

地矿定向钻探施工技术与轨迹控制研究

马德义 杨新江

新疆维吾尔自治区地质局阿克苏地质大队, 新疆 阿克苏 843000

[摘要]定向钻探技术应用于地矿行业已经越来越普及,但是复杂的地质环境下的轨迹控制仍然是影响着钻探的速度及质量的一个难题,文章全面阐述了地矿工程中定向钻探的应用特征。对孔斜失控、钻具磨损、疲劳损坏、遇阻、掉钻以及钻孔信息采集误差、电磁波信号干扰等问题进行了详细的探讨,并分别就钻进工艺的设计改进、实时检测与智能监控、参数联动调节与动态修正、信息化与自动化操控技术以及安全施工与风险管理提出了轨迹控制的方式方法。研究发现,在优化钻具搭配的同时加强随钻测量和智能操控,实现参数及时调整,对定向钻探的轨迹控制精准度有着很大的提高。

[关键词]地矿钻探; 定向钻进; 轨迹控制; 随钻测量; 工艺优化

DOI: 10.64635/ja.2026.1209

中图分类号: P634.7

文献标识码: A

Research on Construction Technology and Trajectory Control of Directional Drilling in Geological and Mineral Exploration

Ma Deyi, Yang Xinjiang

Aksu Geological Brigade, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Aksu, Xinjiang 843000, China

Abstract: Directional drilling technology has been increasingly widely applied in the geological and mineral exploration industry. However, trajectory control under complex geological conditions remains a major difficulty affecting drilling speed and quality. This paper comprehensively discusses the application characteristics of directional drilling in geological and mineral engineering. Problems such as uncontrolled borehole deviation, drilling tool wear, fatigue damage, obstruction, drill tool dropping, errors in borehole information acquisition, and electromagnetic wave signal interference are analyzed in detail. Corresponding trajectory control methods are proposed from the aspects of drilling process design optimization, real-time detection and intelligent monitoring, coordinated parameter adjustment and dynamic correction, information-based and automated control technology, as well as safe construction and risk management. The study finds that optimizing drilling tool combinations, strengthening measurement while drilling and intelligent control, and realizing timely parameter adjustment can significantly improve the accuracy of trajectory control in directional drilling.

Keywords: geological and mineral drilling; directional drilling; trajectory control; measurement while drilling; process optimization

引言

定向钻孔技术是当代钻孔工程的一个重要组成部分之一,通过人工操控钻孔路径而达到对目的岩层精确钻中,对于矿产勘查、煤炭瓦斯抽放、水工环地质勘探等方面有着重要的意义。同传统的直孔钻探相比,定向钻进可以规避复杂构造带、进行分枝孔施工、符合地质导向取心的要求,特别是在地面条件限制,物探对象深埋的情形下更为适用。随着水平定向钻进技术近年来的发展,被越来越多的用于城市自来水管道路施工、跨河穿越、污染环境修复、

地下浅层资源探测等各个领域当中,最大的特点是可以在地面条件有限的情况下,精准地掌握钻孔路径命中预定目标的位置。但是,矿山开采定向钻孔施工存在着地质条件变化大、轨迹控制难度大、深孔钻进时信号衰减弱、井下环境恶劣等一系列的技术难题,“怎么准确的控制方向”是阻碍此项技术发展的最大障碍,文章在总结归纳了矿山开采定向钻孔的应用特征之后,详细研究分析矿山开采定向钻孔施工中普遍存在的一些常见的如孔斜控制不当、钻头磨损严重、卡钻埋钻等问题以及针对这些问题所采取的

相关措施、钻孔施工工艺及轨迹控制方法,希望能够给实际的工程项目带来一定借鉴意义。

1 地矿领域定向钻探的应用特点

地矿工程定向钻进技术有着非常典型的技术属性及使用环境,其使用特性主要包括以下几点:一是钻探目的地下埋藏较深,钻孔深度一般都很大,一些深层探井达到2000m以上,在钻机力量、测量精度以及导轨控制等方面的要求非常高;二是钻探过程中遇到地质状况十分复杂,在钻遇地层时会出现许多不同硬度的地层组合在一起的情况,如软岩与硬岩交替出现、断层破碎带、高强度地带、盐岩蠕变层等等,使得钻杆自动偏离的趋势较为严峻,轨迹控制极不稳定。近几年来成都华建公司水平定向勘探技术研发团队把小口径钻进自定向到靶区加提高钻取心发展到全孔水平绳索定向取心,把单剖面钻孔顶角控制延伸到钻孔三维空间曲线顶角、方位角的综合控制,基本上可以满足各个定向勘探钻孔的需求。其次,定向钻孔多采用小口径取心方法,在保有轨迹准确的前提下还须取得较好的岩心进行地质解析,这对钻具组合配置与取心工艺都提出了更高的要求,技术水平要求更高。另外,地矿定向钻进也表现出跟物探、测试技术和有机结合的特点,在钻进过程中结合随钻测井、孔内地质雷达等物探测取,使钻孔轨迹与地质信息同步取得,从而更好地为精确导向提供强有力的数据支持。

2 地矿定向钻探施工常见问题分析

2.1 孔斜失控问题

孔斜失控是定向钻探工程中经常遇到的技术问题之一,是指钻孔的实际方位与设计方位不符,引起靶标失准率升高、勘探成果降低,以至于钻孔报废等情况的发生。孔斜失控的原因很多,主要有以下几方面原因:地质因素:地层存在软硬差异,岩层的起伏程度不同,断层破碎带分布等因素容易使钻具产生自然偏位从而产生不可预料的轨迹偏差;工艺因素:钻具的选择不合理,钻进过程中所使用的参数不符合要求,造斜工具选用错误,扶正器固定部位出现偏差等情况都可能导致轨迹失控;测量因素中,随钻测控系统存在系统误差叠加、磁干扰等的影响,会造成轨迹判定失真,进而造成纠偏延迟或者失灵^[1];对于大位垂比条件下定向钻进有托压过重、岩粉堆积、速度慢及轨迹难以控制等问题,造斜区应当根据不同井斜角度采用不同曲率规格的螺杆钻具来达到造斜速率与曲线光滑度兼顾的目的。

2.2 钻具偏磨与疲劳损坏

定向钻探当中钻具的偏磨及疲劳破坏的问题严重,影响了工作的顺利进行以及安全性,是造成井下事故频繁发生的原因之一,定向钻孔存在着造斜段和水平段,在弯曲钻孔内工作时旋转承受着交变弯曲应力以及不断同井体间的剧烈磨擦而引起钻杆、钻铤、扶正器、稳定器等重要部件的磨损和疲劳破坏。其中钻杆接头偏心磨损、钻铤外径减少、扶正器直径变细、钻具壁厚减薄都属于偏磨损现象,一旦磨损过度其强度就会降低,极端情况下就会发生钻具折断事故。秦家屯油田定向井偏磨机理分析证明,定向井造斜点高、斜井部分长以及较高的造斜率使得斜井部分径向负荷大是造成偏磨的主要原因。疲劳损害是由于钻具在弯曲井眼内多次受到弯曲、应力集中造成的,在造斜率较大的井段中,钻具所承受的交变应力幅度更大,其寿命大大缩短。为了减少偏磨现象的发生可对井身结构进行优化设计、控制合理的造斜率、使用耐磨副及扶正器、选择高强度钻杆等方法来尽量减少偏磨现象发生概率,另外建立钻具检查制度,定期更换有疲劳损伤倾向的钻具,从而延长钻具使用寿命。

2.3 卡钻与埋钻问题

卡钻及埋钻是定向钻进中最常见的严重的井下事故之一,一旦发生,处理困难、耗时较长,严重时会造成钻孔报废。其具体可分为:缩径卡钻、键槽卡钻、沉砂卡钻、压差卡钻等几种类型,不同的卡钻类型产生的原因不一样,缩径卡钻主要是发生在盐岩蠕变层或者水敏性泥岩层,造成井筒变小把钻具卡住;键槽卡钻是因为井眼曲线变化形成的键槽,钻杆接头落入其中;沉砂卡钻是因为岩屑沉积堵塞使钻杆不能转动;压差卡钻也跟钻井液的性质以及井壁的滤饼有着密切的关系。如果水平定向钻进过程中出现孔身偏斜、弯曲情况应该查明原因加以解决,一般情况下可以通过在偏斜的位置吊起钻锥来回扫孔等方法来解决。糊钻、埋钻常见于正循环内旋挖钻机施工,遇到这种情况需要对泥浆粘度、钻渣进出情况以及钻杆直径进行检测并限制合理的钻进深度;埋钻常见于岩粉沉积较为严重的区域,如果此时循环流量小,泥浆带渣性能差,导致岩石碎屑淤积堵住钻具。

2.4 数据测量误差与信号干扰

随钻测量数据准确度直接影响到轨迹控制的精准程度,测量误差以及信号干扰就是造成测量数据失真的主要原因,是制约定向钻井技术发展的重要难题所在。测量误差产生于传感器的精确度、测量深度、钻具组合、仪器标

定等各环节当中,测量误差在深井中会产生叠加现象使井眼偏移程度增大,造成井眼坐标偏差较大;测量深度和传感器误差,钻具组合以及磁场干扰对测量的影响,基于定向倾角测斜数据可以得到井眼位置误差,据此来选择测量和操控设备^[2]。信号干扰问题,电磁波测井系统在深井、磁性矿物地层中出现信号衰减及噪声干扰,导致信号传输不稳定、实时差,在钻井液性能差、脉冲信号衰减情况下,泥浆脉冲传输系统信号传输效率降低。

3 定向钻探施工工艺优化与轨迹控制策略

3.1 钻进工艺优化设计

钻进工艺优化是保证轨迹精度的前提条件,包括钻具

的选择以及造斜机构和井身的设计等,钻具的选择应当结合地层条件及轨迹控制需求而定,直井段使用塔式钻具或者钟摆钻具,防止出现偏斜现象,造斜段根据造斜率大小选取相应的弯外壳螺杆钻具或连续造斜器并且合理放置扶正器的位置,在水平段加强稳定钻具的设计,使用双扶正器或者三扶正器等结构形式以保持轨迹的顺利连接;适当搭配加重钻具,在直井段选择 $\phi 159\text{mm}$ 钻铤加 $\phi 127\text{mm}$ 钻杆,在造斜段选 $\phi 89\text{mm}$ 加重钻杆可以减少故障几率。造斜工具的选择很重要,每种弯度螺杆钻具的造斜能力以及适合的井段也各不相同,要选择符合设计造斜率以及地层条件的工具进行作业。

表 1 常用造斜工具选型与适用条件

造斜工具类型	造斜能力 (°/30m)	适用井段	主要优点	局限性	适用地层
弯螺杆钻具	0~30	全井段	成本低、技术成熟	需滑动钻进、效率较低	软-中硬地层
连续造斜器	5~20	造斜段/绕障	结构紧凑、操作方便	造斜能力有限	各类地层
旋转导向系统	0~15	水平段/复杂段	连续旋转、轨迹平滑	成本高、维护复杂	各类地层

以上常用造斜工具的基础上,再探讨不同造斜工具的配合使用及实际工作中常用的几种纠斜方式的利弊比较,在造斜工具的选择上要结合具体井段情况及轨迹的控制需要而定,直井段使用“塔式钻具+扶正器”的防斜措施,造斜段运用弯螺杆钻具加单弯或双弯壳体并配有随钻测量仪以达到准确的定向造斜的目的,在水平段通过使用双扶正器或三扶正器、PDC 钻头及旋转导向来保证钻进路径的顺畅,对于复杂地层或者大位移井可以采取连续造斜器、加重钻杆和水力振荡器进行纠斜从而减少摩阻力增大造斜能力等等。例如,在川藏铁路卡子拉山超长直径水平孔项目中,科研人员把液动潜孔锤、孔底弯泥浆马达、绳索取心钻具等工具用于定向钻孔施工,解决了水平绳索随钻定向仪器的推送器具、固定工艺以及随钻定向等问题,形成了水平绳索定向钻进器具与工艺。该技术集成方案对复杂条件下定向钻探具有参考意义。

3.2 实时监测与智能控制技术应用

即时监控是进行准确轨迹跟踪的基础,在此基础上通过智能化控制来提升控制精度。目前大多数定向钻机都配置有随钻测量装置,可以测出井眼倾角、井斜方位角、工具面角、重力工具面角、磁性工具面角等一系列重要的指标参数,以便对轨迹做出及时校正,随钻测量技术主要有电磁波传输以及泥浆脉冲传输这两类方法,其中电磁波传

输适合于浅层低电阻率地层,泥浆脉冲传输适用于深层复杂的地层,根据实际情况选择不同的传输方式,对于水平定向钻进,则使用无线导引及激光陀螺仪观测系统来进行导引误差小于 0.3m。智能控制技术是通过轨迹控制系统模型来利用实时采集的数据作出自行判断,从而对钻井参数以及工具面角做出相应的改变,使以前的经验式操控变成现在的根据数据分析进行操控^[3]。最近几年来,人们开始越来越多的应用人工智能的方法到定向钻孔中去,通过使用机器学习的方法建立轨迹预报模型可以提前发现出现轨道偏斜的可能性并提出相应改正的意见大大提高了对控制的精确度与准确性。

3.3 参数协同优化与动态调整方法

钻进参数联合优化是轨迹控制的关键技术,钻压、转速、排量、工具面角等多个参数互相影响,一起决定了轨迹走向以及钻进效果,在大位垂比、长水平段定向钻进过程中尤其严重,钻头不能有效得到钻压的作用,发生滑动钻进,效率很低,需要进行参数优化,减少摩阻、增大钻压传递能力,分步使用不同曲率半径的螺杆钻具控制井眼方位,配合无固相-高润滑钻井液,可以使水平段钻进效率提升 30%以上。参数动态调节要以实时检测信息以及轨迹误差为基础,在实际测量曲线出现偏移的情况下,对工具面角及钻进参数做出即时调节,完成纠正措施并做好参数调节台账,构建参数优化资源池。

表 2 定向钻进参数协同优化参考范围

钻进工况	钻压 (kN)	转速 (r/min)	排量 (L/s)	工具面角 (°)	轨迹控制要点	参数调整原则
直井段	20~40	100~150	20~30	-	防斜打直	轻压吊打, 监测井斜
造斜段	30~60	60~100	20~30	0~180	按设计造斜率	稳斜钻进, 及时测量
稳斜段	40~80	80~120	25~35	0~180	保持井斜稳定	参数平稳, 减少调整
水平段	20~50	50~80	20~30	0~180	轨迹平滑延伸	小参数调整, 避免波动

3.4 信息化与自动化控制系统应用

信息化、自动化是定向钻具技术发展方向之一，搭建数字化钻探平台，对钻孔轨迹、钻进参数、设备运行状态等信息进行采集、传输、存储及分析，作为轨迹控制决策的数据参考依据；自动化控制系统借助传感器、控制器、执行机构等装置对钻进过程实施自动调节以及故障检测，避免传统的人工干预带来的误差以及延误。淮河能源地质勘探工程分公司研制的定向钻进远程操控系统，可以实现在地面对井下钻探作业全过程的观测分析、管理，可以在地面就可以对井下工作进行操作，工作人员可以减少将近三分之二人左右，极大的减小了安全隐患。该系统利用数字孪生技术建立钻机虚拟操控台，在钻进、监控以及钻孔参数采集上传等方面都有涉及，工人可以在地面向井下进行钻进控制，大大缓解了井下工作条件。

3.5 安全施工与风险控制措施

钻井定向施工风险大，要建立健全风险管控机制，做到由被动应付到主动防范的转变，在钻井定向之前做好详尽的地质勘探、危险源辨识等工作并提前准备相应的应急措施，规定好发生各种事故的处理步骤^[4]；在钻井定向施工过程中加强对设备的检修保养工作，定时对钻杆进行检查以免其出现损坏造成安全事故的发生；对于钻井定向中发生的瓦斯突喷等问题可以采用智能化防喷装置，使用超高精度检测瓦斯含量的甲烷探头实时监控钻井定向过程中瓦斯浓度的变化情况，在达到设定值之后几毫秒即可完成紧急停机指令下达至钻机断电停止运转的动作。另外要加强现场操作人员的技术学习以及安全教育提升他们处理复杂情况进行的能力保证水平定向钻施工的安全顺利。

4 结语

地质矿产定向钻探施工技术和轨迹管理是提高矿产

资源勘查开采速度和准确性的重要手段。文章对地质采矿领域的定向钻探的特点进行详细的研究，并对造成定向钻井过程中孔斜失控、钻具磨损严重、卡钻埋管、测量失真、信号丢失等问题的原因及处理方法进行了论述，在此基础上提出通过优化造斜工具组合、合理选用偏斜方法、改进钻进工艺、加强过程检测与智能化管理、合理调整参数、充分利用信息技术自动化技术以及管控好作业风险来达到轨迹管理的目的，未来智能化定向钻探会朝着更精准、更智能的方向发展。而随着未来的发展，在人工智能算法、数字孪生技术以及远程控制等方面都将会更好地应用到定向钻探当中去，对地矿勘探行业也提供了更好的技术支持。

【参考文献】

[1]裴彬.地矿系统施工中定向钻探技术的应用[J].世界有色金属,2017(07):129+131.
[2]安徽深部钻探技术及应用重点实验室[J].安徽地质,2019,29(03):158.
[3]张继勇,刘晓.在“世界屋脊”展示“钻探铁军”风采[N].中国矿业报,2025-08-07(003).
[4]山东地矿六院水旺庄钻探项目取得阶段性突破[J].地质装备,2020,21(05):7.

作者简介：马德义（1970.10—）男，汉族，内蒙古通辽市开鲁县，大专学历，探矿工程高级工程师，研究方向：固体矿产钻探施工；定向钻进施工；高原冻土层施工方法研究；杨新江（1982.06—），男，彝族，籍贯：云南凤庆，大学本科学历，探矿工程副高级工程师，研究方向：固体矿产钻探施工，高原冻土层钻探施工，定向钻探施工方法与工艺研究。