

九峰山抽水蓄能电站 400m 级长斜井穿越多种水平岩层导井施工技术

李 闯

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：当前，抽水蓄能电站建设在全国范围内快速发展，斜井是抽水蓄能电站的关键构筑物，400m 级长斜井的施工面临倾斜度控制和穿越多种岩层等技术难题。九峰山抽水蓄能电站上斜井共有 3 条，平均长度为 437.07m，倾斜度为 58°，斜井轴线方向穿越页岩、石英砂岩和片麻岩三种水平岩层，本文以九峰山抽水蓄能电站为例，采用“定向钻机+反井钻机”组合技术，成功实现了三条斜井的精准贯通（偏斜率 $\leq 0.55\%$ ）。通过分析不同岩层的施工效率和控制措施，验证了该技术的安全性和经济性，为类似工程提供了参考。

【关键词】：400m 级长斜井；水平岩层；定向钻机+反井钻机；精准贯通；岩层适应性

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.018

1 概述

随着我国“双碳”目标的推进，抽水蓄能电站作为调节电网峰谷负荷的核心设施，进入快速发展阶段。根据《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035 年）》，到 2030 年，我国抽水蓄能装机容量将达 1.2 亿千瓦，其中斜井（或竖井）作为引水系统的关键构筑物，其施工进度和质量直接影响电站的安全性和经济性。

在 400m 级长斜井施工中，通常采用反井法进行施工，而导井的施工精度是斜井施工的关键，采用非开挖定向钻机与反井钻机的组合技术因其施工精度高、效率高、人员投入少等优势，逐渐成为主流施工方案。然而，斜井穿越多层水平层状岩层（如页岩、石英砂岩、片麻岩）时，因岩性突变区域岩石破碎、裂隙发育等原因，导致的卡钻、塌孔、钻头磨损、轴线偏斜等问题仍亟待解决。本文结合九峰山抽水蓄能电站的实际案例，提出了一种基于“定向钻机+反井钻机”的组合施工方法，解决了多岩层穿越和倾斜度控制的难题。

河南九峰山抽水蓄能电站引水发电系统采用三洞六机组斜井布置形式，上下段共计 6 条引水斜井。在引水上平洞段 3 条引水斜井长度分别为 436.07m、436.94m、438.2m（均含上下弯弧段）。

九峰山抽水蓄能电站上斜井从上到下依次穿越寒武系泥灰岩和页岩、中元古界石英砂岩、太古界片麻岩，施工中面临钻机参数动态调整、岩层交界处稳定性控制等挑战。根据设计资料，寒武系灰岩和泥灰岩软硬相间，局部存在软岩；中元古界石英砂岩为厚层状，岩层近水平，岩体坚硬，以微风化～新鲜岩体为主，局部岩体完整性较差；太古界片麻岩，岩体坚硬，围岩以微风化～新鲜岩体为主，局部构造发育位置岩体完整性

较差。根据施工经验，该类围岩条件下，易发生钻机钻杆扭转、钻头卡钻，因此在施工作业时应充分注意钻机参数及返渣情况的变化。

2 导井施工技术

2.1 施工准备

导井施工前应完成施工图纸和技术方案的审批与交底，所用设备及人员应完成报审，现场应完成导井施工所需要的空间场地、风水电通信布置。本工程中，通风、供水、供电、通信沿用上平洞开挖时的风水电及通信系统。定向钻机所需的空间位置根据定向钻机的作业尺寸进行确定，且保证必要的人员及配套设备作业活动空间。

本工程通过提前选定定向钻机施工方法并确定钻机的作业尺寸，在引水中平洞开挖至斜井位置时，根据钻机尺寸，将斜井上弯弧按方案要求进行技术扩挖，同时将斜井下弯弧段向前开挖一部分，以满足斜井定向钻机的作业空间。定向钻在施工时需要将泥浆池、沉淀池、泥浆泵、定向控制仪、定向钻基础等辅助空间布置妥当。

本工程中，提前将泥浆池、沉淀池、泥浆泵、配电系统布置在靠近钻机的右侧，呈“一”字形由低到高布置，施工沉淀池和泥浆池时，按照斜井的轴线位置确定钻进中心点，然后根据定向钻机和反井钻机的作业需求，采用 C30 混凝土浇筑钻机基础，待基础强度满足要求后安装定向钻机，并用施工插筋将钻机固定牢固。

施工前还应应对钻机的工作性能、各辅助设施设备的作业性能进行试运行检查，确保全部正常，泥浆应及时制备并经检查满足施工要求。

2.2 定向钻施工

2.2.1 导孔开孔

利用定向钻开孔时，施工人员需将钻机对准钻孔正中间，在确保钻孔中心和动力头主轴中心重合后即可固定好钻机。

2.2.2 导孔钻进

开孔是导孔钻进过程中非常关键的一步，其是确保钻孔直线度与角度精准的基础。为保证开孔角度准确，开钻前需预留孔槽，开孔钻进时采用轻压、慢转、大泵量的作业模式。通常将转速控制在 60r/min，钻压设定为 500kg，泵量维持在 600-1200L/min。开孔钻具组合选用 $\Phi 216\text{mm}$ 牙轮钻头搭配 $\Phi 172\text{mm}$ 钻铤以及 2m 长的 $\Phi 127\text{mm}$ 短钻杆，具体钻进参数为钻压 0.3-0.5t、钻速 30-40r/min、泵量 1200L/min。

该项目采用复合钻进方式，定向钻进组合由 216mm 牙轮钻头、172 螺杆、411*410 浮阀、212mm 扶正器、165mm 定位短节、4114*A10 变扣、1 根 165mm 无磁钻铤、3 根 165mm 钻铤、9 柱 127mm 加重钻杆以及 127mm 钻杆构成。实际钻进过程中，定向孔钻的钻压设置为 1.5-3.5t，在硬岩段钻速为 50-60r/min，泵量 1200L/min。正常钻进时，钻机与螺杆钻具同时旋转，这样钻机能以较高的转速完成钻进。

施工过程中通过安装在螺杆钻具后的无磁钻铤内的 MWD 无线随钻测斜仪发射泥浆脉冲进行孔斜监测，正常钻进时每 3m 进行一次孔斜量测。当孔斜正常时，按照既定的钻进方式和泥浆浓度进行钻进施工。需要注意的是，靠近钻头部分的螺杆钻具、钻铤等刚度相对比较大（外直径达 $\phi 172\text{mm}$ ），在小于 3m 的长度内不易出现急剧偏斜，所以当孔斜正常时，按既定钻进方式和泥浆浓度施工即可。成孔后，每 30m 测定一次孔斜，每 5-10m 设置一个测点。若孔斜超偏，则加密测点并制定定向纠偏措施。

当测斜结果出现异常，钻孔进入纠偏工况。此时定向钻进螺杆钻具由泥浆推动旋转，钻机旋转至特定角度后锁定。因螺杆有弯角，导孔会沿弯角指向进行定向钻进。钻孔纠偏借助 $\phi 172\text{mm}$ 弯螺杆与随钻测斜仪开展，当钻孔偏距超过 0.5m 或井斜角大于 0.8° 时，分别进行纠偏和降斜操作。定向正常时，采用弯角 1.5° 的 $\phi 165\text{mm}$ 螺杆钻具；若定向效果不佳，同样下入该规格螺杆钻具。定向钻进长度因工况而异，正常纠偏时为 2-3m，正常降斜时为 1-2m，若定向未达预定效果，则需再次定向。定向工具面角在定向钻进过程中以稳定为主；纠偏时以闭合方位为基准反扭；降斜时以钻孔方位角为基准反扭。反扭矩角根据井深确定，井深小于 200m 时为 $10-20^\circ$ ，井深大于 200m 时为 $20-30^\circ$ 。

在石英砂岩段，因岩体坚硬导致钻头磨损严重，平均每钻进 50m 需更换一次钻头。通过优化泥浆配比（密度 1.10~1.15，黏度 25~30Pas），钻头寿命延长至 70m。在页岩和泥岩钻进中，钻头磨损相对要缓慢一些。在施工中根据地质岩层状况及时调整泥浆粘度，同时科学处置泥浆漏失情况，保证施工安全和效率。

2.2.3 导孔扩孔

$\phi 216\text{mm}$ 高精度导孔施工完成后，拆除 $\phi 216\text{mm}$ 三牙轮钻头及配套测斜纠偏设备，换接 $\phi 330\text{mm}$ 钻头从下至上反拉扩孔。

反扩孔期间要用水不断地冲洗孔壁，将岩粉及碎石全部排放到井底，井底施工人员按照要求定时清理积渣，同时做好污水废水的引排工作，保持井底满足文明施工要求，井下作业人员应充分注意作业安全。

钻进过程中，如发现钻具旋转困难，可能遇到裂隙或岩层塌落，此时应把钻具边旋转边提到一定高度，再慢速向下扫孔，若经反复扫孔，仍无效果时，需要提升钻机，查明原因进行处理。



图1 定向钻机施工

2.3 反井钻机施工

2.3.1 反井钻机就位

具体施工中，首先需要按照设计要求安装好反井钻机，施工人员可以借助全站仪等高精度测量仪器进行校准，校准期间应重点控制基础平整度与主机调校偏差，这一步对后期的成孔精度具有极大的影响，其中基础表面平整度要求不超过 $\pm 3\text{mm}$ ，垂直度不超过 $\pm 1\text{mm}$ 。安装完成之后还需进行设备的运行调试，待钻机试运行状态正常，即可启动导孔钻进作业。

2.3.2 反井钻机反拉施工

沿直径 $\Phi 311\text{mm}$ 导孔下放钻杆至中平洞，在中平洞安装扩孔钻头。选择 $\phi 2.5\text{m}$ 扩孔钻头，一方面因为刀盘采用高强度合

金属材料,适用于灰岩、石英砂岩等硬岩地层。另一方面该直径刀盘具有通用性,经济耐用,平均使用寿命为200m。但需要注意,开始安装前工作人员需吊帽等工具送到中平洞,特别是扩孔钻头应放置在洞中心位置,并确保电话或者对讲机通讯设备处于良好的工作状态,从而使水平钻机工作人员能够根据指令做出相应的操作,具体需注意以下几点:

①动力水龙头作为关键动力输出部件,其出轴转速需精准调控。在特定作业阶段,应将出轴转速调整至慢速档,以此为钻进过程提供稳定且适宜的动力,避免因转速过快引发设备故障或影响钻进效果。

②工作人员需在冷却水泵出水管上巧妙接入一个三通,使扩孔钻头能够获得充足的冷却用水。冷却水不仅能有效降低钻头工作时的温度,防止钻头因过热而损坏,还能起到消尘作用,改善作业环境,减少粉尘对施工人员和设备的危害。

③开孔时,利用电位器精确设置钻进压力,将其控制在12-17吨的范围内。同时,以2-3转/分钟的低转速进行慢速钻进,这种操作方式有助于确保开孔的准确性和稳定性,直至扩孔刀盘完全进入岩石内部,为后续作业奠定良好基础。

④扩孔时,扭矩应严格控制在不超过100KNm的范围内,正常岩石状况下保持在85-100KNm为宜。转速调节范围为8-10转/分钟,且最高不得超过10转/分钟。通过精确控制这些参数,能够有效保证扩孔作业的顺利进行,提高作业效率和质量。

⑤遇到破碎带时迅速降低钻进压力和转速,尽量减少反井钻机的振动,确保设备平稳运行。若岩石破碎程度严重,除降低钻进压力外,还需将转速进一步降至2-4转/分钟,避免因振动过大对设备和作业安全造成不利影响。

⑥卸钻杆

卸钻杆过程中若遇到钻杆接头无法松动的情况,可借助辅助卸扣装置辅助动力水龙头反转。若辅助卸扣装置仍无法使接头松动,则采用氧焊在待松动的接头四周进行烘烤,烘烤过程中边烘烤边反向旋转动力水龙头,直至接头松动。若氧焊烘烤仍无效,可在第一根钻杆的下边缘用钢锯锯除2-3mm,再反向旋转动力水龙头使接头松动。

反井钻机扩孔注意事项:

A.做好前期沟通与安装准备。扩孔钻进前要在上平洞和中平洞构建良好通讯。本工程在洞内安装联通通讯系统,作业人员再以对讲机辅助联络,保障导孔钻头拆卸与扩孔钻头安装顺利。中平洞要预留足够空间安装扩孔刀盘,确保安装后能正常上滑套。

B.把控钻杆更换细节。换钻杆时要精准控制刀盘与掌子面距离,间隙小且不影响校准,防止破碎带因间隙大引发岩体坍塌。

C.强化操作人员专注度。反井钻机操作手要全神贯注,精心操控设备。一旦听到异常声音或感觉有异常振动,立即检查调整。

D.定期检查设备系统。扩孔期间频繁检查反井钻机的液压、动力、操作系统等,及时发现并解决问题。

E.重视活动套检查维护。活动套是易出问题部位,操作手每换一根钻杆都要仔细检查,松动及时紧固,避免严重后果。

F.临近基础谨慎操作。钻头扩孔距基础2.5m时,降低钻压慢速钻进,密切观察。若基础周围出现大幅隆起、异常声响等异常,及时处理,处理完后继续缓慢扩孔至钻头露出地面。

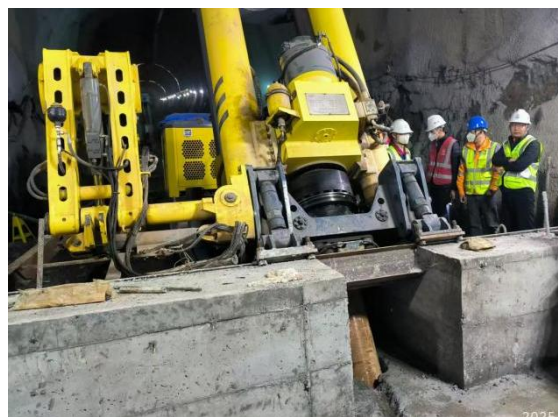


图2 反井钻机钻孔施工

2.3.3 反井钻机施工结束

扩孔结束后,应将上井口按要求进行防护,并在下井口一定范围设置护栏并悬挂警示标志。上平洞其他施工应注意泥水等不得影响下平洞施工。

3 特殊地质条件下施工情况

3.1 定向钻穿越不同地质岩层时的状况

定向钻穿越页岩和泥岩与石英砂岩交界时,返渣由泥糊状突变为粉砂状,此种情况表明岩层特性的变化。此时需降低钻速(30~40r/min),同时增加钻压(2.5~3.5t),以避免钻头卡钻。

因石英砂岩质地坚硬,在钻进过程中,还应适当减缓速度,保证钻头温度在合适的区间,以免造成钻机部件损坏。同时,由于地质情况突变,应注意定向控制的变化,防止因钻头突然遇到坚硬岩石而出现故障,确保定向准确。

当穿越石英砂岩与灰岩交界面时,定向钻返渣由粉砂状突

变为具有一定黏性的细粉砂状，此时应略微降低钻速（25～35r/min），同时略微降低钻压（2.0～3.5t），保证施工机具作业稳定性。如下图表 3.1-1、表 3.1-2。

表 3.1-1 定向钻施工效率统计

序号	部位	定向钻施工总时长(d)	定向钻总进尺(m)	定向钻施工日均进尺(m)	反井钻施工总时长(h)	反井钻机平均进尺(m/h)	备注
1	1#上斜井	17	395	23.24	936	0.42	
2	2#上斜井	19	397	20.89	/	/	
3	3#上斜井	15	401	26.73	/	/	

表 3.1-2 定向钻穿越不同地质岩层时的施工效率

序号	部位	定向钻日均进尺(m)			备注
		页岩、泥岩	石英砂岩	灰岩	
1	1#上斜井	34	21.14	22.63	
2	2#上斜井	32.5	26.6	22.11	
3	3#上斜井	31	24	24.43	

注：本表是根据现场实际记录，剔除施工过程中钻机维修、泥浆池维护等因素后得出的数据，能够反映钻机在不同地质岩层条件下的施工效率。

参考文献：

[1] 潘福营,渠守尚,许力,等.定向钻机加反井钻机开挖长斜井导井施工技术[C]//抽水蓄能电站工程建设文集 2021.北京:中国水利水电出版社,2021:432-435.

[2] 李根,段稳超,刘文禧.长龙山电站 400m 级长斜井定向孔精准贯通实践[J].人民长江,2019,50(S1):215-219.

[3] 王薛钢,赵有崔.反井钻机和定向钻机在中高硬岩石地区的应用[J].浙江水利科技,2019,47(5):71-75.

[4] 杨建洲.超深长距离斜井定向钻机与反井钻机施工技术[R].云南省:中国水利水电第十四工程局有限公司,2023-05-25.

3.2 反井钻机穿越不同地质岩层时的控制

反井钻机是从下向上反拉扩挖，本工程中反井钻机首先遇到的是灰岩，质地较坚硬、均匀，当施工到石英砂岩时，钻头旋转速度不变，钻机提升速度稍微变快，钻机的刀盘推力稍微变小。当由石英砂岩到泥岩和页岩时，钻头旋转速度不变，钻机提升速度明显变快，钻机的刀盘推力也明显变小。

3.3 斜井轴线控制

应用定向钻机+反井钻机穿越不同的地质进行斜井施工，斜井的孔斜控制是施工质量控制的重点，在本工程施工中，通过精准控制定向钻的施工方向和及时检查定向钻的轨迹，实现了上斜井轴线的精准控制，正常钻进时每 3m 测量一次，轨迹测量每 30 米测量一次，通过钻进测量和轨迹测量双重控制，最终实现了 3 条上斜井偏斜均不超过设计要求的目标。

定向孔是反井钻机施工质量控制的基础，定向孔的精准贯通为后续反井钻机精准扩孔提供了有利的条件。九峰山抽水蓄能电站工程上斜井导孔于 2025 年 6 月 22 日精准贯通，1#、2#、3#上斜井的偏斜率分别为 0.2‰、0.40‰、0.55‰，均小于规范和设计要求，达到了国内领先水平。

4 结语

应用定向钻机+反井钻机具有施工过程可控、精准导向、人员投入少、施工安全风险小等优点，在穿越不同岩层时，能够通过钻进参数和返渣情况相互验证，及时调整钻进参数或更换钻头，以提高钻头的适应性和钻进开挖的经济性。

定向导孔的精准贯通是后续反井钻机精准扩孔的基础，在穿越不同地质岩层时，人工仍应密切配合，注意观察和总结岩层变化对钻机精准施工的影响，提高钻机钻孔的工作适应性。

综上所述，定向钻机与反井钻机的组合技术显著提升了斜井施工的安全性和精准性，尤其适用于复杂地质条件。未来可进一步优化设备控制技术及施工参数，推广至类似工程。