

大口径钻探应急救援技术与空气反循环 钻进工艺应用

赵元强^{1,2}

(1. 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272100; 2. 山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室, 山东 济宁 272100)

摘要:随着矿山开采向深部推进, 突发灾害导致的人员被困问题对快速救援技术提出了迫切需求。单纯依靠井下清理井筒、巷道进而搜救人员的传统方式已无法满足应急救援需要, 通过钻探快速构建救援通道能够有效减少人员伤亡, 这种地面快速钻探救援已成为矿山事故处置中的重要手段。大口径钻探作为构建救援通道的核心手段, 其高效的施工工艺是当前研究的关键。本文系统分析了大口径钻探的技术背景、国内外现状及试验方案, 重点探讨了空气反循环钻进工艺在复杂地层中的应用效果, 通过试验数据对比和工艺优化, 总结了不同地质条件下的钻进规律, 为提升矿山应急救援效率提供了理论与实践支撑。

关键词: 矿山应急救援; 大口径钻探; 钻探救援; 救援通道; 空气反循环钻进

中图分类号: P634.5; TD77 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0226-06

Application of air reverse circulation technology in the rapid completion of large-diameter rescue passages

ZHAO Yuanqiang^{1,2}

(1. The Second Exploration Team of Shandong Coalfield Geological Bureau, Jining Shandong 272100, China; 2. Key Laboratory of Mine Drilling Rescue of Shandong Provincial Department of Emergency Management, Jining Shandong 272100, China)

Abstract: With the advancement of mining operations into deeper regions, there is an urgent demand for rapid rescue technologies to address the problem of personnel entrapment caused by sudden disasters. The traditional method of relying solely on clearing shafts and roadways underground to search for and rescue trapped personnel can no longer meet the needs of emergency rescue. Rapidly constructing rescue channels through drilling can effectively reduce casualties, and this surface-based rapid drilling rescue has become an important means in dealing with mine accidents. As the core method for building rescue channels, large-diameter drilling and its efficient construction techniques are the focus of current research. This paper systematically analyzes the technical background, domestic and international status quo, and experimental plans of large-diameter drilling, with emphasis on the application effectiveness of air reverse circulation drilling technology in complex strata. Through comparison of experimental data and process optimization, it summarizes the drilling rules under different geological conditions, providing both theoretical and practical support for enhancing the efficiency of mine emergency rescue.

Key words: mine emergency rescue; large-diameter drilling; drilling rescue; rescue channel; air reverse circulation drilling

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-09-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.034

基金项目: 部省合作地质勘查项目“矿山应急救援大口径定向快速钻探技术研究及应用”(编号: 鲁勘字(2021)17号)

作者简介: 赵元强, 男, 汉族, 1979年生, 应急救援中心主任, 工程师, 水工环地质专业, 从事水工环地质及钻探抢险救援相关工作, 山东省济宁市任城区任城大道120号, zhaoyq2425@126.com。

引用格式: 赵元强. 大口径钻探应急救援技术与空气反循环钻进工艺应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 226-231.

ZHAO Yuanqiang. Application of air reverse circulation technology in the rapid completion of large-diameter rescue passages [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 226-231.

0 引言

随着浅部资源枯竭,我国矿产资源开采深度已普遍超过800 m,部分矿井达1500 m以上。深部复杂构造(如断层、破碎带、高应力区)导致煤与瓦斯突出、透水等灾害风险激增。据国家矿山安全监察局数据,近10年全国矿山事故中,因巷道堵塞、井筒坍塌导致的人员被困事故占比达47%,传统井下清障搜救平均耗时超过黄金救援时间(72 h)^[1]。单纯依靠井下清理井筒、巷道进而搜救人员的传统方式已无法满足应急救援需要,在此背景下,地面大口径钻探以其垂直破障、快速贯通的优势,成为打通生命通道的核心技术——通孔直径 ≥ 711 mm的钻孔,可直接实现被困人员提升、物资输送及生命体征监测,将救援时间压缩至72 h以内^[2]。

1 大口径钻探应急救援技术研究背景

1.1 国内外钻探救援案例

$\Phi 311$ mm以下口径钻探在我国平邑石膏矿坍塌事故、栖霞笏山金矿事故中展现了快速探测与给养能力^[3-5],但仅能满足单向通信与小型物资输送。大口径救援则需突破钻孔精度控制、高效排渣、复杂地层护壁三大难题^[6]。国际典型案例中,2010年智利圣何塞铜矿事故采用开孔直径 $\Phi 1220$ mm钻孔救援,耗时69天完成^[7];2015年平邑事故我国首次实现开孔直径 $\Phi 980$ mm钻孔救援,耗时36天。

当前国内外技术瓶颈集中在:(1)定向钻进精度不足(欧美案例孔底位移普遍 > 3 m);(2)硬岩地层钻进效率低(平均 < 0.5 m/h);(3)涌漏地层排渣失效^[8]。

1.2 我国钻探救援技术现状与项目意义

当前国内大口径钻探多采用泥浆正循环分级扩孔,存在周期长(400 m孔深需30~40天)、成本高、环境影响大等问题^[9]。本文旨在突破技术瓶颈,通过空气反循环工艺创新,构建“快速成孔-精准定向-高效排渣”技术体系,研究不同地质条件下大口径定向钻孔快速钻探技术,通过开展大口径钻探救援试验,为深部复杂地层救援提供标准化方案。

1.3 国内外大口径钻探常规技术现状

1.3.1 传统工艺局限性

泥浆正循环工艺需配制高黏度护壁泥浆(如膨润土含量 $\geq 8\%$),钻渣携带效率随孔径增大呈指数下降($\Phi 711$ mm孔径排渣速度仅为 $\Phi 311$ mm的1/

3)。同时,泥浆易污染地下水,且在裂隙发育地层易发生漏失,导致卡钻事故率达23%。国际上曾尝试改良泡沫钻进、充气钻进等工艺,但在硬岩(抗压强度 > 80 MPa)地层中效率提升有限^[10-11]。

1.3.2 定向钻进技术瓶颈

现有随钻测量系统(MWD)在大口径钻探中面临信号衰减问题,方位角测量误差随孔深增加呈线性增长(400 m深度误差 $\pm 3^\circ$)。欧美主流的弯螺杆+PDC钻头组合在软地层定向精度较高,但进入奥陶系灰岩等硬地层后,工具面控制难度骤增,全角变化率易超标($> 1^\circ/100$ m),导致后期套管下入困难^[12]。

1.4 项目研究目标

针对上述问题,提出三大技术指标:(1)孔底位移 ≤ 1.0 m(较欧美提升60%以上);(2)硬岩钻进效率 ≥ 1 m/h(较传统工艺提升100%);(3)涌水量 > 100 m³/h时持续施工。通过引进雪姆T200XD型钻机、寿力空压机等高端装备,结合自主研发的集束式潜孔锤与多级牙轮钻头,开展多工艺适应性试验。

2 大口径救援通道钻孔快速钻进技术方案

2.1 试验钻孔孔位选择

2.1.1 地质条件针对性

选址遵循“上软下硬、构造典型”原则:上部第四系+新近系(163.5 m)为松散砂土层,需解决大直径套管固定问题;中部石炭二叠系(30.85 m)受嘉祥断层切割,砂岩与泥岩互层,易发生坍塌;下部奥陶系灰岩(揭露210.65 m)致密坚硬(抗压强度90~120 MPa),含裂隙水(涌水量达120 m³/h),是检验硬岩高效钻进的理想靶区。

2.1.2 勘查方法与布孔依据

采用高密度电法(AM-AM装置,点距5 m)反演地层电阻率,圈定第四系厚度等值线(误差 $< 5\%$),结合矿井地质图确定断层位置。最终孔位选在唐口-新河煤矿交界的嘉祥断层带内,兼具松散层、破碎带、硬岩含水层3类典型地层,可覆盖70%以上矿山救援场景。

2.2 地层与构造特征解析

2.2.1 分层岩性工程特性

第四系+新近系:松散砂层占比65%,承载力低($\sigma < 80$ kPa),需采用 $\Phi 980$ mm大孔径一次成孔,

下入 $\Phi 800$ mm钢套管(壁厚12 mm),水泥浆封固段 ≥ 50 m,防止孔口坍塌。

石炭二叠系:砂质泥岩遇水膨胀(自由膨胀率35%),钻进时需控制泥浆滤失量(≤ 10 mL/30 min),避免缩径;细砂岩孔隙率12%,易形成“砂桥”堵塞钻具。

奥陶系灰岩:岩溶发育区涌水量突变风险高,需配备大功率排水设备(流量 ≥ 200 m³/h),同时利用灰岩高硬度特性(可钻性等级6~8级),优化潜孔锤冲击频率(18~22 Hz)。

2.2.2 断层构造对钻孔的影响

嘉祥断层(落差 >900 m)导致地层缺失,钻孔需穿越断层破碎带(宽度约20 m),该带内岩石破碎(RQD $<30\%$),易发生埋钻。为此,在破碎带段采用跟管钻进技术,配置可回收式护壁套管,结合无线随钻测量系统实时调整轨迹,避免孔斜超标。

2.2.3 构造特征

济宁煤田位于华北地台鲁西台背斜西南缘,在鲁西南断块凹陷济宁地堑东部,主要为嘉祥断层及其分支断层。其中嘉祥断层为一区域性正断层,延展长度7.0 km,走向近南北,倾向东,倾角75°,落差大于900 m,西升东降。下(西)盘为寒武系鲕状灰岩,上(东)盘为石炭二叠系太原组煤系。嘉祥支一断层位于嘉祥断层东侧,为其附生正断层,延展长6.5 km,走向北北东,倾向南东东,倾角63°~75°,落差227~684 m,西升东降。(见图1)。

2.3 钻孔结构设计优化

采用三级孔身结构^[13-14](见图2)。一开(0~163.5 m): $\Phi 980$ mm孔径,下入 $\Phi 800$ mm表层套管,水泥返至地面,形成稳定孔口段;二开(163.5~

194.35 m): $\Phi 711$ mm孔径,穿过石炭二叠系,利用潜孔锤快速破除半固结钙质层;三开(194.35~400 m):目标层奥陶系灰岩,采用空气反循环工艺,实现硬岩高效钻进。该结构兼顾护壁与效率,较传统分级扩孔减少1次起下钻,节省时间15%。

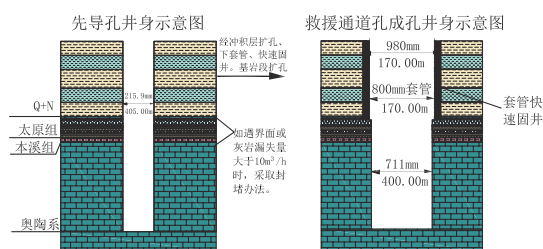


图2 大口径钻孔结构示意图

2.4 高精度定向控制技术指标

通过SEMWD-2000B无线随钻系统实时监测、控制关键参数。全孔最大孔斜 $\leq 3^\circ$,全角变化率 $\leq 0.5^\circ/100$ m,优于石油钻井行业标准($1^\circ/100$ m),确保套管顺利下放;孔底水平位移 ≤ 1.0 m,通过“导向头+偏重钻铤”组合,每20 m测斜1次,实时调整工具面角,在嘉祥断层带段成功将位移控制在0.8 m以内。

3 空气反循环施工工艺创新与应用

3.1 基岩扩孔钻具组合

气动潜孔锤空气反循环钻进: $\Phi 711$ mm集束潜孔锤钻头(带导向直径 $\Phi 215.9$ mm)+ $\Phi 279$ mm双壁钻铤+ $\Phi 219$ mm双壁钻杆+ $\Phi 219$ mm双壁浮动头+气盒子+钻机动力头。

牙轮钻头气举反循环钻进: $\Phi 711$ mm反循环牙轮钻头(带导向直径 $\Phi 311$ mm)+ $\Phi 278$ mm钻铤+ $\Phi 219$ mm双壁混合器+ $\Phi 219$ mm双壁钻杆+ $\Phi 219$ mm双壁浮动头+气盒子+动力头。

3.2 工艺原理与优势对比

传统正循环钻进:泥浆从钻杆内泵入,携带钻渣从环空返出,大孔径下环空流速 <0.5 m/s,无法有效排渣。

空气反循环钻进:高压空气(2~3 MPa)从双壁钻杆环空注入,岩屑经内管高速上返(流速 >15 m/s),排渣效率提升3倍以上。

集束式潜孔锤反循环钻进:适合中低涌水量(≤ 40 m³/h),潜孔锤高频冲击碎岩,反循环排渣。

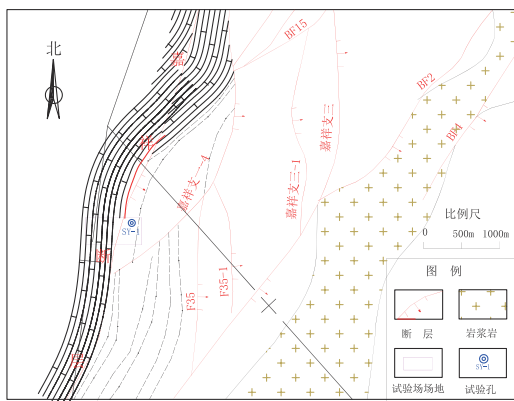


图1 钻孔附近构造示意

多级牙轮气举反循环钻进:针对高涌水(>100 m³/h)地层,通过气水混合器形成低密度气液柱,克服静水压力实现连续钻进。

3.3 核心设备选型与配套

本项目投入设备见表 1。

表 1 大口径试验钻孔基岩段施工投入的主要设备清单

序号	设备名称	品牌、型号及主要技术指标	产地	数量	性能
1	车载钻机	雪姆 T200XD	美国	1 台	提升能力 90.72 t,功率 567 kW
2	空压机	美国寿力 ELQ1525XH	苏州	3 台	排量 43.2/35.4 m ³ /min,压力 2.41/3.45 MPa,柴油机功率 522 kW
3	增压机	阿特拉斯 B4-41/750	比利时	1 台	进气/排气压力 2.41/5.17 MPa,排气量 51 m ³ /min
4	钻铤	Ø279 mm	石家庄	2 根	
5	反循环钻具	Ø219 mm 双壁钻杆	石家庄	405 m	施工能力大于 500 m
6	钻头	Ø311 mm 三牙轮反循环钻头	廊坊	1 个	Ø311 mm 先导钻头
		Ø711 mm 多级牙轮反循环钻头	石家庄	1 个	Ø711 mm 一次性成孔
		Ø711 mm 集束式潜孔锤	济南	1 个	Ø711 mm 一次性成孔
7	振动筛		廊坊	1 个	
8	自动上杆车		廊坊	1 个	可夹持 Ø219 mm 及以下各类钻具,举升高度>5 m
9	无线随钻测量系统	SEMWD-2000B	郑州	1 套	井斜范围 0°~180°,精度±0.1°,方位范围 0°~360°

3.3.1 钻机系统

雪姆 T200XD 型钻机(美国)具备 92 t 提升力,适配 Ø219 mm 双壁钻杆,其动力头转速 10~190 r/min 可调,满足潜孔锤(需低转速 20~30 r/min)与牙轮钻头(需中转速 50~80 r/min)的不同需求。

3.3.2 压气系统

3 台寿力 1525XH 型空压机(总排量 129.6 m³/min)联合供气,搭配阿特拉斯增压机(增压至 5.17 MPa),解决深孔(>300 m)压力不足问题。实测表明,孔深每增加 100 m 供气压力增加 0.3 MPa。

3.3.3 测量与辅助设备

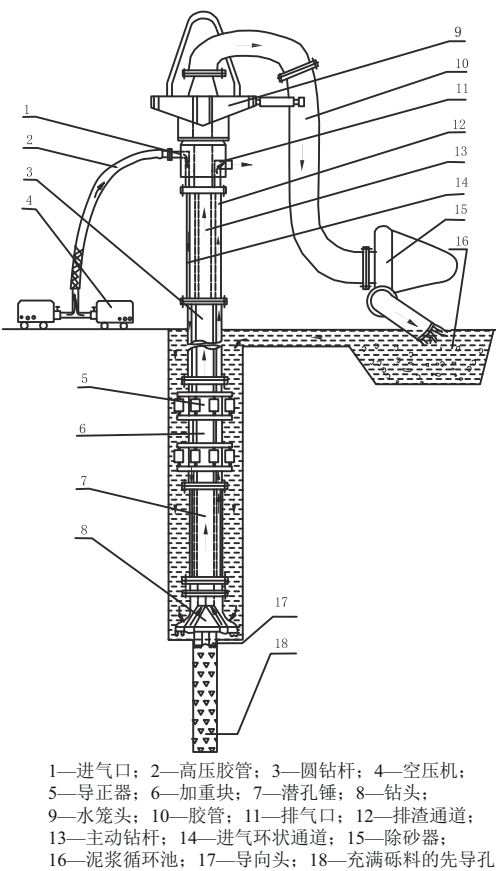
SEMWD-2000B 系统精度±0.1°,实时传输井斜、方位数据至地面工控机,结合自主开发的轨迹优化软件,自动生成纠偏指令;振动筛采用双层网(上层 50 目、下层 100 目),实现钻渣(最大粒径 50 mm)与空气分离,减少环境污染。

3.4 集束式潜孔锤反循环钻进工艺实践

3.4.1 钻具组合创新

设计导向头+集束潜孔锤+双壁钻铤组合(见图 3)。导向头(直径 Ø215.9 mm)嵌入先导孔(Ø 311 mm),确保扩孔轨迹与先导孔一致;集束式潜孔锤集成 3 组冲击器,冲击频率 20 Hz,破碎效率可达 4.0 m/h;Ø279 mm 双壁钻铤增加钻具刚度,减少孔

斜(实测井斜增量<0.3°/100 m)。



1—进气口; 2—高压胶管; 3—圆钻杆; 4—空压机;
5—导正器; 6—加重块; 7—潜孔锤; 8—钻头;
9—水笼头; 10—胶管; 11—排气口; 12—排渣通道;
13—主动钻杆; 14—进气环状通道; 15—除砂器;
16—泥浆循环池; 17—导向头; 18—充满砾料的前导孔

图 3 大口径集束式反循环潜孔锤钻具系统

3.4.2 施工效果与瓶颈

在石炭二叠系砂岩(可钻性3级)中,涌水量 20 m³/h 时,机械钻速达 4 m/h,较泥浆正循环提升 3 倍;但随涌水量增加至 120 m³/h 后,背压过大,送风不足,机械钻速骤降至 0.3 m/h(见表 2)。

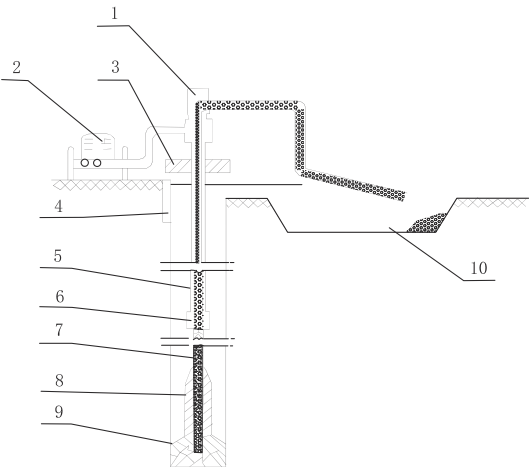
表 2 不同钻进工艺机械钻速对比

钻进工艺	钻头类型	地层情况	涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	空压机数量/台	空压机出气压力/MPa	机械钻速/(m·h ⁻¹)
空气反循环	集束式潜孔锤	砂岩	20	2	1.8	4.0
		泥岩	40	2	2.2	1.5
		泥岩	120	2	2.8	0.3
		泥岩	180	2(1台增压机)	3.3	0.2
气举反循环	多级组合式牙轮	奥陶系灰岩	120	1	1.5	0.8~2.0

3.5 多级组合式牙轮气举反循环钻进工艺突破

3.5.1 工艺原理

针对高涌水地层,采用气举反循环钻进(见图 4):压缩空气经气水混合器注入内管,形成气液两相流,提升排渣能力。实测表明,当进气压力 1.5 MPa、注水量 50 m³/h 时,环空背压达 0.8 MPa^[12-14]。



1—气水龙头; 2—空压机; 3—动力头; 4—孔口管;
5—双壁钻杆; 6—气水混合器; 7—普通单壁钻杆;
8—加重钻杆; 9—反循环钻头; 10—排渣口

图 4 多级组合式牙轮气举反循环钻进

3.5.2 钻进参数优化

在奥陶系灰岩(硬度 6~8 级)中,通过分级调压实现效率提升。
硬岩段(208~253 m, 硬度 7~8 级):采用低转速(28 r/min)、高风压(1.8 MPa),减少钻头周向滑动,机械钻速 0.9 m/h;
中硬段(254~319 m, 硬度 5~6 级):提高转速至 33 r/min,风压增至 2.9 MPa,利用牙轮切削破碎层理,机械钻速提升至 1.16 m/h;

相对软岩段(320 m 以深,硬度 4~5 级):优化风量至 42 m³/min,机械钻速突破 2.05 m/h,创同类地层钻进纪录。

3.6 工艺转换与协同策略

当集束式潜孔锤在 195.5 m 处遇强涌水(120 m³/h)效率骤降时,立即切换工艺。

先导孔防堵:填入 Ø5~10 mm 石英砂(孔隙率 40%),形成临时滤层,防止扩孔渣料落入先导孔;设备调整:拆除潜孔锤,换装 Ø711 mm 多级牙轮钻头,接入气水混合器,启动单台空压机(节约能耗 30%)^[15-19]。

4 阶段总结与技术创新

4.1 工艺适应性量化分析

通过正交试验得出关键结论:集束式潜孔锤最优工况为涌水量≤40 m³/h、岩石硬度≤3 级,此时机械钻速与能耗比达 0.8 m/(h·MPa)^[20];气举反循环在涌水量 80~180 m³/h、硬度 4~8 级地层中优势显著,机械钻速随风压呈幂函数增长($R^2=0.92$),且单位涌水量处理成本(1.2 元/m³)较泥浆工艺降低 60%^[21]。

4.2 装备改造与创新成果

双壁钻杆浮动头采用弹簧缓冲结构,吸收潜孔锤 80% 的高频振动能量,将钻具寿命从 200 h 延长至 500 h^[22-23];增益助气接头:在混合器内部设置文丘里管,使空气流速提升 20%,举升力增加 15%,成功解决 300 m 以深的深孔排渣难题;先导孔防堵技术:建立“粒径-渗透率”数学模型,确定填砂粒径为先导孔直径的 1/6(Ø50 mm 先导孔填 Ø8 mm 砂),防堵成功率达 95%。

4.3 精度控制关键技术

通过三段式轨迹调控:直孔段(0~160 m)利用偏重钻铤自然降斜,控制井斜 $<1^\circ$;过渡段(160~194 m)采用单弯螺杆(弯角 1.25°)定向,每10 m测斜,及时纠正方位偏差(最大 $\pm 5^\circ$);目标段(194~400 m)引入“预测控制算法”,根据地层各向异性指数(1.3~1.8)提前调整钻压(40~50 kN),全角变化率稳定在 $0.4^\circ/100\text{ m}$ 。

5 结语与展望

5.1 研究成果价值

通过对三大技术瓶颈的定向攻关,在定向钻进精度(孔底位移 $\leq 1.0\text{ m}$)、硬岩钻进效率($0.9\sim 2.05\text{ m/h}$)、涌水地层排渣可靠性(成功率 $\geq 95\%$)三个核心维度均实现突破,性能指标显著优于当前国内外普遍水平,可为复杂地层(高精度要求、硬岩、涌水)定向钻进工程提供成套技术解决方案。

5.2 技术改进方向

智能化升级:集成光纤陀螺测斜仪(精度 $\pm 0.05^\circ$)与AI钻进决策系统,实现全自动轨迹控制;
装备轻量化:研发复合材料双壁钻杆(减重30%),解决大口径钻具起下钻耗时问题;

多工艺融合:探索空气反循环+激光破岩复合技术,突破超高硬度地层($>150\text{ MPa}$)钻进瓶颈。

5.3 工程应用前景

项目成果已纳入《矿山应急救援钻探技术规范》修订建议,未来可推广至金属矿、盐矿等复杂地质救援场景。随着“透明矿山”建设推进,大口径钻探与井下避灾硐室、智能钻机协同,将构建“地上下联动、空天地一体”的立体化救援体系,为深部矿产安全开采提供终极保障^[24]。

参考文献:

- [1] 国家矿山安全监察局. 矿山事故应急救援技术装备发展报告(2023)[R]. 北京:应急管理出版社, 2023.
- [2] 王运敏. 矿山救援技术理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2020:123-156.
- [3] 周兢. 矿山灾害应急救援生命保障孔钻井工艺研究[J]. 钻探工

- 程, 2022, 49(1):128-134.
- [4] 钟明. 笏山金矿抢险救援6号钻孔快速准确中靶施工技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(4):131-136.
- [5] 董泽训. 山东笏山矿难3号救援钻孔施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(10):104-109.
- [6] 韦海瑞, 孙红波, 贾明浩, 等. 大口径地面钻孔救援技术与装备发展[J]. 钻探工程, 2023, 50(2):143-149.
- [7] Smith R V. Large-diameter drilling for mine rescue: Case study of the San José copper mine[J]. International Journal of Mining Safety, 2012, 15(2): 45-58.
- [8] 解学才, 宫伟东, 林辰, 等. 我国煤矿应急救援现状分析研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11):229-232.
- [9] 孙继平, 钱晓红. 煤矿事故与应急救援技术装备[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10):1-5.
- [10] 田宏亮, 张阳, 郝世俊, 等. 矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5):29-33.
- [11] 石智军, 赵江鹏, 陆鸿涛, 等. 煤矿区大直径垂直定向孔快速钻进关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9):13-18.
- [12] 黄军利. 国外煤矿应急救援技术装备综述[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9):233-236.
- [13] 莫海涛. 煤矿区地面大口径定向井成井工艺研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2014:32-35.
- [14] 莫海涛, 郝世俊, 叶根飞. 煤矿区大口径井二开先导孔下导管钻进技术[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(4):106-108.
- [15] 杨涛, 杜兵建. 山东平邑石膏矿矿难大口径救援钻孔施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(5):19-23.
- [16] 邹祖杰, 凡东, 刘庆修, 等. 矿山地面大直径钻孔救援提升装备研制[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12):160-165.
- [17] 郝世俊, 莫海涛. 地面大直径应急救援钻孔成孔工艺设计与分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1):277-283.
- [18] 赵江鹏, 王四一. 扩孔用集束式反循环潜孔锤的改进设计[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8):133-135.
- [19] 王艳丽, 许刘万, 伍晓龙, 等. 大口径矿山抢险救援快速钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(8):1-5.
- [20] 赵江鹏. 扩孔用集束式反循环潜孔锤设计与试验[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1):106-109.
- [21] 胡上峰. 双壁钻具气举反循环钻进工艺在大口径钻孔中的应用[J]. 大科技, 2014, 3(1):190-191.
- [22] 程林, 李艳丽, 尹建国, 等. 平邑石膏矿坍塌事故5号救生孔施工工艺及钻具配置[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(5):13-16.
- [23] 何成应, 赵斌. 大口径气举反循环成孔施工中的相关技术[J]. 西部探矿工程, 2008, (6):64-66.
- [24] 李术才, 李利平. 深部巷道围岩控制理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2019:201-234.

(编辑 王跃伟)