 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10630

Construction Technology for Rapid Excavation and Support of Rock Wall Crane Beams in Pumped Storage Power Stations

Hua Zhou Shilong Hu

China Water Resources and Hydropower Ninth Engineering Bureau Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550081, China

Abstract

As the load-bearing structure of the underground powerhouse in pumped-storage power stations, the excavation quality and support reliability of rock wall crane beams directly determine the construction safety and long-term operational stability of the powerhouse, with construction progress significantly impacting the overall project timeline. Addressing challenges such as complex cross-sections and high excavation difficulty in the rock wall crane beam construction at the Anhui Ningguo Pumped-Storage Power Station, this paper proposes a rapid excavation and support construction workflow tailored to the engineering geological conditions and project characteristics. The approach focuses on optimizing the zoned flowwork construction model, employing key technologies including efficient protective layer excavation and "two-way pre-crack blasting" for rock platform formation, complemented by advanced support techniques such as "grouting before rod insertion" for mortar anchors and rapid-setting anchoring for prestressed rods. These methods provide valuable references for similar pumped-storage power station rock wall crane beam construction projects.

Keywords

pumped-storage power station; rock wall crane beam; rapid excavation support; pre-cracking blasting

抽水蓄能电站岩壁吊车梁快速开挖支护施工技术

周华 胡诗龙

中国水利水电第九工程局有限公司，中国 · 贵州 贵阳 550081

摘 要

岩壁吊车梁是抽水蓄能电站地下厂房的承重结构，开挖成型质量及支护可靠性直接决定厂房施工安全及后期运行稳定性，且施工进度会影响整个电站建设工期。本文针对安徽宁国抽水蓄能电站岩壁吊车梁施工中存在的断面复杂及成型难度大等问题，结合工程地质条件及工程量特点提出了一套快速开挖支护施工技术流程，重点优化施工分区流水作业模式，采用保护层高效开挖、岩台"双向预裂爆破"成型等关键技术，同时配套砂浆锚杆"先注浆后插杆"及预应力锚杆速凝锚固等高效支护工艺，旨在为同类抽水蓄能电站岩壁吊车梁施工提供参考。

关键词

抽水蓄能电站；岩壁吊车梁；快速开挖支护；预裂爆破

1 引言

在我国新型电力系统建设背景下，抽水蓄能电站对电网安全稳定运行具有支撑作用。近年来我国抽水蓄能电站建设快速发展，地下厂房这一电站枢纽工程，其结构施工技术难度持续提升。岩壁吊车梁多布置于地下厂房边墙中部位置，受洞室开挖扰动、围岩应力释放、多工序交叉施工等因素影响，其施工质量控制与进度管控已成为地下厂房工程施工的难点。安徽宁国抽水蓄能电站总装机容量 1200MW，地下厂房全长 178.5m，最大开挖高度 56.2m，工程地质条件复杂。厂区围岩以休宁组变质砂岩为主，岩体坚硬但节理裂隙发育，其中②号、⑧号节理组与厂房轴线呈小角度斜交，节理组合切割易形成局部不稳定块体，围岩存在塌落失稳风险。电站岩壁吊车梁布置于厂房第Ⅲ层边墙，单侧长度 157.5m，梁体底面高程 EL139.8m，顶面高程 EL142.7m，斜面与铅垂线夹角 27.5°，施工控制要求高，具有代表性。

【作者简介】周华（1982–），男，中国四川南部人，本科，高级工程师，从事水利水电施工技术管理研究。

2 岩壁吊车梁快速开挖施工技术

2.1 施工分区及流水作业

地下厂房第Ⅲ层开挖断面较宽，岩壁吊车梁位于边墙中部，若采用全断面一次开挖，易造成爆破振动损伤岩台围岩。施工中将第Ⅲ层划分为四个功能区：Ⅲ -1 区为中部拉槽区，宽 16m，采用两侧预裂、中间松动爆破方式，先形成临空面并释放地应力；Ⅲ -2 区和Ⅲ -3 区为预留保护层区，位于拉槽区两侧，用于保留岩石屏障，减弱后续爆破对岩壁的扰动；Ⅲ -4 区为岩壁吊车梁岩台预留区，作为最终成型部位，保留至最后精挖。开挖顺序按照"先拉槽、后保护层、

最后岩台”推进，中部拉槽超前保护层 20 ~ 30m 爆破，为保护层开挖提供侧向临空面，并形成出渣和机械通行通道。拉槽推进后，Ⅲ -2 区保护层跟进开挖，同时利用既有平台开展岩台垂直孔钻孔作业；Ⅲ -2 区完成后再开挖Ⅲ -3 区保护层，保护层全部完成后，实施岩台斜面孔钻孔，并与已完成的垂直孔联网同时起爆。

2.2 保护层高效开挖

保护层采用手风钻造孔，孔径统一为 50mm，根据现场围岩条件的变化灵活选用垂直钻孔或水平钻孔两种方案：当围岩完整性较好时采用垂直钻孔方案，主爆孔间排距按 1.2m × 1.2m 布置，孔深根据开挖层厚确定，单孔装药量控制在 1.5 ~ 2.1kg 范围内。当围岩节理裂隙较发育时，为避免垂直钻孔爆破后岩层面出现顺层滑塌改用水平钻孔方案，主爆孔间排距调整为 1.0m × 0.8m，单孔装药量 1.5kg。预裂孔的布置是保护层开挖的关键环节，预裂孔间距统一按 0.5m 控制，线装药密度根据不同层位调整，Ⅲ -2 区取 111g/m，Ⅲ -3 区加密至 125g/m。预裂孔装药时，将乳化炸药药卷及导爆索同时捆绑在竹片上，整体放入孔中，竹片贴向保留岩壁一侧，以增强预裂面的导向效果，装药完成后，采用钻屑堵塞孔口，堵塞长度 0.9 ~ 1.2m，防止爆生气体过早逸出。主爆孔装药则相对简单，直接将药卷投入孔内，采用连续装药方式并插入塑料管适当挤压，使炸药与孔壁充分接触。优化装药参数及起爆顺序，保护层开挖的半孔率可达到 85% 以上，为后续岩台精挖奠定良好基础。

2.3 岩台“双向预裂爆破”成型技术

钻孔参数严格按设计要求控制，垂直光爆孔孔径 50mm，孔距 30 ~ 40cm，孔深 197cm；斜面光爆孔孔径相同，孔距与垂直孔对应，孔深 166cm，开孔位置设于下拐点以下 3cm 处，以保证钻孔过程中钻头不损伤下拐点岩体。应在现场爆破试验后确定装药参数，试验选取三种线装药密度组合：方案一垂直孔 70g/m、斜面孔 60g/m；方案二垂直孔 90g/m、斜面孔 80g/m；方案三垂直孔 120g/m、斜面孔 100g/m。从低到高逐组进行试爆，观察岩面成型效果及半孔率，选取最优参数。装药结构采用间隔不耦合方式，不耦合系数为 1.56。将 ϕ32mm 乳化炸药按设计线密度切割成小段，用胶布绑扎在竹片上，竹片长度匹配孔深，绑扎时保持各药卷间距均匀。起爆网络采用数码电子雷管，可以做到毫秒级延时控制，垂直孔及斜面孔设置为同段起爆，使两排炮孔同时沿各自轮廓线形成裂缝。辅助孔及缓冲孔则设置 50~100ms 的延时，在主裂缝形成后起爆，进一步破碎内部岩体。数码电子雷管的高精度延时特性保证各炮孔按设计时序准确起爆，避免普通雷管因延时误差导致的爆破不同步问题。

2.4 钻孔精度控制技术

岩台双向预裂爆破的效果在很大程度上取决于钻孔精度，垂直孔同斜面孔的孔位、孔向、孔深若存在偏差，轻则导致岩面不平整，重则造成下拐点偏移或两排孔孔底无法交汇。为确保钻孔精度，研发专用钢管导向样架。样架全部采用 ϕ48 钢管搭设，由支撑排架、高程控制钢管、桩号控制钢管以及导向管四部分组成，支撑排架间距按 1.8m × 1.5m 布置，采用扣件连接，底部与地面锚筋点焊固定保证整体稳定性。高程控制钢管安装在支撑排架上，测量放样确定其中心高程，误差控制在 5mm 以内，该钢管用于控制垂直孔的孔口高程，桩号控制钢管则用于确定每个钻孔的桩号位置，同样经测量校核后方可固定。导向管采用双层套管结构，外套管为 ϕ48 钢管，长度 0.8m，固定在桩号控制钢管上；内导管为 ϕ32 钢管，套在外套管内并可沿轴向滑动。钻孔时，将钻杆插入内导管，内导管约束钻杆的方向及角度，外套管则保持内导管的稳定，垂直孔竖直布置导向管，斜面孔导向管按 27.5° 倾角固定在样架上，这种双层导向结构防止开孔时的跑钻现象，也避免长杆钻进过程中因钻杆挠曲而产生的孔向偏差。

2.5 控制爆破振动

对于岩壁吊车梁混凝土，龄期 0~3d 内允许质点振动速度小于 1.2cm/s，3 ~ 7d 为 1.2 ~ 2.5cm/s，7 ~ 28d 为 2.5 ~ 5cm/s，28d 以上小于 7cm/s。围岩灌浆部位在灌浆过程中不得受振动，灌浆完成后 3d 内控制标准更为严格，岩壁吊车梁锚杆在安装后初期对振动较为敏感，应相应提高控制标准。施工前开展系统的爆破试验，选取与岩壁吊车梁部位地质条件相近的试验段，采用不同的单响药量及起爆延时组合试爆，在距爆源不同距离处布置振动监测仪，记录质点振动速度峰值，建立单响药量与质点振速之间的经验关系式，据此确定每个爆破循环的最大允许单响药量。在实际施工中，每次爆破均实施振动监测，监测点布置在岩壁吊车梁锚杆附近以及已完成浇筑的混凝土结构上，重点监测峰值振速及主振频率，监测数据实时传输至控制中心，技术人员当场分析判断是否超限，一旦发现振速接近控制阈值立即调整后续爆破参数。

3 岩壁吊车梁高效支护施工技术

3.1 支护总体要求及施工顺序

岩壁吊车梁支护结构由 A、B、C 三类砂浆锚杆、护角锚杆及预应力锚杆构成，不同类别锚杆的施工顺序并非任意排列，而是遵循严格的逻辑关系，岩壁吊车梁锚杆的安装时机有明确限定：必须在该洞室已开挖临空的围岩永久支护锚杆全部安装完毕之后，且梁体下部洞室边墙开挖面已形成预裂缝的前提下，方可进行岩壁吊车梁锚杆的安装作业。这一规定的目的在于避免后续爆破振动影响锚杆锚固质量。当岩壁吊车梁锚杆与系统支护锚杆在空间布置上发生冲突时，设计上优先保证岩壁吊车梁锚杆的数量及位置满足设计要求，两类锚杆之间的净距以不小于 30cm 为控制标准。在任何施工情况下，岩壁吊车梁 A、B、C 锚杆的有效根数不得少于设计根数，这一底线要求贯穿施工全过程。

3.2 砂浆锚杆快速施工工艺

砂浆锚杆施工采用“先注浆后插杆”的工艺路线，这一顺序选择基于对上仰锚杆注浆饱满度的考量。钻孔作业由单臂钻或两臂钻完成，孔径不小于 76mm，锚杆杆体四周有足够厚度的水泥砂浆保护层，保护层厚度控制在 20mm 以上。造孔完毕后，采用高压风清除孔内岩粉及水体，遇粘土夹层时先以高压水冲洗再以高压风吹干，注浆前须排除孔内积水。经过试验确定水泥砂浆的配合比，强度等级不低于 M30，水灰比控制在 0.38 ~ 0.45 范围内，水泥与砂的重量比为 1:1.1 ~ 1.2，适量掺入助流膨胀剂以增强砂浆的膨胀性能，注浆作业开始前检查注浆泵性能，中途停止 30min 以上时用水或稀水泥浆润滑管路。注浆管插入孔底后退出 50 ~ 100mm 开始注浆，注浆过程中匀速缓慢拔出，同时做好体积计量，防止拔管过快造成砂浆脱节。注浆完成后即刻插入锚杆，二者衔接紧密，插杆过程中如遇阻碍不得倒退，可轻微旋转锚杆使之缓慢插入，严禁硬性敲击。

3.3 预应力锚杆高效施工

预应力锚杆施工的重点在于缩短内锚固段等待时间，并保证张拉受力稳定，施工中可采用速凝树脂锚固剂，钻孔孔径不小于 90mm，孔口提前用 M40 预缩砂浆找平，找平面积不小于 30cm × 30cm，最小厚度 5cm，为张拉垫板提供平整承压面。内锚固段长度按 3.0m、3.5m 或 4.0m 控制，具体长度依据现场试验确定。终孔验收合格后，根据孔深、锚固段长度及孔径计算锚固剂用量，并用注浆管将锚固剂推送至孔底。锚固剂注装完成后立即插入锚杆杆体，杆体到位后由钻机辅助旋转搅拌，搅拌须在锚固剂初凝前完成，初凝时间控制在 90s 以内。锚固剂凝固 30min 后安装垫板和螺帽，调整托板使其与锚杆轴线垂直。张拉采用 400kN 液压千斤顶，安装时保证锚具、垫板和千斤顶密贴对中。正式张拉前先按 20% 设计荷载预张拉 1 ~ 2 次，随后张拉至设计荷载的 105% ~ 110%，持荷 15 ~ 20min 后锁定。锁定 48h 内若预应力损失超过设计值 10%，应及时补偿张拉；锚固体强度达到设计强度 75% 后再施加预应力，张拉控制应力不得超过杆体强度标准值的 75%。

3.4 喷射混凝土施工

按照设计图纸及施工技术要求，岩壁吊车梁和网架牛腿部位的开挖岩面不进行喷射混凝土支护，这一规定的目的在于确保结构混凝土与岩面实现完整结合。为避免喷混凝土作业对岩壁吊车梁岩面造成污染，在喷混凝土施工前采取严密的遮盖保护措施，具体做法为：在岩壁吊车梁和网架牛腿部位上下设置 Φ8 插筋，插筋间距 1.0m，入岩 20cm，外露 10cm，将彩条布固定在插筋上。喷射混凝土所用水泥优先选用强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥，进场水泥均附有生产厂家的质量证明，砂料采用最大粒径不大于 2mm、细度模数在 2.4 ~ 2.8 之间的中细砂，使用前需过筛处理。拌和水不得含有影响水泥正常凝结与硬化的有害物质，不得使用未经处理的污染水。喷射混凝土作业采用湿喷工艺，分段分片自下而上依次进行，喷射方向大致垂直于岩面。分层喷射时，应在前一层混凝土终凝后进行后一层施工，若终凝 1h 后再行喷射，需先用风水清洗喷层面。喷射机作业严格执行操作规程连续供料，保持工作风压稳定，因故中断喷射作业时，及时清除喷射机及输料管内的积料并冲洗干净。喷混凝土完成后及时拆除彩条布，清理岩面残留混凝土，保证岩壁吊车梁岩面清洁无污染、无水泥砂浆浮浆及水垢。

4 结语

岩壁吊车梁施工技术的本质是重构开挖及支护之间的时空关系压缩整体工期，宁国电站实践中确立的分区流水模式揭示一个规律：工序间的时序搭接效率远高于单工序局部提速。后续同类工程可进一步结合三维测量、爆破参数智能反馈以及锚杆质量无损检测技术，将岩壁吊车梁施工从经验主导的粗放模式转变为数据驱动的新型管理模式。

参考文献

[1] 董树荣. 广西南宁抽水蓄能电站岩壁吊车梁快速开挖支护施工技术 [J]. 吉林水利, 2025, (10): 68-73.

[2] 管建龙, 温剑, 王笃文. 复杂地质条件下地下厂房岩壁吊车梁精细化开挖及支护施工技术 [J]. 四川水力发电, 2025, 44 (04): 13-16.

[3] 蒋明欢, 岑威钧, 王辉, 曹艺凡. 高地应力地下厂房岩壁吊车梁结构安全性分析 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (02): 145-149.

[4] 陈强. 一种抽水蓄能电站地下厂房岩壁吊车梁部位开挖施工方法 [J]. 价值工程, 2022, 41 (30): 87-89.

[5] 刘蕊, 余健. 清原抽水蓄能电站厂房岩壁吊车梁开挖质量控制技术 [J]. 东北水利水电, 2021, 39 (09): 19-21+53+71.