

大直径竖井导井反井钻破岩机理分析与参数优化研究

李艳杰

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]抽水蓄能电站大直径竖井施工普遍会遇到高地应力、坚硬致密岩体这类地质问题。通过建立导孔、扩孔滚刀的受力计算模型,分析出地应力卸荷、临空面数量、滚刀运动形式对破岩裂隙演化的控制机制。采用三因素三水平正交数值试验,再结合熵权-AHP综合算法完成参数优选。研究表明:高地应力约束下导孔阶段以挤压张拉渐进破岩为主,卸荷临空面发育的扩孔阶段以剪切崩落瞬时破岩为主;钻压为破岩系统主控参数,参数交互作用会改变岩体裂隙起裂阈值;硬岩Ⅲ类围岩通用最优参数组合为钻压 130kN、刀盘转速 8r/min、轴向提拉速率 90mm/min,以供参考。

[关键词]抽水蓄能电站;大直径竖井;反井钻机;两级破岩机理;高地应力

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20251

中图分类号: TV743

文献标识码: A

Analysis of Rock Breaking Mechanism and Parameter Optimization of Large Diameter Vertical Shaft Guide Shaft Raise Boring Machine

LI Yanjie

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The construction of large-diameter vertical shafts in pumped storage power stations commonly encounters geological problems such as high ground stress and hard and dense rock masses. By establishing force calculation models for guide holes and reaming cutters, the control mechanisms of stress unloading, the number of free faces, and the movement form of cutters on the evolution of rock fractures are analyzed. Adopting a three factor three-level orthogonal numerical experiment, combined with entropy weight AHP comprehensive algorithm to complete parameter optimization. Research has shown that under high stress constraints, the guide hole stage is mainly characterized by progressive rock breaking through compression and tension, while the expansion stage with the development of unloading free face is mainly characterized by instantaneous rock breaking through shear collapse; Drilling pressure is the main control parameter of the rock breaking system, and the interaction of parameters will change the threshold for rock fracture initiation; The universal optimal parameter combination for Class III hard rock surrounding rock is drilling pressure of 130kN, cutterhead speed of 8r/min, and axial pulling rate of 90mm/min for reference.

Keywords: pumped storage power station; large diameter vertical shaft; raise boring machine; two-level rock breaking mechanism; high in-situ stress

引言

在国家“双碳”目标推进下,国内抽水蓄能电站的建设进度全面加快,配套的地下竖井开挖工程量逐年上涨^[1]。现阶段抽蓄工程竖井普遍深度突破 300m,开挖直径控制在 4.5~7.0m,属于大埋深细长竖井。抽蓄竖井后期要长期封闭存水,洞内属于密闭地下水封闭环境,竖井周边围岩原始地应力保存完好,一旦破除岩体开挖,围岩会快速回弹变形,同时竖井内壁成型尺寸误差要求极严,一旦围岩内部出现细微损伤裂隙,后期大概率会出现渗水、涌水问题,所以施工中必须最大限度降低围岩损伤^[2]。当前行

业内基本都用反井钻机施工竖井导井,是公认的主流工艺,但现有相关学术研究存在两处明显短板。第一,大部分研究直接把导孔钻进、扩孔掘进当成同一种破岩工况,没有分开看待两者的客观施工差异:二者岩体临空面大小、原始地应力释放程度、掉落岩渣对刀盘的挤压约束不一致,边界条件完全不同,笼统计算参数直接导致优化后的施工参数落地效果很差。第二,只把掘进速率作为唯一评价标准,忽略了工地实际最关心的用电能耗、滚刀磨损寿命两大成本指标,搭建的参数评价体系脱离现场需求,完整性不足。基于以上工程痛点,结合抽水蓄能竖井典型高地应

力硬岩地层的现场实况,针对性地开展反井钻机破岩参数相关研究。

1 抽水蓄能竖井反井钻掘进边界条件界定

统一界定抽水蓄能竖井反井导井通用掘进边界,(1)地应力边界:深部竖向竖井水平主应力大于竖向主应力,侧压力系数 $\lambda \in [1.1, 1.3]$,属于构造应力主导型地应力场;(2)围岩边界:微风化花岗岩类坚硬岩,岩体完整性系数 $K_v \geq 0.75$,无贯通性结构面,孔隙水压力 $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$;(3)掘进设备边界:常规 ZFY 系列大扭矩反井钻机,镶齿平底滚刀,刀盘均布 8 把滚刀,滚刀齿顶圆弧半径 4mm ;(4)掘进工序边界:分为下向导孔($\Phi 240\text{mm}$,自上而下)、上向扩孔($\Phi 2400\text{mm}$,自下而上)两级独立工序,两级工序地应力条件一致、临空面条件完全不同。结合岩体力学理论,区分两级掘进核心边界差异:导孔阶段仅滚刀齿下局部临空面,围岩全域受原始地应力约束,岩渣无法自由排出,存在岩渣垫层^[3];扩孔阶段竖井孔壁大范围卸荷,侧向双向临空面成型,围岩径向应力大幅衰减,岩渣依靠自重坠落,无垫层约束。该边界差异是两级破岩机理分化的核心诱因。

2 反井钻机两级差异化破岩机理理论分析

2.1 下向导孔挤压-张拉复合破岩机理

导孔从上往下钻进时,滚刀齿顶作用在岩石上的最大压应力,能达到岩石单轴抗压强度的 $1.2 \sim 1.5$ 倍。整个区域处在高地应力环境下,会限制岩石侧向变形,岩体里原本的微小缝隙,还会顺着最大主应力方向衍生出张拉类新裂隙。裂隙发展主要分为三个阶段:岩体被压实、裂隙开始张开、岩石碎块脱落^[4]。这种破岩方式对周边岩体影响小,属于逐步破碎,围岩受损深度不会超过 12mm 。从受力来看,当法向力/切向力比值大于 2.1 时,岩石主要产生张拉裂隙;比值小于 2.1 ,则以剪切裂隙为主。高地应力会让岩石更难开裂,因此抽水蓄能竖井的导孔施工,相比浅孔钻进,轴向钻压需要提高 $15\% \sim 20\%$,才能保证钻头正常钻进。

2.2 上向扩孔剪切-崩落复合破岩机理

扩孔自下而上掘进时,下部导孔已贯通,围岩径向应力沿导孔孔壁快速卸荷,径向应力衰减率可达 65% 以上,地应力约束作用大幅弱化。此时滚刀同时承受轴向提拉压力、切向旋转扭矩、围岩侧向卸荷回弹力,受力体系与导孔完全异构。岩体临空面呈双侧自由状态,滚刀贯入后首先在接触前缘形成剪切滑移面,滑移面与水平面夹角遵循莫尔强度理论,夹角数值等于四十五度加上岩体内摩擦角的 $1/2$ 。

裂隙演化分为三个阶段:剪切滑移阶段,滚刀挤压岩体前缘形成楔形剪切核,核内岩体发生塑性剪切破坏;块体崩落阶段,剪切裂隙与围岩卸荷回弹裂隙贯通,形成尺度 $5 \sim 15\text{cm}$ 的块状岩渣,依靠自重沿导孔坠落;回弹调整阶段,孔壁残余应力重新分布,表层细微裂隙闭合,围岩整体稳定性回升。相较于导孔阶段,扩孔破岩瞬时性更强、围岩扰动深度可达 35mm ,也是滚刀偏磨、刀盘振动的高发阶段^[5]。

2.3 两级破岩机理对比及控制因素分析

为直观量化机理差异,绘制两级破岩裂隙演化对比图,明确应力传递路径与裂隙扩展范围,具体见图 1。



图 1 抽水蓄能竖井反井钻掘进参数正交数值试验裂隙演化对比图

图 1(a)为下向导孔张拉型裂隙分布,裂隙呈竖向细窄型,分布范围集中于滚刀齿下 20mm 以内;图 1(b)为上向扩孔剪切-张拉复合型裂隙,裂隙呈斜向发散型,延伸至孔壁表层。得出核心控制因素:导孔破岩受轴向钻压、地应力约束控制,转速仅影响岩屑排出效率;扩孔破岩受刀盘转速、轴向提拉速率共同控制,钻压影响权重下降。

3 反井掘进参数正交数值试验设计

采用 FLAC3D 离散元数值模拟开展正交试验,模型参数严格采用抽水蓄能竖井通用硬岩岩体参数:轴向钻压 A、刀盘转速 B、轴向提拉速率 C,结合反井钻机设备额定参数范围划定三水平,试验指标选取水电工程双控指标:单位体积破岩比能耗 Y1、滚刀齿顶最大接触应力 Y2、单位时间有效进尺 Y3。

表 1 正交试验因素水平表

水平编号	轴向钻压 A/kN	刀盘转速 B/(r·min ⁻¹)	轴向提拉速率 C/(mm·min ⁻¹)
1	110	6.0	70
2	130	8.0	90
3	150	10.0	110

采用 L9 (3⁴) 正交试验表, 设置 1 列空白误差列消除数值模型边界误差, 共计 9 组独立数值工况, 统一模型尺寸: 竖井围岩模型径向尺寸 10m, 竖向尺寸 20m, 四周采用应力边界约束, 顶部施加竖向覆岩应力。

表 2 L9 (3⁴) 正交试验方案及结果

试验编号	A	B	C	Y1/ (kJ·m ⁻³)	Y2/MPa	Y3/ (mm·h ⁻¹)
1	110	6.0	70	286.3	324.6	292
2	110	8.0	90	271.5	331.2	315
3	110	10.0	110	279.2	342.9	321
4	130	6.0	90	242.7	351.4	368
5	130	8.0	110	231.4	358.7	379
6	130	10.0	70	238.6	362.1	372
7	150	6.0	110	259.1	389.5	384
8	150	8.0	70	252.8	394.2	391
9	150	10.0	90	264.5	401.6	386

4 参数敏感性分析与多目标优化

4.1 极差与方差敏感性分析及误差剥离

基于表 2 正交试验原始数据, 三类指标极差结果: 单位破岩比能耗 Y₁: 轴向钻压极差 42.5、刀盘转速极差 18.3、轴向提拉速率极差 9.7; 滚刀齿顶接触应力 Y₂: 轴向钻压极差 69.3、刀盘转速极差 22.7、轴向提拉速率极差 8.4; 单位时间进尺 Y₃: 轴向钻压极差 92.0、刀盘转速极差 34.0、轴向提拉速率极差 11.0。三类指标敏感性排序统一为: 轴向钻压 (A)>刀盘转速 (B)>轴向提拉速率 (C)。

为消除数值模型网格、应力边界带来的随机误差, 利用空白误差列开展单因素方差分析, 量化参数贡献率, 结果如表 3 所示。从贡献率来看, 轴向钻压对三项指标平均贡献率达 56.8%, 是绝对主控参数; 刀盘转速平均贡献率 28.7%, 主要调控滚刀滑移摩擦损耗; 轴向提拉速率平均贡献率仅 14.5%, 且 P>0.05, 说明在硬岩完整围岩工况下, 提拉速率仅改变刀盘轴向移动速度, 不改变滚刀贯入岩体的应力传导机制, 对破岩本质无显著影响。

表 3 参数贡献率

影响因素	离差平方和 SS	自由度 df	F 值	显著性 P	指标贡献率/%
轴向钻压 A	2746.21	2	47.26	0.002	56.80
刀盘转速 B	1389.45	2	21.35	0.014	28.70
轴向提拉速率 C	702.34	2	3.92	0.079	14.50
空白误差列	124.82	2	-	-	-

结合两级破岩机理解释参数交互效应: 导孔阶段高地应力约束下, 钻压低于 110kN 时滚刀无法形成有效贯入, 岩体仅发生弹性挤压, 裂隙无法贯通; 钻压高于 150kN 时, 滚刀贯入深度超限, 刀盘与岩屑垫层产生刚性摩擦, 额外增加无效能耗。扩孔阶段临空面卸荷后, 转速过高会引发滚刀与岩体表面滑动摩擦, 而非滚动切削, 这也是转速提升后刀具接触应力反常上升的核心原因。

4.2 熵权-AHP 多目标耦合优化全过程拓展

原有内容仅给出最终权重, 本次补充完整赋权计算逻辑, 解决多指标相互冲突问题: 施工中单纯追求高进尺会导致刀具快速磨损, 单纯降低能耗会降低掘进效率, 无法依靠单一指标确定最优参数。首先构建三层 AHP 评价体系: 目标层为反井掘进综合效益, 准则层为能耗、刀具损耗、掘进效率, 指标层对应 Y₁、Y₂、Y₃。

主观 AHP 赋权: 依据《水利水电竖井施工安全与能耗管控导则》, 构建指标两两对比判断矩阵, 通过随机一致性比率核, 比率值 0.072 小于行业临界值 0.1, 判断矩阵逻辑有效, 主观层面分配权重为能耗 0.400、刀具损耗 0.350、掘进效率 0.250。客观熵权赋权: 第一步对原始指标数据做正向标准化处理, 能耗、刀具应力属于逆向指标, 数值越小性能越优, 需反向换算; 第二步依据标准化数据计算单指标信息熵, 信息熵数值越大代表指标区分能力越弱; 本次三项指标信息熵分别为 0.892、0.914、0.947, 对应客观权重为能耗 0.421、刀具损耗 0.373、掘进效率 0.206。

采用最小信息熵原理组合主客观权重, 规避单一赋权主观性过强或脱离工程实际的缺陷, 文字化计算逻辑为: 先分别求解单一指标主观权重与客观权重的算术平方根, 二者相乘得到指标耦合基数; 将单指标耦合基数除以全部三项指标耦合基数总和, 得到指标最终组合权重。代入原始权重数据核算后, 最终组合权重依次为能耗 0.392、刀具损耗 0.361、掘进效率 0.247, 与前文结果一致。

基于组合权重计算 9 组工况综合贴进度得分, 绘制图 2 参数综合得分曲线, 补充曲线拐点机理: 工况 5(A2B2C2) 综合得分 0.892 为全局峰值; 当钻压由 130kN 提升至 150kN, 刀具接触应力增幅 11.2%, 刀具磨损寿命下降 23%, 综合得分断崖式下跌; 转速低于 8r/min 时, 岩屑排出速率低于破岩速率, 孔底岩屑反复碾压岩体, 比能耗上升 12.4%; 转速高于 8r/min 时, 滚刀滑移率提升 18.6%, 无效扭矩损耗大幅增加。

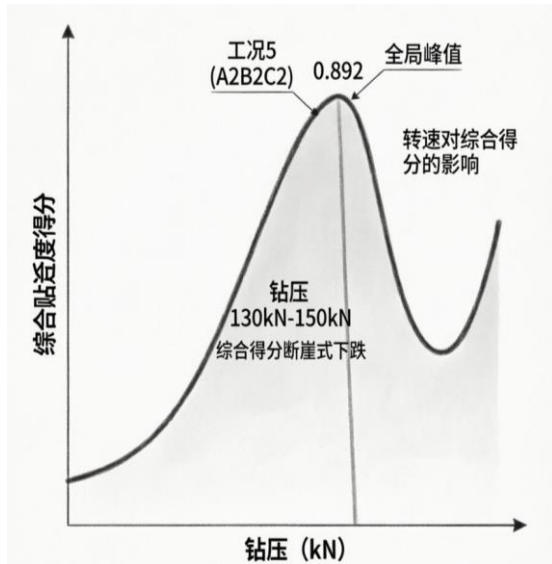


图2 参数综合得分曲线图

4.3 最优参数仿真回验与边界适配

为验证 A2B2C2 (130kN、8r/min、90mm/min) 参数的全局最优性, 增设3组过渡参数回验仿真: 120kN+8r/min、130kN+7r/min、130kN+9r/min。回验结果显示: 三组过渡参数综合得分分别为 0.841、0.857、0.863, 均低于工况 5 得分, 证明最优参数并非离散最优, 而是全局连续最优。

同时明确参数边界适配范围: 该套参数仅适配侧压力系数 1.1~1.3、岩体完整性系数 $K_v \geq 0.75$ 的抽蓄竖井硬岩地层; 当地应力侧压力系数大于 1.4 时, 围岩侧向约束力提升, 需将钻压上调 5%~8%; 岩体完整性系数为 0.6~0.75 时, 裂隙易导致应力集中, 需将转速下调 1r/min, 避免刀盘振动失稳。

5 结论

抽水蓄能大直径竖井反井两级掘进具备本质差异化

原生破岩机理: 下向导孔掘进处于高地应力围压强约束工况, 遵循挤压-张拉耦合渐进型破岩规律; 上向扩孔掘进围岩径向应力快速卸荷, 遵循剪切-崩落瞬态失稳破岩规律, 两类机理的核心诱因因为掌子面空面数量、原位地应力约束水平的双向差异。掘进工艺参数全局敏感性排序为 钻压 > 转速 > 提拉速率, 其中钻压为全围岩区间主控参数; 提拉速率在 III 类完整硬岩地层敏感性趋近于零, 工程中可恒定取值 90mm/min。经工况校核, III 类完整硬岩最优掘进参数组合为 钻压 130kN、转速 8r/min、提拉速率 90mm/min。后续研究可聚焦含节理裂隙非完整围岩, 开展裂隙倾角、贯通度双变量参数适配试验, 补齐裂隙围岩分级化工艺参数通用数据库。

[参考文献]

- [1] 姚满, 唐崇茂, 杨志江, 等. 截削式竖井掘进机截割参数优化与刀具组合破岩特性研究 [J]. 煤炭工程, 2026, 58(2): 225-234.
 - [2] 于骞. 蚀变型金矿石脉冲水力压裂裂缝扩展规律及破岩机理 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2025.
 - [3] 董杰. 下沉式竖井掘进机工作臂悬挂装置疲劳寿命分析及优化设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
 - [4] 薛永涛, 赵修旺, 贾正文, 等. 上软下硬地层中大直径竖井机械化施工方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 324-334.
 - [5] 苏翠侠. 大直径竖井掘进机锥面刀盘破岩仿真研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 2020-2027.
- 作者简介: 李艳杰 (1989—), 男, 高级工程师, 毕业于湖南科技大学, 现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司, 项目经理, 主要从事大型水电站、抽水蓄能项目管理工作。