

# 煤矿井下水平定向钻进技术与装备的新进展

石智军, 李泉新, 姚克

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:**煤矿井下定向钻进技术作为一项工程领域的新技术,已经广泛应用于煤矿井下瓦斯抽采、防治水、地质勘探和精确工程钻孔施工等领域。经过在国内 30 多个矿区推广应用,煤矿井下定向钻进技术和装备逐渐完善并取得新进展,形成了 ZDY12000LD 型大功率定向钻机、无线随钻测量系统、地质导向钻进装置及复合定向钻进工艺。结合现场试验完成了主孔深度 1881 m 的煤层定向长钻孔和 1026 m 岩层定向长钻孔,充分说明了 ZDY12000LD 型钻机功率大、钻进及事故处理能力强,无线随钻测量系统测量精度高,配套复合定向钻进技术形成的钻孔孔壁光滑、沉渣少、钻孔曲率小,钻进效率高。

**关键词:**煤矿井下;定向钻孔;无线随钻测量;地质导向;大功率定向钻机;复合定向钻进

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)01-0012-05

**Latest Developments of Horizontal Directional Drilling Technology and the Equipments for Underground Coal Mine/SHI Zhi-jun, LI Quan-xin, YAO Ke (Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an Shaanxi 710077, China)**

**Abstract:** As a new technology, the directional drilling for underground coal mine has been applied in fields such as gas drainage, water control, geological exploration and accurate drilling borehole engineering. By the popularization and application in more than 30 mines of China, the horizontal directional drilling technology and the equipments for underground coal mine have been gradually improved with new progress; ZDY12000LD directional drilling rig, MWD by mud pulse transmission system, geo-steering drilling device and compound directional drilling technology have been formed. 1881m directional drilling borehole in coal seam and 1026m directional drilling borehole in rock were completed in underground coalmine, which show the advantages of ZDY12000LD rig in large power, high capability in drilling and accident processing and high measurement accuracy of MWD by mud pulse transmission system, by the combination of directional drilling with down-hole motor and rotary drilling technologies, the high drilling efficiency is achieved with smooth borehole wall, less cuttings and small borehole curvature.

**Key words:** underground coal mine; directional borehole; MWD by mud pulse transmission; geo-steering drilling; large power directional rig; directional drilling combined with down-hole motor and rotary drilling power

煤矿井下定向钻进技术可以实现钻孔轨迹的精确控制,保证钻孔轨迹在预定层位中的有效延伸,增长钻孔有效抽采距离,增加钻孔瓦斯抽采量,提高瓦斯抽采率;另外定向钻进技术可进行多分支孔施工,施工的钻孔能均匀覆盖整个工作面,具有钻进效率高、一孔多用、集中抽采等优点,能显著提高煤层瓦斯治理效果,现已成为我国煤矿区瓦斯高效抽采的主要技术途径<sup>[1-2]</sup>。

定向钻进技术自 2008 年开始在我国煤矿井下应用以来,据统计已在 30 多个矿区进行了广泛的推广应用<sup>[3-4]</sup>,不断改进完善并取得了新的重要进展,在国内煤矿井下完成了最大孔深 1881 m,终孔直径 98 mm 和孔深 1209 m,终孔直径 120 mm 的集束型

瓦斯抽采水平定向长钻孔;完成了最大孔深 1026 m,终孔直径 153 mm 的顶板岩石高位定向长钻孔。该技术不仅可应用于煤矿井下瓦斯抽采,还推广应用于煤矿井下探放水及工作面地质构造探测等工程领域,且均取得了良好的应用效果<sup>[5-8]</sup>。

煤矿井下随钻测量水平定向钻进技术与装备最新进展主要表现在:创新设计了定向钻机的结构和液压系统,使其额定扭矩达到了 12000 N·m;研制了煤矿用泥浆脉冲和电磁波无线随钻测量系统,实现了随钻测量信号由“有线传输”到“无线传输”质的改变;研制了煤矿用地质导向装置,实现了从“几何导向钻进”到“精确地质导向钻进”的跨越;开发了复合定向钻进技术,实现了从“滑动定向钻进”到

收稿日期:2015-01-03

基金项目:“十二五”国家科技重大专项(编号:2011ZX05041-001);陕西省 2011 年科技统筹创新工程计划项目(编号:2011KTCG-01-10)

作者简介:石智军,男,汉族,1955 年生,研究员,博士生导师,从事煤矿区煤层气钻井及煤矿井下坑道钻探技术研究及推广工作,陕西省西安市高新区锦业一路 82 号,shizhijun@cctegxian.com。

“旋转定向复合钻进”的跨越。

## 1 ZDY12000LD 型定向钻机

ZDY12000LD 型煤矿用全液压坑道钻机是集主机、泵站、操作台、防爆计算机、流量计、电磁起动柜、急停开关等于一体的大功率深孔定向钻机,适用孔底马达定向钻进、孔口回转钻进以及复合钻进等多种工艺,其结构如图1所示。



图1 ZDY12000LD 型大功率定向钻机

钻机采用整体式布局,具备独立行走能力,搬迁方便、现场布置灵活;回转器主轴采用  $\varnothing 135$  mm 大通孔结构,具备  $12000 \text{ N} \cdot \text{m}$  输出转矩,回转能力大,钻机给进/起拔能力  $250 \text{ kN}$ ,并可配套使用多种规格的普通钻杆、通缆钻杆、螺旋钻杆和打捞钻具等,具有较强的工艺适应性。

## 2 BLY390 型泥浆泵车

BLY390 型履带式泥浆泵车采用整体履带式结构(如图2所示),集成了泥浆泵组件、液压泵站、电磁启动器、机车灯组件、甲烷传感器、操纵台等装置;泥浆泵采用液压驱动,其排量能进行多级甚至是无级调节。泥浆泵在高排量下能够保证足够的压力,其最大泵量可以达到  $390 \text{ L}/\text{min}$ ,额定压力可达到  $12 \text{ MPa}$ ,很好地满足了水平定向长钻孔的成孔需求。



图2 BLY390 型泥浆泵车

## 3 防爆型无线随钻测量系统

### 3.1 泥浆脉冲无线随钻测量系统

泥浆脉冲无线随钻测量系统的工作原理是在井

下测量仪器完成钻孔轨迹倾角、方位及工具面的测量后,通过进行一定规律及次序的数据编码,控制脉冲发生器关闭或打开,从而控制钻杆内泥浆流体流量和压力的变化,从而产生泥浆正脉冲。孔口的泥浆压力传感器检测来自井下仪器的泥浆脉冲信息,并传输到孔口数据处理系统(防爆计算机,见图3)进行处理。整套系统由脉冲发生器、电磁阀驱动短节、电池筒、测量短节、流量开关及防爆计算机等组成(见图4)。

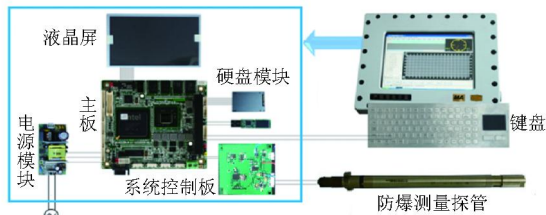


图3 防爆计算机



图4 泥浆脉冲无线随钻测量系统

由于测量系统在煤矿井下爆炸性气体环境中使用,且在小口径钻孔内采集钻孔测量数据,冲洗液排量小,相对于地面采用的泥浆脉冲随钻测量系统,煤矿井下用泥浆脉冲随钻测量系统具备以下功能:

(1) 防爆型泥浆脉冲随钻测量仪器直径较小,脉冲发生器直径为  $73 \text{ mm}$ ,测量仪器直径为  $35 \text{ mm}$ 。泥浆脉冲发生器在小排量冲洗液 ( $1.6 \text{ L}/\text{s}$ ) 的情况下也能产生稳定的脉冲信号,满足煤矿井下小排量和孔径条件下钻孔轨迹的测量要求。

(2) 泥浆脉冲发生控制器采用隔爆腔体设计,能够满足煤矿井下爆炸性气体环境的使用要求。

(3) 设计的控制器电路中最大电压、电流、电容、电感分别为  $16 \text{ V}$ 、 $0.4 \text{ A}$ 、 $10 \mu\text{F}$ 、 $0.1 \text{ mH}$ ,能够满足本安电路要求。

### 3.2 电磁波无线随钻测量系统

电磁波无线随钻测量系统由测量短节、充电电池筒、发控短节、接收天线和防爆计算机等组成,测量短节、充电电池筒和发控短节连接组成孔内仪器,并根据预设工作模式进行工作。孔内仪器检测钻孔轨迹参数后,按预先设定的编码规则将数据通过绝缘短节上部和下部钻杆柱以电磁波无线方式连续发射出去,经上部钻杆柱和煤系地层将数据传递至孔口,安装在孔口煤系地层中及孔口钻探装备上的接

收天线采集上传的电磁波信号并通过有线方式传递给防爆计算机中的信号采集板,信号采集板按预先设定的编码规则对信号进行解调,得出正确的孔内工程参数数据后,通过防爆计算机内数据处理软件在屏幕上上进行显示。

由于煤系地层电磁波信号传输衰减快、仪器在煤矿井下爆炸性气体环境中使用电气要求高、钻具规格较小,相对于地面采用的电磁波随钻测量系统,煤矿井下用无线随钻测量系统具备以下功能:

(1)研制的 $\varnothing 76$  mm 无磁绝缘短节和内部仪器绝缘装置,实现了电磁波无线发射两级绝缘,形成了小直径钻具电磁波数据传输通道;

(2)采用电流监控电路实时监控信号发射电流,当发射功率高于6 W 时,自动限流保护,确保煤矿井下安全使用;

(3)采用双通道数据接收,实现了近距离强信号保护和远距离微弱信号接收,试验接收误码率约2% ;

(4)具有连续工作和间歇工作两种模式,连续工作用于钻孔轨迹复测,间歇工作用于随钻测量定向钻进。

#### 4 地质导向钻进装置

研制的防爆型地质导向随钻测量装置主要由防爆地质导向测量探管和防爆计算机组成(见图5)。其中防爆地质导向测量探管由方位伽马测量短节、伽马电池筒、钻孔轨迹测量短节组成。使用时,防爆地质导向测量探管安装在定向钻进用螺杆马达后,需要测量时,防爆地质导向测量探管根据防爆计算机的操作指令进行工作,并通过有线传输通道将钻孔轨迹参数和地层伽马参数传递至防爆计算机,由防爆计算机进行数据处理和显示。

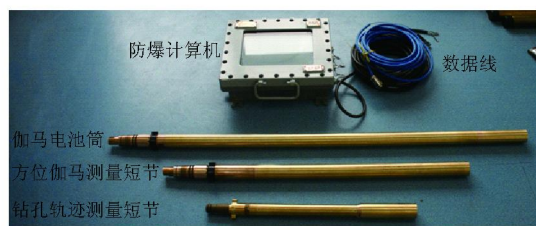


图5 地质导向随钻测量装置

本系统能准确测量钻头附近的地层伽马参数,从而判断出地层信息,并结合钻孔轨迹参数测量,控制钻孔沿着预定方向在煤层中延伸,为提高煤层钻

遇率、探明矿区地层地质信息及提高钻探施工效率提供了有效手段,具有以下创新性:

(1)采用有线传输方式,通过通缆钻杆组成的有线传输通道进行信号传输,显著增加了信号传输速度和可靠性,满足煤层快速钻进需要;

(2)开发了伽马电池筒限流控制电路,具有高压供电、短路保护和低电压损耗等特点,确保方位伽马测量短节长时间正常工作;

(3)开发了基于防爆计算机供电的钻孔轨迹测量短节,可单独使用进行几何导向钻进,也可组装使用进行地质导向钻进;

(4)完成了方位伽马测量短节小直径结构、方位伽马开窗结构、高压隔爆结构和抗震结构设计,既可测量地层伽马数值,又可测量伽马方位,提高了煤层顶底板判断能力。

#### 5 复合定向钻进技术

复合定向钻进工艺包括滑动定向钻进和复合钻进两种形式。滑动定向钻进过程中,钻头回转碎岩动力仅由泥浆泵提供,钻头和螺杆马达转子转动,定向钻机仅向钻具施加钻压,钻具其他部分只产生轴向滑动,孔底马达工具面可保持一个稳定的方向,从而实现钻孔轨迹连续人工控制。复合钻进过程中,泥浆泵向孔底泵送高压水驱动孔底马达带动钻头转动,同时钻机带动钻具回转并向钻具施加钻压,实现复合碎岩,并采用随钻测量装置对钻孔轨迹参数进行实时测量,从而掌握钻孔实时轨迹。这种钻进方法具有钻进效率高、钻孔轨迹平滑、预防钻孔事故和有利于实现深孔钻进的特点。借助滑动定向钻进钻孔轨迹控制功能和复合钻进高效及轨迹平滑的特点,提高了瓦斯抽采定向长钻孔深孔成孔率和成孔效率。图6为同等条件下滑动定向钻进与复合定向钻进钻孔弯曲强度对比,从图中可以看出复合定向钻进钻孔轨迹光滑,有利于深孔钻进。

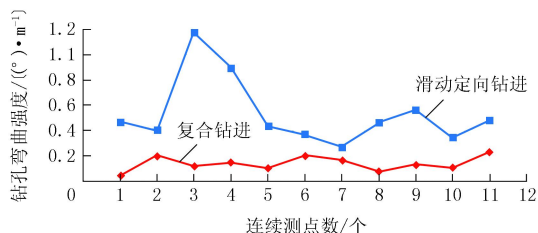


图6 复合钻进与滑动定向钻进钻孔轨迹全弯曲强度对比  
(两个连续测点间隔3 m)



### 6 现场应用

现场应用在晋煤集团寺河煤矿进行,代表性的钻孔有本煤层瓦斯抽采孔和顶板高位瓦斯抽采孔,其中 1 号钻孔孔深 1881 m,总进尺 2601 m,钻孔直径为 98 mm;2 号钻孔孔深 1209 m,总进尺 1767 m,钻孔直径为 120 mm;3 号钻孔孔深 1026 m,钻孔直径为 153 mm。

#### 6.1 1 号钻孔

1 号钻孔为本煤层钻孔,含分支孔 11 个,其中探顶分支 7 个、探底分支 4 个。在 1 号钻孔施工过程中,充分利用复合钻进钻孔偏斜规律,通过滑动定向钻进与复合钻进相结合的方法进行定向钻孔轨迹控

制。钻孔的实钻轨迹剖面图如图 7 所示。钻孔施工平均日进尺 210 m,复合钻进孔段占总进尺的 72%,孔深达到 1000 m 以上时,日平均进尺仍能达到 180 m 以上。钻进过程中,钻孔孔内状况一切正常,孔口排渣顺畅。由于大量采用了复合钻进工艺,钻进系统压力始终保持较低的水平,孔深达到 1881 m 时,钻进系统复合钻进给进系统压力 4.1 MPa,回转系统压力 6 MPa,滑动给进系统压力 8 MPa,远小于系统额定压力。采用的孔底马达最短首次检修时间为 365 h,最长首次检修时间为 410 h,使用寿命提高了 82.5%。钻孔轨迹测量采用无线随钻测量系统。

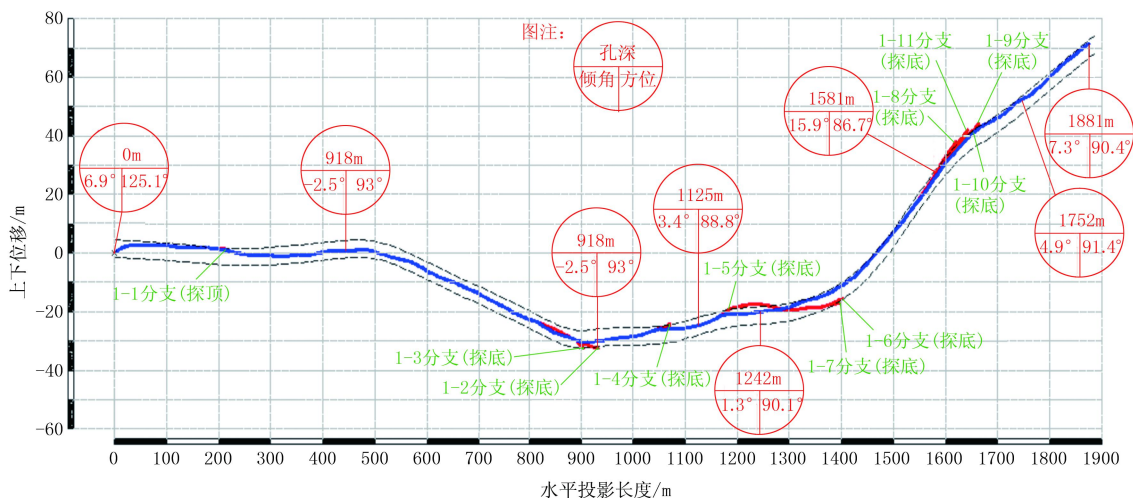


图 7 1 号钻孔实钻轨迹剖面

#### 6.2 2 号钻孔

2 号钻孔同为本煤层钻孔,共 5 个分支孔,其中探顶分支 4 个、探底分支 1 个,钻孔的实钻轨迹剖面图如图 8 所示。2 号钻孔钻进过程中采用了地质导向钻进装置,为了提高分辨率,对伽马数值进行了放

大。在钻孔初期,通过人为探顶、探底,确定煤层以及顶底板岩层伽马值,煤层中伽马值在 1000 ~ 3000 之间,而顶底板岩层伽马值在 5000 ~ 10000 之间。在钻进过程中,可根据伽马值大小判定钻孔实钻层位以及层位的变化趋势。

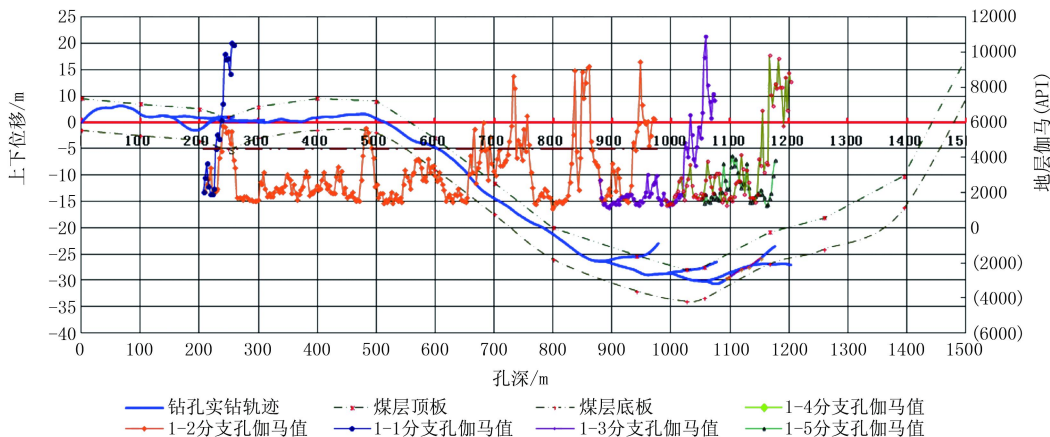


图 8 2 号钻孔地质导向实钻轨迹剖面



该钻孔复合钻进孔段占总进尺的50%以上,复合钻进给进系统压力4.2 MPa,回转系统压力6.6 MPa,滑动钻进给进系统压力5 MPa。钻孔施工完成后采用无线随钻测量系统对钻孔轨迹进行了复测,其轨迹如图9所示。

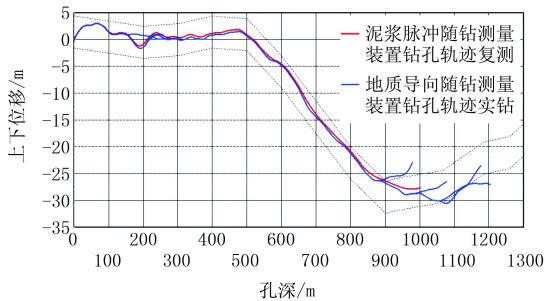


图9 2号钻孔复测轨迹剖面

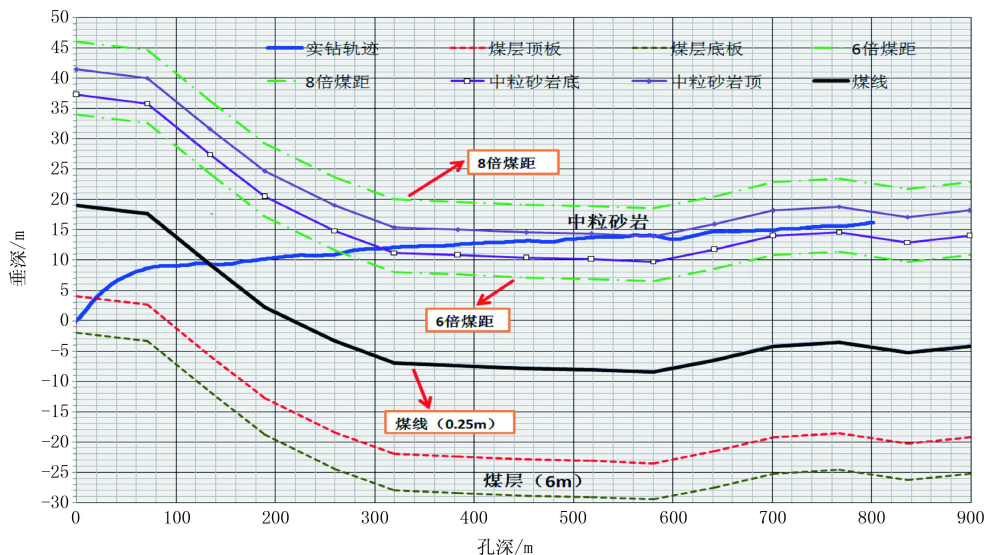


图10 3号钻孔实钻轨迹剖面

能力,测量精度满足实钻需求;无线随钻测量装置减少了对钻杆结构和密封性的要求,提高了钻杆强度和系统工作的安全性,降低了钻进成本。

(3)地质导向钻进装置能够很好测量出不同地层的伽马值,可作为分辨实钻地层的依据,有利于指导定向钻孔施工。

(4)复合定向钻进工艺满足定向钻孔轨迹控制的需要,形成的钻孔孔壁光滑、沉渣少、钻孔曲率小,钻进效率高,钻进系统压力较纯滑动定向钻进显著降低,有利于实现深孔钻进。

#### 参考文献:

[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

### 6.3 3号钻孔

3号顶板岩层高位定向长钻孔先导孔直径为98 mm,后采用 $\varnothing 153$  mm进行扩孔。先导孔钻进时最大日进尺达到了159 m,单班最大进尺达到了57 m,正常钻进时单班进尺在45m以上,在相同地层条件下,钻进效率较现有定向钻机大幅提升。3号高位钻孔轨迹如图10所示。

### 7 结语

(1)ZDY12000LD型钻机功率大、钻进及事故处理能力强。现场试验结果证明,该钻机完全可满足孔深1500 m以上本煤层定向超长钻孔以及1000 m以上的岩层定向长钻孔施工的需要。

(2)无线随钻测量装置具备长距离数据传输的

手册[M].北京:煤炭工业出版社,2012.

- [2] 李泉新,石智军.煤矿井下定向钻进技术的应用[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):86-88.
- [3] 石智军,姚宁平,叶根飞.煤矿井下瓦斯抽采钻孔施工技术与装备[J].煤炭科学技术,2009,37(7):1-4.
- [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,2013,14(6):32-34.
- [5] 石智军,董书宁.煤矿井下近水平随钻测量定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2013,41(3):1-6.
- [6] 姚宁平,姚亚峰,张杰,等.煤矿井下梳状定向孔钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2012,40(10):12-16.
- [7] 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,2008,36(4):78-80.
- [8] 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,2011,40(6):39-41.
- [9] 杨虎伟,许超,董萌萌,等.中硬煤层瓦斯抽采定向长钻孔高效钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):20-23,27.