

北衙金矿区构造应力场数值模拟

马德云^{1,2}, 高振敏¹, 杨世瑜², 韩润生^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床开放实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 昆明理工大学地球科学系, 云南 昆明 650093)

摘要: 在矿区地质背景研究的基础上, 运用有限元原理采用线弹性模型, 对北衙地区进行了三维构造应力场数值模拟。模拟结果表明, 北衙向斜为一断陷盆地, 向斜西翼存在隐伏断裂。在东西向挤压力作用下, 在向斜两翼的应力拉张区内产生四条近南北向的断裂(组), 为斑岩岩浆上侵以及金铅锌多金属矿的赋存提供了有利的构造部位。

关键词: 北衙金矿; 构造应力场; 数值模拟

中图分类号: P554; P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 1552(2003)02 - 0160 - 07

0 引言

构造应力场数值模拟是反映客观规律和定量评价的重要手段, 可以解决矿产预测、区域稳定性等方面的理论问题和实际问题 (Chen Qingxuan, 1995)。近年来, 人们采用应力测量、构造应力场模拟等手段再现古构造应力场, 并取得了很大进展, 获得了许多重要成果 (沈淑敏, 1986; 万天丰, 1988; 丁原辰等, 1994; 王成金等, 1994), 为矿田地质力学研究提供了新的途径。由于北衙金多金属矿床明显地受向斜以及断裂裂隙等构造的控制, 而构造应力场又对成矿具有重要的控制作用 (李四光, 1976), 所以, 本文以相似理论为依据, 在详细的野外地质构造研究的基础上, 用反演的办法, 根据模拟区的实际地质特征, 建立适当的地质力学模型, 并确定变形的边界条件和岩石力学参数, 运用有限元理论和弹性计算力学, 首次对矿区成矿构造应力场进行了三维数值模拟尝试, 反演北衙向斜盆地以及断裂的形成, 进而深入探讨动力驱动矿液运移和沉淀富集的规律, 最终实现对隐伏矿的定位预测的目的。

1 矿区简介

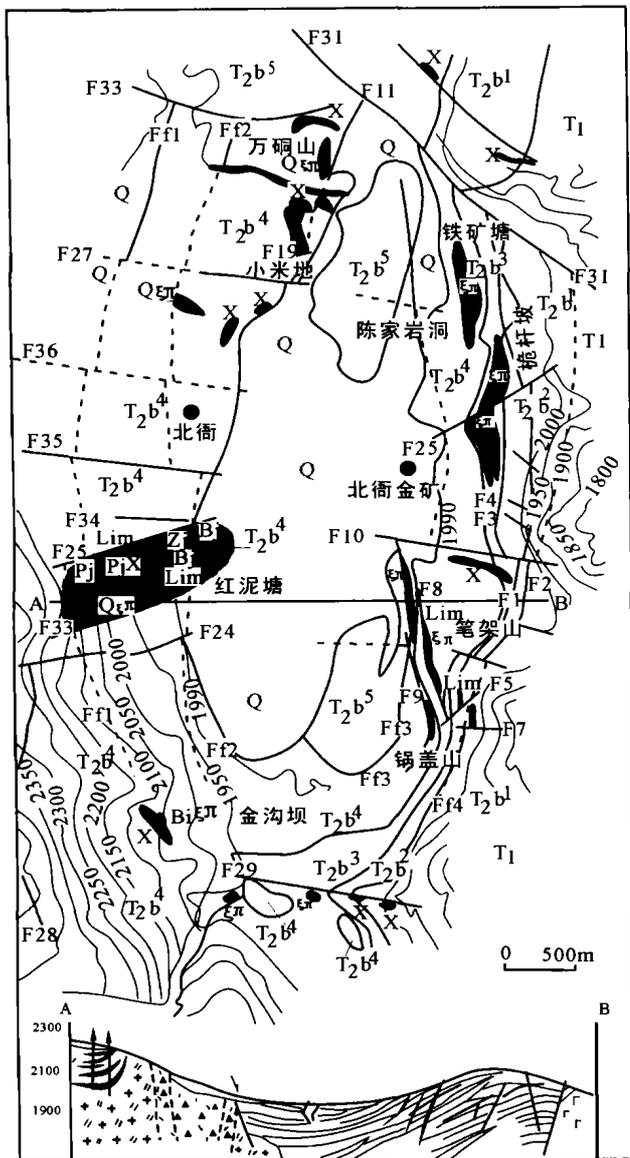
北衙矿区位于云南省鹤庆县北衙乡, 南距大理市 98 km, 北距鹤庆县 68 km。矿区南北长 5 km, 东西宽 4 km, 面积 20 km²。大地构造位置位于扬子准地台丽江台缘褶皱带鹤庆—洱海台褶束的中部, 夹持在金沙江—红河大断裂与程海大断裂之间, 属于金沙江—哀牢山—红河富碱斑岩铜金多金属成矿带的中段。矿区出露地层有第四系、第三系及中三叠统北衙组 (图 1)。其中, 北衙组为一套海中偏酸性富碱质的斑岩系列: 闪长岩—花岗斑岩—石英二长斑岩—石英正长斑岩—二长斑岩—正长斑岩, 此外还有玄武岩、(辉长)辉绿岩、隐爆角砾岩、煌斑岩出露。北衙矿区的碱性岩体同位素年龄为 48 Ma, 属喜山期产物, 矿区有关原生矿化均产在岩体接触带及其附近围岩的各种裂隙构造中。北衙矿区的矿床类型为: 碱性斑岩型多金属硫化物矿床 (矽卡岩型矿床)、残坡积砂矿床 (红色粘土型金矿)、古河床砂金矿床, 其中古河床砂金矿床是矿区新发现的类型。

矿区构造活动强烈, 且具有多期活动的特点。由

收稿日期: 2002 - 08 - 28; 改回日期: 2003 - 01 - 21

基金项目: 国家“九五”重点攻关项目资助, 子课题编号: 96 - 914 - 03 - 04 - 03.

作者简介: 马德云 (1969 -), 男, 讲师, 在站博士后, 主要从事构造地球化学、构造应力场及隐伏矿床预测等方面的研究。



- Q 1 E₂¹ 2 E₂² 3 T₂b⁵ 4
- T₂b⁴ 5 T₂b³ 6 T₂b² 7 T₂b¹ 8
- ζπ 9 Qζπ 10 Biζπ 11 X 12
- Zj 13 Bj 14 Lim 15 16

图 1 北衙金矿区地质略图(据 310 地质队改绘)

1 - 第四系; 2 - 上第三系巨砾灰岩; 3 - 上第三系含砾粘土; 4 - 中三叠统北衙组白云质砂屑灰岩; 5 - 中三叠统北衙组泥灰岩; 6 - 中三叠统微晶灰岩; 7 - 中三叠统北衙组泥质蠕虫灰岩; 8 - 中三叠统北衙组碎屑灰岩、网纹灰岩; 9 - 正长斑岩; 10 - 石英正长斑岩; 11 - 黑云母正长斑岩; 12 - 煌斑岩; 13 - 隐爆角砾岩; 14 - 震碎角砾岩; 15 - 含金褐铁矿脉; 16 - 断层及推测断层

Fig. 1 Geological sketch of mine area in the Beiya gold deposit

近南北向褶皱、断裂及东西向断裂组成的南北构造带,构成矿区的基本构造格架。其中,北衙向斜为一北北东向复式向斜,属松桂大向斜的南延。基底发育有两条隐伏断裂,一条为北北东向的北衙-邓川断裂,它斜切松桂向斜的西翼,另一条是隐伏的东西向基底断裂。区域性南北构造带是矿区内高级别的控岩控矿构造。前期研究工作显示,矿区内断裂的力学性质经历了复杂的历史转变过程:东西向断裂早期显示张性,后期为右行压扭;南北向断裂经历了压性→张性→左行压扭的力学性质转变。通过构造形迹筛分及配套组合,可以明显看出矿区早期经历了东西向挤压的构造运动,本文模拟的主要就是矿区地质体在该种受力条件下的应力场分布特征。

2 应力场模拟

影响构造应力场的因素比较复杂,它不但受力源、时间和区域变化的控制,而且还与外力作用的方式、岩石力学性质、断裂构造、边界条件及地形分布等因素有密切的关系(安欧,1990)。

2.1 地质力学模型的建立

2.1.1 几何边界

模拟矿区的范围:东西宽 4000 m,南北长 7000 m,面积 28 km²。取北衙组的厚度作为应力场的模拟最大深度(约 600 m)。将铅直方向进一步分为五层,分别相当于北衙组的第一至第五段灰岩。将此几何模型按 8 节点六面体划分为 2000 个六面体单元(elements),从而得到 2646 个节点(nodes)。每个六面体单元的长度相当于 350 m,宽为 200 m。

2.1.2 力学边界

从图 1 可以看出,矿区的构造形迹为一近南北向的向斜褶皱,显然是由于受到东西向水平挤压力而形成。该向斜的南端等高线呈圆弧形,收敛封闭较快;而北端两翼大致对称抬升,等高线相互平行,比较开阔。根据前人通过试验材料在不同约束条件下受力后形成褶皱的方法和结果,矿区向斜的南端应远离固定约束,北侧约束点应在轴部附近,由此得出简化后的矿区地质力学模型(见图 2),且其边界约束条件为:在模型第一层(相当于北衙组第一段灰岩)中部各节点处加以固定约束,其余各处均按自由边界处理。规定矿区在受到东西向挤压时,地质体的各个质点在垂直方向(Z 向)可以自由变形(抬升),在水平的 Y 方向上的伸缩位移加以约束。经过反复不断地模拟和调试,将该模型的边界施力大小确定为:

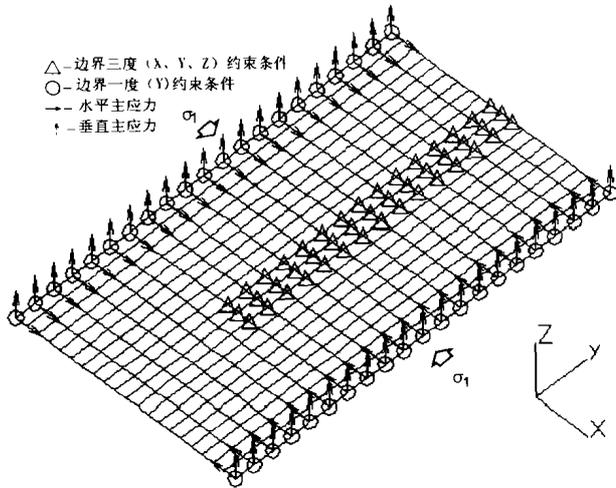


图 2 矿区构造应力场地质力学模型简图
Fig. 2 Simplified geomechanical model for simulating structural stress

$\sigma_1 - \sigma_3 = 185 \text{ MPa}$; $\sigma_1 = 200 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 15 \text{ MPa}$ 。其中, σ_1 为东西向水平挤压力, σ_3 为垂直方向的抬升力。

2.2 岩石力学参数

在矿区分别采集北衙组各段灰岩的应力测试大样, 然后通过试验测试求出了相关的岩石力学参数(表 1)。

表 1 北衙组各段灰岩岩石力学参数

Table 1 Parameters of rock mechanics for various sections limestones of the Beiya Group

岩石参数 岩性代号	密度 (kg/m^3)	弹性模量 (GPa)	泊松比
$T_2 b^1$	2.7E3	2.60	0.234
$T_2 b^2$	2.7E3	2.65	0.233
$T_2 b^3$	2.7E3	2.70	0.232
$T_2 b^4$	2.7E3	2.80	0.230
$T_2 b^5$	2.7E3	2.75	0.231

测试单位: 中国地科院地质力学所

3 构造应力场特征

3.1 变形场特征

从变形位移 (Displacement) 图 3 中可以看出, 矿区的东西两翼以及南端相对抬升, 变形等值线平行分布, 在平面及剖面上均呈半圆弧形, 变形位图总体上是大致对称的。其中, 东西两翼的最外侧相对抬升高度最大, 达到 0.9 个单位 (900 m) 左右, 所以东西

两翼北衙组第四段灰岩的最大出露高程理论值应为 2700 m (1835 + 900 m) 左右。

由于矿区在抬升过程中剥蚀强烈, 所以向斜东西两翼实际出露高度肯定要小于 2700 m。假设矿区两翼相似位置的平均剥蚀速度是一样的, 那么除掉岩层剥蚀因素后, 矿区东西两翼地形还是基本对称的。然而实际则不然: 东翼笔架山点灰岩现今的出露高程为 2100 m, 西翼与此位置对应的红泥塘岩体附近高程达 2300 m; 西翼红泥塘村出露高度 1900 m, 东翼与此对应的位置出露高度为 1950 m。由此可以推断, 在形成北衙向斜过程中, 其西翼必定同时有先存断裂活动, 该断裂显然为北衙—邓川隐伏断裂。正是深部隐伏断裂的活动, 使得原应对称的矿区向斜东西两翼发生非协调变形。

3.2 冯·米塞斯应力 (Von Misses stress)

从冯·米塞斯应力图 4 中可以看出, 在矿区两翼距边界约 400 ~ 600 m、离盆地中央两侧约 150 ~ 300 m 等区域, 冯·米塞斯应力较小, 而在向斜核部及其边部则较高。这说明在东西向挤压力作用下, 矿区内产生的应力非均匀分布, 决定着不同部位将发生不同的形变。

3.3 最大主应力 (Maximum principal stress)

在东西方向挤压力作用下, 矿区不同部位岩石所受应力的性质、大小及方向均具有差异。从图 5 中可看出, 矿区大部分处于压应力状态, 但在局部也产生了拉张应力区: 在北衙组灰岩上部, 距模型中央两侧 0.4 ~ 0.8 个单位即 400 ~ 800 m 的范围, 以及距离边界两侧 0.2 ~ 0.6 个单位约 200 ~ 600 m 的范围内, 分别存在四条近南北向的应力拉张区域。其中, 西翼的两条应力拉张区分别通过红泥塘岩体西面和红泥塘村附近; 东翼的两个应力拉张区分别通过五里盘、锅盖山一带和陡崖一线 (断裂 F_1 、 F_2 沿陡崖南北延长线)。

四条应力引张区总体呈长条形, 具有大致平行且成带对称分布的特点。在不同部位 (平面上)、不同灰岩层位 (剖面上) 的局部, 应力引张区分布的具体范围和形状不尽相同。

3.3.1 最大主应力平面分布特点

在第五段灰岩 (图 5a), 最外侧的两条应力拉张区贯通矿区南北, 宽 400 多米。与之相距 600 多米的内侧两条应力拉张区, 以笔架山附近最宽, 达到 400 m, 然后向南尖灭; 在陈家岩碛附近变为 50 m, 似有变窄间断的趋势。在第四段灰岩 (图 5b), 外侧的两条应力拉张区宽 400 m, 内侧的两条宽 200 m, 在

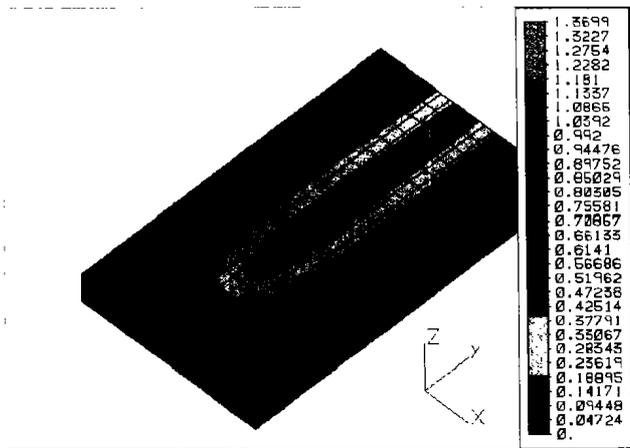


图 3 矿区北衙组 1-5 段灰岩垂向抬升位移趋势图

Fig. 3 Vertical uplifted displacement trend map for section 1-5 limestones of the Beiya Group in mine area

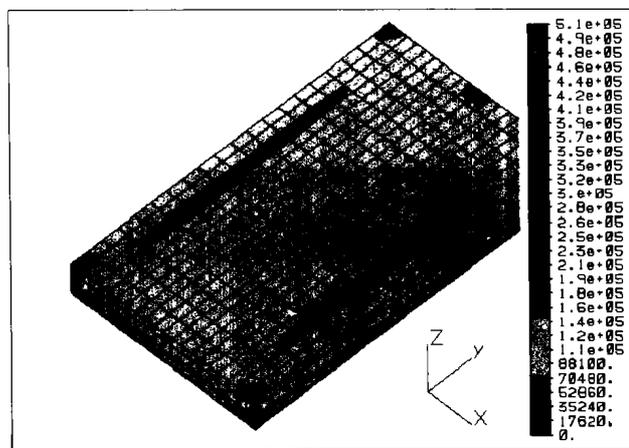


图 4 矿区北衙组 1-5 段灰岩冯米塞斯应力分布图

Fig. 4 Distributing map of Von Mises stress for section 1-5 limestones of the Beiya Group in mine area

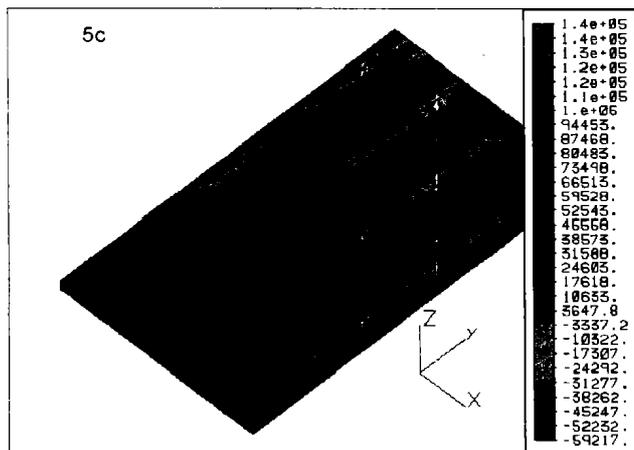
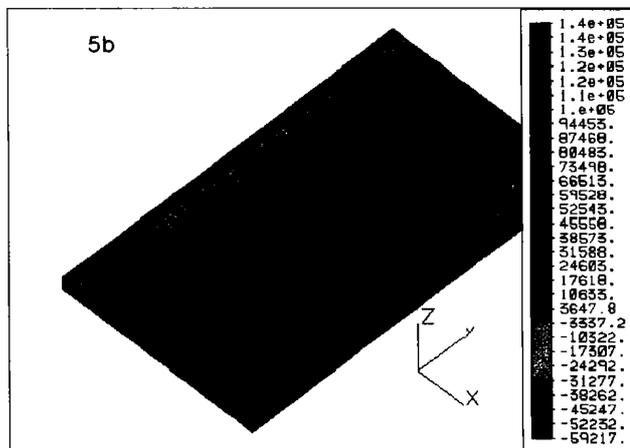
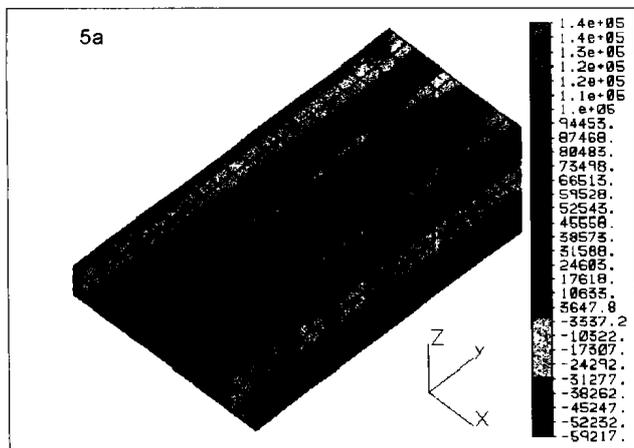


图 5 矿区北衙组 1-5、1-4、1-2 段灰岩最大主应力平面分布图

Fig. 5 Plane distribution map of the maximum principal stress in plane for sections 1-5, 1-4 and 1-2 limestones of the Beiya Group in mine area

矿区北端及笔架山以南小于 100 m, 呈尖灭再现状。在第二段灰岩(图 5c), 有 8 条应力引张区: 从外向内, 最外侧两条宽 200 m, 里侧的两条宽 100 m 左右, 再向里的两条应力拉张区分布更小, 长仅 1500

m, 宽小于 50 m; 最靠近向斜核部的两条宽 200 多米, 但在笔架山以南有尖灭的趋势。

3.3.2 最大主应力剖面分布特点

图 6a 中, 最外侧两条应力引张区宽达 500 m,

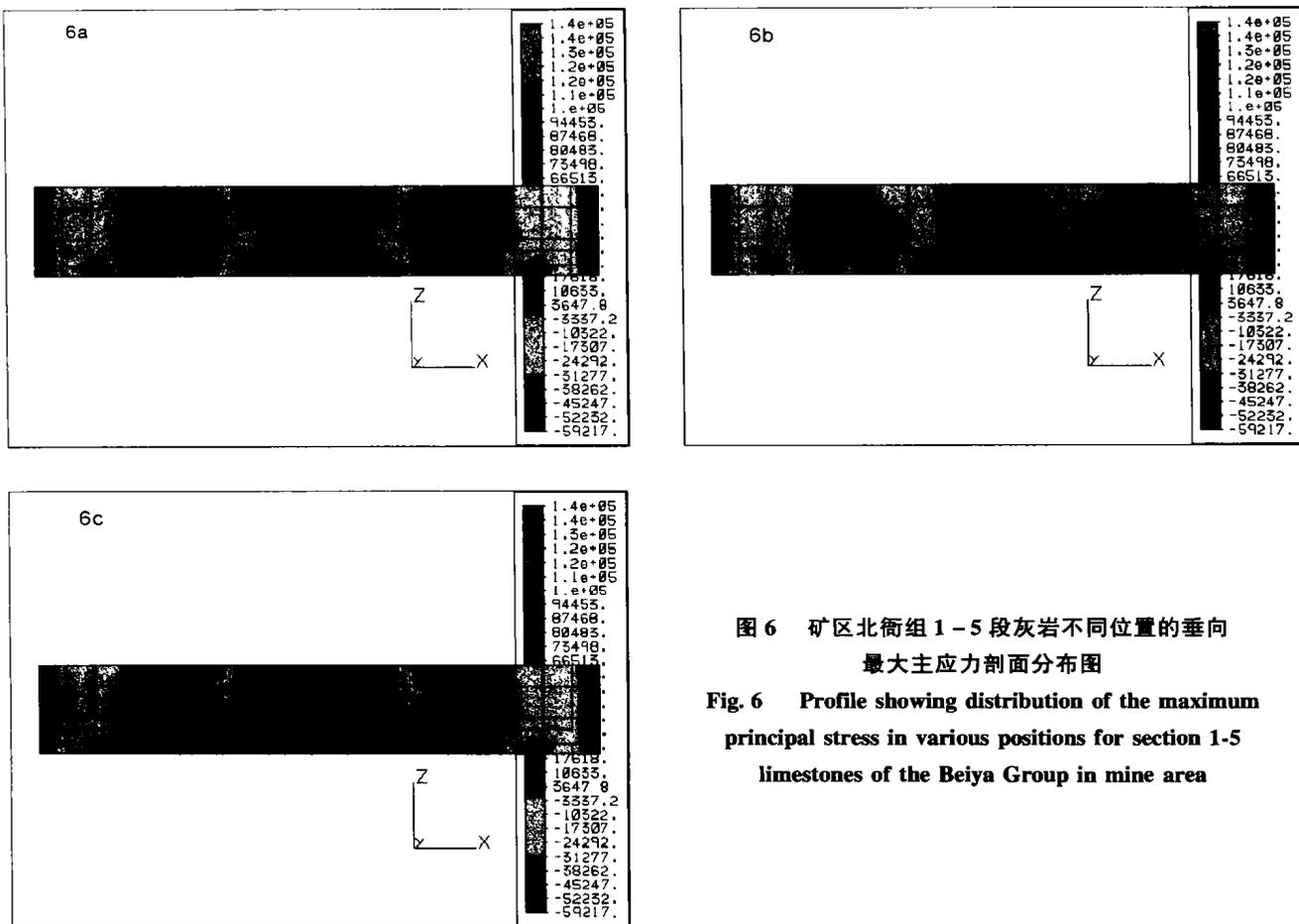


图 6 矿区北衙组 1-5 段灰岩不同位置的垂向最大主应力剖面分布图

Fig. 6 Profile showing distribution of the maximum principal stress in various positions for section 1-5 limestones of the Beiya Group in mine area

但从北衙组第二段灰岩开始分叉；内侧两条上部宽 100 m，在第四段灰岩底部有断开的趋势，然后向盆地内侧变向并变宽，达到 200 m，向下又变窄。在笔架山北侧的剖面图（图 6b）中，4 条应力拉张区宽度基本一致，为 450 m 左右，但外侧的两条从第二段灰岩地层开始分叉，内侧的两条从第四段底部开始变窄。在笔架山南侧的剖面图（图 6c）中，外侧的两条拉张区宽 400 多米；内侧的两条从第五段灰岩开始渐宽，在第四段顶部达到最大值，为 200 m，向下又逐渐尖灭。

水平最大主应力模拟的结果说明，当所受应力达到或超过灰岩的极限荷载时，处于拉应力区内的质点，在拉张力的作用下必将发生明显而较大的水平位移——即岩石破裂，从而形成与褶皱轴向大致平行的南北向伴生张性断裂，如在向斜东翼通过笔架山矿段的应力拉张区内，产生了近南北向张性断裂 F_8 、 F_9 、 F_{10} ，那么在其余拉张应力区的相应地段也应产生同样性质的断裂。如矿区红泥塘岩体西侧、红泥塘村、桅杆坡及笔架山东侧都应是产生断裂的部

位。其中，通过红泥塘村附近的断裂错断了红泥塘东侧岩体，使之下陷到盆地下面；通过五里盘附近的断裂可能使古河道抬升至地表。

3.4 垂向张应力 (Tensile stress)

图 7、图 8 是矿区垂向 (Z) 张应力分布情况，图中应力数值的 +、- 符号代表张应力的方向不同。从图中可看出，在距模型中央约 1.4 个单位 1600 ~ 1800 m (距边界 200 ~ 400 m) 的东西两侧处，产生方向向下的张应力区，矿区其余范围均处于向上的张应力区。相反方向的张应力作用的结果，必将产生垂直方向的相对位移。此外，最大主应力图显示，在相同区域还同时存在水平方向的拉张应力，再加之地块本身的重力作用，于是在矿区东翼相应地段的铁矿塘、桅杆坡、笔架山东面一带，产生了一系列不规则的张性断裂，局部地段以 F_1 、 F_2 断裂为代表，反映在地貌上，则表现为断续相连的陡崖断壁。

从图上还可以看出，与东翼此位置相对应的矿区西翼，其应力场特征也相同。根据向斜东翼岩石变形特征，西翼红泥塘岩体以西附近（距西侧边界约

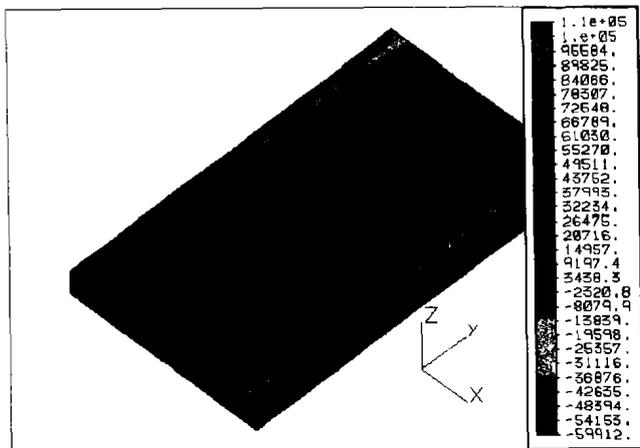


图 7 矿区北衙组 1-5 段地层张应力平面分布图

Fig. 7 Plane map of tensile stress distribution for section 1-5 of the Beiya Group in mine area

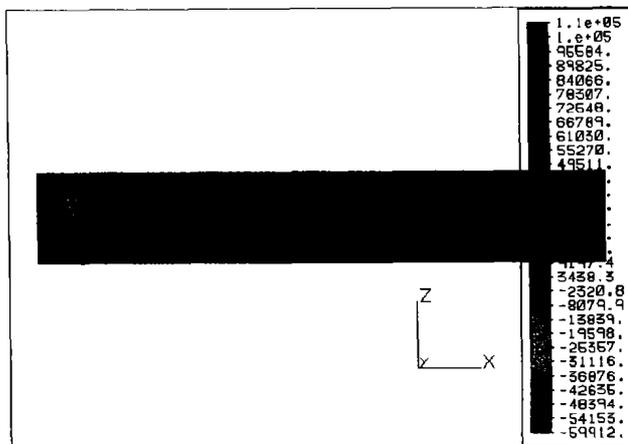


图 8 矿区北衙组 1-4 段地层张应力分布剖面图

Fig. 8 Tensile stress distribution profile for section 1-4 of the Beiya Group in mine area

600 m 处)将产生力学性质相似的断裂,而且断裂西盘也将滑落。然而,红泥塘岩体以西的地体不但没有发生重力滑塌,反而继续抬升。这又再次说明,在北衙向斜褶皱形成过程中,北衙组灰岩底部有另外的先存隐伏断裂也在同时活动。深部隐伏断裂东侧地体相对再次下陷,西盘相对再次抬升,从而支撑着红泥塘岩体以西的灰岩断块,使之继续升高。所以,西翼红泥塘岩体附近的出露高程要大于与之对应的东翼笔架山点,而红泥塘村的出露高度则比东翼相应位置(大致为黄泥坪公路处)要小。

由矿区变形场、水平及垂向应力场特征可得出,构造应力场控制着变形场。矿区由于受到近东西向挤压,形成北衙向斜,同时在向斜东西两翼产生了四条应力拉张区。在应力拉张区内由于水平主应力和垂向张应力的作用,东西两翼产生了四条大致平行、对称且相连的近南北向张性断裂带(群)(图 1 中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4)。其中,靠近盆地周缘的两条张性断裂带(群) F_2 和 F_3 , 是受局部水平拉张应力和垂向应力产生的, F_8 、 F_9 、 F_{10} 断裂是其局部地段的具体表现形式。西翼东侧拉张区产生的断裂带(群) F_2 大致通过红泥塘村附近,地貌上以一系列断续相连的陡崖断面为标志,它错断了红泥塘东侧的岩体,使红泥塘东侧岩体下陷到盆地下面。向斜东西翼最外侧的两条张性断裂带(群) F_1 和 F_4 则是水平拉张应力、垂直抬升力和重力联合作用下的结果,局部地段以 F_1 、 F_2 断裂为代表。

伴生断裂(F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4)的运动方式为:指向盆地中央的内侧断盘相对下陷,外侧断盘相对抬

升。在北衙向斜褶皱过程中,四条断裂带(群)的活动,使向斜核部的断块发生相对沉陷,在向斜两翼尤其是西翼产生间隔逐级沉陷和抬升的台阶地貌,使北衙矿区成为褶皱-断陷盆地;同时,大致通过红泥塘岩体处的深部隐伏断裂也在活动,使得原应对称的向斜东西两翼岩层发生非协调变形,并诱发红泥塘岩体沿该条断裂上侵。

至于图 1 中的东西向、北西向及北东向断裂,是矿区后期在南北向挤压力作用下产生的,由于其主要是对先期形成的构造及矿化进行叠加或改造,与矿区主要成矿活动作用不大,故本文未对其模拟。

4 构造应力场与岩体、矿体(化)的分布关系

从图 1 还可明显地看出,矿区内岩体一般分布于由应力拉张区产生的断裂破碎带附近。也就是说,岩体附近必有断裂构造(或层间滑脱空间)活动。岩体与断裂构造这种空间上的依附关系,说明了构造应力场产生的构造薄弱部位是深部隐伏岩体上侵的有利地段。构造应力促使矿区岩石变形形成向斜,产生断裂破碎带-容矿空间,同时又为岩浆上侵提供了通道,将深源成矿物质带上来,从而导致矿区发生普遍矿化,从而形成构造-岩浆-成矿体系。

5 结 论

构造应力场数值模拟结果表明,北衙向斜是一

断陷盆地。向斜两翼的非对称变形,与矿区隐伏断裂的存在及其活动有关。在东西向挤压力作用下,在北衙矿区局部产生了四条应力拉张区,拉张区内产生了力学性质为张性的近南北向隐伏断裂破碎带(群),斑岩岩浆沿这些构造薄弱部位上侵,将深源成矿物质带来,同时又为矿质沉淀提供力有利空间。矿区构造活动、岩浆活动及矿化受构造应力场的控制,反映出构造动力驱动构造、岩浆活动及含矿热液成矿。

参考文献:

- 安欧. 1990. 构造应力场. 北京:地震出版社: 3-8.
 丁原辰,孙宝珊. 1994. 声发射估计岩石古应力的试验研究. 地质力学与地壳运动-地质力学开放研究实验室 1991-1992 年报. 北京:地震出版社, 43-45.
 李四光. 1976. 地质力学概论. 北京:科学出版社, 2-20.
 沈淑敏. 1986. 中国东南大陆边缘地区中生代构造特点及构造应力场. 地科院地质力学所所刊. 北京:地质出版社: 3-15.
 万天丰. 1988. 古构造应力场. 北京:地质出版社, 1-9.
 王成金,梁一鸿. 1994. 全球构造应力场理论与应用. 长春:长春出版社, 68-111.

References:

- An Ou. 1990. Structural stress field. Beijing: Seismological Press, 3-8 (in Chinese).
 Chen Qingxuan. 1995. Assessment of regional crystal stability and its application to geology engineering in China. *Episodes*, 18(1): 2.
 Ding Yuanshen and Sun Baoshan. 1994. Study on estimating the ancient stress of rock by the experiment of sending voice. Beijing: Seismological Press, 43-45 (in Chinese).
 Li Siguang. 1976. Conspectus of geomechanics. Beijing: Science Press, 2-20.
 Shen Shumin. 1986. Structural features and structural stress field of the marginal areas of southeast continent of China in the Cenozoic. The publication of the Institute of Geomechanics, CAGS, 1991-1992. Beijing: Geological Publishing House, 3-15.
 Wan Tianfeng. 1988. The paleotectonic stress field. Beijing: Geological Publishing House, 1-9.
 Wang Chengjin and Liang Yihong. 1994. Theory of global structural stress field and its application. Changchun: Changchun Press, 68-111.

NUMERICAL SIMULATION FOR TECTONIC STRESS FIELD OF THE BEIYA GOLD DEPOSIT

MA De-yun^{1,2}, GAO Zhen-min¹, YANG Shi-yu² and HAN Run-sheng^{1,2}

(1. *Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China*)

Abstract: Based on the study on the geological background of the Beiya gold deposit, with line elasticity model of finite element, the authors study the numerical simulation of 3D tectonic stress field in the Beiya mine area. The results show that the Beiya syncline is a depression basin. Under the EW compressional stress, the carbonate rock strata of the Beiya Group was transformed into a syncline; it transformed nonsymmetrically because there exist concealed faults on west limb of the syncline. There occur four regions of tensile stress on both limb of the syncline wings, the regions of tensile stress with a strip shape distribute symmetrically and parallelly, the respective range and the shape of tensile stress region are variable in plane and vertically. Finally, the regions of tensile stress trend to produce four N-S fault groups under the action of the maximum principal stress in plane and the tensile stress in uprightiness. These faults provide beneficial tectonic positions for porphyry intrusion and Au-Pb-Zn ores formation. It shows that tectonic stress field controls the transformation field, and the driving forces controlled by tectonic stress field result in structural forming and magma activating and metallic elements depositing.

Key words: Beiya gold deposit; Tectonic stress field; Numerical simulation