

# Optimization strategy of drilling technology in deep resource exploration

Xuanxuan Zhou

Anhui Provincial Coalfield Geological Bureau First Exploration Team, Huainan, Anhui, 232000, China

## Abstract

With the gradual depletion of shallow and shallow resources in China, deep resource exploration has become an important direction to ensure national energy security. The deep geological environment has high temperature, high pressure, complex geological structure, low drilling efficiency, frequent accidents, and serious equipment losses. This article takes deep resource exploration as the background and drilling technology optimization as the starting point. Starting from four aspects: drilling method selection, equipment upgrading, drilling fluid system optimization, safety control, and intelligent application, a systematic optimization plan is proposed. By verifying a case study of deep metal mineral resource exploration, we aim to effectively improve the efficiency and safety level of deep resource exploration, and provide reliable technical references for similar deep exploration in China.

## Keywords

deep resource exploration; Drilling technology; optimization strategy

# 深部资源勘探中钻探工艺优化策略

周宣扬

安徽省煤田地质局第一勘探队, 中国·安徽 淮南 232000

## 摘要

随着中国浅部浅层资源日趋枯竭, 深部资源勘探已成为保障国家能源安全的重要方向。深部地质环境温度高, 压力大, 地质结构复杂, 钻井效率低, 事故频发, 设备损失严重。本文以深部资源勘探为背景, 以钻井技术优化为切入点, 从钻井方式选择、装备升级、钻井液体系优化、安全控制和智能应用四个方面入手, 提出一套系统的优化方案。通过对某深部金属矿产资源勘探实例进行验证, 以有效提高深部资源勘探效率和安全水平, 为中国类似深度勘探提供可靠的技术借鉴。

## 关键词

深部资源勘探; 钻探工艺; 优化策略

## 1 引言

当前全球对资源需求的不断增加, 深部资源(一般为 1000 m 以下)已成为世界各国争夺资源的战略焦点。中国深部资源潜力巨大, 地质调查表明 1000-2000 m 深部蕴藏着 3-5 倍的矿产资源, 但目前深部勘探程度还不到 20%。深部地质环境明显不同于浅部, 随着深度的增大, 地温梯度增大, 百米地温梯度一般在 2-5℃左右, 部分地区地温达 150℃以上; 地应力随着深度的增加呈线性增加, 2000 m 以下地应力达 50-80 MPa; 同时, 深部地层普遍伴有断层破碎带、高压水等复杂结构, 造成钻进过程中钻头磨损加剧、井眼失稳、卡钻等现象, 严重影响勘探进度和成本。因此, 针对深部地质特征进行钻井工艺优化是突破深部勘探技术瓶颈的核心任务。

【作者简介】周宣扬(1980-), 男, 中国安徽安庆人, 本科, 工程师, 从事探矿工程研究。

## 2 深部地质条件对钻探工艺的影响分析

### 2.1 深部地质环境特征

深部地质环境具有三方面的特殊性: 1) 高地温环境, 1000 m 以下(2000 m~80-150℃)地层温度 > 40℃; 高温不仅对钻井液胶体稳定性产生影响, 而且使材料力学性能下降, 如: 当温度升高时, 钢的屈服强度下降, 120℃时可达 20% 以上。2) 是高地应力环境, 深部地层受水平和垂向应力耦合作用, 应力分布复杂, 成井后应力集中现象明显, 极易引起井壁坍塌或缩径, 特别是靠近断层时, 应力释放可引起井壁瞬时失稳<sup>[1]</sup>。3) 复杂的地层结构, 深部地层经历了多期次的地质活动, 断裂、褶皱和裂缝发育, 常伴有高压水、破碎带和硬夹层, 在钻井过程中极易发生漏失、突水、卡钻等地质灾害。

### 2.2 对钻探工艺的核心挑战

在钻井效率上, 由于硬岩(单轴抗压强度大于 100 MPa), 金刚石钻头钻进硬岩深度不到浅部 1/3, 起钻频繁, 非生产

时间增加。在钻孔稳定性方面，由于高应力和地层渗透率的差异，使得井眼容易发生坍塌或扩径，某深部金矿勘探资料表明，破碎带区井眼扩展率高达30%-50%，造成套管下困难<sup>[2]</sup>。在井内安全方面，钻井液性能在高温高压环境中失效易诱发井喷，复杂地层中易发生磨损性加剧，导致钻断事故比浅部高出4-6倍。在装备适应性方面，传统钻井装备的动力系统和冷却系统很难满足深部钻井作业的需求，如高温下液压系统易发生渗漏，影响钻井参数的稳定性。

### 2.3 工艺优化的理论依据

钻进工艺优化是破岩力学、井眼力学和流体力学等多学科交叉的理论基础。岩石破岩理论认为，深部岩石脆-塑转换特征要求钻进模式由冲击破碎向剪切破碎转变，提高钻头齿比压力，实现高效破岩。根据井眼力学分析结果，根据霍克-布朗判据，确定钻井液密度和地应力之间的平衡关系，确定合理的钻井液密度窗口<sup>[3]</sup>。以流体动力学理论为指导，考虑粘度-温度-压力多场耦合作用对钻井液流变性能的影响，并通过添加剂分子设计实现其性能稳定。同时，深部钻进经济性分析要求工艺优化兼顾效率提高和成本控制，形成技术经济协同优化模式。

## 3 深部钻探工艺的多维度优化策略

### 3.1 钻进方法与钻头选型优化

针对深部不同岩性地层，需要建立差别化钻井方法体系，在花岗岩等硬岩地层（如花岗岩），推广高效潜孔锤空气钻进工艺，采用高气压（110-150 mm）潜孔锤（工作压力1.5-2.5 MPa），配合球齿合金钻头，利用高频冲击（每分钟800-1200次）破岩破岩，比传统旋转钻进效率提高2-3倍。针对软、中硬地层（砂岩、泥岩等），采用PDC钻头定向钻进技术，选用胎体PDC钻头，设计合理的刀翼倾角（15°-20°）和布齿密度，利用多晶金刚石的高耐磨特性，实现连续切削；同时，采用随钻测量系统对井眼轨迹进行控制，满足勘探精度要求。

针对复杂夹层地层，创新性地提出复合钻井模式：遇“硬岩-软岩互层”地层时，利用自动送钻系统实时调整钻进压力（波动范围不超过±5%），避免软岩段钻进压力过大引起井眼扩径、硬岩段钻进压力不足而影响效率的问题。钻头材质方面，研制耐高温耐磨复合材料，如在钻头胎体中加入碳化钨颗粒，使钻头在150℃高温下耐磨，使钻头使用寿命超过40%。

### 3.2 钻探设备性能升级

深钻装备的升级换代，重点需要解决动力、散热和控制三个方面的协同强化问题。钻机采用双变量活塞泵驱动，输出功率可提高到300-500 kW，峰值扭矩8000 N·m，可满足2000米以下深度钻井动力要求；同时配有电液比例控制系统，无级调钻压力、速度和给进速度，以适应不同地层条件下钻进参数的匹配。冷却方式为双循环冷却方式，主循环

采用强制风冷式散热器控制液压油温度（≤60℃），辅助循环采用井口换热器对钻井液进行预冷，降低井底钻井液温度15-20℃，缓解高温对钻井液性能的影响。

在设备智能化改造方面，集成物联网模块，实现关键参数实时监控，如在钻杆接头安装温度传感器（-40-200℃），动力头安装扭矩传感器（精度±1%），将采集到的数据通过5G传输到地面控制系统，当参数超过临界值时，自动报警并启动保护机制，如扭矩超限，则自动降速。另外，研制模块化钻机结构，采用快速拆卸设计，缩短设备迁移时间，以适应深部勘探场地狭窄的特点。

### 3.3 钻井液体系配方优化

深部钻井液具有携岩、护壁、降温润滑等功能，针对高温高压环境，研究耐盐耐高温钻井液体系。基本配方为膨润土，加入复合处理剂：高温稳定剂选择有机硅树脂（添加量3-5%），在粘土颗粒表面形成一层保护膜，阻止高温下粘土的水化分散；选用2-4%的磺化酚醛树脂作为降滤失剂，其芳环结构在180℃温度下仍然稳定，钻井液滤失量可控制在5 mL/30分钟以内；选用植物油基酯（添加量1-2%），使钻具摩擦系数小于0.15，降低卡钻风险。

以高压含水层为研究对象，优化钻井液密度调控方法，采用分层密度均衡技术，依据地层压力预测资料，将钻井液密度由井口至井底分3-5个井段进行调整，各井段密度差值为0.05-0.1 g/cm<sup>3</sup>，以防止因密度过高引起井漏和因密度不足引起井涌。将纳米碳酸钙（粒径50-100 nm，添加量1%-3%）作为堵剂，利用纳米级颗粒填充岩石裂隙形成致密滤饼，封堵效率较传统堵剂提高50%以上。

### 3.4 孔内安全控制技术优化

井下安全管理的重点是事故的预防和快速处置，利用随钻测井技术获取地层电阻率、声波时差等参数，并结合地质模型，对可能发育的断层和含水岩层进行预调整，提前调整钻井液密度和钻进参数。当发现声波时差增加超过20%时，应立即降低钻井速度，增加钻井液粘度。

研发智能解卡技术，在发生卡卡时，利用地面控制系统对卡卡类型进行分析：如果是粘卡卡，则启动循环冲洗系统，泵入解卡剂（柴油、表面活性剂和水=3:1:6），并借助钻杆轴向振动（10-20 Hz），利用振动和化学作用协同解除粘卡。对于缩径卡钻时，应采用渐进式倒划法，控制起钻速率（≤0.5 m/s），以防止强力起钻而造成钻断。另外，通过在杆柱设计中增设减震节，减小钻柱纵向振动，降低钻具的疲劳损伤。

## 4 案例分析

### 4.1 项目概况

深部铜镍矿勘探工程位于中国西北某成矿带，勘探深度1500-2500 m，构造复杂，出露3条主断裂断裂带，地层以花岗岩、片麻岩为主，夹有大理岩，井底高温120℃，地

应力 65 MPa。项目设计钻孔总进尺 5000 m，钻孔垂向误差不超过 1%，取心率 $\geq 85\%$ 。在前期的钻井过程中，机械钻速较低（平均 1.2 m/h）和井内事故频发，严重影响了钻探进度。

#### 4.2 地质条件专项分析

通过详细的地质调查和地球物理测量，查明该区主要地质特征：1) 花岗岩单轴抗压强度 120-150 MPa、大理岩 80-100 MPa、片麻岩 60-80 MPa，并有 0.5-3 m 厚的破碎夹层。2) 地应力分布不均匀，断层附近的水平应力集中，为垂向应力的 1.5~2 倍，容易造成钻孔塌陷；3) 高温高压水共存，在 2000 m 以下存在高达 15 MPa 的承压含水层，再加上高温环境的影响，钻井液控制难度增大。在此基础上，提出硬岩高效破岩、井筒稳定控制和高温高压钻井液调控等工艺优化措施。

#### 4.3 优化方案实施

根据项目的特点，提出了多维优化方案：

① 钻孔系统：花岗岩段采用 200 Mpa 高风压潜孔锤，配合球齿钻头，冲击频率每分钟 1000 下，钻孔压力 18~22 kN；在片麻岩段更换为转速 80~100 r/min 的 5 刀翼 PDC 钻头，利用 LWD 系统实时调整井眼轨迹。

② 钻井液系统：采用耐高温钻井液配方，以含水层段为 1.5 g/cm<sup>3</sup>，含水层段为 1.5 g/cm<sup>3</sup>，含水层段为 1.5 g/cm<sup>3</sup>。

③ 设备改造：对钻机进行改造，采用 400 KW 动力头钻机，采用双循环冷却系统，液压油温度低于 55℃；安装了智能监控系统，实现了扭矩、钻井压力和井温等 12 个参数的实时采集。

④ 安全措施：采用超前注浆预处理方法，注水泥-水玻璃双浆体（体积比 1:1），固化时间控制在 30 分钟以内；配有智能解卡装置，反应时间不超过 10 秒。

#### 4.4 实施效果

优化前后钻井技术指标有明显提高：钻井效率，平均机械钻速提高到 1.62 米/小时，较优化前提高 35%。井内

安全方面，井内事故发生率下降到 1.4 公里/千米，下降 60%，没有出现大的卡钻、井喷事故；勘探质量方面，岩芯取芯率达 90% 以上，垂直度误差不超过 0.8%，达到了地质勘探的要求；经济效益上，单米钻进费用减少 18%，总工期减少 25 天，提前完成勘探任务。经一年多的跟踪监测，井眼稳定，井眼未见明显变形，说明优化设计是可行的。

## 5 结语

本文以深部资源勘探为背景，系统地开展了钻探工艺优化研究，发现：1) 深部高温、高压和复杂结构是制约钻井效率和安全的核心因素；基于多学科交叉理论，有针对性地开展工艺优化设计。2) 从钻井方式、装备性能、钻井液系统、安全控制和智能技术等五个方面建立一套能够有效提高深部钻井适应能力的优化体系，其中，高效破岩技术和智能监测系统的协同应用是关键突破口。3) 通过工程实例验证，该方法可明显提高机械钻速，降低事故发生率，具有较好的技术经济价值和推广价值。今后的研究重点应集中在三个方面：1) 研发抗高温钻井液处理剂和超硬复合材料钻头。2) 系统智能化升级，以深度学习算法为基础，建立自主钻井决策模型，实现井眼状态预测和参数调整的完全自动化。3) 技术集成创新，将定向钻井技术和 LWD 技术相结合，形成“探采结合”的综合钻井模式，提升深部资源勘探的综合效益。随着科技水平的不断提高，深部资源勘探钻井技术将不断向高效率、智能化和安全性方向发展，为中国深部资源开发利用提供技术支持。

#### 参考文献

- [1] 王宁. 矿山地质钻探在资源勘探中的应用与优化研究[J]. 中国金属通报, 2024, (12): 167-169.
- [2] 侯兴博. 地质岩心钻探技术在矿产资源勘探中的应用[J]. 世界有色金属, 2024, (03): 160-162.
- [3] 刘浩. 地质岩心钻探技术及其在资源勘探中的应用研究[J]. 中国金属通报, 2022, (01): 181-183.