为基础，避免主观臆断，确保辨识结果客观可靠。（2）风险辨识方法：采用现场调研法，深入作业面实地勘查围岩状况、通风照明、设备布设等现状，获取一手数据；运用故障树分析法，从潜在事故类型倒推致因路径，系统梳理各工序环节的风险触发条件；引入专家打分法，邀请具有抽水蓄能工程经验的技

术专家对风险发生概率和损失程度进行半定量评估；结合历史事故案例分析法，系统整理同类工程施工中的典型事故教训，提炼共性风险因子，为精准排查提供参照依据。

2.2 主要安全风险类型

（1）地质安全风险：交叉施工产生的爆破震动、机械振动及应力重分布持续扰动围岩，诱发围岩坍塌、局部掉块及岩爆等突发性灾害；地下水渗流通道被施工活动贯通，导致突涌水、渗漏失稳等险情，严重威胁作业人员安全。（2）施工操作风险：上下层及相邻洞室交叉爆破作业中，炮孔误穿、起爆时序不当引发飞石伤人及振动损伤；多台重型机械在狭小空间内并行作业，易发生碰撞、碾压及机械伤害；高空作业平台及脚手架搭设不规范，高处坠落事故风险突出；临时用电线路乱拉乱接，漏电保护缺失导致触电隐患。（3）现场管理风险：多工序并行条件下施工计划衔接失序，作业面移交节点模糊，引发窝工与抢工并存的安全隐患；人员进出洞登记与定位管控不到位，非授权人员误入高风险作业区；安全交底流于形式、内容空洞，作业人员对当班风险底数不清，现场安全管理存在明显漏洞[2]。（4）环境辅助风险：深埋洞室通风距离长、风量不足，爆破炮烟及燃油设备尾气中CO、NO_2等有毒有害气体积聚超标，粉尘浓度长期高位运行；照明灯具配备不足或照度不均，作业面可视条件差，严重影响操作精准度与应急响应效率。

2.3 安全风险核心成因分析

（1）人为因素：一线人员安全意识薄弱，对交叉施工风险认知不足，习惯性违章频发，存在侥幸心理；安全培训流于形式、效果差；专职安全员数量不足或监管缺位，对违章纠偏不力，安全管控层层失守。（2）技术因素：交叉施工专项方案脱离实际，对洞室扰动、工序穿插等风险考虑不周，措施缺乏针对性；技术交底笼统，未细化至作业面和岗位，关键工艺参数与安全指标缺失，难以有效指导现场。（3）管理因素：安全制度体系不健全，交叉作业协调机制缺失，多单位权责不清、信息不畅；风险动态监测手段落后，数据未实现实时预警与有效响应；隐患排查整改责任未落实到人、时限不明、复查不到位，同类问题反复出现。（4）环境与设备因素：复杂地质条件难精准预判，围岩变化频繁，超前预报精度有限；设备超期服役、维保不足，关键部件老化风险上升；临时通风、供水、供电布设随意，未按标准规划；安全监测传感器布点覆盖率不足，关键区域数据缺失，风险感知能力受限。

3 抽水蓄能电站地下洞室交叉施工安全管控对策

3.1 健全交叉施工安全管理制度体系

（1）完善专项管理制度：针对交叉施工特点，制定交叉作业审批制度，明确交叉作业申请、风险评估、措施制定、批准实施等流程；建立工序衔接交接制度，规定上下道工序交接验收标准与签字确认程序；完善现场值班值守制度，实行领导带班、安全员旁站、班组长跟班三级值守体系；健全隐患排查登记与整改反馈制度，确保隐患发现、处置、验证全流程闭环，全方位堵塞管理漏洞。（2）建立多方协调机制：搭建由建设单位主导、施工总承包为主体、监理单位监督、监测方技术支持的四位一体联动协调平台，明确各方信息报送渠道与响应时限；每周定时召开交叉施工安全专项调度会议，通报各作业面施工进度、风险动态及存在问题，统筹协调计划调整、资源调配及冲突化解事宜，促进多方高效协同[3]。（3）落实安全责任考核：逐级分解交叉施工安全管控目标，细化各管理层级、各作业班组及关键岗位人员安全职责，形成“横向到边、纵向到底”的责任网络；制定安全绩效考核量化标准，将交叉作业违章率、隐患整改及时率、事故发生率等核心指标纳入考核体系，建立奖惩联动机制，考核结果与绩效薪酬、评优评先直接挂钩，对责任不落实造成重大隐患的单位和个人严肃追究问责，层层传导压力，筑牢责任防线。

3.2 优化交叉施工技术与工序管控

（1）科学规划施工工序：基于地下洞室群三维空间布局与施工总进度计划，运用网络计划技术统筹安排开挖、支护、衬砌、灌浆及机电安装各工序间逻辑关系，遵循“先深后浅、先主后辅、先支后挖”原则优化搭接方案，对空间重叠度高、岩柱敏感性强的高风险区域实施错时错峰作业，从源头减少交叉作业密度与干扰强度。（2）细化专项施工方案：针对相邻洞室同期开挖、上下层洞室立体交叉穿越、岩柱厚度不足段及富水破碎带等高风险作业场景，编制“一洞一策”专项安全施工方案，科学确定爆破孔网参数、单段最大药量、起爆延时、支护紧跟距离、灌浆压力阈值等核心技术指标，必要时通过现场试验修正参数，确保方案科学可靠、务实管用。（3）强化技术交底管控：构建覆盖项目部、工区、班组、作业岗位的分层交底体系，分类编制综合交底书与岗位风险告知卡，由技术负责人对施工管理人员、班组长进行总体交底，再由班组长在班前会上对一线作业人员进行逐项交底，重点阐明交叉作业危险源分布、个人防护标准、操作规程要点及应急避险路线，交底内容全员签字确认、影像资料归档备查，未接受交底人员一律不得进场作业[4]。

3.3 强化现场安全作业管控措施

（1）人员安全管控：严格执行新进场人员“三级安全教育”制度，增设交叉施工安全风险专项培训课程，经考核合格方可上岗；建立特种作业人员动态管理台账，确保电工、焊工、爆破工、起重司机等岗位100%持证上岗；推行班组安全“互保联保”机制，相邻岗位结成安全对子，相互监督、相互提醒，有效遏制违规操作和冒险蛮干行为。（2）设备与用电管控：建立机械设备“一机一档”检修保养制度，关键设备每日进行启动前检查，按月制定维护保养计划，严禁设备带病或超负荷运行；科学规划机械运行线路与作业区域，明确洞内限速、让车规则及作业回转半径安全距离，在车辆交汇处配备专职交通指挥人员；地下洞室临时用电严格按照“三级配电、两级保护”配置，所有配电箱设置在围岩稳固、地势高处并加设防潮支架，电缆线全程穿管或架空敷设，漏电保护器按周试验并记录，确保用电系统安全可靠[5]。（3）作业环境管控：根据各作业面需风量合理配置通风设备，优化风管布设线路，确保有毒有害气体和粉尘浓度不超标；合理增设LED防爆照明灯具，关键作业面照度不低于规范标准，消除照明盲区；配备自动监测仪器实时监控CO、NO_2及粉尘浓度，定期检测围岩变形和地下水渗流变化，发现环境指标异常立即下达停工指令，查明原因并整改完毕后方可恢复作业，持续改善地下施工环境质量。

3.4 构建动态风险监测与应急保障体系

（1）搭建动态监测系统：在洞室交叉段、岩柱薄弱区及富水断层带等重点部位布设围岩收敛计、多点位移计、锚杆应力计、渗压计及微震传感器，构建多参数融合的智能化监测网络，实时采集位移、应力、渗流等数据并上传预警平台；设定红、橙、黄三级预警阈值，系统自动研判风险等级并向现场终端推送预警信息，实现风险由事后分析向事前预警转变，为现场决策提供及时依据。（2）完善隐患闭环管理：建立“全员排查—分级登记—限时整改—逐级复查—验收销号”五位一体闭环机制，明确每项隐患的整改责任人、具体措施、完成时限及验收标准，重点聚焦交叉作业高风险点位实施定点监管；实行隐患分级挂牌督办，一般隐患由工区主任督办，重大隐患由项目经理挂牌督办，确保整改不到位不复工、验收不合格不销号，形成管理闭环，杜绝同类隐患反复出现。（3）优化应急保障体系：针对坍塌冒顶、突涌水、有害气体中毒、触电及火灾等主要事故类型编制专项应急预案，细化处置流程与信息报告程序；在洞外设置专用应急物资储备库，配齐生命探测仪、破拆工具、抽排水设备、正压氧气呼吸器、急救箱等物资并定期检查更新，确保随时可用；每季度组织一次综合应急演练，涵盖实战模拟与桌面推演，演练后及时评估、查漏补缺、修订预案，持续提升全员应急响应和协同处置能力。

结束语

地下洞室交叉施工是抽水蓄能电站建设安全管控的核心重难点，其风险具有叠加性、动态性和复杂性特征。本文全面辨识施工各类安全风险，深挖风险成因，构建了制度、技术、现场、应急多维一体化管控体系。通过全方位落实管控措施，可有效规避交叉施工安全隐患，降低事故发生率，保障工程施工安全有序推进，为同类抽水蓄能工程安全施工提供实践借鉴。

参考文献

[1]李术才,张庆松.深埋抽水蓄能电站洞室群交叉施工灾害风险演化机制[J].岩石力学与工程学报,2023,42(05):901-918.

[2]黄润秋,许强.高地应力区抽水蓄能洞室交叉施工围岩稳定性控制技术[J].工程地质学报,2022,30(03):789-802.

[3]孙涵,王健.基于实时监测的地下洞室群交叉施工动态风险管控研究[J].水利学报,2022,53(10):1256-1265.

[4]蔡思刚,黄刚.抽水蓄能电站地下厂房洞室群多工序交叉施工风险评估模型[J].岩石力学与工程学报,2023,42(08):1765-1774.

[5]李云,陈翔,董超.双重预防机制在抽水蓄能地下洞室交叉施工安全管理中的应用[J].水利水电快报,2025,46(01):80-83.