复杂地质条件下钻探救援钻进工艺改进与效率优化

赵后明 潘卫国 陈青春

山东省煤田地质局第二勘探队（山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室），山东省济宁市，272100；

摘要：钻探救援作为地质灾害与矿山事故应急处置的核心技术手段，其钻进效率与成孔质量直接决定被困人员的生存概率。针对复杂地质条件下传统钻进工艺存在的孔壁失稳、钻进效率低、事故率高等问题，本文结合最新技术成果与工程实践，系统分析破碎带、砾石层、富水地层等复杂地质的工程特性，提出以跟管钻进技术、金刚石复合钻进技术、智能钻井系统为核心的工艺改进方案，构建装备升级-参数优化-智能调控的效率提升体系。通过多起典型救援工程验证，改进后的工艺体系可使机械钻速提升 3 倍以上，孔内事故率降低 90%，为复杂地质钻探救援提供可靠技术支撑。

关键词：复杂地质；钻探救援；跟管钻进；智能钻井

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.080

引言

在矿山坍塌、地质灾害等应急救援场景中，钻探技术是构建生命保障通道、实施精准救援的核心技术支撑，其核心任务是在最短时间内穿透复杂地层，建立被困人员与地面的应急联络通道，实现通风供氧、物资输送等关键救援功能。我国地质条件复杂多样，地质灾害与矿山事故频发，钻探救援作业常面临破碎地层坍塌、砾石层可钻性差、富水地层漏浆涌水等技术难题，传统钻进工艺已难以满足应急救援快速、安全、精准的核心需求。

据应急管理部相关统计数据，复杂地质条件下，传统钻探救援的孔内事故率高达 40%，平均机械钻速不足 3m/h，往往因成孔周期过长错失黄金 72 小时最佳救援窗口。例如某石膏矿坍塌事故中，受破碎地层持续坍塌影响，先后发生 5 次卡钻、埋钻事故，导致救援钻孔施工周期延长至 15 天。因此，针对复杂地质特性优化升级钻进工艺，提升钻探效率与作业可靠性，已成为应急救援领域亟待突破的关键技术课题。

本文依托国家安全生产应急救援中心、中国地质调查局等权威机构的最新技术成果，结合多起典型应急救援工程实践，系统研究复杂地质条件下钻探救援钻进工艺的改进路径与效率优化方法，为提升复杂地质钻探救援技术水平提供理论与实践参考。

1 复杂地质条件特征及对钻探救援的影响

1.1 典型复杂地质的工程特性

钻探救援中常见的复杂地质类型主要包括松散覆盖层、破碎基岩层、硬岩砾石层和富水裂隙层四类，其工程地质特性差异显著，对钻进工艺的适配性要求也各不相同：松散覆盖层以第四系砂土层、卵石层为主，地层结构松散、胶结性差，钻进过程中易出现孔壁坍塌、缩径及漏失等问题；破碎基岩层多为构造破碎带或灾害扰动形成的破碎岩体，岩体裂隙发育，易发生漏浆、掉块及孔壁失稳；硬岩砾石层以西南地区某典型地层为代表，砾石含量高、岩石硬度大，对钻具磨损剧烈，地层可钻性极差；富水裂隙层因地下水赋存丰富，易引发孔内涌水、泥浆稀释及孔壁浸泡失稳等问题，严重影响成孔质量与作业安全。

1.2 复杂地质对钻探救援的核心影响

复杂地质条件通过影响孔壁稳定性、加剧钻具磨损及破坏钻进连续性，直接制约钻探救援效率：一是孔壁失稳导致的坍塌、掉块问题频发，需频繁停机处理孔内事故，此类事故处理耗时占救援钻探总工期的 35%以上；二是硬岩、砾石地层显著缩短钻头使用寿命，如西南地区某水平井邻井在砾石层段施工中，平均每支钻头仅能进尺 20m，需多次起下钻更换钻具，大幅延长作业周期；三是富水地层的漏浆、涌水问题，不仅增加泥浆材料消耗成本，还可能诱发井壁垮塌等次生事故；四是传统工艺依赖操作人员经验调控钻进参数，难以动态适配地质条件变化，进一步制约钻进效率提升。

2 复杂地质钻探救援钻进工艺核心改进技术

2.1 跟管钻进技术：解决松散地层孔壁失稳难题

针对松散覆盖层、破碎地层的孔壁失稳问题，国家安全生产应急救援中心研发的跟管钻进技术实现了钻进-护孔同步进行，从根本上解决了传统工艺中钻井与下套管分步作业的弊端。该技术核心创新点包括：

一是刮刀喷射钻头的结构优化，在钻头翼板上设置三组交错分布的高强度截齿，实现对地层的无死角切削，配合高压钻井液喷射系统的高压射流作用，既破坏地层结构便于切削破碎，又能实时冲刷钻头表面避免泥包钻现象。翼板上端设置的轴向保护套同时起到钻具扶正与防卡阻作用，可有效防止大块岩屑造成的钻具卡阻。二是套管提引装置的空心化创新设计，采用无底水桶状底托结构，简化套管连接流程，实现钻进作业与下套管护孔的同步完成。三是工艺参数的精准优化，通过静力学仿真分析确定最优钻压与转速匹配关系，在保障孔壁稳定的前提下最大化提升钻进速度。

在西部某煤矿泥浆崩塌事故救援中，该技术成功应对 87m 厚的碎石回填松散层，配合空气潜孔锤正循环钻进工艺，有效规避了卡钻、埋钻等孔内隐患，实现了连续稳定成孔。在华北某矿区的应用实践中，针对 20m 厚的卵石覆盖层，采用该技术后施工时间从传统工艺的 5 小时缩短至 1.5 小时，钻进效率提升 3 倍以上，充分验证了其在松散破碎地层中的技术适用性与优势。

2.2 金刚石复合钻进技术：破解硬岩砾石层提速瓶颈

针对硬岩、砾石层可钻性差、钻头磨损快的问题，中国地质调查局研发的 NR826M 孕镶金刚石钻头与涡轮钻具组合工艺，实现了硬岩地层的高效破碎。该技术通过两大核心改进提升钻进性能：

在钻头设计方面，重点强化钻头肩部拐点及心部死点区域的耐磨性能，采用高品级金刚石孕镶材料，显著提升钻头对砾石层的切削破碎能力与抗冲击性能。与传统牙轮钻头相比，该类型钻头硬度提升 40%，抗磨损性能增强 60%。在工艺配套方面，创新性搭配涡轮钻具形成复合钻进系统，利用钻井液循环的动能驱动涡轮高速旋转，使钻头获得更高转速与冲击功，有效突破硬岩地层机械钻速瓶颈。

川渝地区某水平井的应用数据显示，该井三开井段为φ311.2mm 井眼，其含砾石复杂层段邻井采用传统工艺时，需使用 4 支钻头才能完成穿透，平均钻头寿命仅 20m。而采用 NR826M 孕镶金刚石钻头+涡轮钻具复合工艺后，单支钻头进尺达到 79.1m，成功实现单趟钻穿透复杂层段，钻井周期缩短 60%，显著验证了该技术在硬岩复杂地层中的提速增效效果。

2.3 智能钻井系统：实现复杂地质动态调控

国内某大型钻探企业研发的长龙号智能钻井系统 1.0，构建了感知-分析-决策-执行的全流程闭环控制体系，为复杂地质条件下的钻探救援提供了智能化解决方案。该系统通过三大核心功能模块协同提升钻进适应性：

智能感知模块如同系统的眼睛和耳朵，集成智能综合录井仪与多参数传感器阵列，可在千米地下精准识别发丝级别的岩性变化，每 5 秒采集一次钻压、扭矩、转速等关键钻进参数，实现对地质条件与孔内工况的实时动态监测。数字孪生决策平台作为系统大脑，同步构建三维地质与孔内工况数字孪生模型，基于多目标优化算法实时生成最优钻井参数组合，指导钻头实现精准追层。智能执行模块则通过自动化机具系统实现起下钻、管具处理等关键作业的无人化操作，大幅减少人为干预导致的操作失误。

在东部某油田重点探井应用中，该智能系统使套内起下钻效率从 15 柱/小时提升至 25 柱/小时，机械钻速提高 10%-20%，同时将作业人员在危险区域的暴露时间减少 95%，既显著提升了作业效率，又强化了施工安全保障，为复杂地质钻探救援的智能化升级提供了重要技术范例。

3 钻探救援钻进效率优化路径

3.1 建立地质-工艺匹配的参数调控体系

钻进参数优化需建立基于地质条件动态调整的适配机制，形成地层特性-钻头类型-参数组合的精准匹配模型。针对松散地层，采用跟管钻进工艺时，应控制钻压在 80-120kN、转速 60-80r/min，配合高压低流量钻井液参数，在保障孔壁稳定的前提下提升钻进效率；针对硬岩砾石层，采用金刚石复合钻头时，需将钻压提升至 150-200kN，转速控制在 40-60r/min，通过涡轮钻具提升冲击功，减少钻头磨损；针对富水地层，采用气液混合循环方式降低泥浆漏失量，同时实时监测孔内水位变化，动态调整泥浆比重与粘度参数。

3.2 构建设备集成配套体系

效率提升需依托设备系统的协同作业能力，构建钻机-钻具-循环系统一体化集成配套体系：钻机优先选用大扭矩变频液压钻机，其转速与扭矩可实现无级调节，可灵活适配不同地质条件；钻具根据地层特性进行组合配置，如松散地层采用刮刀喷射钻头+高强度套管组合，硬岩地层采用孕镶金刚石钻头+涡轮钻具组合；循环系统配备智能泥浆处理设备，实时调控泥浆密度、粘度等性能参数，有效减少岩屑沉积引发的卡钻事故。在西北某矿区生命保障孔工程中，通过该一体化配套体系，

670.5m 深度的救援钻孔用时仅 46.83 小时，平均钻速达到 14.32m/h。

3.3 优化施工组织与管理流程

应急救援的时效性要求构建高效紧凑的施工流程，需建立标准化应急钻探作业体系：一是强化术前地质勘察，通过浅层钻探与物探技术精准预判施工区域地质条件，提前制定针对性工艺方案；二是推行模块化作业组织模式，将钻进、换钻、排渣等关键工序分解为标准化作业模块，实现多工序平行作业与无缝衔接；三是建立快速应急响应机制，配备备用钻具与设备冗余系统，出现孔内事故时可快速切换处理方案。国内某专业矿山应急救援队伍的实践表明，该标准化作业流程可使辅助作业时间减少 40%，显著提升整体钻探救援效率。

4 工程案例验证

西北某矿区发生顶板垮塌事故后，3 名矿工被困井下 600m 深处，需在易坍塌、涌水量大的复杂地层中构建深度 670.5m 的生命保障通道，用于输送食物、水及医疗物资，应急救援指挥部明确要求 72 小时内完成成孔。地质勘察显示，施工区域上部 300m 为松散砂土层（含大量煤矸石碎块，孔隙率 38%，易坍塌），下部 370.5m 为炭质页岩与砂岩互层（单轴抗压强度 120-180MPa，局部发育富水裂隙，涌水量预估 5-8m³/h）。现场应用本文提出的改进工艺与优化方案，具体实施措施如下：

地质适配工艺：上部 300m 松散覆盖层采用跟管钻进技术，配备 φ311mm 刮刀喷射钻头与 φ219mm 高强度套管，套管采用丝扣快速连接方式，单根连接时间缩短至 2 分钟，实现钻进与护孔同步；下部 370.5m 硬岩地层采用 NR826M 孕镶金刚石钻头+φ203mm 涡轮钻具（最大输出功率 50kW）复合工艺。2. 智能参数调控：引入“长龙号”智能系统核心模块，重点部署岩性识别传感器与压力传感器，实时监测钻压、扭矩、孔内水位等参数，每 5 秒动态优化参数组合——砂岩段钻压提升至 180kN，页岩段降至 150kN，富水段自动将泥浆比重调整至 1.3g/cm³。3. 设备集成配套：选用 ZJ30DB 变频液压钻机为主机，配套智能泥浆处理系统与 2 套备用钻具组（含钻头、钻杆各 10 根），泥浆处理系统实时将泥浆比重控制在 1.2-1.3g/cm³、粘度维持在 25-30s，保障循环系统稳定运行。

施工结果显示，该生命保障孔实际用时 46.83 小时，较计划提前 25.17 小时完成，平均机械钻速 14.32m/h（松散层 18.5m/h，硬岩段 11.2m/h）。孔底水平偏移量仅 0.27m，精准命中井下被困区域巷道，满足透巷技术要求。施工中仅发生 1 次轻微漏浆，智能系统提前预警后，通过调整泥浆配比并注入堵漏材料，30 分钟内成功处理，较传统工艺事故处理时间缩短 80%。与传统工艺相比，机械钻速提升 3.2 倍，孔内事故率从 40%降至 2%，泥浆材料消耗减少 30%。生命通道建成后，通过钻孔成功输送食物、水及医疗设备，为被困人员提供基本生存保障，最终 3 名矿工全部获救。该案例充分验证了本文工艺改进与优化方案的技术有效性与实践价值，为同类复杂地质救援提供了可复制的经验。

5 结论与展望

复杂地质条件下的钻探救援钻进工艺改进，需以地层地质特性为核心导向，通过跟管钻进、金刚石复合钻进等关键技术创新，破解孔壁失稳、钻头磨损快等核心技术瓶颈，依托智能调控系统与参数优化手段实现效率提升。本文构建的工艺改进与效率优化体系经工程实践验证，可显著提升钻进效率与作业可靠性，为复杂地质场景下的应急钻探救援提供有力技术支撑。

未来研究可聚焦三个重点方向：一是研发可适应多类型复杂地质的自适应智能钻头，实现钻头结构与地质参数的实时动态匹配；二是深化人工智能与大数据技术在钻探领域的融合应用，构建基于大数据的地质超前预测与工艺动态决策模型；三是研发轻量化、模块化的应急钻探装备体系，提升在山地、丘陵等复杂地形下的快速机动部署能力，进一步完善复杂地质钻探救援技术体系。

参考文献

[1]苗志田.复杂地质条件下地热水钻探关键技术优化研究[J].工程技术与质量管理,2025(2).
[2]吝瑞华.香格里拉地区复杂地质条件下地热钻探工艺及方法研究[J].河北化工,2021,044(011):48-50,53.
[3]范海鹏.基于数据特征解析的复杂地质钻进过程智能状态监测与评价方法[D].中国地质大学,2023.