

# 水厂铁矿边坡开挖 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟与分析

苗胜军<sup>1</sup>, 李长洪<sup>1</sup>, 佟慧超<sup>2</sup>, 任奋华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; <sup>2</sup> 北京市路政局顺义公路分局, 北京 101300)

**摘要:**本文在地质环境资料调研、岩石力学试验和地应力测量等工作的基础上,以 Mohr-Coulomb 屈服准则为力学模型,采用 FLAC<sup>3D</sup>三维有限差分方法,对首钢水厂铁矿Ⅳ工程地质区开挖过程中边坡岩体应力场、位移场、破坏场进行了数值模拟计算,并对模拟结果进行了系统分析,以指导矿山安全开采。

**关键词:**边坡; FLAC<sup>3D</sup>; 数值模拟; 应力; 位移; 破坏

**中图分类号:**TD854.6   **文献标识码:**A   **文章编号:**1671-4172(2008)01-0029-05

## FLAC<sup>3D</sup> Numerical Simulation & Analysis of Slope Excavation in Shuichang Iron Mine

MIAO Shengjun<sup>1</sup>, LI Changhong<sup>1</sup>, TONG Huichao<sup>2</sup>, REN Fenhuai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>Shunyi Department, Beijing Municipal Highway Bureau, Beijing 101300, China)

**Abstract:** Based on the geological environment investigation, rock-mechanics experiments and in-situ stress measurement, numerical simulation on the stress, deformation and failure distribution and varying regularities of slope rock-mass is carried out during the excavation of Ⅳ engineering geological district in Shuichang iron mine. The simulation result is analyzed systematically and used to guide safety-production.

**Key words:**slope; FLAC<sup>3D</sup>; numerical simulation; stress; deformation; failure

水厂铁矿位于河北省迁安市境内,是一座大型变质岩型磁铁矿床。矿山于 1968 年建成投产,1998 年按年产铁矿石 1 100 万 t 进行了规模调整设计。随着矿山整体边坡不断的加高、加陡,采场局部边坡的变形破坏常有发生。本文以水厂铁矿北区采场Ⅳ区边坡开挖为研究对象,通过 FLAC<sup>3D</sup>有限差分计算,对该区开挖过程中应力场、位移场、破坏场的发展变化过程进行模拟研究,进而指导矿山安全开采。

## 1 FLAC 计算程序简介

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)软件是美国 ITASCA 咨询集团公司开发研制的,可实现对岩石、土和支护结构等岩土工程建立高级三维模型,进行复杂的数值分析与设计等,具有应用广泛、运行速度快、功能强大、实践证明等特征<sup>[1-2]</sup>。

利用 FLAC 软件进行地质力学数值分析的步骤一般为 7 步:1) 定义模型分析的目标;2) 产生一个

物理系统的概念图;3) 构造和运行简单的理想化模型;4) 收集特殊问题的数据;5) 准备一系列详细的模型运行;6) 执行模型计算;7) 当前结果的解释。

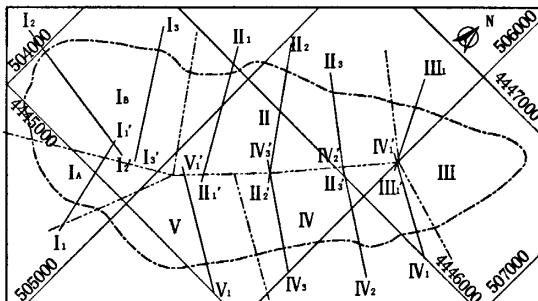


图 1 水厂铁矿工程地质分区示意图

Fig. 1 Engineering geological districts of Shuichang Iron Mine

## 2 边坡开挖三维计算模型的建立

### 2.1 本构关系

根据现场取样和岩石力学试验结果,计算中采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏,关系如下:

基金项目:国家“十五”科技攻关计划课题:“大型深凹露天矿高效运输系统及强化开采技术研究”(编号:2004BA615A-05)  
作者简介:苗胜军(1979-)男,讲师,博士

$$f_r = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别是最大和最小主应力,  $C$ 、 $\varphi$  分别是黏聚力和内摩擦角。当  $f_r > 0$  时, 材料将发生剪切破坏。通常状态下, 岩体的抗拉强度很低, 因此可根据抗拉强度准则 ( $\sigma_3 \geq \sigma_1$ ) 判断岩体是否产生拉破坏<sup>[3-4]</sup>。

表 1 岩体力学参数  
Table 1 Parameters of rockmass mechanics

代号	名称	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $C / \text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi / {}^\circ$	体积模量 $K / \text{MPa}$	剪切模量 $G / \text{MPa}$
Q	第四系人工堆积物	2 000	15	0.3	0.125	18	2.51	5.8
ArS <sup>2-5</sup>	黑云母斜长片麻岩	2 630	6 600	0.21	3.825	36	3 793.1	2 727.3
Fe	磁铁矿	2 850	8 500	0.23	2	36	5 246.9	3 455.3
ArS <sup>2-3</sup>	紫苏黑云斜长片麻岩	2 650	6 880	0.22	3.9	35	4 047.6	2 819.7
Mr	混合花岗岩	2 500	7 020	0.23	2.8	31	4 333.3	2 853.7
ArS <sup>2-2</sup>	辉石斜长片麻岩	2 600	6 077	0.24	3.02	35	3 895.5	2 450.4
F1、F3	断层	1 200	10	0.25	0.4	24	—	—

## 2.2.2 矿区地应力场分布规律

为了互相验证和补充, 水厂矿区地应力测量同时采用应力解除法和水压致裂法。得到矿区地应力场分布规律如下: 1) 三个主应力中两个主应力倾角接近水平方向, 另一个接近垂直方向, 最大主应力  $\sigma_1$  基本位于水平方向; 2) 应力解除法三个测点的最大水平主应力方向平均为  $93.9^\circ$ , 水压致裂法三个钻孔的最大水平主应力方向平均为  $78^\circ$ , 均接近于东西向, 这与华北地区的主应力方向基本一致; 3) 使用线性回归的方法, 对各个测点的应力值进行了回归, 得到最大、最小水平主应力和垂直主应力随深度变化的规律:

$$\sigma_{\text{hmax}} = 0.93 + 0.043 8H \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{hmin}} = 0.61 + 0.026 9H \quad (3)$$

$$\sigma_v = 0.12 + 0.025 9H \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\text{hmax}}$ 、 $\sigma_{\text{hmin}}$ 、 $\sigma_v$ , MPa;  $H$  为测点埋深, m。

## 2.3 数值模型建立

如图 1 所示, IV 区边坡走向与采场长轴方向一致, 为 NE 向, 倾向 NW 向, 呈单面边坡, 包括 IV-1、IV-2、IV-3 三个分析剖面。开挖前的计算模型 X 方向宽 700 m, Z 方向高 535 m (-365 ~ +170 m), Y 方向长 788 m。总体模型的单元总数 51 996 个, 节点总数 56 791 个, 开挖前模型如图 2 所示。

开挖完成后剖面 IV-1 处 ( $Y=0$ ) 边坡没有台阶, 边坡角  $41^\circ$ , 坡底标高 -180 m。剖面 IV-2 处 ( $Y=440$  m) 边坡台阶标高 +10 m, 台阶宽度 40 m,

## 2.2 岩体力学参数及地应力场分布规律

### 2.2.1 岩体力学参数的确定

在现场勘查和试验的基础上, 综合考虑地质条件和工程经验折减法对水厂铁矿北区采场 IV 区边坡岩体的主要岩组进行了分析, 得到岩体及断层的计算模型参数如表 1 所示<sup>[5-6]</sup>。

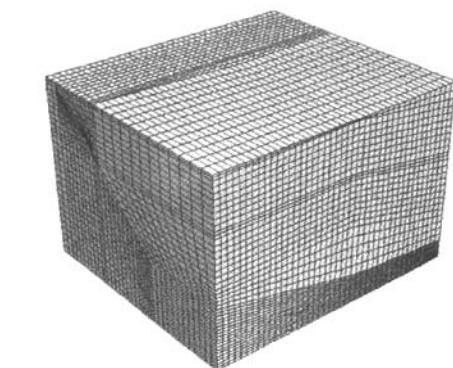


图 2 开挖前网格图形

Fig. 2 Simulation grid before slope excavation

计算过程中, 在  $Y=440$  m 的剖面附近设置了 4 个数值监测点。具体位置在坡顶上部、边坡台阶以及坡趾处, 如图 3 所示。

## 2.4 开挖模拟过程

本次研究对 IV 区边坡的开挖过程进行了模拟。开挖主要分为四步。如图 4 所示, 第一步开挖的岩体主要为上部表层的第四纪人工填土, 厚度约 70 m, 开挖的水平标高约 +40 m 到 +110 m; 第二步开挖的岩体主要为辉石斜长片麻岩, 厚度约 150 m 到

170 m, 开挖的水平标高约 -50 m 到  $\pm 0$  m; 第三步开挖的岩体主要为磁铁矿, 厚度约 137 m 到 155 m, 开挖到水平标高约 -120 m 到 -200 m; 第四步开挖的岩体主要为磁铁矿, 厚度约 100 m 到 150 m, 开挖的水平标高约 -180 m 到 -300 m。开挖完后的边坡形状和边坡分步开挖过程分别如图 3 和图 4 所示。

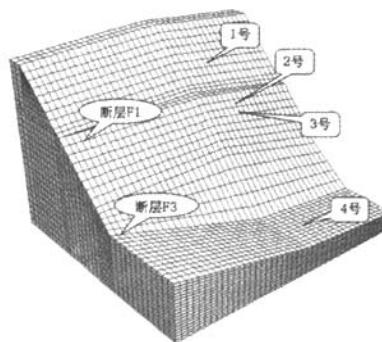


图 3 边坡开挖最终形状及监测点布置

Fig. 3 Final shape of excavated slope and monitoring points

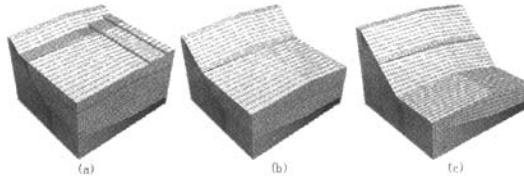


图 4 边坡分步开挖过程

Fig. 4 Stage-by-stage excavation of slope

### 3 计算模拟结果及分析

#### 3.1 应力场模拟结果及分析

##### 3.1.1 最大主应力场模拟结果及分析

图 5 和图 6 分别为边坡整体及 IV-2 剖面最大主应力场模拟结果。可以看出:最大主应力由上到下逐渐增大, 分布较均匀, 这与实测地应力分布规律相符; 坡底和坡趾局部主应力达到最大值, 近 30 MPa, 说明这些区域可能会产生应力集中, 应引起注意; 坡顶在建模时考虑了有人工堆积填土的覆盖, 所以最大主应力值大于零; 另外, 从图 6 还可以看出: 断层 F3 对边坡开挖后最大主应力分布产生一定影响, 断层两边的云图错开, 这对边坡稳定性是不利的, 也应引起注意。

图 7 为边坡台阶处 ( $Z = 370$  m) 最大主应力水平剖面图。可以看出: 从坡面向边坡内部, 最大主应力值逐渐增大; 断层 F1 两边的云图错开, 说明 F1

断层对边坡的最大主应力场也产生了不利影响, 应引起注意。

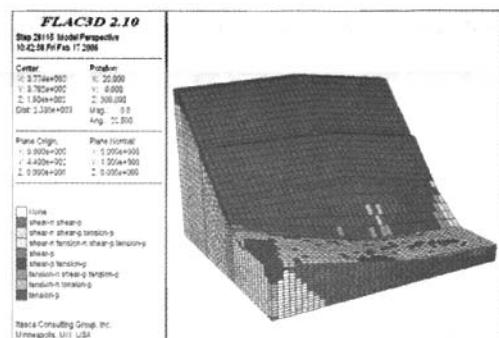


图 5 边坡最大主应力场

Fig. 5 The maximum principal stress distribution of slope

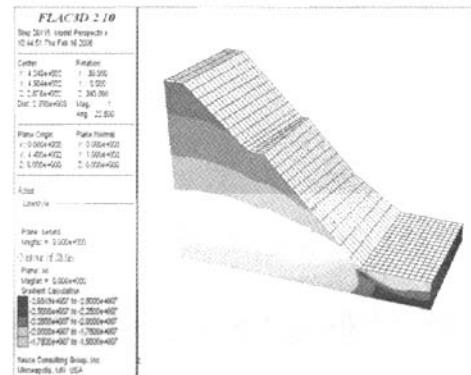


图 6 边坡IV-2剖面最大主应力场

Fig. 6 The maximum principal stress distribution of IV-2 section

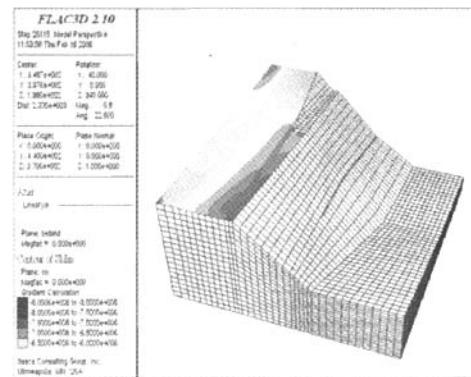


图 7 边坡台阶处水平剖面最大主应力场

Fig. 7 The maximum principal stress distribution of level section

##### 3.1.2 最小主应力场及剪应力场模拟结果及分析

最小主应力场和剪应力场的模拟过程与最大主应力场相同, 最小主应力值也遵从自上而下逐渐增

大的规律,最大值达到了13.3 MPa;最小主应力未出现负值,说明开挖模拟过程中未出现拉应力;另外还能看出:断层F3对应力云图产生了影响。剪应力最大值出现在坡趾附近,说明该区域有可能出现剪切破坏。

### 3.2 位移场模拟结果及分析

边坡在开挖中会产生荷载释放,坡体会随着开挖过程,向被挖空的方向产生水平位移,所以水平位移是评价边坡稳定性的一个重要因素。根据模型,本文主要考虑了X方向的水平位移。

图8为边坡X方向的水平位移。可以看出:最大水平位移发生在坡面处,达到了0.94 m,随着向边坡内部的延伸,位移值逐渐减小。图9为边坡IV-2剖面水平位移场。可以看出:随着向坡面的靠近,X方向位移最大值出现在坡趾上方约100 m处,达到0.4 m,应引起注意。

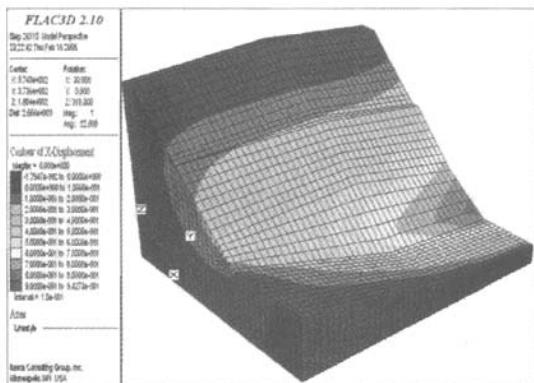


图8 边坡X方向的水平位移

Fig. 8 The level deformation distribution of slope

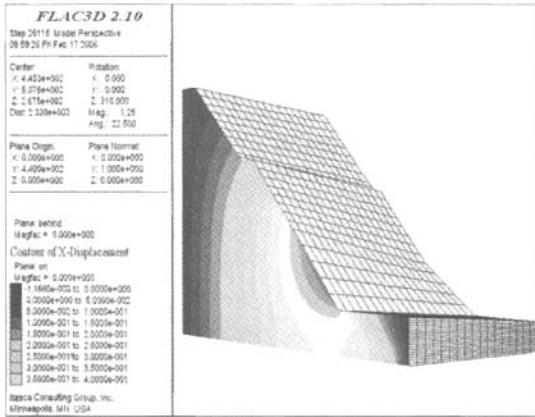


图9 边坡IV-2剖面水平位移场

Fig. 9 The level deformation distribution of IV-2 section

图10为边坡位移矢量场,代表边坡开挖变形趋

势。此图表明边坡总位移方向为X方向,坡底的位移方向略微向上,说明坡底有拱起的趋势,应予以注意。

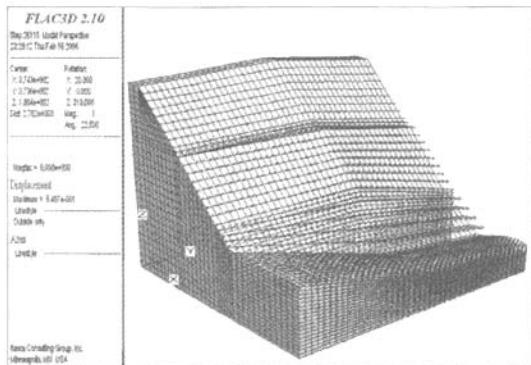


图10 边坡位移矢量场

Fig. 10 The deformation distribution of slope

边坡稳定性不仅取决于位移量的大小,与边坡的位移速度也有很大关系,所以对边坡的位移速度的监测也是评价边坡稳定性的重要指标。图11为1-4号监测点水平位移速度曲线,从图中可以看出:四条曲线同时有四个突起,说明每次开挖之后都是边坡变形最快的一段时期,之后位移速度逐渐趋于缓慢,边坡趋于稳定。

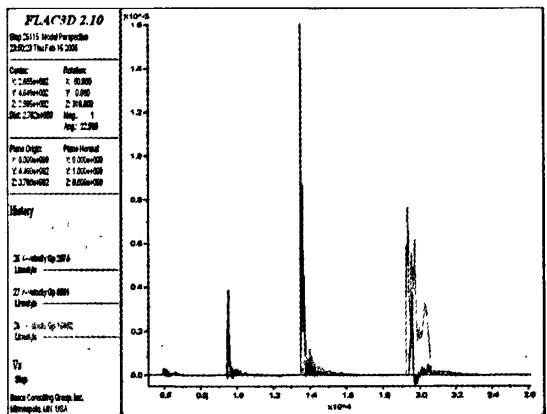


图11 水平位移速度监测曲线

Fig. 11 The monitored curve of level deformation velocity

### 3.3.3 破坏场模拟结果及分析

图12为边坡的破坏场。通过此图可以看出边坡的主体是稳定的,未发生塑性破坏。边坡坡面大约20 m左右厚的绝大部分浅层岩体发生了拉伸破坏,面积遍及坡顶到坡趾。边坡台阶处发生了剪切破坏,面积只涉及台阶附近。坡趾和坡底发生了拉伸与剪切的复合破坏,坡底所涉及的深度最大可达上百米。

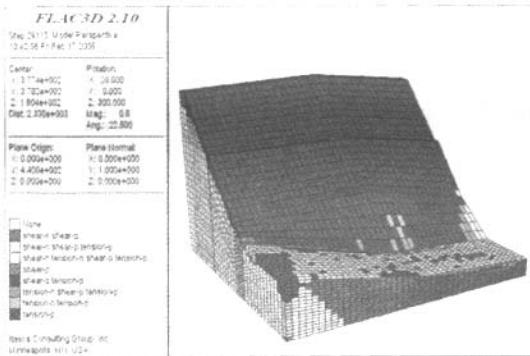


图 12 边坡的破坏场

Fig. 12 The failure distribution of slope

## 4 结论

本文采用 FLAC<sup>3D</sup>三维有限差分计算方法,对首钢水厂铁矿Ⅳ区边坡岩体应力场、位移场、破坏场进行了系统研究和分析,并对Ⅳ-2剖面的四个典型位置进行了监测,模拟结果如下:边坡的整体并未发生较大的破坏应力和位移,没有产生大范围的破坏,所以边坡的整体是稳定的;但坡面的浅层部分局部

出现了拉应力,坡趾和台阶处的剪应力值比较大,坡面的浅层部分尤其是台阶和坡趾处的位移值较大,坡底有隆起的趋势,坡面的浅层部分、台阶、坡趾和坡底发生了塑性破坏。以上这些现象都表明边坡的局部是不稳定的,尤其是台阶和坡趾等关键部位更应该引起注意,建议应根据实际情况对上述部位进行适当的加固。

## 参 考 文 献

- [1] ITASCA Consulting Group, Inc. FLAC3D User Manuals [M], Version 2.1, Minneapolis, Minnesota, 2002, 6.
- [2] 龚纪文, 唐先武, 王岳军, 等. 应力与变形的数值模型方法—数值模拟软件 FLAC 介绍 [J]. 华东地质学院学报, 2002(9):220-227.
- [3] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [4] 张东日, 陶连金, 李风仪, 等. 拉格朗日元法及其应用软件 FLAC [J]. 矿山压力与顶板管理, 1997(3):224-226.
- [5] 北京科技大学, 首钢矿业公司. 露天矿深部安全强化开采综合技术研究专题研究报告 [R]. 2004.
- [6] 苗胜军. 复杂岩体边坡变形与失稳预测研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2006.

□

(上接第 24 页)

## 参 考 文 献

- [1] 邓玉书. 云南个旧锡矿和构造的关系 [J]. 地质论评, 1951, 16(2):57-66.
- [2] 汪自芬. 关于个旧锡矿成矿的几个问题 [J]. 地质学报, 1983, 57(2):154-163.
- [3] 彭程电. 试论个旧锡矿成矿条件及矿床类型、模式 [J]. 云南地质, 1985, 4(1):154-163.
- [4] 庄永秋, 王任重, 杨树培, 等. 云南个旧锡多金属矿床 [M]. 北京: 地震出版社, 1996:108-124.
- [5] Jiang Zhuwei, Nicholas H S O, Terence D B, et al. Numerical modeling of fault-controlled fluid flow in the genesis of tin deposits of the Malage ore field, Gejiu mining district, China [J]. Economic Geology, 2001(92):228-247.
- [6] 金祖德. 个旧土状赤铁矿型锡矿成因商榷 [J]. 地质与勘探, 1981, 17(7):32-34.
- [7] 金祖德. 个旧层状赤铁矿型锡矿热液成因之否定 [J]. 地质与勘探, 1991, 27(1):19-20.
- [8] 彭张翔. 个旧锡矿成矿模式商榷 [J]. 云南地质, 1992, 11(4):362-368.
- [9] 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 个旧等锡矿中沉积结构的发现与矿床成因新探 [J]. 自然科学进展, 1999, 9(5):419-422.
- [10] 张欢, 高振敏, 马德云, 等. 个旧锡矿区鳞片状黄铁矿和胶状结
- [11] 秦德先. 个旧锡矿的矿床成因与找矿新发现 [J]. 昆明理工大学学报:理工版, 2001, 26(6):38.
- [12] 秦德先, 谈树成, 范柱国, 等. 个旧-大厂地区地质构造演化及锡多金属成矿 [J]. 矿物学报, 2004, 24(2):117-123.
- [13] 秦德先, 黎应书, 谈树成, 等. 云南个旧锡矿成矿年代 [J]. 地质科学, 2006, 41(1):122-132.
- [14] 秦德先, 黎应书, 范柱国, 等. 个旧锡矿地球化学及成矿作用演化 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(1):30-39.
- [15] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 锡矿床与基性岩超基性岩的关系探讨 [J]. 中国工程科学, 2005(增刊):267-274.
- [16] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 云南个旧东区玄武岩地质地球化学特征 [C]//中国科协 2005 年学术年会论文集, 以科学发展观促进科技创新(上). 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 366-373.
- [17] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 云南个旧东区玄武岩岩石学特征 [J]. 科技导报, 2006, 24(2):70-72.
- [18] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 云南个旧锡矿床铅、硫同位素研究 [J]. 地质与勘探, 2006, 24(2):49-53.
- [19] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 云南个旧锡矿的玄武岩成矿 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3):326-335.

□