



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.021
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. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.021

瓦斯抽采顺煤层超长距定向孔钻进关键技术

李泉新,王 鲜,许 超,姜 磊,刘 智,刘 飞
(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘 要:针对现有煤矿井下定向钻进技术与装备在钻进 3 000 m 以上顺煤层超长距定向孔中存在的不足,提出采用 ZDY15000LD 大功率定向钻机和 BLY460 高压泥浆泵车提高装备钻进能力,通过优化钻进系统冲洗液管路和研制大通孔钻具以降低冲洗液水路压耗,合理设置泥浆脉冲无线随钻测量系统运行参数以提高超长孔工况下信号传输稳定性,利用井下冲洗液净化循环系统实现定向钻进冲洗液循环利用。创新开发了滑动钻进减阻技术、复合钻进倾角控制技术和复合钻进侧钻分支技术等超长定向孔钻进关键技术。结合神东煤炭集团保德煤矿大盘区煤层瓦斯大区域超前治理需要开展 3 000 m 以上顺煤层超长距定向孔钻进的工程实践,创造了主孔深度 3 353 m 的顺煤层超长贯通定向孔深度记录,实践结果表明:超长距定向孔钻进装备系统有效提高了煤矿井下深孔钻进能力,降低了钻进过程中泥浆泵压力,实现了超长孔工况下信号稳定传输,减少了定向钻进时清水用量和污水排放量;开发的超长距定向孔钻进关键技术降低了滑动定向钻进阻力,提高了滑动定向钻进深度、钻进效率和复合钻进应用比例,解决了超长孔内侧钻分支孔的难题。

关键词:超长定向孔;泥浆脉冲;冲洗液净化循环系统;减阻技术;复合钻进

中图分类号:TD41;P634.31 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0168-07

Key technology of drilling with ultra-long-distance directional hole for gas drainage along coal seam

LI Quanxin, WANG Xian, XU Chao, JIANG Lei, LIU Zhi, LIU Fei
(Xi'an Research Institute, Co., Ltd. China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the shortcomings of existing coal mine underground directional drilling technology and equipment for ultra-long-distance directional hole above 3 000 m along coal seam, it is proposed to use ZDY15000LD high-power directional drilling rig and BLY460 high-pressure mud pump truck to improve the drilling capacity of equipment, reduce the pressure consumption of flushing fluid by optimizing the flushing fluid pipeline of drilling system and developing drilling tools with large hole, reasonably set the operation parameters of mud pulse wireless MWD measurement system to improve the signal transmission stability under ultra-long-distance hole condition, and to achieve the flushing fluid of directional drilling by using underground flushing fluid purification and circulation system recycling. At the same time, it has innovatively developed key technologies for ultra-long-distance directional hole drilling such as sliding drilling drag reduction technology, compound drilling inclination control technology and compound drilling sidetracking branch technology. Combined with the need of advanced control of coal seam gas in large area of Baode Coal Mine of Shendong Coal Group, the practice of ultra-long distance directional drilling along the coal seam with a depth of 3 000 m or more was carried out, and an ultra-long-distance directional drilling along the coal seam with a main hole depth of 3 353 m was created. The practice results show that: the ultra-long-distance directional drilling equipment system has effectively improved the deep hole drilling capacity of coal mines, reduced the mud pump pressure during drilling, realized the stable transmission of measurement signal under the condition of ultra-long-distance hole, reduced the amount of clean water and sewage discharge during directional drilling; the developed key technology of ultra-long-distance directional hole drilling reduced the resistance of sliding directional drilling, improved the depth of sliding directional drilling, drilling efficiency and the

收稿日期:2020-07-25;责任编辑:李金松
基金项目:中国煤炭科工集团西安研究院有限公司科技创新资助项目(2019XAYZD01)
作者简介:李泉新(1980—),男,黑龙江齐齐哈尔人,研究员,博士。E-mail: liquanxin@cctegxian.com

application proportion of compound drilling, and solved the problem of drilling branch hole inside the super long hole.

Key words: ultra-long-distance directional hole; mud pulse; flushing fluid purification circulation system; drag reduction technology; composite drilling

0 引 言

顺煤层定向长钻孔因其可以实现钻孔在煤层中
长距离精准延伸,提高钻孔瓦斯抽采效率并减少抽
采钻孔工程量,现已成为煤矿井下进行煤层瓦斯治
理的重要手段^[1-2]。近年来,随着我国煤矿井下定
向钻进技术与装备的不断进步,顺煤层定向钻孔深
度记录也不断提高。自 2008 年突破千米钻孔深度
以来,2011 年在陕西大佛寺煤矿钻成了 1 212 m 的
顺煤层定向长钻孔,2014 年在山西寺河煤矿钻成了
1 881 m 的顺煤层定向长钻孔^[3],2017 年结合神东
煤炭集团保德煤矿大盘区瓦斯治理需要,在该矿钻
成了主孔深度 2 311 m 的顺煤层定向长钻孔^[4],刷
新了由澳大利亚公司在 Metropolitan 煤矿创下的
2 151 m 顺煤层定向钻孔深度世界纪录^[5],并于
2019 年在保德煤矿再次将顺煤层定向钻孔深度提
高至 2 570 m^[6]。根据保德煤矿顺煤层定向长钻孔
抽采瓦斯数据,截至 2020 年 8 月,2 311 m 定向长钻
孔已连续稳定抽采 950 余天,抽采瓦斯总量超过
300 万 m³,2 570 m 定向长钻孔连续稳定抽采 600 余
天,抽采瓦斯总量超过 170 万 m³,取得了良好的应
用效果。

实践表明,我国煤矿井下定向钻进技术装备已
具备钻进 2 000 m 级顺煤层定向长钻孔能力,对于
走向长度超过 3 000 m 的采煤工作面实现了采用
“钻孔对接式”的瓦斯超前治理模式,提高了此类工
作面瓦斯治理效率并降低了治理成本,但要实现钻
孔沿走向一次性贯穿工作面,进一步提高矿井瓦斯
综合治理效能,还存在一些装备和关键技术问题亟
待完善。为此,开展了 3 000 m 级顺煤层定向孔钻
进技术装备研究与工程实践,旨在形成一套煤矿井
下 3 000 m 以上顺煤层超长定向孔钻进技术与装
备,提高顺煤层定向长钻孔钻进效率和钻孔深度,为
煤矿大区域瓦斯超前治理提供可靠的技术和装备
保障。

1 超长距定向孔钻进装备

现有井下钻探装备在钻进 3 000 m 以上顺煤层
超长定向孔过程中面临的主要问题包括^[7-8]:①滑
动钻进给力不足;②冲洗液高压管路压耗大,泥浆
泵压易达到额定压力;③超长钻孔工况下随钻测量

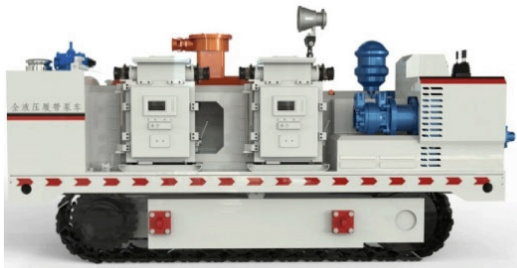
信号传输困难;④大排量冲洗液无法循环利用。针
对以上问题,通过选型、改造和研制,形成了成套超
长定向孔钻进装备系统。

1.1 大功率深孔定向钻机

ZDY15000LD 型大功率深孔定向钻机采用钻
机、泥浆泵车两体式布局形式,如图 1 所示,全液压
驱动、履带自行走,井下运输和空间适应性强。钻机
集主机、操纵台、防爆计算机、泵站、履带车体等于一
体,最大主轴输出转矩 15 000 N·m,主轴额定制动
转矩 3 000 N·m,最大给进/起拔力达到 300 kN^[9];钻
进回转系统和给进系统分别配套设计快、慢 2 档
操作模式,满足滑动定向钻进、回转钻进和复合定
向钻进等多种钻进工艺;主轴通孔直径 135 mm,适
配多种规格钻具,工艺适应性强;钻机具备油缸主
动浮动功能,可有效防止拧卸钻杆时丝扣损伤。BLY
460 泥浆泵车集成了泥浆泵单元、操纵台、泵站、电
磁启动器、履带车体、瓦斯传感器和断电仪、LED
照明灯和急停开关等,可实现泵量在 0~460 L/min
无级调节,额定输出压力 13 MPa^[10],泥浆泵单元采
用远程操作方式,可通过泥浆泵车操纵台和钻机主
操纵台分别对泥浆泵单元进行控制。



(a) 钻机



(b) 泥浆泵车

图 1 大功率深孔定向钻机

Fig.1 High power deep hole directional drilling machine

根据实测数据,钻进冲洗液在钻机系统高压管
路内流通时压力损失可达 1 MPa。为了降低冲洗液
高压管路压耗,对钻机系统冲洗液流通管路进行了
优化:首先,根据冲洗液在管路内流速计算高压管路

途径适用范围,结合管路布局和钻进系统选型参数,将系统内冲洗液管路途径由原来的 $\phi 27\text{ mm}$ 增大至 $\phi 36\text{ mm}$;其次,为了减少冲洗液流经接头处压力损失,将流量计连接管路两端更换为阻尼小的接头,将通水胶管接头途径由原来的 $\phi 32\text{ mm}$ 增大至 $\phi 38\text{ mm}$ 。

1.2 泥浆脉冲无线随钻测量系统

泥浆脉冲无线随钻测量系统是目前煤矿井下实施超长定向孔随钻测量的优选设备,其主要由孔内的测量短节、电池筒、驱动短节、脉冲发生器和孔口的压力变送器、防爆计算机等组成^[11],如图2所示,采用泥浆脉冲无线信号传输方式,目前最大传输距离为 $2\,570\text{ m}$ ^[4],但在泥浆泵达到极限高泵压条件下,信号传输稳定性会受到影响。

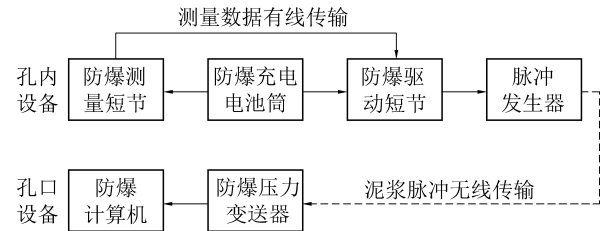


图2 泥浆脉冲无线随钻测量系统结构

Fig.2 Structure of mud pulse wireless measurement while drilling system

泥浆脉冲无线随钻测量系统工作时,由电池筒为测量短节和驱动短节分开供电,当泥浆泵停泵时,测量短节开始采集钻孔工程参数,并按照系统设置的组合编码规则进行编码,编码完成后将以电信号的形式通过有线传输方式传递至驱动短节,泥浆泵开泵后,驱动短节根据编码规则控制脉冲发生器内水流通道的开启和关闭,从而产生压力脉冲,脉冲发生器将脉冲信号放大后通过水流传输至孔口,经压力变送器采集并转换为电信号传入防爆计算机解码和显示^[12]。以上过程中,编码参数的设置直接影响脉冲信号传输强度、可靠性和解析效果,因此,结合超长钻孔工况下电池筒电量续航能力和超长定向孔钻进轨迹控制需要,泥浆脉冲系统参数如下:

脉冲宽度/s	1
最小间隔/s	4
脉冲槽宽/s	1
工具面向角个数	4
数据采集点孔深间隔/m	6

1.3 钻进冲洗液净化循环系统

要实现煤矿井下超长距定向孔钻进冲洗液的循环利用,要求净化循环系统必须具备对冲洗液中气相瓦斯、液相水和固相钻渣的分相分离的能力,并且

净化后的冲洗液中固相含量不会影响定向钻进系统、随钻测量仪器和螺杆钻具等装备的正常使用。同时,净化循环系统的处理能力应能满足超长定向孔钻进对冲洗液量的需求。

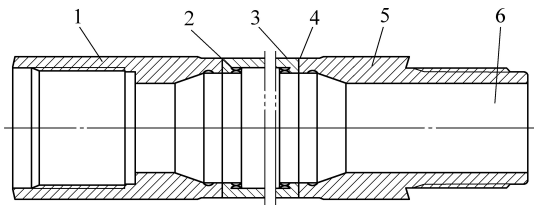
根据煤矿井下超长定向孔钻进对冲洗液净化循环的要求,研制的井下冲洗液净化循环系统包括振动筛单元和离心机单元,其主要性能参数如下:

振动筛单元	
处理量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	20~25
振幅/mm	2.5~4.0
振动频率/Hz	18~25
筛网目数	120目(0.125 mm)
理论容积/ m^3	5.0
离心机单元	
处理量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	20~25
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	3 200
分离因数	1 719
理论容积/ m^3	5.0

冲洗液净化循环的基本流程:孔内返出的冲洗液首先经孔口负压抽吸气相瓦斯,实现气体与固液分离,分离后的冲洗液流入沉淀箱,经简单沉淀后进入振动筛单元,振动筛单元对冲洗液中颗粒较大钻屑进行处理以降低固相含量,处理后的冲洗液进入离心机单元,离心机单元利用冲洗液中具有不同密度且互不相溶的液相和固相在离心力场中获得不同沉降速度的原理,达到使细小颗粒固体沉降的目的,最终处理后的液体供钻进系统循环利用。

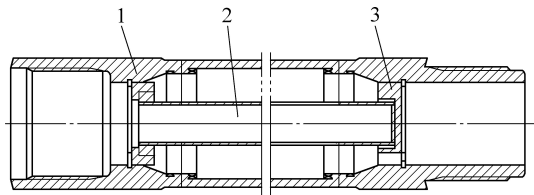
1.4 配套钻具

1) $\phi 89\text{ mm}$ 高强度大通孔无缆定向钻杆。从钻进 $3\,000\text{ m}$ 以上顺煤层超长定向孔实际需要和配套泥浆脉冲无线随钻测量装置要求出发,研制的 $\phi 89\text{ mm}$ 高强度大通孔无缆定向钻杆具有以下特点:①钻杆整体强度高,抗弯能力强,静扭能力达到 $36\,000\text{ N} \cdot \text{m}$ 以上,抗拉能力达到 $1\,300\text{ kN}$ 以上,可满足超长定向孔钻进中交变大载荷工况的需要;②钻杆接头采用“双锥度”设计^[13],实现了小外径、大通孔、高强度及高压密封,采用锯齿形螺纹,具有导向性好、连接强度高和不易脱扣的优点;③采用无缆大通孔结构,杆体通孔内径 78 mm 、接头通孔内径 58 mm ,提高了钻杆内部流线型程度和水力流通性能,经实测,冲洗液压耗较 $\phi 89\text{ mm}$ 中心通缆式钻杆降低达 71% 。 $\phi 89\text{ mm}$ 高强度大通孔无缆定向钻杆结构如图3所示。



1—母接头;2—摩擦焊焊缝;3—杆体;
4—摩擦焊焊缝;5—公接头;6—冲洗液内通孔
图 3 ø89 mm 高强度大通孔无缆定向钻杆结构
Fig.3 Structure of ø89 mm high-strength large hole
wireless directional drill pipe

2) ø89 mm 高强度大通孔过滤钻杆。由钻杆体、滤芯和支撑环等结构组成,如图 4 所示。其中,钻杆体结构与 ø89 mm 高强度大通孔无缆定向钻杆相同,既方便直接连接,又保证了钻杆柱整体强度和承载能力;滤芯通过支撑环定位于钻杆体内,过滤缝隙 ≤ 1 mm,可对混入冲洗液中的杂质进行过滤,为孔底测量仪器和螺杆钻具提供一个更加洁净的冲洗液环境;支撑环采用“三爪”式结构,支撑稳固且便于现场拆卸更换滤芯。

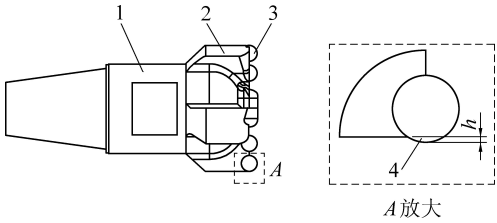


1—钻杆体;2—滤芯;3—支撑环
图 4 ø89 mm 高强度大通孔过滤钻杆结构
Fig.4 Structure of ø 89mm high strength large
hole filter drill pipe

3) ø89 mm 大通孔高压送水器。送水器用于向孔内输送稳定的冲洗液,结合超长定向孔钻进需要,研制的 ø89 mm 大通孔高压送水器采用内平式大通孔结构,通孔直径达到 42 mm,可有效减少冲洗液流通阻力、降低压力损耗;采用类“机械密封”的补偿环和密封环结构设计,静态耐压达到 30 MPa,动态耐压达到 18 MPa,高压密封性好;双轴承设计为送水器提供了更合理的旋转支撑体系,提高了工作性能和使用寿命。

4) ø120 mmPDC 高效定向钻头。为适应井下超长孔钻进中地层条件复杂、岩性种类多变和长距离钻进特点,同时要满足定向钻进对钻头造斜能力的要求,研制了 ø120 mm 螺旋刀翼形平底 PDC 定向钻头^[14-15],钻头结构如图 5 所示。钻头唇面形状为平底式,采用对称螺旋形刀翼,可有效分散切削齿切削地层时产生的指向孔壁的切削力,控制钻头的方位漂移;切削齿自钻头中心沿径向呈增多排布,且最外

圈切削齿具有 $h = 1$ mm 的外出刃,提高了钻进地层适应性和钻头造斜能力;采用短保径、宽保径设计,既增强了钻头导向性能,又保证了钻进稳定性;钻头刀翼中心部位设计为螺旋形式,同时减小刀翼宽度,增大了钻头排粉空间,进而提高了钻进效率。



1—钻头胎体;2—螺旋刀翼;3—切削齿;4—外出刃
图 5 ø120 mmPDC 高效定向钻头结构
Fig.5 Structure of ø120 mm PDC high efficiency directional bit

2 超长距定向孔钻进关键技术

顺煤层定向长孔钻进过程中,受钻具与孔壁间摩阻力影响,滑动定向钻进控制钻孔轨迹深度有限^[16],且因深孔条件下滑动钻进速度难以稳定控制从而大大降低了滑动钻进开分支效率和成功率,这是限制顺煤层定向钻孔深度的关键。为此,开发了超长定向孔滑动钻进减阻技术以延长滑动定向钻进深度,采用复合钻进倾角控制技术在一定程度上替代滑动定向钻进,首创了复合钻进侧钻分支技术解决了深孔钻进分支孔的难题。

2.1 滑动钻进减阻技术

深孔条件下,孔底碎岩阻力和钻具与孔壁间摩擦阻力是滑动定向钻进时的主要钻进阻力,针对这 2 方面分别形成了螺杆钻具水力加压减阻技术和钻具正反扭转钻进减阻技术。

1) 螺杆钻具水力加压减阻技术。该技术借助水力加压螺杆钻具,钻具内部结构可在轴向产生少量位移,冲洗液流经螺杆钻具内部时不仅可驱动钻具带动钻头旋转,同时因冲洗液压力降产生的推力将推动内部结构连同钻头伸出一定长度,进而在钻进过程中为孔底施加钻压^[17-18],减少深孔滑动定向钻进时对钻机给进力的需求,改善孔内钻具受力状态和弯曲变形程度,提高滑动定向钻进深度。经测算,ø89 mm 水力加压螺杆钻具在正常钻进时输出的轴向推力可达 6 kN 以上,完全满足 ø120 mm 钻头在中硬煤层中钻进对钻压的要求。

2) 钻具正反扭转钻进减阻技术。深孔滑动定向钻进时,孔内钻具在复杂受力状态下产生弹性变形,孔口钻具少量正反转动不会传递至孔底^[19-20]。根据这一特点,在滑动定向钻进时利用钻机带动钻

杆柱进行小幅度正反往复扭转运动,扭转运动产生的转矩将沿钻杆柱传递至孔内一定深度,该深度以浅部分钻具做滑动与扭转的复合运动,这部分钻具与孔壁间摩擦阻力将显著降低,该深度以深部分钻具继续滑动钻进,保证了孔底工具面向角值不变。在不改变螺杆钻具工具面和不致使钻具卸扣条件下,扭转运动幅度越大,摩擦阻力降低越明显,但在深孔工况下也越难以控制,目前采用人工控制时建议扭转钻进幅度在0.5~1.0圈。

2.2 复合钻进倾角控制技术

基于“岩屑楔”原理,选用带稳定器的单弯单稳螺杆钻具,稳定器外径略小于钻头直径。在复合钻进过程中,保持较高的钻进速度和较低的旋转速度,此时,经钻头切削形成的钻屑量大且粒径大,受稳定器阻卡作用,钻屑会在孔底部位堆积形成岩屑楔,使得钻具旋转过程中钻头切削上部煤岩程度较下部强,从而使钻孔倾角增大;而在较低的钻进速度和较高的旋转速度情况下,钻屑量小且粒径小,孔底保持相对清洁状态,受稳定器支撑作用,稳定器前端钻具在重力和离心力作用下钻头更多切削孔壁下部煤岩体,从而使钻孔倾角减小。按照理论分析,以适中的钻进速度和旋转速度可实现稳倾角钻进,而在试验中不仅验证了这一规律,同时还发现在较高的钻进速度和旋转速度时亦可保持稳倾角钻进,说明高钻速产生的倾角增大作用被高转速产生的倾角减小作用所“抵消”。试验表明:在煤层中,控制钻进速度高于0.5 m/min、旋转速度低于40 r/min时,倾角会明显增大;钻进速度低于0.25 m/min、旋转速度高于70 r/min时,倾角会明显减小;而给进速度为0.3~0.5 m/min、旋转速度为60~80 r/min,且随给进速度增加,旋转速度也同步增加时,倾角基本保持不变。复合钻进倾角控制技术在

实际应用时倾角造斜率可达到0.18(°)/m左右,满足顺煤层定向钻孔轨迹控制需要。

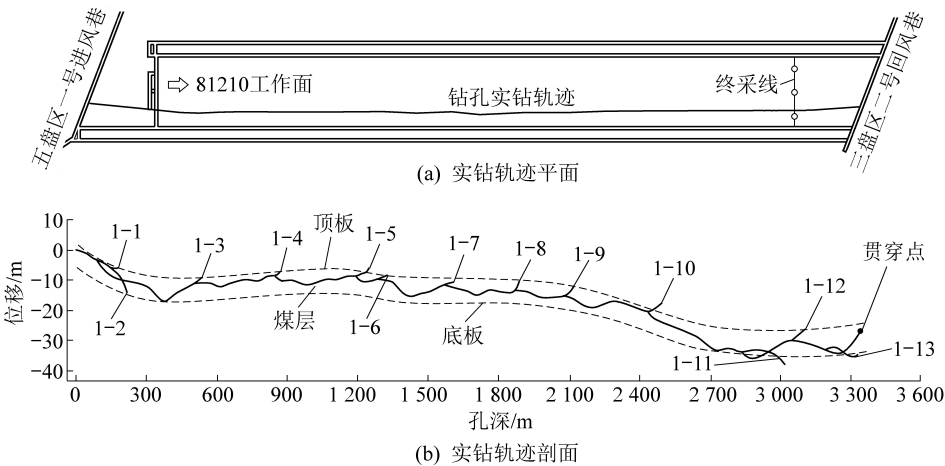
2.3 复合钻进侧钻分支技术

以往采用滑动定向钻进开分支最大深度为1 800 m,且经多次尝试才得以成功开出分支孔,开分支效率和成功率无法满足超长定向孔钻进需要。为此,借鉴复合钻进减小钻孔倾角原理,基于1.5°大弯角螺杆钻具更大的侧向切削力和定向钻头侧出刃结构设计,提出了在顺煤层钻孔中采用复合钻进开分支孔。开分支作业时,将钻头送至合适的分支点位后,采用低钻速和高转速(推荐钻速0.03~0.05 m/min、转速70~80 r/min),使钻头侧出刃在单位时间内连续多次切削孔壁下缘,提高钻头下切位移量与正向进尺量的比例,最终使钻头在向前推进的同时侵入下孔壁的煤岩体中,达到钻进分支孔的目的。

3 工程应用

工程实践在神东煤炭集团保德煤矿二盘区81210工作面进行,工作面走向长度约3 340 m,倾向长度240 m,煤层平均厚度6.8 m,普氏系数为1.7,煤层中上部及中下部分别分布有厚0.4 m和0.6 m夹矸层,普氏系数为2.0,煤层总体稳定性较好。

2019年8月至9月,钻进作业历时21 d,成功钻成了1个主孔深度3 353 m的顺煤层超长定向钻孔,创造了井下顺煤层定向钻孔深度纪录。钻孔直径120 mm,主孔煤层钻遇率100%,开分支13次,总进尺4 428 m,平均日进尺210 m,孔深达到2 000 m以上时,平均日进尺保持在190 m以上,在孔深3 000 m时仍实现了单班进尺126 m的高效定向钻进。钻孔实钻轨迹如图6所示。



1-1,1-2,...,1-13—定向钻孔分支孔编号
图6 3 353 m顺煤层超长距定向孔实钻轨迹

Fig.6 Actual drilling trajectory of 3 353 m ultra-long-distance directional drilling along coal seam

钻孔深度到达3 353 m时贯穿了81210工作面并与相邻三盘区二号回风大巷贯通,中靶坐标误差小于0.15%;钻孔贯通前,复合钻进给进压力6.5 MPa,回转压力16 MPa,泥浆泵压6.5 MPa;钻孔施工期间利用井下冲洗液净化循环系统累计处理冲洗液约4 500 m³,处理后的冲洗液最大固相含量不超过0.15%。

钻进过程中,应用滑动钻进减阻技术将滑动定向钻进深度提高至2 700 m,滑动定向开分支深度提高至2 076 m;采用复合钻进倾角控制技术将钻孔总进尺中复合钻进占比提高至91.5%;利用复合钻进侧钻分支技术实现了在孔深2 424、2 832、3 036、3 198 m处4次开分支作业,成功率100%。

4 结 论

1)研究形成的顺煤层超长距定向孔钻进关键技术与成套装备能够满足3 000 m以上顺煤层超长距定向钻孔施工需要,实现了与井下巷道3 353 m超长距离精准贯通,为煤矿大区域瓦斯超前治理提供了可靠的技术装备。

2)大功率深孔定向钻机钻进能力强且钻进系统压力富余;采用优化后的冲洗液管路结合大通孔钻具,有效降低了泥浆泵压力,同时也为压力脉冲信号传输提供了良好的水流环境;基于合理的系统参数设置,实现了泥浆脉冲信号在3 000 m以上孔深条件下的高质量稳定传输,系统连续准确测量达900余次;井下冲洗液净化循环系统运行稳定,大幅降低了定向钻进时清水用量和污水排放量,实现了井下定向钻进冲洗液由“开式循环”向“闭式循环”的跨越。

3)滑动钻进减阻技术有效降低了超长孔内滑动定向钻进阻力和钻进系统压力,提高了滑动定向钻进深度和滑动定向开分支深度;复合钻进倾角控制技术简化了定向钻进操作流程,显著提高了复合钻进孔段占比,进而提高了钻进效率和钻孔轨迹平滑度;复合钻进侧钻分支技术解决了超长孔内侧钻分支的难题,创新了煤矿井下侧钻分支工艺技术。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下1 800 m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 1 800 m horizontal directional drilling technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 109-113.
- [4] 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.
- [5] HUNGERFORD F, GREEN W. Inseam boreholes to and beyond 2000 m with a combination of slide and rotary drilling[C]//Proceedings of the 16th Coal Operators' Conference, New South Wales; university of wollongong, 2016: 223-235.
- [6] 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.
- SHI Zhijun, XU Chao, LI Quanxin, *et al.* Key technologies for making 2 570 m ultra-deep directional borehole effectively along the coal seam in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 196-201.
- [7] 王鲜,许超,刘飞,等.顺煤层超长孔定向钻进关键装备及应用效果分析[J].煤炭工程,2019,51(11):46-50.
- WANG Xian, XU Chao, LIU Fei, *et al.* Key equipment and application effect analysis of ultra-long directional drilling along coal seam[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 46-50.
- [8] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3 000 m顺煤层定向孔钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
- SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, *et al.* Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3 000 m in underground coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2019, 47(6): 1-7.
- [9] 方鹏.15000 N·m大功率定向钻机关键技术研究[J].煤田地质与勘探,2019,47(2):7-12.
- FANG Peng. Research on key technology of the 15 000 N·m high-power directional drilling rig[J]. Coal Geology and Exploration, 2019, 47(2): 7-12.
- [10] 姚克,张占强,李栋,等.煤矿井下钻探用系列泥浆泵车研制[J].煤田地质与勘探,2016,44(4):153-156,160.
- YAO Ke, ZHANG Zhanqiang, LI Dong, *et al.* Development of series of crawler mud pumps for drilling in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 153-156, 160.
- [11] 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 and Exploration, 2018, 46(6): 193-197.
- [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] 张幼振,石智军,田东庄,等. 高强度大通孔钻杆接头圆锥梯形螺纹的有限元分析及改进设计[J]. 煤炭学报,2010,35(7):1219-1223.

ZHAGN Youzhen,SHI Zhijun,TIAN Dongzhuang,*et al.* Finite element analysis and improved design for taper trapezium joint threads of high-strength drilling rod with big hole[J]. Journal Of China Coal Society,2010,35(7):1219-1223.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 刘 飞,许 超,王 鲜,等. 顺煤层超长定向钻孔钻压传递规律研究[J]. 工矿自动化,2019,45(8):97-100.

LIU Fei,XU Chao,WANG Xian,*et al.* Research of weight on bit transmission law of ultra-long directional borehole along coal seam[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(8):97-100.

[17] 苏义脑,谢竹庄.螺杆钻具和多头单螺杆马达的基本原理[J]. 石油钻采机械,1985,13(4):1-10.

SU Yinao,XIE Zhuzhuang. Basic principle of screw drill and multi-head single screw motor[J]. Drilling & Production Equipment,1985,13(4):1-10.

[18] 谢竹庄. 螺杆钻具推力轴承的载荷研究[J].石油机械,1993,21(3):26-31.

XIE Zhuzhuang. Study on thrust bearing load of screw drill[J]. China Petroleum Machinery,1993,21(3):26-31.

[19] 易先中,李智鹏,周元华,等. 地面钻柱扭摆方法释放井下摩擦阻的研究进展[J]. 钻采工艺,2014,37(4):73-76.

YI Xianzhong,LI Zhipeng,ZHOUYuanhua,*et al.* Research advances on releasing drill string friction effect by surface drill string oscillation method [J]. Drilling and Production Technology,2014,37(4):73-76.

[20] 韩烈祥. 基于静摩擦扭矩释放的快速滑动定向钻井技术[J]. 天然气工业,2015,35(11):60-65.

HAN Liexiang. A quick slide directional drilling technology based on static friction torque release[J]. Natural Gas Industry,2015,35(11):60-65.