

矿井地表通风钻孔偏移量精密测量及井下定向寻孔技术研究

梁洪波

山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司 山东 烟台 264000

摘 要：矿井地表通风钻孔受地层环境与施工扰动影响，普遍存在空间形变与轨迹偏移问题，严重影响井下对接及通风系统稳定运行。本文围绕钻孔空间形态、偏移测量技术、偏移分布特征及井下寻孔工艺展开系统性研究，剖析深部地层钻孔成型的形态演化特点，搭建适配复杂地层的高精度偏移测量技术体系，梳理钻孔全深度偏移的分布规律。结合钻孔空间偏移特性优化井下定向寻孔技术路径，完善轨迹追踪与精准对接作业流程，构建适配矿井复杂工况的完整寻孔技术体系，可为矿井通风钻孔井下精准施工提供技术支撑。

关键词：通风钻孔；空间形态；偏移测量；定向寻孔；矿井通风

引言：地表通风钻孔是矿井通风系统的重要组成部分，承担井下空气交换与灾害防控的关键职能。深部矿井地层结构复杂，地应力分布不均，钻孔成孔后易产生轨迹偏移与空间形变，大幅降低钻孔成孔质量与通风利用效率。常规测量手段与传统寻孔工艺难以适配复杂地层钻孔的偏移检测与井下对接需求，制约矿井通风工程施工质量。依托钻孔空间形变特征开展精密测量与定向寻孔技术研究，能够有效解决钻孔偏移引发的施工难题，提升井下钻孔对接精度，保障矿井通风通道稳定贯通。

1 矿井地表通风钻孔成孔空间形态特征

1.1 地表通风钻孔孔体空间结构组成

矿井地表通风钻孔由地表施工基面垂直向地下延伸，形成贯通地表与井下作业区域的柱状中空通道。孔体纵向可划分为6~8层连续区段，各区段空间形态、围岩稳定性存在明显差异，主要受埋藏深度与围岩赋存条件控制。本次研究钻孔中空通道直径为96~150mm，为通风介质传输核心载体；钻孔地表标高200m，井下底板标高-336.3m、顶板标高-334m，设计总孔深536m。钻孔外围固结围岩构成围护结构，支撑孔体整体空间稳定性^[1]。孔体结构完整度直接决定通风流通效率，同时也是钻孔空间测量、井下定位作业的基础条件。各层段围岩固结强度、孔腔规整度的差异化特征，是精准开展偏移测量与形态分析的重要前提。

1.2 深部地层环境下钻孔成型形态特点

深部矿井高地应力、高围压的复杂力学环境，是导致钻孔成型畸变的核心诱因。浅层地层围压较低、岩体结构稳定，钻孔成型规整、轨迹贴合设计线路；而深部岩体受高强度地应力挤压，围岩持续错动、挤压，重塑

钻孔内部空间轮廓，使深部孔体形态呈现不规则特征。同时，研究区域地层岩性交替频繁、构造分层显著，岩体力学参数纵向分布不均，进一步打乱钻孔成型均匀性，造成钻孔截面尺寸、延伸轨迹持续波动，形成典型的地层依附型空间形态，区别于浅层规整钻孔结构。

1.3 钻孔空间形态的动态演化机制

钻孔空间形态并非固定不变，而是随地层应力调整呈现动态演化特征。成孔后原有地层应力平衡被打破，岩体内部应力持续重构，持续作用于孔壁，驱动孔体形态动态变化。现场监测数据表明，成孔后30天内钻孔孔径收缩量为8~15mm，围岩蠕变效应显著，60天后地层应力趋于稳定，孔体形变基本停止。同时，岩体固有蠕变特性会引发孔体持续性微量形变，使钻孔偏移幅度、截面形态始终处于动态微调状态，最终形成深部钻孔特有的动态空间形态分布规律。

2 通风钻孔偏移量精密测量技术体系构建

2.1 复杂地层钻孔测量技术适配性分析

矿山复杂地层存在岩体松散、构造破碎、地应力活跃等特点，常规钻孔测量技术易受地质环境干扰，存在数据偏差大、稳定性差等问题。不同测量技术的探测原理、适用场景存在明确边界，需结合地层赋存条件精准选型^[2]。针对本次工程松散岩层、破碎构造及高应力地层的复杂工况，摒弃单一测量模式，采用“分段钻进校正+成孔分段测斜”的组合测量方式。施工过程中每钻进10m开展一次钻具垂直度校正，弱化施工扰动偏差；成孔后按深度分段投放测斜仪开展轨迹检测，有效规避地质环境对探测作业的干扰，保障测量数据的真实性与稳定性。

2.2 钻孔多维偏移参数精细化测量方法

通风钻孔空间偏移属于多维度形变，单一位置、单一指标检测无法完整还原钻孔真实形态。本次研究构建多维参数精细化测量体系，聚焦钻孔纵向轨迹、横向位移、截面形变、空间姿态四大核心参数，制定标准化采样标准。现场设置5~10m采样间距，严格执行10m间隔校正、分段测斜的作业规范，536m全孔段有效采集点数不少于80个。针对浅层稳定地层、深部复杂地层、岩性交替地层，差异化调整参数采集精度与探测频率，全面捕捉钻孔不同深度的细微形变。通过多维数据协同采集，规避单一检测的片面性，精准还原钻孔全域空间形态，为偏移规律分析提供完备的数据支撑。

2.3 全深度钻孔测量作业流程搭建

为实现钻孔从地表浅层到井下深部的全域精准测量，搭建分层递进式标准化作业流程。前期完成场地放样、场地平整与钻机找平，消除设备安装偏差；施工阶段随钻进深度同步开展垂直度校正与初步轨迹检测；成孔后分深度段开展精细化测斜，单段测量时长15~25min，全孔测量总时长控制在4~6h。本次钻孔整体钻进周期4天，成孔后采用地表、井下双向复核测量模式，解决深部探测信号衰减、设备稳定性下降等问题。标准化、分层化的作业流程，保障了全孔段测量数据的完整性、统一性与均衡性，为后续数据处理与规律分析奠定基础。

2.4 钻孔测量数据校正与抗干扰处理方式

现场测量数据易受地质岩性变化、作业环境扰动、设备运行误差等因素影响，产生异常数据与系统偏差。为提升数据精准度，构建多重复核、抗干扰数据处理体系。现场严格执行井下、地表各2次的双向复测校核机制，通过多次测量均值拟合，消除随机误差；针对岩层突变、构造破碎区段的异常数据，采用数据滤波、差值修正方式剔除干扰项，校正系统偏差。同时，统一数据采集、整理、归档标准，规范数据校正逻辑，最大化弱化外界环境对测量结果的影响，保障输出数据精准有效。

3 钻孔偏移空间数据特征与偏移分布特点

3.1 钻孔全深度空间数据分布规律

本次536m通风钻孔纵向跨度大，贯穿多层差异化地层，空间偏移参数随深度推进呈现梯度化、规律性演变特征。地表浅层0~150m区段地层稳定、地应力较小，钻孔偏移量波动平缓，空间形态均匀规整，数据离散度低。随着深度持续增加，地层地应力水平逐步提升，围岩作用持续加剧，钻孔偏移量、偏转角度持续增大，空间参数离散度显著提升，数据有序性逐步降低^[3]。深部区

间偏移累积效应凸显，成为钻孔整体轨迹畸变的主要区段，直观体现了钻孔形变随深度递增的核心分布规律。

3.2 不同岩层区间钻孔偏移变化特征

岩层岩性与岩体结构是控制钻孔偏移的核心地质因素。致密均匀、完整性好的岩层对钻孔成型扰动极小，偏移幅度微弱且状态稳定；结构松散、裂隙发育的破碎岩层，围岩自稳性差，受地压作用易发生错动，大幅加剧钻孔形变与轨迹偏移；软硬交替的复合岩层，岩体受力状态频繁突变，导致钻孔偏移呈现阶段性起伏波动。本次工程钻孔沿线岩性频繁更迭，岩层力学性质差异性显著，最终造成井下点位累计偏移量达15m，是钻孔轨迹严重偏离设计轴线的核心原因。

3.3 钻孔偏移方位与纵深变化规律

钻孔偏移方位与偏移幅度随深度延伸呈现规律性演化。浅层钻孔受人为施工控制为主，偏移随机性弱，延伸轨迹基本贴合设计轴线；进入深部地层后，在地层综合应力的持续导向作用下，钻孔偏移方位逐渐趋于固定，呈现定向偏转特征。同时，偏移量具备显著的累积效应，地表浅层水平偏移仅10m，经全深度地层应力叠加作用，井下-340中段累计偏移量扩大至15m，纵深越大，轨迹偏转角度与偏移增量越显著，这也是深部钻孔精准对接难度大幅提升的关键原因。

3.4 地层与施工条件对偏移空间分布的影响

钻孔偏移空间分布受地质条件与施工因素双重控制。地层赋存条件为核心内因，复杂构造、破碎地层岩体运动活跃，使钻孔偏移呈现多波动、无规则的分布特征；地应力的非均匀分布，直接决定钻孔形变的整体格局。施工因素为外部诱因，钻进速率、机具垂直度、成孔管控方式均会影响成孔质量，现场每10m校正钻具垂直度的管控措施，仅能小幅抑制施工偏差，无法抵消岩性不均、地应力差异引发的原生轨迹偏斜。内外因素叠加耦合，最终形成钻孔“浅层稳定、深部畸变、分段起伏”的偏移分布特征。

4 井下通风钻孔定向寻孔关键技术研究

4.1 基于钻孔空间偏移特征的寻孔技术思路

地表通风钻孔成型过程受地层作用产生空间偏移，造成实际孔位与设计坐标偏离，偏差值通常在0.8~1.5m之间，固定点位探测方式无法匹配井下探测作业需求。本项目井下点位累计偏移15m，传统定点搜寻模式完全无法适用。钻孔不同深度区段呈现的差异化偏移规律，能够真实反映钻孔地下延展状态^[4]。探测作业依托全域偏移数据，数据点密度不低于每10m一个控制节点，梳理钻孔实际延伸轨迹。井下探测点位依托实测空间数据完成动

态修正,重构钻孔井下空间分布形态。探测作业围绕真实形变规律开展,使井下探测路径贴合钻孔实际空间走向。摒弃传统固定坐标寻孔模式,依托实测偏移数据动态修正探测点位,可大幅提升复杂地层井下寻孔的精准性与成功率。本项目依托双向校核后的测斜数据制定方案,确定井下向前掘进15m平巷后精准找到通风孔。

4.2 井下钻孔方位定向与空间对标技术

井下作业环境存在复杂空间干扰因素,常规定向方式无法满足高精度孔位对标需求。矿井井下统一空间测量基准可作为定向作业依托,搭建适配偏移钻孔的定向作业模式。钻孔纵深方位随深度产生持续变化,探测设备作业姿态与探测角度可结合方位演变特征完成校正。地面实测孔体空间数据通过坐标换算,完成井下作业区域空间位置对标,将地表放样点位、分段测斜偏移量统一换算至-340中段井下坐标系,消除标高差带来的定位偏差。定向技术逻辑结合钻孔多维偏移特征做出调整,适配孔位空间变动状态。细化对标作业技术细节可削弱井下环境干扰带来的定位偏差,实现探测点位与实际钻孔空间位置的精准对应。

4.3 钻孔轨迹追踪与对接对接技术方法

通风钻孔地下延伸轨迹保持连续变化状态,完整捕捉轨迹走势可支撑井下精准对接作业。全深度偏移数据能够直观呈现钻孔轨迹整体演变态势,锁定轨迹偏转与空间位移的关键位置。地层区间带来的轨迹波动通过分层追踪方式完成精细探测,精准识别局部轨迹的细微变化。探测路径结合轨迹演变特征实时调整,不断贴近钻孔真实孔位形态。结合10m间隔校正、分段测斜的完整轨迹数据,逐层还原536m钻孔全段走向。优化轨迹追踪流程可实现全域轨迹的持续性探测,动态掌握钻孔空间走势。井下对接作业形式结合现场空间条件调整,适配偏移钻孔的不规则轨迹形态,提升作业面与通风钻孔的对接匹配度,保障通风通道有效贯通。动态轨迹追踪模式可适配钻孔不规则延展形态,精准捕捉局部轨迹突变点,为井下高效精准对接提供核心技术支撑。

4.4 井下定向寻孔作业技术体系优化

传统井下寻孔技术各作业环节衔接不够紧密,针对复杂地层偏移钻孔的适配能力存在局限。整套定向寻孔技术架构结合钻孔偏移分布特征与井下作业条件完成优化升级,结合土堆混合井-340中段通风钻孔完整施工、测量、寻孔全流程优化工序逻辑。调整各项技术工序的衔接逻辑,规整空间数据应用、方位定向、轨迹追踪与精准对接的作业流程;现场形成地表放样钻孔、分段测斜校核、井下双向复测、定向掘进寻孔的标化工序。地层条件与施工状态引发的偏移差异,通过调整寻孔技术参数与作业标准完成适配。细化各作业环节的技术操作细节,弥补传统寻孔工艺存在的技术短板^[5]。多维度的技术优化可提升寻孔工艺对复杂矿井环境的适应能力,形成专门适配地表通风钻孔的井下定向寻孔完整技术体系。

结束语

通风钻孔空间偏移受地层赋存条件与施工因素双重驱动,呈现出层次分明的纵向分布特征与方位演变规律。精密测量技术体系通过多维参数整合采集与全深度作业流程搭建,能够系统捕捉孔体空间形态的细微变化。井下定向寻孔技术依托全域偏移数据重构钻孔实际延展轨迹,通过方位对标与轨迹追踪实现探测路径与真实孔位的精准匹配。两项技术的系统集成与协同优化,构建起从地表测量到井下对接的完整技术链条,为矿井通风钻孔空间形态控制与高效贯通奠定了坚实的技术基础。

参考文献

- [1]冀超辉.基于穿层钻孔偏移规律的角度补偿纠偏技术[J].河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(4):34-39.
- [2]王智聪,张军.基于穿层瓦斯预抽钻孔轨迹偏移技术研究[J].能源与环保,2026,48(3):65-71,81.
- [3]曹阳,张文康,赵伟,等.瓦斯抽采钻孔轨迹检测技术及应用[J].中国矿业,2023,32(12):184-191.
- [4]邓立博.煤矿瓦斯抽采钻孔群轨迹偏移规律研究与应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(16):103-105.
- [5]田紫微,李志红,杨昌宇,等.软岩大变形煤层组瓦斯抽采钻孔偏移规律研究[J].煤矿现代化,2026,35(1):1-8.