

## 2 311 m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术

李泉新<sup>1</sup>, 石智军<sup>1</sup>, 许超<sup>1</sup>, 陈殿斌<sup>2</sup>

(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:**针对保德煤矿超长工作面瓦斯区域治理需要, 提出采用国产大功率定向钻进技术与装备进行顺煤层超长定向钻孔施工。根据工作面布置情况及钻遇煤层地质特征, 优化钻孔设计、优选钻进装备, 利用复合定向钻进技术减小孔内摩阻, 实现深孔钻进钻压的传递; 利用煤层钻孔递进式延伸技术和钻孔轨迹控制技术提高煤层钻遇率, 实现深孔精准钻进。结合保德煤矿生产需要施工完成了主孔深度 2 311 m、孔径  $\phi 120$  mm 的顺煤层超长定向钻孔。钻进结果表明: 钻进装备稳定可靠, 钻进工艺技术先进, 钻孔日平均进尺达到 200 m 以上, 孔深 2 000 m 以上单班进尺达到 90 m。研究可为顺煤层超长定向钻孔施工和超长工作面区域瓦斯治理提供重要借鉴。

**关键词:** 钻进技术; 钻进装备; 定向钻孔; 钻进效率; 超长钻孔

中图分类号: TD41; P634 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2018)04-0027-06

### Efficient drilling technique of 2 311 m ultra-long directional borehole along coal seam

LI Quanxin<sup>1</sup>, SHI Zhijun<sup>1</sup>, XU Chao<sup>1</sup>, CHEN Dianfu<sup>2</sup>

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

**Abstract:** In view of the need for gas control in the ultra-long working face in Baode Coal Mine, it is suggested to use the domestic high-power directional drilling technology and equipment to carry out the ultra-long directional borehole drilling construction along the coal seam. According to the layout of working face and the geological characteristics of coal seam, the borehole design and drilling equipment selection are optimized. By means of compound directional drilling technology, the friction within borehole is reduced and the drilling pressure transfer in deep borehole is realized. In addition, using the progressive drilling extension technology in coal seam and technology of borehole trajectory control, the drilling rate of coal seam is improved and the precise drilling in deep borehole is realized. To meet the production need of Baode Coal Mine, an ultra-long directional borehole along the coal seam with depth of 2 311 m and diameter of 120 mm has been constructed. The drilling process showed that the drilling equipment is stable and reliable, the drilling technology is advanced, the average daily drilling footage is up to more than 200 m, and the drilling footage within single shift reached 90 m for the borehole with depth more than 2 000 m. The present study can provide an important reference on both the construction of ultra-long directional borehole along coal seam and the control of gas in the ultra-long working face.

**Key words:** drilling technology; drilling equipment; directional drilling; drilling efficiency; ultra-long borehole

## 0 引 言

煤矿井下顺煤层定向钻孔具有轨迹精确可控、钻进深度大、瓦斯抽采效率高等优点, 已成为国内外

煤矿区中硬煤层瓦斯高效抽采的主要手段<sup>[1-5]</sup>。2003 年, 国内多家煤矿企业陆续引进澳大利亚 VLD1000 定向钻进装备, 并成功应用于中硬煤层顺层瓦斯抽采定向钻孔施工, 瓦斯抽采定向钻孔深度

收稿日期: 2018-01-03; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.04.005

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05061)

作者简介: 李泉新(1980—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 副研究员, 博士研究生。E-mail: liquanxin@cctegxian.com

引用格式: 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.

最大达到1 002 m, 钻孔终孔孔径 $\phi 94$  mm<sup>[6-7]</sup>, 初步实现了井下瓦斯区域抽采。2007年, 我国首台套具有自主知识产权的定向钻进装备问世, “十一五”期间, 国产定向钻进技术与装备得到不断改进、完善, 最大钻孔深度达到1 200 m以上, 钻孔终孔孔径 $\phi 98$  mm<sup>[8]</sup>。“十二五”期间, 为了实现顺煤层瓦斯抽采定向钻孔孔深1 500 m以上高效钻进, 满足煤矿区井上、井下区域联合立体化瓦斯抽采的需要, 解决国内大型矿井超长工作面瓦斯区域治理难题, 开展了中硬煤层大功率定向钻进技术与装备研究, 首次将复合定向钻进技术应用于煤矿井下近水平钻孔施工, 并于2014年在晋煤集团寺河煤矿施工完成孔深1 881 m、终孔孔径 $\phi 120$  mm的顺煤层定向钻孔<sup>[8-9]</sup>。

2017年, 为了进一步提高煤矿井下顺煤层定向钻孔深度, 验证井下顺煤层近水平钻孔复合定向钻进的技术优势, 在神华神东煤炭集团保德煤矿二盘区81210工作面成功施工完成了2个2 000 m以上的顺煤层超长定向钻孔, 其中最大钻孔深度达到2 311 m、终孔孔径 $\phi 120$  mm, 打破了由澳大利亚Metropolitan煤矿保持的顺煤层定向钻孔最大孔深2 151 m、终孔孔径 $\phi 99$  mm的世界纪录<sup>[10]</sup>, 这也彰显了我国煤矿井下定向钻进技术与装备的先进性与优越性, 研究成果对于探索煤矿井下超长工作面瓦斯治理新模式具有重要意义。

## 1 钻进装备

为实现2 000 m以上超长定向钻孔钻进作业, 配套的关键装备包括: ZDY12000LD大功率定向钻机、BLY390泥浆泵以及YHD2-1000(A)随钻测量系统。

### 1.1 ZDY12000LD型大功率深孔定向钻机

ZDY12000LD型大功率深孔定向钻机集主机、泵站、履带车体、操作台、防爆计算机、流量计等于一体, 具备独立行走功能。最大输出转矩达到12 000 N·m, 给进/起拔力达到250 kN, 主轴 $\phi 135$  mm大通孔设计可配套多种规格钻具, 满足井下顺煤层超长定向钻孔、顶板大直径高位定向孔、探放水定向长钻孔、大直径常规钻孔等多种钻孔工程需要。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、复合定向钻进以及回转钻进等多种钻进工艺要求。

### 1.2 BLY390/13泥浆泵车

BLY390/13泥浆泵车集成了泥浆泵、液压泵站、履带车体、电磁起动机、机车灯组件、甲烷传感器、操纵台等, 具备独立行走功能。泥浆泵采用液压驱动, 可实现泵量在0~390 L/min范围内无级调速, 泥浆泵额定输出压力达到13 MPa, 满足 $\phi 89$  mm螺杆马达驱动以及 $\phi 120$  mm定向钻孔钻进排渣需要。

### 1.3 YHD2-1000(A)随钻测量系统

YHD2-1000(A)随钻测量系统由孔底随钻测量探管、测量数据线、防爆计算机、防爆键盘、防爆存储器以及随钻测量软件等组成, 随钻测量系统采用孔口供电, 系统工作时间不受限制。

## 2 复合定向钻进技术

复合定向钻进技术最早应用于油气勘探开发领域, 是使用比较普遍、高效的钻进技术, 其原理是采用转盘或顶驱装置与井下滑动式造斜钻具相配合, 在定向造斜孔段采用滑动式造斜钻具进行定向造斜; 在稳斜段采用转盘带动钻柱和螺杆马达一起回转, 以“减压吊打”的钻进方式成孔。煤矿井下复合定向钻进与地面复合定向钻井在施工环境和钻压给进方式上存在较大差异, 煤矿井下定向钻孔多以近水平为主, 钻进过程中靠坑道钻机给进机构主动加压钻进, 在定向钻机动力头带动孔内钻杆转动的同时, 冲洗液驱动单弯螺杆马达带动钻头旋转形成复合定向钻进。

### 2.1 滑动定向钻进工艺

滑动定向钻进是螺杆马达定向钻进的一个显著特点, 钻进过程中钻机给孔内钻具施加近水平方向的钻压, 产生滑动给进力, 而螺杆马达转子带动钻头旋转碎岩, 其弯头稳定朝向预定方向, 从而实现钻孔轨迹连续人工控制, 因此滑动定向钻进是连续性的造斜钻进, 这也是煤矿井下常用的定向钻进方式。连续造斜造成钻孔轨迹平滑性差、钻孔排渣效果差、钻孔轨迹弯曲严重, 导致孔内钻具摩擦阻显著增大、钻压传递效率降低, 钻进系统压力随孔深增加快速升高, 不利于实现深孔钻进<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2 复合定向钻进工艺

复合定向钻进过程中钻机带动钻杆进行旋转和轴向滑动给进, 同时螺杆马达转子带动钻头旋转碎岩, 如图1所示。相对于滑动定向钻进, 在复合定向钻进工况下, 钻头转速高、碎岩动力强、钻进效率明

显提高;同时,复合定向钻进时由于钻杆持续旋转,使钻孔内沉渣少、孔壁光滑,大幅降低了孔内钻具摩擦,钻孔弯曲强度较滑动定向钻进大幅度降低,如图 2 所示,有利于实现深孔钻进钻压的传递,显著提高钻孔深度<sup>[12]</sup>。

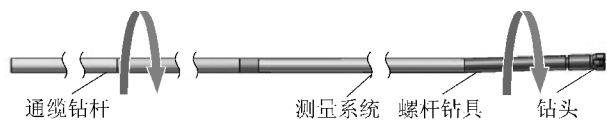


图 1 复合钻进工艺原理

Fig.1 Principle diagram of compound drilling technology

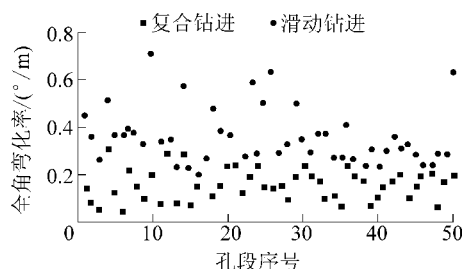


图 2 滑动和复合钻进钻孔弯曲强度对比

Fig.2 Comparison of bending strength of sliding drilling and compound drilling

因此,在定向钻孔施工中,在保证钻孔轨迹精度控制的情况下,应尽量增大复合钻进尺比例,提高轨迹平滑性,降低钻具摩擦,提高钻进效率和实现超深孔钻进。

### 3 钻孔轨迹控制技术

钻孔轨迹控制技术是保障井下顺煤层超长定向钻孔安全、高效施工的关键技术,其主要包括:复合定向钻进轨迹控制技术、煤层钻孔递进式延伸钻进技术、分支点选取原则、顶板趋势预测技术和钻孔轨迹剖面控制技术。

#### 3.1 复合定向钻进轨迹控制技术

复合定向钻进过程中最关键环节是钻孔轨迹控制,复合钻进时螺杆马达弯头朝向不断变化,钻孔轨迹基本处于稳斜状态,但为提高复合定向钻进效率,发挥复合钻进技术优势,可通过钻具组合和钻进参数优化,实现钻进过程中“稳斜快打”。当钻孔轨迹发生偏移时,利用滑动定向钻进工艺进行纠偏,当钻孔轨迹处于控制范围内时,利用复合钻进进行稳斜钻进,为此形成了“滑动纠偏+复合稳斜”的钻孔轨迹控制方法,流程如图 3 所示<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 煤层钻孔递进式延伸钻进技术

在本煤层钻进时为保证钻孔沿煤层延伸,可采

用“主动探顶+开分支+主动探顶+……”的递进式延伸钻进技术,如图 4 所示。该技术特点是每钻进一定距离主动上调钻孔倾角,使钻孔轨迹进入煤层顶板,根据探查到的顶板信息预测煤层及顶板岩层走向,然后退钻开分支沿顶板下方煤层继续钻进,探明煤层顶板起伏情况,从而保证钻孔轨迹沿煤层延伸。主孔完成后,退钻过程中再进行主动探底作业,探明验证煤层的厚度及起伏变化情况,为同一区域内钻孔施工提供借鉴<sup>[14]</sup>。

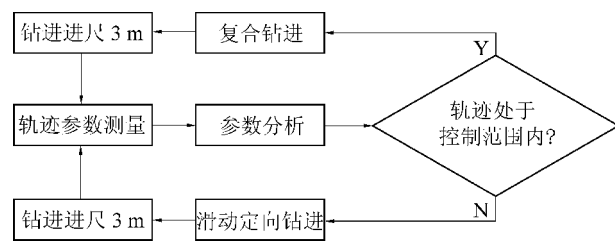


图 3 复合定向钻进技术流程

Fig.3 Technical flow chart of compound directional drilling

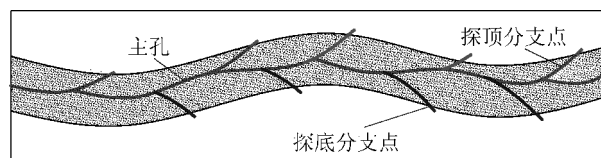


图 4 递进式延伸钻进技术原理

Fig.4 Technology principle progressive extension drilling

#### 3.3 分支点选取原则

钻孔开分支作业是顺煤层定向钻孔施工中常见且重要的环节,分支点的选择在开分支作业中至关重要,直接影响到后续钻孔施工质量和钻孔综合施工效率,分支点选择一般遵循的以下原则:①选择在钻孔轨迹倾角上升孔段,满足螺杆马达向下开分支的需要;②选择在位于煤层顶底板中间偏上位置的孔段,为分支孔开出后钻孔轨迹调整预留足够的空间;③选择的分支点钻孔轨迹倾角与预测的煤层倾角偏差不宜超过 $5^\circ$ ,避免分支孔开出后连续利用滑动造斜钻进进行轨迹纠偏,导致局部孔段轨迹弯曲严重,影响钻进动力传递;④若分支点选择在煤层或较软的岩层时,可提高开分支时钻头侧向切削速度,提高开分支的成功率和效率。

#### 3.4 顶板趋势预测技术

在完成探顶退钻开出分支后,剖面上钻孔轨迹超过最新探顶点位置前,钻孔轨迹控制均可由已探明的顶板起伏情况指导施工;当钻孔轨迹超过最新探顶位置后,就没有准确的信息作为指导,这种情况下可将最新探测的顶板趋势向前延伸 60~80 m 作



为预测顶板,为钻孔轨迹控制提供参考。当钻孔轨迹延伸超过最近探顶位置 60~80 m 后,为因地层起伏导致顶板空间位置信息误判,应开始进行下一轮探顶钻进,从而实现顺煤层定向钻孔递进式延伸。

### 3.5 钻孔轨迹控制技术

顺煤层定向长钻孔施工中,钻孔轨迹控制包括平面控制和垂直剖面控制,一般情况下平面控制就是按照预先设计对钻孔轨迹进行平面控制调整,垂直剖面控制按照探查的煤层顶板起伏变化情况,通过递进式延伸钻进工艺方法保证钻孔沿煤层钻进,因此钻孔轨迹垂直剖面控制更难,也更重要。

钻孔轨迹垂直剖面控制的具体技术方法是在开出分支以后,通过“滑动钻进纠偏为辅、复合钻进稳斜为主”的方法,沿煤层进行钻孔轨迹上下波动控制,钻孔轨迹倾角控制以预测煤层倾角为基准,偏差保持在 $-3^{\circ} \sim +3^{\circ}$ 以内。这种控制方法优点如下:①以复合钻进为主,钻孔轨迹更加平滑,有利于提高钻进动力传递效率,实现深孔钻进;②钻孔轨迹控制以预测的煤层倾角为基准进行上下波动,不会出现大的偏差,实现对孔内状况实时分析,有效避免盲目钻进;③每间隔一定距离预留分支点,为后续突发状况发生施工做好准备,有效保证了钻孔轨迹递进式延伸。

## 4 工程概况及效果分析

### 4.1 工作面概况

钻场位于东二盘区规划的 81210 工作面,主采煤层 8 号煤层,位于二叠系山西组下部,厚度 8 m,含有 2 层夹矸,最厚一层夹矸厚度为 0.4 m,夹矸为深灰-灰黑色泥岩;直接顶为砂质泥岩,灰色至深灰色,水平层理,层厚约 8 m,可作为钻孔施工的标志层来判断煤层起伏情况,为钻孔轨迹沿煤层控制延伸提供指导依据;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。

二盘区整体属于未开采区域,根据工作面原位样品测试显示原始瓦斯含量为  $4.87 \sim 8.96 \text{ m}^3/\text{t}$ ,钻孔所在的 81210 工作面推算原始瓦斯含量为  $8.48 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

81210 工作面为远期规划工作面,工作面基本沿南北走向,呈东高、西底趋势;工作面走向长度 3 400 m,综采面长 240 m。工作面走向两端的盘区

大巷已基本形成,为定向钻孔设计、施工提供了良好的条件。

### 4.2 钻孔设计

由于 81210 工作面暂未形成,只有将钻场分别布置在工作面走向两端已经形成的盘区大巷内,通过对穿施工定向长钻孔的方法,实现工作面瓦斯区域抽采,这要求单侧定向钻孔施工深度最少要达到 1 700 m 以上。此次施工地点位于保德矿五盘区集中一号回风大巷,从 81210 工作面开切眼一侧沿工作面推进方向施工定向长钻孔,共设计 3 个钻孔,每个钻孔均设计 1 个长分支孔,主孔和分支孔设计深度均达到 2 000 m 以上,钻孔间距 20 m,如图 5 所示。

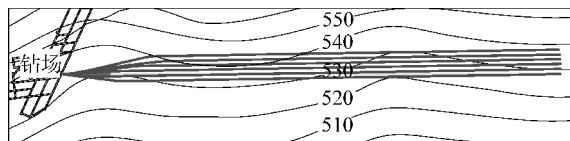


图5 钻孔轨迹平面设计

Fig.5 Plane design diagram of borehole trajectory

### 4.3 钻孔施工情况

在保德煤矿 81210 工作面,历时 34 d,成功完成深度 2 000 m 以上顺煤层超长定向钻孔 2 个,总进尺 5 204 m,煤层钻遇率 100%。其中 1 号钻孔最大钻孔深度达到 2 311 m,该钻孔共探顶 15 次,平均日进尺 200 m 以上,孔深达到 2 000 m 以上仍实现了单班进尺 90 m 的高效定向钻进,基于 1 号钻孔精确的探顶数据,2 号钻孔施工中仅利用 2 次探顶便成功完成了深度 2 008 m 的顺煤层钻孔施工。1 号钻孔轨迹如图 6 所示。

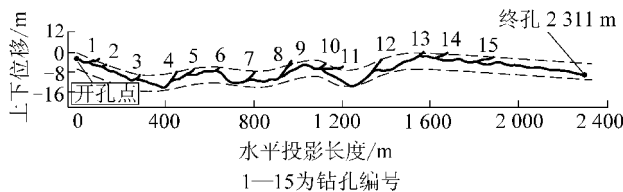


图6 2 311 m 定向钻孔轨迹

Fig.6 Directional borehole trajectory of 2 311 m

### 4.4 钻进装备适应性分析

1) 钻进过程表明:滑动定向钻进时施加在钻杆上的给进力随钻孔深度和钻速的增加而增大,因此在钻进过程中钻孔内摩擦效应也逐渐增强,这需要钻机具备足够大的给进力来抵消钻具的摩擦阻效应。

ZDY12000LD 定向钻机装备性能稳定、给进力大,当孔深超过 2 000 m 后,采用滑动定向钻进工艺技术,钻机给进油压超过 20 MPa,接近钻机额定给

进力;然而采用复合钻进工艺技术,钻机给进油压仅 5.4 MPa,只达到额定给进力的 25%左右,这说明钻进系统压力保持较低的水平,系统压力储备富余。复合钻进时钻孔内降低的摩阻力能为钻进提供持续钻进动力,通过对钻头和螺杆钻具持续加载,复合钻进速度比滑动钻进速度快。通过统计分析,2 311 m 顺煤层定向钻孔施工过程中,复合钻进孔段占总进尺的 65%。

2) 钻进过程表明:泥浆泵是深孔钻进的主要重要动力来源之一,通过泥浆泵输出高压水驱动螺杆钻具带动钻头持续碎岩。钻进开始时,BLY390 泥浆泵泵压 2.5 MPa,流量 250 L/min,随着钻杆长度的增加,泥浆泵的压力与流量持续增加,当钻孔深度超过 2 000 m 后,泥浆泵泵压 9.0 MPa,流量 280 L/min,泥浆泵压力及流量完全满足螺杆钻具的启动和正常工作,系统耐压能力强,同时,钻孔排渣顺畅,泥浆泵压力达到其额定压力的 75% 左右。

3) 钻进过程表明:测量系统的信号传输强度也是深孔钻进的主要限制因素之一,YHD2-1000(A) 随钻测量系统的信号传输强度主要表现为探管测量电压的变化,2 311 m 定向钻孔测量信号强度与孔深的变化曲线如图 7 所示,在孔口阶段,探管测量电压大于 14 V;当钻孔深度超过 2 000 m 后,探管测量电压在 10 V 左右;在孔深 2 311 m 位置,探管测量电压 9.71 V,高于信号传输的临界电压值 7 V 的要求,表现出良好的稳定性,且测量信号电压值与钻孔深度表现出近似的线性关系: $Y=14.885-0.002X$ 。

测量过程表明 YHD2-1000(A) 随钻测量系统稳定性高、测量数据精确、信号传输速度快、使用维护成本低,大幅提高了测量信号的传输效果和定向钻进效率,完全满足 2 000 m 以上顺煤层超长定向钻孔施工的需要。

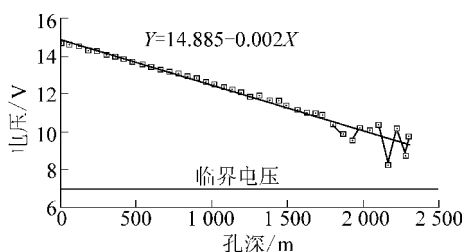


图 7 2 311 m 定向钻孔测量信号强度与孔深变化

Fig.7 Directional borehole measurement signal intensity with the change of 2 311 m borehole depth

## 5 结 论

1) 顺煤层超长定向钻进工艺技术及大功率定向钻进装备,很好地满足了 2 000 m 以上顺煤层超长定向钻孔施工需要,最大钻孔深度达到 2 311 m,有效解决了中硬煤层超长工作面瓦斯区域治理难题,对于提高工作面瓦斯抽采效率、缩短工作面准备周期具有积极意义。

2) 复合定向钻进工艺技术在实现顺煤层超长定向钻孔轨迹精确人工控制的情况下,有效克服了纯滑动定向钻进钻孔轨迹弯曲强度大、钻进动力传递效率低的局限性,同时简化了定向钻进操作程序,提高了钻进动力和转速,有效提升了钻进效率,实现了孔深 2 000 m 以上单班进尺 90 m 的高效定向钻进,复合钻进孔段占总进尺的 65%;利用煤层钻孔递进式延伸技术和钻孔轨迹控制技术,提高煤层钻遇率,实现深孔精确钻进。

3) 大功率定向钻进装备为超 2 000 m 顺煤层定向钻孔施工奠定了基础,ZDY12000LD 大功率定向钻机为深孔钻进提供给进力,同时提供复合钻进的回转动力,钻机系统压力储备富余;泥浆泵系统耐压能力强,通过对泥浆泵压力和流量的控制,使复合钻进更能发挥其优势所在;YHD2-1000(A) 随钻测量系统数据测量传输稳定,完全满足 2 311 m 顺煤层超长钻孔施工需要。

4) 钻进过程表明:钻进装备稳定可靠,钻进工艺技术先进,大功率定向钻进技术与装备对于探索煤矿井下超长工作面瓦斯治理新模式具有重要意义。

### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 石智军,张群,王保玉,等.煤层气开发精确对接井钻进技术装备研发与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(5):6-10,58. SHI Zhijun,ZHANG Qun,WANG Baoyu, et al. Research & development and application on drilling technology and equipment of accurate butted well for coalbed methane development[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 6-10, 58.
- [3] 姚宁平.我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J].煤田地质与勘探,2008,34(4):78-80. YAO Ningping. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China[J]. Coal Geology and Exploration, 2008, 34(4): 78-80.
- [4] 石智军,李泉新,许超.煤矿井下随钻测量定向钻进技术及

- 应用[J].地质装备,2013,16(6):32-36.
- SHI Zhijun, LI Quanxin, XU Chao. The MWD directional drilling technology and its application underground coal mine [J]. *Geology Equipment*, 2013, 16(6):32-36.
- [5] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下水平定向钻进技术与装备的新进展[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2015,42(1):12-16.
- SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Latest developments of horizontal directional drilling technology and the equipments for underground coal mine [J]. *Exploration Engineering; Rock & Soil Drilling and Tunneling*, 2015, 42(1):12-16.
- [6] LIU Z L, CHRIS F. The application of VLD directional drilling in China [J]. The 4th International Symposium on CBM/CMM in China, 2005:226-229.
- [7] 肖东辉,苏军康,斯蒂夫·芬奇,等.定向钻进孔底马达工具面向角变化规律分析[J].煤炭科学技术,2016,44(S1):109-113.
- XIAO Donghui, SU Junkang, Steve Finch, *et al.* Analysis on DHM tool face direction change pattern for directional drilling [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(S1):109-113.
- [8] 石智军,赵江鹏,陆鸿涛,等.煤矿区大直径垂直定向孔快速钻进关键技术与装备[J].煤炭科学技术,2016,44(9):13-18.
- SHI Zhijun, ZHAO Jiangpeng, LU Hongtao, *et al.* Key technology and equipment of rapid drilling for large diameter vertical directional borehole in mine area [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9):13-18.
- [9] 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 and Exploration*, 2016, 44(6):164-168.
- [10] FRANK Hungerford, WAYNE Green. Inseam boreholes to and beyond 2000 m with a combination of slide and rotary drilling [J]. *Proceeding of Coal Operators' Conference, Australia*, 2016:223-235.
- [11] 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 coalmine [J]. *Metal Mine*, 2014, 43(2):112-116.
- [12] 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. Directional drilling construction of coal seam gas drainage based on compound drilling technology [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(4):130-133.
- [13] 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.
- [14] 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.* Reserch on high efficient long directional drilling process for gas drainage in coal mine [J]. *Metal Mine*, 2011(6):39-55.

## (上接第21页)

- [19] 蔡记华,刘浩,陈宇,等.煤层气水平井可降解钻井液体系研究[J].煤炭学报,2011,36(10):1683-1688.
- CAI Jihua, LIU Hao, CHEN Yu, *et al.* Study on degradable drilling fluid system for coalbed methane horizontal drilling [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(10):1683-1688.
- [20] 张晶,郝世俊,李国富.煤层气水平井充气欠平衡钻井的井底环空压力设计与控制方法[J].中国煤炭地质,2015,27(11):48-51.
- ZHANG Jing, HAO Shijun, LI Guofu. Control of bottom annulus pressure in CBM horizontal well aerated under balanced drilling [J]. *Coal Geology of China*, 2015, 27(11):48-51.
- [21] 鲜保安,孙平,王一兵,等.煤层气水平井欠平衡钻井技术研究与应用[J].中国煤层气,2008,5(1):5-8.
- XIAN Boan, SUN Ping, WANG Yibin, *et al.* Research and application of under-balanced drilling technology in drilling horizontal CBM well [J]. *China Coalbed Methane*, 2008, 5(1):5-8.
- [22] 石智军,李泉新.煤矿区钻探技术装备新进展与展望[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2016,43(10):150-153,169.
- SHI Zhijun, LI Quanxin. New progress and prospect of drilling technology and equipment in coal mine area [J]. *Exploration Engineering; Rock & Soil Drilling and Tunneling*, 2016, 43(10):150-153,169.
- [23] 吴奇.地质导向与旋转导向技术应用及发展[M].北京:石油工业出版社,2012:3-41.