

大口径地面钻孔救援技术与装备发展

韦海瑞^{1,2}, 孙红波³, 贾明浩^{1,2}, 温仲龙⁴, 朱芝同^{1,2}, 邵玉涛^{1,2}, 刘 广^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北 廊坊 065000;
3. 国家矿山应急救援大地特勘队, 北京 100040; 4. 宁夏宝丰能源集团股份有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要:大口径地面钻孔救援技术多次在矿难救援中得到成功应用。但由于地层的复杂性、装备及工艺适配性不足等各方面的限制,影响了地面钻孔救援的施工效率。本文以矿难大口径地面钻孔救援装备和大口径钻孔快速钻进技术为主线,分析了目前地面钻孔救援技术存在的主要问题,并针对性地提出了应对措施,包括研发双动力头钻机、跟管钻进技术、高效套管焊接技术、潜孔锤钻进技术以及反循环钻进技术等,以期今后矿难大口径地面钻孔救援施工技术及装备研发提供建议与技术基础,进一步提升钻孔救援的施工效率,加速构建科学的矿难救援体系。

关键词:矿难救援;大口径钻孔;地面钻孔救援;双动力头钻机;跟管钻进;潜孔锤钻进;反循环钻进

中图分类号:P634;TD77 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0143-07

Development of technology and equipment for large-diameter borehole surface rescue

WEI Hairui^{1,2}, SUN Hongbo³, JIA Minghao^{1,2}, WEN Zhonglong⁴, ZHU Zhitong^{1,2}, SHAO Yutao^{1,2}, LIU Guang^{1,2}

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2. *Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China;*

3. *Dadi Special Survey Team of National Mine Emergency Rescue, Beijing 100040, China;*

4. *Ningxia Baofeng Energy Group Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750001, China)*

Abstract: In recent years, the large-diameter borehole rescue technology has been successfully applied in mine disaster rescue for many times. However, the construction efficiency of drilling rescue is affected by the complexity of stratum, the lack of equipment and process adaptation. This paper takes large-diameter borehole rescue equipment and large-diameter rapid drilling technology as the main line, sorts out the main problems existing in borehole rescue technology at present, and puts forward corresponding countermeasures. Including the research and development of dual power head drilling rig, drilling with casing technology, high-efficiency casing welding technology, down-the-hole hammer drilling technology and reverse circulation drilling technology, etc. Hoping to provide suggestions and technical foundation for large-diameter borehole rescue and further improve the construction efficiency of borehole rescue and accelerate the construction of scientific mine rescue system.

Key words: mine disaster rescue; large-diameter borehole; surface borehole rescue; dual power head drilling rig; drilling with casing; down-the-hole hammer; reverse circulation drilling

0 引言

随着矿山尤其是煤矿开采深度的不断增加,矿

井透水、矿井瓦斯引发的矿难问题已成为制约矿山开发的关键因素之一^[1]。当矿难事故发生导致矿工被困

收稿日期:2023-01-30; 修回日期:2023-02-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.020

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号:DD20211421);科技助力经济2020重点专项“大口径成孔装备与施工工艺推广应用”(编号:SQ2020YFF0426318)

第一作者:韦海瑞,男,汉族,1988年生,工程师,机械设计专业,长期从事钻探设备研发及钻探工艺研究工作,河北省廊坊市金光道77号,422607217@qq.com。

引用格式: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.

WEI Hairui, SUN Hongbo, JIA Minghao, et al. Development of technology and equipment for large-diameter borehole surface rescue [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 143-149.

在井下巷道时,快速打通生命救援通道,减少矿难造成的人员伤亡和经济损失,是应急救援成功的关键。近年来,大口径地面钻孔救援技术受到国内外矿难救援界的广泛青睐,并多次在矿难救援中得到成功应用。2010年智利圣何塞铜矿坍塌事故,救援人员利用大口径地面钻孔救援技术成功救出33名矿工,用时69天。2015年山东省平邑县石膏矿坍塌事故,救援人员利用大口径地面钻孔救援技术成功救出4名矿工,用时36天。这也是国内首次利用大口径地面钻孔救援技术救出矿工,是我国矿难救援史上的里程碑事件。

大口径地面钻孔救援技术,通常采取“生活保障孔(小口径)+救生孔(大口径)”的模式进行。生活保障孔用于为被困人员提供维持生命的食物、水源、药品等,救生孔用于下放救生舱将井下被困人员安全救出。实践证明,大口径地面钻孔救援技术应用于矿难抢险救援具有不可替代的优势,但是目前国内针对大口径地面钻孔救援技术的研究尚处于探索起步阶段^[2],还有许多关键技术没有攻克。救生孔施工采用传统的泥浆正循环逐级扩孔工艺,施工效率低,难以满足救援的时效性要求;救援装备难以满足复杂地层下的多工艺钻进需求;复杂地层下空气钻进易出现塌孔、卡钻、涌水等问题。本文主要从地面钻孔救援装备和高效钻进技术两个方面存在的问题进行梳理和研究,提出我国大口径地面钻孔救援技术及装备的发展趋势和发展方向,为我国矿难应急救援技术及装备的进一步发展提供参考^[3-4]。

1 大口径地面钻孔救援技术存在的问题

1.1 钻机不满足救援的时效性需求

钻孔救援的地质条件和施工条件极其复杂,为了提高钻进效率,缩短救援时间,钻孔结构一般采用多开次设计,并配合多种钻进工艺进行施工。例如:2015年12月25日,山东平邑玉荣石膏矿采空区发生坍塌事故,救生孔采用四开设计(图1)。一开和

二开利用旋挖钻机施工,三开和四开采用RB-T90型钻机配合 $\varnothing 711$ mm潜孔锤钻进至设计深度。救援施工中,为了满足不同钻进工艺的需求,将旋挖钻机更换为RB-T90型钻机,施工现场钻机移位困难且两种钻机的控制接口、钻具扣型不通用,整个过程耗费了大量时间,极大地降低了救援的时效性^[5-7]。

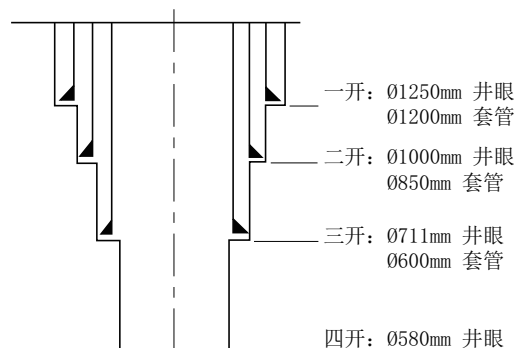


图1 山东平邑矿难救生孔钻孔结构

Fig.1 Shaft structure of rescue hole in Pingyi Mine, Shandong province

目前常用于钻孔救援的钻机为美国雪姆钻机(图2)、德国宝峨钻机(图3)以及部分国产化的全液压动力头车载钻机,主要借鉴煤层气开发领域的钻机,钻机参数源于石油钻机(见表1),钻机作业形式单一,钻机的扭矩和提升力较小,无法满足复杂地层、多工艺快速钻进的需求,研发用于矿难地面钻孔救援的多功能车载钻机迫在眉睫。



图2 美国雪姆 T200型车载钻机

Fig.2 Sherm T200 vehicle drilling rig

表1 常用救援钻机主要参数

Table 1 Main parameters of common rescue rig

名称	提升力/ kN	扭矩/ (kN·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	最大开孔直 径/mm	动力头通径/ mm	桅杆高度/ m	发动机功率/ kW	整机质 量/t
雪姆 T200XD	900	27	0~180	711	150	22	559.5	45
宝峨 RB-T90	900	36	0~325	711	150	23.8	708.8	60



图3 德国宝峨RB-T90型车载钻机

Fig.3 Bauer RB-T90 vehicle drilling rig

1.2 孔口设备自动化程度低

孔口设备主要包括铁钻工、动力猫道、钻杆盒及孔口卡瓦等装置。地面钻孔救援有其突出特点:钻机孔口空间狭窄、钻杆和套管规格多、钻杆和套管直径大(钻杆直径可达219 mm,套管直径可达600 mm)、单根钻杆和套管的重量大,钻杆和套管的移摆、对接、拧卸、起下钻等动作必须依靠孔口设备完成。目前救生孔施工时,各孔口设备单独控制、独立作业,设备缺乏逻辑判断能力,各工序之间串联衔接过程需要人为干涉,工序间的等待时间较长,单根起下钻耗时约3 min,施工效率低,无法满足应急救援的时效性要求。

1.3 套管焊接效率低

提高套管焊接和下套管的作业效率也是高效成孔的重要组成部分。钻孔救援施工中套管的规格多、直径大、质量大,难以实现钻杆同心夹紧和轴向伸缩的精确控制,导致套管在焊接时易出现倾斜或错位的问题。另外,在钻孔救援施工中,套管的焊接都是采用人工竖向工位焊接(图4),孔口的焊接空间小,手动焊接存在烫伤操作人员的风险,焊接过程中需要不停移动角度对套管四周进行焊接,焊接角度和焊接速度难以控制,导致焊缝不均匀、焊接质量参差不齐、焊接效率低。

1.4 复杂地层救生孔钻进效率低

1.4.1 泥浆正循环钻进工艺钻进效率低

目前,矿山大口径钻孔施工多采用成熟的泥浆正循环扩孔钻进工艺。近年来,虽然通过优选钻头、改进扩孔级序、增大泥浆泵排量等手段,正循环扩孔钻速不断提高,但是硬岩破碎效率低、大口径排渣困难的技术难题仍未解决,钻速普遍低于2 m/h,而钻孔救援施工要求导向孔平均机械钻速 ≥ 9 m/min,硬岩扩孔机械钻速 ≥ 3.3 m/h,传统正循环钻进工艺



图4 大口径套管人工焊接

Fig.4 Manual welding of large diameter casing

远远无法满足救援孔施工的时效性要求。

1.4.2 空气潜孔锤结构有待优化

为了避免冲洗液涌入巷道对被困矿工造成二次伤害,救援孔施工中尤其是透巷前不宜使用泥浆或水作为冲洗介质。空气潜孔锤因其高效的钻进速度和安全的冲洗介质,被认为是最适合于钻孔救援施工的钻具^[8-9]。在山东平邑石膏矿矿难救援中,潜孔锤钻进的平均钻速达到了4 m/h,最高钻速达到8 m/h。整个救援施工中,当地层坚硬稳定时,潜孔锤钻进高效稳定,但是当遇到松软地层时,锤头的气孔易被沙土堵塞造成潜孔锤无法工作^[10-12];在硬岩地层,当破碎的岩石颗粒直径 > 2 cm时,同样容易堵塞返渣接头和双壁钻杆,导致无法正常钻进^[13-15]。实践证明,现有的空气潜孔锤结构不能完全适应钻孔救援,急需进行钻孔救援高效钻具的优化设计^[16-19]。

1.5 缺乏科学的救援体系

目前我国在安全生产事故应急救援和相关体系建设方面远远落后于发达国家,发达国家应急救援体系涉及到各个层面以及各个环节,在事故的预防、预警和救援等整个过程都具有详细的程序流程和规范标准,为矿山的安全运营和发展提供保障。这正是我国矿难救援所欠缺的,导致我们在以往的救援工程中走了许多弯路。2015年山东平邑石膏矿坍塌矿难救援中,因不了解地层情况而一味地追求快而导致的再生事故频发,导致原计划15天完成的救援工作最终用时达36天;2021年山东笏山金矿爆炸事故救援中,由于救援钻机位置布置不合理,最终导致2个救生孔报废。

多次的实际救援工作证明,科学的救援体系是快速救援行动的指南,构建标准化的矿难应急救援体系是我国急需完成的工作。

2 大口径地面钻孔救援技术发展对策

2.1 地面钻孔救援施工装备

2.1.1 地面钻孔救援专用钻机研发

借鉴全套管成孔工艺,从矿难灾损形态出发,深入探究救援钻机的成孔机理,研发车载救援钻机。钻机最大提升力不低于 1350 kN,额定扭矩不小于 50000 Nm,保证钻机有足够的大口径作业能力和解卡能力。钻机应配置双动力头,内动力头驱动钻杆钻进时,外动力头可同时驱动套管反向旋转实现跟管钻进,起到护壁作用,从根本上避免塌孔、卡钻等事故的发生,也有利于保证钻孔垂直度和岩屑的顺利排出。双动力头跟管钻进工法成孔精度高,施工效率高,能广泛应对各种复杂地层,可解决复杂地层下大口径钻孔救援钻进效率低的技术难题^[20-22]

此外,结合钻孔救援的实际需求,救援钻机应通过多种辅助装置和高压管束的配置,兼容多种钻具,实现泥浆、空气、泡沫等多种循环介质的钻进应用和正、反循环两种循环模式的高效钻进和快速切换(图5)。

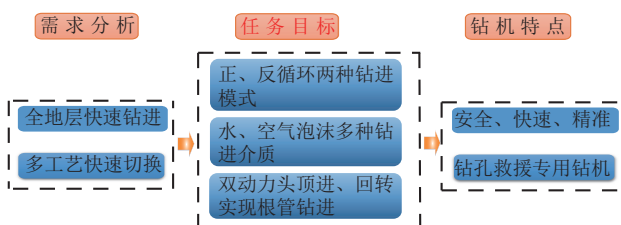


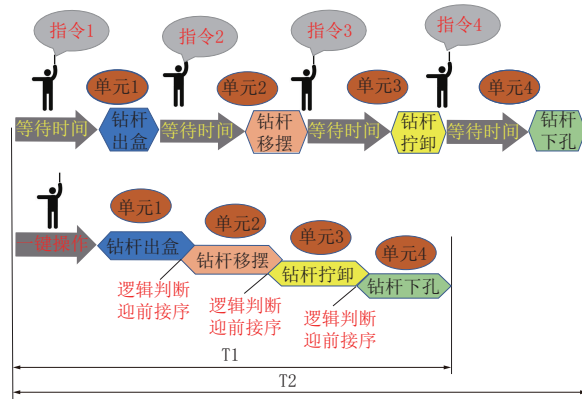
图5 钻孔救援专用钻机研发路线图

Fig.5 Development roadmap of special drilling rig in drilling rescue

2.1.2 孔口设备提速增效技术研发

通过研究作业姿态传感器应用技术实现孔口设备的作业位置识别能力,利用传感器、编码器、环形总线控制技术实现所有孔口设备的远程控制、关联控制及衔接控制。采用树状并行的程序设计理念研发孔口设备自动化、集成化控制系统,代替传统的线性工作流程,各孔口设备根据传感器反馈的数据、信号,进行逻辑判断和关联判定,实现衔接动作的迎前接序,有效缩短孔口设备各单元作业衔接等待时间,

极大地缩短孔口起下钻的辅助作业时间;起下钻作业采用集成化控制系统后与传统线性控制的时效性对比见图6,采用集成化控制系统后作业时间 T1 远小于传统作业时间 T2,极大地提高了作业效率。以钻孔深度为 800 m 为例,钻杆长度 9.5 m,按约 8 回次完成终孔,需要反复起下钻杆 760 根,常规起下钻杆约 3 min,通过孔口自动化作业集成化控制有序衔接,理论计算可实现单根起下节时 45 s,终孔起下钻作业节约辅助时间约 9.45 h。



T1:集成控制系统下钻杆下孔时间;T2:传统流程控制下钻杆下孔时间

图6 孔口设备传统线性控制与树状并行控制时效对比
Fig.6 Time contrast diagram of traditional linear control and tree parallel control for orifice equipment

2.1.3 大口径快速钻进配套钻具优化设计

大口径空气潜孔锤作为最适合钻孔救援的钻具目前已得到快速发展。吉林大学研制的 $\varnothing 445$ mm和 $\varnothing 660$ mm贯通式空气潜孔锤,最高机械钻速达 6 m/h;西安煤科院研制的 $\varnothing 850$ 、710、580 mm系列集束式潜孔锤在煤矿井中展开应用^[23],但潜孔锤工作受地层影响工作不稳定的难题没有得到根本解决。

潜孔锤冲击回转复合碎岩机理及关键机构优化需要进一步研究,主要体现在以下几个方面:

(1)运用岩体力学、损伤力学及断裂力学相关理论研究动静复合载荷下潜孔锤破碎岩石的过程,深入探究潜孔锤的高效碎岩机理;

(2)通过建立快速钻进过程中潜孔锤动力学模型,研究钻具结构形式和复合布齿方案对硬岩的小剪切、大剪切破碎方式的影响规律;

(3)开展不同种类高性能齿的冲击实验研究,优化冲击频率、轴向加压力与冲击力等参数,改进配气

室结构,研发可稳定应用于钻孔救援工况的潜孔锤,为钻孔救援快速钻进提供钻具保障。

2.1.4 大口径套管高效焊接技术研发

在救援工作中大口径套管焊接存在着易倾斜、易错位的问题。需要开展套管快速夹紧对中装置研究。采取双夹持器同步夹紧并精确控制套管的轴向位移,实现套管的精准快速对中。再通过模块化的卡瓦设计,实现对不同规格套管的尺寸适应。

针对大口径套管人工焊接空间狭小、作业效率低、焊接质量参差不齐等问题,借鉴水平定向穿越施工中机器人焊接管道的方案,引入焊接机器人,确定合理焊接角度、科学匹配焊接机构摆动频率与焊接速度,确定竖向焊接的焊接参数与工艺,开展室内模拟试验验证,建立多规格套管焊接程序数据库,实现根据不同规格的套管尺寸一键调用焊接程序进行全自动套管焊接(图 7),套管的焊接线速度大于 0.3 m/min,且焊接过程稳定,焊接质量可靠^[24]。

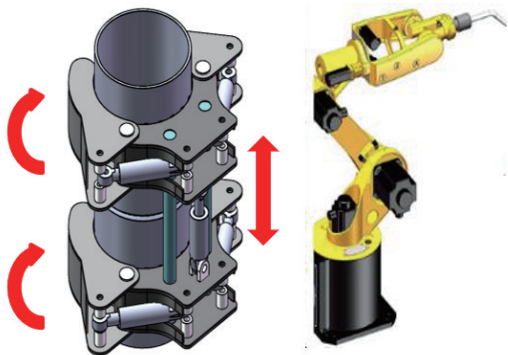


图 7 套管快速夹紧对中装置及全自动焊接机器人
Fig.7 The casing fast clamping device and automatic welding robot

2.2 地面钻孔救援高效钻进技术

2.2.1 气动潜孔锤反循环钻进工艺

气动潜孔锤反循环钻进工艺以压缩空气作为钻进介质,将其潜孔锤快速钻进技术和反循环高效排渣技术相结合,从根本上解决了快速钻进和排渣两大难题。气动潜孔锤反循环钻进原理是压缩空气经双壁钻杆环空通道进入潜孔锤,驱动锤头冲击碎岩钻进,废气携带岩屑经排渣管进入双壁钻杆内管上返排出,见图 8。

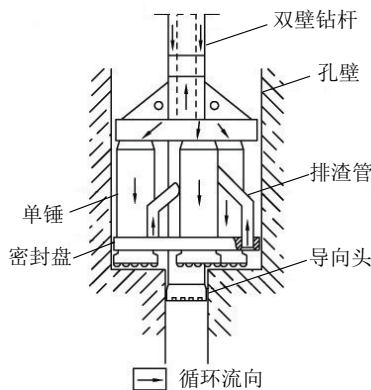


图 8 气动潜孔锤反循环钻进工艺示意
Fig.8 Schematic diagram of reverse circulation drilling process with pneumatic hammer

该工艺主要优点是钻进效率高、携带能力强、排渣速度快、复杂地层适应性强^[25];使用压缩空气作为钻进介质,可以避免透巷时钻井液涌入巷道对井下被困人员造成二次伤害;对压缩空气的需求量只取决于潜孔锤的额定风量,与钻孔直径无关(表 2);钻杆与孔壁之间无钻井介质流动,有利于不稳定地层的孔壁稳定。

表 2 气动潜孔锤正、反循环风量对比

Table 2 Comparison of forward and reverse circulation air volume of pneumatic hammer

钻孔直径/ mm	上返风速 /(m·s ⁻¹)	正循环			反循环		
		钻杆	环空面积/cm ²	风量/(m ³ ·min ⁻¹)	钻杆	环空面积/cm ²	风量/(m ³ ·min ⁻¹)
160	15.24	89	138.85	12.70	89/60	28.27	2.59
180	15.24	89	192.26	17.58	89/60	28.27	2.59
200	15.24	89	251.95	23.04	89/60	28.27	2.59

气动潜孔锤反循环钻进工艺在大口径救援应用中,最大的难点在于反循环难以建立,需要开展孔口密封、孔底软密封等配套装置研究,帮助建立大口径反循环通道,达到顺利钻进的最终目的。2015 年 12

月 25 日平邑矿难中,5 号井采用气动潜孔锤反循环钻进工艺后,整个钻速大幅度提升,平均钻速达 4 m/h,最高钻速达 8 m/h。

2.2.2 气举反循环钻进工艺

气举反循环钻进工作原理是将压缩空气通过双壁气水龙头、双壁钻杆的环状间隙进入混合器形成低密度的气水混合物后喷入内管,形成大量气泡,气泡在双壁钻杆内管内迅速上升的同时体积不断膨胀,压力降低,产生气举作用,将孔内的岩屑连续不断的带出地表。

气举反循环钻进效率主要取决于压缩空气的压力和风量以及混合器沉没在水中的深度,浅孔段由于混合器侵入水下的深度小,压力无法建立,无法采用此工法钻进。随着钻孔深度越深,压差越大,反循环清渣效果越好,特别适合于深孔钻进。

在钻孔救援中,先采用潜孔锤正循环作业快速钻透覆盖层,当孔深达到形成气举反循环的压力条件时采用气举反循环钻进,最大限度地提高救援时效。平邑石膏矿难救援中,首次采用气举反循环钻进工艺配合 $\phi 711/311$ mm反循环潜孔锤,在基岩段钻进时排渣效果良好,平均机械钻速达到2.1 m/h。

2.3 构建科学的矿难救援体系

通过对国内外典型救援案例的充分调研,掌握国内典型矿区的地层特征、救援装备的布局情况、钻孔救援工艺及技术,构建科学高效的矿难救援体系,确保在矿难发生后能快速确定救援方法和救援工艺,合理地调配救援装备,规范地开展救援工作。

根据地面钻孔救援体系化指导需求,建设全国主要矿区地质信息库、救援装备信息库、专家人才库、工艺方法库等数据库,并通过对不同矿区的地质信息深度分析,制定适应不同矿区的救援规范和救援标准。在矿难发生时,现场救援专家可以根据救援数据库提供的数据,科学、快速地进行救援方案确定、人员安排、设备调度以及救援实施,在最短的时间内完成救援工作。

3 结论

(1)地面钻孔救援施工中仍然存在着钻进效率低、应对复杂地层能力差、孔内事故频发等现实问题,需要以安全、高效构建救援通道为终极目标,广泛借鉴桩基工程、水平定向穿越工程、石油勘探、地质勘探等不同行业的大口径钻孔施工经验,加强模块化、轻量化、智能化救援钻机的研发与应用,满足双动力头根管钻进,复杂地层下多工艺钻进、多工艺快速切换的需求,努力提升大口径钻孔救援技术和

装备水平;

(2)进一步优化完善现有的大口径钻孔工艺,加强对反循环钻机成孔机理的研究,探究在复杂地层、破碎地层、孔内涌水等情况下如何建立连续、高效的反循环条件;

(3)国内应急救援相关的体系建设相对落后,需要专业人员从矿难的预防、预警、响应、救援、恢复等各个环节入手,加速制定整个救援过程的程序流程和规范标准。

参考文献(References):

- [1] 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.
WANG Yanli, XU Liuwan, WU Xiaolong, et al. Fast drilling technology of large diameter well for emergency rescue in mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling), 2015,42(8):1-5.
- [2] 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.
TIAN Hongliang, ZHANG Yang, HAO Shijun, et al. Technology and equipment for rapid safety construction of emergency rescue channel after mine disaster[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5):29-33.
- [3] 高广伟,张禄华.大直径钻孔救援的实践与思考——以山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故救援为例[J].中国应急管理,2016(3):74-75.
GAO Guangwei, ZHANG Luhua. Practice and thinking of large diameter borehole rescue—Take rescue work of “12·25” gypsum mine collapse accident in Pingyi of Shandong as an example[J]. China Emergency Management, 2016(3):74-75.
- [4] 薛倩冰,梁楠,韩丽丽,等.大陆科学钻探工程技术发展动态及趋势分析[J].钻探工程,2021,48(12):1-6.
XUE Qianbing, LIANG Nan, HAN Lili, et al. Development trend of continental scientific drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):1-6.
- [5] 周兢.煤矿大口径工程井钻井技术研究[J].中国煤炭地质,2016,28(1):58-62.
ZHOU Jing. Study on coalmine large diameter engineering well drilling[J]. Coal Geology of China, 2016,28(1):58-62.
- [6] 杨富春.超大口径钻孔施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):25-30.
YANG Fuchun. Super large diameter drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Solid Drilling and Tunneling), 2014,41(4):25-30.
- [7] 张小连,熊亮,熊菊秋,等.大直径工程井气举反循环钻进施工常见问题与改进对策[J].中国煤炭地质,2015,27(10):49-52.
ZHANG Xiaolian, XIONG Liang, XIONG Juqiu, et al. Common problems and improving measures in large diameter engineering well

- airlift reverse circulation drilling[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(10):49-52.
- [8] 程林.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. Construction technology of No.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.
- [9] 徐培元,曹伟,王立峰,等.山西中村煤矿抢险救援快速钻井施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):278-280.
- XU Peiyuan, CAO Wei, WANG Lifeng, et al. Construction technology of rapid drilling for emergency rescue in Zhongcun Coal Mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):278-280.
- [10] 殷其雷.潜孔锤反循环钻进技术在某水电站的试验应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3):961-968.
- YIN Qilei. Application test of DTH hammer reverse circulation drilling technique in a hydropower station[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(3):961-968.
- [11] 黄勇,殷琨,朱丽红.气动潜孔锤反循环钻井最小注气量模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(5):65-69.
- HUANG Yong, YIN Kun, ZHU Lihong. The minimum gas injection volume model of pneumatic DTH hammer reverse circulation drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(5):65-69.
- [12] 胡振阳,白鸿雁,殷琨.潜孔锤反循环钻进技术在复杂地层中的试验研究[J].地质与勘探,2011,35(5):94-96.
- HU Zhenyang, BAI Hongyan, YIN Kun. Experimental researches of DTH reverse circulation drilling technique in complex strata[J]. Geology and Prospecting, 2011, 35(5):94-96.
- [13] 李亮.平邑石膏矿坍塌事故救援成功后的几点思考[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):281-286.
- LI Liang. Discussion of Pingyi Gypsum Mine collapse accident rescue[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):281-286.
- [14] 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):22-26,39.
- 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, 39.
- [15] Murphy R R., Kravitz J., Peligren K., et al. Preliminary report: Rescue robot at Crandall Canyon, Utah mine disaster[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008:2205-2206.
- [16] 石智军,刘建林,李泉新.我国煤矿区钻进技术装备发展与应用[J].煤炭科学技术,2018,46(4):1-6.
- SHI Zhijun, LIU Jianlin, LI Quanxin. Development and application of drilling technique and equipment in coal mining area of China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4):1-6.
- [17] 孙万兴.深井大尺寸套管固井技术在塔里木油田的应用[J].石油钻采工艺,2015(5):54-57.
- SUN Wanxing. Application of large size casing cementing technology about deep wells in Tarim Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015(5):54-57.
- [18] 唐永志,傅家德,李万峰,等.深部大采高超长工作面开采技术研究及展望[J].煤炭技术,2015,34(12):15-17.
- TANG Yongzhi, FU Jiade, LI Wanfeng, et al. Prospect and research on mining technology in ultra long deep large height fully mechanized mining face[J]. Coal Technology, 2015, 34(12):15-17.
- [19] 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.
- Emergency Office of Linyi, Shandong. Report on rescue work of “12·25” gypsum mine collapse accident in Pingyi of Shandong[J]. China Emergency Management, 2016(1):47-48.
- [20] 蒋一军,叶小蓉.SD系列多功能旋挖钻机双动力系统[J].工程机械,2012,43(3):17-20,98.
- JIANG Yijun, YE Xiaorong. Dual power system of SD series multi-functional rotary drilling rig[J]. Construction Machinery, 2012, 43(3):17-20, 98.
- [21] 沈保汉,刘富华.第六讲捷程MZ系列全套管钻孔咬合桩施工工艺(3)[J].施工技术,2006,35(10):92-93.
- SHEN Baohan, LIU Fuhua. The technological process of the cased secant piles of Jiecheng MZ series (3)[J]. Construction Techniques, 2006, 35(10):92-93.
- [22] 谢勋,王钰.全套管钻孔咬合桩的施工及质量控制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(8):76-79.
- XIE Xun, WANG Yu. Construction and quality control of full casing bored occlusive pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(8):76-79.
- [23] 宋继伟,蒋国盛,苏宁,等.贵州省复杂地层地热深井钻探工艺[J].地质与勘探,2018,54(5):1024-1037.
- SONG Jiwei, JIANG Guosheng, SU Ning, et al. Drilling technology of deep geothermal wells for complex strata in Guizhou province[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1024-1037.
- [24] 黄龙鹏.长输管道全位置自动焊接工艺研究[J].装备制造技术,2020(4):25-30.
- HUANG Longpeng. Research on full-position automatic welding technology for long distance pipelines[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(4):25-30.
- [25] 翟立新,杨建利,王雷浩.潜孔锤反循环钻进工艺在拉拉铜矿的试验应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):66-69.
- ZHAI Lixin, YANG Jianli, WANG Leihao. Experimental application of DTH hammer reverse drilling technology in Lala Copper Mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(1):66-69.