

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0277-07

大安山煤矿三维可视化系统的建立 及安全监测分析

李杨¹, 杨天鸿¹, 刘洪磊¹, 张鹏海¹, 王薪荣¹, 殷大发²

(1. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 资源与土木工程学院,
辽宁 沈阳 110819; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要 为了能使现场监测得到的数据和采矿时空关系有机地联系起来, 以及做到整体预测分析和监控, 达到评价围岩稳定性和开采安全性的目的, 本文结合大安山煤矿的实际情况, 基于东北大学虚拟现实系统软件开发出具有真三维场景以及带有虚拟漫游、数据库查询和交互控制功能的一整套三维可视化矿山系统, 并在此基础之上对虚拟现实软件进行二次开发, 加强其集成众多三维数据信息的能力。通过综合分析, 得到了基本顶来压步距、超前支护压力及顶板来压破坏的形式与机理等结果, 为进行有效顶板控制和安全开采提供科学依据。

关键词 三维可视化; 矿山压力; 安全监测; 综合分析

中图分类号 TD 76

文献标志码 A

Construction and safety monitoring analysis of 3D visualization system for Da'an Shan coal mine

LI Yang¹, YANG Tianhong¹, LIU Honglei¹, ZHANG Penghai¹, WANG Xinrong¹, YIN Dafa²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract In order to achieve the organic connection between field monitoring data and mining temporal-spatial correlation, to make the whole predictive analysis and monitor, and to evaluate surrounding rock stability and safely mining, a set of 3D visualization mining system combined with the actual conditions of Da'an Shan coal mine has been developed. The mining system is based on Northeastern University virtual reality system software, which not only includes three-dimensional scenes, but also realizes the functions of virtual roaming, database information inquiry and interactive control. By the secondary development of virtual reality software, its ability of integrating 3D data is strengthened. Through comprehensive analysis of the data, main roof weighting length, advanced support pressure and failure mode and mechanism of roof weighting are obtained, which provides the scientific basis for roof controlling and safe mining.

Key words 3D visualization; mine pressure; safety monitoring; comprehensive analysis

收稿日期: 2013-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227902); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120042120053)

作者简介: 李杨(1986-), 男, 甘肃省武威市人, 博士研究生, 从事岩石力学与采矿工程方面的研究。

E-mail: leon.42@163.com

Tel: 024-83671626

“十一五”期间,我国煤矿安全生产状况总体稳定、好转,但重大事故仍有发生,煤矿安全生产形势依然严峻。我国煤矿由于矿山压力的复杂性及地质条件、开采状况、控制手段的多样性,现场监测已成为解决具体矿山压力问题的主要依据和方法^[1]。但井下的工作场所是动态变化的,影响地压分布和动力灾害发生的因素也是变化的,传统的矿压监测难以完整反映矿山的实际情况。如果想要将现场监测得到的数据和采矿时空关系有机地联系起来,以及做到整体实时预测分析和监控,就需要借助三维可视化系统进行研究。可以看出,空间地质模型及可视化系统的研究和应用是工程地质和岩土工程领域计算机应用的必然趋势^[2]。

近些年来,国内外学者在矿山领域的安全监测三维可视化研究方面取得了一定的成果。Eric^[3-6]等探讨了复杂地质构造模型的三维可视化显示及关键技术。柴贺军等^[7]提出了岩体结构三维可视化技术并研制开发了岩体结构三维可视化模型及构图系统。孟永东等^[8-10]研发了边坡和地下铁矿的三维可视化分析系统及虚拟现实系统。魏森声等^[11-13]等基于 OpenGL, OPC 等技术开发了煤矿三维可视化信息系统和采煤工作面虚拟现实系统及实现有限元分析结果的三维可视化。胡小彭等^[14-17]运用 ArcGIS, Vega 等研究了煤矿的三维可视化技术和掘进仿真实现方法。欧平洋等^[18]对煤矿安全监控系统数据集成技术进行了探讨。黄书岭等^[19]综合研究了多源信息的地应力场分析和评价。刘增辉等^[20-23]建立了多种适应不同矿区条件的监测系统。这些研究在矿业领域的安全监测三维可视化方面做了有益的尝试和探索,但研究内容仅限于三维模型的显示技术和仪器监测的分析系统,而且大都以模仿矿山中“看得见”的真实场景为目的建立虚拟模型,而忽略了那些“看不见”却对采矿活动有很大影响的因素,比如开采扰动后的应力场、损伤场等,缺乏采矿时空关系和现场监测数据的有机结合。

本文以大安山煤矿为例,针对其冲击地压的防治问题,应用东北大学虚拟现实系统软件开发包包括地表、地层、矿体、巷道、采场等三维场景,以及带有虚拟漫游、数据库查询和交互控制功能的一整套三维可视化矿山系统,进行煤矿井下安全监测系统测点布置及赋存地质采矿条件的三维可视化显示和解析,实现岩石力学试验、地压监测、有限元计算的应力场和损伤场等数据信息的可视化,以

便于人们同时解读和分析多种数据,更加准确、高效地对围岩稳定性做出评价,达到预测地质灾害的目的。

1 大安山煤矿概况

大安山井田距北京城正西 50 km,东起茶棚岭断层,西到大网山断层,南自玄武岩顶界,北到 48[#]钻孔与 96[#]钻孔连接线,深部到-100 m。整个井田走向长约 9 km,倾向宽 2~4 km,面积 25.5 km²,共分为 6 个采区、11 个水平,其中生产水平为+800 m 水平、+680 m 水平和+550 m 水平。大安山煤矿现已进入深部开采阶段,井田内的褶曲构造是影响矿井采区划分和采煤方法的最主要构造因素。由于井田内褶曲密度大、褶曲紧密且多为倒转或紧闭倒转褶曲,造成煤层以倾斜和急倾斜为主,煤层厚度变化大,赋存强烈不协调。受地质条件、围岩性质、采掘工艺、支护方式等因素的影响,大安山矿区工作面 and 巷道都存在着不同程度的冲击地压现象,随着开采量的增加,采掘深度也随之增加,冲击地压发生的频率越来越高,危害程度也越来越大,已经成为矿区安全高效生产的瓶颈之一。本文建立大安山煤矿三维可视化系统,通过对多种数据及资料的三维可视化显示和解析,探究大安山煤矿的矿压显现规律及冲击地压防治的理论依据,保障有冲击倾向煤层安全开采,对大安山煤矿及类似具有复杂地质构造的矿井开采具有重要指导意义。

2 三维可视化矿山系统建立

本文利用东北大学虚拟现实系统软件开发包包括地表、地层、矿体、巷道、采场等三维场景,带有虚拟漫游、数据库查询和交互控制功能的一整套三维可视化矿山系统,更为形象地显示矿山实际场景,以虚拟现实可视化方式解析煤矿井下复杂地质条件,直观表达各监测项目测点布置与地质结构的相互关系,便于监测成果与地质条件和开采信息的综合分析。

2.1 三维场景建立

三维场景模型的建立对采矿非常重要,建立模型能够正确完整地反映矿体、巷道、厂区等地质体的三维坐标关系。大安山煤矿三维可视化系统的三维场景主要由地表模型、煤层与断层模型、井巷模型和工作面模型等部分组成。如图 1 所示为开采工作面的三维场景模型。

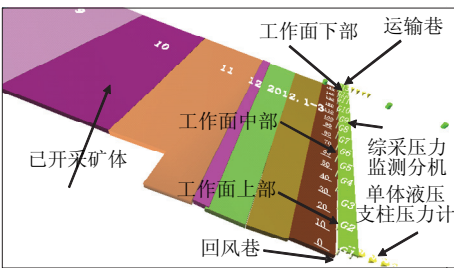


图 1 开采工作面模型
Fig.1 Model of working face

2.2 数据库查询

数据信息查询也是三维可视化矿山系统重要组成部分。通过虚拟模型显示，用户可以直观了解矿体结构等相互关系，但仅通过单纯地观察场景模型并不能具体了解矿山信息，比如矿体厚度、走向、倾向、地质构造等。因此，需要根据地质采矿资料、岩石力学试验结果、监测数据等建立对应模型数据库，然后使用虚拟现实系统软件提供的数据库接口，使三维虚拟场景的对象与数据库建立联系。如

图 2 所示为工作面煤样力学性质查询结果。

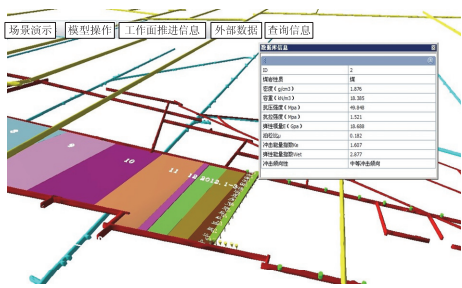
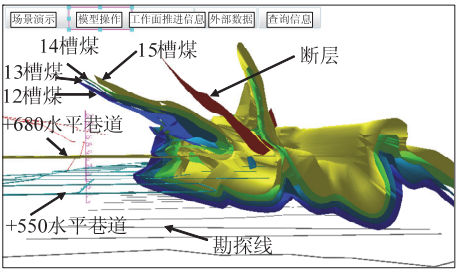


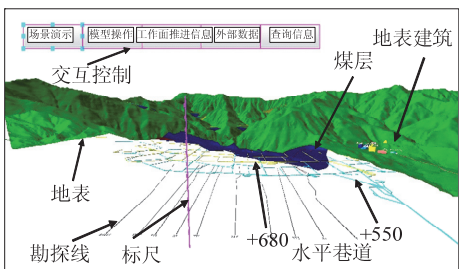
图 2 煤样力学性质查询
Fig.2 Inquiry of mechanical parameters of coal

2.3 交互控制

本文充分利用虚拟现实系统软件三维互动仿真平台的脚本控制方式，达到了虚拟矿山系统交互控制功能。通过编写脚本语句并设置相应按钮，实现了虚拟漫游和模型的隐藏与显示、动画播放等，方便快捷地控制模型。大安山煤矿的三维矿山场景如图 3 所示。



(a) 煤层模型



(b) 整体模型

图 3 大安山煤矿三维可视化系统
Fig.3 3D visualization system of Da'an Shan coal mine

3 安全监测结果三维可视化综合分析

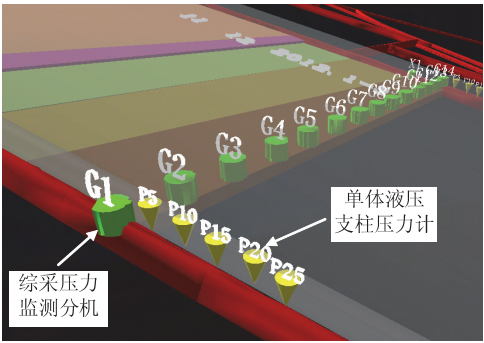
通过 C#编写程序代码，对虚拟现实系统软件进行二次开发，将矿山现场监测的数据和数值计算得到的应力场、位移场、损伤场等数据集成并显示到三维可视化系统中，便于分析开采对原岩应力场的影响，直观显示应力集中区域以及集中程度等信息，加强开采区域的监管与防护措施。

3.1 工作面矿压监测结果分析

通过某工作面液压支架压力以及超前支护压力等方面的长时间系统观测，对工作面顶板来压进行预测预报分析。初采工作面 141 m 共计布置 14 条测线，安设 14 台综采压力监测分机。随工作面的延长而增加测点。回风巷和运输巷超前支护各设 5 个测点，控制范围为 24 m，测点随回采依次回撤

前移，并始终保持 5 个测点不变；在每个测点处安装 1 台矿用数字压力计，共计安设 10 台单柱压力分机，如图 4 所示。

图 5，6 为三维可视化系统中的监测数据显示。



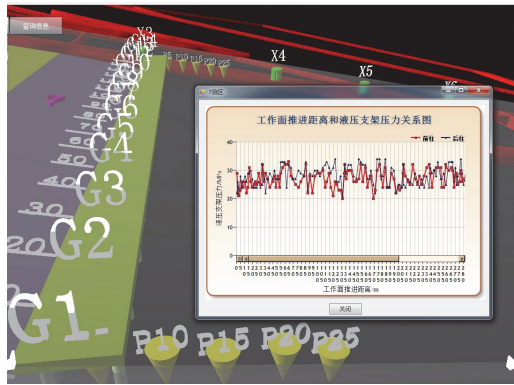


图 5 三维可视化系统中的工作面液压支架压力变化曲线
Fig.5 Pressure-distance curves of hydraulic support

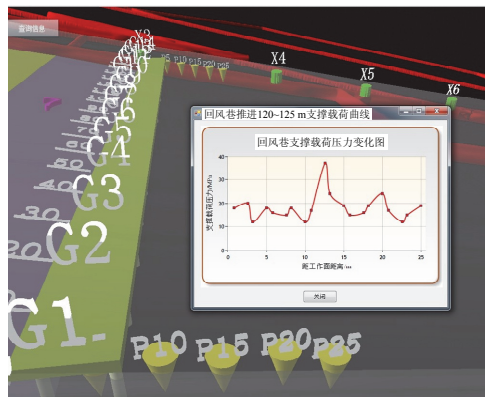


图 6 三维可视化系统中的超前支护压力变化曲线
Fig.6 Pressure-distance curves of roadway monitoring points

1) 工作面液压支架压力

以三测区为例，分析各个测区的来压步距(图 7)。然后得到工作面的初次来压步距和周期来压步距，结果如表 1 所示。

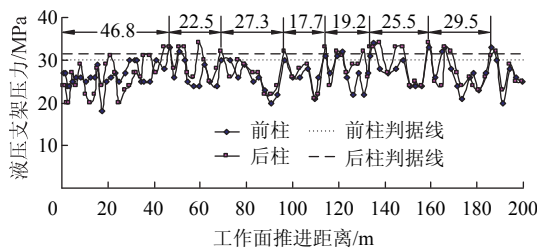


图 7 工作面典型支架压力变化曲线的来压步距判定
Fig.7 Typical pressure-distance curve of working face to judge the weighting length

由表 1 可以看出，基本顶的初次来压步距平均为 52.67 m，周期来压步距平均为 22.12 m。工作面上、中、下部的初次来压步距和周期来压步距不尽相同。工作面上部、中部、下部平均初次来压步距分别为 54.1，53.5，50 m。初次来压中部较上部先来压，但基本趋于同步，而下部步距比上部、中部

都小，分析原因可能是由于煤层倾角以及顶板厚度不一致造成的。工作面上部、中部、下部平均周期来压步距分别为 21.53，21.34，23.68 m。周期来压步距下部较上部有加大的趋势，而中上部趋于同步。实测结果表明：基本顶的周期来压，沿工作面方向并不是同时来压，而是呈现局部来压、迁移特征。从表 1 可以看出，十三、十四测区的曲线图显示基本顶初次来压和第一次周期来压时间要明显领先于其他测区，这是一种十分值得关注的特征。

表 1 工作面平均来压步距统计表
Table 1 Statistical table of the average weighting length

测区	初次来压步距/m	平均值/m	周期来压步距/m	平均值/m
上部	一 57.2		22.2	
二 59.3		54.1	21.84	21.74
三 46.8			23.62	
四 53.1			19.3	
中部	五 54.6		20.33	
六 48.6			22.08	
七 57		53.5	21.2	21.34
八 53.1			20.16	
九 54.6			23.76	
十 53.1			20.6	
下部	十一 59.4		21.78	
十二 59.4		50	23.48	23.68
十三 41.8			23.6	
十四 39.4			25.88	
平均值	52.67		22.12	

2) 超前支护压力

以回风巷推进 120~125 m 时超前支护压力变化曲线为例(图 8)，分析各个来压时刻的峰值及峰值点距工作面的距离，如表 2，3 所示。

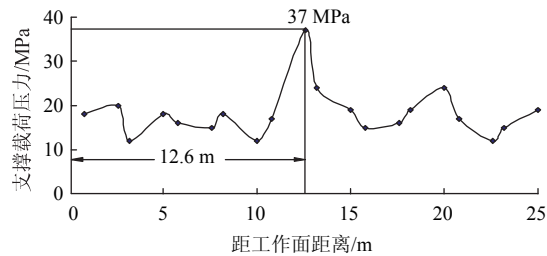


图 8 回风巷推进 120~125 m 超前支护压力变化曲线峰值点的确定
Fig.8 Determination of stress peak by pressure-distance curve of tailentry advance distance at 120~125 m

表 2 回风巷应力增高峰值及峰值点距离

Table 2 Tailentry stress peak and its distance to working face

来压时工作面 推进距离/m	峰值点距工作面 的距离/m	应力峰值/MPa
57.2	16.2	27
79.4	15.8	20
101.6	11.2	22
123.8	12.6	37
146.0	10.6	20
168.2	10.8	22
190.4	8	20
平均值	12.17	24

表 3 运输巷应力增高峰值及峰值点距离

Table 3 Headentry stress peak and its distance to working face

来压时工作面 推进距离/m	峰值点距工作面 的距离/m	应力峰值/MPa
39.4	13.6	21
65.3	12.8	20
91.2	8	26
117.1	5.2	20
143	11	36
168.9	8.8	20
194.8	6.8	22
平均值	9.46	23.57

从表 2~3 中能够得到回风巷工作面前方应力增高的峰值 20~37 MPa，峰值点距工作面 8~16.2 m，平均峰值 24 MPa，距工作面 12.17 m；运输巷工作面前方应力增高的峰值 20~36 MPa，峰值点距工作面 8~13.6 m，平均峰值 23.57 MPa，距工作面 9.46 m。回风巷和运输巷应力增高峰值相差不大，但峰值点距工作面的距离运输巷较回风巷小 3 m 左右，相差较大。

在三维可视化系统中，可以直观查看不同监测时间段不同监测项目的数据信息(图 5，6)，进而对数据进行分析，摸清顶板运动规律和相对应的矿山压力显现规律，得到来压步距及超前支护压力等结果，实现顶板来压及冲击地压的及时、准确预报，为进行有效顶板控制和安全开采提供依据。

3.2 数值计算结果可视化分析

1) 工作面推进 60 m 数值计算结果分析

从图 9 可以看出，由于采动影响，采场周围应力发生显著变化，在工作面附近范围内岩体所受应力都大于原岩应力，形成增压区。随着远离工作面应力逐渐减小，最后恢复到原岩应力，形成稳压区。

随着工作面推进，采空区范围越来越大，煤壁处的支撑压力不断上升，但与之相反，煤壁上方顶板处的压力却出现突变，先减小后增大，这说明工作面从 50 m 推进到 60 m 的过程中，顶板出现了一次破坏卸荷的现象。

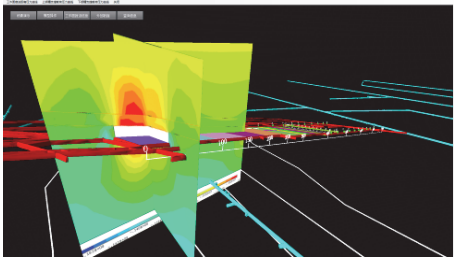


图 9 三维可视化系统中工作面推进 60 m 的应力云图
Fig.9 Stress nephograms of advance distance at 60 m

从图 10 可以看出，采空区四周的煤壁及顶板内部一定范围内均出现了塑性变形。由于采动影响，工作面前方煤层应力集中系数较大，导致工作面前方煤体产生的塑性形变较大。顶板内部的塑性区则主要分布在工作面前方、开切眼处及顶板中部，这 3 处的塑性形变均由拉剪应力引起。由于顶板中部所受的拉应力最大，导致中部塑性形变最明显，所以更容易出现屈服破坏。随着工作面的推进，采场周围煤岩体在逐渐变形破坏，使得塑性区范围不断扩大。这时基本顶的结构可以当做板式结构来处理，最大弯矩出现在板的中间及工作面中部，所以顶板先由工作面的中部开始出现拉伸破坏，接着工作面左右顶板弯矩加大，出现拉伸断裂，进而向四周断裂延展，在采空区四周形成明显的“O”型破坏区，同时在角端沟通，改固支梁为四周简支梁，四面简支板长轴中间弯矩最大，中间断裂，使得顶板形成“O-X”型破坏。综合来看，说明在工作面推进 50~60 m 时基本顶的跨中附近会出现一次大规模的拉剪破坏，即基本顶的初次来压，这与现场矿压观测数据的分析结果基本吻合。

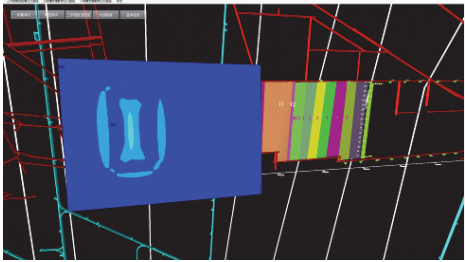


图 10 三维可视化系统中工作面推进 60 m 的损伤云图
Fig.10 Damage nephograms of advance distance at 60 m

2) 工作面推进 80 m 数值计算结果分析

如图 11 所示,初次来压之后(图中已挖去部分为冒落后的顶板),基本顶破断,应力释放,随着工作面的推进,顶板跨度逐渐增大,在工作面前方形形成悬臂梁结构,使得前方应力集中。工作面初次来压后又推进了 20 m,采空区应力减小,形成减压区,同时随着工作面的推进,顶板的跨度不断增大,顶板铰接顶梁平衡结构被破坏,再次断裂塌落形成一次周期来压。由图 12 可知,随着工作面的推进,顶板跨度的增大,围岩体所受应力逐渐增大,集中应力使得工作面前方的基本顶塑性变形不断增大,破坏范围逐渐扩大,同时回风巷和运输巷受采动应力集中的影响,塑性区也在逐渐增大,至跨度达到极限时,塑性区互相贯通,基本顶铰接平衡结构失稳,形成二次来压及周期来压。如此基本顶随回采工作面每推进 20 m 左右即发生一次大规模周期性的破坏过程,这与现场矿压观测周期来压步距基本吻合。

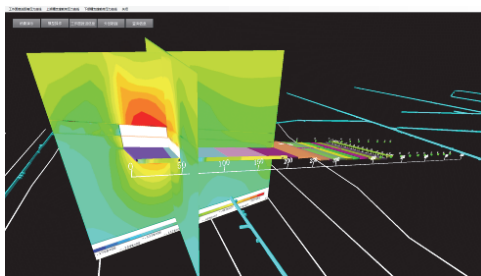


图 11 三维可视化系统中工作面推进 80 m 的应力云图

Fig.11 Stress nephograms of advance distance at 80 m

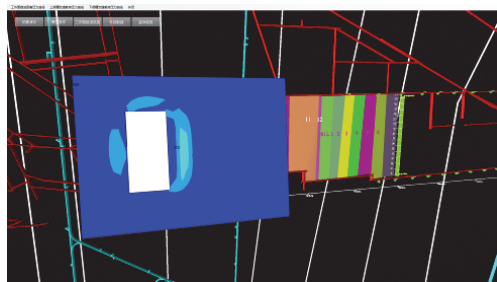


图 12 三维可视化系统中工作面推进 80 m 的损伤云图

Fig.12 Damage nephograms of advance distance at 80 m

通过对数值计算结果的三维可视化,并结合三维场景的空间关系综合分析,得出开采对原岩应力场的影响,揭示工作面来压破坏的形式与机理。通过对数值计算与现场监测的分析结果的联合解读,能进一步完整地掌握工作面矿压显现规律和开采区域的变形趋势与稳定状态。

4 结 论

1) 以三维可视化方式解析煤矿地下工程的地

质采矿条件,更为形象地显示矿山实际场景,可较容易地理解场景中模型复杂的相对位置关系,直观表达各监测项目测点布置与地质结构的相互关系,便于监测成果与地质采矿条件的综合分析。通过 C# 编写程序代码,对虚拟现实系统软件进行二次开发,将矿山现场监测的数据、应力场、位移场、损伤场等数据集成并可视化到三维可视化系统中,直观表达不同监测时间段不同监测项目的数据信息,进而可以通过对可视化结果的联合解读,指导现场的安全生产。

2) 通过对三维可视化系统中监测数据的分析,得出大安山煤矿某工作面基本顶的初次来压步距平均为 52.67 m,周期来压步距平均为 22.12 m。回风巷的应力峰值平均为 24 MPa,距工作面前方平均 12.17 m;运输巷的应力峰值平均为 23.57 MPa,距工作面前方平均 9.46 m。数值计算结果得到的基本顶的初次来压步距为 50 m 左右,周期来压步距为 20 m 左右,与监测结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 谭云亮. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 1, 219.
- [2] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋, 等. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 55-59. CHAI Hejun, HUANG Dilong, HUANG Runqiu, et al. New progress in the study of rock structure 3-D visualization model[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 55-59.
- [3] ERIC A DE KEMP. 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada[J]. Computers & Geosciences, 2000, 26: 509-530.
- [4] ERIC A DE KEMP. Visualization of complex geological structures using 3-D Bezier construction tools[J]. Computers & Geosciences, 1999, 25: 581-597.
- [5] OLIVIER KAUFMANN, THIERRY MARTIN. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34: 278-290.
- [6] JIN Baoxuan, FANG Yuanmin, SONG Weiwei. 3D visualization model and key techniques for digital mine[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2011, 21: 748-752.
- [7] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋, 等. 岩体结构三维可视化及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 217-220. CHAI Hejun, HUANG Dilong, HUANG Runqiu, et al.

- 3-D visualization of rockmass structure and its application in engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 217-220.
- [8] 孟永东, 徐卫亚, 刘造保, 等. 复杂岩质高边坡工程安全监测三维可视化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2500-2509.
MENG Yongdong, XU Weiya, LIU Zaobao, et al. Analysis of 3D visualization of safety monitoring for complicated high rock slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2500-2509.
- [9] 贾明涛, 王李管, 潘长良. 基于监测数据的边坡位移可视化分析系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1324-1328.
JIA Mingtao, WANG Liguan, PAN Changliang. Visual analysis system for slope displacement based on monitored data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1324-1328.
- [10] 张鹏海, 杨天鸿, 刘洪磊, 等. 张马屯铁矿开采虚拟现实系统的建立及应用[J]. 金属矿山, 2011(3): 117-121.
ZHANG Penghai, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Establishment of the virtual reality system of mining in Zhangmatun iron mine and application[J]. Metal Mine, 2011(3): 117-121.
- [11] 魏森声. 基于 OpenGL 和 OPC 技术的煤矿三维可视化信息系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [12] 李建忠, 张俊文, 张建平, 等. 基于 PC 机的采煤工作面虚拟现实系统[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(1): 37-38, 42.
LI Jianzhong, ZHANG Junwen, ZHANG Jianping, et al. Virtual reality system based on PC for mining coal face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(1): 37-38, 42.
- [13] 袁景凌, 钟珞, 楼梦麟. 有限元分析结果的三维可视化[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(3): 15-18.
YUAN Jingling, ZHONG Luo, LOU Menglin. 3D visualization of finite-element analysis result[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(3): 15-18.
- [14] 胡小彭. 基于 ArcGIS 的煤矿巷道三维可视化技术的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [15] 石秀伟, 李晶, 赵换新, 等. 基于 ArcGIS 的煤矿开采沉陷预测与可视化分析[J]. 金属矿山, 2012(9): 103-106, 166.
SHI Xiuwei, LI Jing, ZHAO Huanxin, et al. The prediction and visualization of coal mining subsidence based on ArcGIS[J]. Metal Mine, 2012(9): 103-106, 166.
- [16] 王兵建, 张亚伟, 杨战伟. 煤矿安全培训虚拟现实系统的研发与应用[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 28(5): 561-565.
WANG Bingjian, ZHANG Yawei, YANG Zhanwei. Application of virtual reality technology in coal mine safety training[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2009, 28(5): 561-565.
- [17] 刘洋, 索永录, 赵峰. 基于 Creator/vega 煤巷掘进仿真实现方法的研究[J]. 大连民族学院学报, 2007(5): 30-33.
LIU Yang, SUO Yonglu, ZHAO Feng. Research on the methods of coal roadways tunneling simulation base on Vega & Creator[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2007(5): 30-33.
- [18] 欧平洋. 煤矿安全监控系统数据集成技术的研究与应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [19] 黄书岭, 张勇, 丁秀丽, 等. 大型地下厂房区域地应力场多源信息融合分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2057-2065.
HUANG Shuling, ZHANG Yong, DING Xiuli, et al. Analytical methods of multi-source information fusion for in-situ stress field of large underground powerhouse region and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2057-2065.
- [20] 刘增辉, 高谦, 郭慧高, 等. 金川二矿区 14 行风井稳定性评价及监测系统[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 444-450.
LIU Zenghui, GAO Qian, GUO Huigao, et al. Stability evaluation and monitoring system of a shaft in Jinchuan No. 2 mine area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 444-450.
- [21] 刘建坡, 石长岩, 李元辉, 等. 红透山铜矿微震监测系统的建立及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 72-77.
LIU Jianpo, SHI Changyan, LI Yuanhui, et al. Studies on establishment and application of microseismic monitoring system in Hongtoushan copper mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 72-77.
- [22] 王浩, 葛修润, 邓建辉, 等. 隧道施工工期监测信息管理系统的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1684-1686.
WANG Hao, GE Xiurun, DENG Jianhui, et al. Study on management system of monitoring data in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup 1): 1684-1686.
- [23] 付东波, 齐庆新, 徐刚, 等. 基于 PTR2000 的井下无线压力监测系统的设计[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 222-225.
FU Dongbo, QI Qingxin, XU Gang, et al. Design of wireless measuring system for working resistance of supports based on PTR2000 technique[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(2): 222-225.