绿色钻探技术在煤矿陷落柱探查工程中的应用

郭洪良，杨胜春，王　朔，姜　珊，李　翠，刘　恒*，付江超
（山东省煤田地质局第一勘探队，山东 青岛 266500）

摘要：传统地质勘查工作对生态环境产生较大影响，对地表产生一定的扰动和破坏。实施绿色钻探可以有效控制并最大限度减少环境影响，减少地表扰动与环境污染。本研究在煤矿陷落柱探查钻探施工全过程中系统协同应用了耕植土剥离、防尘网铺设、低噪声电动机、“一孔多支”定向钻进技术、低固相生物降解钻井液体系及“钻井液不落地”等一系列绿色勘查技术措施，施工结束后恢复原地貌情况良好，构建了“源头防控-过程管控-末端治理”的全链条绿色施工体系。为煤矿陷落柱探查区绿色钻探提供了可复制、可推广的技术模式，对推动矿产资源勘查领域绿色低碳发展具有重要现实意义。

关键词：绿色勘查；绿色钻探；耕植土剥离；一孔多支；定向钻进；钻井液不落地；煤矿陷落柱探查
中图分类号：P634.5；TD1　　**文献标识码：**B　　**文章编号：**2096-9686(2026)06-0161-09

The application of green drilling technology in the exploration of subsidence pillars in coal mines

GUO Hongliang, YANG Shengchun, WANG Shuo, JIANG Shan, LI Cui, LIU Heng*, FU Jiangchao
(*The First Exploration Team of Shandong Coal Geological Bureau, Qingdao Shandong* 266500, *China*)

Abstract: Traditional geological exploration practices have significant impacts on the ecological environment, causing disturbance and damage to the land surface. The implementation of green drilling can effectively control and minimize these environmental impacts, reducing surface disturbance and environmental pollution. This study systematically and synergistically applied a series of green exploration technical measures throughout the entire drilling process for exploring coal mine subsidence pillars, including topsoil stripping, dust-proof net laying, low-noise electric motors, "multi-branch directional drilling in a single borehole", low-solid biodegradable drilling fluid system, and non-landing drilling fluid technology. Upon completion of the construction, the original landform was well restored, establishing a full-chain green construction system of "source prevention-process control-end treatment". This provides a replicable and extendable technical model for green drilling in coal mine subsidence pillars exploration areas, which is of significant importance for promoting green and low-carbon development in the field of mineral resource exploration.

Key words: green exploration; green drilling; topsoil stripping; multi-branch drilling in a single borehole; directional drilling; non-landing drilling fluid; exploring coal mine subsidence pillars

0　引言

绿色勘查以绿色发展理念为引领，运用先进绿色勘查装备、先进技术手段与创新施工工艺，实现勘查活动的环境影响最小化[1]。张集煤矿矿区勘查项目严格遵循生态环保标准，通过煤炭清洁利用技术，实现资源开发与环境保护协调统一。本文以张

收稿日期：2026-02-06；**修回日期：**2026-04-08　　**DOI：**10.12143/j.ztgc.2026.06.018
基金项目：山东省煤田地质局2022－2023年度科研专项“急倾斜地层防斜打快技术研究”(编号：鲁煤地科字(2022)24号)
第一作者：郭洪良，男，汉族，1984年生，高级工程师，地质工程专业，主要从事矿产资源勘查、钻井工艺研究工作，山东省青岛市西海岸新区凤凰台路169号，ghl313@126.com。
通信作者：刘恒，男，汉族，1981年生，高级工程师，探矿工程专业，主要从事钻探生产施工、地质找矿等技术研究工作，山东省青岛市西海岸新区凤凰台路169号，liuheng169@126.com。
引用格式：郭洪良，杨胜春，王朔，等.绿色钻探技术在煤矿陷落柱探查工程中的应用[J].钻探工程，2026，53(6)：161-169.
GUO Hongliang, YANG Shengchun, WANG Shuo, et al. The application of green drilling technology in the exploration of subsidence pillars in coal mines[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 161-169.

集煤矿异常区探查项目为例，采用“一孔多支”定向钻进技术，开展绿色地质勘查综合技术应用，系统对比传统钻探方法与绿色钻探技术的实施效果，取得了显著成效，为推动传统地质勘查向理念生态化、装备专业化、管理精细化的绿色勘查模式转型提供实践参考。

1 工程概况

1.1 交通及地质概述

张集煤矿位于山东省菏泽市单县县城以东约22 km，西部边界涉及时楼镇王楼村和谢阁村。区内交通较为便利，张集—单县、终兴集等县乡级公路贯穿其中，矿井东距京杭大运河50 km，具备利用水路运输煤炭的区位优势。项目周边环境见图1。



图1 项目周边环境

Fig.1 Surrounding environment of the project

张集煤矿大地构造位置处于华北板块鲁西地块鲁西南潜隆起区菏泽—兖州断隆的成武背斜南翼，单县背斜东端，区域构造格架表现为受张性断裂控制的凸起与凹陷相间格局，该构造特征控制着区内地层展布与煤炭资源分布。

矿区地层从上至下主要岩性特征如下：(1)第四系地层岩性以棕黄色黏土与砂质黏土为主，夹不等粒砂层。(2)新近系地层岩性以浅绿、棕黄色黏土岩、砂质黏土岩为主，夹有部分细粒砂岩；含煤地层顶部以石盒子群底界砂岩为界，该层砂岩为河床相沉积，典型岩性为中—粗粒长石石英砂岩，侧向常相变为粉砂岩、细粒砂岩或泥岩。(3)二叠系山西组地层岩性为灰—灰白色砂岩、深灰色泥岩、粉砂岩和煤层。

1.2 钻探工程基本情况

工程旨在查明张集煤矿异常区地质构造、地层岩性及水文地质条件，排查隐蔽致灾地质因素，为煤矿安全生产提供可靠地质保障。工程质量严格遵循《绿色地质勘查工作规范》及煤矿地质工作相关要求，确保钻探数据精准、施工安全合规。开展绿色地质勘查综合技术应用，核心是解决传统钻探施工中生态扰动大、耗材消耗多、施工效率偏低等难题，响应绿色发展及找矿突破战略行动要求。通过运用“一孔多支”定向钻进技术、环保型钻井液体系，降低施工对周边环境的扰动，并探索在复杂地质条件下实现精准探查与环境保护协调统一的技术路径，为煤炭资源绿色钻探提供实践经验。

1.3 钻孔结构及钻具组合

工程设计主孔1个、分支孔5个，设计工程量2140 m。

导管：新生界地层采用Ø215.9 mm PDC钻头全面钻进，钻具组合为Ø215.9 PDC全面钻头＋Ø152.4 mm钻铤×1根＋Ø89 mm钻杆＋Ø108 mm方钻杆，钻至孔深22 m；采用Ø311.2 mm PDC全面钻头扩孔，下入Ø244.5×10.03 mm套管22 m并固井，水泥浆返至地面。

一开(直孔段)：采用Ø215.9 PDC全面钻头/取心钻头钻进(单管)，钻具组合为Ø215.9 mm PDC全面钻头/取心钻头＋Ø177.8 mm钻铤×6根＋Ø152.4 mm钻铤×4根＋Ø89 mm钻杆＋Ø108 mm方钻杆，钻至基岩面以下10 m后，下入Ø177.8 mm×9.19 mm石油套管固井，水泥浆返至地面以封隔新生界地层。

二开：分为直孔段与定向段，均为单管钻进。直孔段用Ø152.4 mm PDC全面钻头/取心钻头，钻具组合为Ø152.4 mm PDC全面钻头＋Ø121.4 mm钻铤×4根＋Ø89 mm钻杆＋Ø108 mm方钻杆，取心时为Ø152.4 mm取心钻头＋川5-4型取心筒＋Ø121.4 mm钻铤×4根＋Ø89 mm钻杆＋Ø108 mm方钻杆；定向段(含主孔及分支孔造斜、稳斜段)用Ø152.4 mm PDC全面钻头，钻具组合为Ø152.4 mm PDC钻头＋Ø120 mm(1.25°、1.5°)螺杆钻具×1根＋定向短节＋Ø121 mm无磁钻铤×1根＋Ø89 mm加重钻杆15根＋Ø89 mm钻杆＋Ø108 mm方钻

杆,裸眼完钻。

钻孔空间位置示意图见图2。

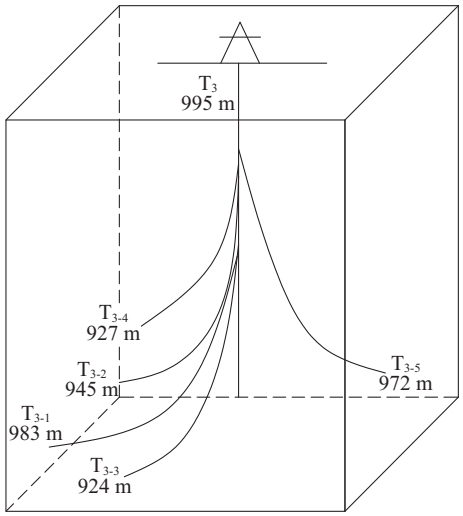

图2　钻孔空间位置示意

Fig.2　Schematic diagram of drilling spatial locations

2　传统钻探工程对环境影响分析

2.1　耕地地表破坏

传统钻探施工前期,开挖泥浆池、蓄水池过程中,未对耕地表层耕植土进行剥离处理,且开挖产生的土方未采取合理堆放措施,易导致土壤结构破坏及植被碾压;钻探工作完成后,仅对施工破坏区域进行简单平整,未将前期剥离的耕植土回填复位,破坏了耕地土壤肥力及耕作条件,进而对农作物生长造成不利影响。

2.2　土壤和水污染

传统地质钻探存在以下环境风险:(1)设备存放场地、泥浆池等潜在污染源未采取防渗措施,化学钻井液渗漏易导致土壤及水体污染;(2)柴油机作为传统钻机动力源,在使用与维修过程中存在油料泄漏风险,造成土壤污染;(3)地表土层钻进过程中未采用环保材料及表层套管固井工艺,导致钻井液与浅层含水层直接接触,引发地下水污染。

2.3　噪声、空气污染

传统地质钻探所采用的动力设备以柴油机为主,该类设备运行过程中噪声排放强度较大,若井场选址临近居民区,其产生的噪声会超出区域环境噪声标准,形成噪声污染,干扰居民日常生活、休息及身心健康。同时,传统地质钻探使用的柴油机未配备完善的废气净化处理设施,废气排放指标未达到国家相关排放标准,废气中含有的颗粒物、一氧化碳、氮氧化物等污染物会直接排放至大气中,造成区域空气污染,影响大气环境质量。

3　绿色勘查施工组织与管理

3.1　绿色勘查技术路线

在勘查过程中,将绿色勘查理念和生态环境保护贯穿于地质勘查全过程,实现地质勘查与生态保护协同推进[2]。在项目部设置、井场建设、绿色勘查施工、环境恢复等各个关键环节,均实施严格的环保管控措施,在满足地质勘查目的的前提下,减少对生态环境的扰动[3]。施工前编制绿色勘查方案,组织安全、质量、环保技术交底;设备下部铺设防渗土工布,耕作层土壤剥离装袋留存复垦。施工中利用既有道路运输,采用“一孔多支”定向钻进技术,优化井场布局,减少占地。施工后及时清理场地,回填耕植土,复垦整治,恢复原地貌及土地利用状态。

3.2　绿色勘查组织机构建设

本项目以张集煤矿异常区探查工作为依托,全面推行绿色勘查工作模式。通过成立绿色勘查管理领导小组与绿色勘查管理办公室,构建完善的绿色勘查管理组织体系:由分管生产安全的副队长担任领导小组组长,统筹绿色勘查整体工作;绿色勘查管理办公室设在总工办,具体负责绿色勘查日常管理、措施落实、过程管控及统筹协调等各项工作,确保绿色勘查各项要求落地见效。

3.3　绿色勘查管理制度

本次张集煤矿地质勘查工作,严格以国家、地方相关法律法规及行业规范制度为根本依据,坚决贯彻落实绿色勘查各项要求。所依据的相关制度包括《绿色勘查指南》《绿色勘查规范》《山东省地质勘查野外项目部标准化建设导则》《山东省绿色勘查技术要求(试行)》《环境空气质量标准》《钻井液材料规范》等,通过完善的制度支撑,为绿色地质勘查工作的规范化实施、全过程管理提供了坚实的制度保障[4]。实行岗位责任制,明确管理小组、项目部、施工班组各层级职责;建立每日巡查机制,及时整改违规问题;绿色勘查指标纳入绩效考核,对成效显著的班组予以奖励,对违规行为责令整改并视情节给予警告或扣除绩效处罚,确保制度执行到位。

3.4 现场踏勘与项目部选址

本次勘查以QES管理体系建设要求为指导，开工前开展现场踏勘，摸清地质条件、进场道路及环境敏感点。项目部租用就近民房，设备运输利用现有道路，减少土地占用与生态扰动。施工严格执行“边设计、边施工、边优化”原则，动态调整勘查方案，确保绿色勘查理念贯穿施工全过程[5]。

3.5 绿色勘查技术培训与学习

项目开展多层级绿色勘查技术培训，系统学习中国矿业联合会《绿色勘查指南》(T/CMAS 0001—2018)、自然资源部《绿色地质勘查规范》(DZ/T 0374—2021)及山东省自然资源厅《山东省绿色勘查技术要求(试行)》等规范文件，掌握绿色勘查的基本原则、技术要求、建设内容及验收标准。施工期间，钻机班组定期组织绿色勘查专题学习，强化生态环境保护意识，深化对绿色勘查技术要求的理解与执行。

4 钻探施工技术与措施

4.1 孔位选择及场地平整

本次勘查在孔位选择阶段，综合区域地层岩性、构造分布及生态环保要求，遵循施工便利性与环境影响最小化原则，在满足地质任务前提下优化孔位布局，最大限度减少辅助工程对生态环境的扰动。施工过程中重点落实两项环保措施：一是剥离井场耕作层土壤(厚度40 cm、总量21.6 m^3)，集中装袋(632袋)留存，用于后期土地复垦；二是对井场裸露地表及临时堆土铺设防尘网，遏制粉尘污染，从源头上降低生态扰动并为后期复垦创造条件。井场施工与现场环境见图3。

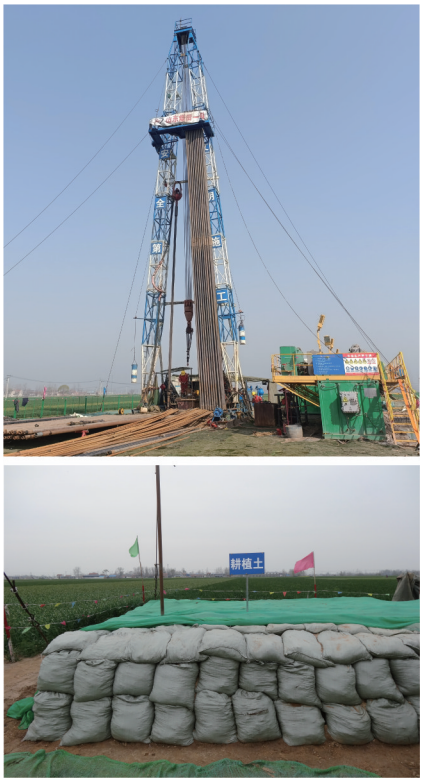

图3 井场施工与现场环境

Fig.3 Well site construction and on-site environment

4.2 动力设备优选

本次钻探施工采用国家电网供电，选用55和37 kW电动机(Y315S-4)作为主要动力设备，所选电动机噪声低、无污染物排放，契合绿色钻探要求。配套设备包括TSJ-3000型钻机、N3NB-350型泥浆泵、27 mA型钻塔；固控系统配置GNZS703F-SHBF型振动筛、GNZJ752F-M1SF型除砂器、GNZJ752F-M8NF型除泥器、RSD/LW500×1000N型离心机；定向钻具采用SQMWD-Y型无线随钻定向仪、Ø177.8/152.4/121 mm钻铤、Ø121 mm无磁钻铤、7LZ120型螺杆钻具、川5-4取心筒。开工前完成塔衣安装及消声装置布设，强化噪声防控。经监测，距井场700 m处村庄噪声值约32 dB，满足《声环境质量标准》(GB 3096—2008)限值要求，对职工健康及周边居民无显著影响。

4.3 “一孔多支”技术的应用

本次勘查施工采用“一孔多支”定向勘查设计理念[6]，核心技术要点围绕定向钻探施工展开，依托SQMWD-Y型无线随钻定向仪、Ø177.8/152.4/121 mm钻铤、Ø121 mm无磁钻铤、7LZ120型螺杆钻具等关键仪器工具，配套固控设备开展施工，核心目的是查明地质异常区构造、排查隐蔽致灾因素，实现陷落柱精准探测。施工中选用带弯接头的孔内动力钻具组合，通过合理选择钻具长度、弯接头规格及严格控制装置角，有效控制井身轨迹；各分支孔侧钻情况见表1。

所有分支孔终孔位置均达到预期靶点范围，精准完成1个主孔(T_3)及5个分支孔施工，与传统作业相比优势显著：减少5个直孔段施工，缩减工程量3600.43 m，缩短工期5.5个月，减少5个井场使用(节约土地约8000 m^2)，节约费用20万元，显著减少地表扰动，体现绿色勘查“减扰动、护生态”核心

表 1　各分支孔侧钻情况

Table 1　Side drilling condition of the lateral branch hole

分支孔号	侧钻起始深度/m	定向终孔深度/m
T_{3-1}	730.43	1062.58
T_{3-2}	758.43	1067.80
T_{3-3}	732.43	1046.68
T_{3-4}	801.43	1067.23
T_{3-5}	723.43	1001.90

要求[7-8]。

定向钻探施工技术要点:直孔段采用满眼钻进工艺或防斜打直技术,抑制孔斜、保障垂直延伸,通过孔斜变化率量化控制精度;造斜段以设计造斜率为控制指标,精准调控孔身轨迹,结合相关公式调整定向工具面及螺杆钻具弯头角度,计算公式为:

$$\eta = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{L} \times 30 \qquad (1)$$

式中:η——每 30 m 孔段倾角变化率,(°)/30 m;θ_1、θ_2——前后两测斜点的钻孔倾角,(°);L——前后两测斜点间的钻孔长度,m。

优化钻进参数(钻压 50~120 kN),确保造斜率稳定在(1°~6°)/30 m;稳斜段通过 MWD 实时传输钻孔倾角、方位角,每钻进 1 个单根钻具复核轨迹,孔斜角偏差>±0.5°或方位角偏差>±3°时及时调整,保障轨迹贴合设计。施工后,结合不同标高(−853.23、−867.43 m 等)陷落柱范围曲线,采用 CAD“放样”功能模拟建模,推测陷落柱为东西向发育椭球状,3 煤$_{上}$剖面东西向约 61 m、南北向约 29 m,3 煤$_{下}$剖面东西向约 70 m、南北向约 46.6 m[9],实现对陷落柱直接、可靠的探测。陷落柱推断模式见图 4。

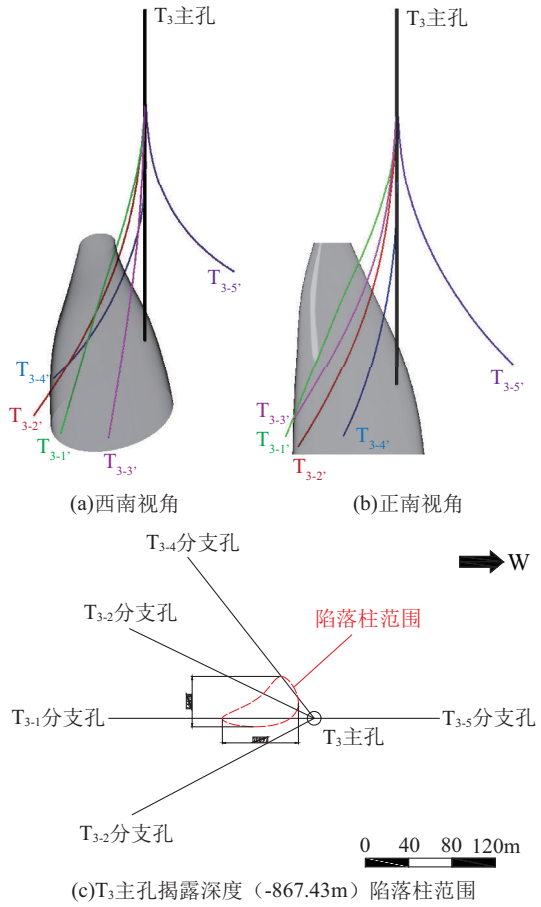

图 4　陷落柱推断模式

Fig.4　Inferred model diagram of subsidence pillar

4.4　钻井液体系优选

在钻探施工过程中,强化环境保护理念,钻井液材料选型在综合考虑钻探工艺、性能等方面的同时,应该重视其对环境的潜在污染和毒性危害[10]。以往钻探施工中,环保意识薄弱,仅关注地质条件选择钻井液材料,忽视对环境的影响,随着地质特深孔复杂地层小环空条件下护壁、钻井液排放污染等难题的日渐凸显[11-12],绿色勘查理念深入人心,对现有钻井液技术的环保性能提出了更高的要求[13]。

本次钻探施工过程中优选低固相生物聚合物水基钻井液体系,主要由优质钠基膨润土、腐殖酸钾、食品级纯碱和改性纤维素类增黏剂构成,该种钻井液材料本身可以生物降解,对环境友好,而且其性能较佳,同时有效控制“三废”排放,优化配比为:优质钠基膨润土 3%~5%、腐殖酸钾 1%~2.5%、改性纤维素类增黏剂(CMC)0.2%~0.5%、食品级纯碱 0.2%~0.6%。

环境友好性机制与性能表征:

(1)生物降解性与毒性评估:腐殖酸钾及改性纤维素均属于天然高分子衍生物,28 d 生物降解率(OECD 301B)>60%,BOD/COD>0.45;急性生物毒性试验(发光菌法,GB/T 15441)抑制率<15%,属实际无毒级(96h-LC50>5000 mg/L)。

(2)食品级添加剂安全性:采用食品级纯碱调节 pH 至 8.5~9.0;体系无荧光、无异味,钻屑及废液经简单中和、絮凝处理后,COD<100 mg/L,满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962)B 级要求,可直接用于场地绿化灌溉或达标排放。

(3)工艺性能协同:结合现场施工实际,不同开次钻井液性能指标如下:一开采用低固相聚合物体系,密度1.03～1.15 g/cm³,漏斗黏度45～50 s,塑性黏度20～40 mPa·s,动切力10～20 Pa,静切力4～8 Pa,API滤失量10～15 mL,泥皮≤0.5 mm,pH值8～10;二开采用低固相聚合物体系,密度1.03～1.15 g/cm³,漏斗黏度60～80 s,塑性黏度10～25 mPa·s,动切力5～10 Pa,静切力3～6 Pa,API滤失量≤4 mL,泥皮≤0.2 mm,pH值7～9。该体系低固相含量(＜4%)降低了环空压耗,有效缓解小环空钻进中的压漏风险;聚合物网状结构在孔壁形成可渗透泥皮,兼顾护壁性能与地下水含水层保护。

现场实践表明,该体系整体生物降解性能优良,环境相容性佳,在确保钻探工艺性能达标、满足复杂地层护壁及冲洗需求的同时,可显著降低"三废"排放量,实现钻井液材料"低污染、可降解、易处理"的绿色目标,充分契合绿色勘查"生态优先、绿色施工"的核心发展理念。

4.5 "钻井液不落地"技术的应用

设计"防渗隔离预处理→四级分级净化→液相净化回用"的优化工艺。地质勘查设备安装时在设备底部、施工操作场地、钻井液材料存放场地等地面铺设了防渗土工布进行防渗隔离。钻井液调配处理使用四级净化固控系统由振动筛(处理量60 m³/h,筛网孔径74 μm)、除砂器(处理量70 m³/h,分离粒径≥44 μm)、除泥器(处理量60 m³/h,分离粒径≥15 μm)、卧螺离心机(处理量50 m³/h,转鼓转速3000 r/min)组成。净化后液相全部回用于配制水基钻井液,少量无法回用的液相经检测后拉至矿内集中处理,实现"防渗—净化—回用—无害化"闭环管控。该工艺有效清除有害固相,实现钻井液循环利用,减少排放,解决了钻井液就地掩埋环境污染隐患大、地貌恢复难度大的难题,满足绿色勘查要求[14]。钻井液不落地设备现场平面布置见图5。

通过应用四级净化固控系统,钻井液循环利用率达到85%以上,单孔钻井液用量减少约60%,钻井废弃物产生量降低70%,显著降低钻井成本。现场土壤及地下水检测指标均符合《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)及《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)要求,未发生钻井液渗漏污染事件,地貌恢复周期缩短50%,实现了经济效益与环境保护的双赢。

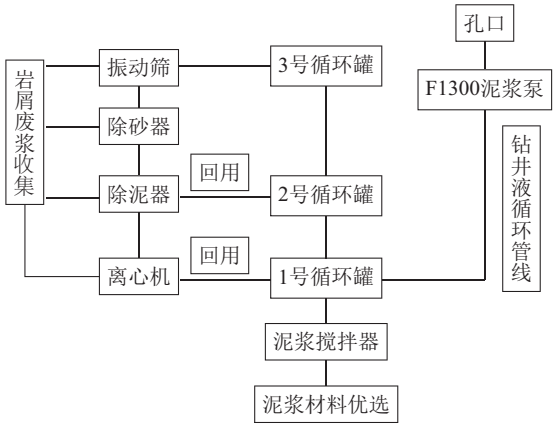

图5 钻井液不落地设备现场平面布置

Fig.5 Site layout plan of drilling fluid non-landing equipment

4.6 其他环保措施

4.6.1 地表水保护

该项目采用表层套管固井工艺,套管尺寸为Ø146 mm,总长670.07 m,下入深度669.14 m,高出地表0.93 m。通过水泥封固浅层含水层,从源头遏制钻井液与地下水接触。与传统无套管或简易套管工艺相比,浅层含水层污染风险降低90%以上,地下水水质达标率100%(符合《地下水质量标准》GB/T 14848—2017Ⅲ类标准),彻底解决了传统钻探中钻井液渗漏导致的水质污染问题。

4.6.2 生产生活垃圾处理

钻探施工期间,机械设备更换产生的废机油采用专用油桶密封存放,经处理后用于涂抹钻具丝扣,实现废机油的100%资源化利用。较传统外委处置方式降低危废处理成本约60%。

施工现场分类摆放垃圾箱,垃圾集中回收后定期运送至当地垃圾回收站进行无害化处理。禁止燃烧垃圾和任何有害物料,无烟尘,对空气无污染[15]。空气质量符合《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准。

4.6.3 现场标准化建设

施工现场严格分区布设,划分钻探施工区、工作休息区、原始土层存放区、消防器材存放区、钻井液材料存放区、钻具摆放区、垃圾回收区等功能区域。与传统勘查现场混乱布局相比,占地面积减少80%(由平均10000 m²降至2000 m²),土壤扰动面积减少85%,原始土层分层存放率达100%,地貌恢复周期由传统3～6个月缩短至1～2个月。现场显著

位置悬挂工程概况牌、绿色勘查危险源识别标牌、井场施工平面布置图及安全警示牌,周边规范设置警戒线及安全围栏,各类工具、物料定置摆放,实现现场标准化管理全覆盖。

在噪声控制方面,本项目采用低噪声电动机替代传统柴油机驱动。现场实测表明,钻探过程中噪声约为32 dB,而传统柴油机驱动模式下同距离噪声达95 dB左右,降噪幅度达63 dB。这一改善不仅显著降低了对施工人员听力的损害风险,也减少了对周边野生动物的惊扰,尤其对生态敏感区域的钻探作业具有重要环保意义。

5　环境恢复管理

5.1　完工井场清理

地质勘查任务完工后,及时拆除、回收施工设备、各类标识牌及防尘网等设施;分类清理废浆、固体废物、岩屑及生活垃圾,消除次生环境风险。剩余钻井液转运至后续钻孔循环使用,废浆及岩粉经罐车运至张集煤矿用于井下采空区充填,生活垃圾运送至就近垃圾转运站统一处理。通过制定环境恢复专项措施,实现“完井、料清、场净”[16]。

5.2　场地复垦

场地复垦时,对井场内废浆池采用分层剥离表土进行回填,严格控制土层回填顺序,尽量恢复原始土壤结构;回填至低于井场地坪30 cm处。结合现场地形条件,尽可能恢复原始地貌。对仅压占未开挖区域,实施浅层翻耕、疏松表层土壤,使其达到复垦标准,确保覆土厚度满足农作物生长需求。井场复垦前后对比见图6。



图6　井场复垦前后对比

Fig.6　Comparison of the well site before and after reclamation

6　绿色勘查技术经济分析

6.1　绿色钻探成本分析

成本分析是保障绿色勘查工作有序开展、实现技术与经济效益协同的重要基础,对绿色勘查项目的规范化实施具有重要指导意义。本次张集煤矿绿色钻探项目成本核算主要围绕人员工资、材料费、施工设备使用费三个核心维度开展,具体核算结果如下:人员配置共计20人,按300元/(人·d)计,工期4.5个月,人员费用合计81万元;材料费主要涵盖防渗土工布、防尘网、安全围栏、指示标牌、优质环保钻井液材料、石油套管、螺杆钻具等,合计39.05万元;施工设备使用费包含设备运输、现场安装、设备日常维修及螺杆钻具检修维护等相关费用,合计32.9万元;临时用地青苗补偿3万元,场地建设1.5万元,污染物处理及井场恢复2万元,合计6.5万元。

6.2　传统钻探成本分析

传统地质钻探按5个钻孔标准实施,成本核算涵盖人员费、材料费、施工设备使用费、井场费用及相关配套支出。人员配置20人,按300元/(人·d)计,工期10个月,人员费合计180万元;材料费(钻井液材料)合计40万元;施工设备使用费(含设备运输、安装及维修)合计36万元;5个钻孔井场青苗补偿15万元,场地建设7.5万元,污染物处理及井场恢复10万元;预计增加工作量约3600 m,预计增加工期5.5个月。

6.3　总成本对比分析

经系统核算,本次绿色勘查项目总成本为159.45万元,传统地质钻探总成本为288.5万元。相较传统钻探方式,绿色勘查总成本降低129.05万元,降幅达44.7%。成本节约的主要原因分析:“一孔多支”定向钻探技术的应用,大幅缩短了总体施工周期,工期缩短5.5个月,有效节约钻探工作量约3600 m,节约井场费用、搬迁成本及人工费用;减少

土地扰动面积，降低青苗补偿及恢复治理费用。从环境效益看，绿色钻探显著降低了勘查过程对生态环境的扰动，并通过土地复垦实现了环境修复。绿色勘查采用环保材料及先进工艺，随着技术进步及环保政策趋严，绿色钻探将成为矿产勘查行业转型升级及矿业可持续发展的必然选择。成本对比分析见图7。

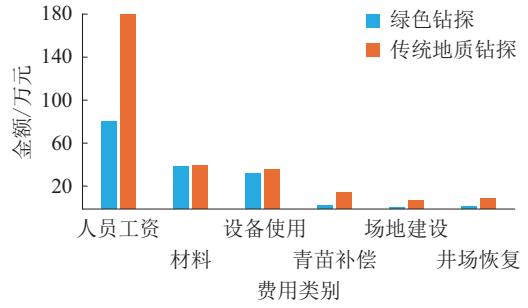

图7 成本对比分析

Fig.7 Cost comparison analysis

7 结论与认识

项目严格遵循《绿色勘查指南》(T/CMAS 0001—2018)及《绿色勘查规范》(DZ/T 0374—2021)要求，核心采用“一孔多支”定向钻进、低固相生物降解钻井液、钻井液不落地及耕作层剥离与复垦等技术，有效降低场地占用、设备搬迁及人力物力成本，有效的减少了对矿区生态环境的影响破坏程度[17-18]，实现“高效勘查、绿色环保”双重目标，为同类矿区异常区绿色勘查提供可复制、可推广的技术模式。

(1)“一孔多支”定向钻进技术搭配MWD随钻测斜仪器等设备，完成1个主孔及5个分支孔高精度施工，大幅提升施工效率、减少地表占用与环境破坏，解决地层异常等施工难题，结合CAD“放样”功能，精准模拟陷落柱三维形态，为异常区地质研究提供可靠数据支撑。

(2)优选低固相生物聚合物水基钻井液体系，核心组分环保，其28 d生物降解率＞60%、BOD/COD＞0.45，属实际无毒级，同时兼具优良护壁性能与地下水保护效果，实现钻井液低污染、可降解、易处理的绿色目标。

(3)采用“防渗隔离—四级净化—液相回用”闭环工艺，配套四级净化固控设备实现钻井液全流程不落地，净化液相可循环回用，少量废液集中处理，现场检测表明土壤、地下水指标达标，彻底解决传统泥浆污染及地貌恢复难题。

(4)成本对比显示，本次绿色勘查项目总成本159.45万元，较传统钻探288.5万元降低129.05万元，降幅达44.7%，主要得益于“一孔多支”技术缩短工期、减少工作量及土地扰动，节约人工、井场及恢复治理等相关费用，验证了绿色钻探技术创新对提升勘查效率、降低生态影响与成本的关键作用。

参考文献(References)：

[1] 畅利民，黄明勇，班金彭，等.绿色勘查在贵州正安旦坪铝土矿勘查钻探工程中的应用与分析[J].钻探工程，2021，48(3)：67-72.
CHANG Limin，HUANG Mingyong，BAN Jinpeng，et al. Application and analysis of green exploration in exploration drilling for Zheng'an Danping Bauxite Mine in Guizhou Province[J]. Drilling Engineering，2021，48(3)：67-72.

[2] 张新虎，刘建宏，黄万堂，等.绿色勘查理念：认知、探索与实践[J].甘肃地质，2017，26(1)：1-7.
ZHANG Xinhu，LIU Jianhong，HUANG Wantang，et al. Green exploration concept：Cognition，exploration and practice[J]. Gansu Geology，2017，26(1)：1-7.

[3] 朱建东，尤静静，刘兴平，等.湖北省四方山—团山沟锰矿区绿色勘查实践及成效[J].资源环境与工程，2021，35(6)：895-899.
ZHU Jiandong，YOU Jingjing，LIU Xingping，et al. Practice and effect of green exploration in Sifangshan-Tuanshangou Manganese mining area in Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering，2021，35(6)：895-899.

[4] 杨元良，陈慕天，郭建强，等.绿色地质勘查施工现场管理措施及技术经济评价：以四川某锂矿勘探项目为例[J].中国矿业，2023，32(S1)：48-54.
YANG Yuanliang，CHEN Mutian，GUO Jianqiang，et al. Management measures and technical economic evaluation of green geological exploration construction site：Taking a lithium exploration project in Sichuan as an example[J]. China Mining Magazine，2023，32(S1)：48-54.

[5] 胡跃亮，冯涛，贾飞，等.胶西北西岭超大型金矿区绿色勘查技术[J].中国矿业，2023，32(2)：69-76.
HU Yueliang，FENG Tao，JIA Fei，et al. Green exploration technology of Xiling super large gold mining area in northwest Jiaodong[J]. China Mining Magazine，2023，32(2)：69-76.

[6] 孟祥瑞，武飒.河南某金矿项目绿色勘查技术研究与实践[J].钻探工程，2023，50(S1)：286-290.
MENG Xiangrui，WU Sa. Research and practice of green exploration technology in a Gold mine area of Henan Province[J]. Drilling Engineering，2023，50(S1)：286-290.

[7] 杜蔺，李光春，巩鑫.贵州省道真县新民铝土矿区绿色勘查技术与成效[J].中国矿业，2021，30(1)：76-81.
DU Lin，LI Guangchun，GONG Xin. Green exploration technology and results of Xinmin bauxite mining area in Daozhen county，Guizhou Province[J]. China Mining Magazine，2021，30(1)：76-81.

[8] 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.
LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):30-39.

[9] 郭洪良,邵银川,姜珊.定向钻井技术在陷落柱探查中的应用[J].山东煤炭科技,2025,43(5):129-134,142.
GUO Hongliang, SHAO Yinchuan, JIANG Shan. Application of directional drilling technology in exploration of collapse columns[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2025,43(5):129-134,142.

[10] 刘海声,窦斌,穆元红,等.地质岩芯钻探中绿色勘查技术的应用及成本分析[J].矿产勘查,2021,12(2):331-337.
LIU Haisheng, DOU Bin, MU Yuanhong, et al. Application and cost analysis of green exploration technology in geological core drilling[J]. Mineral Exploration, 2021,12(2):331-337.

[11] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):129-133.

[12] 杨丽晶.南苏丹A油田KCl/硅酸盐钻井液体系的评价与优选[J].钻采工艺,2013,36(6):102-105.
YANG Lijing. Evaluation and optimization of KCl/silicate drilling fluid system in A Oilfield, South Sudan[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(6):102-105.

[13] 王立辉.环保钻井液技术与发展趋势研究[J].环境工程,2018,36(S1):975-977.
WANG Lihui. Research on environmental protection drilling fluid technology and development trend[J]. Environmental Engineering, 2018,36(S1):975-977.

[14] 温得全,冯美贵,李斌,等.智能高效小型一体化泥浆不落地系统的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(4):49-54.
WEN Dequan, FENG Meigui, LI Bin, et al. Research and application of the intelligent and efficient small-size integrated mud non-landing system[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):49-54.

[15] 李光春,宋小军,巩鑫.贵州福泉桅杆坪磷矿区绿色勘查实践与应用效果[J].钻探工程,2022,49(2):91-96.
LI Guangchun, SONG Xiaojun, GONG Xin. Green geological exploration in Weiganping Phosphorus Mine in Fuquan City, Guizhou Province[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):91-96.

[16] 邓伟,万旭辉,樊生龙,等.绿色勘查技术在敦页1井中的实际运用[J].甘肃科技,2017,33(23):36-37,76.
DENG Wei, WAN Xuhui, FAN Shenglong, et al. Practical application of green exploration technology in Danye-1 Well[J]. Gansu Science and Technology, 2017,33(23):36-37,76.

[17] 彭松林,孔德才,吴得强,等.攀枝花市仁和区中坝石墨矿勘探工作中关于绿色勘查的思考[J].四川地质学报,2019,39(S1):46-49.
PENG Songlin, KONG Decai, WU Deqiang, et al. Reflection on green exploration in the exploration work of Zhongba Graphite Deposit, Renhe District, Panzhihua City[J]. Acta Geologica Sichuan, 2019,39(S1):46-49.

[18] 杜轶伦,李雪峰,张帮禄,等.全国绿色勘查实施进展与成效研究[J].中国矿业,2024,33(10):240-245.
DU Yilun, LI Xuefeng, ZHANG Banglu, et al. Research on the progress and effectiveness of national green exploration[J]. China Mining Magazine, 2024,33(10):240-245.

(编辑　王文)