

文章编号:0253-9993(2010)S0-0049-05

# 大安山煤矿地应力测量及数值模拟分析

潘一山,唐 治,阎海鹏,李国臻,李忠华,耿 琳

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**为弄清大安山煤矿矿区应力状态及分布特征,采用空心包体应力解除法进行地应力测量。结果表明:该区的地应力以水平应力为主,最大主应力方向与太行山以东的华北地区的主应力方向基本一致;各测点均有2个主应力接近水平方向,另1个主应力接近垂直方向,垂直主应力值基本上等于或略小于自重应力值;位于近水平面内的2个主应力相差较大,4个测点近水平面内的2个主应力的比值分别为3.1、1.7、2.4、2.5;最大水平主应力随深度变化增加较快,而深度变化对最小主应力的影响却相对较小;在同一平面内,地应力的大小和方向没有出现突变现象,说明矿区的地应力场是比较均匀的。另外应用ANSYS有限元软件进行数值模拟,得出的最大主应力值和实际测量值比较吻合。

**关键词:**大安山煤矿;地应力;数值模拟;应力解除法;岩石力学

**中图分类号:**TD311 **文献标志码:**A

## Measurement and numerical simulation analysis of in-situ stresses in Daanshan Coal Mine

PAN Yi-shan, TANG Zhi, YAN Hai-peng, LI Guo-zhen, LI Zhong-hua, GENG Lin

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to reveal the state and distribution of stresses in the Daanshan Coal Mine, the in-situ stresses was measured by the hollow inclusion stress-relief method. Some conclusions are drawn as follows: the in-situ stress of this mine is dominated by horizontal stress. The orientation of maximum principal stress is approximately coincided with the orientation of the principal stress of North China on the east of the Taihang Mountains. The direction of two principal stresses at every survey point is close to horizontal. And another is close to vertical. The vertical principal stress is basically equal to the stress caused by self gravity. The deference of two principal stresses close to horizontal plane is larger. And the ratio of them at four survey points is 3.1, 1.7, 2.4, 2.5 respectively. The maximum horizontal principal stress increases quickly with depth. And the depth has comparatively small impact on the minor principal stress. There are no abrupt changes of the size and orientation of in-situ stress in the same plane, which demonstrates that the in-situ stress of this mine is relatively uniform. In addition, the numerical results of maximum principal stress obtained by the ANSYS finite element software are identical with the measured ones.

**Key words:** Daanshan Coal Mine; in-situ stress; numerical simulation; overcoring technique; rock mechanics

大安山煤矿目前开采水平为+550 m,已进入深部开采阶段,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。近年来在采

掘过程中矿山动力现象比较明显。随着采深的增加,预计深部煤层矿山动力现象将会更加明显,给生产和安全带来了严重威胁。为了弄清动力现象与巷道变形破坏机制和特征,必须对各种影响因素进行充分的

研究。而地应力是最重要和最根本的因素之一。因此,对地应力场进行测量与分析十分必要。

大安山井田位于北京正西直距 50 km,地理坐标北纬 39°54'30"、东经 115°45'03",行政区属北京市房山区管辖。东起茶棚岭断层,西到大网山断层,南自玄武岩顶界,北到 48 号钻孔与 96 号钻孔连接线,深部到+450 m 水平。走向长约 9 km,倾向宽 2~4 km,面积 25.5 km<sup>2</sup>。井田东部与木城涧矿千军台井田相邻。区内最高峰为老龙窝,标高+1 646.5 m,最低沟谷为大北河一带,标高+550 m,沟谷均为与地层走向直交或斜交的 V 形谷。井田位于祁吕贺山字型东翼反射弧之庙安岭-召吉山向斜南翼,东有九龙山向斜,南有阜平背斜,西经马栏-洪水峪断褶带与百花山向斜为邻。井田内构造以 SW-NE 向斜褶皱为主(大部分倒转),伴有大量走向及倾向断裂,次级构造十分发育,西北部大寒岭背斜两翼局部受到岩浆岩侵入体的破坏。

## 1 地应力测量

### 1.1 地应力测量方法

地应力测量采用空心包体应力解除法,并用 KX-81 型空芯包体式三轴地应力传感器(应变计)——

中国地质科学院地质力学研究所制造,该传感器由嵌入环氧树脂筒中的 12 个电阻应变片组成,3 枚应变花沿环氧树脂筒周围相隔 120°粘结,每枚应变花有 4 个应变片,在应变计的尾部贴一个补偿应变片。它利用孔壁应力解除法进行地应力测量,可在单孔中通过一次套芯解除获得三维应力状态<sup>[1-3]</sup>。

### 1.2 测量布置原则

巷道中地应力测点位置选择的好坏关系到测量的成败,在确定地应力测点位置时应遵循以下原则<sup>[4-5]</sup>:

(1) 地层具代表性的区域;

(2) 完整或尽量完整、节理裂隙不发育,胶结较好的岩体内,除特殊要求外,一般要远离断层,避开岩石破碎带等地质构造带;

(3) 钻孔的深度能满足巷道宽度的 2.0~2.5 倍以上的要求,孔底处也远离其它地下工程;

(4) 尽量远离大的采空区,避开应力集中区,即应力状态未受工程扰动的地区。同时,要选择接水、接电方便的地点。

### 1.3 测点布置

根据大安山煤矿巷道布置及生产情况,在井田内共设置 4 个测点,测点技术参数见表 1。

表 1 地应力测点技术特征

Table 1 Technical characteristics of in-situ stress measurement points

测点	位置	测点距地表深度/m	钻孔深度/m	钻孔方位/(°)	钻孔倾角/(°)	应变花角度/(°)
1	+550 m 水平西二石门 158 号架线处	672.195	8.0	245	5	180
2	+550 m 水平西二石门 73 号架线处	510.417	7.6	255	5	180
3	+550 m 水平西三石门 60 号架线处	465.028	7.0	230	5	180
4	+550 m 水平西三石门 133 号架线处	580.185	9.0	210	5	180

### 1.4 测量及计算结果

在解除全过程中,用 KBJ-16 型矿用智能数字应变仪记录数据,每钻进 3 cm 记录一次数据,绘制出应力解除曲线。通过应力解除曲线可以检查应变片的工作状态,判断测量数据的可靠性。正常情况下解除深度未达到应变花所在位置时,应变值变化很小,在套芯解除接近应变花位置时,曲线开始变化,超过应变花位置后,曲线趋于平稳。本次测量的 4 个测点应力解除曲线都有较强的变化规律,这说明应变花的工作状态是正常的<sup>[6-8]</sup>。

根据上述分析,各测点用于计算地应力的最终应变数据见表 2。通过套孔岩芯围压试验获得的岩石弹性模量和泊松比值见表 3。采用计算程序,计算出各测点的地应力大小和方向,计算结果见表 4、5。

表 2 计算地应力的最终应变数据

Table 2 Final strain data for calculation of in-situ stress

测点	A90	A0	A45	A135	B90	B0	B45	B135	C90	C0	C45	C135
1	190	218	138	249	51	190	85	73	175	214	130	133
2	112	165	150	30	96	114	132	154	180	190	158	154
3	230	28	88	97	127	230	91	82	41	191	140	142
4	218	163	163	65	56	318	143	88	183	153	98	88

表 3 岩芯弹性模量及泊松比

Table 3 Elastic modulus and Poisson's ratio of core

测点	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\nu$
1	128	0.24
2	127	0.23
3	125	0.27
4	125	0.26

表4 地应力大小及方向

Table 4 Values and direction of in-situ stress

测点	应力	大小/MPa	方位/(°)	倾角/(°)
1	$\sigma_1$	26.3	244	14.5
	$\sigma_2$	13.5	-59	-64
	$\sigma_3$	8.6	159	-20
2	$\sigma_1$	20.5	252	-7
	$\sigma_2$	12.2	-16	-5
	$\sigma_3$	9.3	109	-80
3	$\sigma_1$	19.1	232	12
	$\sigma_2$	12.4	-2	70
	$\sigma_3$	8.1	139	15
4	$\sigma_1$	22.6	213	1
	$\sigma_2$	12.6	-58	-80
	$\sigma_3$	9.2	122	-9

表5 地应力分量

Table 5 Components of in-situ stress MPa

测点	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
1	22.7	12.0	13.8	6.2	-2.9	-2.2
2	19.6	12.9	9.5	2.4	0.2	1.4
3	14.8	12.5	12.4	5.1	0.2	-1.7
4	13.2	18.7	12.5	6.0	-0.3	0.4

## 2 地应力主要特征分析

根据地应力测量结果(表4、5)可以看出,该矿地应力有如下主要特征:

(1)4个测点最大主应力方向分别为244、252、232、213°,其中最大主应力方位为244°,与华北地区的主应力方向基本一致;近东西向(大安山位于太行山以东)。华北地区以太行山为界,东西两个区域有较大差别,太行山以东的华北平原及其周边地区,其最大主应力的方向为近东西向,而太行山以西最大主应力的方向为近南北向<sup>[9-10]</sup>。

(2)4个测点最大主应力的倾角分别为14.5、-7、12、1°,说明最大主应力位于近水平方向,其值为自重应力的1.70~2.19倍,说明该区的地应力以水平应力为主,且均为压应力。

(3)4个测点均有2个主应力接近水平方向,其与水平方向夹角平均为10.4°。另一个主应力接近垂直方向,其与垂直方向夹角平均为16.5°。

(4)4个测点近垂直方向的主应力值分别为13.5、9.3、12.4、12.6 MPa,基本上等于或略小于单位面积上覆岩层的质量。

(5)位于近水平面内的2个主应力相差较大,4个测点近水平面内的2个主应力的比值分别为3.1、

1.7、2.4、2.5。按照摩尔-库仑强度理论,两个主应力的差值就是剪应力,而岩体的破坏通常是由于剪切破坏引起的,在水平面内存在很大的剪应力是引起地下巷道和采场变形和破坏的重要原因,必须引起足够的重视<sup>[11-13]</sup>。

(6)4个测点的最大主应力值分别为26.3(测点深度为672.195 m)、20.5(测点深度为510.417 m)、19.1(测点深度为465.028 m)、22.6 MPa(测点深度为580.185 m)。随深度的增加应力增加,这就意味着在矿山和其他地下工程的深部将会遇到很大的地应力的作用。必须采取合理有效措施控制地应力的作用,维护地下采场、巷道或其他地下开挖工程的稳定性。

(7)最大水平主应力随深度变化增加较快,而深度变化对最小主应力的影响却相对较小。

(8)在同一平面内,地应力的大小和方向没有出现突变现象,说明矿区的地应力场是比较均匀的。

## 3 数值模拟

### 3.1 计算模型的建立

利用ANSYS有限元软件根据第XIII勘探线剖面图建立平面有限元弹塑性本构,采用Druck-Prager屈服准则进行计算,模型取+550 m水平西二石门走向1759 m,最下端取+500 m水平,模型最上端为高山自由端,数值模拟模型如图1(a)所示,用来计算第1、2测点最大主应力。根据第XIV勘探线剖面图建立平面模型,选+550 m水平西三石门走向1749 m,最下端取+500 m水平,模型最上端为高山自由端,数值模拟模型如图1(b)所示,此模型用来计算第3、4测点最大主应力。模型均下边界全约束,左右边界是x方向位移约束,整个模型考虑自重<sup>[14-16]</sup>。

### 3.2 结果分析

图2(a)为根据第XIII勘探线剖面图建立的平面模型最大主应力图,从图中可以看出:

(1)最大主应力大小分布的总体趋势是随深度的增加而逐渐增大,各处增加趋势大体相同;

(2)在大寒岭倒转背斜、马蹄沟逆断层和后曹沟逆断层处,最大应力有增加趋势。

图3(a)为沿+550 m水平西二石门走向的最大主应力曲线图,从图中可以看出:

(1)沿+550 m水平的最大主应力值在17.4~26.2 MPa;

(2)测点离地表的距离越大,最大主应力值越大;

(3)测点1的最大主应力模拟结果为23.8 MPa,

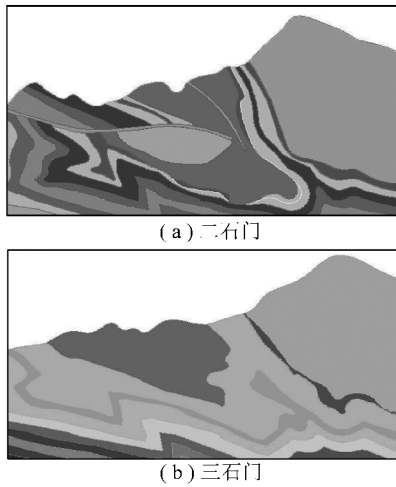


图 1 有限元模型

Fig. 1 The finite element model

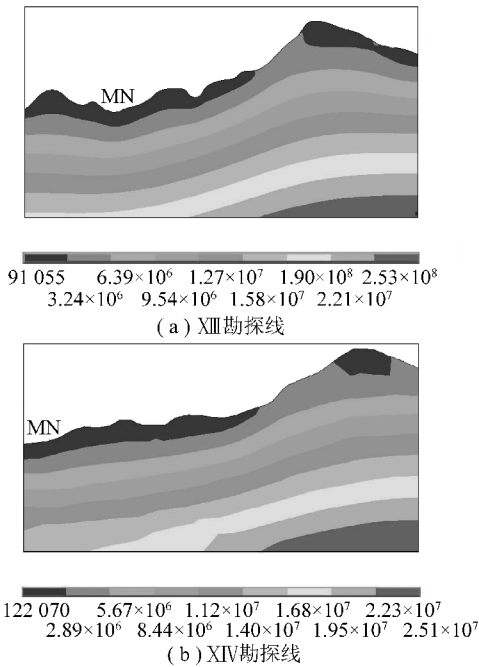


图 2 最大主应力

Fig. 2 The maximum principal stress

实测为 26.3 MPa; 测点 2 的最大主应力模拟结果为 18.1 MPa, 实测为 20.5 MPa; 模拟和实测结果有较好吻合。

图 2(b) 为根据第 XIV 勘探线剖面图建立的平面模型最大主应力图, 从图中可以看出:

- (1) 最大主应力大小分布的总体趋势是随深度的增加而逐渐增大, 各处增加趋势大体相同;
- (2) 在大寒岭倒转背斜处, 最大主应力有增加趋势。

图 3(b) 为沿 +550 m 水平西三石门走向的最大主应力曲线图, 从图中可以看出:

- (1) 沿 +550 m 水平的最大主应力值在 14.7 ~

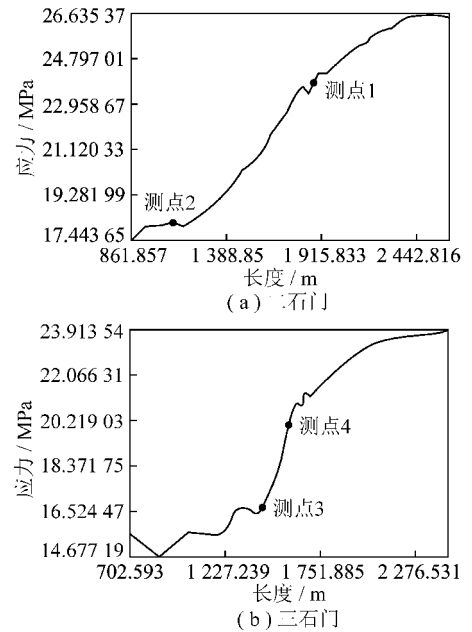


图 3 最大主应力曲线

Fig. 3 The curves of maximum principal stress

24.9 MPa 之间;

- (2) 测点离地表的距离越大, 最大主应力值越大;

(3) 测点 3 的最大主应力模拟值为 16.6 MPa, 实测值为 19.1 MPa; 测点 4 的最大主应力模拟值为 19.7 MPa, 实测值为 22.6 MPa; 模拟值和实测值有较好吻合。

## 4 结 论

(1) 矿区地应力场以水平构造应力为主导, 最大水平主应力平均为自重应力的 1.9 倍; 垂直主应力基本上等于或略小于自重应力。

(2) 测量结果与华北地区区域构造和地应力场的总体变化规律相吻合, 表明地应力测量结果是准确的。

(3) 此次地应力测量为矿区深部开采提供了可靠的基础数据, 对深部巷道支护与冲击地区的防治提供了理论依据。

(4) 数值模拟和实测结果有较好吻合, 说明数值模拟有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000. Cai Meifeng. Principle and techniques of rock stress measurement [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 刘允芳, 朱杰兵, 刘元冲. 空心包体式钻子巨向应变计地应力测量的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 448-453. Liu Yunfang, Zhu Jiebing, Liu Yuanchong. Research on hollow inclu-

- sion triaxial strain gauge for geostress measurement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 448-453.
- [3] Cai M, Qiao L, Yu B. Study and tests of techniques for increasing overcoring stress measurement accuracy [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(4): 375-384.
- [4] 韩 嵩, 蔡美峰. 深部地应力场下砂岩力学性质的变化 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 570-572.  
Han Song, Cai Meifeng. The changes of mechanical properties of sandstone in deep in-situ stress field [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 570-572.
- [5] 吕爱钟. 高地应力区地下硐室断面形状的选择方法 [J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 495-498.  
Lü Aizhong. Selection method of section configuration of underground chamber in high strata stress zone [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 495-498.
- [6] 王连捷, 潘立宙, 廖春亭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.  
Wang Lianjie, Pan Lizhou, Liao Chunting, et al. Rock stress measurement and its engineering application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [7] 康红普. 煤矿井下应力场类型及相互作用分析 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1 329-1 335.  
Kang Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coalmines [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1 329-1 335.
- [8] 周 钢, 李玉寿, 吴振业. 大屯矿区地应力测量与特征分析 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 314-318.  
Zhou Gang, Li Yushou, Wu Zhenye. Measurement of crustal stress and analysis of characteristics in Datun mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 314-318.
- [9] 吴满路, 廖椿庭, 张春山, 等. 红透山铜矿地应力测量及其分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 943-3 947.  
Wu Manlu, Liao Chunting, Zhang Chunshan, et al. In-situ stress measurement and analysis of its distribution law in Hongtoushan copper mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 943-3 947.
- [10] 苗胜军, 万林海, 来兴平, 等. 三山岛金矿地应力场与地质构造关系分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 996-3 999.  
Miao Shengjun, Wan Linhai, Lai Xingping, et al. Relation analysis between in-situ stress field and geological tectonism in Sanshandao gold mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 996-3 999.
- [11] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414-418.  
Cai Meifeng, Qiao Lan, Yu Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No. 2 mining area of Jinchuan nickel mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414-418.
- [12] 蒲文龙, 张宏伟, 郭守泉. 深部地应力实测与巷道稳定性研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(1): 49-51.  
Pu Wenlong, Zhang Hongwei, Guo Shouquan. Crustal stress measurement and stability of the tunnel to survey [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(1): 49-51.
- [13] 马秀敏, 彭 华, 李金锁. 新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11(4): 386-393.  
Ma Xiumin, Peng Hua, Li Jinsuo. Application of hydraulic fracturing in-situ stress measurements to tunnelling in Western Xinjiang [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11(4): 386-393.
- [14] 靳晓光, 王兰生, 李天斌. 地应力测量的应力恢复法试验和数值模拟研究 [J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(3): 287-290.  
Jin Xiaoguang, Wang Lansheng, Li Tianbin. Study on stress restoring and numerical modeling in geostress measure [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(3): 287-290.
- [15] 吕 庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 破碎岩质边坡预应力锚固机制数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 848-1 856.  
Lü Qing, Sun Hongyue, Shang Yuequan, et al. Numerical simulation study on prestressed anchorage mechanism in a crushed rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 848-1 856.
- [16] 刘俊杰. 采场前方应力分布参数的分析与模拟计算 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 743-747.  
Liu Junjie. Analysis and calculation on parameters of stress distribution of the front coalmining face [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 743-747.