

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2021.01.014

红透山铜矿区 F_8 断层构造应力场的有限元数值模拟

张宝一¹, 刘肖莉^{1,2}, 蒙菲¹, 李雪峰³,
佟勇强^{1,2}, 王丽芳^{1,2}, 吴湘滨¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 武汉智博创享科技股份有限公司, 武汉 430074;
3. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150094)

摘要: 针对断层对周围岩石地层影响的问题, 本文提出了一种有限元算法计算模拟该断层对周围地层产生的应力场和位移场。首先, 根据最大主应力、中间主应力和最小主应力来研究正断层、逆断层以及走滑断层的应力状态; 其次, 基于弹性力学相关理论研究应力—应变关系, 采用线性四面体单元有限元分析方法进行算法实现; 最后, 在考虑到断层两侧岩体的物理性质(弹性模量和泊松比)、断层几何形态以及边界条件等情况下, 应用有限元法模拟正断层、逆断层以及走滑断层在层状岩体中产生的应力场和位移场。以红透山铜矿区 F_8 断层为例, 通过地质勘探获得的资料判别该断层性质及其周围地层属性, 使用本文构建的有限元算法模拟了该断层对周围地层产生的应力场和位移场。

关键词: 红透山铜矿; 断层; 有限元法; 位移场; 应力场; 辽宁省

中图分类号: P548; P628.3 **文献标识码:** A

0 引言

可视化是地学研究中的一项重要技术, 是应用图形图像技术及科学计算可视化技术来构建三维地质模型、研究实际的地质构造和地质现象^[1]。断层是一类特殊的地质构造, 是岩层或岩体发生破裂并沿着其破裂面发生明显位移的地质现象。断层将连续的地层和岩体错断成破裂状态, 不同应力大小作用在不同类型岩石上, 会产生大小不等、规模不同、形态多样的断层。根据原始数据的类型以及断层构造的特征, 可以采用不同的断层三维地质建模方法。

传统三维地质建模过程中, 将断层作为地质空间中的三维曲面, 采用空间插值的方法构建断层面模型^[2-4]; 为了准确表达断层的三维结构特征, 也可使用三维体素模型来进行断层带构建, 如八叉树模型^[5-7]、四面体模型^[8-10]、三棱柱模型^[11-14], 或者通过封闭表面的形式来构建断层体模型^[15-17]。Calcagno等将地质插值与断层规则引入地层位势场建模中, 使用非连续场插值方法完成断层场的构建^[18]。通过三维断层模型来定量表达断裂产状变化、厚度变化、物性差异及地形起伏变化等影响断裂构造应力场的因素, 可使断裂构造应力场三维数值模拟结果更大程度地逼近实际地质情况。

断层的形成伴随着应力场和变形场的形成与发

收稿日期: 2020-09-14; 责任编辑: 沈名星

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41772348)资助。

作者简介: 张宝一(1979—), 男, 副教授, 博士, 2007年毕业于中国地质大学(武汉), 主要从事三维地质建模研究。通信地址: 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, 中南大学校本部地信院; 邮政编码: 410083; E-mail: zhangbaoyi@csu.edu.cn

通信作者: 王丽芳(1979—), 女, 工程师, 博士, 2018年毕业于中南大学, 主要从事地理信息系统应用工程研究。通信地址: 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, 中南大学校本部地信院; 邮政编码: 410083; E-mail: csuwlf@139.com

展。在构造应力场研究中,把与地质构造有关的应力状态的空间函数定义为应力场,即将应力状态随空间点的变化表示为场,构造运动通常是应力场所导致的,其性质和强度取决于构造的几何性质和作用力之间的组合关系^[19-20]。构造应力场研究在地学有很多应用,如内生金属矿床是受成矿同期活动的构造应力场控制,地震的孕育、发生和发展实质也是现今构造应力场中能量积累和释放的过程^[19]。基于断层的数学模型,使用数值模拟来研究地质构造变形是一种常用的分析方法,包括静态位错模型、有限元模型以及有限差分法和边界积分方程法^[21-22]。Steketee 首次将位错理论引入到地学中,将断裂的变形和错动视为一个矩形位错源来进行研究,并推导出 Poisson 体中垂直走滑点源位错引起的地表位移场表达式^[23]。但是,地质问题本质上是三维的,二维平面形式的构造应力场的分析难以反映构造应力场的三维特征及时空发展演化过程,有必要基于三维断层模型开展三维构造应力场分析^[24-25]。

从物理学的观点来看,某物理量 f 在空间的一个区域 $D(D \in R^3)$ 上分布,称为一个场,确定场的物理量 f 称为场量。根据场量 f 的性质,又分为标量场(如:温度、密度、势能等)、矢量场(如:引力场、电场、磁场等)和张量场(如:应力场等)。在地学分析应用中,断层场模型更易于与地球物理场、地球化学场相耦合^[26-33],借助 FLAC(3D)、TOUGHREACT、ANSYS 等软件,场模型也更易于与有限元等数值模拟方法相结合,将数值模拟建立在三维地质模型的基础上,从而提高数值模拟的精度和结果的准确性^[34-37],使得三维地质模型能够发挥更大的作用。

作为一种能够有效进行偏微分计算的数值分析方法,有限元法对应力和位移的计算发挥了重大作用。有限元方法以其复杂几何构型适应性和各种物理问题适用性,被国内外学者广泛应用于地球动力学研究与断层体系模拟中,并取得大量的成果^[38-45]。采用静力弹性有限元数值分析方法,可对正断层位错量影响下隧道的受力变形特征以及破坏形式进行分析^[46];采用拉张破坏有限元程序,可模拟雁列式断层这一典型断层构造形式的构造破坏过程^[47];采用断层摩擦接触非线性有限元模拟方法、劈节点有限元法等模拟 Y 型、I 型、十型等几种典型的复合断层形式,可分析其相互作用产生的位移场和应变场为地震预测提供依据^[48-50]。采用空间有限元方法来计算断层影响周围地层产生的应力场和

位移场,实现断层影响周围岩体活动的定量研究,能精确地反应断层的活动过程,能在实际工程建设与矿产开采中发挥关键作用。

本文基于有限元方法,对断层引发的三维形变进行力学模拟与分析,分析正断层、逆断层以及走滑断层非均质地层中的应力状态,使用三维空间有限元法构建断层应力状态的应力场与位移场模型,对该结果进行解释与分析来验证其物理规律;并以红透山铜矿区 F₈ 断层为例,通过地质勘探资料获得断层性质及其周围地层属性,采用构建的有限元算法计算模拟了该断层对周围地层产生的应力场和位移场。

1 有限元结构分析

对于结构分析相关的问题来说位移法进行数值计算更为简便,所以大多数的有限元分析方法都是以位移量作为未知量求解的。本文基于位移法的有限元方法进行数值计算,构建断层面的位移模型和应力场模型,主要有三个步骤:①结构离散;②单元分析;③整体分析。

1.1 结构离散

首先需要选择合适的能够完整表达连续体形状的单元类型。将单元划分为一维、二维和三维单元或者线性、二次和三次单元等多种形式。图 1 显示了由 4 个节点组成的四面体结构单元,图中包含节点以及节点位移的信息,每个节点有 3 个位移分量,即有 3 个自由度(DOF: Degree of Freedom),一个单元所有节点的自由度总和为单元自由度,四面体结构单元是拥有 12 个自由度的空间有限单元。本文主要选取四面体单元作为有限元分析方法的基本单元。

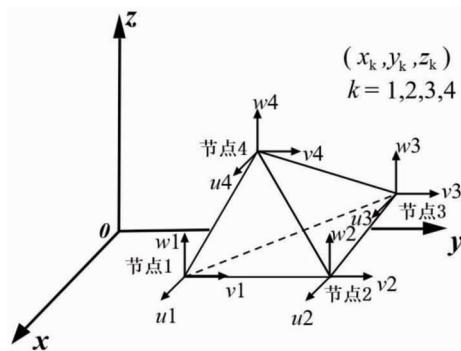


图 1 四面体单元

Fig. 1 Tetrahedral element

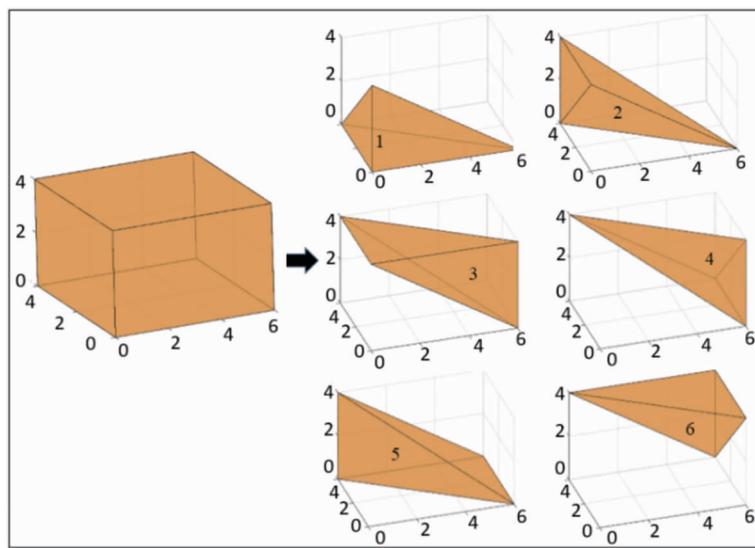


图 2 简单立方体的四面体剖分

Fig. 2 Tetrahedron division of a cube

表 1 节点编号

Table 1 The number of node

| 节点编号 | <i>x</i> 坐标 | <i>y</i> 坐标 | <i>z</i> 坐标 |
|------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 6 | 0 | 0 |
| 3 | 6 | 4 | 0 |
| 4 | 0 | 4 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 4 |
| 6 | 6 | 0 | 4 |
| 7 | 6 | 4 | 4 |
| 8 | 0 | 4 | 4 |

表 2 单元编号
Table 2 The number of unit

| 单元编号 | 节点编号 <i>i</i> | 节点编号 <i>j</i> | 节点编号 <i>m</i> | 节点编号 <i>n</i> |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 5 | 1 | 4 | 2 |
| 2 | 8 | 5 | 4 | 2 |
| 3 | 8 | 6 | 5 | 2 |
| 4 | 8 | 3 | 6 | 2 |
| 5 | 8 | 4 | 3 | 2 |
| 6 | 8 | 7 | 6 | 3 |

将所有单元和节点按照一定顺序进行编号,为了保证四面体每个单元体积的非负性,单元节点的编号必须满足右手坐标系的顺序。然后将每个单元所受的载荷按照静力等效原理分配到节点上,并在受到约束的节点上根据具体情况设置约束条件。采用有限元法剖分实现时,首先对结构体进行规则格网的简单立方体剖分,再把简单立方体进行四面体剖分得到 6 个单元(图 2),表 1 和表 2 给出了节点与其对应坐标的相关信息、单元编号和节点编号。

1.2 单元分析

弹性力学的单元分析就是以独立的单元为研究对象,建立每个单元节点位移(未知量)和节点力(已知量)之间对应的关系式。

单元分析的主要步骤为:

①节点位移,建立单元的位移函数,假设位移函数为线性函数。以四面体单元为例,构建其节点位移、位移模式分别为:

$$\{q\}^e = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & u_2 & v_2 & w_2 & u_3 & v_3 \\ w_3 & u_4 & v_4 & w_4 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} u = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z \\ v = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 z \\ w = a_8 + a_9 x + a_{10} y + a_{11} z \end{array} \right\} \quad (2)$$

将单元的 4 个节点的位移分量和坐标值分别代入公式(2),即可求得待定系数 a_0, a_1, \dots, a_{11} ,将其代入式(3)中,经过整理并将单元位移表达为矩阵形式(4):

$$\{d\} = \{u \ v \ w\}^T \quad (3)$$

$$\{d\} = [N] \{q\}^e \quad (4)$$

式(4)中, $[N]$ 为形函数矩阵,其表达为 $[N] = [N_1 \ I \ N_2 \ I \ N_3 \ I \ N_4 \ I]$, I 为三阶单位矩阵, N_1, N_2, N_3, N_4 均为形函数。形函数表达式为:

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z), \quad i=1,2,3,4 \quad (5)$$

式(5)中, V 为四面体的体积,并且必须考虑体积的非负性,单元的 4 个节点必须按照右手坐标系的顺序编号, a_i, b_i, c_i, d_i 为与节点几何位置相关的系数。

②由几何方程可以构建单元内各节点的位移和单元应变之间的关系,如式(6)所示:

$$\{\varepsilon\} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ v_{xy} \\ v_{yz} \\ v_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$= [B]\{q\}^e = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]\{q\}^e \quad (6)$$

式(6)中[B]为常量矩阵,其中的 B_i 为:

$$B_i = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ 0 & d_i & c_i \\ d_i & 0 & b_i \end{bmatrix}, i=(1,2,3,4) \quad (7)$$

应用弹性力学空间问题的物理方程得到应力场的表达:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{q\}^e = [S]\{q\}^e$$

$$= [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]\{q\}^e \quad (8)$$

在式(8)中,

$$D = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix},$$

E 为弹性模量, μ 为泊松比, $[S]$ 为应力矩阵。

③由虚位移理论可以得到单元刚度矩阵的表达式:

$$[k]^e = \iiint_V [B]^T [D] [B] dx dy dz = [B]^T [D] [B] V \quad (9)$$

④经单元分析可以获得描述单元特性方程,表达为:

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (10)$$

式(10)中, $\{f\}$ 为单元结点力矢量, $[k]$ 为单元刚度矩阵, $\{d\}$ 为节点位移矢量。

1.3 整体分析

整体分析是将单元集成离散的结构体,保持结构体的物理性质不变。整体刚度矩阵集成主要是按照单元编号的顺序将单元刚度矩阵组合成更高阶数的矩阵。将每个单元特性方程叠加,形成总体平衡方程:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (11)$$

式(11)中, $\{F\}$ 、 $[K]$ 与 $\{U\}$ 分别表示整体结构的节点载荷矢量,整体刚度矩阵以及整体节点位移。

引入边界条件主要是根据弹性力学中位移边界条件和应力边界条件设置各自的边界矩阵。边界条件确定之后,根据总体平衡方程利用分解法和高斯消去法求解方程组,求出每个单元的应力矢量:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (12)$$

式(12)中, $\{\sigma\}$ 、 $\{d\}$ 分别为单元应力矢量和单元结点位移矢量。

有限元在单元划分时可以根据结构的复杂程度设定不同精度的单元结构,边界处理只需要使用满足边界条件的单元节点进行计算,并且可以方便地用于处理各向同性、各向异性以及复合材料的分析中。

2 断层应力场模拟

地质体的形态往往不是均质的,可将复杂地质体分层表示,模拟断层对层状地质体的应力应变影响分析。对于层状地质体的属性区分是使用不同的弹性模量和泊松比来完成,岩石的静态弹性性质与这两个参数相关。

断层在层状地质体中的形态见图 3,表 3 为模拟层状地质体的相关物理参数。根据表 3 中模拟层状地质体的相关物理参数进行模拟计算,对安德森模式下的应力状态进行分析,在层状地质体中分别对正断层、逆断层和走滑断层的应力状态进行模拟并构建各自的位移场与应力场。

表 3 模拟层状地质体的基本参数

Table 3 Physical parameters of layered geological bodies

| 岩石类型 | 弹性模量/Pa | 泊松比 |
|------|---------|------|
| 中灰岩 | 2.406E4 | 0.18 |
| 中砂岩 | 2.578E4 | 0.1 |

表 4 正断层单侧参数设置

Table 4 The unilateral parameters of normal fault

| 断层厚度/m | x 方向压力/Pa | y 方向压力/Pa | z 方向压力/Pa | 截面数量 |
|--------|-----------|-----------|------------|------|
| 0.5 | 10~10 | 10~10 | 100~100000 | 30 |

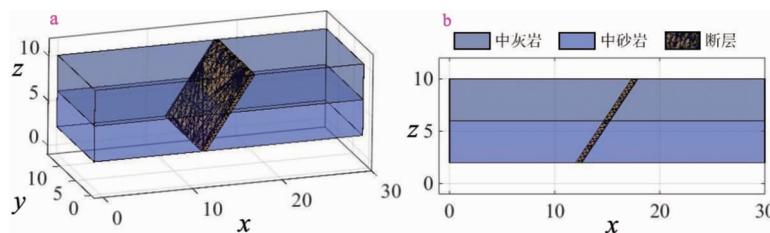


图 3 断层的体形态三维视图(a)、正视图(b)

Fig. 3 Fault shape (a) 3D view and (b) front view

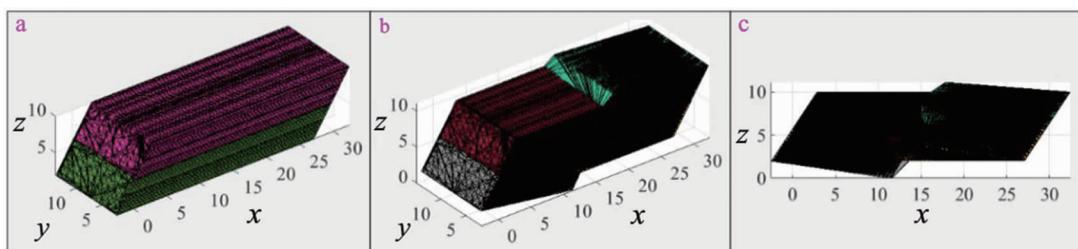


图 4 正断层形成过程层状岩体四面体(a)、结构四面体(b)、xoz 平面图(c)

Fig. 4 Formation process of normal fault including diagram tetrahedron of layered rock mass (a), structural tetrahedron (b) and xoz plane(c)

2.1 正断层

模拟层状地质体中正断层的给定参数见表 4, 按照有限元分析算法, 以正断层在简单地质体中的应力场的计算过程为基础, 计算其在层状地质体中的位移场和应力场。

正断层对层状地质体的影响满足上盘相对下降、上盘相对上升的特点(图 4)。在距离断层线越近的地方位移量越大, 越远位移越小, 并且在图中分层介质的分层面上产生较大的位移量(图 5)。相比 x 和 y 方向上计算得到的应力, 正断层在 z 方向上会产生较大量级的应力, 这说明正断层的形成过程主要

是由在 z 方向上的最大主应力决定的(图 6)。

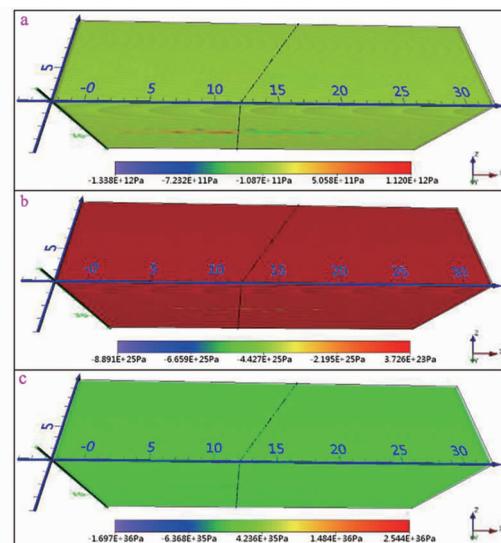


图 6 正断层应力场 x 方向主应力分布(a)、y 方向主应力分布(b)、z 方向主应力分布(c)

Fig. 6 Stress field of normal fault with the principal stress distribution in x-direction (a), the principal stress distribution in y-direction (b) and the principal stress distribution in z-direction(c)

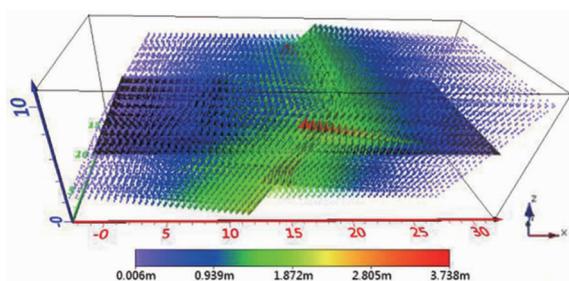


图 5 正断层位移场

Fig. 5 Displacement field of normal fault

表 5 逆断层单侧参数设置

Table 5 Unilateral parameters of reverse fault

| 断层厚度/m | x 方向压力/Pa | y 方向压力/Pa | z 方向压力/Pa | 截面数量 |
|--------|-----------|-----------|------------|------|
| 0.5 | 10~10 | 10~10 | 100~100000 | 30 |

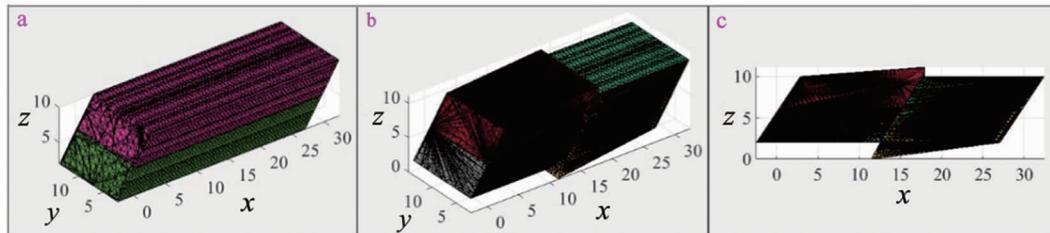


图 7 逆断层形成过程层状岩体四面体(a)、结构四面体(b)、xoz 平面图(c)

Fig. 7 Formation process of reverse fault including tetrahedron of layered rock mass (a), structural tetrahedron(b) and xoz plane (c)

2.2 逆断层

模拟层状地质体中逆断层的给定参数见表 5,按照有限元分析算法,以逆断层在简单地质体中的应力场的计算过程为基础,计算其在层状地质体中的位移场和应力场。

逆断层在层状地质体中的形成仍然满足上盘相对上升、下盘相对下降的特点(图 7)。在距离断层线越近的地方位移量较大,越远位移越小,并且在图中分层介质的分层面上产生较大的位移量图 8。相比 x 和 y 方向上计算得到的应力,逆断层在 z 方向上会产生较大量级的应力,这说明逆断层的形成过程主要是由在 z 方向上的最大主应力决定的(图 9)。

2.3 走滑断层

模拟层状地质体中走滑断层的参数见表 6,按照有限元分析算法,以走滑断层在简单地质体中的应力场的计算过程为基础,计算其在层状地质体中的位移场和应力场。

走滑断层在层状地质体中的形成满足两盘在水平方向上产生相对错动的形态(图 10)。逆断层产

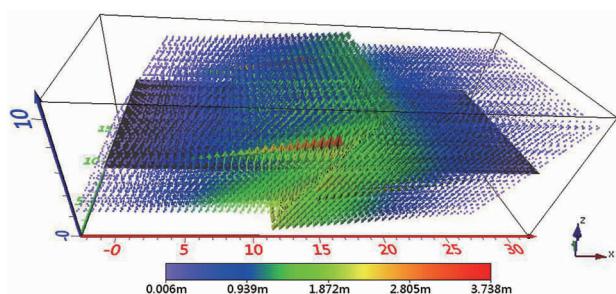


图 8 逆断层位移场

Fig. 8 Displacement field of reverse fault

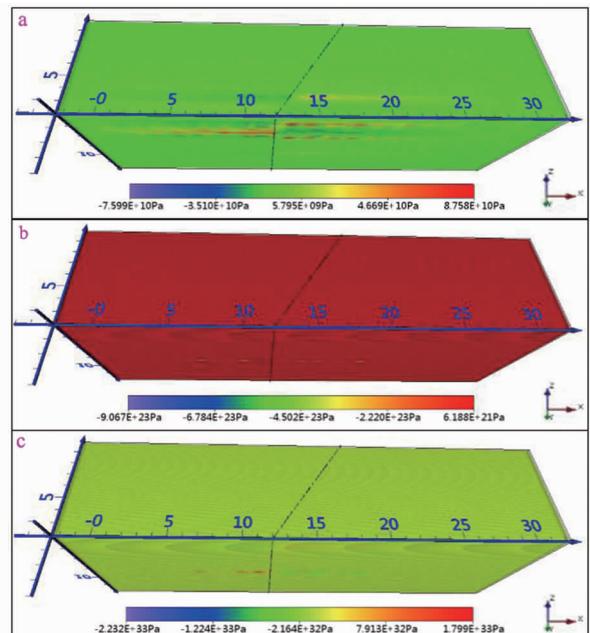
图 9 逆断层应力场 x 方向主应力分布(a)、 y 方向主应力分布(b)、 z 方向主应力分布(c)

Fig. 9 Stress field of reverse fault including the principal stress distribution in x -direction (a), the principal stress distribution in y -direction(b), and the principal stress distribution in z -direction(c)

生的位移场,在距离断层线越近的地方位移量较大,越远位移越小,并且在图中分层介质的分层面上产生较大的位移量(图 11)。在 x 和 y 方向上比在 z 方向上会产生较大量级的应力,这说明逆断层的形成过程主要是由在水平方向上的力来决定的,其错动的方向也与水平方向上两个力的大小来决定(图 12)。

表 6 走滑断层单侧参数设置

Table 6 Unilateral parameter of strike-slip fault

| 断层厚度/m | x 方向压力/Pa | y 方向压力/Pa | z 方向压力/Pa | 截面数量 |
|--------|-----------|------------|------------|------|
| 0.5 | 10~100 | 100~100000 | 100~100000 | 30 |

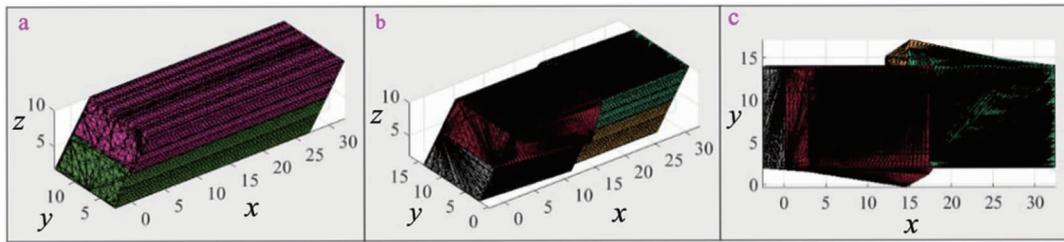


图 10 走滑断层形成过程层状岩体四面体(a)、结构四面体(b)、xoz 平面图(c)

Fig. 10 Formation process of strike-slip fault including tetrahedron of layered rock (a), structural tetrahedron (b) and xoz plane(c)

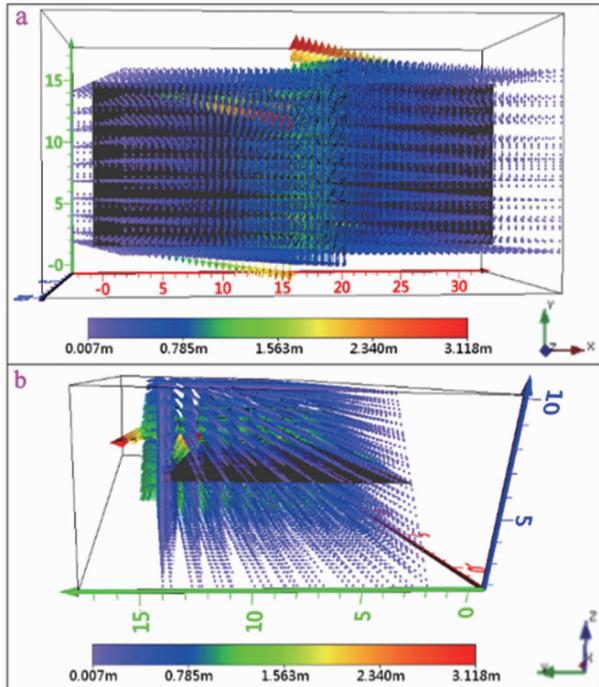


图 11 走滑断层位移场俯视图(a)、侧视图(b)

Fig. 11 Displacement field of strike-slip fault including 3D view (a) and side view (b)

3 研究实例

红透山铜矿区隶属辽宁省抚顺市清原县, 地理坐标 $E124^{\circ}25'15''-124^{\circ}40'15''$ 、 $N41^{\circ}59'30''-42^{\circ}08'45''$ 。根据工作区内地质、矿产、化探等各类资料, 红透山矿区内广泛分布着太古代绿岩带地层, 具有“三

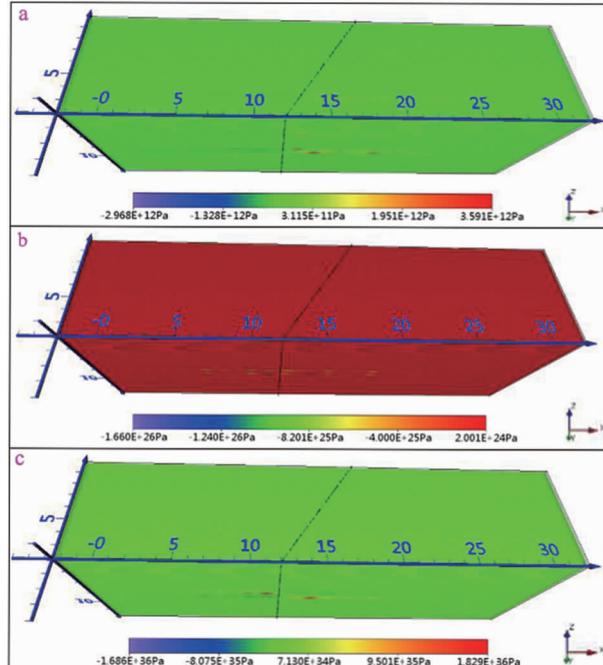
图 12 走滑断层应力场 x 方向主应力分布(a)、 y 方向主应力分布(b)、 z 方向主应力分布(c)

Fig. 12 Stress field of strike-slip fault including the principal stress distribution in x -direction (a), the principal stress distribution in y -direction(b), and the principal stress distribution in z -direction(c)

位一体”的地层层序, 自上而下分为石棚子组、红透山组和南天门组。其中, 石棚子组以斜长角闪岩、辉石角闪岩为主, 少量的浅粒岩及黑云变粒岩夹层。红透山组是由黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩组成的薄层互层带。该组属钙碱性火山岩建造, 以拉斑玄武岩、英安质火山岩和凝灰岩薄层互层为主, 夹少量

黏土质岩,主要发育在浑北地区,其次在浑南通什村地区。南天门组是以副变质为主的黑云变粒岩、二云石英片岩、角闪变粒岩、磁铁石英岩、石英岩及大理岩。根据以上地层信息,对不同地层岩石的弹性模量和泊松比进行参数设置,参数设置情况见表 7。

红透山矿区 F₈ 断裂构造对周围矿体产生了破坏作用,并且该断层是经过多次错动形成的,将整个矿床分为了东、西两段。参照 2009 年红透山矿床—827 m—407 m 中段地质平面图,可以测量得到每个中段平面图上 F₈ 断裂产生的水平位移,由中段平面图可以得到地层分布信息。图 13 为红透山矿床—767 m 中段地质平面图,可以看到 F₈ 断层附近的地层信息。其中矿床大致包含 7 个地层组合,按照纵向深度依次编号为 SH1—SH7,各地层的岩性在图 13 中也可直接获得,整理以上数据得到红透山矿床地层信息见表 8。地层 SH1、SH3 和 SH5 的岩性一致,SH2 和 SH6 岩性一致,这是由于红透山矿床主要控矿构造为褶皱控矿,地质褶皱构造会将地层对折而形成此种现象。另外在观察图 13 中的地层错断,该断层线两侧地层中下降的一盘呈下降趋

势,另一盘呈上升趋势,由此可断定该断层为逆断层。

本次研究以构造有限元算法为基础,根据表 7 地层分类以及各个地层的水平错动距离设置载荷量,在表 8 中给出各个地层载荷分别在 x、y、z 方向上的加载情形。采用本文构建的空间四面体有限元算法计算 F₈ 断裂对周围地层产生的应力场及位移场。

表 7 地层岩石物理参数

Table 7 Physical parameters of the rock masses

| 岩石类型 | 弹性模量/Pa | 泊松比 |
|-----------|----------|------|
| 黑云斜长片麻岩 | 1.4043E4 | 0.20 |
| 角闪斜长片麻岩 | 3.4043E4 | 0.25 |
| 矽线黑云石英片麻岩 | 4.5125E4 | 0.30 |
| 石榴黑云斜长片麻岩 | 5.5125E4 | 0.34 |

F₈ 断裂对周围矿体有破坏作用,该断裂过程是属于上盘上升下盘下降的情形,满足逆断层的特点(图 14)。从位移图(图 15)中可以看到在每个地层分界处的位移量呈现出跳跃式的变化,这是因为不

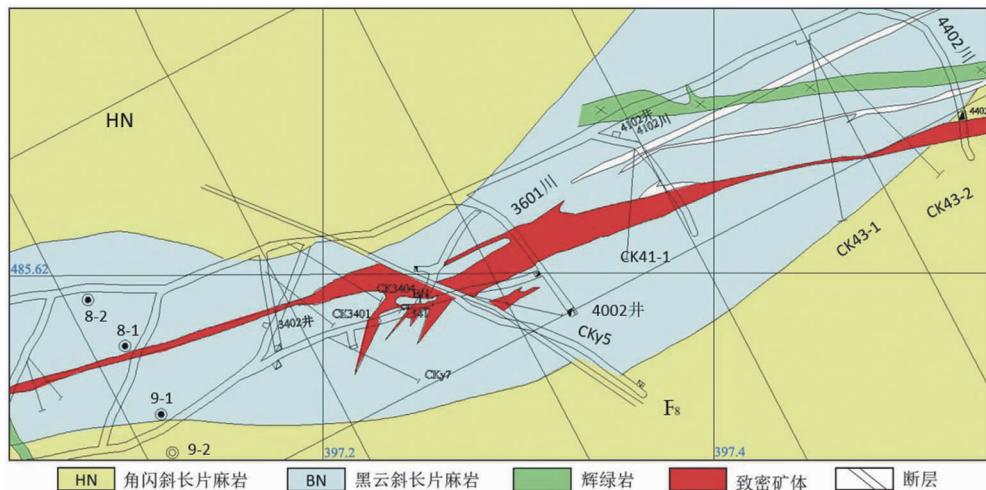


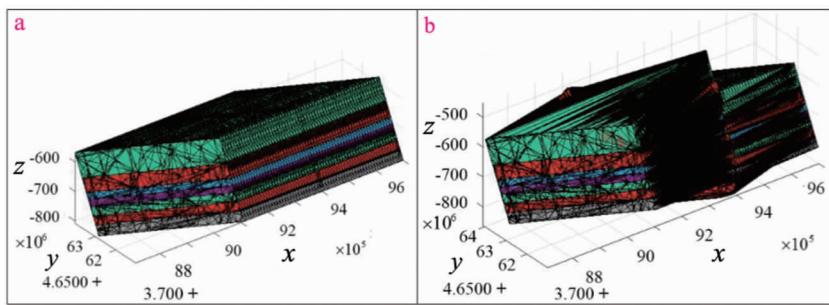
图 13 红透山矿床—767 m 中段地质平面图

Fig. 13 Section geological map of level —767 meter in the Hongtoushan deposit

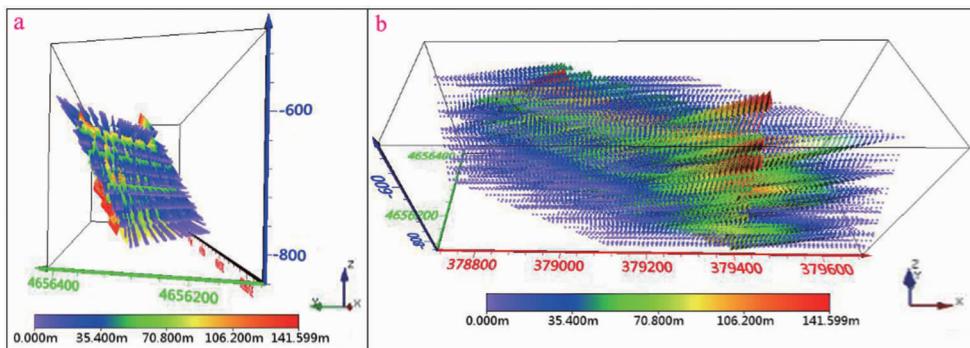
表 8 红透山矿床地层参数信息

Table 8 Stratigraphic parameters of Hongtoushan deposit

| 地层编号 | 岩性 | 水平平均错断距离/m | x 方向压力/Pa | y 方向压力/Pa | z 方向压力/Pa | 截面数量 |
|------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------|------|
| SH1 | 黑云斜长片麻岩 | 38 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 4.6e7 | 30 |
| SH2 | 角闪斜长片麻岩 | 38 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 1.5e8 | 30 |
| SH3 | 黑云斜长片麻岩 | 21 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 2e7 | 30 |
| SH4 | 矽线黑云石英片麻岩 | 21 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 1.49e7 | 30 |
| SH5 | 黑云斜长片麻岩 | 21 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 10e6 | 30 |
| SH6 | 角闪斜长片麻岩 | 24 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 7e7 | 30 |
| SH7 | 石榴黑云斜长片麻岩 | 18 | 100 ~ 100 | 100 ~ 100 | 100 ~ 1.5e7 | 30 |

图 14 红透山铜矿区 F_8 逆断层形成过程Fig. 14 Formation process of F_8 normal fault in the Hongtoushan copper mine

a. 原始地质体四面体; b. 逆断层四面体

图 15 F_8 断层位移场侧视图(a)、三维显示图(b)Fig. 15 Displacement field F_8 fault, side view (a) and 3D view (b)

同岩性的地层有各自对应的破裂受力临界点。并且在同一平面上在断层线周围的位移量以距离断层线越远位移量越小的趋势变化。在切片图(图 16)中可以看到内部应力分布的状态,其中可以明显看到在断层两侧的对应位置应力状态基本呈现大小一致方向相反的情形;并且对比三个方向上的应力图可以看到,在纵向 z 方向上的应力分布明显高于其他两个方向上的应力,这是因为在安德森模式下的逆断层形成机制主要是由于在纵向上当最小主应力逐渐减小时,才会形成逆断层。

4 结论

本文基于三维断层模型,利用有限元算法,实现断层模型对周围地层位移场和应力场影响的模拟。在加载均匀分布载荷的基础上,通过弹性模量和泊松比来定义非均质岩体,并构建实验数据模拟单一断层在非均质地层中的位移场和应力场以验证有限元算法的正确性,最后以红透山 F_8 断裂为实例数据将该算法应用于地质研究中。取得的主要成果和认

识如下:

(1)提出了一种有限元数值模拟算法,选取四面体单元作为有限元分析方法的基本单元,将每个单元所受的载荷按照静力等效原理分配到节点上,根据弹性力学原理建立单元节点位移和节点力之间的关系式,将单元集成离散的结构体,计算单元的应力矢量和位移矢量;

(2)以三维断层模型为基础,通过层状地层中正断层、逆断层以及走滑断层的实验数据,以弹性模量和泊松比来定义岩体的层状特性,采用有限元数值模拟算法,分别施加边界载荷来模拟计算断层在非均质空间中的应力场与位移场,验证了其方法的可靠性;

(3)将本文算法应用于红透山 F_8 断裂,参照该矿区地质平面中段图等勘探资料判别其断层性质,采用有限元数值模拟算法施加边界载荷,模拟该断裂对周围矿体的位移场和应力场,模拟结果显示红透山铜矿区 F_8 断层产生的活动过程以及 F_8 断裂对周围矿体产生的破坏作用;

(4)本文算法能够实现断层影响周围岩体活动的定量研究,较为真实地反映特定区域的地质构造

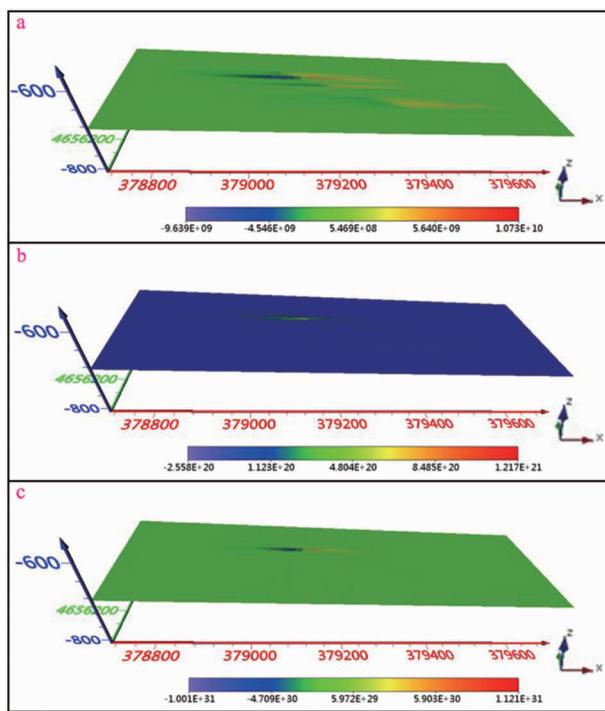


图 16 F_8 断层应力场主应力—700 m 切片
x 方向(a)、y 方向(b)、z 方向(c)

Fig. 16 Principal stress field section of F_8 fault at level
—700 m slice the principal stress distribution
in x direction(a), y direction(b) and z direction (c)

现象,适用于各种地球动力学研究与断层体系模拟问题,可以为后续实际工程建设与矿产开采提供决策支持。

致谢:红透山矿业有限公司石长岩副总经理、辽宁有色地质局 101 队地勘院杨铁军副院长在资料收集、坑道调查工作中给予了大力协助,国家地理信息系统工程技术研究中心与中南大学共建“MAPGIS 实验室”为本研究工作提供了 MAPGIS 软件,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] Houlding S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [2] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(5): 547–555.
- [3] Caumon G, Lepage F, Sword C H, et al. Building and Editing a Sealed Geological Model [J]. Mathematical Geology, 2004, 36(4): 405–424.
- [4] 王诏, 刘展, 安聪荣, 等. 基于剖面的三维断层建模方法[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2015, 30(6): 51–54+61.
- [5] 李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 325–330.
- [6] 程朋根, 龚健雅. 地勘工程 3 维空间数据模型及其数据结构设计[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 74–81.
- [7] Braua J, Thieulot C, Fullsack P, et al. DOUAR: A new three-dimensional creeping flow numerical model for the solution of geological problems [J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2008, 171(1–4): 76–91.
- [8] Xue Y, Sun M, Ma A. On the reconstruction of three-dimensional complex geological objects using Delaunay triangulation [J]. Future Generation Computer Systems, 2004, 20(7): 1227–1234.
- [9] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration [J]. Computers and Geosciences, 2005, 31(1): 35–43.
- [10] 武强, 关文革, 贾丽萍, 等. 面向矿区复杂地质体的四面体生成算法[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 617–620.
- [11] 吴立新, 张瑞新, 戚宜欣, 等. 3 维地学模拟与虚拟矿山系统 [J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 28–33.
- [12] Gong J, Cheng P, Wang Y. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering [J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(4): 391–404.
- [13] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(4): 405–418.
- [14] 程朋根, 刘学斌, 史文中, 等. 一种基于似三棱柱体元的地质三维建模方法研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2004, 27(1): 73–79.
- [15] Moore R R, Johnson S E. Three-dimensional reconstruction and modelling of complexly folded surfaces using Mathematica [J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(4): 401–418.
- [16] 周军霞, 杨钦, 蔡强. 离散光滑插值方法在多值曲面中的应用[J]. 微计算机信息, 2008, 24(30): 191–192.
- [17] 何赵云, 李章林, 张夏林. 含断层地质体三维建模技术[J]. 软件导刊, 2010, 9(8): 175–178.
- [18] Calcagno P, Chilès J P, Courrioux G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge—Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules [J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 2011, 171(1): 147–157.
- [19] 王成金, 梁一鸿. 全球构造应力场理论与应用[M]. 长春: 长春出版社, 1994.
- [20] 宋惠珍, 薛世峰, 曾海容. 构造应力场与有限单元法[M]. 山东: 东营: 中国石油大学出版社, 2012.
- [21] Madariaga R, Olsen K B, Archuleta R J. Modeling dynamic rupture in a 3D earthquake fault model [J]. Translated World Seismology, 1999, 88(5): 1182–1197.
- [22] Mikumo T, Miyatake T. Dynamical rupture process on a three-dimensional fault with non-uniform frictions and near-field seismic waves [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010, 54(2): 417–438.

- [23] Steketee J A. On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium [J]. Canadian Journal of Physics, 1958, 36 (2): 192 - 205.
- [24] 陈连旺, 陆远忠, 郭若眉, 等. 华北地区断层运动与三维构造应力场的演化[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 349 - 361.
- [25] Walsh J J, Bailey W R, Childs C, et al. Formation of segmented normal faults: A 3-D perspective [J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(8): 1251 - 1262.
- [26] Martelet G, Calcagno P, Gumiaux C, Truffert C, et al. Integrated 3D geophysical and geological modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtoceaux area (south Brittany, France) [J]. Tectonophysics, 2004, 382(1 - 2): 117 - 128.
- [27] Guillen A, Calcagno P, Courrioux G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion [J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 2008, 171 (1 - 4): 158 - 169.
- [28] Jessell M W, Ailleres L, De Kemp E A. Towards an integrated inversion of geoscientific data: What price of geology? [J]. Tectonophysics, 2010, 490(3 - 4): 294 - 306.
- [29] 王功文, 张寿庭, 燕长海, 等. 基于地质与重磁数据集成的栾川钼多金属矿区三维地质建模[J]. 地球科学, 2011, 36 (2): 360 - 366.
- [30] 杨莉, 张宝一. 几种梯度场计算的数值算法及其地学应用 [J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(2): 306 - 311.
- [31] 张宝一, 陈伊始, 黄岸炼, 等. 地球化学场及其在隐伏矿体三维预测中的作用[J]. 岩石学报, 2018, 34(2): 352 - 362.
- [32] Wang L F, Wu X B, Zhang B Y, et al. Recognition of Significant Surface Soil Geochemical Anomalies Via Weighted 3D Shortest-Distance Field of Subsurface Orebodies: A Case Study in the Hongtoushan Copper Mine, NE China [J]. Natural Resources Research, 2019, 28(3): 587 - 607.
- [33] 张宝一, 陆浩, 杨莉, 等. 顾及梯度的高斯混合模型在三维属性场空间聚类中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(3): 460 - 470.
- [34] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388 - 392.
- [35] Zhao C B, Hobbs B E, Ord A, et al. Numerical simulation of double-diffusion driven convective flow and rock alteration in three-dimensional fluid-saturated geological fault zones [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(19 - 22): 2816 - 2840.
- [36] Audigane P, Chiaberge C, Mathurin F, et al. A workflow for handling heterogeneous 3D models with the TOUGH2 family of codes: Applications to numerical modeling of CO₂ geological storage [J]. Computers and Geosciences, 2011, 37 (4): 610 - 620.
- [37] Muzik J, Vondrackova T, Sitanyiova D, et al. Creation of 3D Geological Models Using Interpolation Methods for Numerical Modelling [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 25 - 30.
- [38] Jungels P H, Frazier G A. Finite element analysis of the residual displacements for an earthquake rupture: Source parameters for the San Fernando earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1973, 78(23): 5062 - 5083.
- [39] 王仁, 何国琦, 殷有泉, 等. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, 1980(1): 34 - 44.
- [40] 汪素云, 陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 1980, 23(1): 35 - 45.
- [41] Melosh H J, Williams C A. Mechanics of graben formation in crustal rocks: A finite element analysis [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1989, 94 (B10): 13961 - 13973.
- [42] 陈连旺, 陆远忠, 张杰, 等. 华北地区三维构造应力场[J]. 地震学报, 1999, 21(2): 3 - 5.
- [43] 朱守彪, 石耀霖. 用遗传有限单元法反演川滇下地壳流动对上地壳的拖曳作用[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 232 - 239.
- [44] 周仕勇. 川西及邻近地区地震活动性模拟和断层间相互作用研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 165 - 174.
- [45] 姚琪, 邢会林, 徐锡伟, 等. 断裂两盘岩性差异对汶川地震的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3634 - 3647.
- [46] Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby M F, et al. Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (8): 943 - 958.
- [47] 王来贵, 赵娜, 周永发, 等. 雁列式断层拉张破裂有限元数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008(2): 48 - 50.
- [48] 赵少荣. 多断层和障碍体作用的应力场、应变场和位移场 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1993, 18(2): 55 - 62.
- [49] 陈化然, 李铁群, 汪翠芝, 等. 基于断层相互作用的地震活动有限元模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 86 - 90.
- [50] 郭婷婷, 徐锡伟, 邢会林, 等. 共轭断层系统的非线性有限元模拟与震群模型讨论[J]. 地震地质, 2015(2): 598 - 612.

Finite element numerical simulation of tectonic stress field of fault F₈ in Hongtoushan copper mine

ZHANG Baoyi¹, LIU Xiaoli^{1,2}, MENG Fei¹, LI Xuefeng³,

TONG Yongqiang^{1,2}, WANG Lifang^{1,2}, WU Xiangbin¹

(1. School of Geosciences & Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2. Wuhan ZGIS Science & Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China

3. Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Haerbin 150094, China)

Abstract: In order to analyze the influence of the fault on the surrounding stratigraphic rock mass, we proposed a finite element algorithm to simulate the stress field and displacement field of the fault in the surrounding rock. Firstly, the stress status of normal fault, reverse fault and strike-slip fault were explored according to the maximum principal stress, intermediate principal stress and minimum principal stress. Secondly, the stress-strain relationship was analyzed based on the related theories of elastic mechanics, and realized via the linear tetrahedral element finite element analysis algorithm. Finally, considering the physical properties, i. e. elastic modulus and Poisson's ratio of the rock mass on both sides of the fault, fault geometry and boundary conditions, the finite element method was applied to simulate the stress field and displacement field of normal fault, reverse fault and strike-slip fault in the layered rock masses. The algorithm was applied in the Hongtoushan copper mine to simulate the stress field and displacement field of the surrounding stratum caused by the fault F₈.

Key Words: fault; finite element method; displacement field; stress field; Hongtoushan Cu deposit