

# Construction safety management system construction for underground caverns of pumped storage power station

Jiawei Yang

Hubei Changyang Qingjiang Pumped Storage Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443000, China

## Abstract

As a key support for the clean energy system, pumped storage power stations play an important role in peak shaving, valley filling, and emergency backup in energy transformation. Their construction scale and quantity continue to expand with the promotion of the “dual carbon” goal. As a core component of power stations, underground cavern groups often cross complex geological structures, and the construction environment is characterized by high burial depth, large span, and multiple intersecting work surfaces. They face multiple risks such as rock burst, water inrush, and collapse, making safety control difficult. To build a scientifically sound construction safety management system, it is necessary to integrate multidimensional measures such as technical support, organizational guarantee, process standardization, and intelligent control. Through precise geological exploration and dynamic monitoring, responsibility stratification implementation and collaborative linkage, full process standard control and behavior norms, intelligent monitoring and early warning, and rapid response, risk prevention and control can be achieved in advance and safety status can be dynamically controlled. This will build a solid safety barrier for the efficient promotion of the project and provide a reference safety management model for similar projects.

## Keywords

pumped storage power station; Construction of underground caverns; Safety management system; Risk prevention and control

## 抽水蓄能电站地下洞室群施工安全管理体系构建

杨嘉伟

湖北长阳清江抽水蓄能有限公司, 中国·湖北 宜昌 443000

## 摘 要

抽水蓄能电站作为清洁能源体系的关键支撑, 在能源转型中发挥着调峰填谷、应急备用的重要作用, 其建设规模与数量随“双碳”目标推进持续扩大。地下洞室群作为电站核心组成部分, 往往穿越复杂地质构造, 施工环境具有高埋深、大跨度、多作业面交叉等特点, 面临岩爆、突水、塌方等多重风险, 安全管控难度显著。构建科学完善的施工安全管理体系, 需整合技术支撑、组织保障、流程规范与智慧化管控等多维度措施, 通过地质精准探测与动态监测、责任分层落实与协同联动、全流程标准管控与行为规范、智能监测预警与快速响应, 实现风险超前防控与安全状态动态掌控, 为工程高效推进筑牢安全屏障, 为同类工程提供可借鉴的安全管理模式。

## 关键词

抽水蓄能电站; 地下洞室群施工; 安全管理体系; 风险防控

## 1 引言

在“双碳”目标推动下, 抽水蓄能电站迎来快速发展期, 其建设对优化能源结构、保障电网稳定运行意义十分重大。地下洞室群作为其核心枢纽, 往往穿越复杂地质构造区域, 面临岩爆、突水、塌方等潜在风险, 施工安全程度直接关系到工程的成败与人员的生命安全。聚焦风险防控, 构建覆盖技术、组织、流程、智慧化范畴的完整安全管理体系, 成为统筹解决施工复杂性与安全稳定性矛盾的关键路径, 为同类工程提供可复制的安全管理范式。

【作者简介】杨嘉伟(1988-), 男, 中国湖北枝江人, 本科, 工程师, 从事工程建设安全管理研究。

## 2 技术支撑体系: 筑牢安全防控基础

### 2.1 地质超前探测与动态监测

依托三维地震勘探、TSP 超前地质预报等技术, 对洞室周边的岩体结构、水文地质状况进行精细化探测, 提前识别断层破碎带、高压富水段等风险区域。如广州抽水蓄能电站二期工程中, 采用地质雷达与红外探水相结合的方式, 实现对掌子面前方 30 米范围内地质异常的实时监测, 为施工方案的调整提供数据支撑。建立起针对围岩变形、应力应变等关键指标的动态监测网, 通过自动化采集系统实现数据实时传输与分析。

### 2.2 施工工法优化与装备升级

针对不同地质条件, 优化开挖的工法, 在软岩段采用

CRD(交叉中隔壁法)分块开挖,硬岩段推广光面爆破技术,减少对围岩的扰动。同步推进装备智能化升级,引入隧道掘进机(TBM)、液压二次衬砌台车等大型设备,降低人工操作所涉风险。清远抽水蓄能电站在地下厂房施工中,应用双臂凿岩台车替代传统人工钻孔,不仅提高作业效率,更将人员暴露于危险区域的时间缩短60%以上。

### 2.3 应急技术储备与应用演练

建立涵盖突水突泥、岩爆等场景的应急技术库,储备速凝混凝土、注浆加固设备等应急物资,制定分级处置技术方案。定期开展针对性演练,如丰满水电站重建工程中,模拟地下洞室突水事故,演练快速封堵、排水降压等技术流程,检验应急队伍的技术响应能力,确保关键时刻技术措施高效落地。

## 3 组织保障体系:强化安全责任落实

### 3.1 层级化责任架构搭建

构建“项目总部—工区—作业面”三级安全管理体系,明确总部统筹协调、工区具体实施、作业面直接管控的职责边界。每个层级设置专职安全管理岗位,签订安全责任书,将安全指标纳入绩效考核。如宜兴抽水蓄能电站设置安全总监,对地下洞室群施工安全负总责,各作业面配备专职安全员,实现责任链条无缝衔接<sup>[1]</sup>。

### 3.2 专业化安全管理团队培育

通过内部培养与外部引进相结合,组建由地质、岩土、安全工程等专业人员构成的管理团队,定期开展岩爆机理、应急处置等专业培训。中国安能集团在参与深圳抽水蓄能电站建设时,组建“地质+安全”联合专家组,全程驻场指导,为洞室群施工提供专业化安全技术支持。

### 3.3 协同化多方主体联动机制

建立业主、监理、施工单位三方联动的安全管理机制,每周召开安全协调会,共享监测数据与施工进度。推行“安全积分”制度,鼓励各参建单位交叉检查,形成相互监督、共同提升的氛围。如天荒坪抽水蓄能电站实施“监理旁站+施工单位自检+业主巡查”的三方联检模式,对洞室开挖、支护等关键工序进行联合验收<sup>[2]</sup>。

## 4 流程规范体系:明晰安全管控节点

### 4.1 施工全流程安全标准制定

以《水电水利工程地下开挖工程施工规范》为基础框架,结合地下洞室群施工的特殊性,组织地质、施工、安全等领域专家共同编制《地下洞室群施工安全操作规程》,涵盖从洞口防护到洞内作业再到后期维护的12个关键环节。在洞口防护方面,明确防护栏高度不低于1.2米,设置防撞墩与警示灯带,夜间开启探照灯;通风排烟环节规定每500米洞长配备1台轴流风机,确保洞内风速不低于0.25m/s,有害气体浓度控制在国家标准限值以下;用电管理要求采用双重绝缘电缆,配电箱安装漏电保护器,接地电阻不大于4Ω。

针对高风险的爆破作业,细化流程标准,钻孔深度误差不得超过±5cm,装药量根据岩性差异精确计算,硬岩段单孔装药量控制在设计值的±3%以内,起爆方式优先采用非电毫秒雷管分段起爆,通过振动监测仪实时监测,确保爆破振动速度在坚硬岩体内不超过15cm/s,软岩体内不超过5cm/s。如潘家口抽水蓄能电站在地下隧洞爆破施工中,严格执行该标准,连续300余次爆破作业均未对围岩稳定性造成影响<sup>[3]</sup>。

### 4.2 关键工序安全验收机制

将洞室开挖、初期支护、二次衬砌、防水层施工等列为关键工序,实施“作业申请—条件核查—过程监控—结果验收”的闭环管理流程。作业单位需在工序正式开始前24小时提交申请,清晰阐明作业的具体内容、人员资质、设备状态等信息;监理单位联合施工技术部门进行条件核查,确认安全防护措施到位、材料检验合格后方可批准开工。过程监控中,采用旁站监理模式,对开挖轮廓尺寸、支护参数等进行实时记录,每道工序形成完整的监控档案。结果验收实行“双签字”制度,施工单位技术负责人对工序质量自检合格后签字确认,监理工程师复核通过后签署验收意见,两者共同签字方可进入下道工序。呼和浩特抽水蓄能电站在地下母线洞施工中,对初期支护的验收尤为严格,喷射混凝土厚度采用超声波检测仪逐点检测,确保每平方米检测点不少于3个,且全部达到设计厚度10cm的要求;锚杆锚固力通过拉拔试验检验,抽检比例不低于5%,试验值均需大于设计值200kN,通过严格的验收机制,该母线洞施工质量优良率达到100%<sup>[4]</sup>。

### 4.3 作业人员安全行为管控

制定《地下洞室群作业人员安全行为准则》,涵盖个人防护、作业纪律、应急处置等6个方面30条具体要求,新进场人员必须参加为期3天的集中培训,通过理论考试与实操考核后方可上岗,考核合格率需达到100%。引入VR安全体验馆,模拟岩爆冲击、突水淹没、支护坍塌等场景,让作业人员直观感受违规操作的严重后果,增强安全意识。建立作业人员电子档案管理系统,记录培训考核成绩、特种作业资格证书、违规行为次数等信息,实行“红黄牌”管理制度,首次违规给予黄牌警告并参加复训,累计两次黄牌或单次严重违规记红牌,暂停作业资格并重新培训。溧阳抽水蓄能电站为地下洞室作业人员配备的智能定位安全帽,内置GPS芯片与声光报警装置,当人员进入未经授权的危险区域或靠近设备运行范围时,安全帽会发出持续蜂鸣并闪烁红光,同时后台监控系统发出警报,管理人员可通过对讲机及时提醒纠正,该措施使洞内违规进入危险区域的行为减少了80%以上,有效保障了作业人员安全。

## 5 智慧化管控体系:提升安全管理效能

### 5.1 安全监测信息平台建设

安全监测信息平台以数据整合为核心,整合地质监测

中的断层分布、岩体完整性数据，围岩变形中的收敛值、位移速率数据，以及环境参数中的温度、湿度、有害气体浓度等多源信息，构建起可视化的综合管理界面<sup>[5]</sup>。平台搭载的实时采集系统通过光纤传输网络，将分布在洞室各个区域的传感器数据不间断上传，经边缘计算节点初步处理后，传入云端数据库进行深度分析。自动分析模块采用机器学习算法，通过对比历史数据与实时监测值，识别异常波动并生成分析报告。风险等级自动评估模块依据预设的权重体系，将各项指标量化评分，动态划分“绿、黄、橙、红”四级风险等级，当等级达到橙色及以上时，系统自动向项目总经理、安全总监、工区主任等相关责任人的手机 APP 推送预警信息，附带风险位置示意图与初步处置建议。如构皮滩水电站地下洞室群监测平台，不仅实现了 15 分钟内完成 5000 余个监测点的数据整合分析，还开发了数据回溯功能，管理人员可查询任意时间段的监测曲线，通过趋势分析预判围岩稳定性变化，为中长期施工计划调整提供科学依据，平台每年帮助该工程提前识别重大风险隐患 10 余起，有效降低了安全事故发生概率。

### 5.2 BIM+GIS 技术融合应用

BIM 技术构建的洞室三维模型精度达到毫米级，模型中嵌入了每一道施工工序的技术参数，如锚杆的长度、间距、锚固力，喷射混凝土的厚度、强度等级等，同时关联了施工班组、作业时间等管理信息。GIS 技术则将洞室模型置于真实的地理坐标系中，叠加区域地质图、水文地质剖面图等数据，清晰呈现洞室群与地表地形、地下含水层、断层带的空间位置关系。在施工模拟环节，技术人员可通过调整参数，模拟不同开挖方式、支护时机对洞室结构安全的影响，如模拟全断面开挖与台阶法开挖的围岩应力分布差异，确定最优施工方案。深圳抽水蓄能电站在应用 BIM+GIS 技术时，通过模拟发现原计划中地下厂房与输水隧洞同步施工会导致交叉区域围岩应力集中，于是调整为隧洞超前厂房 30 米施工，并在交叉段增加临时支护，经模型验算，该方案使围岩最大应力降低 25%。此外，技术人员还可通过模型漫游功能，直观查看各作业面的空间布局，提前规划材料运输路线与设备停放区域，避免因场地狭窄引发的安全冲突<sup>[6]</sup>。

### 5.3 智能预警与联动处置系统

智能感知网络采用“有线 + 无线”混合部署模式，在固定区域如洞室侧壁安装有振动传感器、应力传感器，在

移动作业面如掌子面配备无线水位传感器、便携式气体检测仪，形成无死角监测覆盖。传感器采集的数据经 5G 网络实时传输至控制中心，当振动幅值超过 10cm/s、应力值突破设计限值、水位上升速率超过 5cm/h 或有害气体浓度超标时，系统立即启动现场声光报警，洞室内的警示灯闪烁，广播系统循环播报风险位置与避险提示。联动处置系统与应急物资储备库管理系统对接，可实时查询防水布、速凝剂、注浆泵等物资的库存数量与存放位置，同时与附近的应急救援队伍建立 GPS 定位联动，一旦收到预警信息，系统自动规划最优救援路线，计算到达时间并推送至救援人员手机。松花湖抽水蓄能电站的智能预警系统在某次监测中发现，3 号隧洞 K2+150 段围岩变形速率从 0.5mm/d 突增至 3mm/d，系统 3 分钟内完成预警信息发布，10 分钟内应急加固队伍携带钢拱架、千斤顶等设备抵达现场，按照系统推送的支护方案开展作业，2 小时内控制住围岩变形，避免了塌方事故发生，该系统的响应速度较传统人工巡检模式提升 80% 以上。

## 6 结语

综上所述，抽水蓄能电站地下洞室群施工安全管理体系的构建，需以技术支撑为基础、组织保障为核心、流程规范为抓手、智慧化管控为引擎，通过多体系协同发力，实现从被动防范到主动防控的转变。这一体系不仅能有效应对地下施工的复杂风险，更能为工程高质量建设提供坚实安全保障，为我国抽水蓄能电站规模化发展贡献实践经验。

### 参考文献

- [1] 黄勇等. “惠州抽水蓄能电站地下厂房洞室群布置方案研究.” 水力发电 36.9(2010):4.
- [2] 张国宝, 宫海灵, and 张贺龙. “琅琊山抽水蓄能电站地下厂房洞室群蚀变岩工程地质特性研究.” 中国水力发电工程学会地质及勘探专业委员会学术交流会 2008.
- [3] 刘芳明, 朱育宏, and 王琪. “清远抽水蓄能电站地下厂房及洞室群通风施工技术.” 云南水力发电 4(2016):86-87.
- [4] 洪坤. 惠州抽水蓄能电站地下洞室群施工仿真与优化研究. Diss. 天津大学, 2007.
- [5] 胡林江, 冯树荣, 胡育林, 等. 溧阳抽水蓄能电站地下厂房洞室群防渗排水设计[J]. 水力发电, 2017, 43(11):39-42, 90.
- [6] 汪易森, 李小群. 天荒坪抽水蓄能电站地下厂房洞室群围岩三维弹性有限元分析及施工方案优化[J]. 华东水电技术, 2000.