

# 钻孔随钻三维轨迹测量技术研究

张 军

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

**摘要:**煤矿井下钻孔施工中,在缺少控制钻孔轨迹偏移测量技术的情况下,施工钻孔轨迹与钻孔设计轨迹偏差较大,无法满足煤矿瓦斯抽采的设计需求。阐述了随钻钻孔三维轨迹测量技术,目的是通过对随钻三维轨迹测量技术的研究,精确控制瓦斯钻孔轨迹,解决瓦斯突出煤层快速掘进及安全高效回采问题。钻孔随钻三维轨迹测量技术是通过测量钻机开孔角度和钻孔轨迹的精确测量,使用三维轨迹成图方法显示。通过大量的数据采集与施工验证证明,该方法成为预抽钻孔煤层保安全、促生产过程中的重要环节,避免了钻孔设计及施工的盲目性,提高了抽采钻孔的利用率及施工速度。

**关键词:**受控定向钻进;钻孔测斜仪;煤矿;底抽巷;钻孔轨迹;随钻三维轨迹测量

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)12-0007-06

## Borehole trajectory 3 - D survey while drilling

ZHANG Jun

(Xi'an Research Institute of Coal Science and Industry Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** In underground drilling for drainage in coal mines, the deviation between the drilled borehole trajectory and the designed borehole trajectory is large due to absence of inclination measurement technology to control the drilling trajectory; thus it can not meet the design requirements of gas drainage in coal mines. This paper expounds the technology of three-dimensional trajectory measurement while drilling, aiming at precisely controlling the trajectory of gas drilling in bottom drainage roadways through the investigation of 3 - D trajectory measurement technology while drilling, and achieving fast tunneling, and safe and efficient mining in gas outburst coal seams. The technology of 3 - Dimensional trajectory measurement while drilling is to accurately measure the inclination of drilling holes and the trajectory of drilling holes, and present them with the 3 - D trajectory mapping method. Through a large number of data acquisition and field verification, it has been proved that this method has become an important link in the process of coal seam safety and production, avoiding the blindness in borehole design and drilling, and improving borehole drainage coverage and drilling rates.

**Key words:** controlled directional drilling; borehole inclinometer; coal mine; bottom drainage roadway; borehole trajectory; borehole trajectory 3 - D survey while drilling

### 1 概述

在煤炭生产中,煤与瓦斯突出一直是煤矿安全生产的最大隐患,一直威胁着煤矿工人的人身安全和井田安全。为了提高井下作业安全系数,各个煤矿尝试通过各种不同的措施来解决这一安全隐患。国内外相关技术专家进行了多方面的研究,也采取了多项措施<sup>[1-3]</sup>。目前,瓦斯预防最常使用的方法是利用采前钻孔预抽放瓦斯,以降低煤岩层中瓦斯压力的方式来消除这一隐患。

钻孔测斜仪的研制,就是为解决监测钻孔钻进过程是否沿预先设计方向钻进,达到预期的抽放目的的难题而提出来的<sup>[4-7]</sup>。随着科学技术的发展,受控定向钻进技术的日益成熟,矿井超前探测以及精确的工程钻探的广泛开展,也迫切需要精度高、能全方位测量钻孔轨迹的仪器,为此经过长期不断研究,研制了随钻测量钻孔倾角和方位角技术与装备,实现了真正的全方位测量,解决了钻孔轨迹测量技术难题<sup>[8-12]</sup>。

收稿日期:2019-02-27 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.12.002

作者简介:张军,男,汉族,1981年生,副研究员,硕士,主要从事矿井电磁法与钻孔测量技术研究工作,陕西省西安市锦业一路82号,zjun0119@126.com。

引用格式:张军.钻孔随钻三维轨迹测量技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):7-12.

ZHANG Jun. Borehole trajectory 3 - D survey while drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12):7-12.

### 2 钻孔开孔精确监控技术

井下钻孔施工在地质超前探测、瓦斯治理和水害防治等多个领域作用突出。煤矿井下的瓦斯抽采、探放水等效果却直接受到钻孔成孔质量的影响<sup>[13-16]</sup>。

钻进施工的第一步就应该是钻机开孔角度的精确测量,因为钻孔成孔的质量首先受钻孔开孔精度的影响。因此,钻孔开孔精度在钻探作为煤矿瓦斯、水害等灾害预防的手段中尤为重要。目前,大多数煤矿仍然采用传统的简单测量工具结合人工测量的方法测定开孔方位角和倾斜角,其操作程序繁琐,停钻时间长,精度极低,测量误差常常大于10°以上,这给井下防治水、瓦斯抽采等工程的施工和验收带来诸多不便,实践中已不能满足煤矿安全高效开采的需要,有可能造成极为严重的后果。为解决此问题,需要使用矿用开孔定向装置,精确控制钻孔开孔角度。

煤井开孔定向监控装备主要由惯导测量部分、电源部分、显示部分等组成。惯导测量部分完成钻机姿态倾角与方位角的测量;电源部分主要实现测量单元和显示模块的供电;显示部分完成数字化显示,指导钻机姿态调整(参见图1)。

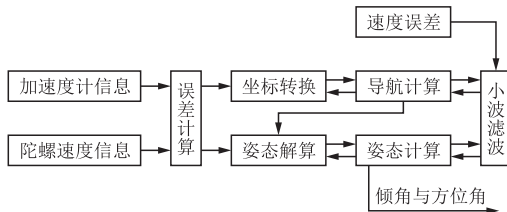


图1 开孔定向装置测量原理图

Fig.1 Survey principle of the orientation device for borehole start

开孔定向装置选取位置误差、速度误差、姿态误差和随机误差作为状态变量,系统状态方程为:

$$X'(t) = A(t)X(t) + W(t) \tag{1}$$

式中: $X'(t)$ —— $X(t)$ 的导数; $A(t)$ ——误差模型的系统矩阵; $X(t)$ ——系统状态变量; $W(t)$ ——系统噪声矩阵。

建立系统观测,系统量测量:

$$Z(t) = HX(t) + V(t) \tag{2}$$

式中: $Z(t)$ ——系统噪声; $H$ ——系统观测矩阵; $V(t)$ ——系统观测噪声。

观测位置与速度两种参数,然后进行求解完成滤波,抑制误差,实现开孔定向技术精确定向。

开孔定向装置根据显示角度调整钻机倾角和方位角,实现调整钻机与开孔测量同步工作。相比原

始的角度测量方法,大大提升了现有测量方法的准确性和便携程度,提高了煤矿井下定向钻进的施工效率。

### 3 钻孔随钻轨迹精确测量

#### 3.1 钻孔轨迹计算方法

将相邻两测点间的钻孔轴线看作为直线;该直线的倾角、方位角分别为上、下两测点的倾角、方位角的平均值;整个钻孔轴线仍是直线与直线连接的折线。钻孔轨迹偏离距离按下式计算:

$$X = \sum_{i=1}^n \Delta L_i \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \left( \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} - \theta_0 \right) \tag{3}$$

$$Y = \sum_{i=1}^n \Delta L_i \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \sin \left( \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} - \theta_0 \right) \tag{4}$$

$$Z = \sum_{i=1}^n \Delta L_i \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \tag{5}$$

式中: $X$ ——钻孔南北方向的偏离,其中向北为正、向南为负; $Y$ ——钻孔东西方向的偏离,其中向西为正、向东为负; $Z$ ——钻孔上下方向的偏离,其中向上为正、向下为负; $\alpha$ ——钻孔的倾角; $\theta$ ——钻孔的方位角; $\Delta L$ ——测点A、B间的距离。

钻孔空间轨迹计算原理如图2所示。

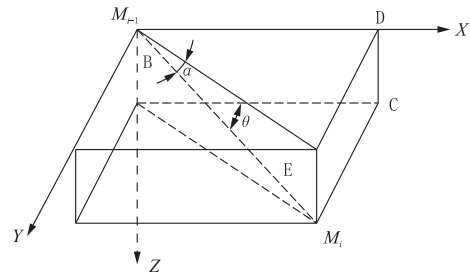


图2 钻孔空间计算原理示意图

Fig.2 Diagram of spatial calculation principle for boreholes

此法是现场手算常常采用的方法,以上、下两测点倾角、方位角的平均值作为轴线的计算角度,降低了增斜段和减斜段水平位移、垂直深度的计算误差;在测点间距较大、曲率半径较小时有一定误差。

#### 3.2 误差的产生与消除

在野外测量和室内校验测斜仪时,在条件不变的情况下,对同一测点做反复多次测量,会看到测值有波动现象,如果测次足够,各个数值出现的频率符合正态分布规律,这也是与误差产生的机理相吻合的。用有限多次的测量数据的均值来代替数学期望。计算公式如下:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (6)$$

$$S_{\theta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2 \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \pm \lambda \sqrt{S_{\theta}^2/n} \quad (8)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (9)$$

$$S_T^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \quad (10)$$

$$\Delta T = \pm \lambda \sqrt{S_T^2/n} \quad (11)$$

式中:  $\bar{\theta}$ 、 $\bar{T}$ ——倾角、方位角测量数据的加权平均值;  $\theta_i$ 、 $T_i$ ——同一测点修正后的倾角、方位角测量数据;  $S_{\theta}$ 、 $S_T$ ——倾角、方位角测量数据的标准差;  $n$ ——参加统计计算的测量数据的个数, 又称自由度;  $\Delta\theta$ 、 $\Delta T$ ——倾角、方位角的置信区间;  $\lambda$ ——在置信系数  $T=0.01$  和  $n-1$  自由度下,  $t$  分布的临界值, 可查表求得。

在实际工作中不可能在同一测点进行很多次的测量, 测次的增加, 有时也会造成标准差的增加, 误差减小的幅度逐渐降低。

### 3.3 钻孔轨迹精确测量技术

轨迹仪由控制器与探管组成。控制器与探管连接, 实现控制器与探管之间的时间同步和数据传输。探管安装在钻头后的无磁钻铤中, 探管主要完成对钻孔的轨迹参数的测量, 方位测量根据大地磁场确定探管的方向姿态; 倾角测量采用加速度传感器, 根据重力加速度确定探管的俯仰角度。控制器在孔口与探管同步工作并记录钻孔深度, 控制器主要用于煤矿井下监测和测量数据采集、通信、处理及存储, 可实时显示数据及钻孔三维轨迹图。

钻孔轨迹精确测量系统包括数据精确计算过程, 同时钻孔轨迹数据的采集更为重要。在钻孔施工中主要由等待准备、钻进施工和退钻几个部分组成。在钻进施工过程中进行轨迹测量, 钻机停止钻进时曲线变为水平稳定状态。测量完成后继续进行钻进。通过对钻孔信息的有效监测, 可以精确监控钻孔施工的整个过程, 同时保障钻孔轨迹测量的有效性和可靠性, 避免了因为操作有误导导致的钻孔信息不准确的现象发生。

## 4 三维轨迹测量技术研究

在常规的钻孔轨迹测量中使用的是测量倾角和

方位角, 然后在二维空间显示测量曲线, 这种方法虽然能够看出钻孔在二维空间的展布, 但是很难在三维空间里看出整个钻孔的分布规律和分布形态, 这样的结果既不利于钻孔设计, 也不利于钻孔瓦斯抽放, 会为煤矿安全生产埋下隐患。

在钻孔轨迹测量中最常用的有 3 种方式: 一种是打完钻孔进行测量, 一种是随钻钻孔轨迹测量, 还有一种是随钻轨迹测量并实时显示与控制轨迹的方法。第一种测量方法需要在钻孔形成后进行, 这样就影响了钻孔施工进度, 降低了钻孔施工效率; 第三种测量方法方便快捷, 并且能够实时显示钻孔轨迹, 指导打钻, 但是这种测量装备成本昂贵, 难以在煤矿普遍使用; 在这种情况下, 第二种测量方法称为煤矿能够普遍使用的钻孔轨迹测量方式。

通过钻孔角度的计算, 得到钻孔在三维空间的分布。假设原点  $O$  为钻孔开孔点,  $X$  轴为勘探线方向,  $Y$  轴的方向垂直于勘探线,  $Z$  轴为地下铅直方向, 钻孔的开孔坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 第  $N$  点  $P_n$  的倾角为  $\theta_n$ , 方位角为  $\alpha_n$ , 第  $n+1$  点  $P_{n+1}$  的倾角为  $\theta_{n+1}$ , 方位角为  $\alpha_{n+1}$ 。

$$X_{n+1} = X_n + \Delta L \cos \frac{\theta_n + \theta_{n+1}}{2} \cos \left( \frac{\alpha_n + \alpha_{n+1}}{2} - \alpha_d \right) \quad (12)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + \Delta L \sin \frac{\theta_n + \theta_{n+1}}{2} \cos \left( \frac{\alpha_n + \alpha_{n+1}}{2} - \alpha_d \right) \quad (13)$$

$$Z_{n+1} = Z_n + \Delta L \cos \frac{\theta_n + \theta_{n+1}}{2} \quad (14)$$

式中:  $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$ ——第  $n$  个测点的三维坐标;  $X_{n+1}$ 、 $Y_{n+1}$ 、 $Z_{n+1}$ ——第  $n+1$  个测点的三维坐标;  $\Delta L$ ——第  $n$  个测点与第  $n+1$  个测点之间距离;  $\theta_n$ 、 $\theta_{n+1}$ ——第  $n$  个测点与第  $n+1$  个测点的倾角;  $\alpha_n$ 、 $\alpha_{n+1}$ ——第  $n$  个测点与第  $n+1$  个测点的方位角;  $\alpha_d$ ——勘探线方位角。

依据计算式(12)~(14)可求出各测点的三维坐标, 利用计算后得到的钻孔轨迹数据绘制三维轨迹图如图 3 所示。

## 5 应用实例

### 5.1 矿区地质与瓦斯情况

该井田切割较深, 沟谷纵横, 地层裸露。井田内褶皱、断层以及陷落柱较发育, 井田内褶皱属宽缓型褶皱, 断层皆为小型层间断层; 陷落柱常成群出现, 一定程度上影响到了采区的划分。井田内构造复杂

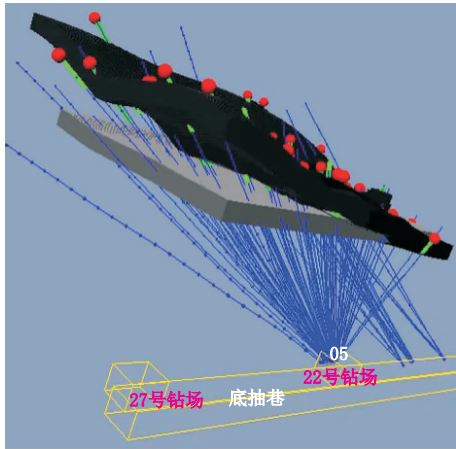


图3 钻孔三维轨迹测量方法示意图

Fig.3 3-D trajectory measurement method for boreholes

程度简单偏中等。

矿区属典型的高瓦斯矿井,在实际开采过程中曾多次发生煤与瓦斯突出现象。瓦斯含量随煤层埋深的增加而增高,在构造破碎带、采空区瓦斯易局部聚集。

### 5.2 钻孔设计方法

矿用钻孔轨迹测量仪方位角传感器现测量选用体积小、高精度、高集成度的磁阻传感器;不仅使轨迹仪体积大大减小,降低电路复杂度,同时增强了仪器抗震性,提高了测量精度。采用无缆测斜技术,测斜无需电缆,借助钻杆推送探管,实现了真正意义上的全方位测量,使上仰、下俯、水平、垂直各种钻孔测量简便易行,且使用方便。

通常情况下,矿井钻孔设计采用平面绘图软件进行剖面图(如图4所示)和平面图设计(如图5所示),该设计方法无法直观显示钻孔空间位置,难于理解钻孔空间分布。

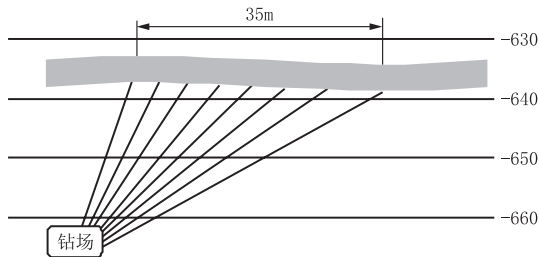


图4 底抽巷钻孔设计剖面图

Fig.4 Borehole design profile for bottom drainage roadway

在传统设计方法使用的基础上,进一步研究了三维显示软件在钻孔轨迹测量中的应用,采用三维技术应用于钻孔测量中。以某矿底抽巷道瓦斯抽采勘探孔为例,钻孔三维布置如图6所示。该矿区地层

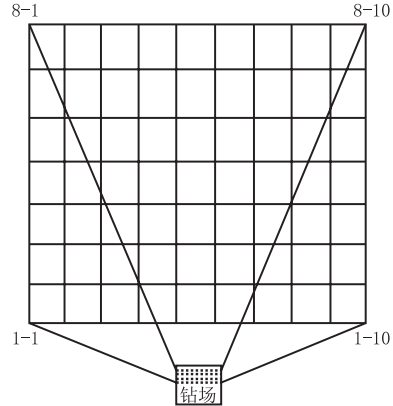


图5 底抽巷钻孔设计平面图

Fig.5 Plan of drilling design for bottom drainage roadways

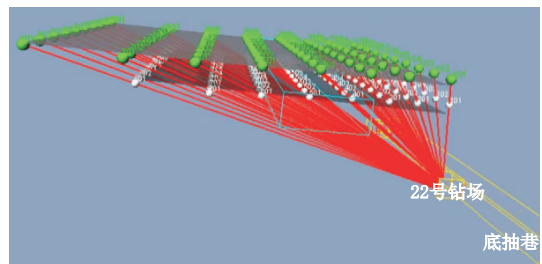


图6 底抽巷钻孔布置三维图

Fig.6 3-D drawing of the borehole layout in the bottom extraction roadway

受客观因素限制,根据对前期完工钻孔测斜数据分析,以现有的钻探施工方法及工艺设备难以满足地质岩心钻探规程要求。根据矿区方位角变化小的特点,对钻孔轨迹采取相应监测和控制措施。

底抽巷道瓦斯抽采孔目的是在底抽巷道进行穿层孔施工,在顶板煤层预掘进巷道位置设置等间距钻孔,提前抽采煤层中的瓦斯,保障煤层巷道掘进施工安全,钻孔见煤点设计如图7所示。

### 5.3 钻孔测量实例

由于钻机开孔角度不准确造成的钻孔成孔质量差的情况十分普遍,因此,在钻孔施工中首先使用开孔定向仪精确控制钻机开孔倾角与方位角。在钻孔钻进过程中使用随钻轨迹测量装置进行实时跟踪测量。

新型钻孔轨迹测量仪在全国各地矿业集团获得了广泛的应用,轨迹仪在抽放瓦斯孔、工程地质孔以及探放水孔等方面都具有良好的应用效果。现以底抽巷道瓦斯抽放钻孔的实例进行说明。底抽巷钻孔是为了释放煤层的瓦斯压力而施工的卸压孔,钻孔发生偏斜,应该钻进的区域没有钻孔,将达不到应有的卸压抽采效果。近年来,由于推行井下钻孔测斜

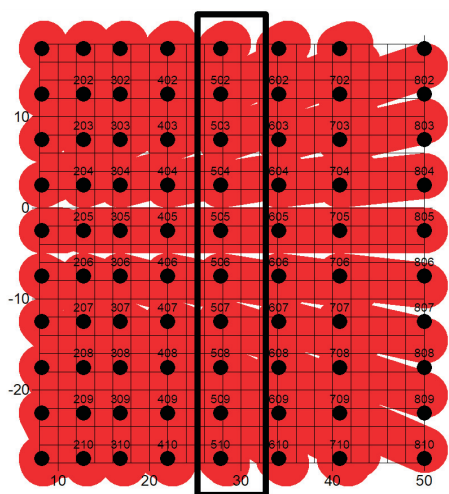


图 7 钻孔见煤点设计图

Fig.7 Borehole design at coal occurrence

技术,规定地质钻孔测斜校正、消除误差而引发的不安全事故,终于实现了矿井安全生产。底抽巷实钻钻孔轨迹三维效果如图 8 所示。

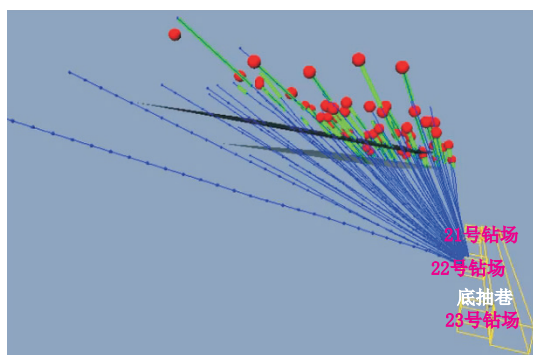
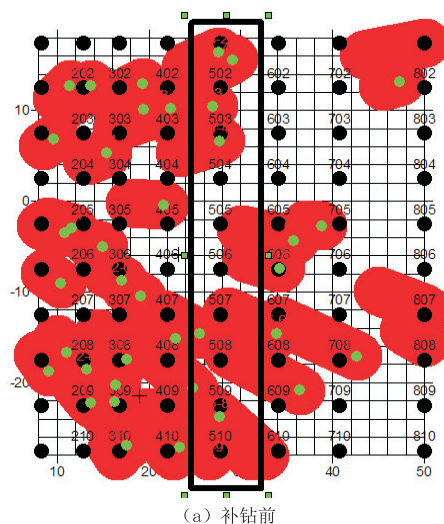


图 8 底抽巷实钻钻孔轨迹三维图

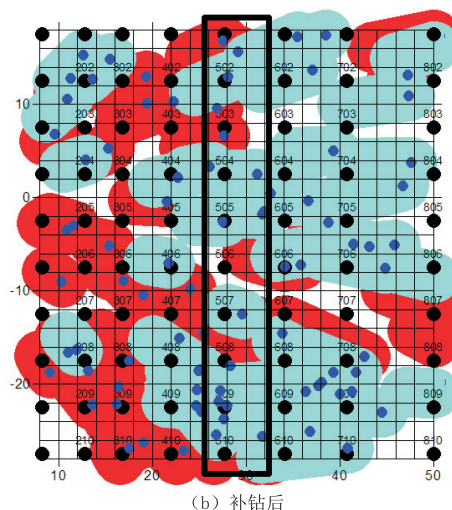
Fig.8 3 - D trajectory of actual drilling holes in the bottom extraction roadway

在按照设计进行钻进施工后,绘制了钻孔见煤点示意图(见图 9),由图 9(a)可以看出,在完成设计钻孔施工后,见煤位置仍然有大范围空白区域,这些区域钻孔没有钻进到位,这样就可能导致大量的瓦斯仍然在未钻进位置聚集,对后期巷道掘进和煤层回采将产生很大的安全隐患。通过实钻钻孔的三维显示和对见煤点位置的分析后,利用钻孔开孔精确监控技术和钻孔随钻轨迹精确测量技术对该钻场进行了补孔,补孔后钻孔见煤点如图 9(b)所示,此时,见煤点位置钻孔基本均匀覆盖了该区域,这样就达到了通过钻孔进行瓦斯抽采的目的,提高钻孔精度与施工效率的同时,大大提高了煤矿安全生产的任务。

通过对每个钻孔进行开孔定位精确测量以及钻



(a) 补钻前



(b) 补钻后

图 9 补钻前后钻孔见煤点对比图

Fig.9 Comparison of coal occurrence points before and after infill drilling

孔轨迹的精确测量,绘制出钻孔轨迹三维图,同时将设计见煤点与实钻见煤点以及实钻煤层位置在图中显示(如图 10 所示)。通过该图可以清楚地看到钻孔位置及其他相关信息,为煤矿钻探工作提供可靠的技术支持,有力的提高了生产效率和安全保障。

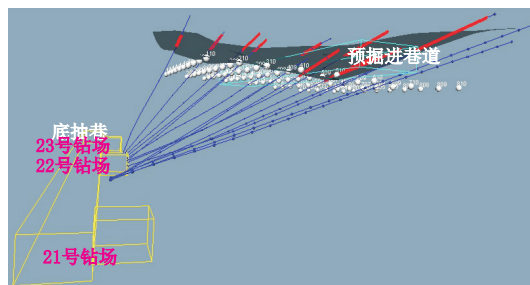


图 10 底抽巷实钻煤层三维图

Fig.10 3 - D drawing of the actual drilled coal seam for the bottom of extraction roadway

矿用开孔定向仪和钻孔轨迹测量装备应用以后,先是被应用在了煤层底抽巷道抽采控制孔以及探放水孔等钻孔中,使用钻孔轨迹仪对钻孔倾斜度进行测量。在每一个钻孔施工结束后,可通过实时在三维图中添加钻孔信息,通过已有钻孔信息,实时调整后孔的布置与设计,达到高产高效的作用。

## 6 结论

采用钻机开孔精确监控技术与钻孔三维随钻轨迹测量技术,测量过程中可精确测量开孔信息,在钻机打钻过程中就可以实现对钻孔信息的测量。钻进结束后,可以对钻孔轨迹进行成图、分析。

通过在煤矿针对钻孔开孔精确监控技术、钻孔随钻轨迹精确测量及三维显示技术的使用,证明了该测控方法在煤矿钻孔施工中具有数据精确,施工效率高,显示效果好的突出特点。开孔精确监控技术在提高施工效率的同时,大大提高了测量精度;钻孔轨迹精确测量技术不但测量得到了钻孔准确空间位置信息,同时可以监测钻孔施工全过程,避免了人为误操作造成的误差;三维显示技术改变了以往二维条件下钻孔显示不直观引起的问题。总之,矿井钻孔随钻三维轨迹测量技术为煤矿钻孔的高效使用提供了强有力的技术设备支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王清峰,黄麟森.基于外部供电的矿用随钻测量装置研究及应用[J].煤炭科学技术,2013,41(3):12-15.  
WANG Qingfeng, HUANG Linsen. Study and application of mine measuring device with drilling based on external electric power supply[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(3):12-15.
- [3] 方俊,石智军,李泉新,等.新型煤矿井下定向钻进用有线随钻测量装置[J].工矿自动化,2015,41(8):1-5.  
FANG Jun, SHI Zhijun, LI Quanxin. Novel cable measurement while drilling device used for directional drilling in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2015,41(8):1-5.
- [4] 袁鹏斌,余荣华,欧阳志英.无线随钻测量信息传输的现状与问题[J].焊管,2010,33(10):65-69.  
YUAN Pengbin, YU Ronghua, OUYANG Zhiying. The current status and problems of wireless signal transmission in measurement while drilling[J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(10):65-69.
- [5] 吴银成,张小波.基于电磁波传输随钻测量参数的技术[J].煤矿安全,2015,46(6):100-103.

- WU Yincheng, ZHANG Xiaobo. Technology of parameters measurement while drilling based on electromagnetic wave transmission[J]. Safety in Coal Mines, 2015,46(6):100-103.
- [6] 王家豪,董浩斌,石智军,等.煤矿井下随钻测量电磁传输信道建模[J].煤炭学报,2015,40(7):1705-1710.  
WANG Jiahao, DONG Haobin, SHI Zhijun, et al. Modeling an EM channel for MWD in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(7):1705-1710.
- [7] 刘喜龙,张军,赵明校,等.钻孔轨迹测量技术及应用研究[J].西部探矿工程,2016,28(11):17-20.  
LIU Xilong, ZHANG Jun, ZHAO Mingxiao, et al. Research on the technology and application of borehole trajectory measurement [J]. West-China Exploration Engineering, 2016,28(11):17-20.
- [8] 张军.矿井长钻孔随钻轨迹测量技术研究[J].能源与环保,2019,41(2):67-72.  
ZHANG Jun. Research on measurement technique of long borehole trajectory in mine shaft[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019,41(2):67-72.
- [9] 张群,石智军,姚宁平,等.我国定向长钻孔技术和设备应用现状分析与建议[J].中国煤层气,2007,4(2):8-11.  
ZHANG Qun, SHI Zhijun, YAO Ningping, et al. Analysis and suggestions on application of directional long boreholing technologies and drills in China[J]. China Coalbed Methane, 2007,4(2):8-11.
- [10] 王新,万教育,冯国军.塔河油田短半径水平井侧钻技术[J].石油钻采工艺,2003,25(1):15-17.  
WANG Xin, WAN Jiaoyu, FENG Guojun. Short radius horizontal sidetracking technology in Tahe Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(1):15-17.
- [11] 刘景顺,滕振兴.煤矿瓦斯抽放钻孔轨迹控制的理论探讨[J].煤矿安全,1995(7):27-30,34.  
LIU Jingshun, QI Zhenxing. Discussion on the theory of controlling the drilling track of gas drainage in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 1995(7):27-30,34.
- [12] 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.  
YAO Ningping. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2008,36(4):78-80.
- [13] 姚宁平,张杰,李乔乔.煤矿井下近水平定向钻技术研究与与应用[J].煤炭科学技术,2011,39(10):53-57.  
YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Qiaoqiao. Research and application of horizontal directional drilling technology in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2011,39(10):53-57.
- [14] 黄才启,朱永宜.受控定向钻孔轨迹设计方法[J].探矿工程,1991(5):22-25.  
HUANG Caiqi, ZHU Yongyi. Design of trajectory for controlled directional borehole [J]. Exploration Engineering, 1991(5):22-25.
- [15] 高珺.矿用随钻测量系统中数据传输技术研究[J].中州煤炭,2016,38(4):115-117,121.  
GAO Jun. Research on data transmission technology in mine-used MWD systems[J]. Zhongzhou Coal, 2016,38(4):115-117,121.
- [16] 王兆丰,刘军.我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J].煤矿安全,2005,36(3):29-32.  
WANG Zhaofeng, LIU Jun. Problems Existing in methane drainage in coal mines of China and probing into the counter-measures[J]. Safety in Coal Mines, 2005,36(3):29-32.