

## 安庆铜矿采区围岩监测及稳定性预测

赵仲芳<sup>1,2</sup> 李一帆<sup>3</sup>

(1. 同济大学·上海 200092; 2. 江西理工大学·赣州 341000;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所·武汉 430071)

**摘要** 本文针对岩土工程稳定性分析,提出了监测、灰色预测和有限单元法相结合的分析方法。建立 GM(1,1) 模型,用 Java 语言编写灰色预测程序,在灰色预测基础上,建立了三维弹塑性有限元模型,对局部区域用 ANSYS 软件进行稳定性分析。应用此方法分析了安庆铜矿围岩的稳定性,灰色预测结果与后续监测结果基本一致,说明模型、程序及所提方法的实用性。

**关键词** 围岩变形监测 灰色预测 Java 语言 有限单元法 稳定性分析

**中图分类号** TD325 **文献标识码** B **文章编号** 1004-4051(2005)12-0017-05

### MONITORING OF THE SURROUNDING ROCK DEFORMATION AND PREDICTION OF THE STABILITY IN THE MINING DISTRICT IN ANQING COPPER MINE

Zhao Zhongfang<sup>1,2</sup> Li Yifan<sup>3</sup>

(1. Tongji University · Shanghai 200092; 2. Jiangxi University of

Science and Technology · Ganzhou 341000; 3. Institute of

Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences · Wuhan 430071)

**Abstract:** Aiming at the stability analysis in rock and soil engineering, a method combining monitoring, gray prediction with FEM is presented in this paper. At first, a GM(1,1) model is established, and a gray prediction program is built with Java language, then by analysing the predicted results, a three-dimensional elastoplastic finite element model is established and the stability in the regional area is analysed by using the ANSYS software. The stability of the surrounding rock in Anqing Copper Mine is analysed by using this method. The predicted results agree approximately with the following monitored results, indicating the practicability of the model, program and the method.

**Keywords:** Surrounding rock deformation monitoring Gray prediction Java language FEM Stability analysis

#### 1 前言

目前,很多金属矿山随着开采服务年限增长,开采深度不断增加,大部分已进入中深部或深部开采,地压问题愈来愈突出,开采条件日益恶化。矿山地压活动的日益激烈,已成为矿山企业极为严重的技术、经济和社会问题,严重影响着矿山安全生产和矿产资源顺利回收。

地压研究的核心问题是工程结构的稳定性分析,围岩变形是地压活动的宏观表现,岩土工程中

围岩稳定与失稳均会表现出一定量的变形。在岩体稳定性分析中,数值计算方法是定量分析的重要手段。对实际岩土工程问题,因各种原因仅少数有解析解,多数情况下只有求助于数值计算方法得到近似解。另一方面随着电子计算机的普及和电子计算技术的发展,发展了进行岩土工程稳定性分析的各种计算方法,如有限差分法、有限单元法、边界元法、离散元法、无界元法以及其中一些方法的相互耦合、半解析法等<sup>[1]</sup>。由于有限单元法所具有的显著优点,特别是这一类大型通用商业软件较多,因此,在工程实践中,至今应用最为广泛的仍为有限单元法或有限单元法与其它方法的耦合。

收稿日期:2005-07-18

作者简介:赵仲芳(1976-)男 湖北孝昌人 江西理工大学环境与建筑工程学院 同济大学在读博士

本文提出了对围岩变形进行监测,利用监测数据进行灰色预测,根据预测结果进行围岩稳定性初步评价和预测,再在此基础上用有限单元法对局部区域进行稳定性分析的方法,即监测、灰色预测和有限单元法相结合的稳定性分析方法,力求达到围岩稳定性数值计算方法的的目的性、高效性和经济性。

## 2 地压监测方案

安庆铜矿主要采用高阶段大直径深孔嗣后充填采矿法开采,阶段高度达120m。开采程序为先采矿房,后采矿柱,矿房用尾砂胶结充填,矿柱用尾砂充填。1#矿体为主要开采体,储量占全矿储量的80%。-400m以上部分基本采完,已转入-400m以下开采为主。-400m以下矿体厚度加大,采场暴露空间加大和空场时间延长将降低采场的稳定性,同时单一采场负担矿量加大,导致采场破坏对矿山生产的危害性加大。开采深度的增加,岩体原岩应力加大,而上部矿体被采空,导致了其围岩应力的转移,这将使下部岩体处于比较复杂的次生应力场中,这对下部矿体的开采可能造成较大的影响。下部采场与上部已经充填采空区之间只隔有实际高度不足10m的水平矿柱(称为-400m“楼板”),它的稳定与否,对下部矿体的安全顺利开采至关重要。因此,有必要对采区进行地压监测。

地压监测方法为光应力计测定二次应力和巷道收敛计测定巷道变形。光应力计监测网测点设计分布在-180m至-510m八个中段,设计布设77个测点,由于一些测点施工不便,另外加上采矿作业的破坏,实际有效测点个数为68个,构成立体监测网。巷道收敛计测点布设在-400m和-460m两个中段的下盘平巷、上盘回风道和穿脉中,总计8个断面24条测线。巷道收敛计测线如图1所示。

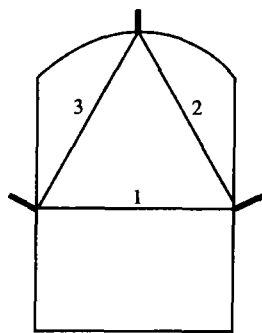


图1

## 3 灰色预测

围岩变形量受各种因素影响,如岩体物理力学参数、地质构造、地下水、开挖形状及大小等。目前,对影响围岩变形的诸多因素,认识是不确定的和不全面的,即是灰色的。通过监测围岩变形,用灰色预测方法建立围岩变形与时间的关系模型,据此模型可了解围岩变形规律,预测其变化趋势,从而判断岩土工程的稳定性以及是否需要支护和合理的支护时间。

GM(1,1)模型是以等间隔数据序列为基础建立的,但实际监测可能不是按等时间间隔进行,这样所测的原始数据序列为非等时间间隔数据序列,只有变换成等时间间隔数据序列,才能建立GM(1,1)模型<sup>[2]</sup>。因篇幅有限,本文主要介绍等时间间隔数据序列的GM(1,1)模型。

### 3.1 GM(1,1)建模

给定原始非负数据序列  $\{x^{(0)}(i)\} i=1, 2, \dots, N$

相应的一阶累加序列  $\{x^{(1)}(i)\} i=1, 2, \dots, N$

GM(1,1)模型的动态形式

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (1)$$

响应函数离散形式为:

$$\hat{x}^{(1)}(i+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-a} + \frac{b}{a} \quad (2)$$

其中,系数向量为:

$$\hat{a}[a \ b]^T = [B^T B]^{-1} B^T \cdot Y$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(N) + x^{(1)}(N-1)] & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = [x^{(0)}(2) \ x^{(0)}(3) \ \dots \ x^{(0)}(N)]^T$$

将累加预测值序列还原成还原序列  $\hat{x}^{(0)}(i+1) = \hat{x}^{(1)}(i+1) - \hat{x}^{(1)}(i)$ 。

### 3.2 模型精度检验

模型预测值和原始值之差称为残差  $\epsilon^{(0)}(i) = x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)$

为了研究预测模型的可靠性,检验所建模型的精度,一般采用后验差检验法。计算后验差检验指标:

(1) 后验差比值

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

(2) 小误差概率

$$P = \{ |\epsilon^{(0)}(i) - \bar{\epsilon}| < 0.6745S_1 \} \quad (4)$$

其中  $S_1$ ——原始数据序列的方差；

$S_2$ ——残差序列的方差；

$\bar{x}$ ——原始数据序列的均值；

$\bar{\epsilon}$ ——残差序列的均值。

按照 P 和 C 的数值大小，将精度分为四个等级（见表 1）。

表 1 后验差检验精度等级

预测精度	好 (Good)	合格 (Qualified)	勉强 (Just Mark)	不合格 (Unqualified)
P	>0.95	>0.80	>0.70	≤0.70
C	<0.35	<0.50	<0.65	≥0.65

### 3.3 残差辨识

当后验差检验不合格时，说明预测模型的精度低，为了达到好的预测效果，应该建立残差 GM(1, 1) 模型，修正原有模型，以提高预测的精度。以残差预测值  $\{\hat{\epsilon}^{(0)}(i)\}$  修正  $\{\hat{x}^{(0)}(i)\}$ ，即用  $\{\hat{x}^{(0)}(i) + \hat{\epsilon}^{(0)}(i)\}$  作为原始数据序列的预测值序列，重新检验修正后模型的精度，如还未满足要求，可重复上面的残差建模，一直到满足要求为止，或者预测失败。此时原始数据序列的预测值序列为：

$$\{\hat{x}^{(0)}(i) + \sum_{j=1}^r \hat{\epsilon}_j^{(0)}(i)\}$$

其中  $j$ ——残差模型修正序号；

$r$ ——残差模型修正总次数。

### 3.4 关联度分析

当模型精度检验不合格时，用残差模型修正，再进行模型精度检验。从理论上来说，残差模型能提高原有模型的精度。但由于计算误差的存在，有时残差模型并不能提高原有模型的精度，这时应该舍去残差模型。因此，同一次残差模型修正前后精度检验都不合格时，应该进行关联度分析，以残差模型修正前后的预测值序列与原始数据序列的关联度大小关系来决定残差辨识是否还要继续下去。

关联度计算的数据序列的量纲最好是相同的，当量纲不同时，应该进行无量纲化处理。本文关联度分析时原始数据序列无量纲化处理选用初值化方法。由于初值化处理，所有数据序列有公共交点（第一点数值均为 1），则关联系数为：

$$\zeta_j(i) = \frac{0.5 \max \max |x_0(i) - x_j(i)|}{|x_0(i) - x_j(i)| + 0.5 \max \max |x_0(i) - x_j(i)|} \quad j=1,2 \quad (5)$$

其中  $x_0(i)$ ——原始数据序列初值比；

$x_1(i)$ ——每次残差辨识前的预测序列初值比；

$x_2(i)$ ——每次残差辨识后的预测序列初值比。

关联系数只表示各时刻数据间的关联程度，过于分散，不便比较，因此用所有时刻的平均值作为集中化处理得子因素  $x_j$  对母因素  $x_0$  的关联度

$$r_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta_j(i) \quad j=1,2 \quad (6)$$

其中  $r_1$ ——每次残差辨识前的预测数据序列与原始数据序列之间的关联度；

$r_2$ ——每次残差辨识后的预测数据序列与原始数据序列之间的关联度。

(1)  $r_1 < r_2$ ，说明残差辨识能增大预测数据序列与原始数据序列之间的关联度。继续进行残差辨识有益于模型精度的提高。再进行下一次残差辨识，然后进行后验差检验修正后的模型的精度，若精度还不满足要求时，再做关联度分析，直至模型精度满足要求或 (2) 中的情况发生。

(2)  $r_1 \geq r_2$ ，说明残差辨识不能增大预测数据序列与原始数据序列之间的关联度。此时，应放弃再进行残差辨识，宣告建模失败。再利用后续监测数据，应用新息 GM(1, 1) 模型或等维新息 GM(1, 1) 模型（新陈代谢 GM(1, 1) 模型）重新建模预测。

### 3.5 预测

当预测模型后验差检验满足要求时，可进行外推预测。在 GM(1, 1) 模型及残差 GM(1, 1) 模型的离散响应式中令  $i=N, N+1, \dots, T$  求得预测值。图 2 为整个过程的计算机程序实现的简化框图。

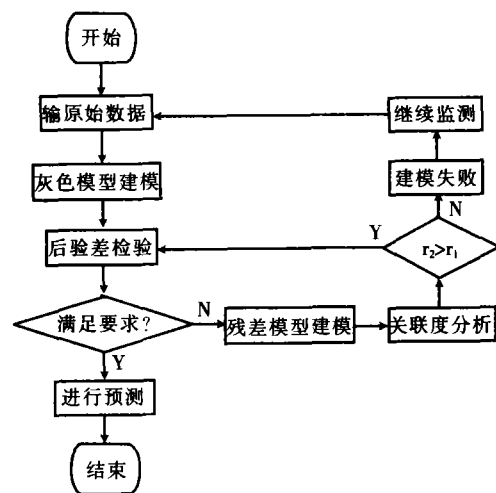


图 2 灰色预测框图

### 3.6 程序编制

为了利用计算机方便快捷地处理监测数据,用Java语言编写了灰色预测程序。为了通用性,编制程序时考虑了监测数据序列的等时间间隔和非等时间间隔两种情况,对非等时间间隔数据考虑了弱随机性和强随机性,对监测数据序列能正向和反向预测。程度界面用Java Swing实现<sup>[3]</sup>,界面友好,并用表格(JTable)、图形实现了原始数据序列、预测数据序列和相对位移的可视化。

### 3.7 预测实例及结果分析

分析围岩变形的变化情况,可为岩土工程围岩的稳定性评价和预测提供依据。围岩变形曲线特性和时间、空间、地应力大小、岩体物理力学性质、开挖方式、工程结构形状及尺寸、支护参数及支护时机等因素密切相关,因而岩土工程围岩可视为一

个灰色系统,应用灰色系统理论进行分析预测。本文预测主要针对巷道收敛计的监测数据序列进行,应用所编写的灰色预测程序对一段时间的监测数据进行处理,预测出未来一段时间内的巷道收敛变形的变化趋势。通过分析这个变化趋势,结合现场岩体的变形历时特性,可初步评价和预测巷道周围结构体的稳定性。

通过灰色预测程序对监测数据的处理,围岩变形量不大(见表2)。安庆铜矿围岩为硬岩,强度高,完整性好。根据初步的监测结果建模预测可以判断-400m、-460m中段巷道收敛计各测点附近围岩基本稳定。随着监测的进行,结合后续监测数据可进一步检验及应用新息GM(1,1)模型或等维新息GM(1,1)模型重新建模预测、评价。

表2 测线预测位移值

测线	位移	测线	位移	测线	位移
400_02_1	-0.163	400_02_2	-0.163	400_02_3	1.376
400_11_1	-1.1542	400_11_2	-2.6895	400_11_3	-1.1155
400_12_1	-2.9513	400_12_2	-0.316	400_12_3	-1.0335
400_22_1	-0.5342	400_22_2	-0.2853	400_22_3	-5.4819
460_02_1	-2.3685	460_02_2	-2.8132	460_02_3	-1.3697
460_11_1	1.1404	460_11_2	-1.4652	460_11_3	-0.5535
460_12_1	0.8825	460_12_2	-1.005	460_12_3	-0.4947
460_32_1	-0.9783	460_02_2	-0.3933	460_02_3	-0.9485

注: a. 测线\*\_\*\_\*表示中段\_测点号\_测线,如400\_02\_1表示-400m中段02号测点第1测线;

b. 位移负值表示巷道断面测线净距缩小,正值表示扩大;

c. 位移的单位为mm。

## 4 有限元分析

鉴于上述分析,-400m、-460m中段的区域围岩基本稳定,但收敛计监测数据预测围岩变化有一定的增加趋势,于是用有限元方法(ANSYS软件)模拟-460m中段回采-400m“楼板”及采场的稳定性。模型的四个侧面限制水平位移,底面限制垂直位移约束,上部施加上覆岩层的自重应力。

### 4.1 几何模型及单元划分

依据研究对象(-460m中段)及回采影响,三维计算模型的长、宽、高分别取430m、310m和260m。模型的长度方向为矿体的走向方向,宽度方向垂直于矿体走向,高度范围为标高-300m~-560m。对计算模型单元采用不等划分,重点考察部位细划分单元,计算模型共划分为5940个六面体单元,7072个节点。计算模型的几何形态及单元划分如图3所示。

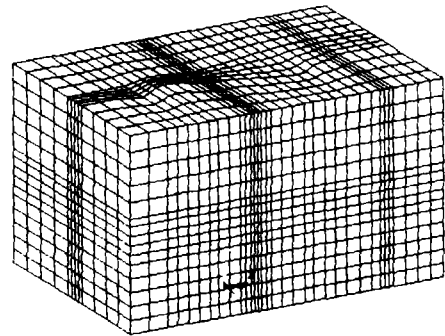


图3 模型网格划分

### 4.2 强度准则

计算对岩体的屈服函数F采用Drucker-Prager屈服准则。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (7)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin^2\varphi)}, K = \frac{6C\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin^2\varphi)}$$

- $I_1$ ——应力张量第一不变量；  
 $J_2$ ——应力偏张量第二不变量；  
 $C$ ——材料介质的内聚力；  
 $\varphi$ ——材料介质的内摩擦角。

### 4.3 模拟回采及结果分析

有限元模型主要用于模拟-460m中段的4R、9R分步回采过程中，采场围岩及-400m“楼板”的应力状态和位移，判断其稳定性。假设4R、9R分四步回采，在分步回采过程中，-400m“楼板”沉降位移增大，并且主要沉降区发生在-460m中段4R、9R的顶部位置，其它已充填矿房、矿柱和未回采处沉降位移很小。第四步回采完毕，即-460m中段4R、9R采空时，-400m“楼板”各处的沉降位移达到最大值，整个“楼板”沉降位移最大值为4.8567cm，位置在9R上方中部。

-460m中段4R、9R的两帮位移也随着回采的进行而有所增加，其变化的量值与-400m“楼板”差不多，其中位移的最大值发生在采空区两帮的近中部。随着各步回采，采空区的扩大，位移的最大值发生位置相应上移，在第四步回采完毕，两帮位移达到最大。在回采过程中，4R两帮的位移变化不大，9R两帮的位移相应大一些，并且在靠近7R的一帮比另一帮大，这与此帮矿体厚大并且已采充有关。

在用ANSYS软件进行四步回采的分析中，还分析了-400m“楼板”和-460m中段的4R、9R的应力情况。随着4R、9R的逐步回采，-400m“楼板”的拉应力区扩展，“楼板”应力向两侧转移，远离它们并且已采充的矿房上面的“楼板”的应力较小一些，这说明回采的影响区域不大，还显示了-460m中段矿体以前回采时，应力转移使一些“楼板”区域应力减小的结果，即“免压拱效应”，说明了回采顺序对围岩稳定性的影响。四步回采中用D-P准则对“楼板”稳定性进行评价，基本上没有塑性区分布，说明-400m“楼板”在下部中段回采时，其稳定性比较好，至于再下部中段回采的影响，由于上部回采使围岩应力重分布、转移及其已形成的“免压拱”，再加之因为回采的影响区域有限和充填采矿法的应用，估计-400m“楼板”稳定性仍比较好，但下部矿体厚大及深部地区应力增大（光应力计监测结果，由于其观测数据不多，不对之进行详细分析），开采产生的应力重分布的影响还待以后监测和有限元分析。

-460m中段4R、9R的围岩稳定性有限元模拟分析表明，4R、9R回采过程中，采场稳定。但

深部地应力较大，因此在深部高应力区回采时围岩的稳定性及是否会产生岩爆也要进一步观测和计算分析。

### 5 结论

(1) 用灰色预测程序对安庆铜矿围岩变形监测数据进行了预测分析，由预测结果、围岩变形历时特性曲线，收敛计各测点附近围岩基本稳定。灰色预测结果中出现巷道断面测线间扩张（由于邻近工程的影响），表明监测时纪录邻近采矿工程情况及开采计划对围岩稳定性评价和预测有重要指导意义。

(2) 应用ANSYS软件模拟分四步回采-460m中段的4R、9R过程中-400m“楼板”及采场的稳定性，结果显示-400m“楼板”有一定的沉降位移，-460m中段4R、9R采空区两帮围岩也有一定的位移，用D-P准则判断基本上没有塑性区，说明这些区域的围岩是稳定的。模拟结果还显示-400m“楼板”在-460m中段的4R、9R回采过程中出现了拉应力，但对其稳定性影响不大。分步回采过程中-400m“楼板”出现应力转移（重分布），因此要合理地安排回采顺序，使回采在“免压拱”的保护下进行。

(3) 岩土工程是一个包含有诸多未知因素或不确定条件数十分复杂的灰色系统，因此应用灰色系统理论进行各类预测，结合岩土工程数值计算方法，在岩土工程中应用前景广阔。

由于巷道收敛计监测的巷道形成已久，不可能通过灰色反向预测得出围岩自形成以来的变形历时特性曲线，文中预测结果为阶段性的围岩变形历时特性曲线，因此，在应用预测结果时要结合巷道形成历史来初步评价和预测围岩的稳定性。在有限元模拟分析中，有些因素没有考虑，如断层、渗流场（地下水）、温度场（深部地热）等。同时由于各方面的原因<sup>[4]</sup>，岩土工程数值分析仍不能很好地适应岩土工程的复杂情况，从而使数值计算的定量结果只能作为定性或准定量评价作用。

#### 参考文献

- [1] E. T. 布朗著，余诗刚，王可钧译. 工程岩石力学中的解析与数值计算方法 [M]. 北京：科学出版社，1991.
- [2] 袁嘉祖著. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京：科学出版社，1991.
- [3] David M. Geary 著，李建森等译. Java 2 图形设计卷 II：SWING [M]. 北京：机械工业出版社，2000.
- [4] 徐军，郑颖人. 岩石力学数值分析方法中的一些问题. 第六次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]：363-365.