

复杂地质条件下抽水蓄能电站通风兼安全洞隧道施工组织设计与进度管控研究

杨 斌

中国水利水电第十六工程局有限公司 福建 福州 350000

摘 要：抽水蓄能电站是新型电力系统关键部分，建设规模与速度不断增大。通风兼安全洞是主体工程开工的先行通道，有施工交通、通风排烟、安全疏散等功能，其施工进度影响地下厂房等关键线路开工。复杂地质下，断层破碎带等不良地质问题频发，给施工组织设计与进度管控带来挑战。本文系统分析复杂地质对隧道施工的影响机制，从总体方案等方面提出施工组织设计策略，构建全周期进度管控体系，为同类工程提供参考。

关键词：复杂地质条件；抽水蓄能电站；通风兼安全洞隧道；施工组织设计；进度管控

引言：抽水蓄能电站多建于山区，通风兼安全洞是地下厂房系统较早施工的洞室，其贯通是后续主洞室施工的前提。但复杂地质下隧道施工不确定性与风险高，断层破碎带致掌子面坍塌、高地应力区诱发岩爆、富水地层有突涌水威胁。这些地质风险危害施工安全、延误工期、影响电站建设周期。

1 复杂地质条件分析

1.1 常见复杂地质类型

抽水蓄能电站多在高山峡谷选址，通风兼安全洞施工时常见复杂地质类型多样。断层破碎带普遍存在，带内岩石破碎、胶结差，两侧节理密集，岩体完整性与自稳能力弱。高地应力与岩爆区多在埋深大的洞段，岩体坚硬脆性且地应力超强度时，开挖卸荷会引发岩爆，威胁施工安全。软岩大变形常见于千枚岩等软弱岩层，遇水软化、强度低、蠕变明显，开挖后围岩变形大且久，易破坏初期支护。富水地层与涌水段常见，裂隙水等丰富，开挖揭穿含水构造可能突涌水，恶化环境、引发失稳。此外，膨胀岩等也有出现，且各类复杂地质常复合存在，增加施工难度。

1.2 复杂地质对施工的影响

复杂地质对通风兼安全洞隧道施工影响广泛。安全上，断层破碎带易掉块坍方，岩爆段有飞石风险，涌水段可能淹溺，高地温影响健康。效率上，不良地质段需调整开挖工法，循环进尺缩减，支护时间延长，掘进速度下降，如断层破碎带作业时间或增一倍以上。质量上，软岩大变形段支护不当或滞后，围岩变形侵限会拆换拱；涌水段处置不好，地下水会软化围岩、降低混凝土耐久性。成本上，地质变化致方案变更、材料增加等，会推高造价，且其不可预见性使施工组织变数大，

管理难度增加^[1]。

1.3 地质勘察与预测技术

准确掌握地质条件是应对复杂地质的关键，施工前综合运用区域地质调查、钻探、物探及室内试验等，查明地层岩性等条件。钻探可获岩芯判断岩石质量、测定力学参数；物探如地震反射法等能探测隐伏断层范围。但前期勘察难完全揭示地质细节，施工中的超前地质预报不可或缺。常用技术有断层预测预报系统、地质雷达法等，各有优劣。实践中需综合运用、长短结合、相互印证，形成系统预测体系。预报成果要及时反馈，指导工法调整与支护参数优化，实现信息化施工。

2 通风兼安全洞隧道施工组织设计策略

2.1 总体施工方案规划

通风兼安全洞隧道施工总体方案规划需综合考虑工程规模、地质条件、工期要求及资源配置等因素。洞口段施工通常先行启动，需做好边仰坡开挖与防护，施作超前大管棚或注浆加固，确保进洞安全。主体洞挖施工需根据洞身长度与地质分段确定开挖方向，一般由进出口双向掘进以缩短工期，但在复杂地质条件下需评估双向掘进在洞内贯通点的地质风险。开挖方法选择是总体方案的核心内容，应遵循动态设计原则，根据不同围岩类别预设多种工法组合。Ⅱ、Ⅲ类围岩条件较好时可采用全断面法，配备多臂凿岩台车钻孔，配套装载机与自卸汽车出渣，实现快速掘进。Ⅳ类围岩需采用台阶法，上台阶超前3至5米，下台阶跟进，必要时设置临时仰拱。Ⅴ类围岩及断层破碎带应采用分部开挖法如预留核心土法或双侧壁导坑法，严格控制开挖进尺，短进尺、弱爆破、强支护、勤量测。总体方案还需明确辅助生产系统配置，通风系统应满足长距离独头掘进需求，采用

压入式通风,风管直径与风机功率根据洞长与作业面人数计算确定。排水系统需考虑最不利涌水工况,设置多级泵站接力排水。供风、供水、供电系统应沿洞线合理布置,确保各作业面需求。

2.2 施工准备阶段组织设计

施工准备阶段的工作质量直接影响后续施工的顺利开展。技术准备方面,需组织图纸会审与设计交底,深入理解设计意图与地质勘察成果,编制实施性施工组织设计与专项施工方案。针对复杂地质风险,应提前编制塌方、涌水、岩爆等应急预案,组织专家评审论证。测量控制网建立至关重要,洞口控制点需埋设牢固并与永久控制网联测,洞内导线随掘进及时延伸,确保贯通精度。物资设备准备方面,根据总体方案列出主要材料与设备需求计划,提前采购储备。支护材料如锚杆、钢拱架、钢筋网片、喷射混凝土料等需有稳定供应渠道。机械设备应选用适应性强的型号,如三臂凿岩台车、湿喷机械手、大功率通风机、大流量水泵等,并做好进场验收与调试^[2]。临时设施建设包括施工便道、供风供水站、变电站、拌和站、修理间及办公生活区,需合理规划布局,满足施工高峰期需求。洞口截排水系统应在进洞前完成,防止地表水灌入洞内。

2.3 施工阶段组织设计

施工阶段组织设计的核心是实现各工序的高效衔接与资源的最优配置。钻爆作业是开挖循环的起点,需根据围岩情况动态调整钻爆参数。钻孔采用凿岩台车或多臂钻机,严格控制孔位、孔深与角度,周边眼间距适当加密以控制超欠挖。装药结构根据岩性选择,断层破碎带采用微震爆破或预裂爆破减少扰动。出渣运输组织需保证装渣、运输、卸渣各环节连续高效。装载机与自卸汽车数量根据运距与循环方量计算匹配,洞内每隔一定距离设置会车避让段,重车下坡时空车上坡需注意行车安全。初期支护应紧跟掌子面,喷射混凝土采用湿喷工艺减少回弹、提高强度,钢拱架安装需保证垂直度与间距,锚杆钻孔注浆饱满。仰拱与二次衬砌虽不紧跟掌子面,但需根据围岩变形监测数据确定合理跟进距离,软岩段应尽早施作仰拱形成封闭环。工序衔接组织宜采用平行作业与流水作业相结合,如出渣与立架准备平行,喷浆与钻孔准备搭接,最大限度压缩循环时间。不良地质段施工需制定专项组织方案,断层破碎带坚持超前支护先行的原则,超前小导管注浆后再开挖;岩爆段采取应力释放孔、洒水软化、防护网等措施,加强人员防护;涌水段组织快速堵水与强排结合,预备足够排水能力。

2.4 施工安全与质量管理组织设计

复杂地质条件下的隧道施工,安全与质量是进度得以保障的基础。安全组织设计需建立风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制。针对各类地质风险,制定专项安全技术措施,断层破碎带施工强调超前支护与短进尺,岩爆段注重应力监测与防护设施配备,涌水段强化排水系统检查与应急演练。设置专职安全管理人员,落实班前安全教育与工序安全确认,对出渣运输、爆破作业、用电安全等高风险环节实施重点监控。应急管理体系应完善,洞口储备充足的应急物资如方木、工字钢、注浆设备、水泵等,组建应急救援队伍并定期演练。质量组织设计需建立从原材料到成品全过程的质量控制体系。材料进场严格验收检验,锚杆、钢拱架、水泥、外加剂等必须有合格证并抽样复验。工序质量控制实行三检制,钻孔需检查孔位与角度,爆破后检查断面尺寸与超欠挖,立架检查间距与垂直度,锚杆检查长度与注浆饱满度,喷砼检查厚度与强度。隐蔽工程如超前支护、初期支护需经监理验收合格后方可进入下道工序。测量监测质量控制同样重要,洞内控制测量定期复核,围岩变形监测点埋设及时、数据采集准确,及时反馈指导施工。建立质量责任追溯制度,每个工序、每批材料均记录在案,实现质量可追溯。安全与质量管理的各项要求应融入施工组织设计,与进度计划协调统一,避免重进度轻安全质量^[3]。如下图所示



隧洞施工形象照片

3 通风兼安全洞隧道施工进度管控方法

3.1 进度计划编制

进度计划是施工组织设计的核心成果,也是进度管控的基本依据。通风兼安全洞隧道进度计划编制需以地质条件分析为基础,遵循动态弹性原则。首先进行地质分段与进度指标确定,根据勘察资料与超前预报结果,将隧洞划分为若干地质区段,每段依据围岩类别、洞径断面及施工难度,参照类似工程经验与劳动定额,确定该段的计划掘进速度。断层破碎带、岩爆段等不良地质

段需适当降低指标，并单独考虑支护加固所占用的时间。进度指标应以每循环进尺与循环时间为基本单元计算，从钻孔爆破到出渣支护再到下一循环开始，精确测算各工序耗时，最终换算为日进尺与月进尺。总体进度计划编制宜采用网络计划技术，明确各工序逻辑关系，识别关键线路。通风兼安全洞的关键线路通常为洞挖本身，但洞口段施工、不良地质处理、衬砌跟进等也可能成为阶段性关键。进度计划需预留弹性储备，针对不可预见地质风险设置机动时间，一般可按总工期的百分之十至百分之十五作为风险储备。计划编制完成后需组织评审论证，确保其技术可行性与资源匹配性。同时编制资源需求计划与资金使用计划，作为进度计划的支撑文件。进度计划还应形成分级体系，包括总进度计划、年度计划、季度计划与月度计划，逐级细化落实。

3.2 进度控制措施

进度控制措施是实现计划目标的具体手段，可分为技术措施、管理措施与经济措施三类协同运用。

3.2.1 技术措施

技术措施是进度控制的基础保障，通过优化工艺与引入先进技术提升效率。优化钻爆参数，依不同围岩动态调整炮眼布置等，提高爆破效果，减少超欠挖与修整时间。推广多臂凿岩台车等高效设备，压缩钻孔与喷浆作业时长。优化出渣运输系统，合理配置车辆与线路，减少运输等待。不良地质段采用快速支护技术，研发早强喷射混凝土缩短等待时间。应用信息化技术，建立数字化采集系统，用 BIM 技术模拟施工，引入地质预报与监测数据自动分析平台。确保通风、排水等辅助系统与掘进速度匹配，定期维护设备。核心是以技术进步突破施工瓶颈，换取时间。

3.2.2 管理措施

建立高效生产调度体系，每日开会汇总进度、分析问题、部署工作，确保工序紧密衔接。实行关键工序旁站制度，专人跟踪处理问题。加强施工队伍管理，推行班组承包责任制，组织竞赛与考核。物资供应建立库存预警机制，保障关键材料安全库存。设备管理实行定人定机与定期保养，储备关键备件。完善沟通协调机制，与设计等建立快速通道，提前协调对外关系。管理措施核心是以精细化管理消除组织障碍，保障施工顺利推进。

3.2.3 经济措施

经济措施借助利益杠杆推动进度目标达成，合同明

确工期奖罚机制，奖励按期或提前完成者，处罚延误者，奖励标准要有足够激励性。设立专项进度奖金，按月或节点考核兑现。对施工困难区段提高计价单价或给予补贴。增加赶工投入时保障资金，奖励技术创新与工艺改进。物资采购集中且战略合作降低成本，释放资金用于生产。实施经济措施要配套公正透明的考核体系，保证进度数据真实，奖罚及时到位，以发挥激励作用。

3.3 进度动态调整

复杂地质下，进度计划常因地质变化与施工干扰需动态调整，此过程含监测对比、偏差分析、方案调整、资源重组四个环节。先建立进度监测系统，每日统计实际进度数据，与计划对比并绘图，同步分析超前地质预报与围岩监测数据，预判对进度的影响。偏差分析要量化差距、区分客观与主观原因，针对不同原因采取不同措施，地质恶化则重新评估剩余地质条件、调整进度指标，管理问题则查找漏洞、强化执行。制定调整方案要结合剩余工期与资源，可压缩工序、增加平行作业等，重大地质变更需重选工法、重编计划。资源重组保障调整，按新方案优化配置。调整后及时下达并交底，以不影响关键节点为目标，关键线路延误要赶工，且完整记录调整过程，为索赔和总结经验提供依据。

结束语

复杂地质下抽水蓄能电站通风兼安全洞隧道施工组织与进度管控是系统工程，需基于地质风险建立动态适应的体系机制。本文从地质分析入手，明确主要风险及影响，强调地质勘察与预测的基础作用。施工组织设计提出全方位策略，注重工法与资源匹配。进度管控构建系统方法，确保计划在复杂地质中有效。该洞作为先行工程，其成败影响电站整体建设。随着地下工程技术发展，数字化、智能化及机械化技术将提供有力支撑，期望本文能为同类工程提供参考，推动电站建设管理水平提升。

参考文献

- [1]刘泽戈.云霄抽水蓄能电站通风兼安全洞设计探讨[J].水上安全, 2023(11): 16-18.
- [2]刘原峰,董帮伟,张奎,等.某抽水蓄能电站通风兼安全洞爆破安全控制[J].电力安全技术,2025,27(4):71-73.
- [3]盘晓红,陈露,颜加明,等.某抽水蓄能电站通风洞洞口风机房设计分析[J].暖通空调,2025,55(6):47-51.