

小口径金属矿产勘探钻探关键技术研究与应用

蔡正水¹, 王 强^{2,3*}, 刘 兵¹, 胡洪飞¹, 赵 俊¹

(1. 安徽省地质矿产勘查局313地质队, 安徽 六安 237010; 2. 安徽工业经济职业技术学院, 安徽 合肥 230051; 3. 安徽省深地钻探工程研究中心, 安徽 合肥 230051)

摘要:为应对深部及复杂地层小口径金属矿产勘探的挑战,本文针对硬岩地层钻进效率低、小口径钻孔轨迹控制难、复杂地层孔壁稳定性差及环保要求严等关键问题,系统开展了4项关键技术研究与应用:针对坚硬低研磨性地层,优化钻头设计(复合胎体、金刚石参数、水力结构)与钻进参数(高钻压、中转速),机械钻速提升超100%;针对易斜地层,集成防斜钻具与 $\Phi 32$ mm MWD,提出“主动防斜+动态纠偏”方法,实现钻孔偏斜率 $\leq 1.5^\circ/100$ m;针对破碎、漏失地层,研发地层适配性低固相/无固相冲洗液体系及自适应调控方法,结合随钻跟管、桥接堵漏等技术,有效解决垮孔、缩径及冲洗液漏失问题;创新融入绿色勘查理念,应用高效低扰动钻机、环保冲洗液、岩屑闭环处理等技术,显著降低环境扰动。在霍邱铁矿区应用表明,该技术体系可显著提升钻探效率,降低勘探成本与钻孔事故率,为深部金属矿产高效、精准、绿色勘探提供了可靠技术支撑。

关键词:金属矿产勘探;硬岩钻进;轨迹控制;复杂地层;绿色勘查

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0186-07

Research and application of key technologies for small-diameter drilling in metallic mineral exploration

CAI Zhengshui¹, WANG Qiang^{2,3*}, LIU Bing¹, HU Hongfei¹, ZHAO Jun¹

(1. Anhui Geology and Mineral Bureau 313 Team, Lu'an Anhui 237010, China; 2. Anhui Technical College of Industry and Economy, Hefei Anhui 230051, China; 3. Anhui Deep Drilling Engineering Research Center, Hefei Anhui 230051, China)

Abstract: To meet the challenges of small-diameter drilling for metallic mineral exploration in deep and complex formations, this study addresses four critical issues: low penetration rates in hard rock, difficulty in borehole trajectory control, poor borehole stability in broken or lost-circulation strata, and stringent environmental constraints. Four key technologies were developed and implemented: (1) For hard, low-abrasivity formations, bit design (composite matrix, diamond specification, hydraulic configuration) and drilling parameters (high weight-on-bit, moderate rotary speed) were optimized, raising the rate of penetration by more than 100%. (2) In deviation-prone formations, an anti-deviation bottom-hole assembly coupled with a $\Phi 32$ mm mud-pulse MWD system was deployed, enabling a “proactive deviation prevention + dynamic correction” strategy that limits borehole deviation to $\leq 1.5^\circ/100$ m. (3) Formation-adapted low-solid/non-solid drilling fluid systems with adaptive control, combined with drilling-with-casing and bridging lost-circulation materials, effectively mitigate collapse, diameter reduction and mud losses. (4) Green exploration principles were integrated through low-disturbance rigs, environmentally benign drilling fluids and closed-loop cuttings management, markedly reducing environmental impact. Field trials in the Huoqiu iron deposit

收稿日期:2025-07-23; 修回日期:2025-08-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.028

基金项目:安徽省战略性矿产找矿行动专项攻关工程第一批地质勘查基金项目“霍邱县吴集铁矿北段外围铁矿普查”(编号:2024-1-4)

第一作者:蔡正水,男,汉族,1974年生,正高级工程师,探矿工程专业,从事深部钻探技术研究与应用工作,安徽省六安市佛子岭中路103号,582362342@qq.com。

通信作者:王强,男,汉族,1986年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,从事深部钻探技术研究与应用工作,安徽省合肥市祁门路66号,307211839@qq.com。

引用格式:蔡正水,王强,刘兵,等.小口径金属矿产勘探钻探关键技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(S1):186-192.

CAI Zhengshui, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research and application of key technologies for small-diameter drilling in metallic mineral exploration[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):186-192.

demonstrate significant improvements in drilling efficiency, cost reduction, and accident-rate decline, providing a robust technical foundation for efficient, accurate and environmentally sustainable deep mineral exploration.

Key words: metallic mineral exploration; hard rock drilling; trajectory control; complex formation; green exploration

0 引言

金属矿产资源作为国家经济建设和战略安全的重要物质基础,其勘探开发技术水平直接关乎资源保障能力与产业核心竞争力^[1-2]。随着浅部矿产资源逐渐枯竭,勘探重点已转向深部及复杂地层。然而,在深部小口径金属矿产勘探实践中,传统钻探技术面临多重挑战,主要体现为:(1)超硬岩钻进效率低:在花岗岩等高石英含量坚硬岩层中,常规钻头的机械钻速普遍低于1 m/h,难以满足高效勘探需求,严重制约了勘探进度^[3-4]。(2)钻孔轨迹控制精度不足:随着孔深增加(>1500 m),钻孔偏斜率常超过设计标准,影响目标矿体精确中靶^[5-6]。(3)复杂地层适应性差:在破碎、漏失及水敏性地层中,护壁堵漏困难,岩心采取率及质量难以保障^[7]。(4)难以满足环保要求:传统钻探工艺与设备等对生态环境扰动较大,亟需绿色勘查技术体系支撑^[8-9]。

针对上述问题,本文基于理论创新与技术集成,重点攻关以下内容:基于岩石力学特性与可钻性分级,优化钻头设计(复合胎体、金刚石参数、水力结构)与钻进参数,以提高硬岩地层钻进效率;研发集成小口径无线随钻测量(MWD)系统,结合主动防斜钻具,实现钻孔轨迹的高精度动态控制;研发地层适配性泥浆体系及复杂地层护壁堵漏工艺,解决复杂地层钻进取心难题;引入环保节能钻探装备、环保冲洗液及无害化处理等技术,推动绿色勘查实践。本研究旨在为深部金属矿产勘探提供一套高效、精准、环保的技术解决方案,助力国家资源安全保障与行业技术进步。

1 坚硬低研磨性地层高效钻进技术

1.1 典型地层特征及影响分析

研究区域位于安徽霍邱铁矿区,主要发育石英片麻岩、混合岩、石英镜铁矿等硬岩地层,具有以下显著特征:(1)硬度高、强度大:压入硬度>4410 MPa,单轴抗压强度>147 MPa;(2)低研磨性:岩石研磨性<5 mg,矿物组成以石英(含量>60%)和长石为主,矿物粒径细小,岩粉研磨能力弱。

采用传统孕镶金刚石钻头钻进时,主要存在以

下技术瓶颈^[10]:(1)抛光效应明显:由于岩石研磨性不足,胎体磨损速率与金刚石出刃失衡,新切削刃难以有效暴露,导致机械钻速普遍<0.3 m/h,甚至出现零进尺,钻头寿命不足50 m。(2)热损伤问题突出:高转速配合低泵量的钻进参数,易引发金刚石局部高温,加速金刚石石墨化进程。(3)岩粉滞留效应严重:钻头水路结构设计不合理,排粉能力差,岩粉积聚导致二次研磨,影响钻进效率。针对上述问题,系统开展了钻头设计、钻进参数协同优化及钻具组合匹配等方面的研究。

1.2 钻头优化设计

1.2.1 胎体与唇面设计

采用多层复合胎体结构(如Co基/WC基层交替),表层添加10%~15%易磨损相(Cu/Sn等),随进尺增加逐渐过渡到高耐磨底层,实现胎体磨损速率与金刚石出刃的动态平衡,保持持续自锐性。优化唇面结构(如设计为阶梯式、锯齿型、螺旋斜齿、高低齿等),控制钻头底唇面与岩石接触面积占比在30%~50%,增强钻头攻击性。

1.2.2 金刚石参数优化

粒度与浓度:选用40/45目高强度(TI>120%)人造金刚石,浓度降至60%~75%,在极硬低研磨性地层可降至40%。采用表面粗化处理的金刚石颗粒,增强包镶强度。优化原则是深孔硬岩钻进以寿命优先,浅孔硬岩钻进以效率优先,确保钻头性能与地层特性匹配。

1.2.3 钻头结构设计

非对称水力结构:采用螺旋形水槽设计(倾角45°~60°),搭配不等径水口(前缘水口扩大20%),形成涡流场加速岩粉排出。

复合切削齿布局:主切削区采用交错式孕镶块(5 mm×5 mm)与尖齿状天然金刚石复合布置,辅助破碎区设置微型凸起(高度0.3~0.5 mm)。设计的金刚石钻头如图1所示。

1.3 钻进参数协同优化

小口径金属矿产勘探钻探中,合理选择钻进参数可有效改善钻头出刃效果和钻进效率。针对坚硬地层,推荐的钻进参数优化组合如表1所示。

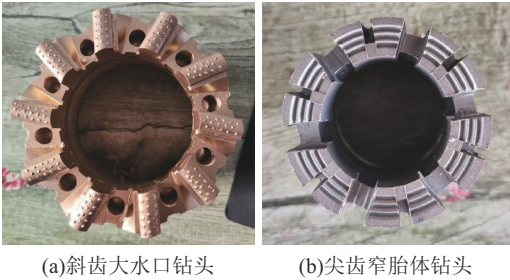


图1 钻头实物

表1 坚硬地层钻进参数推荐值

参 数	推荐值	作 用	备 注
钻压/kN	高钻压(高出常 规钻压30% ~100%)	促进岩石塑— 脆性转变	钻压可短时间 提高至常规 钻压的 300%
转速/(r· m ⁻¹)	中 转 速 (300~ 500)	平衡热损伤与 钻进效率	
泵量/(L· min ⁻¹)	35~120	及时冷却钻头 并排出岩粉	

1.4 钻具级配

合理的钻具级配设计对提高钻进效率具有重要意义,主要体现在:增强钻具稳定性,降低钻孔偏斜率;实现高低转速自由切换;减少孔内事故率。

针对小口径金属矿产勘探中的不同地层条件,采取差异化级配方案:(1)断层、破碎带或软硬互层地层适当增大钻头直径,提高泥浆黏度和固相含量,以增强孔壁稳定性。(2)完整地层优先采用标准级配方案。(3)复杂易斜钻孔施工,上部松散地层推荐采用多级塔式钻具,基岩采用偏心钻具加偏心钻头等特殊方式,以满足不同孔段环空间隙需求。

通过不同矿区多个钻孔的实验对比,推荐的钻具级配如表2所示。

2 钻孔轨迹高精度控制技术

2.1 小口径钻孔轨迹控制技术瓶颈

随着勘探深度增加(>1500 m),传统轨迹控制技术面临主要问题有:偏斜率超限(>3°/100 m);孔内信号传输延迟导致纠偏响应滞后(>30 min);复杂地层(如破碎带、蚀变岩层等)适应性差,轨迹控制精度下降30%~50%^[11]。此外,进口高精度MWD系统单套价格超百万元,且维保成本高,难以普及;国内有缆随钻定向系统则存在运输及使用不

表2 钻具级配推荐

口径 代号	钻杆/接 头直径/ mm	钻头标 准规格/ mm	钻头加 大直径/ mm	加大 量/ mm	适用地层
N	71/73	76	76	0	完整、稳定
			77~81	1~5	局部脆弱
H	89/91	96	96	0	完整、稳定
			97~100	1~4	局部脆弱
P	91/94	98	98	0	完整、稳定
			100~105	2~7	局部脆弱
	114/120	125	125	0	完整、稳定
			127~133	2~8	局部脆弱
	114/118	122	122	0	完整、稳定
			125~128	3~6	局部脆弱

便、随钻时送水器密封不严易导致机台污染、绞车和电缆事故频发等问题,增加了使用成本和孔内事故风险。

2.2 小口径无线随钻测量系统

针对传统定向钻进随钻测量系统在近垂直孔段(顶角<5°)因地磁场测量失效、惯性传感器漂移、工具面参考系退化等因素而存在的测量精度劣化问题,本研究通过技术创新,研发了适用于小口径钻探的泥浆脉冲随钻测量系统(MWD),实现了垂直孔段的高精度测量。该系统在硬件架构、算法优化和标定体系三方面进行了突破性改进。

2.2.1 多模态传感器融合架构

构建了磁惯导混合测量系统,集成三轴磁通门(±10 nT@±100 μT 量程,覆盖地磁场典型强度55~65 μT)和MEMS加速度计(±0.001 g静态精度),当顶角<3°时自动切换至纯惯性导航模式,并融合井口陀螺基准数据,抑制惯性导航累积误差;启用基于重力矢量的方位角解算算法(GtAzi);采用数字温度补偿技术,使MEMS加速度计的零偏稳定性优化至0.0005 g(1σ,静态条件下)。

2.2.2 动态误差抑制算法

设计了变权重自适应滤波算法,根据实时顶角动态调整磁测量与惯性测量的融合权重系数;在泥浆脉冲信号中植入时间同步标识符,补偿信号传输延迟引起的姿态解算相位误差。

2.2.3 全工况标定体系

引入24位置标定法(含-40、25、85℃3个温度点,每点8位置),建立了加速度计全温区(-40~

85℃)误差参数建模;现场作业时通过孔口光纤陀螺基准传递实现绝对方位角标定,消除地磁偏转角的系统性误差。

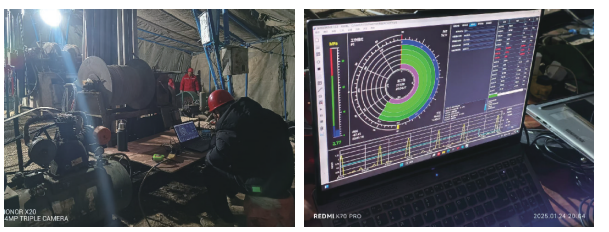
2.2.4 系统性能参数

研发的小口径无线随钻测量仪器外径为 $\varnothing 32$ mm(适配内径 $\geq \varnothing 40$ mm的钻杆),采用压电陶瓷堆叠驱动的直动式脉冲阀(响应时间小于 5 ms),在 40~180 L/min 排量范围内保持稳定脉冲(最低工作排量 30 L/min);顶角测量误差 $\pm 0.1^\circ$ ($0^\circ \sim 10^\circ$ 范围),方位角精度 $\pm 1.0^\circ$ (经磁干扰补偿后),工具面角精度 $\pm 0.5^\circ$;系统耐压 20 MPa,电子系统工作温度范围 $-20 \sim 85^\circ\text{C}$,传感器存储温度 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$,脉冲幅值 0.5~2.5 MPa 可调。

2.2.5 现场应用流程

现场动态纠偏作业基本流程如下:
组装纠偏钻具组合→孔口螺杆钻试验→下 $\varnothing 32$ mm MWD 仪器→孔口试验定向仪器→消除组合差→继续下钻(距孔底 0.5~1.0 m)→开泵循环启动螺杆钻具→启动仪器信号地面接收装置→测量钻孔孔斜→扭转钻杆调整工具面角→保持钻杆周向固定→纠偏钻进→实时监测工具面角和钻孔轨迹的关系→纠偏结束,提钻。

仪器入孔试验如图 2(a)所示,无线随钻测量界面如图 2(b)所示。



(a)仪器入孔测试 (b)无线随钻测量界面

图 2 随钻测量系统

3 复杂地层冲洗液护壁技术

3.1 地层适配性冲洗液体系优选

3.1.1 聚合物功能化冲洗液体系

以低黏聚阴离子纤维素、水解聚丙烯酰胺、聚丙烯酰胺等高分子聚合物为核心处理剂^[12-14],通过“包被絮凝-滤失调控-流变改良”协同作用,有效抑制地层水化分散,形成薄韧低渗滤饼,并显著提高携屑能力。该体系具有固相含量低、抑制性强、矿样污染低及现场维护便捷等综合优势。

3.1.2 无固相/低固相复合体系

由聚合物增黏剂(黄原胶 XC)、降滤失剂(改性淀粉、聚阴离子纤维素)及封堵材料(纳米碳酸钙、磺化沥青)复配而成,主要应用于严重漏失地层、矿层保护(降低固相侵入)及绳索取心钻进。

3.2 冲洗液性能参数设计

冲洗液关键性能参数设计目标如表 3 所示。

表 3 冲洗液性能参数表

参 数	目 标 范 围	作 用
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.03~1.20(根据地层压力)	平衡地层压力,防止塌孔/涌水;过高易压裂地层导致漏失
中压滤失量/mL	≤ 15 (矿层段 ≤ 10)	形成薄韧泥皮,减少水侵,保护孔壁稳定
泥皮厚度/mm	< 0.25	保护孔壁,降低钻具对孔壁的破坏
漏斗黏度/s	30~50(动态调整)	携带岩屑;黏度过高泵压高,黏度过低则携岩效果差
pH	8~9.5(多数体系)	维持处理剂活性,抑制腐蚀,稳定黏土分散
含砂量/%	≤ 0.5	减少钻具磨损,防止泥皮疏松

3.3 复杂地层冲洗液适应性调控

3.3.1 破碎坍塌地层

提升冲洗液黏度至 > 35 s(马氏漏斗)、静切力 > 5 Pa,复配多级封堵剂(刚性纳米 SiO_2 /柔性碳化棉纤维,粒径级配 1~100 μm),密度梯度调控(增量 ≤ 0.15 g/cm^3),同步监测漏失风险。

3.3.2 水敏缩径地层

采用聚胺-钾基复合抑制体系(K^+ 浓度 $\geq 3\%$),API 滤失量严格控制在 ≤ 8 mL/30 min,添加黏土稳

定剂。

3.3.3 漏失地层分级处理

漏失地层采用分级处理,如表 4 所示。

4 绿色勘查技术研究

4.1 环保钻探工艺

(1)采用低扰动钻机系统(如全液压顶驱钻机),减少占地面积,并配备自动防渗托盘,防止油污渗漏^[15-16]。

表4 漏失地层处置方案

漏失等级	处治方案	技术指标
微漏($Q < 10 \text{ m}^3/\text{h}$)	随钻添加片状云母 (40目)+植物 纤维(3~5 mm)	堵漏剂浓度 $\leq 5\%$
严重漏失($Q \geq 10 \text{ m}^3/\text{h}$)	转换无固相钻井液 或硬胶泡沫体系	气相体积占比 $> 85\%$
失返性漏失	实施间歇式桥塞堵 漏(核桃壳/橡胶 粒复合段塞)	段塞浓度 $30\% \sim 40\%$

(2)使用绿色冲洗液体系(植物胶基环保钻井液)、可降解润滑剂(降解率 $> 90\%$)、重金属螯合剂(固定率 $> 95\%$)。

(3)通过岩屑无害化处理措施,采用“即时固化-分类处置”闭环管理模式,普通岩屑就地回填,含矿岩屑集中回收,特殊岩屑专业处置^[17-18]。

4.2 节能降耗措施

树立节能即是减排的理念,应用先进的节能降耗设备与工艺,在发挥节能作用的同时,还可以提高施工效率,降低事故发生概率,从而降低施工费用和治理费用。比如,应用变频电机可节能 $20\% \sim 30\%$,降低事故率 $5\% \sim 15\%$;使用循环水系统可使节水率达 60% 以上。

4.3 无害化冲洗液

使用无毒、无害环保型冲洗液材料,杜绝有害材料进入矿区施工现场。利用生物降解技术对钻探废弃物进行肥料化处理,将熟化后的钻余物进行环保检测,达到肥料标准后可就地使用,既保护环境,又节省成本。

4.4 全过程监控体系

在中、大型矿区施工多个钻孔的情况下,可结合数字化管理平台建立“四位一体”监控网络进行监控:土壤监测点、地下水监测井、空气质量监测站、噪声实时监测仪。

5 霍邱铁矿区推广应用情况

5.1 霍邱铁矿区基本概况

霍邱铁矿已探明储量25亿t,远景资源量35亿t,平均矿石品位为 32% ,具有规模集中、矿体厚度大、矿层地质条件简单、可选性好、有害元素含量少等特点。霍邱铁矿区第四系厚度 $60 \sim 260 \text{ m}$,地层

复杂多变。岩性以石英片麻岩、混合岩、花岗岩、大理岩为主。由于第四系覆盖层较厚、地层变化大、接触带含水丰富、基岩局部裂隙发育、岩石可钻性差、地层陡倾等不利因素,该矿区钻探面临诸多难题,直接影响钻孔质量和钻进效率,导致孔内事故率高,钻探成本居高不下。具体表现为:

(1)硬岩进尺效率低。因地层硬度大、可钻性差(9级以上)等原因,在大段地层中钻进时效不足 0.3 m/h ,钻头适应性差。

(2)钻孔轨迹控制难度大。因地层陡倾、岩石各向异性等原因,地层自然造斜较强,部分钻孔因孔斜超标导致报废,孔斜控制难度大。

(3)复杂地层事故频发。第四系覆盖层厚,砂层、钙层、基岩接触带、基岩裂隙或构造破碎带漏失情况频发,严重时冲洗液“失返”,施工安全风险大、效率低、费用高。钻孔多设计为倾角 $75^\circ \sim 80^\circ$ 斜孔,钻进时套管断、脱事故频发,导致套管成本和处理套管事故的成本增加,甚至造成钻孔报废。基岩段地层变化频繁,地层陡倾,超径、破碎、漏失情况严重,易造成卡钻、埋钻、烧钻、断钻杆等事故。

(4)生态脆弱,环保压力大。矿区毗邻淮河,且大量孔位布设在农田内,环保要求高。传统设备、工艺和冲洗液难以适应环保要求。

5.2 推广应用情况

5.2.1 硬岩钻进效率提升

根据钻遇地层情况,对钻头进行了改良,由磨锐式出刃改成自磨式出刃,即胎体采用阶梯配方、软硬胎体交替的方式无压烧结成型。另外,结合防斜钻具、偏心钻头、液动冲击器等方式,大大提高了钻进效率。坚硬岩层钻进效率由原来的 $0 \sim 0.3 \text{ m/h}$ 提高到 $0.5 \sim 0.8 \text{ m/h}$,单孔效率提高 40% ,成本降低 25% 。典型硬岩岩心和使用的钻头见图3。

5.2.2 钻孔轨迹控制效果

霍邱铁矿区钻孔轨迹控制难度较大,很多倾角 $75^\circ \sim 80^\circ$ 斜孔因钻孔孔斜超标及孔斜导致的孔内事



(a)典型硬岩岩心 (b)取心钻头

图3 典型硬岩岩心和所用取心钻头

故而被迫报废,造成大量一孔多打现象。通过应用防斜纠偏钻具、纠偏钻头和小口径无线随钻测量系统,对钻孔轨迹进行实时跟踪监测、校正与优化,使

钻孔轨迹满足了设计要求。钻孔轨迹控制效果对比如表 5 所示,钻孔剖面图、平面投影图及倾斜剖面图如图 4~6 所示。

表 5 钻孔轨迹控制效果对比					
钻孔类型	钻孔直径/mm	工 艺 方 法	顶角/(°)	方位角/(°)	备 注
斜孔	97	传统钻具组合+常规测斜仪	1.2~1.8	1.6~2.5	每钻进 100 m 孔斜增量
		防斜钻具组合+动态纠偏技术	0.8~1.2	1.1~1.6	
	77	传统钻具组合+常规测斜仪	1.5~2.3	2.2~2.8	
		防斜钻具组合+动态纠偏技术	0.92~1.5	1.1~1.7	
直孔	97	传统钻具组合+常规测斜仪	1.05~1.5		
		防斜钻具组合+动态纠偏技术	0.5~0.7		
	77	传统钻具组合+常规测斜仪	1.3~1.7		
		防斜钻具组合+动态纠偏技术	0.7~0.9		

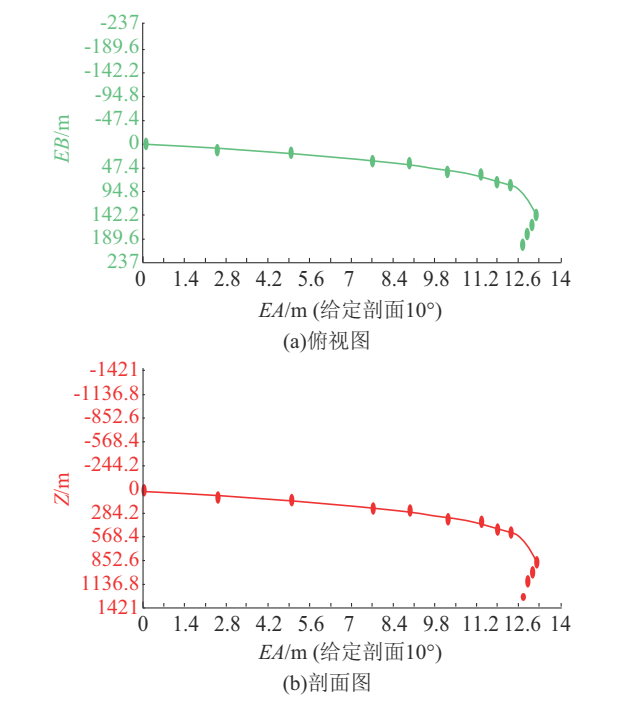


图 4 钻孔剖面图

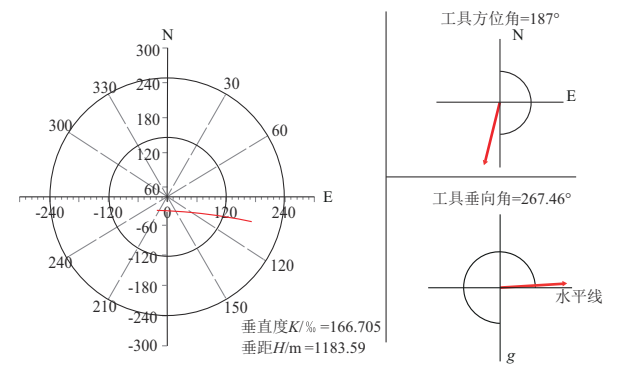


图 5 钻孔平面投影图

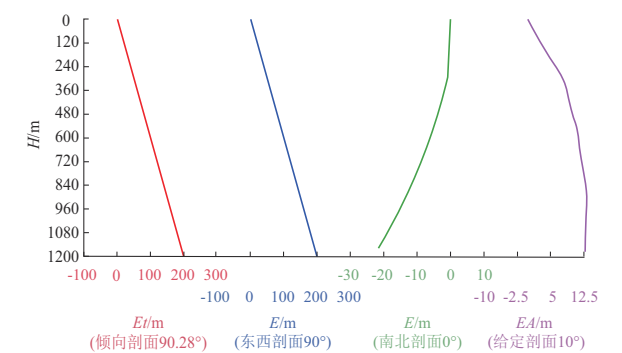


图 6 钻孔倾斜剖面图

5.2.3 复杂地层处理

针对霍邱铁矿区覆盖层厚且漏失严重造成的塌孔、缩径、埋钻等难题,集成应用了“随钻堵漏冲洗液体系+大直径绳索取心式防斜钻具+随钻跟管”技术,形成了一套适用于第四系及基岩破碎带的高效取心钻进工艺。

随钻堵漏冲洗液显著降低了漏失程度,延长了安全钻进时间,减少了套管下入层级;大直径绳索取心式防斜钻具,提高了钻孔轨迹质量和松散破碎地层取心质量;随钻跟管技术不同于传统跟管技术,其利用本级取心钻杆作为预备护管,钻孔施工受阻或需下套管时,可以直接把大直径钻杆作为套管使用,下入下一级钻具扫除上级钻头内径后继续进行取心钻进,节省时间成本和孔壁不稳定地层的下套管风险。复杂漏失地层处理措施如表 6 所示。

5.2.4 绿色勘查技术应用

(1)低扰动钻机系统。浅孔用全液压模块化钻机,深孔用全液压力头钻机,占地面积减少 25%。

表6 复杂漏失地层处理情况

地 层	漏失性质	漏失程度	常规措施	改进措施
第四系砂砾层	渗透性漏失	<3 m ³ /h	下套管	随钻跟管+随钻堵漏
基岩接触带	裂隙性漏失	>5 m ³ /h	稠冲洗液	桥接材料+封堵剂
破碎带	失稳性漏失	3~5 m ³ /h	冲洗液+水泥浆	液体套管+润滑剂

电动变频驱动替代柴油机,噪声降低至 55 dB 以下,碳排放减少 40%。

(2)绿色冲洗液体系。绿色钻井液的主要添加剂如表 7 所示。

表7 添加剂情况

类 型	成 分	环保优势
植物胶基钻井液	改性魔芋胶+纤维素衍生物	生物降解率>95%
合成生物润滑剂	脂类复合物	无重金属,LD50>5000 mg/kg

(3)岩屑闭环处理技术。即时固化:添加地质聚合物固化剂(如偏高岭土基材料),固化后浸出毒性低于国家相关标准限值。资源化利用:含矿岩屑经浮选回收金属,尾渣用于矿区道路铺设。

6 结 论

本文针对深部小口径金属矿产勘探中硬岩钻进效率低、钻孔轨迹控制难、复杂地层适应性差及环保风险高等核心难题,通过理论创新与技术集成取得以下成果:

(1)提出“岩性-钻头-钻进参数”动态匹配方法,研发复合胎体与非对称水力结构(螺旋水槽+前缘扩口)钻头,在霍邱铁矿区坚硬地层中应用,机械钻速由<0.3 m/h提升至0.82 m/h(提升173%)。

(2)研发了Ø32 mm 泥浆脉冲MWD系统,利用惯性主导测量模式突破了传统磁导向工具在垂直孔段的测量瓶颈,结合防斜钻具形成“主动防斜+动态纠偏”轨迹控制技术,实现1500 m以深钻孔偏斜率≤1.5°/100 m。

(3)开发了适用于复杂地层(尤其是破碎地层)的无毒环保型钻井液体系,满足环境敏感地区钻探作业的高标准环保要求。

(4)构建了“低扰动装备-环保冲洗液-钻屑闭环处理”技术链,通过应用高效节能环保钻探装备及岩屑资源化利用工艺,大幅降低了钻探活动对生态环境的影响。

本研究形成的关键技术体系,有效提升了深部小口径金属矿产勘探的效率、精度与环保水平,为保障国家资源安全与推动行业技术进步提供了可靠支撑。

参考文献:

[1] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.

[2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.

[3] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2014.

[4] 刘兵,朱恒银,王强,等.坚硬打滑地层钻进技术研究[J].地质装备,2024,25(3):36-40.

[5] 宋继伟,冉飞,方青,等.贵州省贞丰县金矿勘查小口径定向分支钻进技术[J].地质与勘探,2024,60(6):1217-1227.

[6] 李笔文,叶嗣暄.复杂地层分层定向钻孔轨迹设计方法优化[J].钻探工程,2024,51(2):47-52.

[7] 刘蓓,蔡正水,杨可,等.寨上金矿复杂地层深孔岩心钻探技术[J].钻探工程,2023,50(S1):240-245.

[8] 马骋,张福良,雷晓力,等.当前推进绿色勘查工作的若干思考[J].中国矿业,2019,28(S2):138-141.

[9] 吴金生,李子章,李政昭,等.绿色勘查中减少探矿工程对环境影响的技术方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):112-116.

[10] 沈立娜,路杲,尹建民,等.坚硬地层NBS高效孕镶金刚石钻头的研究与应用[J].钻探工程,2017,44(1):84-86,92.

[11] 刘聃,陈剑奎,侯岳,等.钻井利器故事之“慧磁”高精度定向中靶导向系统[J].钻探工程,2023,50(4):155-159.

[12] 代万庆,薛艳,颜巧云.水敏性地层钻探泥浆性能优化及配制[J].钻探工程,2021,48(11):23-29.

[13] 李冰乐,王胜,袁长金,等.复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J].钻探工程,2023,50(6):86-92.

[14] 李增梁,陈永平,穆元红,等.甘肃杨岭铁矿区复杂地层岩心钻探技术[J].钻探工程,2024,51(S1):287-291.

[15] 方国庆,潘德元,王杰,等.绿色勘查技术在湖南省幕阜山地区钻探工程中的应用与实践[J].钻探工程,2024,51(S1):269-274.

[16] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J].钻探工程,2022,49(2):30-39.

[17] 温得全,冯美贵,李斌,等.智能高效小型一体化泥浆不落底系统的应用[J].钻探工程,2022,49(4):49-54.

[18] 樊勇军,武恒,王士国.天津地区工程废弃泥浆物理压滤处置技术研究[J].钻探工程,2021,48(7):115-120.

(编辑 王跃伟)