



移动扫码阅读

石智军,许超,李泉新,等. 煤矿井下 2 570 m 顺煤层超深定向孔高效成孔关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020,48(1):196-201.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.01.025
SHI Zhijun,XU Chao,LI Quanxin,*et al.* Key technology of high efficiency hole formation for ultra deep directional hole with long 2 570 m along seam in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology,2020,48(1):196-201.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.01.025

煤矿井下 2 570 m 顺煤层超深定向孔高效成孔关键技术

石智军¹,许超¹,李泉新¹,陈殿赋²,郝世俊¹,姚克¹

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.神华神东煤炭集团有限责任公司 保德煤矿,山西 保德 036600)

摘要:针对现有定向钻进技术装备不能满足超长工作面瓦斯大区域治理对井下顺煤层定向钻孔深度要求的问题,提出利用泥浆脉冲无线随钻测量系统替代有线随钻测量系统进行钻进参数测量,避免了有线随钻测量系统信号传输受通缆钻杆影响的问题;基于近水平钻孔回转钻进的“岩屑楔”理论,通过优化螺杆钻具结构及调整钻进工艺参数实现复合钻进状态下钻孔增、降、稳倾角调节,进一步提高了复合钻进进尺比例,使钻进系统压力明显降低。结合保德煤矿生产需要施工完成主孔深度 2 570 m、孔径 120 mm 的顺煤层超长定向钻孔,钻孔平均日进尺达到 200 m 以上,通过对该超深孔施工关键装备适应性分析可知:钻进装备稳定可靠,无线随钻测量系统信号在超深钻孔中传输稳定,复合钻进倾角控制效果良好,系统压力参数下降明显,说明该套技术装备能满足煤矿井下 2 500 m 顺煤层超深定向钻孔的施工要求。研究成果可为顺煤层超深定向钻孔施工和超长工作面瓦斯超前治理提供重要借鉴。

关键词:泥浆脉冲;测量系统;定向钻孔;复合钻进;超深钻孔

中图分类号:TD41;P634 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)01-0196-06

Key technology of high efficiency hole formation for ultra deep directional hole with long 2 570 m along seam in underground coal mine

SHI Zhijun¹, XU Chao¹, LI Quanxin¹, CHEN Dianfu², HAO Shijun¹, YAO Ke¹

(1.Xi'an Research Institute, China Coal Technology Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2. Baode Coal Mine, Shenhua Shendong Coal Group Co., Ltd., Baode 036600, China)

Abstract: In view of the problem that the existing directional drilling technology and equipment can not meet the requirements for the depth of in-seam directional borehole in the large area of gas control in the ultra long working face. It is proposed to use the mud pulse wireless MWD system instead of the wired MWD system to measure the drilling parameters, so as to avoid the problem that the signal transmission of the wired MWD system is affected by the cable drill pipe. Based on the theory of “cuttings wedge” in rotary drilling of near horizontal borehole, the inclination of increase, decrease and balance borehole angle under the condition of compound drilling is adjusted through optimizing the structure of DHM and adjusting the drilling parameters, which further improves the proportion of compound drilling footage and makes the drilling system pressure significantly lower. In combination with the production needs of Baode Coal Mine, the in-seam ultra-deep directional borehole with the depth of 2 570 m and the diameter of 120 mm is completed, and the average daily drilling footage is more than 200 m. According to the adaptability analysis of the key equipment of the ultra-deep borehole, it can be seen that the drilling equipment is stable and reliable, the signal transmission of wireless MWD system is stable in the ultra deep drilling, the angle control effect under the condition of compound drilling is good, and the system pressure parameter drops obviously, which shows that the technical equipment can meet the construction requirements of the ultra deep directional drilling of 2 500 m coal seam under the full coal mine. It provides an important reference for the construction of ultra deep directional drilling along the coal seam and the advanced gas control in the ultra long working face. The drilling process shows that the drilling equipment is stable and reliable, the signal of wireless MWD system is stable in the ultra-deep borehole, the angle of control inclination of compound drilling is effective, and the pressure parameters of the drilling system is obviously reduced. It shows that the technology and equipment can meet the construction requirements of the in-seam ul-

收稿日期:2019-07-29;责任编辑:赵 瑞
基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-003-001)
作者简介:石智军(1955—),男,陕西省富平人,研究员,博士生导师,硕士。

tra-deep directional borehole beyond 2 500 m underground coal mine.The research can provide an important reference for the construction of in-seam ultra-deep directional borehole and the comprehensive advanced control of gas in the area of ultra-long working face.

Key words:mud pulse; measurement system; directional borehole; compound drilling; ultra-deep borehole

0 引 言

为降低矿井掘进率,增加资源采出率,尽可能减少搬家倒面,缓解工作面接续紧张状况,现阶段综采工作面推采长度不断增加,多数煤矿工作面推采长度达 3 000 m 以上。在煤矿区域瓦斯治理中,一般在工作面形成前,从其两侧的盘区大巷向工作面内部沿走向施工顺煤层定向长钻孔进行瓦斯抽采,并要求两侧钻孔能够全面覆盖工作面,避免因钻孔深度不够造成工作面中间部位出现抽采盲区,从而大幅度提高工作面瓦斯抽采效率,有效缓解工作面抽-掘、抽-采接替矛盾^[1]。

超长工作面瓦斯大区域超前治理,要求顺煤层定向钻孔深度普遍达到 1 800 m 以上,为实现该目标,2017 年在保德矿二盘区 81210 工作面成功试验完成了 2 个深度 2 000 m 以上的顺煤层超深定向钻孔,最大钻孔深度达到 2 311 m、孔径 120 mm,创造了当时井下定向钻孔孔深世界纪录^[1-3]。

但在后期的生产中,随着定向钻杆服役期限延长,其中心通缆密封零件逐渐出现老化、变形等现象,导致随钻测量信号传输能力逐渐降低,最终难以满足实际生产需要^[4];另外,现有的单弯无稳螺杆钻具在复合钻进中对钻孔轨迹倾角、方位角保持效果良好,钻孔轨迹基本呈直线延伸,这样便需要一定量的滑动钻进进尺来纠正轨迹,但过多的滑动定向进尺不利于实现深孔与高效钻进^[5-6]。

针对上述 2 个问题,此次工程示范分别采用泥浆脉冲无线随钻测量系统与复合钻进倾角控制技术,成功完成了深度 2 570 m 顺煤层超深定向钻孔,再次创造了井下定向钻孔最深世界纪录,对于促进井下超长工作面瓦斯治理技术发展具有重要意义^[7]。

1 工程概况

为实现保德煤矿超长工作面煤层瓦斯超前治理,此次工程示范在总结原 2 311 m 超深定向钻孔成功经验的基础上,通过技术改进、完善,解决有线系统信号传输以及滑动钻进影响钻进深度和效率的问题,使顺煤层超深定向孔深度普遍能够达到 2 000 m 以上,工程示范目标深度达到 2 500 m 以上。

1.1 工作面概况

钻孔布置在保德煤矿二盘区规划的 81209 工作面,该工作面为远期规划工作面,基本沿南北走向,呈东高、西低趋势;工作面规划区走向长度约 3 340 m,倾向长 240 m,位于二叠系山西组下部,开采 8 号煤层,煤层厚约 8 m,走向两端的盘区大巷已形成,为超深定向孔施工提供了良好条件。

该工作面煤层原始瓦斯含量为 4.87~8.96 m³/t,钻孔所在 81209 工作面推算原始瓦斯含量为 8.48 m³/t。工作面直接顶为砂质泥岩,灰色至深灰色,水平层理,层厚约 8 m,可作为钻孔探顶的标志层;伪底为灰褐色薄层泥岩,遇水膨胀变软,厚 0.10~0.20 m,直接底为泥岩、砂质泥岩,半坚硬,泥质胶结,厚 2.0 m,可作为钻孔探底的标志层。

1.2 钻孔设计

钻场位于保德矿 81209 工作面北侧的五盘区集中一号回风大巷,钻孔设计长度 2 500 m,水平至 81209 工作面运输巷平距约 42 m,钻孔水平位移约 135 m,如图 1 所示。

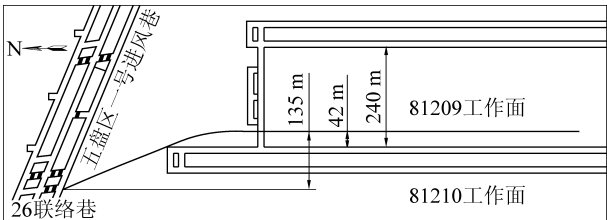


图 1 2 500 m 超深钻孔平面设计

Fig.1 Plane design of 2 500 m ultra-deep borehole

1.3 施工装备配套

根据以往超深定向孔施工经验,选配 ZDY12000LD 大功率定向钻机,该钻机最大输出转矩 12 000 N·m、给进/起拔力 250 kN,可满足滑动定向钻进、回转定向钻进以及复合定向钻进等多种钻进工艺要求^[8];配套 BLY460/13 泥浆泵车可实现泵量 0~460 L/min 无级调节,泥浆泵额定输出压力 13 MPa^[9];采用 YHD2-1000 有线随钻测量系统,装备配套 $\phi 89$ mm 通缆定向钻具,定向钻进一次成孔 $\phi 120$ mm,具体配套如下:

定向钻机	ZDY12000LD
泥浆泵车	BLY460/13
随钻测量装置	YHD2-1000(A)
螺杆马达直径/mm	89

定向钻杆直径/mm	89	最大传输距离仅为 1 566 m ^[13-14] ,能否满足 2 500 m
定向钻头直径/mm	120	以上钻孔随钻测量有待现场验证。

2 泥浆脉冲无线随钻测量系统

为解决通缆钻杆影响有线随钻测量系统信号传输质量问题,利用 YHD3-1500 泥浆脉冲无线随钻测量系统进行施工,并对泥浆脉冲无线随钻测量系统在超深钻孔中信号传输的稳定性进行检验。

YHD3-1500 泥浆脉冲无线随钻测量系统总体分为孔口单元和孔底单元,其中孔底单元由测量短接、电池筒、驱动、脉冲发生器、过滤钻杆等组成,孔口单元包括:防爆计算机、防爆键盘、防爆存储器、压力变送器以及随钻测量软件等^[11-12]。

泥浆脉冲无线随钻测量系统工作流程如图 2 所示,单回次钻进完成后,停止泥浆泵向钻杆内供水,测量短接的流量开关复位,探管判断确认停泵,开始采集钻孔轨迹倾角、方位角以及工具面向角等参数并进行编码;当泥浆泵启动向孔内供水时,测量短节流量开关打开,探管判断确认开泵,将测量的数据传递给驱动短节,驱动短节根据数据信号编码控制电磁阀的动作使脉冲发生器改变钻杆内水力通道的流道面积,限制部分冲洗液流入钻杆内通孔,从而产生泥浆压力正脉冲,并被安装在泥浆泵的出水口的压力变送器检测出来,传递到防爆计算机,防爆计算机内系统软件按预先设定的编码规则对压力脉冲信号进行解调,得出正确的钻孔轨迹和定向钻具状态数据。数据传输完成后,探管测量短节自动停止供电,脉冲发生器复位钻具内部通道恢复原状,泥浆泵压力恢复到正常值,开始正常钻进^[11-12]。

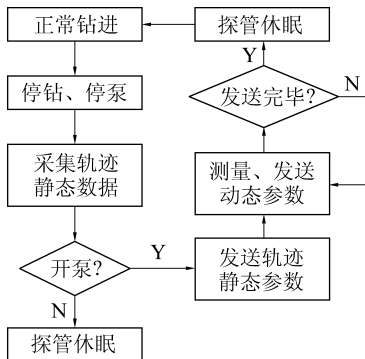


图 2 井下泥浆脉冲随钻测量系统工作流程
Fig.2 Workflow diagram of downhole mud pulse while drilling measurement system

井下泥浆脉冲随钻测量系统采用水压脉冲的方式进行信号传输,摆脱了测量系统信号传输对通缆钻杆的依赖,但是当前井下泥浆脉冲随钻测量系统

3 超深孔高效定向钻进工艺

3.1 复合定向钻进技术

当前煤矿井下随钻测量定向钻进技术主要是基于螺杆钻具孔底动力碎岩。早期井下定向钻进采用纯滑动定向钻进工艺,钻进过程中泥浆泵泵送高压水通过钻杆内通孔进入螺杆马达,从而驱动螺杆马达转子带动钻头旋转碎岩,同时钻机推动钻具向孔内滑动,这样螺杆钻具弯头保持稳定朝向,实现钻孔轨迹连续人工定向控制,因此它是一种连续造斜的定向钻进技术。滑动定向钻进工艺具有钻孔轨迹平滑性差、钻孔排渣效果差等局限性,相比较传统回转钻进,滑动定向钻进孔内钻具摩阻显著增大、钻压传递效率大幅降低,钻进系统压力随孔深增加快速升高,不利于深孔安全、高效钻进^[15-16]。

为了解决滑动定向钻进的技术局限,提出了复合钻进,复合钻进过程中螺杆马达转子带动钻头旋转碎岩,钻机施加轴向给进力的同时还带动钻杆进行回转。相对滑动定向钻进而言,复合钻进钻头转速更高、碎岩动力更强、辅助作业更简单,因此综合钻进效率更高;同时,复合钻进钻具的持续转动发挥着辅助排渣作用,孔内钻屑堆积更少、孔壁更加光滑,复合钻进孔段弯曲强度显著降低,从而有效低了孔内钻具摩阻力,提高了深孔钻进钻压传递效率,降低了钻进风险^[15-16]。

复合钻进过程中,钻杆的持续转动导致螺杆钻具弯头朝向不断变化,因此无法进行钻孔轨迹控制,通过力学计算以及试验数据分析得知,采用单弯无稳螺杆钻具在复合钻进时钻孔轨迹倾角、方位角基本保持不变,钻孔保直效果良好,为了充分发挥复合钻进技术优势,同时实现定向钻进,利用复合钻进轨迹自然弯曲规律,形成了“滑动纠偏+复合保直”的钻进工艺技术,即复合定向钻进技术^[5-6,16]。

3.2 复合定向钻进倾角控制技术

现有复合定向钻进技术的滑动纠偏,既包括方位角的纠偏,也包括倾角的纠偏。为实现井下定向钻孔深度的更大突破,在保证钻孔轨迹控制精度的情况下,应尽量增大复合钻进进尺比例,为了实现这一目标,提出了复合钻进倾角控制技术,即利用复合钻进代替滑动钻进进行倾角纠偏控制。倾角控制包括增倾角、降倾角和稳倾角 3 种工况。

3.2.1 增倾角控制机理

为了实现复合钻进增倾角,对现有单弯无稳螺

杆钻具结构进行改进,如图 3 所示,新螺杆钻具定子弯接头上设置 1 个螺旋稳定器,直径 $\phi 114$ mm,略小于定向钻头。根据煤矿井下近水平钻孔回转钻进岩屑对钻孔轨迹弯曲影响的“岩屑楔”理论,在以较高的钻进速度和较低的钻杆转速钻进时,钻屑粒径、钻屑量增大,易在钻孔下缘发生堆积,当工具面旋转至 $(0^{\circ}, 90^{\circ})$ 和 $(270^{\circ}, 360^{\circ})$ 区间时,螺杆弯头朝上,稳定器受堆积钻屑的支撑形成支点,增加钻头向上造斜的趋势,当工具面旋转至 $(90^{\circ}, 270^{\circ})$ 区间时,受钻屑支撑作用,限制了钻头向下侧向切削能力,从而总体上产生了增倾角的效果^[17]。

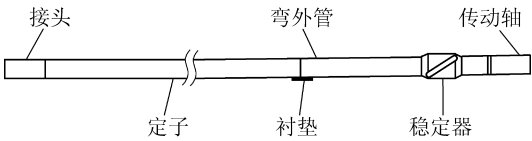


图 3 新型螺杆钻具结构示意图

Fig.3 Structural sketch of new screw drill tool

3.2.2 降倾角控制机理

复合钻进中,螺杆钻具在转动过程中,弯头朝向周期变化,工具面向角旋转至 $(90^{\circ}, 270^{\circ})$ 区间时,钻头正面切削孔底煤岩体的同时,钻具组合在重力作用下,钻头外出刃^[18-20](图 4)会切削孔壁下缘煤岩体,使钻孔有向下偏斜的趋势,此时可以通过降低钻进速度、提高钻杆回转速度的方法,提高钻头下切位移量与正向进尺量的比值,从而达到降低钻孔倾角的目的。

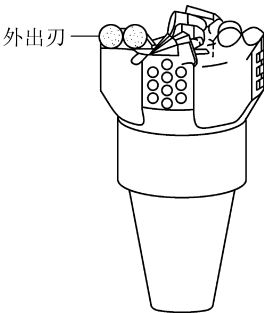


图 4 $\phi 120$ mm 定向钻头结构示意图

Fig.4 Structural sketch of 120 mm directional drill bit

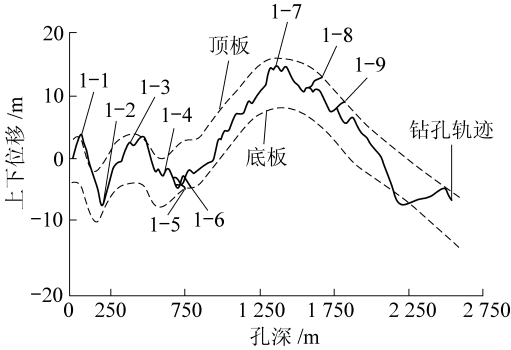
3.2.3 稳倾角控制机理

增倾角控制的“低转速、高钻速”工艺特点与降倾角控制的“高转速、低钻速”正好相反,因此它们之间必然存在一个稳倾角的中间状态。

4 施工情况及效果分析

2019 年 1 月,在保德煤矿 81209 工作面,历时 20 天,成功完成了主孔深度 2 570 m 的顺煤层超深定向钻孔,又一次创造了井下顺煤层定向钻孔孔深

纪录。单孔施工总进尺 3 164 m,开分支孔 9 个,钻孔探顶 8 次、探底 4 次,煤层钻遇率 97%,孔径 120 mm,正常钻进情况下平均日进尺达到 200 m 以上,钻孔轨迹剖面如图 5 所示。



1-1—1-9 为分支孔编号

图 5 2 570 m 顺煤层超深定向钻孔轨迹剖面

Fig.5 Track Profile of ultra-deep directional borehole drilling along coal seam of 2 570 m

4.1 关键装备适应性分析

4.1.1 钻机

钻进过程中,钻机主要作用是提供回转动力和给进、起拔力。当孔深达到 2 000 m 以上时,钻机复合回转压力、滑动给进压力和复合给进压力最高分别为 14、26 和 6.1 MPa,除了滑动给进压力接近极限压力 28 MPa,其他 2 项参数均有较大的富余量,分别达到 50% 和 78%。

4.1.2 泵车

泥浆泵流量和压力随孔深变化如图 6 所示,在等流量条件下,受沿程阻力影响,泥浆泵压随孔深增加基本呈线性增长,当孔深达到 1 700 m 时,泥浆泵压接近额定值压力 13 MPa,为避免泥浆泵压力达到极限,将流量下调至 300 L/min 以下,孔深达到 2 100 m 以上时钻进流量稳定在 250 L/min,能够满足钻进及排渣需要。

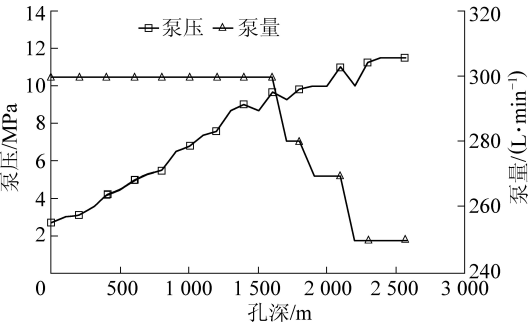


图 6 泥浆泵泵量和压力随孔深变化曲线

Fig.6 Variation curves of pump volume and pressure of mud pump with hole depth

4.1.3 测量系统

钻进开始采用 YHD2-1000(A) 有线随钻测量

系统,当钻进至 1 824 m 时,受通缆钻杆影响,有线随钻测量系统已无法稳定传输信号,信号电压随孔深变化曲线如图 7 所示,信号衰减系数为新钻杆的 2.65 倍^[1]。

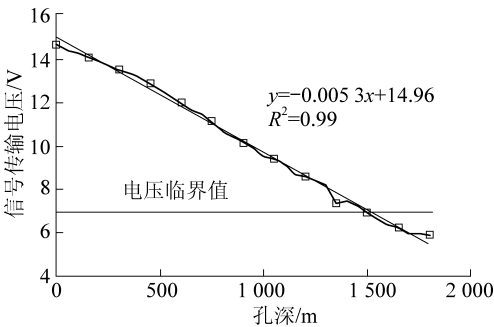


图 7 信号电压随孔深变化曲线

Fig.7 Signal voltage variation curve with hole depth

随后起钻更换 YHD3-1500 泥浆脉冲无线随钻测量系统并完成后续孔段施工,成功测量至 2 570 m,期间测量解调误码率低于 3%,信号传输稳定。

4.2 复合钻进效果分析

通过试验得出利用复合钻进动力头转速和给进速度的调节实现钻孔轨迹倾角的调节模式。根据试验数据,在煤层中,当复合钻速高于 60 r/min、给进速度低于 0.25 m/min,倾角降低;当复合钻速低于 40 r/min、给进速度低于 0.4 m/min,倾角上升;当复合钻速约 40 r/min、给进速度约 0.3 m/min,倾角基本保持不变。复合钻进控制倾角造斜率可以达到 0.15°/m,完全可以满足定向钻进轨迹控制的需要。

通过复合钻进倾角控制,复合钻进比例明显提高,该钻孔复合钻进占比达到 76%,较 2 311 m 钻孔提高 11%,回转压力也由 19 MPa 降低至 14 MPa,有效降低了钻进摩阻。

4.3 瓦斯抽采数据分析

钻孔施工过程中,定期对钻孔的瓦斯涌出量进行统计,如图 8 所示,随着钻孔深度增加,钻孔瓦斯涌出量也逐渐增大。

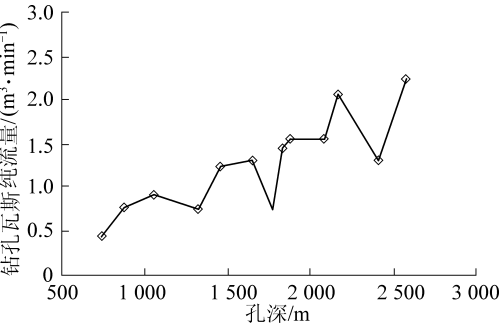


图 8 瓦斯流量随孔深增加变化趋势

Fig.8 Trend of gas flow rate with increase of hole depth

5 结 论

1)采用大功率定向钻进装备及泥浆脉冲无线随钻测量系统,配合使用复合定向钻进工艺完成了煤矿井下 2 570 m 顺煤层超深定向钻孔,对于解决超长工作面瓦斯超前治理提供了可靠的技术与装备保障。

2)通过优化螺杆钻具结构及调整钻进工艺参数实现了复合钻进倾角有效控制,提高了复合钻进孔段长度占比,使钻进系统压力明显降低,对超深孔安全、高效钻进发挥了重要作用。

3)对超深孔施工关键装备适应性分析可知,除了钻机滑动给进压力接近极限外,其他压力参数均有较大的富余量,说明该套技术装备能满足 2 500 m 超深定向钻孔施工要求。

参考文献 (References) :

[1] 李泉新,石智军,许超,等.2 311 m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术[J].煤炭科学技术,2018,46(4):27-32.
LI Quanxin,SHI Zhijun,XU Chao,et al.Efficient drilling technique of 2 311 m ultra-long directional borehole along coal seam[J]. Coal Science and Technology,2018,46(4):27-32.

[2] 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.

[3] 姚克,田宏亮,姚宁平,等.煤矿井下钻探装备技术现状及展望[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):1-5,14.
YAO Ke,TIAN Hongliang,YAO Ningping,et al.Present situation and prospect of drilling equipment technology in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2019,47(1):1-5.

[4] 李泉新.矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置研发及应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):193-197.
LI Quanxin. Development and application of mine mud pulse wireless MWD device[J]. Coal Geology & Exploration,2018,46(6):193-197.

[5] 许超.煤矿井下复合定向钻进技术优势探讨[J].金属矿山,2014,43(2):112-116.
XU Chao.Discussion on superiority of compound directional drilling technology in underground coal mine[J]. Metal Mine,2014,43(2):112-116.

[6] 许超.基于复合钻进技术的煤层瓦斯抽采定向钻孔施工[J].煤矿安全,2015,46(4):130-133.
XU Chao.Direction drilling construction of coal seam gas drainage based on compound drilling technology[J].Safety in Coal Mines. 2015,46(4):130-133.

[7] 石智军,田宏亮,田东庄,等.煤矿井下随钻测量定向钻进使用手册[M].北京:地质出版社,2012.

[8] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下 1800m 水平定向钻进技术

与装备[J].煤炭科学技术,2015,43(2):109-113.

SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Underground mine 1800m horizontal directional drilling technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):109-113.

[9] 张占强. 煤矿井下大功率泥浆泵车研制与应用[J]. 能源与环保, 2017, 39(7):51-54.

ZHANG Zhanqiang. Development and application of high power mud pump vehicle in underground coal mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(7):51-54.

[10] 李泉新. 碎软煤层复合定向钻进技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11):101-106.

LI Quanxin. Research and application of drilling technology combined rotary with direction in soft-fragmentized coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11):101-106.

[11] 李泉新. 煤矿井下复合定向钻进及配套泥浆脉冲无线随钻测量技术研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2018.

[12] 方俊, 谷拴成, 石智军, 等. 矿用泥浆脉冲无线随钻测量装置及其应用[J]. 工矿自动化, 2019, 45(2):12-17.

FANG Jun, GU Shuancheng, SHI Zhijun, et al. Mine-used mud pulse wireless measurement while drilling device and its application[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2):12-17.

[13] 姚克. ZDY12000LD 大功率定向钻机装备研发及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6):164-168.

YAO Ke. Development and application on ZDY12000LD high-power directional drilling equipment[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6):164-168.

[14] 方鹏, 姚克, 邵俊杰, 等. 履带式中深孔定向钻进装备设计关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4):71-75, 87.

FANG Peng, YAO Ke, SHAO Junjie, et al. Research on key technology of the design of tracked directional drilling equipment for medium-deep borehole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4):71-75, 87.

[15] 刘建林, 李泉新. 基于轨迹控制的煤矿井下复合定向钻进工艺[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2):78-81.

LIU Jianlin, LI Quanxin. Composite directional drilling technology for underground coal mine based on trajectory control[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(2):78-81.

[16] 赵建国, 赵江鹏, 许超, 等. 煤矿井下复合定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4):202-206.

ZHAO Jianguo, ZHAO Jiangpeng, XU Chao, et al. Composite directional drilling technology in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4):202-206.

[17] 石智军, 胡少韵, 姚宁平, 等. 煤矿井下瓦斯抽采(放)钻孔施工新技术[M]. 北京:地质出版社, 2008.

[18] 许超, 李泉新, 刘建林, 等. 煤矿瓦斯抽采定向长钻孔高效成孔工艺研究[J]. 金属矿山, 2011(6):39-55.

XU Chao, LI Quanxin, LIU Jianlin, et al. Research on high efficient long directional drilling process for gas drainage in coal mine[J]. Metal Mine, 2011(6):39-55.

[19] 王传留, 居培, 高晓亮. 煤矿井下定向钻进用新型 PDC 钻头[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016(6):74-78.

WANG Chuanliu, JU Pei, GAO Xiaoliang. Research on new type of directional drilling PDC bit used in coal mine drill[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016(6):74-78.

[20] 高晓亮, 王传留, 田宏杰. 大直径定向长钻孔用 PDC 钻头设计与应用[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5):150-152, 155.

GAO Xiaoliang, WANG Chuanliu, TIAN Hongjie. Design and application of PDC bit for major diameter directional long drilling hole[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5):150-152, 155.