

文章编号:1000-582X(2010)05-105-09

天府三汇一矿地应力场三维有限元分析及其分布特征

许江,彭守建,陶云奇,杨红伟

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆400044)

摘要:重庆天府三汇一矿位于华蓥山帚状褶皱带的收敛端,属地应力相对集中地带,矿区的煤与瓦斯突出不但发生的次数多,突出强度也大,且正在开采的煤层均属突出煤层,对该区域原始应力场的三维分布规律研究可为矿井生产设计及煤与瓦斯突出危险性区域预测提供参考依据。在收集三汇一矿地质资料的基础上,建立起三维有限元计算模型,利用ANSYS大型通用有限元软件采用弹塑性有限元法对该矿初始地应力场进行数值模拟。根据模拟结果,分析了三汇一矿地应力场的三维分布特征,并对 K_1 煤层的地应力分布进行了分析。

关键词:采矿工程;煤矿;地应力;数值模拟;分布特征

中图分类号:TD713

文献标志码:A

Using 3D finite element method to simulate in-situ stress field and its distribution characteristics in Tianfu Sanhui NO. 1 mine

XU Jiang, PENG Shou-jian, TAO Yun-qi, YANG Hong-wei

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Tianfu Sanhui No. 1 mine of Chongqing is located in the convergent extreme of Huayingshan scopolate fold belt, which is an area of in-situ stresses concentration. Coal and gas outburst occurred not only frequently, but also high-intensity, and the working seams are all outburst seams, so the research of its three-dimensional initial in-situ stresses field can put forward the suggestion on the production design of coal mine and the prediction of coal and gas outbursts. Based on the geological materials about Sanhui No. 1 mine, this paper develops the 3D FEM model, and uses the elastoplastic finite element method and ANSYS program in numerical simulation of the initial in-situ stresses field. Based on the simulation results, it analyzes the characters of the in-situ stresses of Sanhui No. 1 mine and K_1 coal seam.

Key words: mining engineering; coal mine; in-situ stresses; numerical simulation; distribution characteristics

煤与瓦斯突出是发生在煤矿井下的一种极其复杂的动力失稳现象^[1],根据以往实际发生的煤与瓦斯突出案例以及国内外学者的研究成果分析,地应力在煤与瓦斯突出事故中扮演了较为重要的角色。Л. Я. 加卢什科对前苏联的里沃夫-沃伦煤田和顿巴斯煤田的应力场研究表明,水平应力等于按垂直和

侧压系数确定的侧压力值,无突出危险,而具有严重突出危险的煤田,其水平应力远大于垂直应力^[2]。朱兴珊和徐凤银^[3]将国内部分突出矿区的地应力实测结果与突出情况进行了分析,认为煤、岩石和瓦斯突出多发生在具有大地动应力场特点的矿区,突出煤层的围岩内往往存在着较高的水平应力,其值不

收稿日期:2010-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50974141);国家科技重大专项项目(2008ZX05034-002);重庆市科技攻关计划重大项目(2006AA7002)

作者简介:许江(1960-),男,重庆大学教授、博士生导师,主要从事工程岩体稳定性方面的研究,(E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn.

仅远远超过岩体自重引起的侧向应力,而且超过铅直应力。表明水平应力越大,突出就越严重。汪西海^[4]以声发射粗估法对谢二矿的地应力研究表明,煤与瓦斯突出与地应力呈正相关关系,突出地带最大主应力偏高,而安全区域最大主应力正常或偏低。张宏伟^[5]利用地质动力区划方法分析了突出矿井的高应力区、低应力区和应力梯度区,以此作为预测突出的指标之一。韩军等^[6]利用空芯包体地应力测量方法对分布于中国东北、华北、华中和华南的阜新、平顶山、鹤壁和淮南等 7 个煤与瓦斯突出矿区的地应力进行了测量,探讨了地应力在煤与瓦斯突出中的作用,分析认为在影响煤与瓦斯突出的地应力、瓦斯和煤体强度 3 个主要因素中,高地应力环境使瓦斯压力和瓦斯含量增加从而增加了突出的动力,使煤体破坏强度(峰值强度)降低从而减少了突出的阻力,总体上高地应力环境下含瓦斯煤体更容易出现失稳破坏、发生煤与瓦斯突出。煤与瓦斯突出矿区所具有的地应力场特征对突出的发生、发展具有重要的作用,是产生煤与瓦斯突出的核心因素。罗康成^[7]结合六盘水矿区地应力场特征和瓦斯涌出规律,以实例重点分析了地应力场对煤与瓦斯突出的控制作用,阐明了发生煤与瓦斯突出的力学原因,为煤与瓦斯突出的预测和治理提供了依据。从以上研究可以看出,煤和瓦斯突出与地应力状态有着密切的联系,加强对矿区地应力场的研究,是防治矿井瓦斯灾害的重要基础,对指导安全生产起着重要作用。

一般而言,实测地应力是提供区域地应力场最为直接的途径,文献 [8,9] 分别论述了对平顶山一矿及晋城矿区进行地应力实地测量所取得的研究成果。但很多情况下由于场地和经费等原因,不可能进行大量的地应力实地测量,前人研究成果^[10-15]表明,为更好地满足实际生产设计和研究的需要,可在

有限的实测地应力资料的基础上,结合现场地质构造及地形等条件,通过有效的数值计算方法,进行地应力场的分析,以获得适用范围较大的地应力场分布。

重庆天府三汇一矿是中国煤与瓦斯突出较为严重的矿区之一^[16],中国历史上最大的一次煤与瓦斯突出就发生在该矿。然而目前对该区域地应力研究的文献不多,特别是对区域地应力场的三维分布研究较少。基于此,以天府三汇一矿为研究对象,拟通过建立三维计算模型,运用 ANSYS 结构分析程序对矿区地应力场进行三维数值计算,以探明天府三汇一矿地应力场的三维分布规律,进而为三汇一矿的生产设计及煤与瓦斯突出危险性区域预测提供参考依据。

为了使地应力场的数值计算结果尽可能与实际地应力场相接近,在三维地质模型的构建、材料参数的计算、边界条件的确定等方面都作了更为严谨的考虑,相对以往研究有了一定的改进。

1 地应力场三维有限元计算模型

1.1 矿区概况

重庆天府三汇一矿位于重庆市北约 85 km 的合川三汇镇境内,其地理坐标为东经 $106^{\circ}35'37'' \sim 106^{\circ}39'22''$,北纬 $30^{\circ}03'45'' \sim 30^{\circ}08'45''$,矿井在川东平行岭脊之内,山脊多为三叠系飞仙关与二叠系长兴、茅口石灰岩组成。矿区处于新华夏系第三沉降带川东褶皱带西缘之华蓥山帚状褶皱带的收敛端,属地应力相对集中地带,矿区的煤与瓦斯突出不但发生的次数多、突出强度大,且正在开采的煤层均属突出煤层。在研究区出露有 F_{62} 走向逆断层和 F_{63} 斜向逆断层。图 1 具体给出了三维地应力场数值计算涉及的区域及其平面图。

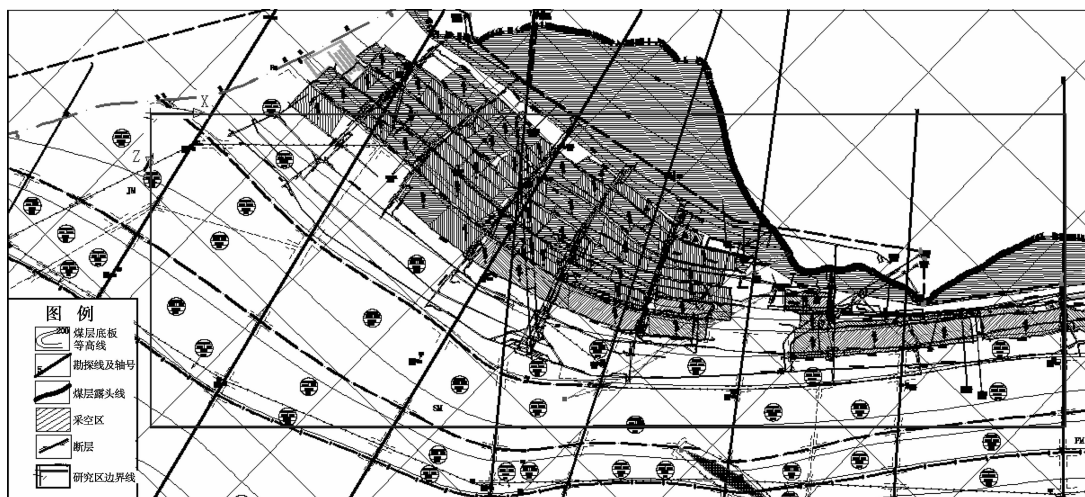


图 1 研究区域及其平面图

1.2 地应力场三维有限元计算模型的建立

1.2.1 三维地质模型

分析三汇一矿地质资料可知,研究区域位于宝顶背斜东翼,根据地质构造形成的力学机制^[17],对于褶曲构造来说,该地区的最大水平应力方向往往与构造脊线走向垂直,而最小水平应力方向则与构造脊线走向近乎平行。综合考虑到模型边界加载及边界效应的影响,根据三汇一矿 K₁ 煤层底板等高线图、矿井上下对照图、勘探线剖面图及地层综合柱状图所建地质模型为:以北京坐标系中的(3 327 535, 36 366 675, 400)为坐标原点,沿最小水平应力方向(N45°E)取 4 000 m,以该方向作为 *x* 轴正方向;沿最大水平应力方向(E45°S)取 1 500 m,以该方向作为 *z* 轴正方向;由 +400 m 标高水平向上延伸至地表,以竖直向上为 *y* 轴正方向。如此建模和选取坐标系的目的,一是为了消除边界效应,二是为了便于在模型边界施加地应力,因为 *x* 轴和 *z* 轴分别平行于最小水平地应力和最大水平地应力方向,所以最小水平地应力应平行于 *x* 轴施加到模型边界面上,最大水平地应力应平行于 *z* 轴施加到模型边界面上。

1.2.2 软件及本构模型选取

选用 ANSYS 结构分析程序进行数值计算,并采用其中的 D-P 模型描述地层材料,与该模型相应的屈服准则为 Drucker-Prager 准则,需确定弹性模量 *E*、密度 ρ 、泊松比 μ 、内聚力 *C*、内摩擦角 φ 以及膨胀角 φ_f 6 个材料参数^[18],但研究表明^[19-20],膨胀角 φ_f 反映的是介质剪切变形引起的体积改变,只对处于塑性状态的区域变形有影响,而分析的是矿区在未受采动影响时的原岩地应力场分布,因此可假定岩层没有体积变化,即取 $\varphi_f=0$ 计算。

1.2.3 材料参数

根据三汇一矿的地层综合柱状图可知,在研究区域出露的地层自上而下依次发育有三叠系飞仙关组的页岩互层,二叠系上统长兴组的石灰岩、页岩互层和龙潭组的页岩、砂岩互层(含煤地层),二叠系下统茅口组的泥岩、页岩、石灰岩及角砾岩互层,其各岩层厚度及相应物理力学参数值见表 1。

为了简化计算和提高精度,除将 K₁ 煤层单独考虑外,其顶底板各岩层均以地质年代为界限进行复合,相应的各复合岩层的物理力学参数则是根据复合岩层中各组分岩层的物理力学参数按其厚度进行加权平均处理后计算获得,即

表 1 岩层划分及其物理力学参数

复合岩层	岩层名称	岩层厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
T ₁ f	灰色页岩	20	2 598	4.982	0.24	11.27	26.4
	深灰色页岩	15	2 595	4.985	0.26	11.24	26.7
	灰黑色页岩	7	2 597	4.988	0.27	11.23	26.3
	石灰岩	16	2 579	7.269	0.31	10.53	26.5
	黑色页岩	12	2 704	51.993	0.25	24.35	36.5
	石灰岩	18	2 679	7.698	0.29	9.83	22.7
	P ₂ c	46	2 651	19.104	0.29	13.86	27.6
P ₂ c	页岩	4	2 643	47.229	0.28	16.38	28.9
	细砂岩	9	2 549	6.527	0.36	12.68	18.9
	砂质页岩	13	2 713	48.635	0.19	27.64	29.6
	砂岩	6	2 485	5.473	0.36	18.70	17.3
	灰白砂岩	10	2 781	64.474	0.25	32.96	24.7
	灰黑色页岩	15	2 529	6.127	0.27	13.2	16.5
P ₂ l	57	2 622	28.937	0.27	20.68	22.3	
K ₁	K ₁ 煤层	3	1 420	1.000	0.33	0.80	20.0
	深灰色泥岩	15	2 673	47.229	0.17	18.29	26.3
	灰色页岩	18	2 677	6.316	0.26	13.80	17.2

续表 1

复合岩层	岩层名称	岩层厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
P ₁ m ³⁺⁴	钙质页岩	23	2 709	48.756	0.22	27.33	28.4
	铝土页岩	10	2 740	53.861	0.27	19.50	26.9
	角砾岩	30	1 960	15.092	0.27	18.70	24.0
石灰岩		50	2 645	37.692	0.12	23.85	26.0
P ₁ m ¹⁺²		90	2 427	31.955	0.19	21.65	25.4

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (1)$$

式中: K 为相应复合岩层中第 i 分层的某物理力学参数在该复合岩层的加权平均值; K_i 为相应复合岩层中第 i 分层的某物理力学参数; h_i 为相应复合岩层中第 i 分层的厚度; n 为相应复合岩层中所包含的地质自然分层数。所得到的各复合岩层的物理力学参数值见表 1。

1.2.4 网格划分

一般而言,在进行有限单元网格划分时,应遵循细分网格以满足计算精度、粗分网格以减少计算工作量的总原则,并根据所用计算机的条件,考虑单元形状的规则性以及迁就地质构造的延伸等诸多因素,从而给出最为恰当的、既满足精度要求又不至于付出不必要的计算时间。因此,考虑到 K₁ 煤层为本文研究之重点,单元网格划分时,在 K₁ 煤层及其附近区域的单元划分相对密集,而在其他区域的单元划分则相对稀疏。

在单元类型选取方面,选用 solid45 三维实体结构模型单元,分配实体模型单元属性后,自由划分有限单元网格,最终整个模型划分出 913104 个单元网格,图 2 则具体给出了三汇一矿三维计算模型及其单元网格划分图。

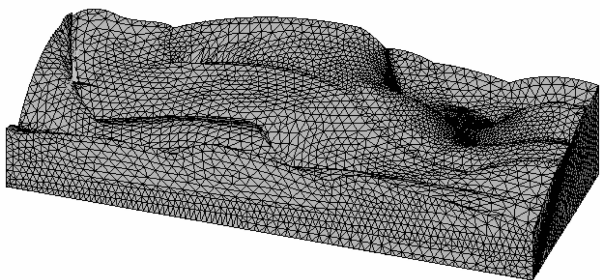


图 2 三汇一矿三维计算模型及其单元网格划分图

1.2.5 边界条件

在对某区域应力场进行有限元数值计算时,都是取出一定范围的地质体作为其具体对象进行分析,而该地质体则是赋存于一定的地质环境中的,即作为研究对象的地质体与周围的地质体之间存在相互作用。在建立计算模型时,这种相互作用可通过边界条件的设定来反映。因此,边界条件选取的合理与否将影响到计算结果的可靠性。鉴于此,在对三汇一矿地应力场进行三维数值计算时,设定的边界条件如下。

位移约束边界: $x=0$ 边界面的法线方向;

$y=0$ 边界面的法线方向;

$z=0$ 边界面的法线方向。

应力约束边界: $x=4\ 000$ m 边界面沿 x 轴的负方向;

$z=1\ 500$ m 边界面沿 z 轴的负方向。

自由边界: 上部的地表界面。

在位移约束边界上均采取零位移约束,而在应力约束边界上的应力大小取值则按下述方法确定。

众所周知应力约束边界上的水平应力分量主要是由自重应力水平分量和构造应力水平分量两部分叠加而成,其自重应力的水平分量可由下式确定

$$\sigma_g = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma h, \quad (2)$$

式中: ν 和 γ 为整个矿区计算范围内出露的所有岩层的泊松比 ν_i 和容重 γ_i 按其厚度进行加权平均处理后所确定的平均泊松比和平均容重; h 是距离地表的深度。而构造应力的水平分量则是以文献 [21] 中与三汇一矿相对较近的且处于同一地质年代的重庆永川煤矿的实测地应力结果为依据,将三汇一矿的最大水平构造应力(即 $z=1\ 500$ m 边界面沿 z 轴的负方向)取为 8.0 MPa,最小水平构造应力(即 $x=4\ 000$ 边界面沿 x 轴的负方向)取为 4.0 MPa。

图 3 具体给出了计算模型各边界的边界条件。

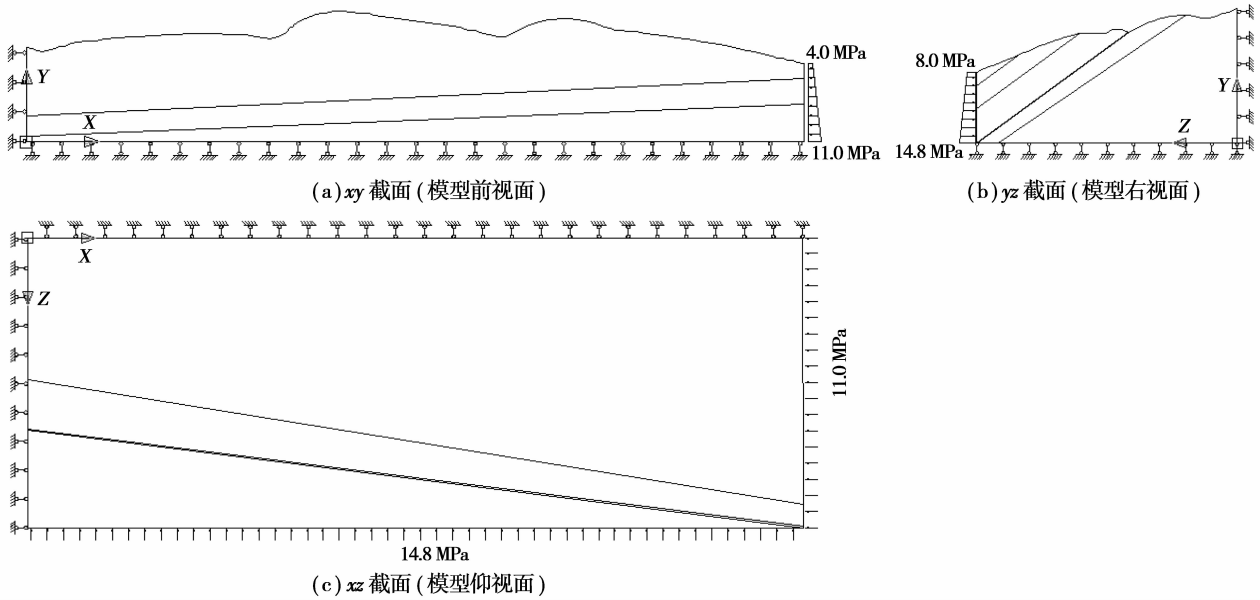


图 3 计算模型的边界条件

2 计算结果及分析

2.1 矿区地应力场三维分布规律

图 4 为其主应力矢量图。分析该图可知,模拟区内最大主应力方向在浅部多为近水平向,深部多为竖直向。各主应力方向随地形的起伏有所偏转,但总体上水平最大应力和最小应力方向与区域地质构造运动方向一致,且各主应力都为压应力。

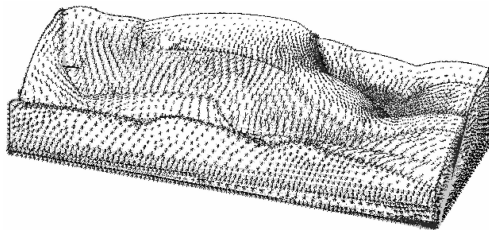
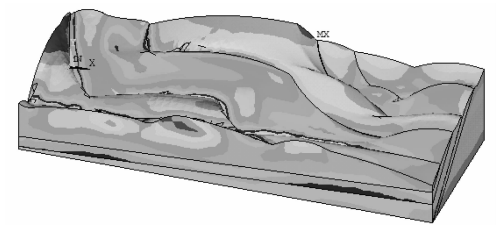


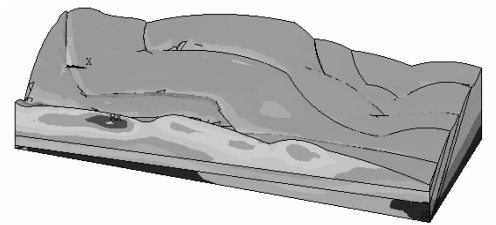
图 4 主应力矢量图

通过对如图 5-7 所示的最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 及最小主应力 σ_3 分布规律的综合分析可发现,其主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的分布规律具有以下特点:

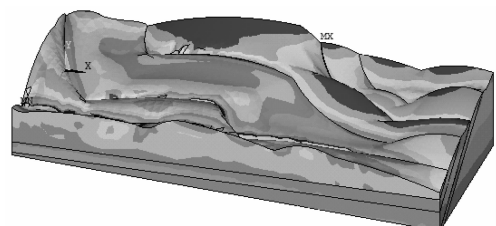
1)在整个矿区内,主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 几乎全为压应力,这说明整个矿区内的煤岩体都处于复杂的三维压应力状态,而最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的方向,除局部区域受岩性界面及地表的影响之外,基本上都近乎于与水平方向平行,中间主应力 σ_2 方向则近乎于与水平方向相垂直。由此说明,矿区最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 主要为水平构造应力,中间主应力 σ_2 主要为自重应力。



(a)x 方向



(b)y 方向



(c)z 方向

图 5 沿坐标轴方向的正应力图(单位:Pa)

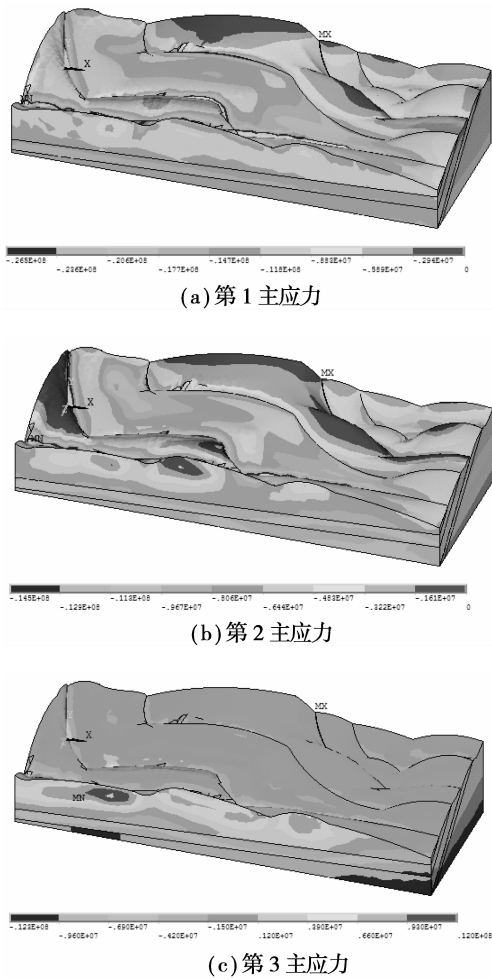


图 6 主应力图(单位:Pa)

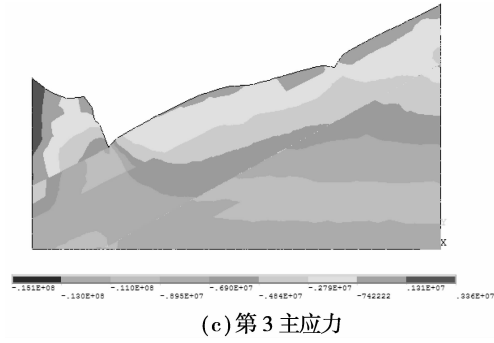
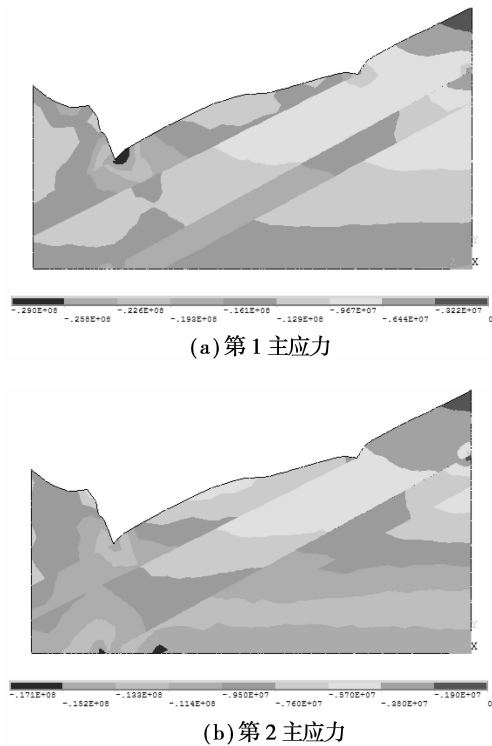


图 7 $x=2000\text{ m}$ 截面主应力等值图(单位:Pa)

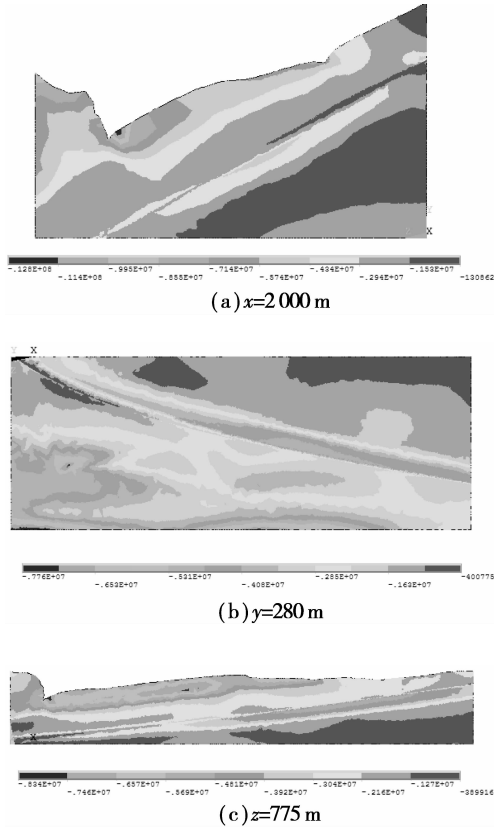


图 8 典型剖面最大剪应力等值图(单位:Pa)

2) 由于最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 方向均与水平方向近似一致,而中间主应力 σ_2 与水平方向近乎垂直,因此,在接近地表的浅部区域,最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 一般可不为零,而中间主应力 σ_2 则将趋近于零,即是说,最大主应力 σ_1 等值线和最小主应力 σ_3 等值线将有可能在地表某处尖灭,而中间主应力 σ_2 的等值线在地表附近区域的起伏程度将与地表地形曲线的起伏相类似。

3) 在地层的浅部,地应力分布受地表起伏的影响较大,与地表山坡的地形变化密切相关,一般而言,由于受到山坡自重应力的影响,在山坡谷底的地

表层附近,主应力较大,主应力梯度也较大,有应力集中现象;而在凸起的山坡地表下,主应力则相对减小,主应力梯度也较小。

4)主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 均随着埋深的增加而增大,各主应力在同一岩层中沿铅垂方向的变化呈近似线性增加,但在材料参数相差较大的复合岩层之间要发生一定的突变,这种突变与复合岩层的材料参数密切相关^[22]。

分析如图8所示的矿区计算剖面上的最大剪应力 τ_{\max} 分布规律可看出,最大剪应力 τ_{\max} 沿深度的变化规律有下述几个特点:

1)在地表浅层的大部分区域,最大剪应力 τ_{\max} 仍受地表山坡地形的影响,在地表山谷地带,最大剪应力 τ_{\max} 相对较大,其变化梯度也较大,在地表凸起地带,最大剪应力 τ_{\max} 则相对较小;

2)在各复合岩层之间的交界面处,由于各复合岩层的岩性参数不同,而且,其交界面又是牢固粘结,故最大剪应力 τ_{\max} 在该区域具有较大的变化梯度,尤其是在 K_1 煤层和 P_{1m} 及 P_{1l} 复合地层交界面处,由于两种岩性是一软一硬,在其交界面附近引起较大的剪应力集中。

2.2 K_1 煤层的地应力场分布

在煤与瓦斯突出潜在危险性区域预测中,最为关心的是突出煤层的原始应力场分布,为此,在建模过程中,特意将 K_1 煤层从煤系地层中单独划分出来构建为一岩层,以便计算完成后利用ANSYS软件中的面操作功能从计算模型中剖分出三汇一矿 K_1 煤层面,来分析该煤层中的最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 及最大剪应力 τ_{\max} 的分布规律。

从图9所给出的三汇一矿 K_1 煤层中的最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 及最大剪应力 τ_{\max} 的分布特征可看出,其主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 及最大剪应力的分布具有以下特点:

1)本计算区域处于宝顶背斜东翼,其主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 之值均随煤层埋深的增大而增加。

2)由于煤层倾向有所扭转,由东南向折转为近正南向,因此在扭折带区域导致了一定程度的地应力集中现象,一般而言,在同一埋深时,西南区域的主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的值较其东北区域要大一些。

3)在煤层浅部,各主应力大小受地表地形的影响,在地形凹陷区域,有应力集中现象,而在地形凸起区域,应力值较小;在深部区域主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的大小随上覆岩层厚度的起伏也有所波动。

4)从图中的最大剪应力分布来看,其值分布较复杂,但在煤层倾向发生扭转的区域,则明显有一个

应力集中区。

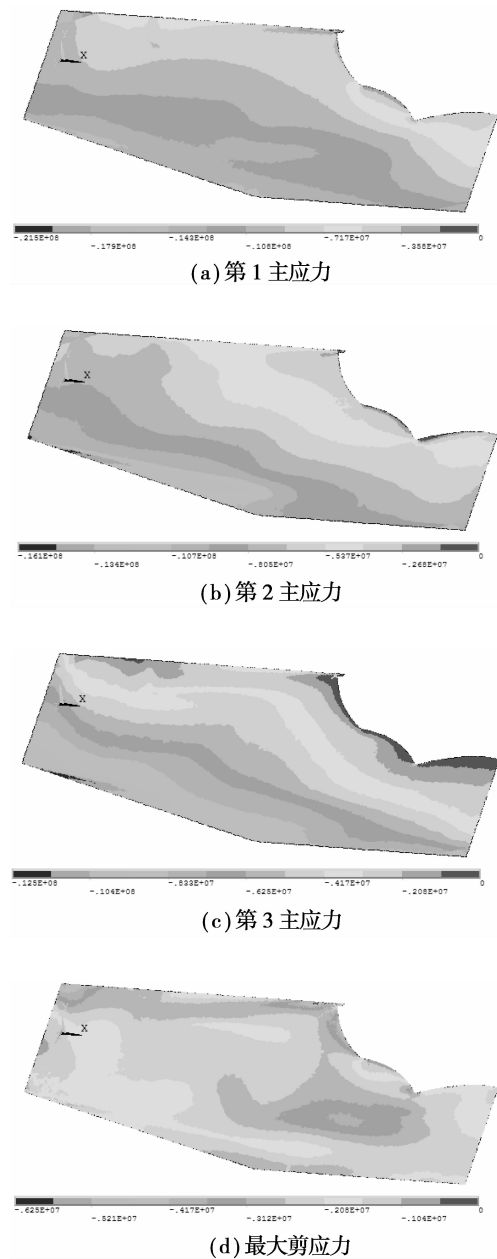


图9 K_1 煤层中的应力图(单位:Pa)

3 结论

1)通过建立三维计算模型,采用有限元方法模拟矿区初始地应力场能够较好地获得矿区地应力场的三维分布规律,为进一步分析预测矿区煤与瓦斯突出的潜在危险性提供了参考,也可作为井巷设计与施工的依据。

2)计算表明,三汇一矿煤岩体处于复杂的三维压应力状态,矿区最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 主要为水平构造应力,中间主应力 σ_2 主要为自重应力,最大主应力的方向与区域内存在的地质构造运动密切相关。

3) 计算精度是数值模拟关心的问题,合理建立三维地质模型及确定边界条件等能使模拟结果更加接近于实际值。将地质模型建至地表,能够反映地形地貌对初始地应力场的影响。

4) 地应力场影响因素复杂,实地测点尚很难全面了解整个区域的地应力情况。在尽可能提高数值计算精度的基础上,所获得的研究成果只是反映三汇一矿地应力场分布的大体趋势。

参考文献:

- [1] 程卫民,王刚,周刚,等.煤与瓦斯突出后对防突风门破坏的数值模拟[J].重庆大学学报,2009,32(3):314-318.
CHENG WEI-MIN, WANG GANG, ZHOU GANG, et al. Numerical simulation of outburst prevention air door destruction by coal and gas outbursts[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3): 314-318.
- [2] 加卢什科 ИЯ.里沃夫-沃伦和顿巴斯煤田岩体应力的研究成果:地壳应力状态[M].国家地震局地震地质大队情报资料室,译.北京:地震出版社,1978.
- [3] 朱兴珊,徐凤银.论构造应力场及其演化对煤和瓦斯突出的主控作用[J].煤炭学报,1994,19(3):304-313.
ZHU XING-SHAN, XU FENG-YIN. The controlling effect of tectonic stress field and its evolution on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(3): 304-313.
- [4] 汪西海.煤和瓦斯突出与地应力之关系[J].地质力学学报,1997,3(1):88-94.
WANG XI-HAI. A study on the relation between rock stress and outbursts[J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3(1): 88-94.
- [5] 张宏伟.地质动力区划方法在煤与瓦斯突出区域预测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):621-624.
ZHANG HONG-WEI. Application of geodynamic division method in prediction of coal and gas outburst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 621-624.
- [6] 韩军,张宏伟,宋卫华,等.煤与瓦斯突出矿区地应力场研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3852-3859.
HAN JUN, ZHANG HONG-WEI, SONG WEI-HUA, et al. In-situ stress field of coal and gas outburst mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3852-3859.
- [7] 罗康成.地应力场对煤与瓦斯突出的控制作用[J].煤炭工程,2009,8:95-97.
- [8] 张延新,蔡美峰,王克忠.平顶山一矿地应力分布特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23):4033-4037.
ZHANG YAN-XIN, CAI MING-FENG, WANG KE-ZHONG. Study on distribution characteristics of in-situ stresses for Ping Ding Shan No. 1 mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4033-4037.
- [9] 康红普,姜铁明,张晓,等.晋城矿区地应力场研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):1-8.
KANG HONG-PU, JIANG TIE-MING, ZHANG XIAO, et al. Research on in-situ stress field in Jinchuan mining area and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 1-8.
- [10] MCKINNON S D. Analysis of stress measurements using a numerical model methodology[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(5): 699-709.
- [11] 杨强,程勇刚,张浩.基于格构模型的岩石类材料开裂数值模拟[J].工程力学,2003,20(1):117-121.
YANG QIANG, CHENG YONG-GANG, ZHANG HAO. Simulation of cracking processes of rock materials by lattice model[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 117-121.
- [12] SU S. Effect of fractures on in situ stresses studied by the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41(1): 159-164.
- [13] 张延新,蔡美峰,王克忠.三维初始地应力场计算方法与工程应用[J].北京科技大学学报,2005,27(5):520-523.
ZHANG YAN-XIN, CAI MING-FENG, WANG KE-ZHONG. Algorithm of in-situ stress field and its application[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(5): 520-523.
- [14] 马淑芝,贾洪彪,易顺民,等.罗湖断裂带地应力场三维有限元模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3898-3903.
MA SHU-ZHI, JIA HONG-BIAO, YI SHUN-MING, et al. Analysis of geostress field simulation in Luohu fault zone with 3D finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup. 2): 3898-3903.
- [15] MATSUKI K, NAKAMA S, SATO T. Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(4): 467-652.
- [16] 张天模.天府三汇一矿煤与瓦斯突出差异分析及处理措施[J].重庆职业技术学院学报,2006,15(4):140-142.
ZHANG TIAN-MO. Analysis of the differences and countermeasures for the large amount of coal and gas in Sanhui Tianfu mining area[J]. Journal of Chongqing Vocational & Technical Institute, 2006, 15(4): 140-142.
- [17] 李东旭,周济元.地质力学导论[M].北京:地质出版社,1986.
- [18] 张波,盛和太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [19] 刘建华,朱维申,李术才.岩土介质三维快速拉格朗日数值分析方法研究[J].岩土力学,2006,27(4):525-529.
LIU JIAN-HUA, ZHU WEI-SHEN, LI SHU-CAI. Study on fast lagrangian numerical analysis method for

- rock and soil medium in 3 dimensions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 525-529.
- [20] 程立朝,陆庭侃. 膨胀特性对软岩巷道围岩变形规律的影响研究[J]. *河南理工大学学报*, 2006, 25(6): 461-464.
CHENG LI-CHAO, LU TING-KAN. Research on the effect of dilatancy characteristics to the law of surrounding ground deformation in soft rock roadway[J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2006, 25(6): 461-464.
- [21] 魏福生,胡国忠,王宏图,等. 永川煤矿地应力测试及地应力变化特征[J]. *矿业安全与环保*, 2007, 34(4): 1-3.
WEI FU-SHENG, HU GUO-ZHONG, WANG HONG-TU, et al. Measurement and variation characteristics of strata stress in Yongchuan coal mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2007, 34(4): 1-3.
- [22] 苏生瑞,朱合华,王士天,等. 岩石物理力学性质对断裂附近地应力场的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(3): 370-377.
SU SHENG-RUI, ZHU HE-HUA, WANG SHI-TIAN, et al. Effect of physical and mechanical properties of rocks on stress field in the vicinity of fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(3): 370-377.

(编辑 赵静)

(上接第104页)

参考文献:

- [1] EKWEBELAM C, SEE H. Microstructure investigation of the yielding behaviour of bidisperse magnetorheological fluids[J]. *Rheol Acta*, 2009, 48(1): 19-32.
- [2] KEAVENY E E, MAXEY M R. Modeling the magnetic interactions between paramagnetic beads in magnetorheological fluids[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(22): 9554-9571.
- [3] CAO J G, HUANG J P, ZHOU L W. Structure of electrorheological fluids under an electric field and a shear flow: experiment and computer simulation[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(24): 11635-11639.
- [4] MURASHOV V V, PATEY G N. Structure formation in dipolar fluids driven by rotating fields[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2000, 112(22): 9828-9833.
- [5] 方生,张培强. 旋转磁场作用下磁流变液颗粒运动及结构演化的模拟[J]. *化学物理学报*, 2001, 14(5): 562-566.
FANG SHENG, ZHANG PEI-QIANG. Simulation of the structure and the dynamics of the particles of MR fluids in rotating magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2001, 14(5): 562-566.
- [6] MELLE S, CALEDERON O G, RUBIO M A, et al. Rotational dynamics in dipolar colloidal suspensions: video microscopy experiments and simulations results[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2002, 102(2): 135-148.
- [7] 杨仕清,龚捷,张万里,等. 磁流变智能液场致微结构变化的 Monte Carlo 模拟[J]. *原子与分子物理学报*, 1998, 15(3): 411-415.
YANG SHI-QING, GONG JIE, ZHANG WAN-LI, et al. Monte Carlo simulations to influence of magnetic field strength on aggregate structure of ferromagnetic particles in magnetorheological fluids[J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1998, 15(3): 411-415.
- [8] LI H, PENG X, CHEN W. A micro-to-macroscopic analysis for the yield stress of magnetorheological fluids[C]// *International Conference on Heterogeneous Materials Mechanics*, Jun 21-26, 2004, Chongqing, China. Chongqing: Chongqing University Press, 2004: 276-280.
- [9] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社, 2000.
- [10] MELLE S, CALEDERON O G, FULLER G G, et al. Polarizable particle aggregation under rotating magnetic fields using scattering dichroism[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 247(1): 200-209.
- [11] 李敬生,王成刚. 金属超细微颗粒簇团形貌特征的模拟研究[J]. *有色金属*, 1998, 50(1): 80-83.
LI JING-SHENG, WANG CHENG-GANG. Simulated study on appearance characteristics of superfine metallic particles[J]. *Nonferrous Metals*, 1998, 50(1): 80-83.
- [12] 柴伟文,曹黎侠. 多维 δ 函数及其物理应用[J]. *西安工业学院学报*, 2006, 26(2): 175-178.
CHAI WEI-WEN, CAO LI-XIA. Multi-dimensional δ function and its physical application[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2006, 26(2): 175-178.
- [13] SHEN M, CAO J G, ZHU H T, et al. Van Der Waals interaction in colloidal giant electrorheological systems[C]// *The 9th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Aug 29-Sep 3, 2004, Beijing, China. Beijing: World Scientific, 2005: 156-162.
- [14] LI H, PENG X, CHEN W. Simulation of the chain-formation process in magnetic fields[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(7/8): 653-658.
- [15] 李德才. 磁性液体理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [16] 魏育新. 金原子纳米团簇反常尺寸效应的分子动力学模拟研究[D]. 重庆:重庆大学数理学院, 2002.
- [17] 李海涛,彭向和,黄尚廉. 基于偶极子理论的磁流变液链化机理模拟研究[J]. *功能材料*, 2008, 39(6): 902-904.
LI HAI-TAO, PENG XIANG-HE, HUANG SHANG-LIAN. Study on the chain-formation mechanism of magnetorheological fluids based on dipole theory[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(6): 902-904.

(编辑 赵静)