

# 缓坡斜井精准反导井正挖法施工技术研究

郑尧

(中国水利水电第七工程局有限公司,四川成都 610213)

**摘要:**“精准反导井正挖法”是一种新型缓坡斜井施工工艺,该工艺运用 MWD、RMRS 测斜技术实现了导孔精准定位,引入定向钻机达到钻进纠偏的目的,改进后的反井钻机克服了缓坡斜井的大扭矩,实现了导井反扩;通过溜渣模型试验解析了渣料的运动特征,降低了堵井风险;最后运用爆破颗粒控制和溜渣技术实现了缓坡斜井安全、高效的开挖。本文阐述了对缓坡斜井精准反导井正挖法施工技术进行的研究。

**关键词:**缓坡斜井;反导井正挖法;模型试验;控制爆破;溜渣井;阳江抽水蓄能电站

**中图分类号:**TV7;TV52;TV554;TV51

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2184(2023)06-0034-05

## Research on Construction Technology of the Accurate Inverse-induced Shaft Forward Excavation Method Applied in the Inclined Shaft with a Gentle Slope

ZHENG Yao

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

**Abstract:** "Accurate inverse-induced shaft forward excavation method" is a new type of construction technology applied in the gentle slope, which uses MWD and RMRS inclination measurement technology to achieve the accurate positioning of the pilot holes, and introduces directional drilling rig to achieve the purpose of drilling correction, and improves the inverse-induced shaft drilling rig to overcome the large torque of the inclined shaft with a gentle slope and realize the reverse excavation of the guide shaft. The movement characteristics of slag material are analyzed by slag sliding model test, reducing the risk of shaft plugging. Finally, blasting particle control and slag conveying technology are adopted to realize the safe and efficient excavation of the inclined shaft with a gentle slope. This article describes the research on construction technology of the accurate inverse-induced shaft forward excavation method applied in the inclined shaft with a gentle slope.

**Key words:** Inclined shaft with a gentle slope; Inverse-induced shaft forward excavation method; Model test; Controlled blasting; Slag sliding shaft; Yangjiang Pumped Storage Power Station

### 1 概述

阳江抽水蓄能电站(以下简称“阳蓄电站”)为国内已建一等[大(1)型]工程中净水头最高、埋深最大、灌浆压力最大的电站,在国际上亦处于前列。该电站高压电缆洞斜井倾角为 $36^\circ$ ,长度为 262.93 m(包括弯段),呈城门洞型,断面尺寸为 $6\text{ m}\times 5.4\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)。目前国内、外缓倾角斜井的施工常采用正井法或反井法,但其均存在安全风险高、投入成本大、工期长等问题。该工程若采用反井钻机法施工是最高效、安全的开挖方法,但因该工程斜井角度明显偏小,导致反井钻机施工导孔贯通困难,导井溜渣安全风险高,且倾角为 $36^\circ$ 的斜井采用反井钻机法施工尚无先例可寻。因此,项目部依托该工程开展了缓坡斜井施工工艺

的分析研究,提出了一种安全、优质、高效的“精准反导井正挖法”,并予以应用,取得了较好的效果。阐述了对缓坡斜井精准反导井正挖法施工技术进行的研究。

### 2 施工工艺的比较与分析

结合阳蓄电站倾角为 $36^\circ$ 的高压电缆洞斜井,此次研究主要针对 $30^\circ\sim 45^\circ$ 缓坡斜井施工工艺进行。根据《水电水利工程斜井竖井施工规范》(DL/T5407-2019)条文说明 4.1.1 条中的建议:“ $30^\circ\sim 45^\circ$ 的缓斜井采用自上而下全断面开挖(正井法),若采用自下而上的开挖(反井法),须有扒渣和溜渣措施”<sup>[1]</sup>。由此可见该类斜井的施工工艺局限性较强。由于该类斜井倾角较缓、整体高差较大、空间受限、施工条件差且与常用施工设备、施工技术水平不相匹配,导致该工程施工难度

收稿日期:2023-03-10

较大。研究分析后了解到的各工艺存在的问题见表1。

表1 倾角为30°~45°缓坡斜井各施工工艺存在的问题分析统计表

序号	开挖方法	施工工艺	存在问题
1	正井法	布置提升设备, 自上而下全断面开挖	①提升设备成本高且须较大的场地布置; ②渣料运输受设备和空间限制, 出渣效率低; ③上下交叉作业, 安全风险高; ④掌子面积水, 施工环境差; ⑤内外工作面相互干扰, 工期长
2	反井法	爬罐法 爬罐作为操作平台, 自下而上开挖	①爬罐设备成本高且作业辅助时间长; ②上倾隧洞排烟难, 岩体渗水易湿衣, 作业环境差; ③爆破作业上倾造孔导致开挖质量控制难; ④掌子面岩块易坠落, 砸伤风险高; ⑤底板不平导致其溜渣难, 须增设溜渣措施
		反向全断面开挖法 简易台车作为操作平台, 自下而上开挖	①缺点与爬罐法类似; ②施工效率更低, 机械化率更差, 安全风险更高
3	反井钻机法	反井钻机先挖导井、再自下而上扩挖、最后自上而下开挖	①反井钻机无定位、纠偏功能, 钻孔精度控制能力低; ②导孔钻进时钻头竖向分力大, 钻头易偏斜; ③导井反扩时受力不平衡, 导致刀盘易破损、钻杆易断裂; ④无溜渣有效措施, 爆破后石渣易堆积, 堵井风险高; ⑤反井钻机的应用范围大于60°斜井, 不适宜该范围开挖

为克服传统施工工艺存在的各种问题, 提高施工的安全性和效率, 项目部技术人员探究出一种“精准反导井正挖法<sup>[2]</sup>”。该方法通过MWD、RMRS定位技术实现了钻头定位, 采用定向钻机纠偏钻进完成了导孔精准施工, 改进型反井钻机实现了反扩溜渣导井, 模型试验论证了溜渣的可行性, 控制爆破技术实现了正向开挖。

### 3 精准反导井正挖法施工工艺

缓坡斜井精准反导井正挖法施工的核心在于导孔的精准贯通及导井溜渣, 但其存在的主要风险是溜渣堵井和导井偏斜。其工程目的实现的关键为: 在模型理论的支撑下综合应用多种先进技术, 结合有效的控制爆破方法进行施工。

该工艺的主要施工流程: 方案研究→模型试验→施工准备→定向钻机安装→导孔施工(定位及纠偏)→定向钻机拆除→反扩基础施工→反井钻机安装→导井反扩施工→反井钻机拆除→现场爆破试验→正向全断面开挖支护。

#### 3.1 定向钻机导孔施工工艺要点

该工艺为确保缓坡斜井的精准贯通, 通过MWD、RMRS定位技术提出了采用定向钻机施工导孔、辅以专用定向钻具并结合钻进轨迹进行分析后实施钻进校正以提高导孔的贯通精度。

(1) 钻机选型。定向钻机的选型应充分结合钻井长度、钻孔直径、岩石坚硬程度、断层情况、偏斜率控制标准、场地空间尺寸等条件复核定向钻

机的最大回托力、最大回转扭矩、回转速度、给进压力、泥浆泵最大排量、最大压力等参数, 从而选择合适的设备进行施工。

(2) 定向钻机的纠偏钻具组合。为解决定向钻机及MWD、RMRS测斜系统在坚硬岩层中直线钻进的应用, 需要采用依托该工程研制的“一种用于斜、竖井钻进的定向钻具”以实现导孔的定位与校正。该钻具的组合形式: 牙轮钻头+磁短节+单弯螺杆+浮阀+扶正器+无磁钻铤3根(内置测斜仪)+扶正器+加重钻杆+普通钻杆。

(3) 钻井泥浆。泥浆是定向工程导孔定位纠偏成败的关键因素之一, 其主要作用是稳定导孔壁、裹携钻渣并将其排至地表、润滑钻具、提供纠偏的动力、冷却孔底钻具等<sup>[3]</sup>。现场作业时泥浆控制的主要指标是相对密度、滤失量、粘度、静切力等。泥浆性能的优劣直接影响导孔的定位及纠偏效果, 其可以通过优化膨润土、水和化学处理剂等的比例调节性能, 从而保证定向钻成孔的效果以及在扩孔、纠偏过程中的稳定性和安全性。为了适应不同地层对泥浆性能的要求, 应当进行现场试验用于调整泥浆的掺量指标。该工程采用的泥浆性能技术指标<sup>[4]</sup>见表2。

(4) 测斜纠偏。在定向钻具无磁钻铤中安装MWD测斜仪, 通过脉冲发生器将探测到的数值发送至井口。通过数值计算钻头的实际角度、方位等数据, 再操作定向钻机旋转单弯螺杆钻具至

表 2 泥浆性能技术指标表

相对密度	滤失量 / mL · 30 min <sup>-1</sup>	粘度 / s	静切力 / Pa	泥皮厚度 / mm	胶体率 / %	pH 值
1.1~1.2	10~20	<30	4.9~19.6	<3	100	7.0~8.5

理论角度,通过高压泥浆压力驱动前段弯螺杆的钻头钻进纠偏,从而实现导孔“转弯”;纠偏后重新测量钻头的方位数据,直至调整到设计井斜。斜井导孔从入钻点至出钻点 50 m 之前采用 MWD 测斜仪对钻头进行定位,导孔距出钻点小于 50 m

时在透孔点下部设置 RMRS 测距系统对钻头(旋转的短磁节)进行闭合定位,综合 MWD、RMRS 两项数据运用所研究的“一种缓倾角斜井导孔轨迹控制方法”计算并校正导孔。单弯螺杆结构形式见图 1。

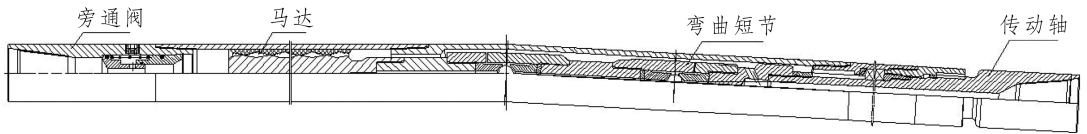


图 1 单弯螺杆结构形式图

### 3.2 反井钻机导井施工工艺要点

该工艺系为确保缓坡斜井的导井反扩开挖制定,从而对反井钻机的主要受力构件及基座进行改造以确保其结构受力、操作空间、设备布置等满足相关要求,同时分阶段采用合理的钻速、钻压等参数完成导井反拉施工<sup>[5]</sup>。

(1)反井钻机的基础设计。对于该工程倾角范围内的缓坡斜井,反井钻机施工时钻机受力复杂,重力方向上的分力大,钻机在大扭矩力作用下容易发生机械故障,需要尽量让钻机的作用力垂直于基础面以改善其受力情况。对此,项目部技术人员研究并设计出“一种缓坡斜井反井钻机基础结构”。该基础设计的要点在于增加了基础的抗滑能力,采用实心混凝土“凹”型基础;混凝土基础与反井钻机调脚靴板平行以确保钻杆轴线与混凝土基础斜面垂直;在基础斜面上还应预埋 H 型钢用于安装、固定反井钻机;在混凝土基础内沿斜井钻进中心线预埋钢管以减少起钻时对基础的结构破坏;在基础的一侧铺设混凝土垫层以利于钻杆的存放及吊运。反井钻机基础结构剖面见图 2。

(2)对反井钻机适应性进行的改造。常规的反井钻机适用于倾角为 60°~90°的斜井施工,但其在倾角为 30°~45°斜井中使用时应进行适应性改造。该工程主要对反井钻机液压支撑底座、调脚靴板、抓手、马达等部位进行了以下改进。

①液压支撑底座的改造:为便于反井钻机调整入钻角度,在反井钻机支撑底座与主机框架处增加了 2 组长液压千斤顶,并在千斤顶与主机框架连接部位设置了三角支撑,在千斤顶与底座连

接部位设置了矩形支撑。

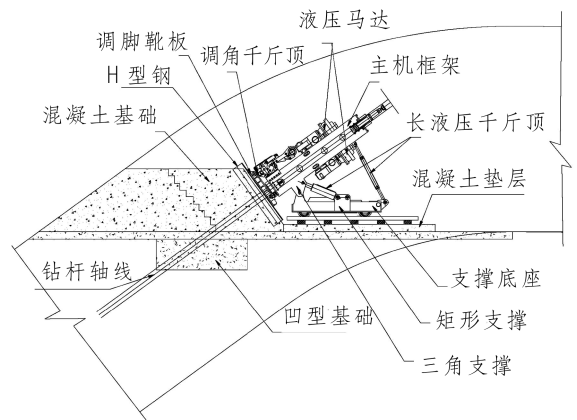


图 2 反井钻机基础结构剖面图

②为进一步提升入钻点的准确度,在调脚靴板处增加了 2 组角度调节液压千斤顶,脚板预留锚固孔,将基础板与脚板通过螺栓进行连接。

③改进了液压抓手,采用两组液压系统分别控制大臂、小臂,使其犹如人的手臂一样能够满足反井钻机液压抓手横纵移动,从而更加便捷地安装斜井钻杆。

④对液压驱动马达采用双组设计,选用了两组改进型液压马达,将液压马达做到轻量化。

通过对施工工艺及钻机受力情况进行研究,在改进了上述基础及设备后,实现了缓坡斜井反井钻机的稳定反扩,顺利完成了导井施工。

### 3.3 正向开挖施工工艺要点

针对该倾角范围的斜井,应在数值模拟、模型试验研究的基础上开展缓坡斜井溜渣可行性的分析研究,充分利用爆破试验开展现场溜渣验证,优

化掌子面倾角、溜渣井位置、爆破设计方案,辅以适当的溜渣措施以降低正向开挖面临的溜渣堵井及安全风险高等问题出现的概率。

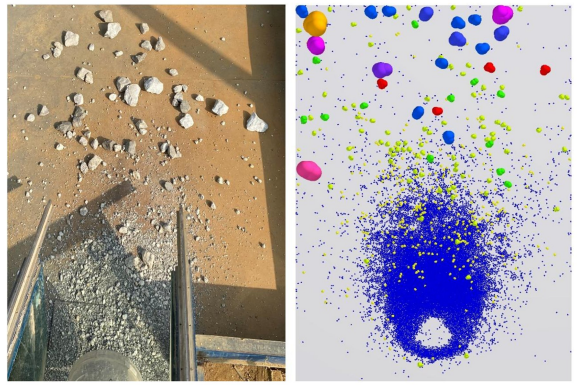
### 3.3.1 导井溜渣运动特征和角度适应性分析

缓坡斜井溜渣是否堵井决定了“精准反导井正挖法”的成败,项目部针对缓斜井溜渣的角度,通过数值模拟、建立运动学模型、开展模型试验、现场试验等方式探究了溜渣运动特征与角度的适应性。

在进行数值模拟前,首先进行了单颗粒岩块运动学和动力学理论研究,分析了岩块在溜渣井内可能出现的运动状态和特征;然后进行室内试验,研究不同坡度、形状、大小、条件下岩块的运动轨迹、速度、距离等参数的变化情况,进行多变量方差分析;最后进行颗粒群岩块运动特征分析,通过采用高速摄像记录及现场统计等方法定量分析了岩块运动的相关特性,获取了数值模拟及模型试验所需的基础参数。

颗粒流溜渣运动的数值模拟运用 EDEM 软件进行了离散元理论分析,通过网格划分将渣料离散为单个相互独立运动的单元,通过各单元颗粒在溜渣井中相互接触、相互作用模拟出真实的溜渣状态,运用牛顿运动定律等创建每个单元的运动方程,采用显示时间差分法求解动力平衡方程,通过动态松弛法、静态松弛法等迭代方法进行循环迭代并计算出每个单元的运动特性,从而得到整个研究对象的运动特征,模拟出溜渣过程的运动情况。

通过数值模拟获取参数后进行相关的模型试验。模型试验以滑渣坡度、颗粒级配为两个变量研究石渣在导井中的运动规律,进而论证缓坡斜井反井溜渣的安全角度范围和最优颗粒级配。模型试验装置由支撑构造、存料装置、滑槽导管、渣料收集器、记录装置五部分组成,该装置可实现 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 坡度范围内的任意改变。溜渣模型主要从渣料级配、石渣容重、滑槽尺寸、滑槽摩擦系数等关键指标考虑其相似性,模型与溜渣井的几何相似比为 $1:5$ 。将模型试验与数值模拟试验取得的结果进行对比,从图3中可以看出两种试验渣料的冲出距离和颗粒集散区间基本一致,进而可以相互印证试验结论的准确性。某颗粒级配试验结果对比情况见图3。



(左:模型试验结果;右:数值模拟结果)

图3 某颗粒级配试验结果对比图

通过对上述研究数据进行总结,论证了 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 斜井在适合条件下能够满足溜渣需求,并得出小颗粒是阻碍溜渣效果的因素之一。小颗粒的增多会加大溜渣过程中下垫面的摩擦力,阻碍大颗粒的滚动,因此,在工程现场,需要严格控制小颗粒的含量。模型试验得出粒径小于 $30\text{ mm}$ 的颗粒不能超过总质量的 $20\%$ ;工程中的最大粒径不能超过 $700\text{ mm}$ ,且粒径为 $200\sim 700\text{ mm}$ 颗粒的质量不能超过全部颗粒总质量的 $50\%$ ,否则可能有堵井风险。该工程的最优爆渣级配区间指标为:小颗粒含量为 $10\%\sim 20\%$ ,中颗粒含量为 $40\%\sim 50\%$ ,大颗粒含量为 $40\%\sim 50\%$ 。

### 3.3.2 缓坡斜井扩挖爆破岩块粒径的控制与所采用的溜渣技术

项目部根据数值模拟合模型试验推荐的最优爆渣级配,在斜井正式开挖前开展了现场爆破试验,获得了符合溜渣粒径控制要求的钻爆参数,项目部据此实施开挖并辅以扩挖溜渣技术完成了斜井开挖。

(1)全断面爆破试验。全断面一次性爆破设计主要进行的是爆破进尺及爆渣级配控制试验等。该工程的试验进尺分别为 $1\text{ m}\rightarrow 2\text{ m}\rightarrow 2.5\text{ m}$ 。各种进尺均未出现堵井现象,其中 $1\text{ m}$ 进尺成本较高, $2.5\text{ m}$ 进尺扒渣量较大且大颗粒渣料相对较多,堵井风险高;最终选取了即经济又保险的 $2\text{ m}$ 进尺。

根据该工程岩性特点,在进尺 $2\text{ m}$ 时进行了两组钻爆孔距试验,第一组试验的孔距为 $40\sim 60\text{ cm}$ ,爆出的渣料粒径较细,细颗粒含量( $18\%$ )接近模型试验上限,故应适当加大孔距;第二组试验

的孔距为 60~70 cm,爆出的渣粒粒径中颗粒含量较大(52%),超出了模型建议值,故应减小孔距。最终将主爆孔间距控制在 50~60 cm,综合试验结果得出的最优级配粒径区间及含量见表 3。

表 3 最优级配粒径区间及含量表

颗粒分类	模型试验粒径 /mm	实际爆破粒径 /mm	所占总质量的 比例 /%
小颗粒	0~5	0~25	10~20
中颗粒	5~20	25~100	20~25
	20~40	100~200	20~25
大颗粒	40~140	200~700	40~50

其他工程若需参照本研究成果实施,应首先根据工程实际遇到的岩性进行爆破试验,然后选择爆破进尺、孔距、爆破方式等。

(2)全断面扩挖溜渣技术。为降低堵井风险,提高施工效率,项目部结合现场及模型试验成果对工程进度及安全进行综合分析后作出了以下三点优化:

①掌子面倾角优化:为提升渣料下溜率且便于爆破造孔,将开挖掌子面倾角与水平线的夹角控制在  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,如此实施能够将爆破石渣有效集中于底部,提升石渣导入溜渣井的数量,进一步降低扒渣人员的劳动强度。缓倾斜井正向开挖剖面见图 4。

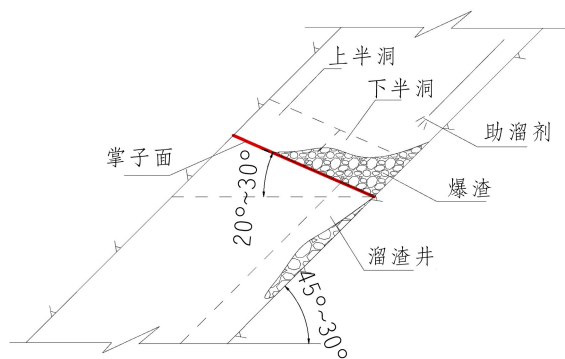


图 4 缓倾斜井正向开挖剖面示意图

②溜渣井的位置优化:基于导井的高精度贯通,为有效减少下半洞的存渣量,将溜渣导井布置于底板,以便更好地引导爆破渣料下溜,减少扒渣工程量;溜渣过程采用 5 L/min 的助溜剂进行助溜,助溜剂的组成为 0.1% 的植物油,99.9% 的水。

③爆破设计优化:以导井为中心,炮孔布置形式采用“菱形+中心空孔”方式布置,孔距控制指标为 50~60 cm,全断面分上下半洞两序延时(880 ms)爆破,这样实施既可以提高爆渣落入导井的量,提升施工效率;又可有效降低瞬间同时进入导井的渣量,进而降低了堵井风险。

#### 4 结 语

“精准反导井正挖法”在阳江抽水蓄能电站中的成功应用,形成了缓坡斜井施工新工艺。该工艺通过实时定位、钻进纠偏、反井钻机适应性改造、模型试验、爆破控制等各项施工技术的有机结合,能够有效规避传统施工工艺存在的问题,突破了缓坡斜井施工的局限性,形成了一种高效、精准、安全、优质的施工技术。希望此次研究取得的成果及文中阐述的施工技术分析能为倾角为  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  斜井工程的施工提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 水电水利工程竖井斜井施工规范,DL/T 5407-2019 [S].
- [2] 郑尧,王强,宋安瑞,等.一种缓坡斜井精准开挖方法[P].中国专利:CN112012751A;2022-08-16.
- [3] 闫绪宇,田乐.注浆材料与钻井液材料在反井导孔施工中的综合应用[J].建井技术,2016,37(2):22-24.
- [4] 李霞.缓倾斜井导孔高精度施工技术[J].四川建筑,2022,42(6):200-202.
- [5] 王凯,马勋才,欧阳秘.缓倾角长斜井开挖施工技术及应用[J].水资源开发与管理,2019,37(2):70-74.

#### 作者简介:

郑尧(1988-),男,四川成都人,项目总工程师,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

## 中水十局装备工程公司易门县马头村光伏项目 220 千伏升压站顺利并网

10月28日,由中水十局装备工程公司承建的易门县马头村光伏项目 220 千伏升压站建安工程带电成功并顺利并网。易门县马头村光伏项目 220 千伏升压站建安工程位于云南省玉溪市易门县南部十街彝族乡马头村,规划 82 个组串式逆变方阵,交流侧装机容量为 230 兆瓦。项目采用“药光互补”的立体光伏土地综合利用模式,被列入云南省 2022 年度“重中之重”项目。

项目建成后年发电量约 4 亿千瓦时,每年可节约标煤约 12.27 万吨,每年可减少二氧化碳 33.1 万吨,烟尘 12.73 吨,节约淡水 48.13 万立方米,具有良好的环保效益和社会效益,能够有效壮大村级集体经济,为推动当地能源结构改革和助力乡村振兴发挥积极的作用。

(水电十局 供稿)