

潼关小秦岭金矿绳索取芯钻进技术问题分析

蔡迎千, 陈龙, 冯涛, 杨升, 林彬, 李金锋

陕西太合智能钻探有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘要

潼关小秦岭金矿田作为我国重要的黄金资源基地,其深部勘探面临复杂地层、花岗岩高硬度等技术挑战。现场采用绳索取芯钻进工艺,因环状间隙小(3~5 mm)存在岩粉滞留、泵压异常以及岩芯破碎等问题。本文以ZKD8901孔为例,通过现场试验,分析研究绳索取芯钻进技术在硬岩钻进时存在的几个关键技术问题,并提出了相应的改进措施。现场应用表明:通过优化钻具组合和钻进参数,合理调控冲洗液配比,可避免泵压异常、提高岩芯采取率、控制孔斜率。研究成果对相似地区硬岩层绳索取芯钻进工作具有借鉴意义。

关键词

绳索取芯钻进, 钻进工艺参数, 小秦岭金矿

Analysis on Technical Problems of Wire-Line Core Drilling in Xiaoqinling Gold Mine of Tongguan

Yingqian Cai, Long Chen, Tao Feng, Sheng Yang, Bin Lin, Jinfeng Li

Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

As an important gold resource base in China, the deep exploration of the Xiaoqinling gold field in Tongguan faces technical challenges such as complex strata and high hardness of granite. The wire-line core drilling technology is adopted in the field. Due to the small annular gap (3~5 mm), there are problems such as rock powder retention, abnormal pump pressure and core breakage. Taking ZKD8901 hole as an example, this paper analyzes and studies several key technical problems of

wire-line core drilling technology in hard rock drilling through field test, and puts forward corresponding improvement measures. Field application shows that abnormal pump pressure can be avoided, core recovery rate can be improved and hole slope can be controlled by optimizing BHA and drilling parameters and reasonably regulating drilling fluid ratio. The research results have reference significance for wire-line core drilling in hard rock strata in similar areas.

Keywords

Wire-Line Core Drilling, Drilling Process Parameters, Xiaoqinling Gold Mine

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

潼关小秦岭金矿田地区, 位于豫、陕两省交界处, 面积大于 1000 km², 是我国著名的金成矿区带[1], 其复杂的地质条件和丰富的矿产资源一直备受关注。随着金矿勘探工作的不断深入, 传统的钻探技术已难以满足日益增长的勘探需求。

绳索取芯钻进技术最先用于石油钻井, 1947 年, 美国宝长年(Boart Longyear)公司[1] [2]将绳索取芯技术工程转化应用于地质岩芯钻探领域, 该工艺在我国的工业化实践始于 1979 年, 通过技术引进实现了钻探工程的重要升级。绳索取芯钻进技术作为一种先进的岩芯钻探方法, 该技术主要由绳索取芯钻杆、内外管总成、打捞器总成和绳索绞车等组成。工作原理是利用钻杆传递钻压和扭矩, 通过内管总成采取岩芯, 当岩芯充满内管后, 使用打捞器总成通过钢丝绳将内管提出地表, 取出岩芯后重新下入孔内继续钻进。因该工艺取芯无需提钻取芯, 辅助生产时间下降, 纯钻孔时间相对增加, 提升了钻探取芯过程的整体效率[3]。

陕西太合智能钻探有限公司承担了潼关小秦岭金矿田 ZKD8901 钻孔施工任务, 设计孔深 1000 m。本文拟对钻进过程中所遇到的几个关键技术问题进行分析研究。

2. 潼关小秦岭金矿区概况及地质特征

2.1. 工作区概况

工作区位于陕西省渭南市潼关县西庄峪七亩角北岔, 地表坐标为 X: 3814494.052, Y: 37425939.618, 海拔 1367.729 m, 处于小秦岭造山带北缘与渭河地堑交汇处。

工作区毗邻连霍高速(G30)与 310 国道, 距潼关县城 25 km (车程 40 分钟)、华山北高铁站 60 km (车程 1.5 小时), 大件物资可通过陇海铁路华阴站中转。矿区内部道路也能够满足日常运输需求, 公共交通较为便利。

根据合同和现场设计要求, 矿区主勘探孔 ZKD8901, 设计孔深 1000 m, 方位角 288°, 钻孔轴线与工作面法线呈 10°夹角, 施工过程中需精确控制孔斜偏差($\leq 5^\circ/100$ m), 最终需完成地质调查井 1 口, 施工周期为 2024 年 9 月 8 日至同年 12 月 17 日, 共计 101 天(含固井、测斜等辅助作业)。

2.2. 自然地理环境

小秦岭金矿区处于中高山区, 海拔 1200~2500 m 之间, 地形以山地为主, 地形起伏大, 植被覆盖率

约为 80%，气候处温带季风性半湿润气候，该地区的年平均气温 10°C~14°C，霜冻期为 10 月中下旬持续到次年 3 月中下旬至 4 月初，大约 5~6 个月，冻土层深度约 0.5~1 m，对钻探施工窗口期形成制约。

矿区属黄河水土保持重点区，勘探需遵循《绿色矿山建设规范》，同时采取相应的环保措施。

2.3. 成矿地质条件及岩性

矿区金矿成矿受多重地质作用控制，太古界太华群变质岩系[4] (黑云斜长片麻岩、角闪岩)富含金的初始丰度(0.5~1.2 ppb)，为金矿形成提供了物质来源，北东向断裂构造为金矿的形成提供了有利的成矿空间和导矿通道，岩浆活动和变质作用促进了金元素的活化迁移和富集成矿。这些地质特征为小秦岭金矿的形成提供了有利条件，也为该地区金矿的勘探和开发提供了重要依据。矿床类型主要为石英脉系，变质碎屑岩脉型，特点是矿脉分布集中、金矿品位高，矿体延伸大[5]。

工作区岩石为花岗岩，硬度级别高，其抗压强度为 220~260 MPa，莫氏硬度通常在 6~7 之间，可钻性级别为 8~10 级，其对钻头的研磨性较强。

3. 钻进工艺技术问题分析

采样方法的选择需综合考虑实际工况条件、钻孔深度、岩层特性及动态调控需求。钻探作业的安全性与效率，关键在于合理选用适配性强的技术工具、精准预判潜在风险、及时应对突发问题并优化动态调控策略。通过科学匹配钻探参数、强化现场决策响应能力，可有效提升复杂地质条件下钻探工程的成功率与资源勘探效益[6] [7]。

ZKD8901 孔深部勘探要求取芯直径达到 $\phi 48$ mm，因该勘探孔旨在勘察该工作区金储量，所以需要较高的取芯率，最终采用金刚石绳索取芯钻进工艺。与常规钻进技术相比，绳索取芯钻进工艺一般认为是“满眼钻进”，其内外管环状间隙小，通常仅为 3~5 mm，钻杆与孔壁的狭窄间隙容易造成岩粉滞留、冲洗液循环阻力增大、泵压升高、孔壁遭受严重冲刷以及孔内事故处理难度增大等一系列问题。

鉴于上述问题，本文通过将地质特征与钻进工艺进行耦合分析，系统性的提出针对性解决方案，为类似矿区深部硬岩绳索取芯钻进工程实践提供技术参考。

3.1. 钻孔结构设计

工程设计中第一个关键问题就是按照钻探工艺的基本要求和钻孔地层情况确定钻孔结构[8]。本次钻进施工选用 XY-6N 型全液压岩芯钻机，BW320 型高压泥浆泵，其压力和泵容量可以在较大范围内变化，可以满足深孔岩芯钻探的要求。

根据矿区地层复杂程度(覆盖层松散、矿层为花岗岩地层)和终孔口径要求，采用三开阶梯式钻孔结构。其中一开采用 PDC 钻头回转钻进工艺，二开、三开分别采用 HQ、NQ 绳索取芯钻进工艺钻进。其中钻具规格参数见表 1。

Table 1. Specification parameters of three-hole structure drilling tool

表 1. 三开钻孔结构钻具规格参数

类别	钻杆规格(mm)		取芯钻具内管(mm)		取芯钻具外管(mm)	
	外径	内径	外径	内径	外径	内径
一开	$\phi 127$	$\phi 118$	/	/	/	/
二开	$\phi 97$	$\phi 81$	$\phi 73$	$\phi 67$	$\phi 95$	$\phi 80$
三开	$\phi 75$	$\phi 60$	$\phi 57$	$\phi 49$	$\phi 73$	$\phi 63$

孔身结构具体如下:

(1) 一开。 $\phi 133$ mm PDC 平底钻头开孔, 穿越浅表松散覆盖层深度 13 m, 建立井口稳定性, 下入 $\phi 127$ mm (40#) 套管固井, 水泥返高至地表。

(2) 二开。换用钻头外径为 $\phi 102$ mm 超硬岩 PDC 取芯钻头及其配套钻具, 取芯钻进至 184 m, 揭露主要含矿层位, 下入 $\phi 98$ mm (26CrMo) 套管固井, 水泥封固至二开底部。

(3) 三开。换用 $\phi 78$ mm 超硬岩取芯钻头以及配套钻具及钻进至设计孔深。

经现场实测, 该钻孔结构能够在花岗岩硬地层中钻进效率、岩芯质量的相应性能提升, 以及钻进成本的控制。

3.2. 冲洗液的性能要求

在岩心钻探过程中, 要保证快速安全的钻进, 冲洗液选择和使用是十分重要的[9]。绳索取芯钻进的孔壁间隙小, 应根据地层性质合理选用无固相或低固相冲洗液, 并添加适量润滑剂, 同时设计适宜的冲洗液密度、黏度和失水量等主要性能指标, 以确保钻进效率和岩芯采取率, 同时, 在实际施工过程中, 不断地进行实时监控, 使冲洗液能满足钻探需求。该 ZKD8901 勘探孔使用的冲洗液概况如下:

本次施工选用低固相聚合物冲洗液, 其核心材料为膨润土和聚丙烯酰胺(简称 PAM), 该体系通过降低固相含量(含砂量 $\leq 4\%$), 减少岩芯表面污染和孔壁冲刷风险, 同时 PAM 作为一种聚合物, 可利用其絮凝作用来改善岩粉携带能力, 冲洗液循环方式采用正循环方式。冲洗液主要性能指标如表 2 所示。

Table 2. Main performance indicators of flushing fluid

表 2. 冲洗液主要性能指标

漏斗黏度(s)	密度(g/cm ³)	含砂量(%)	失水量(ml/30 min)	pH 值
20~25	1.02~1.06	≤ 4	25	8~9

针对复杂地层使用的深孔绳索取芯冲洗液需兼顾护壁性能与工艺适配性, 冲洗液在实际使用时需进行必要的动态调控措施。在钻进至破碎地层时, 可通过提高泵量, 来提高岩粉携带能力; 在钻进至完整岩层段时, 降低泵量, 减少无效能耗以及孔壁冲刷; 在漏失异常段, 可适当添加堵漏剂。按照以上配置工艺和调控措施, 能够制备黏度稳定、悬浮力强的可满足潼关小秦岭金矿工况需求的冲洗液。

3.3. 钻头 - 钻杆匹配性

钻孔与钻杆间的环空间隙, 称为径差, 直接控制岩粉排出效率与钻具受力状态。根据钻探工艺规范, 合理径差(通常建议为钻头直径的 8%~12%)可确保冲洗液携带岩粉的流速 ≥ 0.5 m/s, 避免岩屑滞留导致“泥包钻”或孔壁坍塌。

在三开钻进施工过程中, 使用 $\phi 78$ mm PDC 钻头在钻进至 243 m 时, 发生憋泵现象。经现场工作人员初步分析, 可能是由于钻头 - 钻杆径差过小, 导致环空排屑能力不足, 造成异常。

为了提高钻进效率, 下面将具体分析以上问题并提出相应的改进措施:

(1) 基于 GB/T 16950-2014 标准推荐的 NQ 系列钻具尺寸, 常规配套参数为: $\phi 69.9$ mm 钻杆配 $\phi 76$ mm 钻头, 径差 6.1 mm, 环空面积计算公式为:

$$A_{\text{环空}} = \pi(R^2 - r^2) \quad (1)$$

式中, R 为外管内径; r 为内管外径。

由式(1)计算出标准推荐的 NQ 系列钻具环空面积为 6.99 cm²。

在潼关小秦岭金矿三开施工中, 根据 ZKD8901 孔硬岩钻进需求, 钻具组合需同时满足抗震性、强度以及孔斜控制精度, 因此实际采用 $\phi 75$ mm 钻杆(接手外径 $\phi 75$ mm, 杆体外径 $\phi 73$ mm)配 $\phi 78$ mm 钻头, 径差 3 mm, 由式(1)计算出环空截面积为 3.6 cm^2 。与推荐钻具参数相比, 实际组合环空截面积仅为推荐值的一半, 岩粉通过空间狭窄(尤其花岗岩粉粒度 $0.5\sim 2 \text{ mm}$)。导致排屑不畅, 从而引起泵压升高。

因此, 若地层允许, 将钻头外径增加至 $\phi 80$ mm (配 $\phi 75$ mm 钻杆), 由式(2)计算可得, 环空截面积增加至 6.5 cm^2 , 岩粉排出效率提升 80%; 除此之外, 若钻杆材质允许, 可将钻杆外径改至 $\phi 73$ mm (配 $\phi 78$ mm 钻头), 环空间隙增加至 5 mm, 可平衡排粉效率与水力损失, 在常规泵量下即可实现高效排粉($>90\%$), 综合性价比更优。

(2) 已知, 当环空内充满不可压缩流体(如钻井液)时, 静液柱压力计算公式为:

$$P_{\text{静液}} = \rho gh \tag{2}$$

式中, ρ 为冲洗液密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); h 为冲洗液原始液柱高度(m)。

随着钻进过程的进行, 钻头破碎岩层产生的岩屑会混入冲洗液, 若除砂器、离心机效率不足, 未及时清理岩屑, 冲洗液中的固相含量会逐渐累积, 导致密度上升。由式(2)可知, 当重力加速度与冲洗液原始液柱高度不变的情况下, 随着冲洗液密度的增加, 会导致压力升高。

当液体流动时, 需考虑压力损失和加速度压力。此时, 环空压力可表示为:

$$P_{\text{环空}} = P_{\text{静液}} + \Delta P_{\text{摩擦}} + \Delta P_{\text{加速度}} \tag{3}$$

式中, $\Delta P_{\text{摩擦}}$: 摩擦压力损失, 与流速、流体黏度、管壁粗糙度等因素相关; $\Delta P_{\text{加速度}}$: 加速度压力, 与流体加速或减速有关。

由式(2)得出静态压力会逐渐增大, 且随着钻井深度的增加, 摩擦力也会随着冲洗液密度的增大而逐渐增大, 从而导致环空压力增大, 造成憋泵。

在不改变原有钻头钻杆配置情况下, 可适当提高冲洗液黏度, 提高冲洗液携带岩粉的能力, 减少冲洗液中固相含量; 或者提高泵量加速岩粉排出。

3.4. 硬岩层钻进参数动态调控

金刚石钻进技术参数受多重因素影响, 主要包括三个维度, 地层因素(涉及岩石物理力学特性及地层构造特征)、装备要素(包括钻头规格选型、孔径匹配度、孔深结构特征以及钻机动力性能)以及工艺控制(循环介质选择、钻压 - 转速 - 泵量等核心参数的协同优化)。

在潼关小秦岭金矿主矿层为花岗岩硬地层, 其本身具有高硬度和较大的脆性特征。因此合理调整钻进工艺参数(包括转速、钻压和冲洗液流量), 才能更好地提升岩芯采取率并确保钻进效率, 根据既往正交试验结果显示, 钻压对取芯率影响权重最大, 其次为转速、泵量。

结合对以上各个影响因素的考虑, 在施工时所采用的钻进工艺参数如表 3 所示, 并配套实时监控与反馈机制, 确保岩芯质量与钻进效率的平衡。

Table 3. Optimization selection of drilling process parameters

表 3. 钻进工艺参数优化选择

钻孔结构	钻压(kN)		转速(r/min)		泵量(L/min)
	PDC 钻头	孕镶金刚石钻头	PDC 钻头	孕镶金刚石钻头	
一开	6~10	/	150~200	/	100~150
二开	10~15	/	200~250	/	120~150
三开	8~12	6~10	250~300	500~600	100~120

现场测试中对于以上钻进参数的响应,可满足 PDC 钻进的基本需求,但仍需及时跟进现场情况来动态调控相应参数。除此之外,提出以下改进措施:在破碎带采用低钻压-高转速模式,减少岩心二次破碎;完整岩段切换高钻压-低转速模式,提高单颗粒金刚石吃入深度。

3.5. PDC 钻头硬岩适应性分析

坚硬致密打滑地层是金刚石钻探中遇到的一大难题,金刚石钻头在该类地层中钻进时胎体难以磨耗,金刚石不易出刃,钻进效率低,回次进尺少,单位钻探成本高,频繁出现打滑问题,已成为阻碍金刚石钻进尤其是绳索取心钻进的重大障碍[10]。钻头的合理选型是提升钻进效率、延长钻头寿命及保障岩芯质量的核心环节,而且 ZKD8901 孔主要采用绳索取芯钻进技术,如果钻头寿命短,导致在钻进过程中频繁提钻更换失效的钻头,那么将会大大降低使用绳索取芯钻进技术的优势。

基于对钻进速度较高要求的考虑,本次勘探主要采用优质高强 PDC 钻头,以适应花岗岩单轴抗压强度大于 150 MPa。其水口设计采用内水槽与外水槽结合的设计形式,确保冲洗液在循环时同时冷却切削齿并携带岩屑上返。在结构上内外水槽呈对称分布的弧形结构设计,以避免钻头体偏磨和紊流,从而提高钻头使用寿命和排渣效率。保径采用内保径和外保径的双重保径设计,可保证采取岩性的质量和尺寸以及增强钻头体抗研磨性,保证钻头工作时不会缩径。

在硬岩钻进中,PDC 钻头与孕镶金刚石钻头的性能差异显著。花岗岩抗压强度 220~260 MPa,在 ZKD8901 孔施工中,PDC 钻头在钻进至 300m 时,发生打滑现象。根据现场施工人员分析,已知,PDC 钻头($\phi 78$ mm)转速 200 rpm 时,钻压需达到 18.5 kN 及以上方能切入,但受限于设备与工艺,实际钻研不足导致打滑率升高。之后换用孕镶金刚石钻头,第一只钻头进尺 40 m 起钻,平均机械钻速为 0.8 m/h,在同等口径下,无打滑现象。但是一般情况下孕镶金刚石钻头在钻进 1~2 m 就需要提钻,增加了时间成本;其次在坚硬、强研磨性地层孕镶金刚石钻头一般仅能钻进 30 m 左右,使用寿命短,PDC 钻头寿命可达孕镶钻头的 2~3 倍,当然成本也是孕镶钻头的 2~3 倍。

通过以上问题反映出,基于绳索取芯钻杆壁厚薄、扭矩承载低的特性,在地层松散、中硬至硬地层条件下,PDC 钻头钻速可达孕镶钻头的 3~5 倍,且在使用寿命上为孕镶金刚石钻头的 2~3 倍,可减少提钻次数,适合绳索取芯技术,但当地层更为复杂时,PDC 会难以切入;在极硬高研磨性地层中,孕镶钻头可以通过金刚石颗粒的持续出刃磨削岩石,避免打滑,具有较强的地层适应力,但是机械钻速通常不高于 1 m/h,效率低,钻进 30~40 米后就需提钻,虽然单次成本低,但综合提钻耗时与钻头损耗,总成本可能高于 PDC。

4. 结论

(1) 在潼关小秦岭金矿的勘探实践中,绳索取芯钻探技术在花岗岩硬岩钻进中展现出了良好的适用性,其结构设计合理,弹卡动作灵活,能够有效应对矿区复杂的地质条件,最终取芯率达到了 95% 以上。

(2) 通过优化钻具组合和钻进参数,合理调控冲洗液配比,针对破碎地层和完整地层采取不同的调控措施,制备出的黏度稳定、悬浮力强的冲洗液能够满足该工作区工况需求。

(3) 在钻头选用上,ZKD8901 孔花岗岩地层中,若设备能提供高钻压,且钻杆抗震性、强度较高,可在该需求场景下使用 PDC 钻头,可避免打滑,保障岩芯质量;若钻压不足或地层不均时,则换用孕镶钻头,并可通过改进胎体配方(如降低耐磨性以加快金刚石出刃)提升机械钻速,但同时需接受频繁提钻与低效率的代价。

参考文献

[1] 孙建华,张永勤,梁健,等.深孔绳索取芯钻探技术现状及研发工作思路[J].地质装备,2011,12(4):11-14.

- [2] 昌珺, 陶超, 张永贵. 绳索取芯技术及经济效益[J]. 山东煤炭科技, 2011(2): 85+87.
- [3] 张峰. 矿山地质钻探绳索取芯钻探技术浅析[J]. 中国金属通报, 2023(6): 225-227.
- [4] 吕军利, 冯伟华, 彭海练, 等. 陕西潼关桐峪金矿区深部地层岩石 Au 背景值变化特征及其成矿作用研究[J]. 陕西地质, 2024, 42(1): 20-26.
- [5] 陈正国, 刘辰, 姚夫义. 陕西小秦岭地区金矿资源开发利用现状探析[J]. 科技创业月刊, 2014, 27(4): 18-19.
- [6] Teodoriu, C. and Bello, O. (2021) An Outlook of Drilling Technologies and Innovations: Present Status and Future Trends. *Energies*, **14**, Article No. 4499. <https://doi.org/10.3390/en14154499>
- [7] Amadike, M.P., Nwanesi, F.O., Anochie, U.E., *et al.* (2024) Drilling Methods and Applications in Engineering and Geology: A Review. *International Journal of Engineering and Modern Technology (IJEMT)*, **10**, 40-65.
- [8] 易荣. 深孔绳索取芯钻探施工体会[J]. 山西建筑, 2017, 43(20): 94-96.
- [9] 李展华. 浅谈绳索取芯在阳春铜多金属矿区普查项目中的应用[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(12): 77-78.
- [10] 刘碧湘, 曹社强. 坚硬致密岩层打滑形式分析及金刚石钻头的选择[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(6): 79-82.