

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0337-06

塌陷区下部采场顶板稳定性分析及岩移预测

龚剑, 胡乃联, 王孝东, 李迪, 崔翔

(北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 为了分析塌陷区下部顶板的稳定性, 采用了 RMR 岩体分类与 Q 系统岩体分类对某矿区围岩进行岩体质量评价, 得出围岩条件, 并建立塌陷区力学模型分析了采空区顶板的受力状态, 结果表明了-127 m 中段采空区顶板已具备塌陷的力学条件。根据三维有限元模型的计算结果, 验证了-127 m 中段采空区塌陷的可能性, 根据监测值进行岩移量时间序列预报。预报结果表明, -127 m 中段顶板岩移量有逐渐增大的趋势, 塌陷势能在逐渐积累, 应采取支护方案控制岩移量, 并定期进行时间序列预报, 掌握岩移量变化趋势。

关键词 岩石质量评价; 力学分析; 三维数值模拟; 稳定性分析; 时间序列

中图分类号 TD 325 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.026

Stability analysis and rock movement prediction of stope roof below the subsidence area

GONG Jian, HU Nailian, WANG Xiaodong, LI Di, CUI Xiang

(State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract In order to analyze the stability of the roof below the subsidence area, the RMR rock mass classification and the Q system rock mass classification have been used for rock quality evaluation to calculate the rock condition, and the mechanical model of the subsidence area has been established to analyze the strained state in the roof. The results show that the roof of -127 m level is unstable enough with the mechanical condition of the collapse. The possibility of the collapse of the mined-out area in -127 m level has been verified by the calculation results of the 3D FEM numerical analysis, then the time series predicting analysis has been used for rock displacement deformation. Based on the results of predicting data, the rock movement value of -127 m level increases gradually with the accumulation of potential collapse. Therefore, supporting scheme should be formulated to control the value of rock movement and the time series prediction should be forecasted periodically to monitor the tendency of the rock movement value.

Key words rock quality evaluation; mechanical analysis; 3D numerical simulation; stability analysis; time series

地表塌陷属于地质灾害的一种, 常由于覆岩条件下的大面积采空区失稳造成, 与采矿方法、围岩

条件等有密切关系, 当覆盖层不足以支撑其自身重量和上覆荷载时就会产生地表塌陷^[1]。地表塌陷地

收稿日期: 2013-08-29

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB01B04); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0950)

作者简介: 龚剑(1987—), 男, 湖北省荆州市人, 博士研究生, 从事矿山安全保障技术方面的研究。

E-mail: gongdadao@163.com

Tel: 18612207879

质灾害可能会导致下部采空区顶底板的垮落、破坏,甚至上部塌陷体直接击穿下部采空区顶板,引起大范围的冲击地压活动,给矿山生产造成重大安全隐患^[2]。

采空区顶板整体处于受拉状态,当其拉伸变形超过岩石的极限抗拉强度时,顶板累积的岩移量会使其上部岩层与整体分开,无规则垮落入采空区^[3]。因此,为避免引发大面积顶板冒落和岩移,需要密切关注塌陷区下部顶板的稳定性状况^[4]。顶板稳定性问题是岩体结构和井下作业状况的综合反映,对其稳定性分析及变形监测有利于掌握采场岩体的力学动态,提前预测灾害发生的可能性,适时调整施工参数,优化结构,提高工效和降低风险。基于此,本文以某铁矿为工程背景,运用岩体质量评价方法对其岩性进行判断,建立力学模型分析塌陷区失稳条件,采用三维建模计算顶板拉应力及安全系

数,并通过处理采场顶板的岩移监测数据,运用时间序列对监测数据进行预测,充分考虑时间因素影响,判断未来一段时间内采场岩体变形发展趋势。

1 工程背景

1.1 矿体及围岩特征

该矿以开采铁矿石为主,属于急倾斜矿体,平均倾角 70°,沿走向长度 140 m,倾向北东,平均厚度 15 m,采用空场法开采,留有少数不规则矿柱,地下已形成多层采空区。矿坑在-96.4 m 以上各中段采空区顶板大部分坍塌,塌陷区正下方为-127 m 到-188 m 采场,采空区分布与塌陷坑走向基本一致,高度 8~11 m,顶板跨度 12~15 m,中段高度 15~17 m。矿体顶底板围岩主要有闪长岩、大理岩、矽卡岩、花岗岩。通过对各中段进行采集岩样试验,得到各矿岩体的工程地质数据,如表 1 所示。

表 1 工程地质数据
Table 1 Engineering geological data

岩体名称	单轴抗压强度 /MPa	RQD/%	裂隙间距/cm	RMR 岩体分类		Q 系统岩体分类	
				RMR 值	等级	Q 值	评级
闪长岩	135.2~143.6	24.2~54.3	6~19	44~58	III	1.318~2.615	较差
大理岩	62.7~114.9	35.4~46.6	7~16	40~54	III	0.527~0.792	很差
矽卡岩	132.5~276.4	45.1~55.3	14~22	48~61	III	2.968~3.716	差
花岗岩	149.8~240.2	43.7~60.2	8~25	48~66	III~II	3.463~5.128	差~一般
铁矿石	126.5~132.2	36.5~47.8	6~20	39~54	III	1.042~1.348	差

1.2 岩体质量评价

为分析围岩参数,采用 Q 系统岩体分类和 RMR 岩体质量指标 2 种方法进行岩体质量评价,评价结果见表 1。由表 1 可得,对于同一类别的围岩,Q 分类法的分类等级普遍比 RMR 分类法的分类等级低,这是因为 Q 分类法考虑了地应力折减系数 *SRF* 对围岩的影响,使围岩稳定性参数下降。国外学者在对 *SRF* 参数修正后,提出 RMR 值与 Q 值的对应关系^[5]:

$$W_{RMR} = 15\lg W_Q + 50 \tag{1}$$

式中: W_{RMR} 为 RMR 分值; W_Q 为 Q 分值。根据式(1)换算得出修正后两者的对应关系,如表 2。经计算,该矿矿岩 Q 分值与 RMR 分值相近,两者的评级结果也具备较好的一致性,说明 RMR 分类与 Q 系统分类相关性较好。

按照修正后的方法进行岩体质量评价,该矿矿岩属于 III 类岩体,节理裂隙较发育,整体稳固性一般。得出各矿岩 RMR 分值后,可根据 RMR 分值计

算出弹性模量 E_m , 公式为

$$E_m(\text{GPa}) = \begin{cases} 10^{\frac{RMR-10}{40}} & (RMR < 55) \\ 2RMR - 100 & (RMR \geq 55) \end{cases} \tag{2}$$

表 2 Q 分类与 RMR 分类对应关系
Table 2 Correspondence between Q classification and RMR classification

Q 值	Q 分类评级	RMR 分类等级
0.001~0.01	非常差	V
0.01~0.1	很差	IV
0.1~4	差~一般	III
4~100	好~很好	II
>100	非常好	I

2 塌陷区力学分析

塌陷区稳定性计算采用太沙基理论^[6],假定岩体为松散体,由于岩体中存在各种原生及次生结构面,加之开挖硐室施工的影响,其围岩不可能为完整而连续的整体。当顶板受到上覆地压作用,发生挠曲变形,随之会引起地应力的重新分布。其力学

模型如图1所示,在虚线框内ABCD所圈出的散体中,取厚度为 dx 的薄层为分析对象。

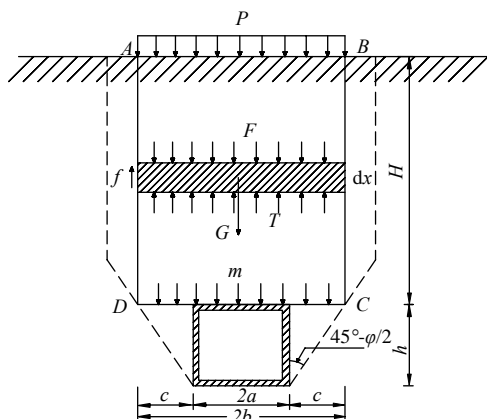


图1 力学模型

Fig.1 Mechanical model

由图1可得,单元散体的自重可表示为

$$G = \int_0^H 2b\gamma dx \quad (3)$$

单元体上表面竖直向下的上覆岩体压力为

$$F = 2b\sigma_v \quad (4)$$

单元体下表面竖直向上的下腹岩体拖力为

$$T = \int 2b(\sigma_v + d\sigma_v) \quad (5)$$

作用于单元体侧面的竖直向上的侧向围岩摩擦力为

$$f = \int_0^H (\lambda\sigma_v \tan \phi + c_r) dx \quad (6)$$

b 值可以表示为

$$b = a + h \tan(45^\circ + \phi/2) \quad (7)$$

式中: a 为采空区顶板半宽; γ 为岩体体积质量; σ_v 为竖向初始地应力; λ 为力学系数; dx 为薄层单元体厚度; c_r 为岩体内聚力; ϕ 为岩体内摩擦角。

单元体在竖直方向上是平衡的,其平衡方程为

$$\sum W_v = F + G - T - 2f = 0 \quad (8)$$

将方程(3)~(6)代入平衡方程,通过计算可得到

$$\sigma_v = \frac{b\gamma - c_r}{\lambda \tan \phi} (1 + ae^{-\frac{\lambda \tan \phi}{b} x}) \quad (9)$$

加入边界条件:当 $x=0$ 时, $\sigma_v=p$,代入方程(9),可得

$$\sigma_v = \frac{b\gamma - c_r}{\lambda \tan \phi} (1 + e^{-\frac{\lambda \tan \phi}{b} x}) + pe^{-\frac{\lambda \tan \phi}{b} x} \quad (10)$$

取 $x=H$, $n=H/b$,表示相对埋深系数,代入式(10)得采空区上覆岩体压力为

$$m = \frac{b\gamma - c_r}{\lambda \tan \phi} (1 + e^{-\lambda n \tan \phi}) + pe^{-\lambda n \tan \phi} \quad (11)$$

对于许多矿山来说,由于埋深较大,取埋深系

数 $n \rightarrow \infty$,因此由式(11)可得到

$$m = \frac{b\gamma - c_r}{\lambda \tan \phi} \quad (12)$$

当上覆岩体压力 $m < 0$ 时,说明采空区上覆岩体处于稳定状态;而当 $m > 0$ 时,上覆岩体就处于不稳定状态,已具备塌陷的力学要素。

根据本次研究的地质资料,由式(12)计算可得, $m_{-127} \approx 0.2024 \text{ MPa} > 0$,表明-127 m水平中段采空区顶板处于不稳定状态,顶板可能冒落,直到塌陷体充填该采空区。因此,为验证其冒落可能性,采用数值模拟的方法计算顶板所受拉应力状态,分析安全系数。

3 数值模拟

3.1 力学参数

在有限元模型计算中,物理模型的计算结果主要依赖于岩体的物理力学参数。矿区地应力物理模型考虑的岩体分类如表1所示,涉及到的物理力学参数主要有弹性模量、泊松比等,如表3所示,弹性模量可由式(2)计算得到,其他力学参数通过采集岩样进行岩石力学试验确定。

表3 计算模型的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of the calculation model

岩体分类	单轴 抗压强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩 擦角/ ($^\circ$)	弹性 模量/ GPa	泊松 比 μ
闪长岩	173.26	16.7	26.8	33.7	48.6	0.26
大理岩	84.26	9.5	26.2	31.5	33.4	0.28
砂卡岩	142.38	14.6	31.4	38.6	37.6	0.31
花岗岩	90.16	10.4	27.7	36.3	57.5	0.25
铁矿石	149.32	15.2	42.3	33.7	41.2	0.31

3.2 网格划分及破坏准则

利用三维有限元通用软件 ANSYS 划分模型网格。三维有限元模型范围的确定是基于圣维南原理,计算模型的几何尺寸为矿区开挖体最大尺寸的3~5倍,使模型周边保持初始应力状态。根据采场现状,选择建模尺寸为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ 。模型底部采用垂直方向约束,南北边界和东南边界分别采用水平方向约束,整个模型被施加自重荷载。

模型的计算采用 Drucker-Prager 屈服准则^[7]。采空区受开挖作用的影响,周边会产生应力集中现象,而处于应力集中区域的岩体,可能会产生压剪破坏。压剪破坏在岩土工程中常用 Drucker-Prager 弹塑性破坏准则来判别。

3.3 计算结果分析

根据矿区三维模型计算得到的各中段安全系数分布图(如图 2)。从图 2 可看出, -140~-188 m 中段部分区域安全系数 $s < 1$, 表明这些区域的稳定性较差; 这主要是因为矿区-140 m 到-188 m 中段正在进行部分采空区顶板回采, 由于有开采扰动影响, 使其安全系数数值较低, 属于正常开采所得结果。-127

m 中段由于紧邻塌陷区, 已停止开采多年, 没有开采扰动的影响, 采空区地应力重新分布已完成, 而其安全系数的区间为 $s \in [0.8, 1.15]$, 顶板部分区域安全系数小于 1, 表明其稳定性较差, 顶板所受拉应力较大, 塌陷体有填充该采空区的可能。因此, 通过理论力学模型分析与实际三维建模分析, 结果均表明-127 m 采空区顶板存在塌陷可能性。

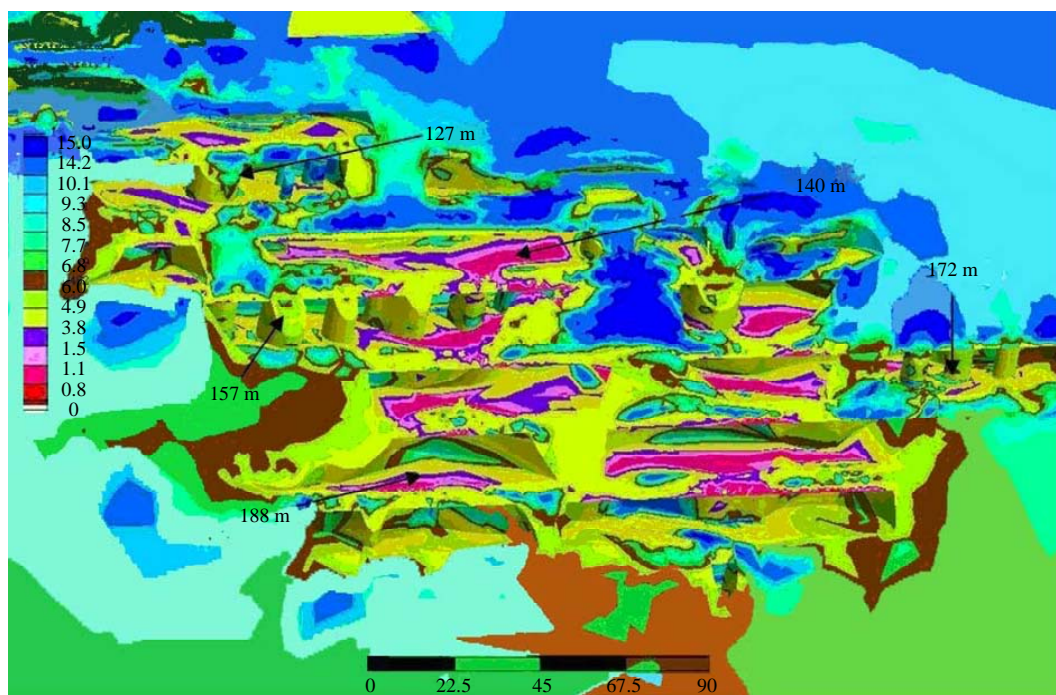


图 2 安全系数分布图

Fig.2 Safety factor distribution

4 岩移监测预报

塌陷区目前已延伸至-96.4 m, 且-127 m 中段顶板出现塌陷趋势, 需要制定监测方案分析岩移量, 掌握岩体的力学动态。根据采空区顶板冒落规律, 顶板中心区域承受的拉应力最大, 顶板塌陷大部分先从其中心区域开始冒落, 从图 2 可看出, 安全系数小于 1 的区域也主要集中于顶板中心线附近。因此, 将-127 m 中段顶板中心区域标记为监测点 C, 对其进行岩移监测。

4.1 岩移量监测

对 C 点的顶板岩移监测采用巷道变形收敛仪, 测点用木桩标定。用浅孔钻机钻直径为 32 mm、深为 300 mm 的孔, 将 $\Phi 34$ mm、长为 320 mm 的木桩打入孔中, 木桩端部安设弯形测钉。木桩打入孔后, 与钻孔紧密结合, 无松动现象, 监测频率为每 2 d 监测 1 次。顶板岩移量通过收敛仪所测数据计算所得。监测断面计算模型如图 3 所示, 表达式为

$$\Delta h = h' - h = \frac{(2/c')\sqrt{s'(s'-a')(s'-b')(s'-c')}}{(2/c)\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}} - \quad (13)$$

式中: $s = (a+b+c)/2$, $s' = (a'+b'+c')/2$ 。根据监测数据得到 C 点岩移量随时间的变化关系(图 4)。从图 4 可看出, 每次监测岩移量的单次变化范围在 $[-2, 2]$ mm 之间, 最大值不超过 2 mm。累积岩移量随时间的增长逐渐增大, 监测期内累积岩移量达到 18 mm。

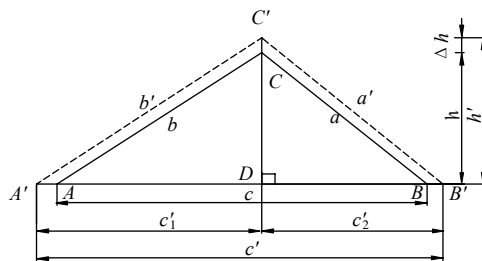


图 3 监测断面位移计算模型图

Fig.3 Calculation model of monitoring sections displacement

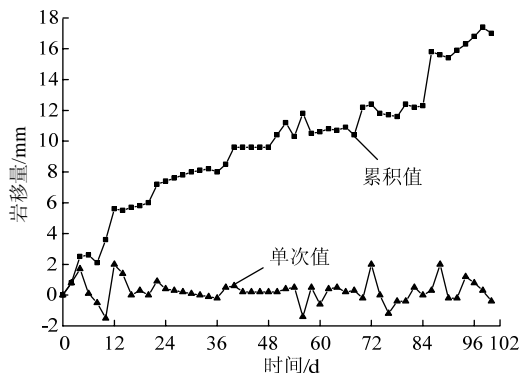


图4 岩移量时间分布图

Fig.4 Rock movement value with time distribution

4.2 时间序列预报

根据图4所示的监测数据,可以对其稳定性进行一定时期的预测。常用的预测方法有回归分析法、灰色理论法等,但这些方法没有充分考虑时间对预测变量的影响。本文采用时间序列预报^[8-12],预测一段时间区域下顶板岩移量的变化趋势,用于判断未来一段时期内顶板的稳定性状况。

将图4所示的岩移量数据视为逐渐增加的非平稳序列,采用最小二乘法对监测数据时间序列进行多项式趋势项提取,其多项式函数表达式为

$$y(x) = -0.0012x^2 + 0.1608x + 1.9342 \quad (14)$$

残差序列采用 ARMA(p, q)模型计算:

$$z_x = \sum_{i=1}^p \varphi_i z_{x-i} - \sum_{j=1}^q \theta_j a_{x-j} + a_x \quad (15)$$

本文取 $p=1, q=1$, 经计算得模型参数 $\varphi_1=0.3218, \theta_1=-0.0549$, 因此残差模型表达式为

$$z_x = 0.3218z_{x-1} + 0.0549a_{x-1} + a_x \quad (16)$$

合并式(14)与(16),得到岩移量时间序列模型表达式为

$$y(x) = -0.0012x^2 + 0.1608x + 1.9342 + 0.3218z_{x-1} + 0.0549a_{x-1} + a_x \quad (17)$$

对于 ARMA(p, q)模型,时间序列预报的计算法则表示为

$$\begin{cases} \bar{x}_t(1) = E[x_{t+1}] = \varphi_1 x_t + \varphi_2 x_{t-1} + \cdots + \varphi_p x_{t+1-p} - (\theta_1 a_t + \theta_2 a_{t-1} + \cdots + \theta_q a_{t+1-1}) \\ \vdots \\ \bar{x}_t(q) = E[x_{t+q}] = \varphi_1 \bar{x}_t(q-1) + \varphi_2 \bar{x}_t(q-2) + \cdots + \varphi_p \bar{x}_t(q-p) - \theta_q a_t \end{cases} \quad (18)$$

预报方差表达式为

$$\text{var}[e_t(q)] = \sigma_a^2 \sum_{i=0}^{q-1} G_i^2 \quad (19)$$

95%置信区间表达式为

$$y(t+q) + \bar{x}_t(q) \pm 1.96\sqrt{\text{var}[e_t(q)]} \quad (20)$$

根据上述方法对监测点 C 的岩移量进行未来 30 d 的预报,预报结果如表 4 所示。从预报结果可以看出,岩移量趋近于 21 mm,而目前的累积岩移量监测值不超过 18 mm,预报结果说明岩移量单次变化最大值已从目前的 2 mm 在 30 d 后趋近于 3 mm,表明岩移量有日渐增大的趋势,顶板的塌陷势能在逐渐积累,需要采取喷浆或者锚杆支护等治理措施防止岩体位移的进一步扩大,同时对岩移量继续实施密切监测,监测频率可视岩移量的变化速率相应调整,并采取相同方法进行未来一段时期的预报,掌握发展趋势,做好提前防护。

表4 岩移量预报结果

Table 4 Prediction of rock movement

预报时间/d	预报岩移量/mm	预报方差	置信区间
2	18.246 8	0.783 8	18.2468±1.2675
4	18.398 4	0.767 8	18.3984±1.2471
6	18.982 4	0.742 3	18.9824±1.2836
8	19.014 3	0.742 6	19.0143±1.2587
10	19.324 8	0.741 8	19.3248±1.3015
12	19.421 8	0.735 4	19.4218±1.3033
14	19.634 2	0.730 2	19.6342±1.3067
16	19.801 2	0.721 9	19.8012±1.3049
18	20.013 5	0.731 6	20.0135±1.3093
20	20.024 7	0.722 4	20.0247±1.3102
22	20.128 4	0.713 9	20.1284±1.3058
24	20.238 7	0.701 7	20.2387±1.3105
26	20.469 2	0.689 2	20.4692±1.3216
28	20.572 9	0.664 2	20.5729±1.3238
30	20.763 4	0.662 1	20.7634±1.3275

5 结 论

1) 采用 RMR 岩体分类与 Q 系统岩体分类进行岩体质量评价,通过修正后的 Q 系统分类与 RMR 分类具有较好的相关性,能更加准确地对围岩稳定性状况进行描述,为三维稳定性建模分析提供矿岩数据。根据计算,矿区围岩稳定性一般,采场具备了塌陷的围岩条件。

2) 应用太沙基理论建立塌陷区力学模型,分析塌陷区下部顶板的稳定性状况以及失稳的力学因素。模型计算结果显示-127 m 中段采场顶板已具备了塌陷的力学条件。

3) 在得出采场顶板失稳的围岩条件与力学条件的基础上,根据采场现状图建立了与矿区空间形态相似的三维有限元模型,经计算得到-127 m 中段顶板部分区域安全系数小于 1,确定了在实际围岩

条件与应力状态下-127 m 中段存在塌陷可能性。

4) 为了掌握顶板的力学动态, 制定出监测方案分析顶板岩移量。监测期内的累积岩移量不超过 18 mm, 单次岩移量监测最大值不超过 2 mm。将监测数据运用时间序列预报分析, 未来一段时期顶板岩移量趋近于 21 mm, 单次岩移量预报最大值趋近于 3 mm, 说明顶板的塌陷势能在逐渐积累, 需要采取支护方案控制岩移量。同时对-127 m 中段顶板应继续采取监测措施, 并定期进行时间序列预报, 掌握岩移量变化趋势, 保证安全。

参考文献:

- [1] 刁心宏, 远洋, 张传信. 金属矿山地质灾害及其研究发展趋势[J]. 金属矿山, 2006(6): 1-4.
DIAO Xinhong, YUAN Yang, ZHANG Chuanxin. Geological disasters of metal mines and trend in their research[J]. Metal Mine, 2006(6): 1-4.
- [2] 罗周全, 徐海, 杨彪, 等. 矿区岩溶地表塌陷神经网络预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 39-44.
LUO Zhouquan, XU Hai, YANG Biao, et al. Prediction of Karst collapse in mining area based on neural network[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 39-44.
- [3] 郭维君, 崔晓艳, 肖桂元, 等. 矿山地质灾害主要类型及防治对策研究[J]. 金属矿山, 2010 (8): 148-151.
GUO Weijun, CUI Xiaoyan, XIAO Guiyuan, et al. Major geological disasters type in mining and its control counter measures[J]. Metal Mine, 2010 (8): 148-151.
- [4] 吴超凡. 安溪县后井矿区地面塌陷形成机理与防治[J]. 化工矿物与加工, 2010(10): 38-41.
WU Chaofan. Research on the causes for the ground collapse in Jiandou Town, Anxi County[J]. Industrial Minerals & Processing, 2010(10): 38-41.
- [5] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 185-192.
- [6] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 205-284.
- [7] 叶姗, 欧阳治华, 龚剑. 普得铁矿残矿回采时岩体稳定性综合评价[J]. 金属矿山, 2010 (9): 155-158.
YE Shan, OUYANG Zhihua, GONG Jian. Comprehensive evaluation of stability in Pu-De Mine while mining residual ore[J]. Metal Mine, 2010(9): 155-158.
- [8] 杨叔子, 吴雅, 轩建平, 等. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 175-311.
- [9] TURE M, KURT I. Comparison of four different time series methods to forecast hepatitis virus infection[J]. Expert Systems with Application, 2006, 31: 41-46.
- [10] ALONSO A M, BERRENDERO J R, HERNANDEZ A, et al. Time series clustering based on forecast densities[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51: 762-776.
- [11] 丛爱岩, 成枢, 刘春. 时序分析法在岩层与地表移动中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 159-161.
CONG Aiyun, CHENG Shu, LIU Chun. Application of time series analysis to strata and ground movement[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(2): 159-161.
- [12] 刘晓菲. 冲击地压电磁辐射前兆信息的时间序列数据挖掘及群体识别体系研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 96-134.