

9-25-2024

Emergency response and critical technologies for large-diameter boreholes in mine rescue through surface drilling

MA Tan

National Mine Emergency Rescue Shandong Special Survey Team, Jining 272100, China; College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Department of Emergency Management of Shandong Province, Jining 272100, China; The Second Exploration Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Jining 272100, China, iammatan@foxmail.com

ZHUGE Lei

National Mine Emergency Rescue Shandong Special Survey Team, Jining 272100, China; Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Department of Emergency Management of Shandong Province, Jining 272100, China; The Second Exploration Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Jining 272100, China

ZHAO Weidong

National Mine Emergency Rescue Shandong Special Survey Team, Jining 272100, China; Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Department of Emergency Management of Shandong Province, Jining 272100, China; The Second Exploration Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Jining 272100, China

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

MA Tan, ZHUGE Lei, ZHAO Weidong, et al. (2024) "Emergency response and critical technologies for large-diameter boreholes in mine rescue through surface drilling," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 9, Article 19.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.06.0385

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss9/19>

This Drilling Engineering is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.



移动阅读

麻坦, 诸葛雷, 赵伟东. 矿山地面救援应急响应与大直径钻孔关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 192–202. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.06.0385

MA Tan, ZHUGE Lei, ZHAO Weidong. Emergency response and critical technologies for large-diameter boreholes in mine rescue through surface drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 192–202. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.06.0385

矿山地面救援应急响应与大直径钻孔关键技术

麻坦^{1,2,3,4}, 诸葛雷^{1,3,4}, 赵伟东^{1,3,4}

- (1. 国家矿山应急救援山东特勘队, 山东 济宁 272100; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249;
3. 山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室, 山东 济宁 272100; 4. 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272100)

摘要: 【目的】大直径救生孔多次在矿山地面钻探救援中得到成功应用, 但在快速出动、跨区域救援等应急响应方面仍有短板, 在应对复杂地层时大直径救生孔的工艺适配性不足。【方法】从应急救援整体角度出发, 以救援时效为指标, 就响应能力提升、复杂地层成井工艺等关键技术进行总结。构建了矿山地面钻探救援应急处置流程, 明确了预案启动、响应动作和响应速度 3 个方面的提升内容, 建立了跨区域救援层次化出动机制和钻前技术保障响应机制。分析了大直径救生孔松散层、基岩层钻进工艺特点, 提出了针对破碎、高涌水等复杂地层施工难点的解决方案, 指出了救援提升过程中的典型问题。【结果和结论】研究表明: (1) 科学的矿山地面钻探救援应急响应机制是提高救援效率的重要方式之一, 通过采用跨区域救援层次化出动机制和钻前技术保障响应机制, 可有效提高应急响应效率 2.3 倍。(2) 形成了复杂地层条件下大直径救生孔高效成孔的解决方案, 并应用于济宁九顶山矿大直径救生孔工程试验, 完钻孔深 403.2 m, 终孔孔径 580 mm, 平均机械钻速 2.5 m/h, 从应急响应到救援提升总用时 311.95 h, 救援整体时效性提升 47%。(3) 就救援时效性而言, 救援准备阶段的提升效率要优于救援实施阶段, 且应急响应能力的提升途径更易实现, 因此在钻探工艺和装备提升不大的情况, 矿山救援队应着重提升应急备战和快速反应能力。研究结果可满足 400 m 以浅矿山地面应急救援需求, 可指导矿山救援队建立应急响应机制, 为大直径救生孔的施工设计提供参考, 对矿山地面钻探应急救援具有指导意义。

关键词: 矿山地面钻探救援; 应急救援模式; 应急响应; 大直径救生孔; 成孔工艺

中图分类号: TD77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)09-0192-11

Emergency response and critical technologies for large-diameter boreholes in mine rescue through surface drilling

MA Tan^{1,2,3,4}, ZHUGE Lei^{1,3,4}, ZHAO Weidong^{1,3,4}

- (1. National Mine Emergency Rescue Shandong Special Survey Team, Jining 272100, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Department of Emergency Management of Shandong Province, Jining 272100, China; 4. The Second Exploration Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Jining 272100, China)

Abstract: [Objective] Large-diameter lifesaving holes have been successfully applied multiple times in mine rescue through surface drilling. However, they show limitations in emergency response like quick dispatch and cross-regional rescue, and their technological adaptability is insufficient to cope with complex strata. [Methods] From the perspective of overall emergency rescue, with rescue timeliness as an indicator, this study summarized the critical technologies like response capability enhancement and borehole-forming technology for complex strata. It constructed an emergency

收稿日期: 2024-06-14; 接收日期: 2024-08-20

基金项目: 山东省地勘基金项目(SDGP37000000202102003484)

第一作者: 麻坦, 1988 年生, 男, 河南驻马店人, 硕士, 工程师。E-mail: iammatan@foxmail.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

handling process for mine rescue through surface drilling, specified the improvements in contingency plan activation, response actions, and response speeds, and established the hierarchical cross-regional rescue dispatch mechanism and the pre-drilling technical support response mechanism. Based on the analysis of the drilling process characteristics of large-diameter lifesaving holes in unconsolidated strata and bedrock layers, this study proposed solutions to construction challenges in complex strata characterized by fragmentation and high water inflow, and typical problems in the rescue lifting process. [Results and Conclusions] Key findings are as follows: (1) A scientific emergency response mechanism for mine rescue through surface drilling is a significant approach for improving rescue efficiency. The emergency response efficiency can be effectively increased by 2.3 times by employing the hierarchical cross-regional rescue dispatch mechanism and the pre-drilling technical support response mechanism. (2) An efficient borehole-forming solution for large-diameter lifesaving holes under complex formation conditions is developed in this study. The solution is applied to the experimental project of the Jiudingshan mine in Jining City, completing a large-diameter lifesaving hole with a final drilling depth of 403.2 m, a diameter of 580 mm at the end location, and an average penetration rate of 2.5 m/h. The total duration from emergency response to rescue lifting takes 311.95 h, improving the overall rescue timeliness by 47%. (3) In terms of rescue timeliness, the efficiency improvement of the rescue preparation phase is superior to that of the implementation phase, with more achievable enhancement in the emergency response capability. Therefore, mine rescue teams are recommended to enhance emergency preparedness and rapid response capabilities in the case of limited enhancement in drilling technology and equipment. The results of this study can be referenced for supplying surface emergency rescue for mines with mining depths shallower than 400 m, guiding mine rescue teams to establish emergency response mechanisms, and conducting construction design for large-diameter lifesaving holes, thus holding significant guiding implications for mine emergency rescue through surface drilling.

Keywords: mine rescue through surface drilling; emergency rescue mode; emergency response; large-diameter lifesaving hole; borehole-forming technology

当前,随着浅部资源的逐年减少和枯竭^[1],我国矿产资源开采正向深部、构造复杂区域全面推进,矿山安全管控难度日益增大。在现有条件下,单纯从管理及技术层面,无法完全避免矿山事故的发生^[2]。近年来国内外开展的救援钻孔实践表明,“小直径生命保障孔+大直径救生孔+救援提升装备”的地面钻探救援模式是进行矿山灾害救援的一种有效途径^[3]。21世纪以来,世界范围内共有3起采用该模式救援的成功案例^[4],分别是2002年美国宾夕法尼亚州魁溪煤矿事故救援,2010年智利圣何塞铜矿事故救援,2015年中国山东平邑石膏矿“12·25”重大坍塌事故救援,共计挽救46名矿工生命。

近年来我国应急救援体系快速发展,截至2023年国家矿山应急救援队扩充至49支,应急备战能力更加全面,如在2021年山东栖霞笏山金矿“1·10”重大爆炸事故救援中,从获悉事故发生的十几个小时内完成了从中央到地方的组织动员,先后从全国调集了21支专业救援队伍^[5]。同时,小直径生命保障孔钻探能力取得长足进步。在救援装备方面,相关科研机构^[6-8]优化了地面救援车载钻机在给进系统、电液系统方面的设计,研制了钻杆自动加卸、连续缆管储放、多源信息探测等辅助装备;在钻探技术方面,相关学者^[9-11]推广了气动潜孔锤在矿山事故钻孔救援中的现场应用,开发了复杂地层小直径生命保障孔快速、精准钻进技术,并基于此,开展了救援钻孔钻进过程中的井涌井漏预测、安全透

巷距离数值模拟等研究。目前,以国家矿山应急救援大地特勘队、国家矿山应急救援山东特勘队为代表的国家矿山应急救援队伍已基本满足72h“黄金救援时间”内打通 $\phi 152.4$ mm小直径生命保障孔的救援需求^[12-13]。

但是当前国内针对大直径地面钻孔救援技术的研究尚未完全成熟。山东平邑石膏矿“12·25”重大坍塌事故救援的成功实践,相关救援队伍^[14-15]初步总结了大直径救生孔的施工工艺,针对该救援暴露的相关问题,一些学者^[16-17]在大直径救生孔关键装备研发和钻探工艺提升方面开展了相关探索,研制了提升力1200 kN、转矩50 kN·m以上的车载钻机,研发了不同系列的救援提升装备,首次在宁夏宁煤集团梅花井煤矿开展了地面钻孔救援集成工程试验,取得了较好的试验效果。但与小直径生命保障孔相比,施工大直径救生孔的技术难度和工艺方法有着显著差异,仍有关键技术尚未攻克。目前,集束式潜孔锤反循环钻进工艺是大直径救生孔相关研究和救援实践的首选方案^[17],但在破碎、气侵、涌砂、高涌水等地层钻进时,该工艺钻效骤降且钻井事故风险倍增;同时,气动潜孔锤定向钻进技术现场应用尚不成熟,而采用多点测斜仪提钻测斜或气动潜孔锤与随钻测量交替测斜,停钻辅助时间长。如平邑石膏矿“12·25”重大坍塌事故救援,因上部岩层掉块、缩径,5号救生孔在采用孔底密封法潜孔锤反循环工艺时发生了埋钻事故,拖延了救援进度^[18],且5号救生孔未能精准透巷,临时从7号生命保障孔送入工具,由被困人

员从巷道向钻孔凿进 0.8 m 后贯通,增大了救援难度^[19]。

应急救援的时效性原则是第一原则,矿山地面钻探救援在确保“快速”的同时要兼顾“精准”和“安全”。但其时效性不仅取决于钻探过程的“快速”,还取决于从收到救援指令开始的人员出动、物资调配、跨区域运输和钻前准备等应急响应过程。而目前我国矿山地面钻探救援程序流程和规范标准尚不完善,常态化备战、应急响应方面仍有短板。如 2021 年山东栖霞笏山金矿“1·10”重大爆炸事故救援,在获悉事故发生的 12 h 内,达到现场且具备开钻条件的救援队伍仅有 2 支,快速反应能力有待提升^[5]。

目前,国内学者在开展矿山地面钻探救援研究方面,更多关注于救援实施阶段,即研究相对集中在优化钻探工艺与提升装备性能,未见相关研究者从应急救援整体角度就矿山地面钻探救援关键技术进行梳理。基于此,按照抢险救援模式开展矿山地面钻探救援大直径救生孔技术研究,以救援时效和成功率为技术指标,在应急响应方面确立预案启动、响应动作和响应速度 3 个层次的提升内容,构建跨区域救援层次化出动机制和钻前技术保障响应机制,分析大直径救生孔松散层、基岩层钻进工艺特点,提出针对破碎、高涌水等复杂地层施工难点的解决方案,指出救援提升过程中的典型问题和应对措施,并通过工程试验对大直径救生孔高效成井工艺进行验证,以期对矿山救援队建立应急响应机制以及大直径救生孔的施工设计提供参考。

1 应急响应

1.1 矿山地面钻探应急救援实施原则

按照“以人为本、生命至上”的矿山事故救援要求,矿山救援队在接到救援指令后,第一时间启动应急预案,在启动应急响应的 1 h 内出动,300 km 以内的跨区域救援应在 5 h 内达到事故地点,到达事故现场 2 h 内达到开钻条件,按照现场指挥部命令、应急救援方案及矿山救援队行动方案,实施地面钻探救援任务。小直径生命保障孔以优快成孔为目标,应在接到救援指令的 72 h 内打通生命保障孔,为被困人员提供食物、水源、药品等补给。确需实施大直径救生孔救援的,按照高效成孔

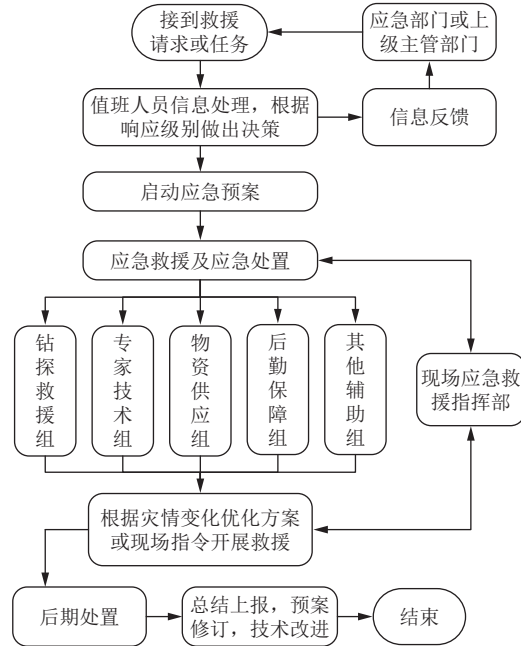


图 1 矿山地面钻探救援响应分级的应急处置流程

Fig.1 Emergency handling process for mine rescue through surface drilling based on hierarchical response

要求,争取在 360 h 内打通救援通道,救生孔应能保证人员或救生舱顺利通过。

1.2 应急处置流程

矿山应急救援的时间是应急处置效率的主要指标,通常应急处置消耗时间越长,损失就越大^[20]。科学的应急处置流程是提高救援效率的重要方式之一。通过救援业务流程分析,构建了矿山地面钻探救援响应分级的应急处置流程,如图 1 所示。

1.3 应急响应能力提升内容

对于地面钻探救援,影响综合应急响应能力的要素主要包括:客体、环境、信息等^[21]。客体即救援队伍,环境是指实施救援的客观条件,信息包括与救援相关的各类资料、信息和情报。若在地面钻探救援应急响应过程中,上述要素没有发挥较高的效能,将影响救援时效性。基于设计的地面钻探救援应急处置流程框架,总结出预案启动、响应动作和响应速度 3 个应急响应能力提升途径,得出其具体的应急响应能力提升内容,详见表 1。

表 1 钻探应急救援“快速反应”能力提升内容

Table 1 Improvements for the "quick response" capability of emergency rescue through drilling

分类	内容	提升内容解释
应急救援预案启动	预案启动	按照分级响应的原则,应迅速启动应急预案,调集应急救援队伍、应急救援物资,派出应急人员和专家赶赴突发事故现场
应急救援响应动作	队伍启动	快速集结钻探救援组、专家技术组、物资供应组和后勤保障组等分队
	物资启动	快速有序装卸侦测搜寻、钻掘救援,通信指挥、应急保障等救援装备
	技术启动	及时有效采取应急通信、交通运输、物资保障等技术措施

续表 1

分类	内容	提升内容解释
应急救援响应速度	反应速度	值班人员从接到救援指令到启动应急预案的速度
	到达现场速度	启动应急预案后, 救援人员到达现场(第一时间赶赴事故现场, 第一时间采取处置措施, 第一时间报告事故情况)、主要救援装备到达现场的速度
	推进层次化速度	先期快反速度: 队伍接到救援指令后, 首先携带施工小直径生命救援孔所需的钻掘装备、通信指挥等核心救援物资, 第一时间集结, 快速到达现场 重装携行速度: 在先期队伍出发或收到变更指令后, 运输施工大直径救生孔所需的钻掘装备、侦测搜寻、通信指挥和应急保障等专业装备

1.4 跨区域救援层次化出动机制

不同于火灾、危化品等抢险救援, 矿山地面钻探救援所需装备种类多、数量大。因此在应急响应阶段, 能否更快实现装备的整备装车、跨区域到达, 是判断快速反应能力的关键指标之一。快速反应能力提升的关键在于实现跨区域救援的层次化出动, 根据救援特点将装备分为先期快反设备和重装携行物资, 详见表 2, 使每个层次的设备出动更加灵活和快速, 达到跨区域救援方便、高效出动。先期快反设备包括小直径生命保障孔

钻掘装备、通信指挥装备等少量核心救援物资, 基本以模块化为主, 形成集群式快速机动装备, 方便装卸, 以快速到达现场开展救援为目标。重装携行物资主要是指大直径救生孔钻掘救援、侦测搜寻、应急保障等专业装备, 是根据救援需要或者指令变更而整备的物资, 主要装备采取“双配套”原则, 着力应对长时间、远距离救援和救援难度较大的情况。必要时, 跨区域救援应请求交通运输部门维持交通秩序, 保障通行顺畅。

表 2 跨区域救援层次化出动物资明细
Table 2 Details of cross-regional relief supplies dispatched at different levels

层次化出动	类型	明细
先期快反出动	钻掘装备	车载钻机、发电机组、钻井液系统、固控系统、泡沫系统、空压机系统、随钻测量及地质导向等设备; 钻头、钻杆等钻具; 设备抓取、装卸、扶正、打捞、减震等工具
	通信指挥	通信指挥车、公网单兵图传、数字集群移动站等
	钻掘装备	车载钻机, 钻头、钻杆等钻具
重装携行出动	侦测搜寻	救援钻孔多元信息侦测装置等
	通信指挥	卫星便携站、现场指挥调度终端、数字集群移动站等
	应急保障	运兵车、全路面汽车起重机、餐车、宿营车、装备运输车等

跨区域救援出动采用层次化流程后与常规线性流程的时效性对比如图 2 所示, 采用层次化流程的到达现

场时间 t_{sh} 将极大提前, 而且采用层次化流程的响应时间 t_{th} 小于常规流程响应时间 t_{tn} , 提高了响应效率。

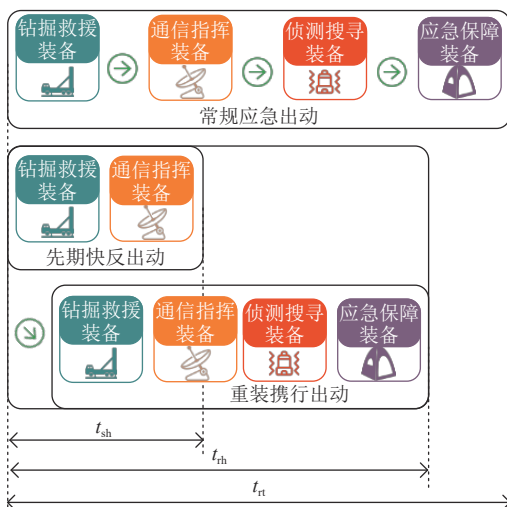


图 2 跨区域救援出动不同机制时效

Fig.2 Timeliness of cross-regional rescue dispatch under different mechanisms

1.5 钻前技术保障响应机制

一般情况下, 受制于救援准备和应急响应机制, 钻探救援的钻前准备阶段始于到达现场后。但根据钻前技术保障响应机制要求, 钻前准备阶段的起始节点应提前至应急预案启动时, 通过延长钻前准备的时间跨度, 保障钻前工作充分性, 通过提升响应阶段时间利用率, 达到缩短整体应急响应时间的目的。

钻前技术保障, 以专家技术组为主导, 在获得事故信息后, 应设专人跟踪事故进展。要尽早获取以下 4 个方面信息: (1) 被困人员情况, 人员数量、所处大概位置等。(2) 矿井情况, 井上下对照图、采掘工程布置图、井下逃生路线图等资料。(3) 地质情况, 岩层情况、地质构造情况及地下水情况等, 或者钻探、测井数据资料。(4) 施工及周边情况, 场地情况、“三通一平”情况等。其余各组根据应急预案任务分工各司其职, 钻探救援组

确定组队、装备、物资配置方案,后勤保障组确定机动方式、行动路线,物资供应组确定应急救援设备的种类、数量及运输先后顺序。

钻前技术保障响应机制采用树状并行的设计理念,代替传统的线性工作流程,压缩各个流程的衔接等待时

间,减少救援准备时间,钻前技术保障作业流程如图 3 所示。依靠可视化通信设备,在跨区域救援途中和达到现场后,专家技术组与全体救援队员进行充分信息交互,可以更好地开展钻前准备。

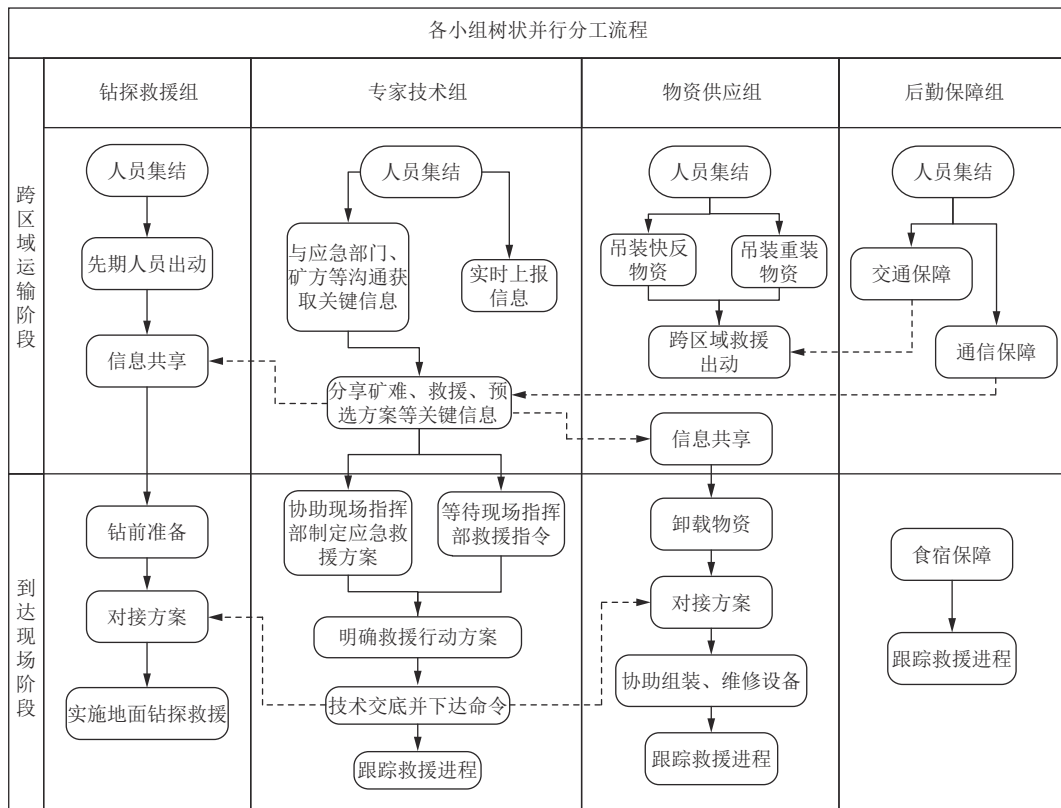


图 3 钻前技术保障作业流程
Fig.3 Operation process of pre-drilling technical support

同时,专家技术组应安排人员根据事故调查情况制定救援方案。救援方案应包含现场性质评估、需求评估、一般情况处置应对措施及意外情况处置措施。方案应征求地质、水文地质、钻探、采矿、消防、安全、地理信息、医学等救援方的意见,并经现场救援指挥部审批后,方可实施。

2 救援实施

大直径救生孔施工应遵循“结构优化、高效成孔、精准中靶、安全透巷”4项原则。所谓结构优化,是在保障安全钻进的前提下,使井身结构设计更加简单合理。要达到高效成孔,钻探过程应尽可能按照“一开次一工艺”原则,各开次导向孔或扩孔段尽量采用“一趟钻”技术,同时有效缩短各工序的衔接等待时间,以提升整个钻井周期的时效性。精准中靶是成功救援的前提,井眼轨迹控制要贯穿在施工的全过程。安全透巷是钻探救援的本质要求,固井、透巷等施工过程均可能导致巷道

坍塌或流体侵入,必须避免钻探救援过程中可能产生的二次伤害。

2.1 大直径救生孔设计

2.1.1 井位及井型

大直径救生孔井型以直井为宜,布置与井底坐标对应的地面井位要考虑地层的自然偏斜规律和地面条件,井位坐标误差宜在 1 cm 以内。同时,井位选择应避免开采空区的上部位置,在地面施工条件差或需绕障时,可选用定向井,为保障救生舱或人员顺利通过,全井段井斜角应小于 15°^[22]。井位坐标采用人工导线测量坐标定位及卫星导航定位系统方法两种测量方法相互验证,为精准透巷提供基础保障。

2.1.2 井身结构

大直径救生孔井身结构的选择要以时效性为基准,并综合考虑地层因素、工艺选择、安全透巷等技术要求,详见表 3。为确保遇险人员无伤害的提升,大直径救生孔完钻裸眼直径应不小于 580 mm,如遇险人员受伤等

情况需要救生舱提升时,完钻裸眼孔径应不小于650 mm。大直径救生孔完钻孔径大小与是否下入救生舱,应根据现场实际情况由现场专家组或救援指挥机构确定。

表3 不同地层条件下大直径救生孔井身推荐结构
Table 3 Recommended casing programs for large-diameter lifesaving holes under different formation conditions

(孔径/ 套管外径)/mm	稳定地层 条件下开次	常规地层 条件下开次	复杂地层 条件下开次
1 250/1 050			一开
980/820	一开	一开	二开
711/630	二开*	二开	三开
580		三开	四开

注: *为稳定地层条件下,大直径救生孔二开裸眼孔径取650 mm。

在岩层完整、不穿过含水层的稳定地层,大直径救生孔可采用二开井身结构。一开孔径980 mm,封隔松散层和地表水,套管下深进入基岩层。二开为基岩段钻进,在金属、非金属矿等岩性力学性质良好、无含水层的情况下可裸眼完井,以缩短救援时间。二开采用空气钻进工艺时可直接透巷,采用其他循环介质钻进时,需预留15~20 m的安全透巷距离,转换为空气钻进工艺透巷。

对于煤矿等常规地层,大直径救生孔可采用三开井身结构。一开孔径980 mm,隔离松散层和地表水,套管下深进入基岩层;二开孔径711 mm,钻至安全透巷距离处;三开孔径580 mm,采用空气钻进工艺透巷,裸眼完井。

在坍塌掉块、高涌水等复杂地层,大直径救生孔可采用四开井身结构。相比常规地层,一开孔径增大为1 250 mm,需要多下入一层 $\phi 820$ mm技术套管,隔离穿过的复杂地层及含水层,确保安全救援。

2.2 大直径救生孔高效成孔工艺

2.2.1 松散层钻进

大直径救生孔开孔孔径大,高效成井的要点在于一次性成孔。地表松散层一般为砂层、土层、卵砾石层或基岩风化带,选用全套管钻进或者旋挖法钻进工艺。其中,全套管钻进是松散层大直径救生孔施工的首选方案,优点是钻进支护同步进行,有效提高时效性,平均钻速可达13 m/h,但目前国家矿山应急救援队全回转钻机的配备率不高。旋挖法钻进技术相对成熟、施工简便,多采用湿式旋挖,平均钻速可达10 m/h,适用于除砾石以外的地层。

2.2.2 基岩层钻进

多数情况下,大直径救生孔基岩层钻进工序分两步,首先施工先导孔,再通过逐级扩孔达到要求的孔径,相

关钻探工艺汇总详见表4。先导孔的钻进是大直径救生孔施工的重点之一,应严格进行井眼轨迹控制,确保顺利中靶。先导孔采用下导管钻进^[23],有效解决一开大尺寸段岩屑上返问题。对于地层倾角小、自然造斜率可控的地层,优先采用空气潜孔锤钻进工艺。在常规地层钻进或进行纠斜施工时,采用螺杆钻具复合钻进技术。

基岩层扩孔钻进首选集束式潜孔锤反循环钻进工艺,在保障钻效的同时有效解决排渣问题,机械钻速可达3 m/h以上,显著提高硬岩段钻进效率。该工艺属于局部强制反循环范畴,推荐使用孔口孔底联合密封法,其适应性优于橡胶片孔底密封法,可在少量掉块、出水量较小的地层使用。

地层涌水会产生水柱密封效应,有利于反循环的产生,但过高的液柱压力导致集束式潜孔锤单体背压高,造成其工作效率低甚至无法工作^[24]。因此,在高涌水地层应更换为三牙轮钻头气举反循环工艺,其硬岩扩孔平均机械钻速0.8 m/h,保障顺利成井。

表4 基岩层钻探工艺
Table 4 Drilling technologies for bedrocks

工序	钻探工艺	适用条件
先导孔	“PDC钻头+螺杆钻具”复合钻进技术	软岩、含水层、易斜地层
	“空气潜孔锤+E-MWD”钻进技术	硬岩、不含水地层
	“气动潜孔锤+钻井液螺杆钻具”纠偏组合钻进技术	目标层位埋深较大、易斜地层、复杂地层
扩孔段	集束式潜孔锤反循环钻进工艺	孔壁稳定、漏失地层、水敏性地层
	牙轮钻头气举反循环钻进工艺	涌水地层

2.2.3 下套管及固井

大直径救生孔因其孔径大,固井所用套管通常为无缝钢管,可有效保障套管强度。入井套管自重较大,一般超过现场提升装备提升力,需采用吊浮法下套管,下入前准确计算钻井液注入量,同时验算无缝钢管的抗挤压性能,引入安全系数以选择合理的提升装备,保障作业安全。大直径救生孔固井可采用压入式和内插式,其中内插法可解决混浆问题^[25]。固井时,采用高标号、高密度、高强度的水泥浆液,保持水泥浆液低速上返,套管带压全封闭,保障固井质量。

2.2.4 透巷钻进

不同于小直径生命保障孔的靶区选择,大直径救生孔的井底坐标宜选择在被困人员附近巷道宽阔处或巷道交叉处,避免透巷过程中造成的地层垮落坍塌危及遇险人员。安全透巷距离 H 应大于巷道顶板裂隙发育高度 h_i 与透巷前一开次裂隙延伸长度 h_p 之和,一般取15~20 m。透巷一般采用 $\phi 580$ mm集束式潜孔锤反循环钻

进工艺,过程中要控制涌入流体不超过 9 m³,确保安全透巷。

2.3 复杂地层施工难题解决方案

大直径救生孔基岩层钻时占钻井周期的 45% 以上,基岩层钻进效率是影响大直径救生孔高效成孔目标的主要因素之一。而破碎、高涌水等复杂地层条件将极大限制集束式潜孔锤反循环钻进工艺的钻效,应对该复杂地层,可采用“集束式潜孔锤反循环+牙轮钻头气举反循环”的组合钻进工艺,通过复杂地层后下入技术套管封隔,可获得较好的应用效果。该工艺有两个技术难点,一是确定集束式潜孔锤反循环钻进与牙轮钻头气举反循环钻进的工艺转换工况,二是气举反循环钻进的井壁稳定性及岩屑上返问题。

2.3.1 不同空压机注气量条件下的最佳涌水量

涌水量和空压机注气量直接影响集束式潜孔锤反循环钻进工艺的钻进效率。通过大直径救生孔试验,在孔深 315 m、孔径 711 mm 条件下,采用“ $\phi 711$ mm/ $\phi 215.9$ mm 集束式潜孔锤钻头+ $\phi 219$ mm 双壁钻杆”钻具组合,得出了不同空压机注气量条件下涌水量对机械钻速的影响规律。

如图 4 所示,集束式潜孔锤反循环钻进的机械钻速与涌水量、空压机注气量有密切的关系。在任一空压机注气量条件下,当涌水量低时,机械钻速随涌水量增加而增加;涌水量为某值时,机械钻速达到最大,此时相对应的涌水量即最佳涌水量;随着涌水量继续增加,机械钻速随涌水量增加而降低。同时,随着空压机注气量的降低,存在最大机械钻速和最佳涌水量逐渐降低的趋势。

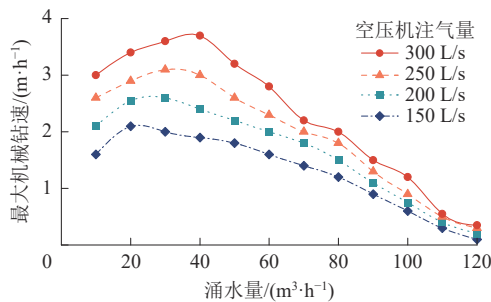


图 4 不同空压机注气量条件下涌水量对机械钻速的影响规律

Fig.4 Impacts of water inflow on the penetration rate under different air injection rates of air compressors

因此,保持集束式潜孔锤反循环钻进工艺最大机械钻速对应的最佳涌水量,可获得钻效最大化。根据不同空压机注气量条件下的最佳涌水量,可确定集束式潜孔锤反循环钻进与牙轮钻头气举反循环钻进的工艺转换工况。取气举反循环机械钻速为参考值,当涌水量超过参考值对应的最佳涌水量时,应考虑更换施工工艺。

2.3.2 气举反循环钻进井壁稳定性及岩屑上返问题

一般而言气举反循环钻进抽吸作用会产生负压,不利于井壁稳定,而且钻井液流态、性质和上返速度也影响井壁稳定性,限制了其在破碎地层的应用^[26]。同时,钻进面积大、上部地层掉块等因素会导致岩屑在举升过程中大量聚集,从而更易发生钻杆内部堵塞。以上问题可以通过改进工艺措施和优化钻头性能来解决,详见表 5。

表 5 复杂地层气举反循环钻进技术
Table 5 Air-lift reverse circulation drilling under complex formation conditions

类别	方法	作用
钻井液	调整流态为层流	降低内管钻井液上返速度,减少对井壁冲刷作用
工艺	加大沉没比	提高上返钻井液的携带岩粉能力
	减小钻压	钻进复杂地层时将钻压控制在 20~50 kN,降低岩屑密度
钻头	改进水眼	在牙轮钻头水眼外侧加装异形保护钢板,减小上返岩屑粒径
	增设防堵进水短接	上移进水口,使其远离井底沉渣,达到进水而不吸渣的目的

2.4 救援提升

大直径救生孔可广泛借鉴桩基、石油勘探、地质勘探等行业的大直径钻孔施工经验,但大直径救生孔救援提升程序可借鉴的应用场景极少,更依赖救援提升试验总结经验。典型的大直径救生孔提升装备分为提升平台和救生舱两类,其中以随车起重机等为主的移动式提升平台更适用于矿井应急救援现场情况,常见救生舱外径 550 mm、高度 4 m,质量约 1 t。

救援提升过程中的典型问题及原因分析见表 6,对于救援提升具有指导意义。在开展救援提升程序前,需进行充分的准备工作以减少相关问题的影响。首先,对于完井与救援提升工序间隔时间较长或者地面沉降监测值变化较大的情况,在下入救生舱前应预先下入救援钻孔多元信息侦测装置,获取井斜变化率、气体环境、图像等参数,评估救生舱通过可行性。应预先放松再收紧卷扬钢丝绳,释放钢丝绳的部分扭转应力,上提下放时控制速度,以减轻救生舱旋转和通信线缆缠绕情况。

3 现场应用

2022 年 6 月,在山东济宁九顶山矿开展了矿山地面钻探应急救援大直径救生孔工程试验(图 5、图 6)。该试验按照“双盲”演练抢险救援模式,主要实施应急响应、大直径救生孔钻探和救援提升模拟 3 方面试验,以救援成功率和时效性作为评价标准,对体系效能、救援装备和施工工艺进行了试验验证。

表 6 救援提升过程典型问题及应对措施
Table 6 Typical problems and countermeasures in the rescue lifting process

问题	原因	措施
救生舱遇卡遇阻	地层坍塌蠕变、固井质量差等原因可能造成套管变形，产生过大水平位移，严重时会影响救生舱的正常通过	预先下入救援钻孔多元信息侦测装置，评估救生舱通过可行性
救生舱旋转	提升下方过程中，卷扬滚筒收放钢丝绳，救生舱会随钢丝绳发生明显的旋转	预先释放钢丝绳的部分扭转应力，在上提下放过程中控制速度并适度停顿
安全绳起吊碰撞井壁	当采用安全绳直接提升时，无救生舱保护，易发生碰撞井壁情况	控制上提速度，被困人员穿戴护具
长距离通信故障	当救生舱跟随钢丝绳旋转时，通信线缆与钢丝绳之间易发生缠绕，造成通信故障	在上提下放过程中控制速度并适度停顿



图 5 应急响应现场
Fig.5 Emergency response site



图 6 大直径救生孔施工现场
Fig.6 On-site construction of a large-diameter lifesaving hole

试验预设救援情景，某日 6 时九顶山矿 301 巷道发生大面积垮塌，造成 3 人被困，无法开展井下救援，需实施地面钻探营救被困人员。矿难地点距离救援基地 70 km，救援深度 402 m，靶区为井底车场。已知岩层软硬互层，具体地层特征尚不明晰。

(1) 应急响应阶段。接到救援指令后，值班人员第一时间发出警报并启动应急预案，4 min 内应急救援队伍紧急集合完毕，23 min 内完成快反物资调集装车出动。专家技术人员达到现场用时 65 min，救援装备达到现场用时 133 min，途中完成了救援信息搜集、整理

和技术交流，到达现场 107 min 内完成了设备吊卸和钻前准备。应急响应试验采用跨区域救援层次化出动和钻前技术保障响应机制，应急响应总用时 4.45 h，以匀速衡量的响应效率为 15.73 km/h。参加山东平邑石膏矿“12·25”重大坍塌事故、山东栖霞笏山矿“1·10”重大爆炸事故救援的响应效率分别为 4.5 km/h 和 9.2 km/h，与典型案例的应急响应平均时效相比，该试验的响应效率提高 2.3 倍，对应急响应能力提升有重要指导意义。

(2) 钻探救援实施阶段。因地层情况不明确，首先使用 T200XD 车载钻机施工 $\phi 215.9$ mm 小直径资料孔，用时 31 h 完钻。明确地层从上到下为第四系，寒武系中统张夏组、毛庄组、徐庄组，下统馒头组；地层倾角 $3^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ，上部泥岩、砂砾岩段易掉块、缩径，灰岩含水层深度为 191 ~ 213、230 ~ 236 m，涌水量大，属复杂地层。根据资料孔数据，大直径救生孔采用四开井身结构，如图 7 所示。一开采用旋挖式钻进。基岩段先导孔准确中靶。二开采用“集束式潜孔锤反循环+牙轮钻头气举反循环”的组合钻进工艺，其中集束式潜孔锤反循环钻进采用孔口孔底联合密封法，钻进至 203 m 时涌水量达到 $36 \text{ m}^3/\text{h}$ ，转换为牙轮钻头气举反循环钻进工艺，二开平均机械钻速 2.2 m/h。三开采用集束式潜孔锤反

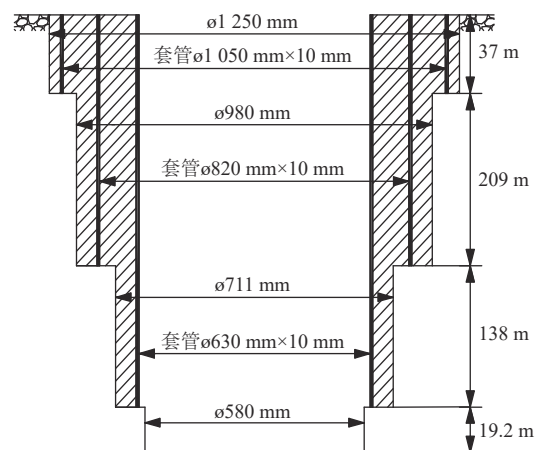


图 7 井身结构
Fig.7 Casing program

循环钻进,采用“一趟钻”技术,钻具组合为 $\phi 711$ mm/ 215.9 mm 集束式潜孔锤钻头+ $\phi 279$ mm 双壁钻铤+ $\phi 219$ mm 双壁钻杆+ $\phi 219$ mm 双壁浮动头,三开平均机械钻速 3.1 m/h。二开、三开固井均采用 G 级高标号水泥,密度 $1.90 \times 10^3 \sim 1.95 \times 10^3$ kg/m³,采取大泵量、连续泵送,固井质量合格。四开透巷段采用集束式潜孔锤反循环钻进。大直径救生孔完钻井深 403.2 m,平均机械钻速 2.5 m/h,完钻孔径 580 mm,孔底位移 0.45 m,侵入巷道流体约 8.7 m³,达到了大直径救生孔“结构优化、高效成孔、精准中靶、安全透巷”的施工要求。

(3) 救援提升模拟阶段,先下入救援钻孔多元信息侦测装置进行试验,做好卷扬、线缆等下入前准备工作,随后进行了 3 次救生舱往返试验,救生舱均无卡阻现象,下入过程平均用时 10 min,提升时放慢速度至 2 m/min,减轻了救生舱的旋转,提升平均用时 21 min,期间进行了模拟通话,顺利完成救援任务。

(4) 该试验按照抢险救援模式实施地面钻探救援,各工序时间占比如图 8 所示,总用时 311.95 h。在山东平邑石膏矿“12·25”重大坍塌事故救援中,自接受国家救援指挥中心紧急调遣到矿工成功升井历时 663 h,与此典型案例相比,该试验有效提升了大直径救生孔救援时效 47% 。资料孔和大直径救生孔施工克服了破碎、高涌水的复杂地层,使用钻井液正循环钻进、旋挖法、集束式潜孔锤反循环钻进、牙轮钻头气举反循环钻进等多种工艺措施,有效验证了工艺实用性。

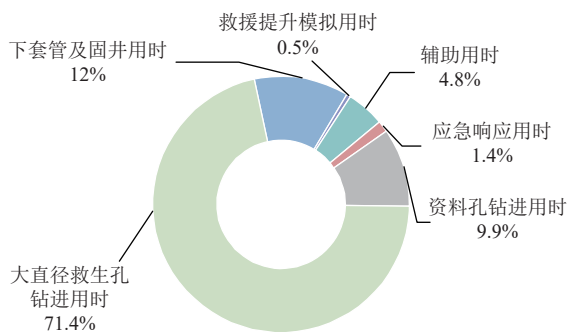


图 8 矿山地面钻探救援各工序用时占比

Fig.8 Time proportions of various processes for mine rescue through surface drilling

4 结论

(1) 矿山地面钻探应急救援大直径救生孔关键技术研究,完善了矿山地面钻探救援应急响应机制,形成了复杂地层条件下大直径救生孔高效成井的解决方案,矿山地面钻探应急救援整体时效性提升了 47% ,可满足 400 m 以浅矿山应急救援需求,为我国矿山灾害救援提供技术支撑。

(2) 就救援时效性而言,救援准备阶段的提升效率要优于救援实施阶段,且应急响应能力的提升途径更易实现,因此在矿山地面钻探救援工艺和装备现状提升不大的情况,矿山救援队更应着重提升应急备战和快速反应能力。而应急响应能力提升内容主要包括应急救援预案启动、响应动作和响应速度 3 个方面,通过采用跨区域救援层次化出动机制和钻前技术保障响应机制,应急响应效率可提高 2.3 倍。

(3) 大直径救生孔施工应遵循“结构优化、高效成孔、精准中靶、安全透巷” 4 项原则。在破碎、高涌水等复杂地层钻进时,可采用“集束式潜孔锤反循环+牙轮钻头气举反循环”的组合钻进工艺,当涌水量超过最佳涌水量,应考虑更换施工工艺,保障钻效最大化。通过针对钻井液、工艺和钻头等的改进措施,可解决大直径救生孔气举反循环井壁稳定性及岩屑上返问题。

(4) 本文所述试验的救援距离仍属于驻地周边“5 小时”应急响应范围,且采用的大直径救生孔钻探技术仍是以集束式潜孔锤反循环为主的多级扩孔成孔工艺,建议在后续研究中,开展救援距离 300 km 以上的应急演练,进一步验证长时间、远距离跨区域救援的应急响应能力,开展坍塌岩体条件下的顶管钻进和空气螺杆定向技术研究,进一步提升复杂地层条件下大直径救生孔钻进效率。

符号注释:

H 为安全透巷距离, m; h_p 为透巷前一开次裂隙延伸长度, m; h_c 为巷道顶板裂隙发育高度, m; t_{th} 为采用层次化流程的响应时间, h; t_{rt} 为采用常规流程的响应时间, h; t_{sh} 为采用层次化流程的到达现场时间, h。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [2] 陈卫明, 王家文, 凡东, 等. 矿山救援钻孔中井涌井漏事故预警预测[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 144-152.
CHEN Weiming, WANG Jiawen, FAN Dong, et al. Early warning and prediction of kicks and lost circulation accident during rescue drilling of mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 144-152.

- [3] 张彪, 康玉国, 黄勇, 等. 矿山救援地面生命保障孔高效成孔关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(11): 14-23.
ZHANG Biao, KANG Yuguo, HUANG Yong, et al. Key technologies of surface efficient life support hole forming for mine rescue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 14-23.
- [4] 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.
HUANG Junli. A review of foreign technical equipment on coal mine emergency rescue[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(9): 233-236.
- [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(10): 104-109.
DONG Zexun. Construction technology of No. 3 rescue borehole in Hushan Mine disaster, Shandong province[J]. *Drilling Engineering*, 2021(10): 104-109.
- [6] 凡东, 邹祖杰, 王瑞泽, 等. 地面救援车载钻机的研制[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(11): 35-44.
FAN Dong, ZOU Zujie, WANG Ruize, et al. Development of rescue truck-mounted drilling rig in ground emergency[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 35-44.
- [7] 常江华. 全液压车载钻机回转系统设计[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(2): 115-117.
CHANG Jianghua. Design of rotary system for all hydraulic truck-mounted drilling rig[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(2): 115-117.
- [8] 徐俏武, 张小新. 液动力猫道钻杆减阻控制优化研究[J]. *制造业自动化*, 2021, 43(11): 144-147.
XU Qiaowu, ZHANG Xiaoxin. Optimization of hydraulic power catwalk drill pipe drag reduction control system[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(11): 144-147.
- [9] 甘心, 殷琨, 何将福, 等. 救援井用大直径贯通式潜孔锤及钻头的研制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(6): 1844-1851.
GAN Xin, YIN Kun, HE Jiangfu, et al. Development and test of a large diameter hollow—Through DTH air hammer and drill bit used in rescue well[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6): 1844-1851.
- [10] 王立峰, 张晓昂, 徐影. 单体大直径空气潜孔锤钻井工艺研究及应用[J]. *中国煤炭地质*, 2021, 33(8): 65-67.
WANG Lifeng, ZHANG Xiaolang, XU Ying. Study on and application of unicum large diameter pneumatic DTH hammer drilling technology[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(8): 65-67.
- [11] 田宏亮, 邹祖杰, 郝世俊, 等. 矿山灾害生命保障救援通道快速安全构建关键技术与装备[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(11): 1-13.
TIAN Hongliang, ZOU Zujie, HAO Shijun, et al. Key technologies and equipment of quickly and safely building life support and rescue channel in mine disaster[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 1-13.
- [12] 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(1): 128-134.
ZHOU Jing. Research on drilling technology for mine disaster rescue life support holes[J]. *Drilling Engineering*, 2022(1): 128-134.
- [13] 武程亮, 滕子军, 赵后明, 等. 矿山钻探应急救援中生命通道的钻井技术以山东栖霞笏山金矿事故救援1号孔为例[J]. *钻探工程*, 2021, 48(增刊1): 206-210.
WU Chengliang, TENG Zijun, ZHAO Houming, et al. Drilling technology for the lifeline channel in mine emergency rescue a case study of the accident rescue of the Hushan Gold Mine in Qixia city, Shandong province[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(Sup.1): 206-210.
- [14] 山东省临沂市应急办. 山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故救援工作纪实[J]. *中国应急管理*, 2016(1): 47-48.
Linyi Emergency Management Bureau. On-the-spot report on rescue work of “12.25” gypsum mine collapse accident in Pingyi, Shandong Province[J]. *China Emergency Management*, 2016(1): 47-48.
- [15] 渠伟, 李新年, 张堃, 等. 大口径救援生命通道的施工工艺及钻具配置[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(增刊1): 44-48.
QU Wei, LI Xinnian, ZHANG Kun, et al. Construction technology and drilling tools configuration of large diameter life rescue channel[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(Sup.1): 44-48.
- [16] 唐永志, 赵俊峰, 丁同福, 等. 复杂地质条件下大直径救生孔成孔关键技术与工艺[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(4): 22-26.
TANG Yongzhi, ZHAO Junfeng, DING Tongfu, et al. Key technology and technique of large diameter rescue borehole drilling under complicated conditions geological[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(4): 22-26.
- [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): 277-284.
HAO Shijun, MO Haitao. Design and analysis of hole-forming technology for surface large diameter emergency rescue borehole[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 277-284.
- [18] 赵江鹏, 刘建林, 赵建国. 矿山大口径钻孔循环钻进技术研究[J]. *金属矿山*, 2018(1): 147-151.
ZHAO Jiangpeng, LIU Jianlin, ZHAO Jianguo. Research on reverse circulation drilling technology for large-diameter mine drilling hole[J]. *Metal Mine*, 2018(1): 147-151.
- [19] 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.
CHENG Lin, LI Yanli, YIN Jianguo, et al. Construction technology of 5# rescue hole in the collapse accident in Pingyi gypsum mine and the drilling tool configuration[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(5): 13-16.
- [20] 杨三军, 朱新菲, 谭波. 基于云模型的矿山应急救援队伍能力评估标准研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(11): 250-255.
YANG Sanjun, ZHU Xinfai, TAN Bo. Evaluation standard of mine emergency rescue force capability based on cloud model[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 250-255.
- [21] 邹逸江, 孔家辉, 斯港杰. 综合应急救援能力描述理论架构及提升内容研究[J]. *灾害学*, 2021, 36(2): 145-150.
ZOU Yijiang, KONG Jiahui, SI Gangjie. Research on theoretical framework and improvement content of capability description in comprehensive emergency rescue[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 145-150.
- [22] 顾海荣, 单增海, 王龙鹏, 等. 大直径钻孔救援提升装备研究进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(11): 45-57.

- GU Hairong, SHAN Zenghai, WANG Longpeng, et al. Research progress of lifting equipment for large-diameter borehole rescue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 45–57.
- [23] 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.
- MO Haitao, HAO Shijun, YE Genfei. Drilling technology with guide pipe in the second section pilot hole of large-diameter well in coal mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(4): 106–108.
- [24] 莫海涛. 集束式潜孔锤水柱密封反循环形成机理与过程控制研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- MO Haitao. Research on reverse circulation formation mechanism and process control of cluster-type pneumatic DTH hammer with water column seal downhole[D]. Beijing: China Coal Science Research Institute, 2021.
- [25] 王程林, 王明耀, 王翠. 矿山大口径钻孔钻探施工技术工艺研究[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(增刊 2): 26–28.
- WANG Chenglin, WANG Mingyao, WANG Cui. Research on construction technology of large diameter drilling in mines[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(Sup.2): 26–28.
- [26] 刘凯都, 刘书杰, 文敏. 物理化学作用下定向井井壁稳定分析[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(3): 64–67.
- LIU Kaidu, LIU Shujie, WEN Min. Stability analysis of directional wellbore wall under physicochemical action[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(3): 64–67.

(责任编辑 郭东琼)