

基于 FLAC^{3D}-RSM 的采空区失稳概率分析及验证

罗周全, 谭浪浪, 邓俏

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 针对某矿山开采后存在大量残留采空区容易导致安全生产事故的工程实际, 为了准确判定这些采空区的稳定性情况, 以该矿山 54-6# 采空区为例, 运用 Midas 前处理功能生成网格模型导入到 FLAC^{3D} 进行数值分析, 并结合计算响应面法 (RSM), 对采空区发生失稳破坏的可能性进行综合分析, 结果表明该采空区存在失稳风险。然后对该空区进行先后两次精密探测, 将两次测量的空区模型进行差异分析, 验证了数值分析和失稳概率分析结论的正确性。本文对矿山其他的残留采空区的稳定性的评价找到一种可靠方法, 对矿山的安全生产具有一定的指导意义。

关键词 响应面法; FLAC^{3D}; 失稳概率

中图分类号 TD853

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.10.006

Probability Analysis and Verification of Cavity Instability Based on FLAC^{3D}-RSM

LUO Zhouquan, TAN Langlang, DENG Qiao

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In view of the safety misadventure due to many residue mined-out cavities after mining in practical projects, the stability of cavities must be evaluated accurately. The cavities in 54-6# mine were taken as an example in this study. Using the powerful pre-processing functions of Midas, the grid model was generated to be used in FLAC^{3D} for numerical analyses. Results show that there has a large tensile stress on both sides of the cavity. In view of this fact, with the response surface calculation method, the possibility of instability damage of the cavity is analyzed. It is shown that the cavity imposes the obvious instability risk. Then, the cavity model was measured twice, to validate the accuracy of the results and verify the conclusion of the numerical analysis and the instability probability analysis on the cavity. This paper provides a reliable evaluation method for the stability of mined-out cavities.

Keywords RSM; FLAC^{3D}; instability probability

0 引言

在地下矿山开采活动中, 由于充填不及时, 在一定时间内往往有多个残留采空区 (后面简称采空区) 存在的情况。而这些采空区的存在导致矿山的开采环境进一步恶化, 对于矿山本身而言是一个潜在的安全隐患^[1]。因此, 进行矿山采空区稳定性分析对矿山的安全生产具有重大意义。有学者单独运用 FLAC^{3D} 有限差分法软件对复杂空区群的稳定性进行过研究^[2], 或者考虑动力扰动因素对采空区进行数值分析^[3-4], 以及

层次分析法等。而这些大多运用都有一定的限制性, 不能完全反映采空区所处力学特性复杂、岩体性质不确定的实际情况。因此, 无法确保其所做出的稳定性评判结果的正确性。

矿山采空区存在于复杂力学特性的岩体中, 岩体性质具有不确定性。可靠度分析结果能反映各种不确定性和随机性, 特别适合矿山采空区所处的实际环境, 并可使确定性因素定量化, 为工程计算提供更有理论依据、更客观的工具。为了准确判定采空区的稳定情况, 确保矿山的安全生产, 针对

收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-04-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2007BAK22B04-12); 中南大学研究生学位论文创新项目 (1960-71131100008)

作者简介: 罗周全, 教授, 研究方向为矿床深井开采与安全预警数字化技术, 电子信箱: lzq505@hotmail.com

某矿山的工程实际,对其 54-6# 采空区分别进行 FLAC^{3D} 数值分析、计算响应面法(RSM)的失稳概率分析。两种分析结果都显示采空区不稳定,失稳概率达百分之三十几,实测验证与分析结果基本吻合,从而证明了采用该方法分析采空区的失稳概率是有效的,为矿山提供了一种采空区稳定性分析的实用方法。

1 FLAC^{3D} 数值分析

1.1 分析模型构建

将在 Surpac 中构建好的采空区三维实体模型^[2-5]转换至 GTS 中构建前处理模型^[6],将前处理模型转换为 FLAC^{3D} 计算模型。利用 Midas/GTS 构建地层模型,经过对几何体进行运算,完成 54-6# 空区的三维几何建模。模型 x, y, z 方向的尺寸为:150m×130m×200m,采场部分采用 2m×2m×2m 四面体单元,其他部分采用 5m×5m×5m 四面体单元,该模型共有 201143 个单元。图 1 为利用 Midas/GTS-FLAC^{3D} 转换所生成的三维模型在 FLAC^{3D} 中的显示效果。

选用摩尔-库伦准则,根据矿山岩体物理力学参数及实

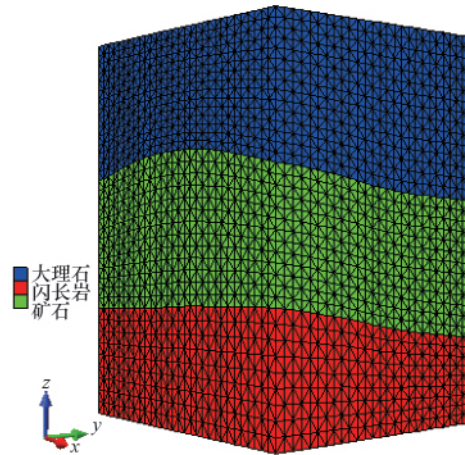


图 1 计算模型 FLAC^{3D} 格式数据

Fig. 1 Calculation model with FLAC^{3D} formatted data

测的原岩应力确定各种参数及初始应力(见表 1、表 2);采用位移约束的边界条件,在模型的左右边界、前后边界及底边

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

矿岩类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗拉强度 σ/MPa	内摩擦角 $f/(\text{°})$	黏聚力 c/MPa
大理岩	14870	0.26	27.1	2.24	45	1.71
砂卡岩	34320	0.25	39.7	3.04	48	3.69
石英闪长岩	30070	0.26	27.2	2.78	46	2.75

表 2 原岩应力实测结果

Table 2 Original rock stress based on test results

测点	主应力/MPa			主应力倾角 $\alpha/(\text{°})$			主应力方位角 $\beta/(\text{°})$		
	σ_1	σ_2	σ_3	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3
1	32.75	12.23	8.69	2.25	25.81	64.08	48.31	317.22	142.95
2	34.33	16.47	13.84	6.37	44.39	44.9	248.42	152.13	344.81

界采用零位移边界条件,上边界为自由边界。该矿山采用的是嗣后充填法,采空区在充填之前要经受正在开采的其他采场开采扰动。而最为主要的就是爆破产生的动力扰动作用。在底部采用黏滞边界,将质点的振动时程曲线转化为动应力形式,再在计算模型中输入爆破动应力。实测的爆破震动速度时程曲线如图 2 所示。

1.2 数值结果分析

对上述构建的模型进行数值运算,结果如图 3 所示。采空区开挖引起应力释放,导致围岩产生拉应力。

由图 3(a)采空区的最大主应力云图可知,采空区的顶板、底板均没有出现拉应力集中,顶、底板都处于压应力作用下;采空区两帮出现了拉应力集中。最大主应力达到了

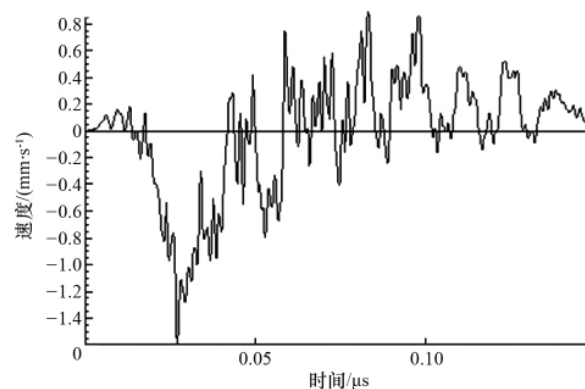


图 2 爆破震动时程曲线

Fig. 2 Time-history curve of concussion blasting

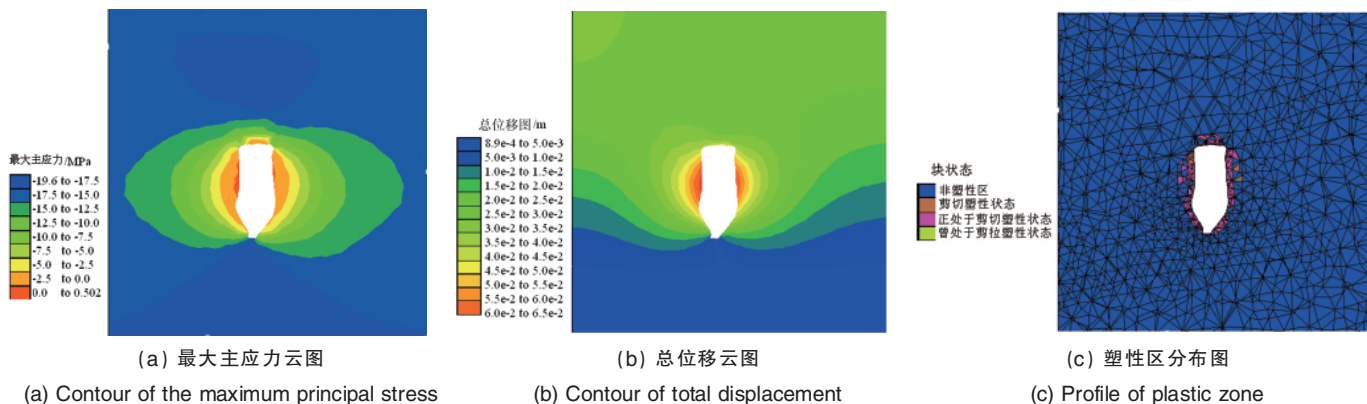


图3 数值结果分析
Fig. 3 Numerical results

2.91MPa, 非常接近围岩的单轴抗拉强度 3.04MPa, 围岩处于拉升破坏的临界状态; 对于采空区顶板而言, 顶板处于压应力作用下, 不存在拉应力作用, 说明采空区的两帮比采空区顶板更易发生拉升破坏。从图 3(b)可知, 采空区整体位移分布基本服从近似对称特性规律, 采空区两帮围岩位移最大。图 3(c)为采空区形成后围岩塑性区分布图, 从图可以看出, 塑性区的分布主要出现在空区的两帮, 且主要为剪切屈服破坏, 顶板、底板也产生了少量塑性区。

综合以上分析表明, 采空区的两帮的最大拉应力达到了 2.91MPa, 两帮的最大位移达到了 +6.83cm, 并且出现了较大范围的剪切破坏塑性区, 而采空区顶板的最大主应力为 -2.5MPa (为压应力状态), 采空区顶板的位移为 -7.0cm 并且出现了少量塑性区, 说明采空区如果发生失稳最可能从两帮开始, 而且确实存在失稳的可能性。

2 响应面法失稳概率分析

(1) 计算变量确定

响应面法^[10-13]是数学方法和统计方法结合的产物。该矿山矿床规模大、范围广, 围岩种类多, 北京有色冶金设计研究院对矿石和顶底板岩石进行了物理力学试验, 取得了大量数据资料。根据所获得的岩石力学参数, 以及 FLAC^{3D} 数值模拟分析时所需要的岩石力学参数, 选定弹性模量 $E(x_1)$ 、密度 $\rho(x_2)$ 、泊松比 $\mu(x_3)$ 、黏聚力 $c(x_4)$ 和内摩擦角 $f(x_5)$ 作为基本随机变量, 并记为 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 。失稳概率分析的数据见表 3。

(2) 失稳判断准则

围岩是否发生失稳, 需要用 一个判断准则进行判断。据多数专家对围岩破坏机理的认识, 采空区围岩失稳的判断准

表 3 力学参数汇总

Table 3 Mechanical parameters

岩性	弹性模量 E/GPa		密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$		泊松比 μ		黏聚力 c/MPa		内摩擦角 $f/(\text{°})$		抗拉强度 σ/MPa	
	均值 μ	均方差 σ	均值 μ	均方差 σ	均值 μ	均方差 σ	均值 μ	均方差 σ	均值 μ	均方差 σ	均值 μ	均方差 σ
砂卡岩	34.32	0.65	39.69	0.35	0.25	0.04	3.69	0.07	48	4.0	3.04	0.10

则主要有应力准则、位移准则和剪应变准则。这里选用应力准则、位移准则和塑性区范围进行采空区失稳综合判断。

(3) 允许失效概率确定

允许的风险水平是由破坏概率和破坏后果决定的, 反映了决策者对风险所采取的态度, 因此, 受到决策者的主观判

断, 又要考虑工程性质和重要程度, 实际破坏的经验数据, 以及所承担风险与可能得到的经济受益之间的权衡。针对采空区失稳破坏后果的严重程度、破坏后遭受危险的平均人数, 将采空区的安全级别划分为稳定、较稳定、失稳概率较大和失稳概率很大 4 种, 确定采空区的允许失效概率见表 4。

表 4 采空区允许失效概率

Table 4 Allowable failure probability of cavity

P_f	采空区安全级别	后果
$<10\%$	稳定	不造成人员伤亡、设备损失; 或者造成个别人员轻伤, 或造成直接经济损失 100—1000 元
$10\% \leq P_f < 25\%$	较稳定	造成人员轻度伤亡、设备损失, 或造成直接经济损失 1000—10000 元
$25\% \leq P_f \leq 40\%$	失稳概率较大	造成 1—2 人死亡, 或造成直接经济损失 10000 元
$P_f > 40\%$	失稳概率很大	造成 3 人以上人员死亡, 或造成经济损失超过 10000 元

(4) 功能函数获取

根据 RSM 的基本原理,本次失稳概率分析设计试验点 x_i 法采用中心复合设计法,有弹性模量 $E(x_1)$ 、密度 $\rho(x_2)$ 、泊松比 $\mu(x_3)$ 、黏聚力 $c(x_4)$ 和内摩擦角 $f(x_5)$ 5 个随机变量,一共有 $n=5$ 个因子,为了确定拟合 RSM 的功能函数 $\bar{g}(x)$ 的各项系数 $\{A\}$ 的值,一共进行 $2n+1=2 \times 5+1=11$ 次有限元数值模拟计算。

对每个因子取 $X_i = \mu_{xi} \pm f\sigma_{xi}$ (本文选取 $f=3$) 为试验点,作为数值模拟计算的参数,做 11 次数值模拟。设初始迭代点 $x^{(1)} = (34.32, 39.69, 0.25, 3.69, 48)$, 取试验点 $x_i = \mu_{xi} \pm 3\sigma_{xi}$ 及 $x_i = \mu_{xi}$, 即迭代点为 $(36.27, 39.69, 0.25, 3.69, 48)$, $(32.37, 39.69, 0.25, 3.69, 48)$, $(34.32, 40.74, 0.25, 3.69, 48)$, $(34.32, 38.64, 0.25, 3.69, 48)$, $(34.32, 39.69, 0.37, 3.69, 48)$, $(34.32, 39.69, 0.13, 3.69, 48)$, $(34.32, 39.69, 0.25, 3.9, 48)$, $(34.32, 39.69, 0.25, 3.48, 48)$, $(34.32, 39.69, 0.25, 3.69, 60)$, $(34.32, 39.7, 0.25, 3.69, 36)$, 分别进行数值模拟,得到一系列不同的位移、应力、应变、塑性区的结果数值,代入功能函数值

$$Z^{(i)} = g(X^{(i)}) = R - S$$

$$= a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + c_1x_1^2 + c_2x_2^2 + c_3x_3^2 + c_4x_4^2 + c_5x_5^2$$

获得相应功能函数值 Z 为 $\{2.20, 2.23, 2.31, 2.35, 2.37, 2.41, 2.35, 2.40, 2.36, 2.40, 2.40\}$, 将这些点及相应的 Z 值代入响应面中,得到如下线性方程组:

$$X \cdot A = G$$

其中,
 $X =$

134.32	39.70	0.25	3.69	48	1177.8624	1575.2961	0.0625	13.6161	2304
136.27	39.70	0.25	3.69	48	1315.5129	1575.2961	0.0625	13.6161	2304
132.37	39.70	0.25	3.69	48	1047.8169	1575.2961	0.0625	13.6161	2304
134.32	40.74	0.25	3.69	48	1177.8624	1659.7476	0.0625	13.6161	2304
134.32	38.64	0.25	3.69	48	1177.8624	1493.0496	0.0625	13.6161	2304
134.32	39.70	0.37	3.69	48	1177.8624	1575.2961	0.1369	13.6161	2304
134.32	39.70	0.13	3.69	48	1177.8624	1575.2961	0.0169	13.6161	2304
134.323	9.70	0.25	3.90	48	1177.8624	1575.2961	0.0625	15.2100	2304
134.32	39.70	0.25	3.48	48	1177.8624	1575.2961	0.0625	12.1104	2304
134.32	39.70	0.25	3.69	60	1177.8624	1575.2961	0.0625	13.6161	3600
134.32	39.70	0.25	3.69	36	1177.8624	1575.2961	0.0625	13.6161	1296

$$A = (a \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5 \quad c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5)^T$$

$$G = (2.20 \quad 2.23 \quad 2.31 \quad 2.35 \quad 2.37 \quad 2.41 \quad 2.35 \quad 2.40 \quad 2.36 \quad 2.40 \quad 2.40)^T$$

解此线性方程组,得到:

$$a = 1136.57923135364; b_1 = -1.14511715075067;$$

$$b_2 = -32.8235634811766; b_3 = -354.8611111111111;$$

$$b_4 = -98.1280276816608; b_5 = -9.61092214663643;$$

$$c_1 = 0.0162696438873023; c_2 = 0.412741960067062;$$

$$c_3 = 693.0555555555556; c_4 = 13.1968473663975;$$

$$c_5 = 0.0990803728898967。$$

由此得到由 RSM 拟合的采空区可靠性功能函数:

$$Z^{(1)} = 1136.57923135364 - 1.14511715075067x_1 -$$

$$32.8235634811766x_2 - 354.8611111111111x_3 -$$

$$98.1280276816608x_4 - 9.61092214663643x_5 +$$

$$0.0162696438873023x_1^2 + 0.412741960067062x_2^2 +$$

$$693.0555555555556x_3^2 +$$

$$13.1968473663975x_4^2 + 0.0990803728898967x_5^2$$

可靠度指标 $\beta^{(1)} = 0.20938822848296$ 。

根据公式求得新的展开点:

$$x^{(2)} = (31.4973864689527, 39.4747914735867,$$

$$0.270018535681186, 3.80343836886005, 48)$$

采用 Matlab 软件计算,得

$$\beta^{(9)} = 0.490353365922, \beta^{(8)} = 0.48881974602975, \beta^{(9)} - \beta^{(8)} =$$

$$0.00153361989225 < 0.001$$

满足 $|\beta^{(k)} - \beta^{(k-1)}| < \varepsilon = 0.001$ 停止迭代,此时,可靠性功能函数为

$$Z^{(9)} = 10000.9110840682 - 10.2730988681154x_1 -$$

$$289.401039363846x_2 - 3105.6796161222x_3 -$$

$$880.145738792158x_4 - 85.2329700280209x_5 +$$

$$0.148103437676397x_1^2 + 3.64060356652928x_2^2 +$$

$$6184.37500000001x_3^2 + 118.987889273358x_4^2 +$$

$$0.885487528344666x_5^2$$

求得可靠指标 $\beta^{(9)} = 0.490353365922$, 对应的采空区失稳概率为

$$P_f = \Phi(-\beta) = 0.311941935008868 \approx 31.2\%$$

(5) 失稳概率分析

采空区失稳破坏的可能性有多大,要分析和讨论顶板、两帮围岩二者发生失稳破坏的概率是多少。采空区的稳定性是由采空区顶板和两帮围岩 2 个部件组成的,任何一个部件失效时,结构体系就失效。对于一个由 n 个部件组成的系统,当且仅当所有部件都能正常工作时,系统才能正常工作,假设各部件的可靠度指标分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, 那么各部件的失效度指标分别为 $1 - \beta_1, 1 - \beta_2, \dots, 1 - \beta_n$, 则系统的可靠度指标为 $\beta = \beta_1 * \beta_2 * \dots * \beta_n$, 系统的失效度 $f = 1 - \beta$ 。

对于采空区的失稳概率,在获取采空区顶板和两帮围岩的可靠度后,根据 $P_f = \Phi(-\beta_i)$ 即可得到采空区顶板和两帮围岩的失稳概率,同时得到采空区的失稳概率。

采用前面讲述的 FLAC^{3D}-RSM 方法分别拟合得到采空区顶板和两帮围岩的功能函数,具体见表 5。

根据拟合得到的功能函数,利用 Matlab 软件求解得到相应的失效概率 P_f 和可靠度指标 β , 将计算结果列于表 6。

通过计算可知, $P_{f \text{ 顶板}} < P_{f \text{ 两帮}}$, 那么 54-6# 采空区的失效概率 P_f 为

$$P_f = P_{f \text{ 两帮}} = 31.19\%$$

经计算得到了 54-6# 采空区的失稳概率为 31.19%, 综合考虑位移、强度失效概率以及采空区塑性区变化情况,根据采空区允许失效概率分布表, 54-6# 采空区的安全级别属于失稳概率较大,采空区很可能发生失稳破坏,而两帮围岩失

表 5 采空区可靠性功能函数
Table 5 Cavity reliability function

名称	失效准则	拟合功能函数
采空区顶板	位移准则	$Z^{(9)}=2188.6779-2.8899x_1-63.5662x_2-691.8146x_3-176.7376x_4-18.7707x_5+0.0407x_1^2+0.7984x_2^2+1362.5x_3^2+23.7240x_4^2+0.1946x_5^2$
	强度准则	$Z^{(9)}=10.9448-0.0518x_1-0.2199x_2-8.9488x_3-7.5633x_4+0.0755x_5+0.0008x_1^2-0.0027x_2^2+18.75x_3^2+0.9516x_4^2+0.0009x_5^2$
采空区两帮围岩	位移准则	$Z^{(9)}=10000.9111-10.2731x_1-289.4010x_2-3105.6796x_3-880.1457x_4-85.2329x_5+0.1481x_1^2+3.6406x_2^2+6184.3750x_3^2+118.9879x_4^2+0.8855x_5^2$
	强度准则	$Z^{(9)}=65.4239-0.5751x_1-1.7203x_2-2.9055x_3-7.4186x_4-0.4194x_5+0.0075x_1^2+0.0302x_2^2+62.5x_3^2+0.7353x_4^2+0.0054x_5^2$

表 6 失效概率和可靠度指标计算值
Table 6 Calculation values of failure probability and reliability index

名称	位移失效准则		强度失效准则	
	可靠度指标 β	失效概率 P_f	可靠度指标 β	失效概率 P_f
顶板	1.031064	0.1513	0.968326	0.1664
两帮	0.490353	0.3119	0.514909	0.2893

稳概率明显要比顶板失稳概率更大。

3 验证

为准确掌握该矿 54-6# 采空区的失稳破坏情况, 获取其失稳破坏的准确信息^[7-9], 并对概率分析结果进行验证, 在 54-6# 采空区充填之前对其进行了第二次现场探测。将两次的采空区实测三维模型进行复合, 如图 4(a) 所示, 为了更好地显示采空区的失稳情况, 沿采空区长轴方向对复合模型进行剖切, 剖面图如图 4(b) 所示。将两次探测所获得的采空区三维实体模型进行布尔运算, 获得 54-6# 采空区垮塌区域的实体模型, 如图 5 所示。

从图 4、图 5 可以看出, 54-6# 采空区两帮发生了失稳破

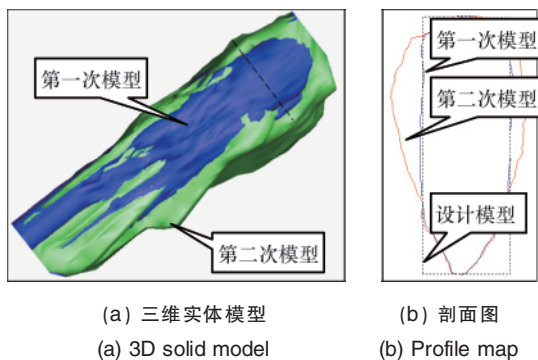


图 4 54-6# 采空区三维模型复合
Fig. 4 3D model compound of 54-6# cavity



图 5 54-6# 采空区垮塌区域三维实体模型
Fig. 5 Collapse of 3D entity model of the 54-6# cavity

坏, 造成了采空区两帮大量垮塌, 其垮塌量达到 8562m³, 而采空区顶板位置没有发生大规模失稳破坏, 实测结果表明 54-6# 采空区确实发生了失稳破坏, 而且失稳破坏主要发生在采空区两帮位置, 分析结果与实测结果吻合。

4 结论

- (1) 针对某铜矿采空区的工程实际, 综合运用 Midas、FLAC^{3D} 对 54-6# 采空区进行数值分析, 得出采空区可能发生失稳破坏的分析结果;
- (2) 运用计算响应面法 (RSM) 开展该矿采空区失稳破坏的概率分析研究, 计算得到 54-6# 采空区发生失稳破坏的概率为 31.19%, 存在较大的失稳破坏概率;
- (3) 通过前后两次对所研究的采空区实测模型对比分析, 数值分析结果和概率分析结果都与实测结果相吻合, 表明使用该方法对矿山采空区失稳的可能性进行分析是有效的。形成了一种适用于矿山采空区的基于 FLAC^{3D}-RSM 的采空区失稳概率计算方法, 为矿山采空区失稳破坏分析提供了新的途, 对提前预警采空区的安全, 指导矿山的安全生产具有一定的实际意义。

参考文献 (References)

[1] 古德生, 李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术 [M]. 北京: 冶金工业出

- 版社, 2006.
- Gu Dsheng, Li Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [2] 罗周全, 杨彪, 刘晓明, 等. 基于 CMS 实测及 Midas-FLAC^{3D} 耦合的复杂空区群稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2010, 30(6): 1-5.
- Luo Zhouquan, Yang Biao, Liu Xiaoming, et al. *Mine and Metallurgical Engineering*, 2010, 30(6): 1-5.
- [3] 杨金林, 李夕兵, 周子龙, 等. 动力扰动对采空区稳定性影响的离散元分析[J]. 科技导报, 2010, 28(24): 48-52.
- Yang Jinlin, Li Xibing, Zhou Zilong, et al. *Science and Technology Review*, 2010, 28(24): 48-52.
- [4] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC3D 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894-2899.
- Yan Changbin, Xu Guoyuan, Li Xibing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [5] 罗周全, 刘晓明, 苏家红, 等. 基于 Surpac 的矿床三维模型构建 [J]. 金属矿山, 2006(4): 33-36.
- Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, Su Jiahong, et al. *Metal Mine*, 2006(4): 33-36.
- [6] Luo Z, Liu X, Su J, et al. Deposit 3d modeling and application[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(2): 225-229.
- [7] Jarosz A P, Shepherd L. Open stope cavity monitoring for the control of dilution and ore loss[J]. *Mining Engineering*, 1998(8): 63-67.
- [8] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型自动生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334-1337.
- Luo Zhouquan, Wu Yabin, Liu Xiaoming, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1334-1337.
- [9] Hart R, Cundall P A, Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element model -part II. Mechanical calculation formation and interaction of a system composed of many polyhedral blocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1998, 25(3): 117-125.
- [10] 武清玺, 俞晓正, 赵魁芝. 响应面法及其在混凝土面板堆石坝可靠度分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1506-1511.
- Wu Qingxi, Yu Xiaozheng, Zhao Kuizhi. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1506-1511.
- [11] 李广慧, 刘晨宇, 托拉·欧尼弗里奥. 响应面方法及其在桥梁体系可靠度分析中的应用[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25(1): 16-21.
- Li Guanghui, Liu Chenyu, Onoufriou Toula. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2004, 25(1): 16-21.
- [12] 佟晓利, 赵国藩. 一种与结构可靠度分析几何法相结合的响应面方法[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 51-57.
- Tong Xiaoli, Zhao Guofan. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(4): 51-57.
- [13] 徐军, 郑颖人. 基于响应面方法的围岩参数随机反分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 167-170.
- Xu Jun, Zheng Yingren. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(2): 167-170.

(责任编辑 代丽)

《科普研究》简介



《科普研究》(双月刊)是由中国科普研究所主办、中国科学技术协会主管的专业学术期刊,逢双月出版。它的刊文范围包括科技传播、科学教育、科普展教、科学与文化等领域。本刊以“促进科学技术普及理论的研究,推动科普事业的发展”为办刊宗旨,以“百家争鸣、探索求是创新”为办刊方针,坚持聚焦中外科技传播前沿动态,促进科技的传播与发展,为广大科技传播和科普工作者搭建一个活跃学术思想、发表学术论文的平台,努力为提高公民科学素质、促进科技创新、经济发展及人文进步做贡献。欢迎广大科普理论研究和科普实践工作者订阅、投稿。

网 址: <http://kpyj.crsp.org.cn>。

联系电话:010-62103301, 62103285。

电子信箱: kepuyanjiu2005@sina.com。

通信地址:北京市海淀区学院南路 86 号 (100081)。

邮发代号:80-564。