



朱墨然. 煤矿瓦斯抽采钻孔三维模拟及控制效果评价[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(3): 50-55.

ZHU Moran. 3D simulation and control effect evaluation of gas extraction drilling in coal mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3): 50-55.

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20240418

扫码阅读下载

煤矿瓦斯抽采钻孔三维模拟及控制效果评价

朱墨然^{1,2}

(1. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:针对瓦斯抽采钻孔施工完成后缺少钻孔三维可视化及控制效果评价的工具,难以精确识别钻孔空白带,留下安全隐患的问题,提出了一种抽采钻孔的三维模拟及评价技术。通过导入采掘工程平面图和钻孔施工数据,提取巷道、钻场、钻孔、测量点等基础数据,对巷道底板高程沿导线测量点的高程值进行插值处理,将巷道等图元的二维坐标转换为三维坐标,构建了可反映煤层、巷道和钻孔特征的三维模型。提出了基于体积法的钻孔控制效果评价方法,将煤层划分为若干个边长等于抽采有效半径的控制体,通过计算穿过控制体钻孔长度之和与抽采有效半径的比值来定量评价钻孔的控制效果,并将钻孔控制效果用不同的颜色进行三维展示,便于对钻孔的疏密及钻孔空白带的位置进行分析,为精确补充钻孔提供决策依据。基于该技术,开发了抽采钻孔三维模拟及控制效果评价系统,并在窑街煤电金河煤矿16215工作面进行了应用,处理了3786个钻孔数据,绘制了巷道、钻场、钻孔和煤层的三维模型,钻孔三维模拟情况与现场一致,通过控制效果分析对钻孔空白带施工了补充钻孔,有效消除了潜在安全隐患。

关键词:煤与瓦斯突出;瓦斯抽采;抽采钻孔;三维模拟;控制效果;效果评价

中图分类号:TD712.6

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)03-0050-06

3D simulation and control effect evaluation of gas extraction drilling in coal mine

ZHU Moran^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: To address the issue of lacking tools for three-dimensional visualization and control effect evaluation after the completion of gas extraction drilling, the lack of a three-dimensional visualization and evaluation tool for the dilling effects makes it difficult to accurately identify drill blank zones accurately, thereby leaving hidden safety hazards. To address this issue, a three-dimensional simulation and evaluation technique for gas extraction drilling was proposed. This technique involves importing mining engineering plans and drilling construction data to extract basic information such as roadway, drilling site, drilling, and measurement point were obtained. By interpolating the elevation values of roadway floors along guide points were interpolated and converting the two-dimensional coordinates of roadway elements into three-dimensional coordinates, a three-dimensional model reflecting the characteristics of coal seam, roadway, and drilling was constructed. The evaluation method of drilling control effect based on volumetric method was proposed. The coal seam was divided into several control volumes with side lengths equal to the effective extraction radius. The control effect of drilling was quantitatively evaluated by calculating the ratio of the sum of drilling lengths passing through the control volumes to the effective extraction radius. The drilling control effect was then displayed in

three dimensions using different colors, facilitating the analysis of drilling density and the location of drilling blank zones, thus providing a basis for decision-making in accurately supplementing drillings. Based on this technology, a three-dimensional simulation and control effect evaluation system for gas extraction drilling was developed and applied in 16215 working face of Jinhe Coal

收稿日期:2024-05-07;2024-05-14 修订

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2023-TD-ZD001-005)

作者简介:朱墨然(1992—),男,重庆江津人,硕士研究生,主要从事瓦斯灾害防治方面的科研工作。E-mail: cqmkyzmr@163.com.

Mine of Yaojie Coal Power. It processed 3 786 pieces of drilling data and drew the three-dimensional models of roadway, drilling site, drilling and coal seam. The drilling three-dimensional simulation matched the field conditions. Through control effect analysis, supplementary drilling was carried out in drilling blank zones, effectively eliminating potential safety hazards.

Keywords: coal and gas outburst; gas extration; gas extration drilling; three-dimensional simulation; control effect; effect evaluation

我国煤炭资源赋存条件复杂,瓦斯灾害较为严重,在煤层中施工抽采钻孔预抽煤层瓦斯,成为煤矿瓦斯灾害治理的关键技术措施^[1-3]。

瓦斯抽采钻孔的设计和施工质量是影响瓦斯抽采效果的关键因素。然而,目前抽采钻孔施工完成后缺少钻孔控制效果可视化分析工具,难以识别煤层中的钻孔空白带,进而影响瓦斯抽采效果和煤矿的安全生产。为提升抽采钻孔的控制效果,国内外学者在钻孔可视化、钻孔控制效果分析等方面做了大量相关研究工作。在钻孔可视化方面,定向钻进钻孔数据完整,实现了钻孔的三维可视化^[4-5];回转钻进钻孔通常基于轨迹监测数据实现三维可视化^[6-8],但由于轨迹仪通常只能给出单个钻孔的轨迹图,无法确定钻孔组与煤层之间的位置关系^[9-10]。在钻孔设计方面,合理的钻孔间距和布孔方式能够有效减少钻孔空白带和钻孔工程量^[11],传统布孔方式为正方形布孔,研究显示“三花眼”和等边三角形布孔方式能够更好地消除钻孔空白带^[12-15]。在钻孔控制效果评价方面,目前主要采用轨迹偏离度^[16]和钻孔密度^[17]分析方法进行评价。然而,这些方法只能对局部的控制效果进行评价,无法全面反映钻孔施工的质量和瓦斯抽采的效果。

综上所述,现有抽采钻孔可视化分析工具未能全面反映巷道、煤层、钻孔的位置关系,对钻孔控制效果的评价未实现量化和可视化。因此,为了提升瓦斯灾害治理的效率和准确性,减少钻孔施工的盲目性,笔者提出了一种抽采钻孔三维模拟及控制效果评价方法,通过导入采掘工程平面图、钻孔施工数据,自动将巷道及钻孔的二维坐标转换为三维坐标,构建全面反映煤层、巷道和钻孔关系的三维地质模型,并采用体积法对钻孔控制效果进行定量评价,控制效果采用三维展示。该方法能够智能识别钻孔空白带,可为精确补充钻孔提供决策依据。

1 抽采钻孔三维模拟及评价技术

钻孔三维模拟的关键是对钻孔、煤层及巷道三维空间坐标的精确定位,然而,在传统钻孔施工的记录中,往往只包含了开孔高度、左右帮距、方位角、倾角和孔深等信息,缺乏关于钻孔开孔点三维坐标数

据,难以实现钻孔及煤层的三维模拟。在钻孔控制效果评价方面,钻孔施工完成后,通过钻孔竣工图无法对钻孔的控制效果进行定量评价。为解决上述问题,提出了一种基于工作面钻孔竣工 CAD 底图的钻孔三维模拟建模及评价方法,步骤如图 1 所示。

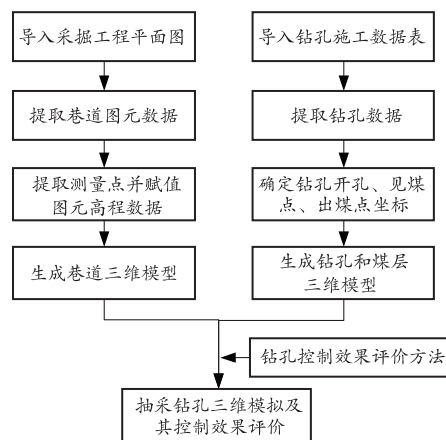


图 1 抽采钻孔三维模拟及评价技术路径图

Fig. 1 3D simulation and evaluation technology roadmap for extraction borehole

其中,钻孔控制效果评价方法是在钻孔、煤层三维模拟的基础上,针对煤层划分评价单元和控制体,通过计算控制体中钻孔的长度之和与控制体边长的比值来评估钻孔对控制体的控制效果,同时,将控制效果数值赋予各控制体并在三维模型中用不同的颜色进行展示。根据分析结果,针对钻孔控制较弱的区域进行针对性补孔,增强控制效果。

1.1 巷道三维模拟

巷道三维模拟所需的数据包括巷道图元数据、巷道高度、巷道宽度、底板高程。巷道三维模拟步骤:①获取采掘工程平面图,包含巷道的布局、尺寸、走向等关键信息;②提取平面图中的巷道图元数据,如巷道的起点、终点、转弯点等;③确定巷道的宽度和高度,巷道宽度可以通过采掘工程平面图获取,巷道高度一般变化不大,可设置为定值;④对提取的图元数据进行高程赋值,由于巷道图元中通常未标注高程,但每条巷道掘进时每隔一段距离都会设置 1 个测量点,测量点的属性包含了高程信息,通过导入图层中的导线测量点,沿着巷道中轴线生成 1 条巷道底板标记线,将测量点所在位置的高程值赋予

底板标记线并使用插值算法对所有标记线的高程进行补充;⑤将上述处理的数据利用三维模块生成巷道的三维模型,如图 2 所示。

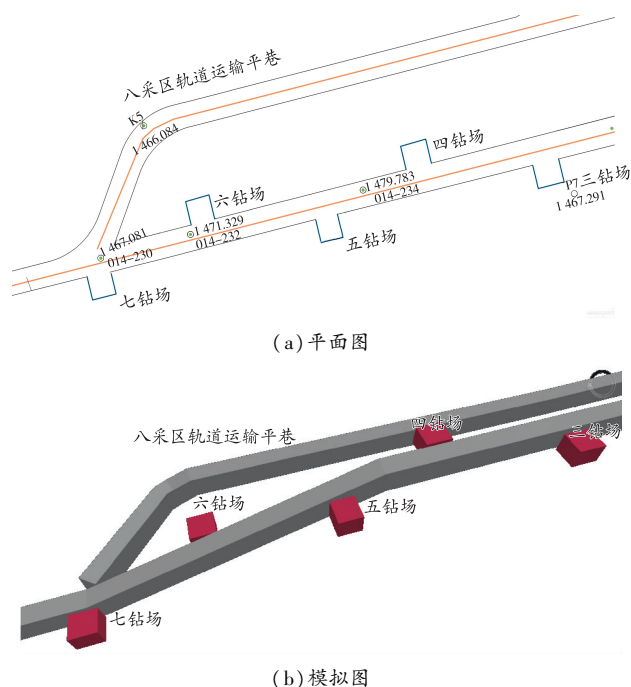


图 2 巷道三维模拟

Fig. 2 3D simulation of roadway

1.2 钻孔三维模拟

钻孔三维模拟包括钻孔施工数据导入和钻孔三维建模过程,主要步骤如下:

1) 导入钻孔施工数据

在钻孔施工完成后,通常记录了一系列详细的数据,这些数据包括钻孔的开孔位置(如开孔高度、左右帮距等)、钻孔参数(如方位角、倾角、孔深等)及孔内情况(如钻孔见煤岩情况)。这些数据被整理成穿层钻孔和顺层钻孔 2 类,并按施工地点分组,保存在 Excel 格式的钻孔参数表中。这些钻孔数据能够为钻孔三维模型的生成提供数据支撑。

2) 钻孔三维建模

在开始三维建模之前,由于导入的钻孔参数中并不包含开孔坐标信息,因此需要在平面图上手动指定每个钻孔的开孔位置。钻孔的开孔位置确定方法根据钻孔类型可分为 2 种:第一种是在采掘工程平面图中钻场所位置手动定点,将该点与所在巷道进行关联,提取开孔位置的横纵坐标,并将钻场所位置巷道的底板高程作为钻场的高程值,得出开孔位置的三维坐标,这种方法适用于施工地点分散、呈发散型的穿层钻孔;第二种是沿着巷道绘制钻孔布孔线,设置每个钻孔与指定位置的距离,通过布孔点处巷道的底板高程来计算每个钻孔的开孔坐标,

这种方法适用于沿巷道平行布置的顺层钻孔。

通过上述步骤,结合开孔坐标,以及钻孔的方位角、倾角和孔深等参数,生成钻孔的三维模型,如图 3 所示。

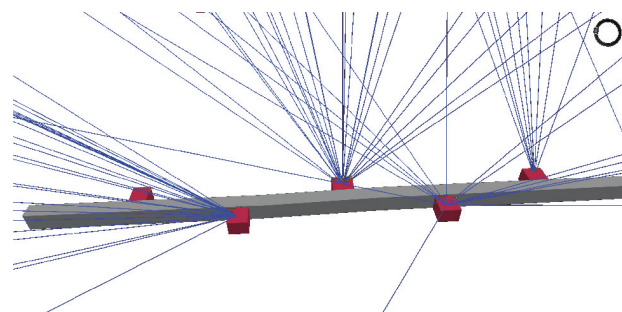


图 3 钻孔三维模拟

Fig. 3 3D simulation of borehole

1.3 煤层三维模拟

煤层三维模拟的方法主要有基于地质资料和基于钻孔数据^[18-19]2 种方法:

1) 基于地质资料的煤层三维反演

地勘数据中记录了地勘点的坐标、煤层柱状图等信息,通过分析汇总地勘点指定煤层的顶底板坐标,可实现指定煤层的三维反演。但由于地勘钻孔分布较为稀疏,仅能反映煤层的大致走势,模拟的煤层精度较低。

2) 基于钻孔数据的煤层三维反演

根据钻孔施工中记录的钻孔位置、见煤岩情况等数据,通过以下步骤,可实现煤层的三维模拟:

①获取煤矿穿层钻孔施工数据。包括钻孔的开孔位置 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 、方位角 α_i 、倾角 β_i 、钻孔长度 l_i 、钻孔接触煤层时的钻孔长度 $l_{i,1}$ 、钻孔穿出煤层时的钻孔长度 $l_{i,2}$ 。各参数位置关系如图 4 所示。

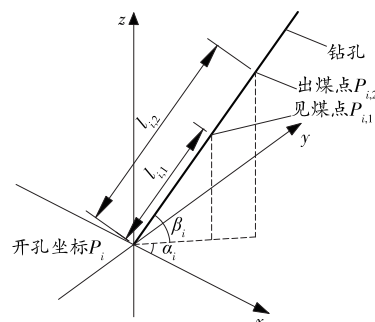


图 4 钻孔竣工数据示意图

Fig. 4 Diagram of borehole completion data

②计算所有的见煤点和出煤点坐标。根据钻孔施工数据,结合空间位置关系,计算出各个钻孔见煤点空间坐标 $P_{i,1}(x_{i,1}, y_{i,1}, z_{i,1})$ 和出煤点空间坐标 $P_{i,2}(x_{i,2}, y_{i,2}, z_{i,2})$,具体如下:

$$P_{i,1}(x_{i,1}, y_{i,1}, z_{i,1}) = (x_i + l_{i,1} \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, \\ y_i + l_{i,1} \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha, z_i + l_{i,1} \cdot \sin \beta) \quad (1)$$

$$P_{i,2}(x_{i,2}, y_{i,2}, z_{i,2}) = (x_i + l_{i,2} \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, \\ y_i + l_{i,2} \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha, z_i + l_{i,2} \cdot \sin \beta) \quad (2)$$

式中: $P_{i,1}(x_{i,1}, y_{i,1}, z_{i,1})$ 为第 i 个钻孔见煤点坐标; $P_{i,2}(x_{i,2}, y_{i,2}, z_{i,2})$ 为第 i 个钻孔出煤点坐标; α_i 为第 i 个钻孔的方位角; β_i 为第 i 个钻孔的倾角; $l_{i,1}$ 为第 i 个钻孔开孔至见煤点的长度; $l_{i,2}$ 为第 i 个钻孔开孔至出煤点的长度; x_i 为第 i 个钻孔开孔处的横坐标; y_i 为第 i 个钻孔开孔处的纵坐标; z_i 为第 i 个钻孔开孔处的竖坐标。

③生成煤层三维模拟图形。对所有见煤点和出煤点的空间坐标数据分别进行三维插值、重采样、点抽稀和再次三维插值操作,得到煤层底板和顶板的曲面图,如图 5(a)~(b)所示。再将煤层顶底板曲面图的四周进行“缝合”,形成煤层及钻孔的三维模拟图,如图 5(c)所示。

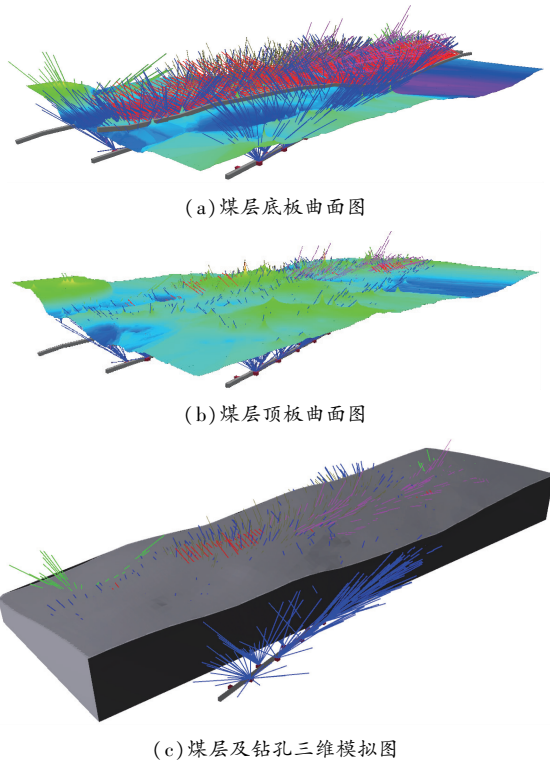


图 5 煤层三维模拟图
Fig. 5 3D simulation map of coal seam

1.4 钻孔控制效果评价

钻孔控制效果评价主要是分析抽采钻孔是否对抽采区域的煤层进行了全覆盖,检查钻孔空白带,为抽采参数调整、补孔等措施提供科学依据。钻孔控制效果评价的主要步骤如下:

1) 划分评价单元

首先根据地质条件、煤层结构、钻孔布局等因素

将煤层划分为若干个评价单元,然后再将评价单元划分为若干个边长等于瓦斯抽采有效半径的控制体,如图 6 所示。

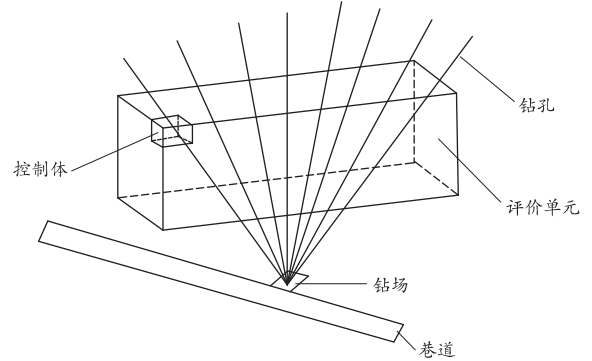


图 6 评价单元划分示意图
Fig. 6 Schematic diagram of evaluation unit division

2) 钻孔控制效果分析

假设控制体能够被有效抽采的条件是穿过控制体钻孔的长度之和大于等于控制体边长。可以通过计算控制体中钻孔长度与控制体边长的比值来衡量钻孔的控制效果,如果一个控制体中有多个钻孔,则对控制体中的钻孔长度求和,如图 7 所示。

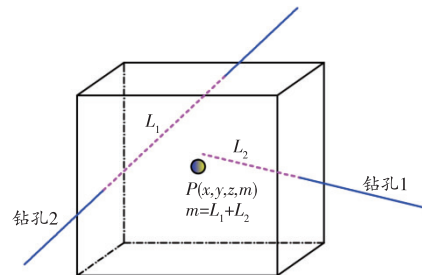


图 7 控制体内钻孔长度
Fig. 7 Controlling the drilling length inside the body

钻孔控制效果指数 K_i 计算公式如下:

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{R} \quad (3)$$

式中: K_i 为第 i 个控制体的钻孔控制效果指数; $\sum_{i=1}^n l_i$ 为第 i 个控制体内各钻孔长度之和, $i = 1, 2, \dots, n$; R 为控制体的边长,即抽采有效半径。

控制体能够被有效抽采的原则是穿过控制体钻孔的长度大于等于控制体的边长,即取 $K_i = 1$ 为补充钻孔的临界值。当 $K_i \geq 1$ 时,认为钻孔能够对控制体进行有效抽采,而当 $K_i < 1$ 时,则需要补充钻孔来增强控制效果。

3) 评价效果的三维展示

钻孔控制效果指数计算完成后,为便于观察评价单元中钻孔的控制效果,将钻孔控制效果指数的

数值赋予该控制体,用不同的颜色对钻孔控制效果进行三维展示,颜色越深代表该区域控制效果越好,如图 8 所示。通过观察控制体颜色的深浅确定钻孔的疏密及钻孔空白带的位置。

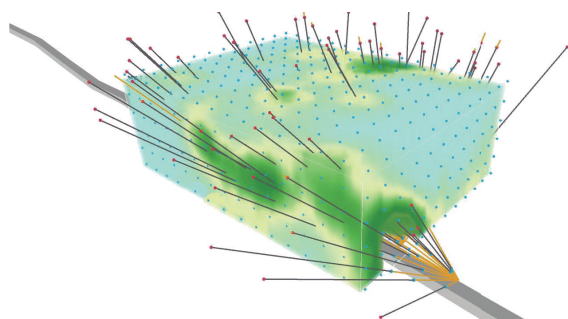


图 8 钻孔控制效果三维展示
Fig. 8 3D display of borehole control effect

2 系统开发

2.1 开发环境

抽采钻孔三维模拟及评价系统采用 Visual C#. NET 语言进行开发,并基于 SuperMap Objects. NET 10i 平台完成整体构建。SuperMap 作为国内领先的地理信息二三维图形处理平台,提供了丰富多样的图形开发接口和组件,使系统能够高效地完成二三维空间数据的分析计算及绘制渲染工作。

2.2 整体结构

系统的结构由数据预处理、三维模拟和钻孔质量评价 3 个模块组成。其中,数据预处理模块包括图形预处理和钻孔数据预处理;三维模拟模块包括巷道、煤层和钻孔的三维模拟;钻孔质量评价模块包括钻孔评价单元划分和钻孔缺陷区域评价。系统结构如图 9 所示。

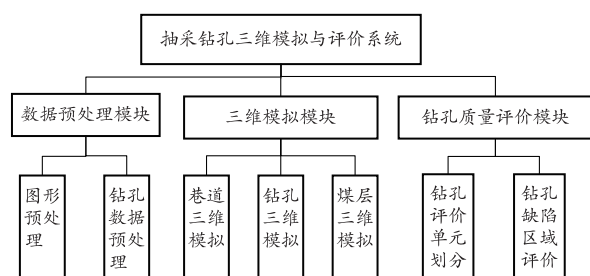


图 9 系统结构图
Fig. 9 System architecture diagram

1) 数据预处理模块,对导入的图形及钻孔基础数据进行预处理,提取图形的属性信息,如高程、坐标、长度等;提取钻孔特征数据,包括钻孔开孔参数、见煤见岩等信息。数据预处理完成后将数据传递给三维模拟模块。

2) 三维模拟模块,对图形和钻孔特征数据进行

三维模拟,包括对巷道、钻场、钻孔和煤层进行模拟,直观地展示各部分的三维图形。

3) 钻孔质量评价模块,对区域内的抽采钻孔进行效果评价,识别钻孔缺陷区域,并在三维图上展示钻孔质量分布情况。

2.3 功能模块

1) 编辑绘图

系统提供了图形绘制和图形编辑功能。图形绘制功能提供了巷道、钻场、钻孔等图形绘制工具,可根据采掘情况对三维图形进行绘制;图形编辑功能提供了延伸、连接、打断、偏移等 15 项工具,能够对已绘制图形进行编辑。

2) 数据导入及预处理

支持图形和数据等多种格式的导入,如采掘工程平面图、钻孔施工数据等。能够对导入的图形数据进行处理,提取关键信息如巷道图元数据、测量数据等,并进行高程赋值,为三维模型的构建奠定基础。钻孔数据预处理能够对钻孔参数进行整理和分析,包括开孔位置、方位角、倾角、孔深等,为钻孔三维建模提供精确的数据支撑。此外,还具备数据清洗和数据转换功能,能够对导入的无效或错误数据进行清洗,可将二维坐标转换为三维坐标,为三维模拟提供必需的空间信息。

3) 三维模拟

根据数据预处理模块提供的钻孔特征数据,对巷道、钻场、钻孔和煤层进行三维空间建模。同时,提供了丰富的交互功能,可对三维模型进行旋转、缩放、平移等操作,以便从不同角度和距离观察钻孔的形态和细节。

4) 钻孔质量评价

系统能够对目标区域抽采钻孔的控制效果进行自动评价,评价结果以三维图形的形式展示,用户可通过三维视图查看钻孔质量的分布情况。系统还提供了数据导出和报告生成功能,可将评价结果导出为 Excel、PDF 等格式的文件。

3 现场应用

系统开发完成后在窑街煤电金河煤矿 16215 工作面进行应用。16215 工作面通过 16215 底抽巷施工穿层钻孔预抽条带瓦斯,然后通过工作面进风巷、回风巷施工顺层钻孔抽采工作面瓦斯。系统应用期间收集整理了该工作面的采掘工程平面图和钻孔施工数据,处理了 9 组共计 3 786 个钻孔数据,绘制了该工作面巷道、钻场、钻孔和煤层的三维模型,如图 10 所示。

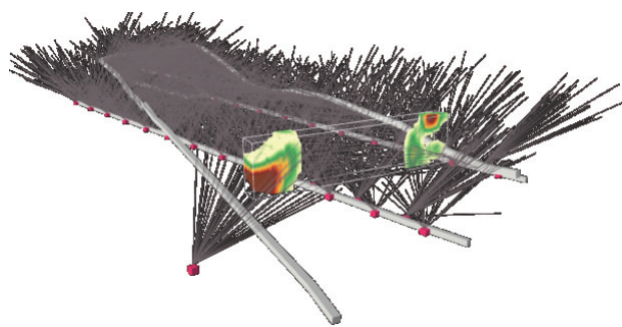


图 10 工作面钻孔全景展示
Fig. 10 Panoramic display of borehole drilling at the working face

三维建模完成后,对煤层进行了评价单元的划分,并进一步划分为边长等于 5 m 的控制体。由控制效果评价分析结果可知,在 16215 工作面进风巷距开口 20 m 处孔底段钻孔密度较低,多个控制体 $K_i < 1$,存在钻孔未能有效控制的空白带,经核查其原因是钻孔施工过程中施工参数偏差造成的。为保障瓦斯抽采效果,通过在底抽巷二十三钻场补打钻孔,增强对空白带的控制效果。系统的应用为金河煤矿 16215 工作面抽采钻孔的施工和验收提供了可视化的分析工具,为煤矿抽采钻孔设计及施工提供了参考依据。

4 结论

1) 研究了抽采钻孔三维模拟技术,通过导入采掘工程平面图和钻孔数据,提取测量点高程,并对巷道底板高程进行插值处理,解决了三维模拟中图形高程值缺失的关键问题,实现了巷道、钻场、钻孔、煤层的三维模拟。

2) 构建了钻孔控制效果评价方法,通过划分评价单元和控制体,计算控制体中钻孔长度与控制体边长的比值来确定钻孔的控制效果,并进行三维展示。

3) 该技术及系统在窑街煤电金河煤矿 16215 工作面进行了应用,绘制了 3 786 个钻孔,绘制的煤层三维模型符合矿井实际情况,通过钻孔质量评价和三维分析,为补充钻孔设计提供了参考依据。

参考文献(References):

- [1] 张志刚,张庆华,刘军.我国煤与瓦斯突出及复合动力灾害预警系统研究进展及展望[J/OL].煤炭学报,2024;1-13(2024-04-21)[2024-04-27].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1079>.
ZHANG Zhigang,ZHANG Qinghua,LIU Jun. Research progress and prospects of coal and gas outburst and composite dynamic disaster warning systems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024; 1-13(2024-04-21)[2024-04-27].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1079>.
- [2] 梁运培,郑梦浩,李全贵,等.我国煤与瓦斯突出预测与预警研究

- 现状[J].煤炭学报,2023,48(8):2976-2994.
- LIANG Yunpei,ZHENG Menghao,LI Quanguai,et al. A review on prediction and early warning methods of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(8):2976-2994.
- [3] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
- WANG Enyuan,ZHANG Guorui,ZHANG Chaolin,et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):297-322.
- [4] 雷侃,刘宗伟,李涛涛,等.煤矿井下定向钻孔轨迹跟踪算法研究[J].煤炭技术,2023,42(7):124-127.
- LEI Kan,LIU Zongwei,LI Taotao,et al. Research on tracking algorithm of directional drilling in coal mine[J]. Coal Technology, 2023,42(7):124-127.
- [5] 高杰,秦松,张佳乐,等.非定向近水平钻孔轨迹参数的解算及应用[J].采矿与安全工程学报,2024,41(2):341-351.
- GAO Jie,QIN Song,ZHANG Jiale,et al. Calculation and application of non-directional near-horizontal borehole trajectory parameters[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(2):341-351.
- [6] 张军,王霄菲,王小龙.基于钻孔轨迹精确测量的瓦斯抽采钻孔群空白带控制技术[J].煤矿安全,2022,53(1):100-104.
- ZHANG Jun,WANG Xiaofei,WANG Xiaolong. Control technology of blank zone in gas drainage boreholes group based on accurate measurement of borehole trajectory[J]. Safety in Coal Mines,2022, 53(1):100-104.
- [7] 张吉林,岳俊,谭瑶,等.钻孔三维可视化系统构建与应用[J].煤炭技术,2017,36(10):106-108.
- ZHANG Jilin,YUE Jun,TAN Yao,et al. Construction and application of 3D borehole visualization system[J]. Coal Technology, 2017, 36(10):106-108.
- [8] 岳俊.瓦斯抽采高位钻孔自动设计及软件开发[J].煤矿机械,2022,43(3):186-188.
- YUE Jun. Automatic design and software development of high-level drilling for gas drainage[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(3): 186-188.
- [9] 王小龙,张军.回转钻进钻孔数据处理与三维显示软件设计[J].工矿自动化,2021,47(6):84-90.
- WANG Xiaolong,ZHANG Jun. Design of rotary borehole data processing and 3D display software[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(6):84-90.
- [10] 张军.钻孔随钻轨迹测量及三维可视化技术研究[J].能源与环保,2020,42(2):54-59.
- ZHANG Jun. Study on borehole while drilling trajectory measurement and three-dimensional visualization technology[J]. China Energy and Environmental Protection,2020,42(2):54-59.
- [11] 郝天轩,范国阳,赵立桢.基于 AutoCAD 的钻孔智能设计系统[J].中国安全生产科学技术,2023,19(4):71-77.
- HAO Tianxuan,FAN Guoyang,ZHAO Lizhen. Intelligent borehole design system based on AutoCAD[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(4):71-77.
- [12] 李普,张小东,覃木广.消除钻孔瓦斯抽采盲区空白带的布孔方式研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):37-42.
- LI Pu,ZHANG Xiaodong,QIN Muguang. Study on borehole arrangement mode for eliminating the blank zone in blind area of drilling gas extraction[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2020,47(6):37-42.

(下转第 64 页)

- 34(4):24-29.
- [9] 刘清泉,程远平,王海峰,等. 顺层钻孔有效瓦斯抽采半径数值解算方法研究[J]. 煤矿开采,2012,17(2):5-7.
- LIU Qingquan, CHENG Yuanping, WANG Haifeng, et al. Numerical resolving of effective methane drainage radius in drill hole along seam[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(2): 5-7.
- [10] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):465-469.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the characteristics of “O” ring in the distribution of mining cracks in overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 465-469.
- [11] 袁亮,刘泽功. 淮南矿区开采煤层顶板抽放瓦斯技术的研究[J]. 煤炭学报,2003,28(2):149-152.
- YUAN Liang, LIU Zegong. Study on the technique of roof gas drainage from mine coal seam in Huainan Mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 149-152.
- [12] 胡国忠,王宏图,范晓刚. 邻近层瓦斯越流规律及其卸压保护范围[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1654-1659.
- HU Guozhong, WANG Hongtu, FAN Xiaogang. The law of methane gas leak flow in adjacent layer and its relief-pressure protection region[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1654-1659.
- [13] 高超. 高、底抽巷抽采邻近层卸压瓦斯技术研究与实践[J]. 煤炭技术,2015,34(10):150-152.
- GAO Chao. Study and practice on pressure relief gas extraction of adjacent coal seams by high-located drainage roadway and end-located drainage roadway[J]. Coal Technology, 2015, 34(10): 150-152.
- [14] 李琰庆. 淮南矿区突出煤层群开采瓦斯治理模式[J]. 煤炭技术,2016,35(6):222-223.
- LI Yanqing. Gas control mode of outburst coal seams in Huainan coal mining area[J]. Coal Technology, 2016, 35(6): 222-223.
- [15] 杨文. 我国煤矿区域性瓦斯治理技术及发展[J]. 矿业装备,2022(5):172-173.
- YANG Wen. Regional gas control technology and development in China's coal mines[J]. Mining Equipment, 2022(5): 172-173.
- [16] 王会强. 兴隆煤矿保护层开采未保护区钻孔抽采区域防突措施效果论证[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [17] 林海飞,季鹏飞,孔祥国,等. 顺层钻孔预抽煤层瓦斯精准布孔模式及工程实践[J]. 煤炭学报,2022,47(3):1220-1234.
- LIN Haifei, JI Pengfei, KONG Xiangguo, et al. Precise borehole placement model and engineering practice for pre-draining coal seam gas by drilling along seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1220-1234.
- [18] 李彦明. 基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(1):215-218.
- LI Yanming. Upper corner gas control based on high level directional long borehole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 215-218.
- [19] 张伟,赵博,郭晓阳,等. 重复采动影响下含瓦斯岩层瓦斯运移规律[J]. 矿业安全与环保,2024,51(1):61-69.
- ZHANG Wei, ZHAO Bo, GUO Xiaoyang, et al. Gas migration law of gas-bearing rock strata under the influence of repeated mining[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(1): 61-69.
- [20] 郭英,孟祥军,陈功华,等. 青龙煤矿11615工作面高位定向长钻孔瓦斯抽采分析[J]. 中国矿业,2021,30(4):185-190.
- GUO Ying, MENG Xiangjun, CHEN Gonghua, et al. Study on gas drainage laws of high-level directional long drilling in 11615 working face of Qinglong coal mine[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(4): 185-190.
- [21] 李鹏,苏超,段鹏坤. 基于响应面法的煤巷掘进工作面顶板变形因素分析[J]. 矿业安全与环保,2023,50(4):81-88.
- LI Peng, SU Chao, DUAN Pengkun. Analysis of roof deformation factors in coal roadway heading face based on response surface method[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(4): 81-88.
- [22] 王钧,赵东. 钻孔钻进期间瓦斯涌出数值模拟[J]. 矿业安全与环保,2023,50(6):77-84.
- WANG Jun, ZHAO Dong. Numerical simulation of gas emission during borehole drilling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(6): 77-84.

(责任编辑:陈玉涛)

(上接第55页)

- [13] 张士岭. 普通钻孔智能设计系统研究与应用[J]. 煤炭工程,2019,51(6):149-152.
- ZHANG Shiling. Research and application of ordinary drilling intelligent design system[J]. Coal Engineering, 2019, 51(6): 149-152.
- [14] 马国龙. 瓦斯抽采定向长钻孔智能设计方法及系统[J]. 煤矿安全,2017,48(5):103-106.
- MA Guolong. Intelligent design method and system for long directional gas drainage drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5): 103-106.
- [15] 邓敢博. 矿井瓦斯抽采分析评价系统设计[J]. 煤炭技术,2016,35(3):155-157.
- DENG Ganbo. System design of gas drainage analysis and evaluation[J]. Coal Technology, 2016, 35(3): 155-157.
- [16] 马国龙. 顺层瓦斯抽采钻孔施工偏差研究[J]. 煤矿安全,2017,48(3):147-151.
- MA Guolong. Study on construction error of bedding gas drainage boreholes[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(3): 147-151.
- [17] 岳俊. 防突措施钻孔可靠性分析及系统开发[J]. 煤矿机械,2022,43(6):195-198.
- YUE Jun. Reliability analysis and system development of drilling for outburst prevention measures[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(6): 195-198.
- [18] 毛明仓,张孝斌,张玉良. 基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(1):286-293.
- MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 286-293.
- [19] 袁亮,张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. 煤炭学报,2023,48(1):1-14.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1-14.

(责任编辑:陈玉涛)