

矿山灾害应急救援生命保障孔钻井工艺研究

周 兢^{1,2,3}

(1. 北京大地高科地质勘查有限公司, 北京 100043; 2. 国家矿山应急救援大地特勘队, 北京 100043;
3. 中国煤炭地质总局, 北京 100038)

摘要:近年来国内外开展的救援钻孔实践推动了矿山和地下工程应急救援技术的发展,探索出的“小直径生命保障孔+大直径救生孔”模式是进行矿山和地下工程灾害救援的一种有效途径。本文以矿山灾害救援地面生命保障孔钻井工艺为主线,分析了小直径生命保障孔井身结构设计和套管选用方法;分别介绍了泥浆正循环钻进工艺和空气潜孔锤正循环钻进工艺,并以山东栖霞笏山金矿生命救援孔钻进实例分析了当前生命保障孔钻井工艺难点。依据轨迹设计理论,针对笏山金矿救援3号生命保障孔出现的偏斜问题,创新提出了超短距离螺旋纠偏技术,并取得了良好的应用效果,为后续生命保障孔施工积累了宝贵经验。

关键词: 矿山灾害; 应急救援; 生命保障孔; 轨迹控制; 钻进

中图分类号: P634; TD77 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)01-0128-07

Research on drilling technology for mine disaster rescue life support holes

ZHOU Jing^{1,2,3}

(1. Beijing Dadi High-tech Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100043, China;
2. National Mine Emergency Rescue Daditekan Team, Beijing 100043, China;
3. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China)

Abstract: Emergency rescue technology in mines and underground works has developed rapidly in recent years, and it has been found that the mode of the small diameter life support hole combined with large diameter rescue wells is an effective way to carry out mine disaster rescue. With the drilling technology for life support holes in mine disasters as the main subject, this paper analyzes the typical structural design of the small diameter life support hole and casing selection, describes mud direct circulation drilling, air DTH hammer reverse circulation drilling, and presents drilling difficulties in the case of the rescue of Qixia Hushan Gold Mine. In view of the deviation of the No. 3 life support hole in the rescue, based on the trajectory design theory, the ultra-short-distance spiral correction technology was innovatively proposed. The method has achieved good results, and provides valuable experience for subsequent life support hole construction.

Key words: mine disaster; emergency rescue; life support hole; trajectory control; drilling

0 引言

煤矿开采和地下工程施工过程中,由于地下爆炸^[1]、透水^[2]、顶板灾害^[3]等造成地层坍塌,地下作业人员容易被困。事故发生后,及时打开救援通道,

提供必要的给养和心理支持,是进行成功施救的重要因素。以往地下工程和矿山事故救援过程,多采用地面或者井下直接大口径钻进^[4]的方法进行透巷,由于破岩断面大,钻进效率低、施工时间长,往

收稿日期:2021-09-24; 修回日期:2021-12-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.017

基金项目:国家重点研发计划课题“地面生命保障孔精准定位及快速成孔技术”(编号:2018YFC0808201)

作者简介:周兢,男,汉族,1982年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质勘查、钻孔救援技术研究及管理工作,北京市石景山区玉泉路59号,zhoukeke2003@163.com。

引用格式: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.

ZHOU Jing. Research on drilling technology for mine disaster rescue life support holes[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 128-134.

往最后透巷成功时,人员已经遇难,延误了宝贵的救援时间,传统的救援方式已无法满足当前救援要求,迫切需要新的救援理念,大幅降低事故人员伤亡率。

生命保障孔是从地面向可能存在被困人员的事事故区域施工小口径钻孔,一般终孔直径 ≤ 152 mm,其功能主要是与井下被困人员取得联系,了解井下灾区和人员情况,为被困人员提供新鲜空气、饮用水、食物、药品等维持生命的基本物品。2015年我国平邑石膏矿坍塌事故^[5-6],4名被困矿工被成功救援的实践表明,“小直径生命保障孔+大直径救生孔”的模式是进行矿山灾害救援的一种有效途径^[7]。小直径生命保障孔快速成孔、精准透巷成为此救援体系实施的前提,现有矿山应急救援技术多来自于石油钻井、煤田勘查钻探等,应用于矿山救援领域虽然取得了很大的进步^[7],从我国开展的几次钻进救援生命保障孔的施工实践来看,我国在快速钻进工艺和井眼轨迹控制方面,仍然还有很多关键性技术尚未攻克^[8],尤其对松散覆盖层、强含水层、裂隙发育等复杂地层难以实现精准、快速钻进。

因此,我们开展了矿山灾害救援地面生命保障孔钻井技术的研究,在分析生命保障孔基本井型、直井结构、套管选用等基础上,从泥浆正循环钻进工艺、空气潜孔锤正循环钻进工艺、钻进实例等方面总结了生命保障孔钻井工艺。依据轨迹设计理论,针对山东栖霞笏山金矿救援3号生命保障孔出现的偏斜问题,创新提出了超短距离螺旋纠偏技术,并取得了良好的应用效果,为后续生命保障孔施工积累了宝贵经验。

1 生命保障孔井筒构建

1.1 生命保障孔井身结构设计

合理的井身结构,就是按照现场救援要求,根据被困人员可能位置、钻遇地层情况、当前钻井设备现状、钻井工艺技术水平、钻井工具条件及施工能力等一系列因素,设计出满足钻井及抢险救援要求的套管程序,井身结构设计合理与否,是关系到该井能否精准透巷、完成救援任务的首要问题。为减少下套管用时时间,地面生命保障孔采用套管程序力求简单,考虑到钻井安全性及实用性的总体特点,通常采用三开结构设计,图1为典型的直井型生命保障孔井身结构。

一开表层套管以封固松散层、漏失层及易垮塌

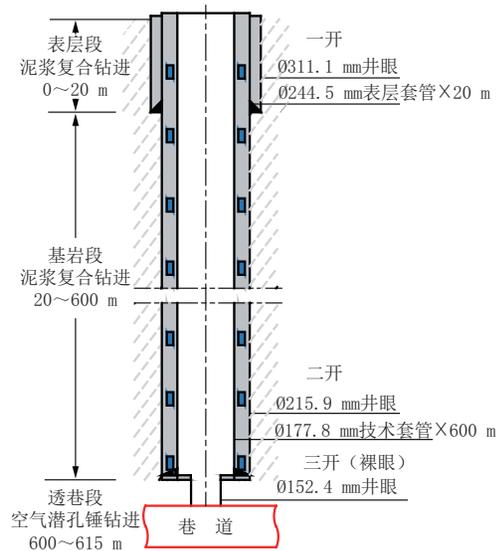


图1 典型地面生命保障孔井身结构

Fig.1 Typical structural design of life support holes

层等复杂地层为主,防止井下事故,采用大尺寸钻头钻进,保证开钻井眼、完钻井眼相对较大,为后续井段钻头和套管的选择留有余地,一般情况选择 $\Phi 311.1$ mm钻头开孔,下入 $\Phi 244.5$ mm表层套管,一般情况下不固井,直接进行二开钻进。

二开钻进,以防斜、防漏、防塌为主,快速精准钻进至距离巷道 $10\sim 15$ m处停钻,一般情况选择 $\Phi 215.9$ mm钻头,下入 $\Phi 177.8$ mm技术套管,如果地层涌水量小,可选择不固井,涌水量大时,必须进行固井。

三开钻进,二开套管下入后,无论固井与否,井筒中充满泥浆或清水,继续采用泥浆钻进透巷,会导致泥浆或清水灌入巷道中,对被困人员造成二次伤害。因此在进行三开钻进时,必须先下入小直径常规钻杆至井底,接入空压机将井筒中泥浆吹干,用空气潜孔锤继续钻进 $10\sim 15$ m实现透巷。

由于井深较浅,套管程序较为简单,复杂地层条件下,钻孔宜为四开结构,一开孔径为 $\Phi 445$ mm,下入 $\Phi 340\text{mm}\times 12.00$ mm套管;二开孔径为 $\Phi 311.1$ mm,下入 $\Phi 244.5$ mm $\times 8.94$ mm套管;三开孔径为 $\Phi 215.9$ mm,下入 $\Phi 177.8$ mm $\times 8.05$ mm套管;四开(透巷)孔径为 $\Phi 152.4$ mm。

1.2 生命保障孔套管选用

生命保障孔的套管扣型、钢级、壁厚等需做到统一标准,方便展开快速救援作业,通常选用市场上常见规格,便于快速部署。技术套管可以选用无缝钢

管、螺旋钢管或石油钢管。套管内径应满足施工井径的需要,套管壁厚以能保证安全下入井内和钻井施工中不发生套管破损、挤毁变形的需要为要求。技术套管材质应符合以下要求:石油钢管应符合 API 5A 规范;无缝钢管和螺旋钢管应符合《钢结构设计标准》(GB50017-2017)、《普通流体输送管道用埋弧焊钢管》(SY/T5037-2018)、《螺旋钢管》(GB/T9711.1)等有关规定,一般应优选强度较高、塑性较好、刚性较强、可焊性好的普通碳素钢和低合金钢。

成井套管直径宜首选 API 标准的石油钢管,应采用丝扣连接,且符合 API 5A 规范,其次选用无缝钢管,采用丝扣连接或电焊焊接连接,螺旋钢管宜采用电焊焊接连接。采用电焊焊接时宜采用埋弧焊或手工电弧焊,条件具备时,宜配合使用熔化极活性气体保护电弧焊,套管壁厚 >6 mm 时,需在套管端面打设坡口,坡口角度 40° 左右、深度为 $3/5$ 壁厚,焊接材料材质应尽可能与套管材质相一致,成井套管连接部位应牢固、同心、密封良好。

2 生活保障孔钻进工艺分析

在松散覆盖地层,较软地层中和孔内水位较浅时,宜采用泥浆正循环钻进工艺,保证钻进安全性和钻进速度。地表出露岩石地区及岩石较硬的地层,宜采用空气潜孔锤正循环钻进工艺。根据矿山常见地层特点、救援要求、井身结构、技术水平等制定生活保障孔钻井工艺。

2.1 泥浆正循环钻进工艺

各开钻具组合设计宜为:

(1) 一开钻具: $\text{O}311.1$ mm 牙轮钻头+ $630\times 4\text{A}10$ 转换短节+ $\text{O}165$ mm 无磁钻铤 $\times 1$ 根+ $\text{O}159$ mm 钻铤 $\times 4$ 根+ $4\text{A}11\times 410$ 转换短节+ $\text{O}127$ mm 钻杆串,下入 $\text{O}244.5$ mm $\times 8.94$ mm 套管;

(2) 二开钻具: $\text{O}215.9$ mm PDC 钻头+ $\text{O}165$ mm 单弯 1.5° 螺杆+ $\text{O}165$ mm 定向短节(MWD)+ $\text{O}165$ mm 无磁钻铤 $\times 1$ 根+ $\text{O}159$ mm 钻铤 $\times 4$ 根+ $4\text{A}11\times 410$ 转换短节+ $4\text{A}11\times 410$ 转换短节+ $\text{O}127$ mm 钻杆,下入 $\text{O}177.8$ mm $\times 8.05$ mm 套管。

钻进参数按照表1要求,钻压、转速参数可根据实际钻情况优选,原则上在上部地层采用高转速,适中钻压,在下部地层采用低转速,大钻压。

表1 钻井工艺参数

Table 1 Drilling parameters

井段	钻头尺寸/ mm	钻头 类型	钻压/ kN	转速/ ($r\cdot\text{min}^{-1}$)	排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)
一开	311.1	三牙轮	20~60	50~80	>30
二开	215.9	PDC	20~80	20~40	>24

2.2 空气潜孔锤正循环钻进工艺

选用空压机时,在充分参考潜孔锤规定风压值的同时,也要考虑因管路消耗、克服水柱背压、启动潜孔锤的压力及维持空气或空气泡沫循环的压降等部分组成的额外压力^[9],同时,需考虑较长管路中气体压缩性和泄露影响。一般来说,较高的空气压力将提高潜孔锤的工作效率,空气压力还决定了潜孔锤的钻井深度,钻井深度越深,所需空气压力越大^[10]。潜孔锤钻进所需上返风速应尽可能达到 20 m/s,一般情况下不小于 15 m/s,否则孔内岩屑多,会严重影响钻进效率。如果出水量 >10 m^3/h ,需要在空气加入泡沫施工,必要时通过外置空压机增加风量、通过增压机增加风压。

采用 $\text{O}215.9$ mm 孔径的潜孔锤钻进,最佳压力在 15 kN 左右。一般来说,按潜孔锤直径计算,每增加 1 cm 应增加压力 $0.5\sim 0.8$ kN,可根据地层情况适当调节。最优的钻头回转速度,以获得有效的钻速、平稳的操作和经济的钻头寿命作为一般要求,潜孔锤旋转存在着最优转角,其值为 11° ,最优转角与转速、冲击频率之间的关系为:

$$A=n\times 360/f \quad (1)$$

式中: A ——最优转角, $(^\circ)$; n ——转速, r/min ; f ——冲击频率,次/ min 。

2.3 基于笏山金矿生命救援孔钻进实例的钻进工艺分析

小口径生活保障孔施工目前采用国产钻机完全可行,如正远 SL1000 型钻机和金科 JKS800 型钻机,最大提升力在 $370\sim 520$ kN,最大钻进直径 $450\sim 800$ mm,扭矩约为 20 $\text{kN}\cdot\text{m}$,整机质量在 17 t 左右。在笏山矿难钻孔救援中,由于当前矿山救援队配备了一些大吨位的钻探设备,如进口雪姆车载钻机 T200、徐工 XSC1200 型等钻机,应急现场也经常会出现大钻机钻小孔的现象,这几款钻机最大提升力在 $900\sim 1200$ kN,最大钻井直径均在 820 mm 以上,最大扭矩达 30 $\text{kN}\cdot\text{m}$,整机质量达 $45\sim 55$ t。

笏山矿难救援一共设计了4口生命保障孔,设计孔深从578~629 m不等,终孔直径均为152 mm。其中3号钻孔采用正远SL1000型钻机,配合气动空气潜孔锤进行钻进,取得了较好的钻进效果。但是由于该型钻机动力头采用的钻杆无法与现场纠偏仪器配套,后又更换雪姆T200型钻机采用“螺杆马达+随钻测斜仪(PMWD)”进行定向钻进纠偏,随后利用空压机吹出钻井泥浆,再次使用潜孔锤进行钻进顺利透巷。本次生命救援孔钻进中泥浆正循环钻进和气动潜孔锤钻进的方法均被采用,最后必须要气体钻进完成透巷工作,但是两者之间的切换耗时费力,当前生命保障孔钻进工艺还不成熟,相关的钻探装备的适应性也不强,需要针对矿山救援的特点,研发合适的钻探工艺和配套装备。

3 生命保障孔轨迹控制

3.1 生命保障孔轨迹要求

目前生命保障孔井型以直井型为主,生命保障孔垂直井型宜控制井眼全角变化率 $\leq 2^\circ/30$ m。在地面施工条件差或有井下绕障需要的情况下,则需采用定向井型。应急救援时,生命保障孔施工存在地面条件限制、复杂地质条件制约、地层自然偏斜因素的影响等原因时^[11],救援人员无法实现救援井的快速、精准完成,如果钻进措施不当还会引起事故甚至危及被困人员^[12]。因此面对地面条件限制和复杂地层时^[13],要实现垂直钻进和精准钻进,开展救援区定向钻井最优轨迹设计和轨迹控制是必不可少的。

现场救援情况复杂多变,往往出现钻井工艺与地层的不适应性问题^[14-15],考虑到钻遇松散覆盖层、强富水含水层、裂隙发育等异常地层,复杂的地质条件下,不利于造斜段施工,尽量把造斜段设定在地质条件稳定、可钻性又比较好的井段,根据地面钻孔位置与井下待救援位置的距离与深度的分析,选择不同的轨迹进行设计施工,有利于快速地施工到目的位置,实现小孔径救援与井下的受困人员取得联系。

定向井下放救援设备过程中,容易遇阻遇卡^[16-17]、也存在井壁不稳定的问题,宜控制定向井井眼全角变化率 $\leq 8^\circ/30$ m。生命保障孔孔深 > 800 m,一般不使用旋转导向系统,且透巷过程中需保证井下人员安全,快速钻进的要求下,定向精度不

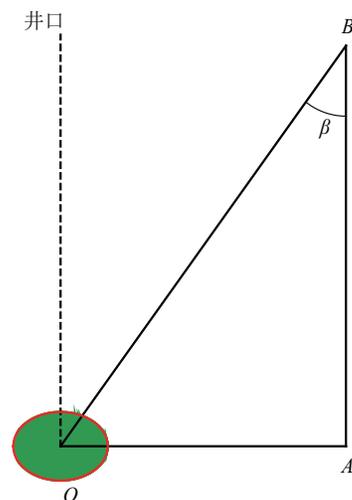
易保证,容易打偏,丧失黄金救援时间。井眼轨迹控制时,每钻进30 m测量孔斜及方位角,易造斜地层及其他原因应加密测量,孔斜及方位角超设计要求时,应及时采取螺杆定向纠斜措施,纠斜后应反复修井,确保满足井身轨迹全角变化率要求。

3.2 生命保障孔超短距离螺旋纠偏技术

2021年1月,山东栖霞市笏山金矿在基建施工过程中,回风井发生爆炸事故,造成22人被困井下,经全力施工,11人获救,这是近年我国发生的最大的一次井下事故^[18-19]。该事故救援过程中,3号生命保障孔前期采用空气潜孔锤正循环工艺钻进施工^[20-21],钻进至521.10 m时,井底水平位移7.41 m,此时与透巷距离仅剩60 m,必须进行纠偏作业^[22]。

3号生命保障孔施工过程中,0.00~520.10 m段井斜角 $0.1^\circ\sim 1.5^\circ$,井深520.10 m处井底位移动达7.41 m,究其原因是钻孔偏斜的方位基本维持在 $220^\circ\sim 280^\circ$,虽然井斜很小,但随着井段不断加深,井底水平位移不断累加,最终导致了井斜小、井底水平位移偏大的问题。由图2可知: $OA=AB\times \tan\beta=OB\times \sin\beta$,距离OA和AB是固定不变的,要达到纠偏目的,首先须具备足够的纠偏距离(OB)和井斜角(β),然后再采取降斜稳斜的方式进行纠偏。

先增斜,再降斜,势必会出现钻柱弯曲,随着井眼弯曲强度的增大,造成2个问题:一是钻柱在井眼



β —井斜角;OA—井底水平位移;AB—偏斜点(520.10 m处)到靶点垂向距离;OB—偏斜点(520.10 m处)到靶点距离

图2 纠偏距离计算示意

Fig.2 Schematic diagram of the correction distance

内摩阻和扭矩逐渐增大,钻柱起钻负荷及下钻阻力大,定向滑动钻进时钻压施加难度大,钻速很低;二是钻柱受到的轴向力也逐渐增大,如果钻柱受到的轴向力 \leq 临界屈曲载荷,钻柱是安全的,相反,当高于此临界值时,由于钻具中和点以上及以下钻具分别受拉和受压,如果钻杆承受不了轴向压缩载荷,会因较小的抵抗轴向阻力而失效变弯,导致屈曲。如图3所示,若轴向压力大大超过了临界屈曲载荷,造成钻具弯曲直至断钻杆等井下事故^[12]。

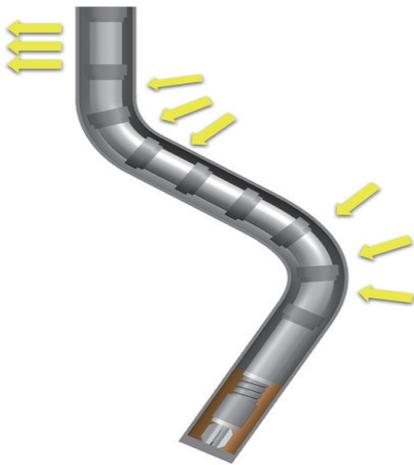


图3 山东栖霞笏山金矿救援3号孔纠偏钻具受拉受挤示意
Fig.3 Forces on the correction drilling string in the No. 3 hole in Qixia Hushan Gold Mine of Shandong

根据现场钻井轨迹优化设计和摩阻扭矩分析,采用泥浆驱动弯螺杆+MWD复合钻井工艺进行纠斜,在超短距离情况下,单纯用调整井斜的方法进行强行纠偏作业,井眼曲率变化(“狗腿”度)大,钻柱在井眼内摩阻和扭矩高,起下钻柱风险高,滑动钻进速度慢甚至无法钻进,后续下套管作业施工困难,过大的井眼曲率还会使钻柱轴向压力超过临界屈曲载荷而折断,出现井下事故。最终决定采用如图4所示的超短距离螺旋纠偏技术,纠偏钻具组合为: $\varnothing 152.4$ mm PDC钻头+ $\varnothing 120$ mm单弯螺杆 1.5° + $\varnothing 105$ mm无磁钻铤(内置MWD)+ $\varnothing 89$ mm加重钻杆+ $\varnothing 89$ mm钻杆。

纠偏过程中在增井斜、降井斜的同时,围绕垂直井眼轴线,进行扭方位作业,延长纠偏距离,降低纠斜段井眼曲率变化,减小井眼内钻柱摩阻扭矩和钻

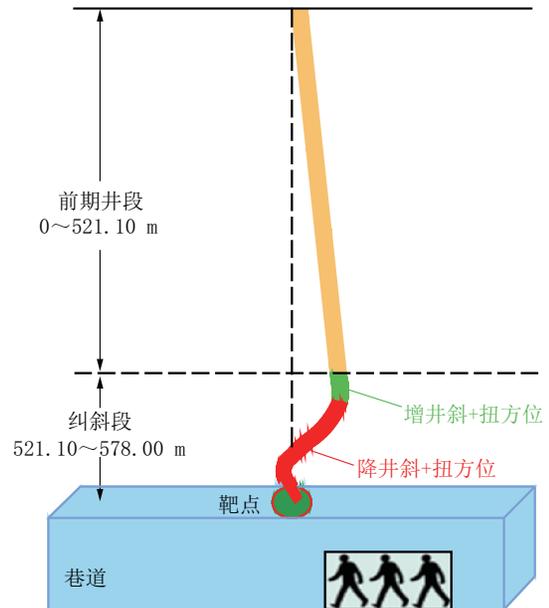


图4 超短距离螺旋纠偏技术示意

Fig.4 Ultra-short-distance spiral correction drilling

柱轴向压力,以达到井眼平滑、钻柱安全的目的。如图5所示为井眼轨迹变化,通过纠斜,3号孔井底水平位移减小至1.24 m,完成精准透巷和下套管作业,取得了良好的纠偏效果,圆满完成了生命保障孔钻进任务。

4 结论与展望

近年来国内外开展的救援钻孔实践,探索和推动了矿山应急救援技术的发展,补充了矿山灾害应急救援方法,成功救援实践表明,“小直径生命保障孔+大直径救生孔”的模式是进行矿山灾害救援的一种有效途径,生命保障孔是矿山应急救援中重要物资保障和人员沟通的重要通道。针对山东栖霞笏山金矿救援3号生命保障孔出现的偏斜问题,创新提出了超短距离螺旋纠偏技术,并取得了良好的应用效果,为后续生命保障孔施工积累了宝贵经验。

但通过对山东笏山金矿事故救援暴露出当前生命保障孔快速钻进工艺以及配套装备还不成熟,未来需要转变思维,针对复杂地层,加强气动潜孔锤快速钻进工艺及机具研制;研发快速、简便、可靠的定向气动钻进工艺和控制机具,确保透巷安全性;研制配套的生命保障孔快速钻进装备。

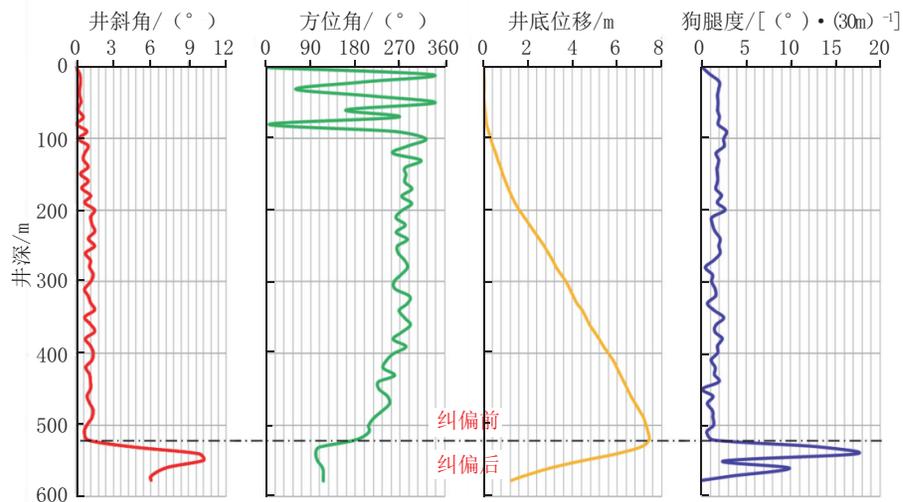


图5 山东栖霞笏山金矿救援3号孔井眼轨迹变化

Fig.5 Hole trajectory change of the No. 3 hole in Qixia Hushan Gold Mine of Shandong

参考文献 (References):

- [1] 王贺剑,李冬生,李旺年,等. 适应复杂煤层救援钻进工艺的钻具快速拧卸装置[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 157-160.
WANG Hejian, LI Dongsheng, LI Wangnian, et al. A rapid screw-off device for drilling tools suitable for rescue drilling of complex coal seams [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 157-160.
- [2] 李加莲,池宏. 基于煤矿透水事故应急响应时效性的水泵布局鲁棒优选问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(7): 192-201.
LI Jialian, CHI Hong. Research on Robust optimization problem of pump layout based on emergency response timeliness of coal mine water inrush accident [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7): 192-201.
- [3] 杜龙龙,宋宜猛,冯宇峰. 煤矿顶板事故分析与防治对策研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(10): 50-54.
DU Longlong, SONG Yimeng, FENG Yufeng. Research on analysis and prevention countermeasures of coal mine roof accidents [J]. China Coal, 2020, 46(10): 50-54.
- [4] 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.
- [5] 杨涛,杜兵建. 山东平邑石膏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.
YANG Tao, DU Bingjian. Construction technology of large diameter rescue borehole in Pingyi Gypsum Mine Disaster of Shandong [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(5): 19-23.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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(S1): 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(S1): 44-48.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王志坚. 矿山钻孔救援技术的研究与务实思考[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(1): 5-9.
WANG Zhijian. Considering and researching of drilling technol-

- ogy in mine rescue[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(1):5-9.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 钱自卫, 姜振泉, 吴慧蕾. 煤矿救援快速钻井系统技术分析[J]. 煤矿安全, 2010,41(9):116-118.
QIAN Ziwei, JIANG Zhenquan, WU Huilei. Study of quick drilling system technology of mine rescue [J]. Safety in Coal Mines, 2010,41(9):116-118.
- [16] 郑锋, 张建荣, 房旭, 等. 定向井完井多级划眼清洁技术研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019,16(2):35-38.
ZHENG Feng, ZHANG Jianrong, FANG Xu, et al. Research of multistage reaming cleaning technology in directional well completion[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019,16(2):35-38.
- [17] 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.
- [18] 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.
DONG Zexun. Construction technology of No.3 rescue borehole in Hushan mine disaster, Shandong province [J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):104-109.
- [19] 杜兵建, 周兢, 肖明国, 等. 笏山矿难应急救援钻孔施工技术[J]. 钻探工程, 2021,48(S1):195-199.
DU Bingjian, ZHOU Jing, XIAO Mingguo, et al. Drilling technology for the rescue borehole in Hushan mine disaster [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):195-199.
- [20] 周兢, 杜兵建, 阴慧胜, 等. 钻探技术在矿山灾害事故应急救援中的应用[J]. 钻探工程, 2021,48(S1):200-205.
ZHOU Jing, DU Bingjian, YIN Huisheng, et al. Application of drilling technology in emergency rescue in mine disasters [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):200-205.
- [21] 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(S1):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(S1):206-210.
- [22] 田彦强. 矿井事故垂直救援孔快速钻进技术研究[J]. 钻探工程, 2021,48(S1):211-215.
TIAN Yanqiang. Application of fast drilling technology in vertical drilling rescue for mine accidents [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):211-215.

(编辑 李艺)