

# 基于三维地应力场反演的宏观区域冲击危险性评价

邓 志 刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;

3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)



扫码移动阅读

**摘 要:** 为了提高采区宏观区域冲击危险评价精度, 基于三维地应力场反演技术开展了相关研究, 并以集贤煤矿西二采区为研究对象, 在地质构造特征分析、煤岩物理力学性质和矿井地应力实测的基础上, 根据多元线性回归原理对三维地应力场进行数值模拟反演, 获得了研究区域内三维地应力场的相关信息; 综合考虑构造应力、采动影响等因素, 实现了对采区宏观区域的冲击危险评价, 优化后的单翼顺序开采方案可以降低回采区域应力集中水平, 有利于指导现场的冲击地压灾害防治。

**关键词:** 三维地应力场反演; 宏观区域; 数值模拟反演; 冲击危险评价

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)10-0078-05

## Danger evaluation of pressure bump in macro area based on 3D geostress field inversion

DENG Zhigang<sup>1,2,3</sup>

(1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Mine Safety Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to improve the evaluation precision of the mine bump danger in the macro area of the mining block, a related study was conducted based on the inversion technology of the 3D geostress field. And with West No. 2 Mining Block of Jixian Mine was the study object, based on the analysis on the geological structure features, the coal and rock physical mechanics properties and the mine geostress measurement, according to the multiple linear regression principle, a numerical simulation inversion was conducted on the 3D geostress field and the related information of the 3D geostress filed in the study area were obtained. The comprehensive consideration on the structure stress, mining factors and other factors could realize the evaluation on the mine bump danger of the macro area in the mining block. The stress concentration level of in the mining area could be reduced after using the optimized single-wing sequential mining scheme, which could help to guide the prevention and control of the pressure bump disaster at the site.

**Key words:** 3D geostress field inversion; macro area; numerical simulation inversion; mine bump danger evaluation

## 0 引 言

煤炭资源是我国的主体能源, 近年来随着东部资源逐渐枯竭, 我国已经开始对西部煤炭资源进行全面开发。在这过程中面临的一个显著问题就是高强度开采所引发的新型冲击地压问题, 其特点是煤层埋藏深度通常在 300~700 m、煤岩具有冲击倾向

性、开采强度大、回采巷道破坏严重等; 分析发现, 此类新型冲击地压灾害的致灾因素包括资源埋藏深度、煤岩冲击倾向性、地质构造赋存情况等客观因素, 也包括由于矿井整体或局部开拓布局不合理导致的应力集中等人为因素。因此, 对于目前国内新建矿井来说, 如何在建井初期或者是在局部资源回采之前, 在宏观评价矿井或局部区域冲击危险的基

收稿日期: 2018-04-08; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.10.012

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045003-006-002); 煤炭科学技术研究院科技发展基金资助项目(2016JC09)

作者简介: 邓志刚(1981—), 男, 吉林长春人, 副研究员, 博士研究生。Tel: 010-84262753, E-mail: dengzhigang2004@163.com

引用格式: 邓志刚. 基于三维地应力场反演的宏观区域冲击危险性评价[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 78-82.

DENG Zhigang. Danger evaluation of pressure bump in macro area based on 3D geostress field inversion[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 78-82.

基础上,合理规划矿井或局部开拓布局,降低潜在的冲击危险,对指导矿井生产期间的冲击地压灾害防治工作具有十分重要的意义。

目前在冲击地压危险性评价领域应用较多的方法包括:现场实测方法、模拟研究方法和多指标参量综合评价方法,但以上方法很难实现对大范围宏观区域的高精度冲击危险性评价<sup>[1-4]</sup>。张宏伟等根据对河南、北京、新疆等多个矿区冲击地压灾害的发生条件进行分析,提出了“不同矿区、不同煤层、不同构造条件下矿井动力灾害具有不同的模式”的观点<sup>[5-7]</sup>。韩军等认为京西煤田具有发生冲击地压灾害的地质动力环境,该条件下的冲击地压灾害是煤岩体在较高构造应力条件下以块体形式整体瞬间破坏、快速释放能量的过程<sup>[8]</sup>。

为实现对大范围区域的宏观高精度冲击危险性评价,笔者在传统地应力测试方法的基础上<sup>[9-11]</sup>,采用三维地应力场反演技术方法<sup>[12-13]</sup>,在矿井区域地质构造特征分析和矿井地应力实测的基础上,根据多元线性回归原理,开展三维地应力场反演研究,获得研究区域的三维地应力场信息;综合考虑研究区域内构造、采动等因素作用,开展宏观区域冲击危险性评价;根据冲击危险性评价结果,指导优化矿井或局部采区的开拓布局,降低潜在的冲击危险,并为多个现场进行了成功应用。

## 1 三维地应力场反演技术原理

常规的地应力测试只能测定个别点的地应力值和方向,并不能直观地反应出测定区域的地应力场情况,因此如何根据现场实测获得的地应力测试参数,通过相关方法深入研究获取区域大范围应力场,是煤矿地应力场研究领域需要深入解决的问题。由于反演区域应力场和载荷之间有着相互依存关系,最通用的方法是利用计算机手段,在实测资料的基础上对地应力场进行反演。目前,地应力场反演方法主要包括:侧压力系数法、多元线性回归法、神经网络法等。

其中,多元线性回归法能够较为全面、准确地反应地形特征、岩体结构等地质环境因素,是目前实际工程应用中较为成熟且精确的地应力反演法。该方法的核心思想是基于地应力测试数据和较为详尽的地质资料,依据对研究区域地应力场产生条件的分析研究,建立研究区域的三维有限元模型,展开多元回归计算分析研究,获得整个研究区域的初始地应力场回归方程。

将地应力测试回归值作为因变量,将通过有限元计算方法求得的自重应力场和构造应力场对应于实测点的应力计算值作为自变量,获得回归方程的形式为

$$\hat{\sigma}_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \quad (1)$$

式中: $k$ 为测试点的序号; $\hat{\sigma}_k$ 为第 $k$ 个测试点的回归值; $L_i$ 为对应于自变量的回归系数; $\sigma_k^i$ 为对应于应力分量计算值的单列矩阵; $n$ 为工况数。

假定有 $m$ 个测试点,则最小二乘法的残差平方和为

$$S_c = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i)^2 \quad (2)$$

式中: $\sigma_{jk}^*$ 为 $k$ 测试点 $j$ 应力分量值; $\sigma_{jk}^i$ 为 $i$ 工况下 $k$ 测试点 $j$ 应力分量的有限元计算值。

解此方程,得 $n$ 个待定回归系数 $L=(L_1, L_2, \dots, L_n)^T$ ,则研究域内任一点 $P$ 的回归初始应力,可由该点各有限元计算值叠加而得:

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jp}^i \quad (3)$$

式中: $j=1, 2, \dots, 6$ ,对应初始应力6个分量。

## 2 地应力测试与三维应力场反演

集贤煤矿主采9煤和16煤,间距40 m;西二采区上部9煤已经采空,目前主采16煤,平均厚度为1.55 m,平均埋深670 m,顶板为细砂岩,底板为细砂岩与粉砂岩互层。该矿是龙煤集团双鸭山矿区最早发生冲击地压灾害的矿井,在开采16号主采煤层过程中发生冲击地压事故,为有效遏制矿井的冲击危险,提高冲击地压灾害防治效率,2013年对集贤煤矿开展了基于三维地应力场反演的西二采区布局优化研究。

2013年,对集贤煤矿西二采区地应力场进行了现场测试,测得其最大主应力和中间主应力接近水平方向,其中最大主应力为36.18 MPa;最小主应力接近垂直方向,为16.25 MPa。最大水平主应力与垂直应力比值范围在2.16~2.65,平均为2.37倍,其地应力场以水平构造应力为主导。

根据集贤煤矿西二采区采掘工程平面图、地质报告和研究区域内钻孔柱状图等资料,结合地应力测试点位置,应用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件进行三维地应力场反演,确定模型尺寸如下: $x=4\ 200$  m, $y=1\ 610$  m, $z=1\ 010$  m;数值模型共分为28 730个单元和12 809个节点。研究建立集贤煤矿西二采区的

数值模拟模型如图 1 所示。

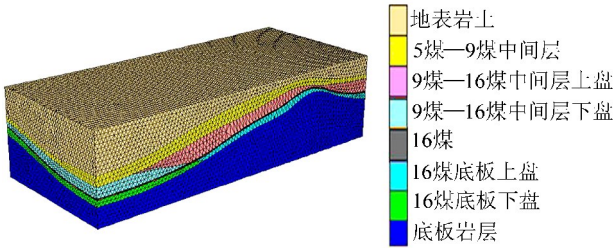


图 1 集贤煤矿西二采区数值计算模型  
Fig. 1 The numerical model for west second area in Jixian Coal Mine

以现场 3 个测试点地应力测试资料为基础,进行最小二乘多元线性回归分析,获得 5 个回归系数: $L_1=1.032\ 5$ , $L_2=1.046\ 5$ , $L_3=1.464\ 7$ , $L_4=-3.204\ 0$ , $L_5=4.940\ 9$ ,复相关系数为 0.962 1。表 1 列出了测试点实测地应力值与回归方程得出的应力计算值的对比分析数据,对于计算应力以及应力方向这 2 个核心数据,其计算值与实际值的相对误差均不超过 10%,计算结果与实际值具有较高的拟合度,反演结果较为理想。

表 1 集贤煤矿西二采区各测点实测地应力与回归应力对比

Table 1 Statistics between measured geostress and regression stress for Jixian Coal Mine west second area

参量	测点号	实测值	计算值	相对误差/%
最大主应力/MPa	1	36.61	35.02	4
	2	33.03	32.30	2
	3	38.91	37.41	4
最大主应力方向/(°)	1	165.77	167.38	1
	2	173.64	172.92	1
	3	192.26	190.27	1
中间主应力/MPa	1	21.57	22.98	7
	2	15.54	15.14	3
	3	19.14	18.42	4
中间主应力方向/(°)	1	78.35	79.89	2
	2	86.93	85.30	2
	3	283.6	281.39	1
最小主应力/MPa	1	18.61	17.1	8
	2	12.62	12.20	3
	3	15.53	16.25	5
最小主应力方向/(°)	1	233.01	230.84	1
	2	233.34	231.46	1
	3	95.51	98.21	3

基于地应力实测结果,应用多元线性回归分析方法,对集贤煤矿西二采区进行地应力反演,然后根据 16 煤上部 9 煤的采空区分布情况进行开挖,得到西二采区内 16 煤的最大主应力云图,如图 2 所示。

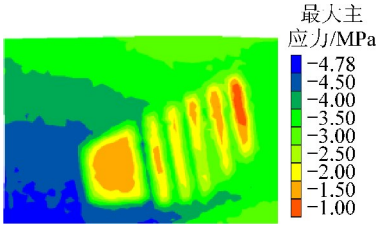


图 2 西二采区 9 煤采空后 16 煤最大主应力云图  
Fig. 2 Maximum principal stress for No.16 coal seam after No.9 coal seam mined in west second area

3 宏观区域冲击危险性评价

西二采区原开拓布局方案为双翼对拉式顺序开采布置方式,采区中部布置 3 条沿煤下山,各工作面分两侧自上而下依次回采,相邻工作面之间采用沿空留巷技术,西二采区原开拓布局方案如图 3 所示。

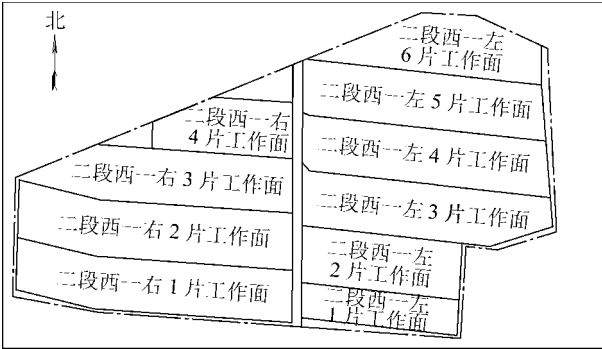


图 3 西二采区原开拓布局方案  
Fig. 3 The original development program for west second area

图 4 为根据原开拓布局方案开采过程中,各工作面采出后的最大主应力云图,分析发现该开采方案对原岩应力场的扰动作用非常明显,造成局部应力高度集中,应力集中系数峰值达到 4.78,平均应力集中系数 2.32;同时,该方案中 3 条采区下山大部分位于 9 煤残留煤柱影响范围内,不利于巷道的维护和冲击地压的防治;在工作面接续时,尤其在左 1 片和左 2 片工作面回采结束后,由于工作面形状不规则,将会造成残留三角煤柱,并且该区域位于向斜构造附近,应力集中程度较高,冲击地压危险性较大。



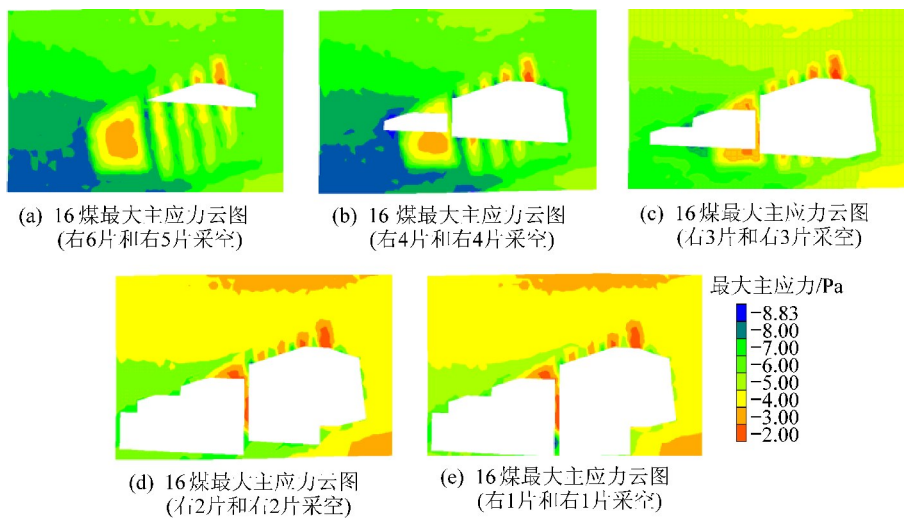


图 4 原开拓方案各阶段最大主应力云图

Fig. 4 The maximum principal stress for various phases of original development program

基于西二采区三维地应力场反演结果,从指导冲击地压灾害防治的角度,对采区原开拓布局方案进行了优化研究,优化后的开拓布局方案为单翼顺序开采。根据上部 9 煤的采空区和残余煤柱分布情况,16 煤西二采区设计时,为避开上煤层残余煤柱造成的集中应力,各工作面相对上煤层错开半个工作面距离,即 87 m,考虑矿方的实际情况,工作面长度仍为 194 m;根据开采范围,各工作面设计为自东向西依次布置,单一工作面自南向北后退式开采;相邻工作面之间采用沿空留巷设计,消除煤柱的应力集中效应,同时减少了煤炭损失。优化后的西二采区开拓布局方案如图 5 所示。

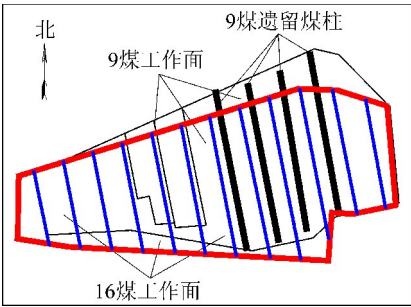


图 5 优化后的西二采区开拓布局方案  
Fig. 5 Optimized development program for west second area

图 6 为根据优化后的开拓布局方案进行开采时,各工作面采出后的典型最大主应力云图,分析发现该开采方案对原岩应力场的扰动作用明显降低,应力集中系数峰值为 3.15,平均应力集中系数 1.63;同时,该方案中 3 条采区下山全部位于低应力区域,回采过程中应力集中系数没有明显变化;工作面接

续过程中几乎没有残留三角煤柱,不会形成局部高应力区,回采过程中冲击地压危险性明显降低。

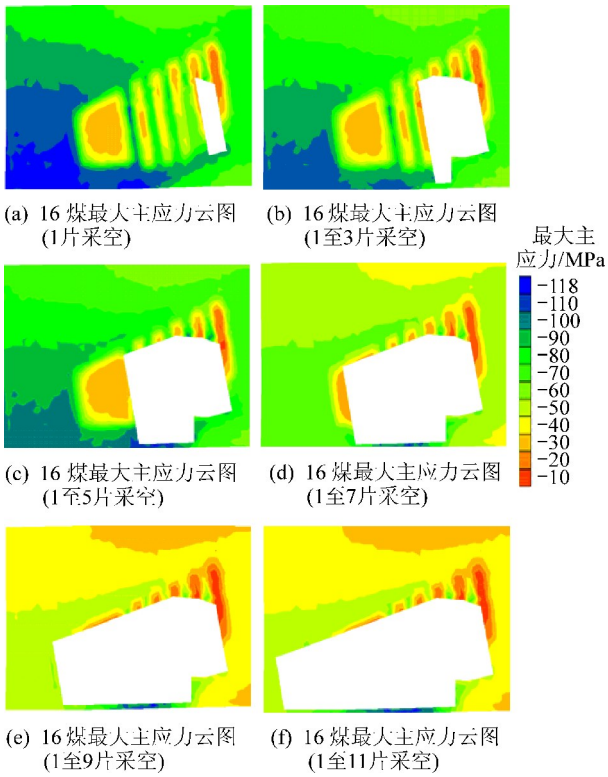


图 6 优化开拓布局后各阶段最大主应力云图  
Fig. 6 The maximum principal stress for various phases of optimized development program

通过对集贤矿西二采区 2 种开拓布局进行对比,发现无论从应力集中区域的大小,还是从应力水平大小来看,优化后的方案明显优于原方案;基于应力控制理论,“力源”因素是冲击地压发生的必要条

件,冲击地压发生的区域基本上均是位于高集中应力区,降低了回采区域的应力集中水平,将非常有利于治理冲击地压灾害。因此,西二采区优化后的开拓布局方案,将有利于指导现场的冲击地压灾害防治。

## 4 结 论

1) 基于地应力测试的三维应力场反演技术,能够在现场地应力测试的基础上,结合现场地质条件和岩体的结构形态,直观显示大区域的原岩应力场分布情况,是比较成熟且精确的地应力场反演方法。

2) 集贤煤矿西二采区地应力场进行了现场测试,测得其最大主应力和中间主应力接近水平方向,其中最大主应力为 36.18 MPa;最小主应力接近垂直方向,为 16.25 MPa。最大水平主应力与垂直应力比值为 2.16~2.65,平均为 2.37 倍,其地应力场以水平构造应力为主导。基于以上测试数据、西二采区地质资料,应用三维地应力反演技术对西二采区地应力场进行数值模拟反演。

3) 在对集贤矿西二采区三维地应力场反演的基础上,对双翼对拉式顺序开采和单翼顺序开采 2 种布置方式分别进行了开拓反演,研究发现无论从应力集中区域的大小,还是从应力水平大小来看,优化后单翼顺序开采方案明显优于原方案,可以降低回采区域的应力集中水平,有利于指导现场的冲击地压灾害防治。

## 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [2] 齐庆新,刘天泉,史元伟.层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[J].煤炭学报,2002,27(S1):43-48.  
QI Qingxin, LIU Tianquan, SHI Yuanwei. The theory and practice of rockburst led by structure failure of bedded coal-rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(S1): 43-48.
- [3] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大

学出版社,2008:60-89.

- [4] 李宏艳.煤岩物理力学性质与冲击倾向性关系[J].煤矿开采, 2011, 16(3): 43-46.  
LI Hongyan. Physical and mechanical property of coal and rock and its relationship with rock-burst liability[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(3): 43-46.
- [5] 张宏伟,韩军,宋卫华,等.地质动力区划[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [6] 张宏伟.岩体应力状态研究与矿井动力现象预测[D].阜新:辽宁工程技术大学,1999.
- [7] 张宏伟,陈学华,胡占峰.活动断裂研究中的趋势面分析方法[J].辽宁工程技术大学学报,2000,19(3):225-228.  
ZHANG Hongwei, CHEN Xuehua, HU Zhanfeng. Tendency plane analysis method used in active fault research[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2000, 19(3): 225-228.
- [8] 韩军,张宏伟,兰天伟,等.京西煤田冲击地压的地质动力环境[J].煤炭学报,2014,39(6):1056-1062.  
HAN Jun, ZHANG Hongwei, LAN Tianwei, et al. Geodynamic environment of rock burst in western Beijing coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1056-1062.
- [9] 蔡美峰.地应力测量原理和技术[M].北京:科学出版社,2000.
- [10] 乔伟,李文平.深部矿井地应力场分布规律及其在冲击地压预测中的应用[C]//第八届全国工程地质大会论文集,2008.
- [11] 张延新,宋常胜,蔡美峰,等.深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):778-786.  
ZHANG Yanxin, SONG Changsheng, CAI Meifeng, et al. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modelling predictions of stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 778-786.
- [12] 邓志刚,齐庆新,赵善坤,等.三维地应力场反演技术在冲击危险性评价中的应用[J].煤炭科学技术,2014,42(5):5-8.  
DENG Zhigang, QI Qingxin, ZHAO Shakun, et al. The rock-burst risk assessment based on Back analysis of 3D geostress[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(5): 5-8.
- [13] 张宁博,商晶志,邓志刚,等.基于地应力场反演的冲击危险性评价及防治[J].煤矿安全,2015,46(11):43-49.  
ZHANG Ningbo, SHANG Jingzhi, DENG Zhigang, et al. Hazard assessment and prevention of rock burst based on ground stress field inversion[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(11): 43-49.