



移动扫码阅读

姚克,李泉新,方俊,等. 煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 36-42.
YAO Ke, LI Quanxin, FANG Jun, *et al.* Research on rotary geosteering drilling technology and equipment in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 36-42.

煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研究

姚克,李泉新,方俊,方鹏,王龙鹏,田东庄,陈龙,许超

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西西安 710077)

摘要:针对煤矿区井下瓦斯抽采定向钻孔施工技术装备存在的自动化程度低、目标地层钻遇率低、岩层钻进速度慢、钻孔直径小等局限性,开展了煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研发工作,突破了定向钻机无线遥控操作、机械自动加杆、实时参数监测与故障诊断、随钻煤岩识别、轨迹旋转调控等核心技术难题,研制出 ZDY25000LDK 型电液控制定向钻机、BLY800/12 型高压大流量泥浆泵车、YSG(A) 型矿用动态方位伽马地质导向随钻测量系统、 $\phi 133$ mm 液驱推靠式旋转导向钻进系统和配套钻具,其中定向钻机的最大转矩 25 000 N·m、自动加卸钻杆时间小于 55 s,泥浆泵车的额定流量 800 L/min,地质导向随钻测量系统的自然伽马测量误差小于 $\pm 5\%$ 、随钻地层探查距离 ≥ 0.5 m,旋转导向钻进系统的适用转速范围 80~200 r/min、造斜力达到 1.4 t;开发了煤矿井下近水平孔地质导向钻进技术和旋转导向钻进技术,详细介绍其技术特点与工艺流程。在内蒙古唐家会煤矿进行了现场试验,在煤层和岩层中实钻定向钻孔共 4 个,最大成孔深度 820 m,总进尺 2 419 m,定向成孔直径 172 mm,煤层中综合钻进效率提高 25% 以上,岩层中综合钻进效率提高 30% 以上,实现了煤矿井下定向钻进从“几何导向”到“旋转地质导向”的跨越,提升了煤矿井下定向钻进智能化水平和钻孔成孔质量,为煤矿井下瓦斯高效抽采和智能矿井建设提供了技术装备支撑。

关键词: 瓦斯抽采;定向钻孔;定向钻机;旋转导向钻进;地质导向钻进

中图分类号: TD712.63

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0036-07

Research on rotary geosteering drilling technology and equipment in underground coal mine

YAO Ke, LI Quanxin, FANG Jun, FANG Peng, WANG Longpeng, TIAN Dongzhuang, CHEN Long, XU Chao

(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the limitations of directional drilling technology and equipment for underground gas drainage in coal mining areas, such as low degree of automation, low drilling ratio of target formation, slow drilling rate of rock formation, and small diameter, the research of rotary geosteering drilling technology and equipment underground coal mine has been carried out, with the core technical problems has overcome such as wireless remote control operation of directional drilling rigs, mechanically automatic drill pipe addition, real-time parameter monitoring and fault diagnosis, coal and rock identification while drilling, and trajectory rotation control, ZDY25000LDK electro-hydraulic controlled directional drilling rig, BLY800/12 mud pump truck with high-pressure and large-volume, YSG(A) Mine geosteering MWD system by dynamic azimuth gamma, $\phi 133$ mm hydraulic push type rotary steering drilling system and supporting drilling tools have developed, with the maximum torque was 25 000 N·m, the automatically add drill pipe time was less than 55s of the directional drilling rig, the rated flow was 800 L/min of the mud pump truck, the natural gamma measurement error was less than $\pm 5\%$ and the stratum exploration distance was ≥ 0.5 m of the geosteering MWD system, the applicable speed range was 80~200 r/min and the deflection force was 1.4 t of the rotary steerable drilling system; geosteering drilling technology and rotary steerable drilling technology for near horizontal hole has developed with the technical characteristics and process flow are introduced in detail. The field test was carried out in

收稿日期: 2022-06-08

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-23

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-003); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金资助项目(2020XAYDC01-4)

作者简介: 姚克(1973—), 男, 宁夏中卫人, 研究员。E-mail: yaoke@cctegxian.com

Tangjiahui Coal Mine in Inner Mongolia. 4 directional drillings were completed, with the maximum drilling depth was 820 m, the total footage was 2 419 m, the directional drilling diameter was 172 mm, the drilling efficiency was increased 25% in coal seam and 30% in rock, which realized the directional drilling from “geometric steering” to “rotary geosteering” underground coal mine, the intelligent level and drilling trajectory quality of underground directional drilling in coal mine has been improved, and provided technical equipment support for efficient underground gas drainage and intelligent mine construction.

Key words: gas extraction; directional drilling; directional drilling rig; rotary steering drilling; geosteering drilling

0 引言

井下抽采是煤矿区煤层气开发的重要技术手段^[1], 2020年全国煤层气抽采纯量 213 亿 m³, 其中井下抽采量为 128 亿 m³, 占全国总抽采量的 60% 以上。顺煤层定向钻孔和顶板高位定向钻孔是煤矿井下瓦斯抽采的重要技术途径, 其中顺煤层定向钻孔随煤层起伏延伸, 主要用于采前预抽, 并可降低煤层中瓦斯含量, 使煤层达到开采条件; 顶板高位定向钻孔根据采动覆岩裂隙发育规律提前布设在回风巷道一侧“O”型圈内裂隙带中, 主要用于工作面回采时采动卸压瓦斯抽采, 同时可降低回风巷道及上隅角的瓦斯浓度, 确保回采安全^[2-4]。

依托“十一五”“十二五”国家科技重大专项, 我国研发出了煤矿井下随钻测控千米定向钻进装备和大功率定向钻进装备, 开发了以单弯螺杆马达为造斜钻具的滑动定向钻进技术和复合定向钻进技术, 成功解决了井下近水平钻孔轨迹测控问题, 大幅提升了井下长钻孔施工能力水平, 先后多次刷新井下顺煤层定向钻孔深度世界纪录^[5-6]。同时利用大功率定向钻进装备, 采用正向多级扩孔工艺, 开展了顶板高位定向钻孔钻进试验, 最大成孔深度超过 1 000 m, 定向成孔直径 120 mm, 扩孔成孔直径 200 mm, 并取得了良好抽采效果, 推动了“以孔代巷”采动卸压瓦斯抽采技术进步^[7-8]。但以上技术装备仍存在以下局限性:

1) 定向钻进装备以功能实现为主, 自动化程度低、参数监测和事故预警技术发展滞后, 随着钻进装备能力逐渐增大, 钻杆加卸等辅助工作劳动强度大, 降低了综合钻进效率, 且不利于钻进过程分析和钻

进参数优化^[9-11]。

2) 钻孔轨迹主要依据矿井地勘资料进行设计, 往往与地层真实赋存情况存在偏差; 钻孔施工时不能精确识别钻进地层变化情况, 并未对设计轨迹进行动态调整, 导致钻孔易穿出目标地层, 尤其是薄煤层、起伏变化大及薄厚不均煤层中钻进时, 煤层钻遇率低^[12-13]。

3) 单弯螺杆马达输出的回转动力仅为钻机额定转矩的 1/10 左右, 岩层钻进效率低、定向成孔直径小, 且采用“滑动造斜+回转稳斜”交互的方法进行钻孔轨迹控制, 钻孔轨迹平滑性差, 钻具与孔壁间摩阻大, 钻进动力传递效率低, 成孔深度受限^[14-16]。

因此, 在“十三五”国家科技重大专项支持下, 开展了煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研发工作, 旨在通过技术装备创新, 提升瓦斯抽采定向钻孔施工效率和成孔质量, 进而增加井下瓦斯抽采量, 提高瓦斯抽采浓度, 为煤矿井下瓦斯高效抽采和提质上产提供支撑。

1 旋转地质导向装备研发思路

煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备整体组成如图 1 所示, 主要包括电液控制定向钻机、泥浆泵车、地质导向随钻测量系统、旋转导向钻进系统和配套钻具。利用电液控制定向钻机提高辅助作业效率, 利用地质导向随钻测量系统进行地层识别, 利用旋转导向钻进系统进行旋转轨迹控制, 从而提高钻孔直径、钻进效率和目标地层钻遇率, 提升煤矿区井下顺煤层定向钻孔和顶板高位定向钻孔施工能力和自动化水平。具体思路如下:

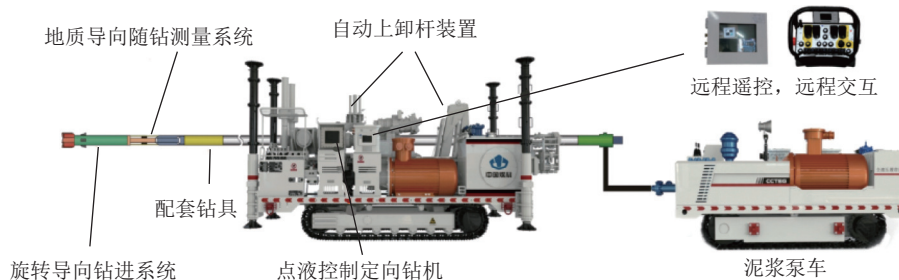


图 1 煤矿井下旋转地质导向定向钻进装备

Fig.1 Rotary geosteering drilling technology and equipment underground coal mine

1) 电液控制定向钻机重点从钻杆自动装卸、钻进参数监测、电控操作、故障诊断与工况识别等方面进行“机械化换人、自动化减人”，降低工人劳动强度，提高钻进效率和安全性。

2) 根据含煤地层物性参数差异，利用地质导向随钻测量仪器随钻测量和判识钻头位置的地层信息，并结合钻孔轨迹参数测量，修正地质模型和设计轨迹，控制钻孔沿着预定方向在目标地层中延伸，提高顺煤层定向钻孔在起伏变化大及薄厚不均煤层中的钻遇率。

3) 利用旋转导向钻进系统，采用旋转导向钻进技术，在回转钻进的同时实现钻孔轨迹实时测量和精确调控，既可充分发挥坑道钻机大扭矩旋转高效成孔优势，又可大幅提高成孔直径及成孔质量，还可提升深孔和复杂破碎地层成孔能力与钻探施工安全性。

2 旋转地质导向钻进装备

2.1 电液控制定向钻机

根据旋转导向钻进和地质导向钻进对定向钻机的要求，研制了国内首台煤矿井下电液控制定向钻机(图2)，其最大扭矩达到 25 000 N·m，最大适配钻杆直径 127 mm，最大起拔能力 350 kN，自动加卸钻杆时间小于 55 s，具备大直径定向钻杆自动装卸、钻进参数与钻机状态参数智能感知、钻机典型故障自动识别、自动化钻进等功能^[17]。主要技术特点如下：

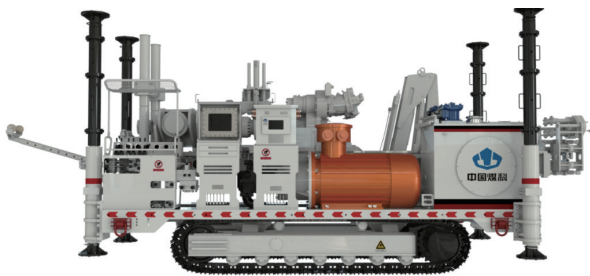


图2 ZDY25000LDK型电液控制定向钻机

Fig.2 ZDY25000LDK electro-hydraulic controlled directional drilling rig

1) 采用两体布局结构，实现 1 600 mm 车体宽度条件下钻机紧凑化布局设计；开发了 25 000 N·m 大通孔回转器和组合油缸驱动式给进装置，缩小了钻机关键部件尺寸；采用固定式主动钻杆驱动，减少了送水器的频繁拆卸，缩短了辅助作业时间，可有效提高钻进施工效率。

2) 开发了大直径钻杆多部件协同自动装卸技术，设计了对顶式大开口夹持器与卸扣器、液驱串联关

节机械手、搓杆机构、液压吊装系统，采用动力头与夹持器的中间装、卸钻杆方式，利用液驱串联关节机械手实现钻进过程自动化更换钻杆，利用搓杆机构实现起钻过程动力头后方机械化拧卸钻杆，利用液压吊装系统进行粗径钻具和批量钻杆的机械化吊装，实现了大直径钻杆和粗径钻具的连续自动化加装拆卸。

3) 设计了电液复合控制定向钻机液压系统，采用无线遥控为主、液控备用的控制方案，建立了钻机手动操作控制、机械手自动上卸钻杆、自动钻进、自动起下钻流程，提高了控制精度和施工效率，可远距离控制施工，避免了近距离施工时钻孔喷孔、突(涌)水等安全风险。开发了钻进参数监测装置，建立了工况识别判据智能专家知识库，具备 10 余种孔内工况和钻机故障实时诊断报警功能。

2.2 高压力大泵量泥浆泵车

根据大直径钻孔施工需要，研制了额定流量 800 L/min、额定压力 12 MPa 的高压力大流量泥浆泵车(图3)。主要技术特点如下：

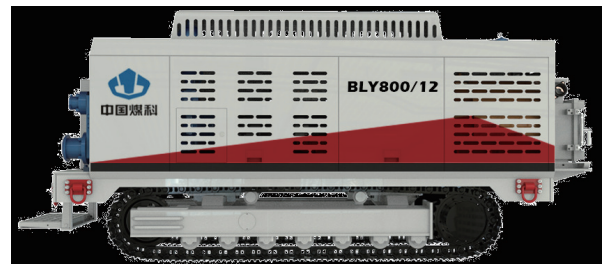


图3 BLY800/12型高压力大泵量泥浆泵车

Fig.3 BLY800/12 mud pump truck with high-pressure and large-volume

1) 开发了具有负载敏感泵控特性的泥浆泵车开式液压系统，泥浆泵车输出流量比现有产品提升近 1 倍。

2) 优选 5 柱塞往复式泥浆泵单元，采用径向低速大扭矩马达直驱方式，解决了泥浆泵车紧凑布局设计和高效驱动难题。

3) 采用近/远端双重控制方式，配合先导比例调节技术，实现井下钻场灵活布置、钻机端远程操控，泵压、流量负载功率自适应控制。

4) 采用高压蓄能器与安全控制阀进行安全控制与卸荷，采用电子数显流量计实时监测输出流量和压力，并在钻机集成显示，实现安全、稳定、高效供液。

5) 发明了基于定向钻进孔内负载模拟的泵车性能检测装置及方法，解决大流量输出参数可调泥浆泵性能测试难题。

2.3 矿用动态方位伽马地质导向随钻测量系统

根据含煤地层物性参数特点,选择自然伽马值作为随钻地层识别的依据,开发了矿用动态方位伽马地质导向随钻测量系统(图4),其自然伽马测量误差小于 $\pm 5\%$,随钻地层探查距离 ≥ 0.5 m。主要技术特点如下:

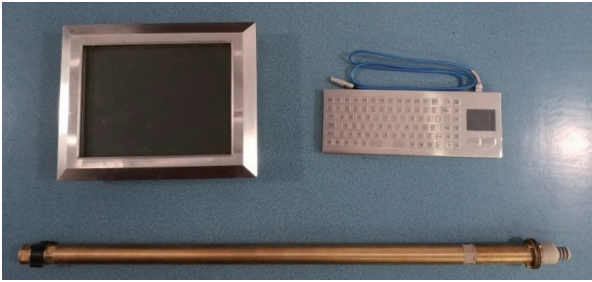


图4 矿用动态方位伽马地质导向随钻测量系统

Fig.4 Mine geosteering MWD system by dynamic azimuth Gamma

1)开发了方位伽马动态高频率精准测量技术,采用闪烁体和光电倍增管组成自然伽马探测器接收地层伽马射线^[18],经信号放大处理、滤波、整形,测量出地层的伽马放射值;采用钨镍合金为屏蔽外壳,设计了具有多个方向探测能力的开窗结构,实现了方位伽马探测;基于通缆钻杆有线载波通信技术^[19],进行信号双向传输,实现随钻过程中测量数据高速传输。

2)开发了8扇区方位伽马成像技术和首套煤矿井下随钻方位伽马8扇区成像软件,可对随钻方位伽马测量数据进行实时显示、预处理和分析,并具备数据回放显示和分析处理功能,通过数据成像协助划分煤岩层边界。

3)开发了基于随钻动态方位伽马的地层识别技术,建立了含煤地层地质模型^[20],开展了动态方位伽马响应模拟,得到了随钻方位伽马测量仪器在探测到不同地层交界面时不同方位伽马的响应变化规律^[21],获得了穿越地层状态判断依据,给出了仪器与地层界面之间夹角、钻遇界面距离和目的层厚度的计算方法^[22]。

2.4 液驱推靠式旋转导向钻进系统

根据煤矿井下受限作业空间施工要求,开发了小直径液驱推靠式旋转导向钻进系统(图5),外径仅为133 mm,适用转速范围为80~200 r/min,造斜力达到1.4 t,其工作原理是:在旋转导向工具上设置了3个不随钻杆转动的推靠翼肋,钻进过程中通过实时控制3个推靠翼肋的伸出长度和推靠力大小,形成矢量合力对钻头进行偏置,实现定向造斜纠偏。主要技术特点如下:

1)开发了机电液一体化推靠翼肋矢量闭环控制技术,采用电路控制、液压驱动、机械机构执行的导向工具工作方式,设计了高效率高功率密度电源变换电路板,解决了整体式微型电动、液压模块设计难题,推靠翼肋侧向推靠合力可0~10 MPa无级调节、推靠合力方向可0~360°矢量控制,从而实现动态调整旋转导向工具的造斜能力,准确控制钻进方向。

2)开发了轨迹参数动态测量技术,研制了浇封兼本安型触摸屏防爆计算机和孔内随钻实时动态测斜探管,开发了大噪声背景下微弱信号提取技术、高量程高线性度高分辨率的地磁场信号测量技术,设计了专用减震机构,解决了钻进过程中强烈振动下倾角、工具面角的高精度测量难题;开发了旋转导向钻进系统控制软件,实现了旋转导向钻进状态实时获取和反馈调控。



图5 $\phi 133$ mm 液驱推靠式旋转导向钻进系统

Fig.5 $\phi 133$ mm hydraulic push type rotary steering drilling system

2.5 配套定向钻具

根据旋转导向钻进、地质导向钻进和机械化自动钻杆加卸要求,研制了新型 $\phi 114.3$ mm通缆钻杆、送水器与定向钻头。主要技术特点如下:

1) $\phi 114.3$ mm通缆钻杆接头采用大通孔平滑流线设计,在保证机械强度的基础上,降低了冲洗液循环压耗;设计了大锥度螺纹牙型,提高钻杆接头螺纹承载能力,便于钻机自动上卸扣。

2)送水器采用格莱圈组合式密封结构,提高旋转密封性能;采用环空式电缆铺设结构和滑环式电缆接触结构,提高可靠性,增大过水面积,降低局部压损;选用深沟球轴承和推力球轴承,提高送水器旋转灵活性和寿命。

3)基于动态破岩仿真,对切削布齿结构进行了优化设计,将钻头不平衡力控制在10%以内,防止钻头冲击破坏;选取最小破岩比能作为钻头布齿方案,提升钻头碎岩效率。

3 旋转地质导向钻进技术

3.1 地质导向钻进技术

地质导向钻进技术利用地质导向随钻测量系统

在钻进过程中实时检测钻头处的地层变化,通过随钻地层识别,对目标钻进区域的地层赋存情况和钻孔设计轨迹进行修正,控制钻孔轨迹沿目标地层延伸,解决了以地勘时期地质资料设计轨迹为调整依据易穿出目标地层、钻遇率低等问题,提高了成孔质量,实现了煤矿井下定向钻进从“几何导向”到“地质导向”的跨越。

地质导向钻进技术工艺流程如图6所示,其关键是对地层随钻识别和设计轨迹动态修正,可首先在试验矿井施工取样钻孔,获取可能钻遇地层的样本,建立岩样对照卡;其次在取心后的钻孔下入地质导向随钻测量仪器,对各典型岩层进行自然伽马测量和标定,形成地层识别判识依据;然后在钻进过程中,对处理后的方位自然伽马测量数据进行成像处理,结合钻进参数变化和孔口返渣取样信息,精准判断地层岩性;最后根据相邻近边界点的空间坐标,估算实钻地层倾角情况,对设计轨迹进行调整;当实钻轨迹靠近目标地层边界时,采用滑动定向纠斜,将钻孔轨迹调整至目标地层中,否则采用复合钻进稳斜施工,从而精确控制定向钻孔至边界线的距离,保证钻孔轨迹在目标地层内延伸。

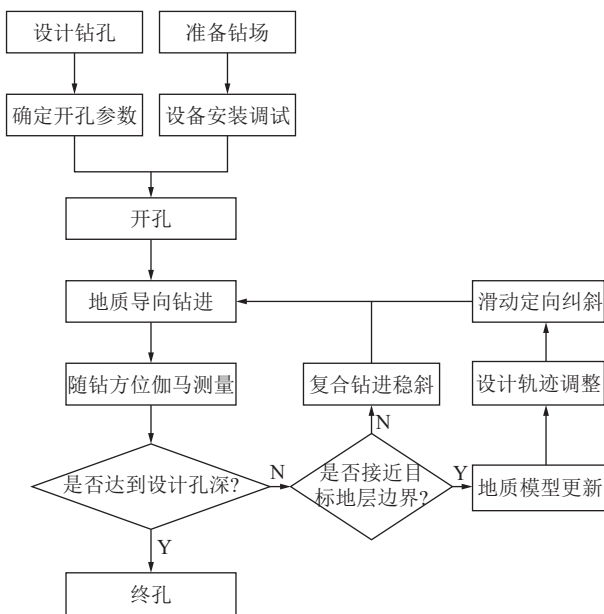


图6 地质导向钻进工艺流程

Fig.6 Process flow of geosteering drilling

3.2 旋转导向钻进技术

旋转导向钻进技术可在回转钻进的同时实现钻孔轨迹精准控制,解决了现有螺杆马达滑动定向钻进时存在的钻孔轨迹不平滑、长钻孔排渣困难、成孔率低和硬岩定向钻进困难等问题,提高了钻探施工

效率和安全性,实现了煤矿井下定向钻进从“滑动定向”到“旋转定向”的跨越。旋转导向钻进集成了机、电、液一体化控制技术,是未来实现智能钻探的重要路径之一。

旋转导向钻进技术工艺流程如图7所示,其关键是对旋转导向钻进系统侧向推靠力大小和方向的实时监测控制,在钻孔施工过程中,先利用孔内测量探管测量钻孔实钻轨迹;然后由司钻人员根据实钻轨迹与设计轨迹的偏差确定钻进模式,利用防爆计算机设定旋转导向工具的推靠合力大小和方向,并通过通缆钻杆将控制指令传输给孔底旋转导向工具;再利用定向钻机回转通缆钻杆,带动孔内旋转导向工具驱动钻头碎岩,回转过程中旋转导向工具根据控制指令动态调整3个推靠翼肋的推靠力大小,实时监测并上传推靠翼肋工作状态,确保钻头按设计造斜方向进行轨迹控制,直至达到设计深度。

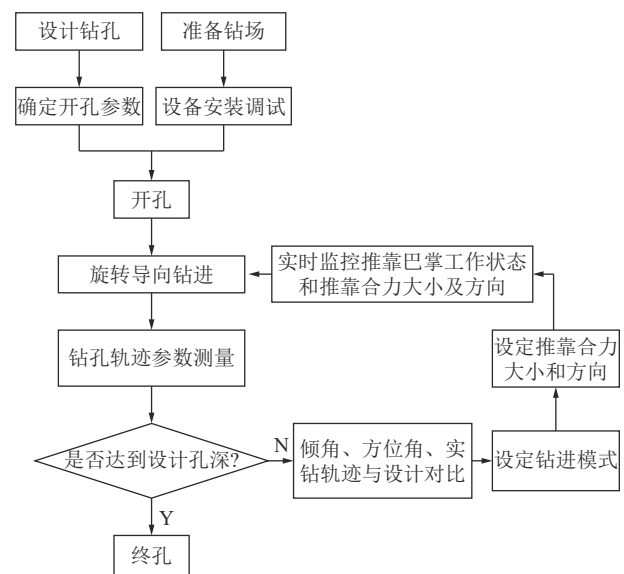


图7 旋转导向钻进工艺流程

Fig.7 Process flow of rotary steering drilling

4 现场试验

在淮河能源唐家会煤矿进行了现场试验,施工煤层定向钻孔和岩层定向钻孔共4个,对钻进技术装备性能进行了验证。

4.1 矿井概况

唐家会煤矿主采煤层为6煤,倾角小于5°,平均厚度约18m,采用综合机械化放顶煤工艺开采。煤层顶板岩性依次为粗粒砂岩、细粒砂岩、粉砂岩、砂质泥岩和泥岩,裂隙较为发育;底板岩性依次为砂质泥岩、粉砂岩、泥岩、炭质泥岩、粗粒砂岩、中粒砂岩、细粒砂岩。

4.2 钻场与钻孔设计

在6煤南回风大巷与2号联巷交汇处设置一号钻场,设计定向钻孔3个,其中顶板岩层定向钻孔2个,目标地层为距6煤15~20m范围的顶板岩层,设计煤层定向钻孔1个,沿6煤延伸。

在6煤南辅运大巷和61303回风巷交汇处设置二号钻场,设计顶板岩层定向钻孔1个,目标地层为距6煤25~30m范围的顶板岩层。

4.3 钻孔施工情况

现场试验时共完成定向钻孔4个,最大成孔深度达到820m,总进尺2419m,成孔直径172mm,煤层钻进效率提高25%,岩层钻进效率提高32%,实钻轨迹如图8所示。

现场试验中ZDY2500LDK型电液控制定向钻机全部采用遥控器电控操作,实现机械辅助自动加卸钻杆,通过钻机钻探参数实时监测与故障报警,保障了施工安全。BLY800/12型泥浆泵车的输出流量和输出压力满足大直径钻孔施工需求,验证了大流量供液能力。动态方位伽马地质导向随钻测量系统的轨迹测量精度可靠,自然伽马测量数据与地层放射性变化规律基本一致。小直径液驱推靠式旋转导向钻进系统的旋转推靠力矢量精准可控,实现了随钻信号高速率、高稳定性双向传输,钻孔弯曲曲率显著下降,提升了成孔直径和成孔效率,且钻进系统给进压力、回转压力远低于螺杆马达定向钻进时的数值,钻进系统压力富余量充分,具有更深钻孔钻进能力。

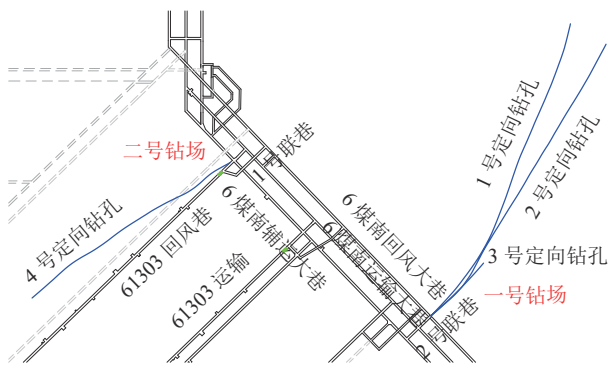


图8 现场试验实钻轨迹

Fig.8 Actual drilling trajectory of field test

5 结 论

1)依托“十三五”国家科技重大专项,开发了煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备,具有定向钻机无线遥控操作、机械自动加杆、实时参数监测与故障诊断、随钻煤岩识别、轨迹旋转调控等功能,现场试验完成定向钻孔4个,最大成孔深度达到820m,定

向成孔直径172mm,煤层钻进效率提高25%,岩层钻进效率提高32%,实现了煤矿井下定向钻进从“几何导向”到“旋转地质导向”的跨越,为煤矿井下瓦斯高效抽采和智能矿井建设提供了技术装备支撑。

2)研制的电液控制定向钻机最大扭矩达到25000N·m、最大起拔能力350kN、自动加卸钻杆时间小于55s,配套泥浆泵车的额定流量800L/min、额定压力12MPa,满足超长定向钻孔和大直径定向钻孔施工需要,提升了煤矿井下定向钻机自动化程度,降低了工人劳动强度。

3)选择自然伽马作为地层识别依据,研制了矿用动态自然伽马地质导向随钻测量系统,开发了地质导向钻进技术,通过随钻方位伽马测量和地层识别,提高了目标地层钻遇率,提升了钻孔成孔质量。

4)研制了 $\phi 133$ mm小直径液驱推靠式旋转导向钻进系统,推靠方向可精准控制、推靠力可动态调节,反馈响应速度快;开发了旋转导向钻进技术,实现了钻孔轨迹精确回转调控,提高了定向钻进效率和成孔直径,提升了钻孔成孔质量。

5)智能定向钻进是一项系统性工程,涉及的钻进装备不仅包括智能定向钻机本体,还包括辅助钻进系统、信息监控决策系统和智能钻具系统,应进一步加强辅助钻进系统和钻具系统智能化研究,丰富钻探信息监测类型和数量,支撑智能定向钻进监控决策和全流程自动化施工。

参考文献(References):

- [1] 刘见中,孙海涛,雷毅,等.煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J].煤炭学报,2020,45(1):258-267.
LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258-267.
- [2] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1-34.
- [3] 刘忠全,陈殿斌,孙炳兴,等.高瓦斯矿井超大区域瓦斯治理技术[J].煤炭科学技术,2021,49(5):120-126.
LIU Zhongquan, CHEN Dianfu, SUN Bingxing, et al. Gas control technology in super large area of high gas mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 120-126.
- [4] 程志恒,卢云,苏士龙,等.采空区顶板高位走向长钻孔高效抽采瓦斯机理研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):136-142.
CHENG Zhiheng, LU Yun, SU Shilong, et al. Mechanism study on high efficiency gas drainage of high level strike long boreholes in

- gob roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 136-142.
- [5] 李泉新,王 鲜,许 超,等.瓦斯抽采顺煤层超长距定向孔钻进关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 168-174.
LI Quanxin, WANG Xian, XU Chao, *et al.* Key technology of drilling with ultra-long-distance directional hole for gas drainage along coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 168-174.
- [6] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3000 m顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 1-7.
SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, *et al.* Key technology of in-seam directional borehole and beyond 3000m underground coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 1-7.
- [7] 王建强,张 杰,杜学明.复杂地层高位定向长钻孔成孔工艺研究与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 168-173.
WANG Jianqiang, ZHANG Jie, DU Xueming. Research and application of high-level directional long borehole hole-forming technology in complex stratum[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 168-173.
- [8] 石智军,李泉新,姚 克.煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2217-2224.
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2217-2224.
- [9] 李泉新,刘 飞,方 俊,等.我国煤矿井下智能化钻探技术装备发展与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 265-272.
LI Quanxin, LIU Fei, FANG Jun, *et al.* Development and prospect of intelligent drilling technology and equipment for underground coal mines in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 265-272.
- [10] 李泉新,刘 飞,方 俊.煤矿坑道智能化钻探技术发展框架分析[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(10): 9-13, 25.
LI Quanxin, LIU Fei, FANG Jun. Analysis of development framework of intelligent coal mine underground drilling technology[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(10): 9-13, 25.
- [11] 王清峰,陈 航.瓦斯抽采智能化钻探技术及装备的发展与展望[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(11): 18-24.
WANG Qingfeng, CHEN Hang. Development and prospect on intelligent drilling technology and equipment for gas drainage[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(11): 18-24.
- [12] 方 俊,谷拴成,石智军,等.煤矿井下随钻测量信号泥浆脉冲传输特性研究与试验[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3604-3613.
FANG Jun, GU Shuancheng, SHI Zhijun, *et al.* Transmission characteristics of mud pulse measurement signal while drilling in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3604-3613.
- [13] 方 俊,刘 飞,李泉新,等.煤矿井下碎软煤层空气复合定向钻进技术与装备[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 224-229.
FANG Jun, LIU Fei, LI Quanxin, *et al.* Air compound directional drilling technology and equipment for soft-fragmentized seam underground coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 224-229.
- [14] 王四一,李泉新,刘建林,等.冲击螺杆马达研制[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 225-231.
WANG Siyi, LI Quanxin, LIU Jianlin, *et al.* Development of impact screw motor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 225-231.
- [15] 刘建林,王四一,赵江鹏,等.单弯螺杆马达与液动潜孔锤复合钻具研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(5): 138-142, 211.
LIU Jianlin, WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, *et al.* Study on compound drilling tools of single bending screw motor and hydro hammer[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(5): 138-142, 211.
- [16] 王 鲜,姜 磊,李泉新,等.超长定向钻孔滑动钻进减阻技术及其应用[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(11): 117-120.
WANG Xian, JIANG Lei, LI Quanxin, *et al.* Drag reduction technology of ultra-long directional drilling and its application[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(11): 117-120.
- [17] 方 鹏,姚 克,王龙鹏,等.ZDY25000LDK智能化定向钻进装备关键技术研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 72-79.
FANG Peng, YAO Ke, WANG Longpeng, *et al.* Research on key technologies of the ZDY25000LDK intelligent directional drilling equipment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 72-79.
- [18] 方 俊.矿用有线地质导向随钻测量装置及钻进技术[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(11): 168-173.
FANG Jun. Mine cable geosteering MWD device and geological directional drilling technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(11): 168-173.
- [19] 陈 龙,陈 刚,张冀冠.矿用随钻动态方位伽马仪器的研制与应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 86-91.
CHEN Long, CHEN Gang, ZHANG Jiguan. Development and application of a mine-used dynamic azimuth gamma instrument while drilling[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 86-91.
- [20] 张 宁,张幼振,姚 克.一种含煤地层岩性优化识别方法[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(7): 100-106.
ZHANG Ning, ZHANG Youzhen, YAO Ke. An optimized identification method of coal-bearing stratum lithology[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(7): 100-106.
- [21] 田小超,蒋必辞,汲方林,等.随钻伽马测井系统在顺煤层钻进中的应用[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(2): 135-138.
TIAN Xiaochao, JIANG Bici, JI Fanglin, *et al.* Application of gamma logging while drilling system in drilling along coal seam[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(2): 135-138.
- [22] 蒋必辞,田小超,张 鹏,等.随钻伽马对方位角测量的影响及校正方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 175-181.
JIANG Bici, TIAN Xiaochao, ZHANG Peng, *et al.* Study on influence and correction method of gamma while drilling on azimuth angle measurement[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 175-181.