

抽水蓄能电站水磨钻开挖技术探索与应用

冯 晓

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司 四川 成都 611100

摘要: 在能源转型加速、抽水蓄能电站大规模建设的背景下,硬岩开挖面临精度与环保双重挑战。本文以抽水蓄能电站水磨钻开挖技术为研究对象,系统分析技术原理、特点及关键应用环节。通过阐述非爆破钻孔取芯的技术原理,梳理低环境影响等四大技术特点,深入研究地质适配、分层开挖、设备选型、质量安全管控四大关键技术,细化施工准备、测量定位、钻孔破碎出渣、质量控制的应用流程。研究表明,该技术可满足抽水蓄能电站硬岩开挖的精度与安全需求,为同类工程提供技术参考,具备良好推广价值。

关键词: 抽水蓄能电站;水磨钻开挖技术;应用流程

引言:当前能源结构调整背景下,抽水蓄能电站建设需求激增,其硬岩开挖面临环境敏感、精度要求高、地质复杂等挑战,传统爆破技术易引发安全与生态问题。水磨钻非爆破开挖技术因低扰动、低成本等优势,逐渐成为优选方案,但在抽蓄电站复杂场景中的应用仍需系统探索。

1 水磨钻开挖技术原理与特点

1.1 水磨钻开挖技术原理

水磨钻开挖技术是基于岩石力学特性的非爆破硬岩开挖方法,核心是利用岩石抗压强度高、抗拉抗剪强度低的特点,通过钻孔取芯创造临空面实现岩石破碎。操作中,先以特定直径的混凝土取芯钻孔机,沿开挖轮廓线或桩基础设计圆周钻孔取芯,取出的圆柱体岩芯会在钻孔区域形成外周临空面(如桩基础施工中形成环形临空面)。随后处理中部岩芯:沿圆半径取芯分块,在岩芯钻一排小孔并插入钢楔捶击,使岩石受铅锤面拉力与水平面剪切力。当挤压力超岩石极限抗拉、抗剪力之和时,岩石沿铅锤面拉裂且从底部剪切破裂,分裂成小块便于清理。通过分层取芯、破裂、取岩块的循环,逐步完成开挖。

1.2 水磨钻开挖技术特点

水磨钻开挖技术特点有:(1)低环境影响。无传统爆破的强烈震动波,避免破坏周边建筑基础、扰动地下管线,对环境和既有结构影响小,适用于城市区域、文物保护单位等环境敏感场景。(2)成本效益。水磨钻机等设备价格亲民、维护简便;对劳动力需求少,普通工人经简单培训即可上岗,降低人工成本;无需爆破所需的高额火工品费用与复杂审批,施工成本可控。(3)工艺简便。操作流程易懂,施工人员短期培训后能熟练掌握设备操作与施工步骤,易在不同规模施工队伍中推广,无需依赖高技

术人才,为工程开展提供便利。(4)适用广泛。可应用于城市地铁(不影响居民生活与建筑安全)、地下管线铺设(精准开挖防管线损坏)、小型涵洞、岩石边坡开挖等各类工程,保障工程安全高效进行^[1]。

2 抽水蓄能电站水磨钻开挖关键技术

2.1 地质条件适配与预处理技术

抽水蓄能电站施工前需针对硬岩特性及复杂地质情况,开展针对性适配与预处理,为开挖作业奠定基础,具体如下:(1)进行精细化地质勘察。通过钻孔取样、声波测试等手段,明确开挖区域岩石的抗压强度、完整性系数、节理裂隙发育程度及地下水分布情况——针对抗压强度50-150MPa的中硬岩,需调整钻筒切削参数;针对节理密集区,需提前判断岩体稳定性,避免开挖过程中出现塌方风险。(2)实施地质预处理措施。对于局部破碎岩层,采用超前小导管注浆或锚杆支护,增强岩体整体性,防止钻孔过程中岩块脱落;对于地下水富集区,通过井点降水、导水孔引流等方式降低地下水位,避免钻孔时出现涌水、泥浆漫溢问题,同时减少钻筒因遇水打滑导致的效率下降;对于岩层倾角大于30°的倾斜地层,需通过调整钻孔角度补偿岩层倾斜影响,确保开挖轮廓线符合设计要求,避免因岩层滑动导致开挖面偏移。

2.2 分层分段开挖与临空面控制技术

抽水蓄能电站开挖区域(如地下洞室边墙、桩基础)多存在空间受限、轮廓精度要求高的特点,分层分段开挖与临空面控制技术是保障施工安全与开挖质量的核心。(1)在分层开挖设计上,根据开挖深度、岩石硬度及支护要求确定分层厚度:对于地下洞室开挖,分层厚度通常控制在1.5-2.5m,避免单次开挖深度过大导致岩体应力集中;对于边坡基础开挖,分层厚度需结合边

坡率调整,一般不超过2m,同时每层开挖后及时进行临时支护,防止边坡失稳。(2)临空面控制要遵循“先外围、后核心”的原则:沿设计开挖轮廓线先钻设周边孔,形成封闭的外周临空面,周边孔的孔径、孔距需根据岩石完整性确定——中硬岩区域孔距控制在30-50cm,硬岩区域缩小至20-30cm,确保外周岩芯完整取出,为中部岩体破碎提供稳定受力面;中部岩体开挖时,需按“分块对称”原则划分开挖单元,每块面积不超过5m²,避免单次破碎范围过大导致岩体坍塌,同时通过控制钻孔深度(通常比分层厚度深10-15cm),确保岩体破碎后无残留岩根,减少后续清理工作量^[2]。

2.3 设备选型与高效作业保障技术

水磨钻开挖效率与设备性能直接相关,抽水蓄能电站需结合工程规模与地质条件,优化设备选型与作业流程,提升施工效率。(1)设备选型需聚焦核心参数匹配。主钻机需选择功率15-22kW、转速80-120r/min的中型水磨钻机,确保在硬岩中具备足够切削力;钻筒需选用金刚石复合片(PDC)材质,针对不同岩石硬度调整钻筒壁厚(中硬岩选8-10mm,硬岩选10-12mm),同时优化钻筒排渣槽设计,提升泥浆排出效率,减少卡钻风险;配套设备需选用高压注浆泵(压力 $\geq 10\text{MPa}$)用于地质预处理,以及低噪音空压机(噪音 $\leq 85\text{dB}$)辅助岩体破碎,兼顾施工效率与环境要求。(2)高效作业保障需优化操作流程:钻孔时采用“匀速进给+循环冷却”模式,进给速度控制在5-8cm/min,避免因进给过快导致钻筒磨损加剧;冷却水循环系统需设置三级过滤装置,过滤泥浆中的岩屑杂质,防止管路堵塞,同时控制水温不超过40℃,避免钻筒因过热降低使用寿命;岩体破碎时采用“多楔同步捶击”方式,每个破碎单元插入3-4个钢楔,间距控制在20-30cm,确保岩体受力均匀,减少破碎时间。

2.4 开挖质量与安全管控技术

抽水蓄能电站对开挖质量(如轮廓尺寸、平整度)及施工安全要求严苛,要建立全流程质量与安全管控体系,规避工程风险。(1)质量管控要聚焦关键指标:开挖轮廓线偏差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 内,通过全站仪实时放线复核,每完成10m开挖段进行一次轮廓检测;开挖面平整度偏差不得超过3cm/m,采用2m靠尺检测,对超差区域及时进行修凿处理;岩芯取出率需 $\geq 90\%$,通过统计岩芯长度与钻孔深度的比值,判断岩层完整性,若取出率低于85%,需重新评估地质条件并调整开挖参数。(2)安全管控要落实全环节措施:作业前对施工人员进行专项培训,考核合格后方可上岗,重点培训钻筒更换、钢楔

捶击等高危操作的安全规范;施工现场设置临边防护栏(高度 $\geq 1.2\text{m}$)、警示标识,地下洞室作业需配备通风设备(风量 $\geq 3\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{人}$)及有毒气体检测仪,防止缺氧或有害气体超标;定期检查设备运行状态,重点排查钻机油路、电路的密封性与绝缘性,钢楔、钻杆等易损件需定期更换,避免因设备故障引发安全事故^[3]。

3 水磨钻开挖技术在抽水蓄能电站中的应用流程

3.1 施工前期准备工作

抽水蓄能电站多位于山区或复杂地质构造区域,施工前期准备要结合工程特性强化针对性。场地平整阶段,除常规杂草、浮石清理外,需重点评估地基承载力与排水需求:针对软弱地基区域,采用级配砂石分层回填(每层厚度 $\leq 30\text{cm}$),经重型压路机碾压后,通过灌砂法验证压实度 $\geq 90\%$,确保钻机作业稳定性;临时排水系统需结合电站区域降雨特征设计,主排水沟宽度 $\geq 40\text{cm}$ 、深度 $\geq 50\text{cm}$,坡度控制在3‰-5‰,末端连接沉淀池(容积 $\geq 20\text{m}^3$)实现泥水分离,避免直接排入河道影响生态。设备选型需匹配抽蓄工程特点:主钻机功率15-22kW可满足中硬岩至硬岩钻进需求,金刚石复合片钻筒直径80-120mm适配不同开挖轮廓(如洞室拱顶、边墙),高压水泵压力 $\geq 0.8\text{MPa}$ 确保冷却水循环效率,空压机风压0.6-0.8MPa适配风镐破碎作业。材料储备需建立动态管理机制:钻筒按开挖量1.2倍备货,结合钻进速度(5-8cm/min)计算每日消耗量,设置安全库存预警线;钢楔长度20-30cm符合人体工程学操作需求,润滑油选用抗磨液压油(粘度等级46#)适应钻机高温工况。人员培训需构建“理论+实操+考核”体系:理论课程涵盖钻机结构原理、钻进参数设定、安全操作规程;实操演练重点训练钻筒更换、钻杆连接、应急停机操作,考核标准包含操作熟练度、安全意识、故障处理能力,合格率需达100%方可上岗,岗位分工明确至钻孔、破碎、安全监控等具体职能。

3.2 测量放线与定位

抽水蓄能电站对开挖精度要求极高,测量定位要遵循“三级复核”制度确保零误差。控制网布设采用全站仪(精度 $\pm 2\text{mm}$)结合卫星定位技术,在开挖区域外稳定基岩上布设控制点,形成闭合导线网,平面坐标与高程数据需与设计图纸严格比对,误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。地下洞室或桩基础开挖时,需在开挖面标注中心点、轮廓线及分层开挖线:中心点通过全站仪交会法确定,轮廓线采用墨斗弹设,对直线段每2m、曲线段每5m设置加密控制点,确保轮廓线连续平滑;分层开挖线间距1.5-2.5m依据岩体稳定性确定,软弱岩体取下限,坚硬岩体取上

限。水准点设置于轮廓线外侧50cm稳定区域，用于开挖深度监测与复核，每10m放线段需进行闭合校验，平面位置偏差 $\leq \pm 3\text{cm}$ 、高程偏差 $\leq \pm 2\text{cm}$ ，若超限需重新调整控制点并复测，直至满足设计要求。

3.3 钻孔取芯与岩体破碎出渣

钻孔取芯是岩体破碎的前提，需严格控制孔位、孔径、孔深及垂直度。周边孔布设沿开挖轮廓线展开，孔距依据岩石硬度调整：中硬岩30-50cm、硬岩20-30cm，确保破碎后岩体轮廓完整；钻孔角度采用电子经纬仪校准，垂直度偏差 $\leq 0.5^\circ$ ，避免因角度偏差导致超挖或欠挖。钻进过程采用“匀速进给”策略，进给速度5-8cm/min匹配钻机扭矩与钻筒寿命，过慢影响效率，过快导致钻筒磨损加剧或卡钻；钻孔深度比分层开挖厚度深10-15cm，预留破碎空间，避免残留岩根影响后续作业。钻筒磨损监测通过游标卡尺定期测量切削刃高度，当高度 $< 3\text{mm}$ 时立即更换，更换时执行“断电-固定-拆卸-安装-同心度检查”标准流程，确保钻机安全运行。岩体破碎优先采用楔裂法：在中部岩体钻设间距20-30cm的裂碎孔，插入钢楔后通过同步捶击施加剪切力与拉力，实现岩体破裂；对坚硬岩体辅以风镐破碎，风压控制0.6-0.8MPa，避免过度冲击导致岩体飞溅伤人。出渣流程遵循“分层清理、有序运输”原则：人工清理小块岩石后，采用小型装载机（斗容0.5-1 m^3 ）转运至临时渣场，渣场设置隔离围挡与防尘网，同步实施洒水降尘；地下洞室采用轨道式矿车运输，通过减速带与限位装置确保运行平稳，避免碰撞开挖面造成二次破坏^[4]。

3.4 施工质量控制要点

质量控制贯穿开挖全周期，需建立“过程监控+结果验证”双控体系。孔径控制通过钻筒标准化管理实现：每批次钻筒进场抽检直径偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，钻孔过程中每20孔用卡尺测量孔径，若偏差 $> -3\text{mm}$ （即孔径偏小）需

立即更换钻筒，避免影响后续破碎效果。孔深控制采用“钻杆标记+水准测量”双重校验：钻杆按分层厚度标注刻度，钻孔时实时对照刻度控制深度，同时用水准仪监测开挖面高程，孔深偏差 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，超差时需调整钻进参数或重新钻孔。垂直度控制通过钻机水平仪实时监测，钻孔前调整钻机四角水平，钻孔过程中每钻进50cm检查一次垂直度，若偏差超限需停机调整钻机角度后继续钻进。开挖轮廓线完整性需每日巡检，超挖量 $> 5\text{cm}$ 区域采用C20混凝土回填，欠挖量 $> 3\text{cm}$ 区域用风镐修凿，确保开挖面平整度符合设计规范。建立质量追溯机制，记录每孔钻进参数、破碎效果、出渣情况，形成完整的质量控制档案，为后续施工提供数据支撑。

结束语：本文全面剖析了抽水蓄能电站水磨钻开挖技术的原理、关键技术与应用流程，明确了地质预处理、分层开挖控制、设备优化选型等核心要点，验证了该技术在抽蓄电站硬岩开挖中的可行性与优势。其低环境影响、高性价比的特点，可有效助力抽蓄电站建设降本增效、保障安全。未来可进一步探索技术与智能化设备的结合，优化施工参数，推动该技术在更复杂地质条件下的应用，为抽水蓄能电站建设技术升级提供更多可能。

参考文献

- [1]付闯,谢文峰,张浩,等.抽水蓄能电站水磨钻开挖技术探索与应用[J].水利水电快报,2025,46(z1):42-45,49.
- [2]李琛.抽水蓄能电站通风兼安全洞开挖支护施工技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(1):118-121.
- [3]马赛.抽水蓄能电站地下洞室群开挖及通风技术研究[J].建筑机械化,2024,45(3):69-72.
- [4]马俊福.水磨钻施工在小型水工隧洞中的技术应用[J].大众标准化,2025(15):153-155.