



## 利用 Mathews 合成图与动静荷载 数值模拟评价倾斜矿体采场稳定性

张宗国, 史秀志, 邱贤阳

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 倾斜矿体采场在开采后会暴露出较大的顶板及上盘, 稳定性状况非常复杂, 为了研究其稳定性及稳定的概率, 本文通过 Mathews 合成图、考虑静荷载和爆破动荷载的 FLAC3D 数值模拟两种方式展开了研究。以某铅锌矿四个倾斜矿体采场为研究对象, 采用  $RMR$  及  $Q'$  值法进行了岩体分级, 使用重新绘制的考虑稳定等概率线的 Mathews 合成图和拟合的稳定等概率线公式, 得到了四个采场顶板及上盘的稳定性状况和稳定概率; 采用 FLAC3D 中加入爆破荷载的方式研究了采场在静力和动力下的稳定性。结果表明: 由于考虑了暴露时间对采场稳定性的影响, 发现暴露时间对岩性较差的采场影响尤其显著; Mathews 稳定图法与数值模拟法相互验证, 可较全面地分析倾斜矿体采场的稳定性。

**关键词:** 岩体分级; Mathews 稳定图; 数值模拟; 动态扰动; 稳定概率

文章编号: 1004-0609(2022)-05-1504-11

中图分类号: TD853

文献标志码: A

**引文格式:** 张宗国, 史秀志, 邱贤阳. 利用 Mathews 合成图与动静荷载数值模拟评价倾斜矿体采场稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1504–1514. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40168

ZHANG Zong-guo, SHI Xiu-zhi, QIU Xian-yang. Stability evaluation of inclined orebody stopes by using Mathews stability synthetic graph and numerical modeling of static and dynamic loads[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1504–1514. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40168

长久以来, 为保障矿山安全高效开采, 首先就要分析采场的稳定性。影响地下采场稳定性的因素错综复杂, 而倾斜矿体采场开采后有顶板及上盘两个对安全影响很大的暴露面, 其稳定性分析更加困难, 因此选择合适的分析方法是十分必要的。

目前分析采场稳定性的方法主要有经验方法、数值模拟、相似模型试验三大类, 经验方法中如 MATHEWS 等<sup>[1]</sup>建立了稳定图表, 将采场的岩体稳定性系数与形状因子(水力半径)建立了联系, 之后 MAWDESLEY<sup>[2]</sup>对采场数据库进行了扩充, 冯兴隆等<sup>[3]</sup>给出了采场崩落线的函数表达式, 这些方法提高了稳定图的预测能力及适用性, 近年来也有一些

学者将人工智能技术运用到采场稳定性预测中, 如 ZHOU 等<sup>[4]</sup>、MOHANTO 等<sup>[5]</sup>对采场矿柱进行了稳定性评价, GOH 等<sup>[6]</sup>使用多元自适应回归样条将  $RMR$  值与采场跨度建立了联系; 数值模拟中一些学者使用 FLAC3D 研究了采场不同的几何参数<sup>[7]</sup>、地应力情况<sup>[8]</sup>对采场稳定性评价的影响, 还有一些学者使用响应面实验设计和数值模拟<sup>[9–10]</sup>研究了各影响因素与采场稳定性之间的关系。此外, 相似模型试验<sup>[11]</sup>也是一种重要的研究采场稳定性的方法, 但是试验成本高、可重复性较低。除了采用单一方法外, 许多学者<sup>[12–14]</sup>还将经验、理论与数值模拟相结合来研究采场的稳定性。以上方法在判别采

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004329, 51874350)

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-07-08

通信作者: 史秀志, 教授, 博士; 电话: 13974801752; Email: baopo@csu.edu.cn

场稳定性时取得了良好的效果,但在获取稳定概率上并不够直观和方便,分析中往往未考虑暴露时间的影响,大多数数值模拟仅考虑了静荷载未考虑爆破荷载的影响,且查阅文献发现对倾斜矿体采场稳定性研究的报道也比较少。

针对以上问题,本文以某铅锌矿倾斜矿体采场为研究对象,拟合了稳定等概率线方程,并将采场暴露时间作为重点因素进行了分析,此外还在数值模拟中加入爆破荷载研究采场在静力及动力下的稳定性。研究结果与现场实际较为符合,对倾斜矿体的安全开采有一定的指导意义。

## 1 现场介绍

广东省某铅锌矿经过50多年的开采,目前在地下深部出现了大量倾角在 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 之间且品位较高的矿体,给矿山生产带来了一定的困难。矿山将盘区机械化上向中深孔分层充填法(以下简称为盘区上向充填法)做了调整以便开采这类矿体。由于这类倾斜矿体的厚度普遍为中厚,因此采场由垂直走向布置变成沿矿体走向布置;为了控制贫化损失,这一分层的采场宽度往往留设得比较大,一般可达15~22 m;为了提升采矿效率,现将一个分段(7~9 m)作一次回采,突破了一次爆破一个分层(4 m左右),因此一次爆破后空区高度最高可达10~12 m。调整之后,采矿方法的最大变化为:由分层改为中深孔分段,且采场宽度变得更宽。调整之后的

采矿示意图如图1所示。

图1所示为使用盘区上向充填法开采一个分段时的示意图,矿体上盘一般为围岩,下盘一般为围岩或隔壁采场开采完成后充的充填体。当上下盘皆是围岩时,一般采场上盘回采至围岩,下盘只打直孔按现有窿形采直;当上盘为围岩,下盘区域为充填体时,采场下盘要求回采至充填体;整个采场可分为拉槽区和侧崩区,拉槽区一般设置天井或者无天井时需要设置“人工拉槽区(打拉槽孔)”,爆破时拉槽区先响,侧崩区后响。

## 2 稳定性分析方法

### 2.1 采场岩体分级方法

根据现场实际调查以及矿山提供的设计资料,选定了四个倾斜矿体采场:Sh209#S采场、Sh209#N采场、ShN6-7#采场以及Shn209#S采场。使用国际上常用的地质力学分类标准RMR分级法(Rock mass rating)、 $Q'$ 系统分级法(Rock mass quality rating)<sup>[15]</sup>进行采场的岩体稳定性评价。

### 2.2 基于 Mathews 合成图的采场稳定性评价方法

Mathews 稳定图解法是一种基于 $Q'$ 系统的来判断采场稳定性的半经验性方法,图中不同区域表征采场在不同岩体性质及不同结构参数(水力半径)下的稳定性状况。

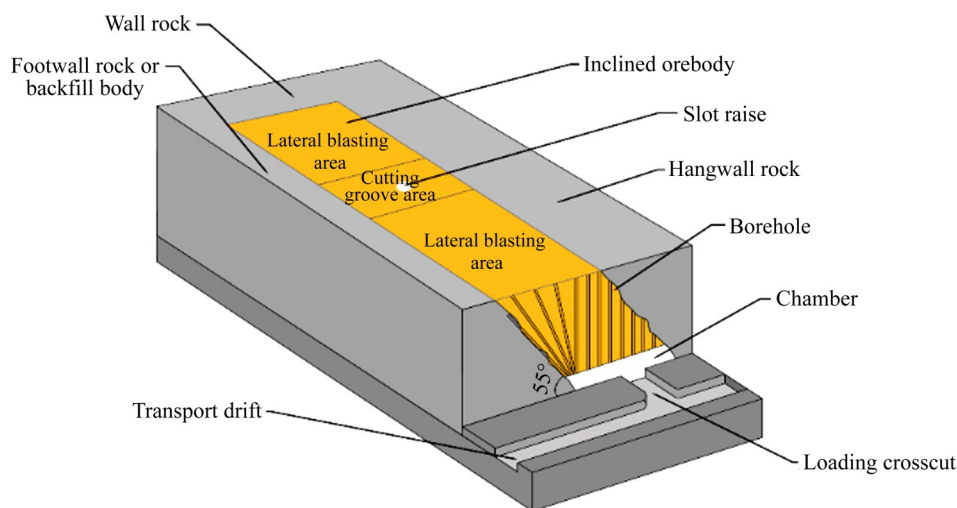


图1 盘区上向充填法开采倾斜矿体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mining inclined orebody by panel upward backfill mining method

### 1) 稳定数 $N$ 与水力半径 $S$ 的参数确定

Mathews 稳定图法综合考虑了与岩体性质有关的岩体稳定性系数 $N$ 和与采场结构参数有关的采场水力半径 $S$ <sup>[1]</sup>。稳定性系数 $N$ 一般通过公式 $N=Q'ABC$ 来确定,其中 $A$ 代表与地应力相关的应力系数, $B$ 代表与岩体中节理裂隙等发育程度有关的岩体缺陷方位修正系数, $C$ 代表暴露面方位修正系数。采场水力半径计算公式为 $S=w/2(w+l)$ ,其中 $w$ 为暴露面宽度, $l$ 为暴露面长度,水力半径即为暴露面面积与周长之比<sup>[1-2]</sup>。

### 2) 考虑等概率线的 Mathews 合成图

将岩体稳定性系数 $N$ 与水力半径 $S$ 在稳定图上进行对应时,往往费时费力、主观性强且出错率高,为此许多科研工作者<sup>[3, 13, 16]</sup>曾将稳定-破坏线、严重破坏线拟合成为较为直观的数学方程式,方便了稳定图的使用。但笔者发现这些成果中稳定等概率线数量少且未对等概率线进行公式化,为此,本文为了更直观地判断采场稳定性状态以及具体稳定的概率,在文献<sup>[2, 12, 16]</sup>提出的稳定图表、稳定等概率图表、破坏等概率图表的基础上进行改进,绘制了 Mathews 稳定图与稳定等概率线的合成图,并拟合了稳定等概率线方程。

合成图被稳定-破坏线、破坏-严重破坏线、严重破坏-崩落线分为稳定区、破坏区、严重破坏区、崩落区四个部分,在稳定区内加入了 95% 稳定、90% 稳定、80% 稳定、20% 稳定的稳定等概率线。稳定-破坏线的稳定概率为 60%,破坏-严重破坏线的稳定概率为 8%<sup>[2]</sup>,破坏区及严重破坏区中的 20% 严重破坏线的稳定概率为 20%,严重破坏-崩落线的稳定概率为 0%<sup>[13, 16]</sup>,各概率线相互平行<sup>[2]</sup>。等概率线通过 MAWDESLEY<sup>[2]</sup>使用 Logit 模型提出以下的概率方程计算:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_kx_k \quad (1)$$

$$f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad (2)$$

$$y = a + b_1 \ln N + b_2 \ln S \quad (3)$$

式中: $y$ 是预测的对数几率值; $f(y)$ 是预测的对数概率值; $a$ 是常数; $b_1$ 、 $b_2 \cdots b_k$ 是回归系数<sup>[2, 13]</sup>。在稳定概率的 Logit 模型中,可用由常数、稳定性系数 $N$ 和水力半径 $S$ 构成的线性函数来表达稳定的概率<sup>[12]</sup>,方程如下:

$$y = 2.9603 + 0.7928 \ln N - 1.4427 \ln S \quad (4)$$

依据式(4),拟合 95% 稳定概率线、90% 稳定概率线、80% 稳定概率线、稳定-破坏线、20% 严重破坏概率线、破坏-严重破坏线方程列于表 1。

## 2.3 考虑暴露时间的倾斜矿体采场稳定性分析

影响采空区稳定性的因素除了岩体性质与采场结构参数之外,采空区暴露时间对其影响也很大,这里参考文献<sup>[17]</sup>加入了时间影响因子 $T$ 对稳定性系数 $N$ 进行修正,修正后为 $N^*=Q'ABCT$ ,文献<sup>[17]</sup>的时间影响因子 $T$ 与岩体质量 $Q'$ 对应关系如表 2 所示。

## 2.4 数值分析方法

以上采用的 Mathews 稳定图法是一种基于经验判断采场稳定性的方法,这里使用 FLAC3D 技术对 Mathews 方法进行验证。数值模拟技术除了考虑静力学之外,还加入了爆破荷载考虑爆破因素对采场稳定性的影响,来研究采场在静力及动力之下的变化。

### 1) FLAC3D 动力分析

① 阻尼设定:使用 FLAC3D 数值模拟技术在进行动力学分析计算时,首先要设定阻尼的大小以及形式。FLAC3D 数值模拟软件中所具有的阻尼形

表 1 稳定等概率线方程表

Table 1 Equations of stable probability lines

| Isoprobability line                                          | Model equation                  |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Stable probability of 95%                                    | $\ln N = 1.8197 \ln S - 0.0201$ |
| Stable probability of 90%                                    | $\ln N = 1.8197 \ln S - 0.9625$ |
| Stable probability of 80%                                    | $\ln N = 1.8197 \ln S - 1.9853$ |
| Stable-failure boundary (stable probability of 60%)          | $\ln N = 1.8197 \ln S - 3.2225$ |
| Major failure probability of 20% (stable probability of 20%) | $\ln N = 1.8197 \ln S - 4.2454$ |
| Failure-major failure boundary (stable probability of 8%)    | $\ln N = 1.8197 \ln S - 6.8362$ |

表 2 暴露时间与时间影响因子对应表

Table 2 Correspondence table of exposure time and time factor  $T$

| Wall exposure time | Time factor, $T$ |           |
|--------------------|------------------|-----------|
|                    | $Q' < 10$        | $Q' > 10$ |
| > 12 months        | 0.2              | 0.3       |
| 5–12 months        | 0.3              | 0.5       |
| 3–5 months         | 0.5              | 0.8       |
| < 3 months         | 0.8              | 1         |

式有瑞利阻尼(Rayleigh)和局部阻尼(Local)<sup>[18]</sup>, 这里采用了应用较多的瑞利阻尼。

② 边界条件设定: FLAC3D 进行地下采场动力分析时常采用黏滞边界(静态边界)条件来吸收边界上的入射波<sup>[19]</sup>。

③ 动载荷的确定与简化: 在进行动力计算时, 如果使用黏滞边界条件, 则必须使用应力时程, 具体计算时, 可通过数据 Table 表或者 Fish 语言来把时程曲线输入到 FLAC3D 里面, 将爆破荷载加在采场底板, 向 Z 轴负方向传播<sup>[18]</sup>。

2) 数值计算模型

以四个采场中岩性最差的 N6-7# 采场和岩性最

好的 209#N 采场为例进行了分析。根据圣维南原理, 工程开挖对周围岩体的应力及位移有明显影响的区域范围为开挖区域的 3~5 倍<sup>[20]</sup>, 因此建立尺寸分别为 120 m×110 m×70 m 及 90 m×110 m×70 m 的模型, 如图 2 所示(N6-7# 采场监测点 2#、3# 位置因在纵剖面上, 故未在图中标注)。

① 力学参数

两个采场计算所需的岩体物理力学参数是根据室内试验确定的铅锌矿岩石物理力学参数折减后得到的, 具体参数见表 3, 表中  $\rho$  是密度,  $K$  是体积模量,  $F_{\text{coh}}$  是内聚力(Cohesion),  $\varphi$  是内摩擦角,  $G$  是剪切模量,  $T$  是抗拉强度。

② 爆破振动荷载的输入

由于未在现场实测爆破振动, 这里采用了较为简洁的三角波的形式, 将作用在结构上的爆破荷载简化为三角形荷载<sup>[21]</sup>, 且只研究最大段药量对采场稳定性的影响, 爆破荷载曲线如图 3 所示。

炮孔压力作用时间约为几百微秒, 按照炸药参数将升压时间  $t_r$  取为 100  $\mu\text{s}$ , 正压作用时间  $t_s$  为 600  $\mu\text{s}$ <sup>[22]</sup>, 模型计算时间为 1 s<sup>[23]</sup>。

根据现场实际情况, 209#N 采场最大段药量为

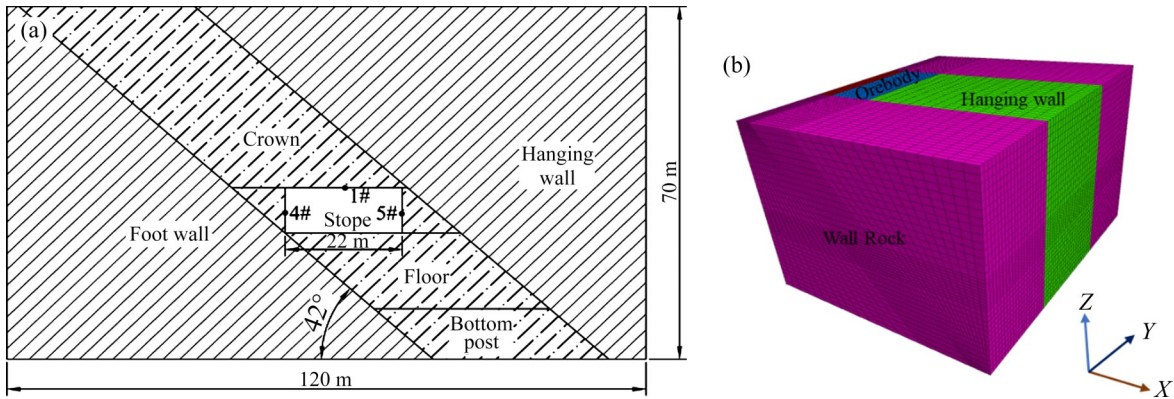


图 2 采场模型示意图

Fig. 2 Numerical calculation model: (a) N6-7# stope; (b) 209#N stope

表 3 岩石和充填体的力学性质表

| Parameter        | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $K/\text{GPa}$ | $F_{\text{coh}}/\text{MPa}$ | $\varphi/(^{\circ})$ | $G/\text{GPa}$ | $T/\text{MPa}$ |
|------------------|----------------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------|----------------|
| Orebody of 209#N | 3500                                   | 14.5           | 3                           | 60                   | 8.75           | 7.9            |
| Orebody of N6-7# | 2500                                   | 9              | 0.3                         | 30                   | 4.5            | 1.2            |
| $D_2^{\text{d}}$ | 2720                                   | 10.1           | 3.05                        | 36                   | 5.75           | 1.6            |
| $D_3^{\text{t}}$ | 2700                                   | 8              | 0.32                        | 47                   | 4.4            | 1.5            |
| Backfilling      | 2200                                   | 5.12           | 0.45                        | 30                   | 2.57           | 0.8            |

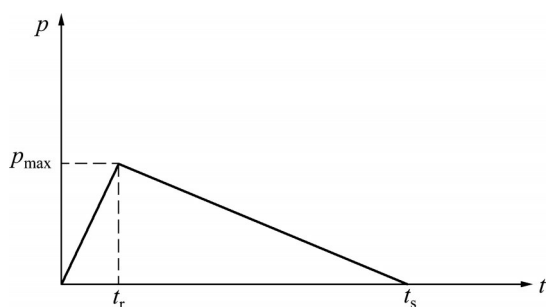


图3 爆破荷载曲线

Fig. 3 Curve of blasting load

330 kg, N6-7#采场最大段药量为 230 kg, 依据式(5)计算爆破荷载应力峰值 $p_{\max}$ <sup>[21, 24]</sup>。

$$p_{\max} = -0.8034 + \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} \quad (5)$$

$$Z = \frac{r}{Q_y^{1/3}} \quad (6)$$

式中： $Q_y$ 为炮孔装药量，kg； $r$ 为炮眼至荷载作用面的距离，m。

### ③ 监测点选取

本模拟主要监测顶板垂直位移、侧帮水平位移以及采空区周围应力情况，故布置垂直位移监测点

在采场顶板中心(图2中的1#)以及顶板两侧(2#、3#)，水平位移监测点布置在采场两个侧帮中间(4#、5#)。

## 3 结果分析

### 3.1 试验采场岩体分级结果

Sh209#S试验采场矿体上下盘皆为 $D_2d^b$ 围岩(废石)，中等稳固；Sh209#N试验采场矿体上盘为 $D_2d^b$ 围岩，稳固性较好，下盘区域为充填体；ShN6-7#试验采场矿体上下盘为 $D_3t^a$ 围岩(废石)，矿体含泥量大、稳固性很差；Shn209#S采场矿体上下盘皆为 $D_2d^b$ 围岩，稳固性稍差。四个采场几何信息及围岩岩性见表4。

将研究的四个采场岩体性质情况统计于表5， $Q'$ 值与RMR值可用公式 $RMR=9\ln Q'+44$ <sup>[15]</sup>换算。这四个试验采场矿体稳固性分别从较好、中等、稍差到很差，选用这四个采场可以评价在不同岩性、不同结构参数下采场的稳定性。

表4 四个采场几何信息及围岩岩性统计表

Table 4 Statistical results of geometry and rock mass properties of four stopes

| Stope number | Height/m | Hanging wall rock |          |                |               | Span/m |
|--------------|----------|-------------------|----------|----------------|---------------|--------|
|              |          | Rock              | Length/m | Slant height/m | Dip angle/(°) |        |
| Sh209#S      | 12       | $D_2d^b$          | 40       | 17             | 45            | 15     |
| Sh209#N      | 11.1     | $D_2d^b$          | 42       | 14.5           | 50            | 18     |
| ShN6-7#      | 9        | $D_3t^a$          | 42       | 9              | 90            | 22     |
| Shn209#S     | 10.2     | $D_2d^b$          | 60       | 10.2           | 90            | 12     |

表5 岩体分类结果及质量描述表

Table 5 Results of rock mass classification and a quality description

| Stope surface            | RMR | Class no. | $Q'$  | Description         |
|--------------------------|-----|-----------|-------|---------------------|
| Crown of Sh209#S         | 59  | III       | 5.29  | Fair rock           |
| Hanging wall of Sh209#S  | 58  | III       | 4.74  | Fair rock           |
| Crown of Sh209#N         | 69  | II        | 16.08 | Good rock           |
| Hanging wall of Sh209#N  | 66  | II        | 11.52 | Good rock           |
| Crown of ShN6-7#         | 18  | V         | 0.06  | Extremely poor rock |
| Hanging wall of ShN6-7#  | 19  | V         | 0.06  | Extremely poor rock |
| Crown of Shn209#S        | 32  | IV        | 0.26  | very poor rock      |
| Hanging wall of Shn209#S | 38  | IV        | 0.51  | very poor rock      |

### 3.2 基于 Mathews 合成图的采场稳定性结果分析

#### 1) $A$ 、 $B$ 、 $C$ 值及 $N$ 、 $S$ 取值结果

依据取值方法, 将各采场的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  值及计算的稳定数  $N$  与水力半径  $S$  分别列于表 6。

#### 2) 采场稳定性结果分析

将表 6 确定的 Sh209#S、Sh209#N、ShN6-7#、Shn209#S 采场上盘及顶板的稳定数  $N$ 、水力半径  $S$

绘制在 Mathews 稳定图与等概率图的合成图中, 如图 4 所示。

Sh209#S、Sh209#N 采场上盘及顶板、Shn209#S 采场上盘皆处于稳定区, 且在此结构参数下稳定的概率皆较高; ShN6-7# 采场上盘及顶板、Shn209#S 采场顶板皆处于破坏与主要破坏区, 说明在此结构参数下稳定的概率小于 60%, 发生破坏但是不严重, 须加强安全措施, 必要时进行支护或优化采场结构参数来保障安全。四个采场上盘及顶板的稳定概率  $f(y)$  见表 7。

表 6 采场稳定数取值表

Table 6 Stability number value table

| Stope surface            | $A$ | $B$ | $C$ | $N$   | $S/m$ |
|--------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|
| Crown of Sh209#S         | 1   | 0.9 | 1   | 4.76  | 5.45  |
| Hanging wall of Sh209#S  | 1   | 0.4 | 3.8 | 7.20  | 5.96  |
| Crown of Sh209#N         | 1   | 0.9 | 1   | 14.47 | 6.30  |
| Hanging wall of Sh209#N  | 1   | 0.4 | 4.2 | 19.35 | 5.39  |
| Crown of ShN6-7#         | 1   | 0.9 | 1   | 0.05  | 7.22  |
| Hanging wall of ShN6-7#  | 1   | 0.3 | 8   | 0.14  | 3.71  |
| Crown of Shn209#S        | 1   | 0.9 | 1   | 0.23  | 5.00  |
| Hanging wall of Shn209#S | 1   | 0.3 | 8   | 1.22  | 4.36  |

### 3.3 考虑暴露时间因素的采场稳定性结果分析

根据该矿实际情况, 采场爆破结束至出矿完成、充填结束时间一般在 3 个月以内, 据此, 考虑时间影响因素  $T$ , 将修正的稳定性系数  $N^*$  及修正的稳定概率  $f(y)^*$  列于表 7。将考虑暴露时间的稳定概率  $f(y)^*$  与未考虑的  $f(y)$  进行对比, 发现岩性较差的 N6-7# 采场顶板稳定概率由大于 8% 小于 20% 降到

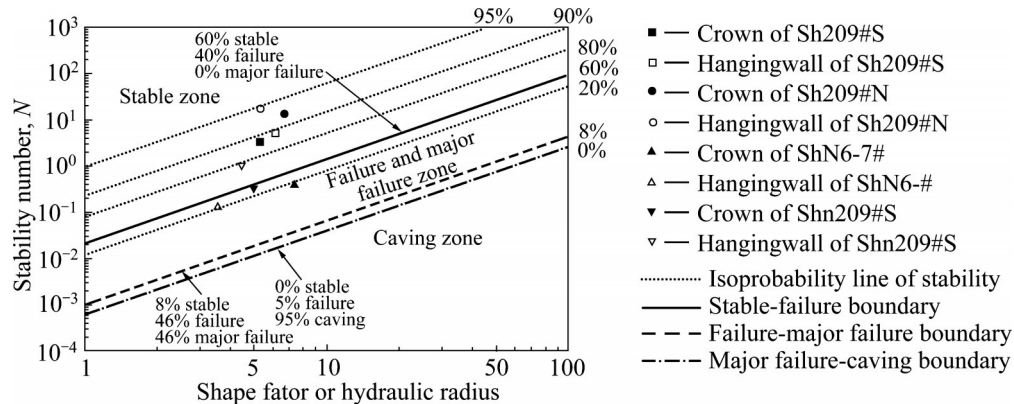


图 4 Mathews 稳定图与等概率线的合成图

Fig. 4 Mathews stability synthetic graph considering stable isoprobability lines

表 7 采场稳定概率及考虑暴露时间的采场稳定概率统计

Table 7 Results of stability probabilities and stope stability considered exposure time of four stopes

| Stope surface            | $f(y)$               | $N^*$ | $f(y)^*$               |
|--------------------------|----------------------|-------|------------------------|
| Crown of Sh209#S         | $>80\%$              | 3.81  | $>80\%$                |
| Hanging wall of Sh209#S  | $>80\%$              | 5.76  | $>80\%$                |
| Crown of Sh209#N         | $>90\%$              | 14.47 | $>90\%$                |
| Hanging wall of Sh209#N  | $>90\%$              | 19.35 | $>90\%$                |
| Crown of ShN6-7#         | $20\% > f(y) > 8\%$  | 0.04  | $<8\%$                 |
| Hanging wall of ShN6-7#  | $60\% > f(y) > 20\%$ | 0.11  | $60\% > f(y)^* > 20\%$ |
| Crown of Shn209#S        | $60\% > f(y) > 20\%$ | 0.18  | $60\% > f(y)^* > 20\%$ |
| Hanging wall of Shn209#S | $>60\%$              | 0.98  | $>60\%$                |

小于8%。因此,暴露时间对于岩性较差采场的影响尤其显著,对于岩性较差的采场应尽快出矿,出矿结束后应立即进行充填,以减小暴露时间对稳定性的影响。

### 3.4 数值模拟结果分析

将两个采场仅考虑静力因素及考虑了动静荷载因素的结果进行出图对比,如图5~7所示。下面以位移变化图、塑性区图、应力变化图分别说明。

由图5可知,采场顶板发生向下的位移,最大位移量出现在顶板靠近中心处,从顶板越往上位移

量越小;底板出现向上的位移。

由以上云图同时可知,两个采场静力计算与动力计算的云图样式基本一致,仅在个别区域存在较小差别,统计位移数据于表8,可直观地对比动力载荷前后的变化。

209#N采场岩性较好,塑性区分布也较少,在下盘充填体部位存在着小部分受剪的区域。通过分析图6加入爆破荷载前后塑性区的变化可发现,加入爆破荷载后,塑性区面积基本没变,但是Shear-n、Shear-p(红色区域)的面积大了很多,说明爆破加深了下盘的破坏。

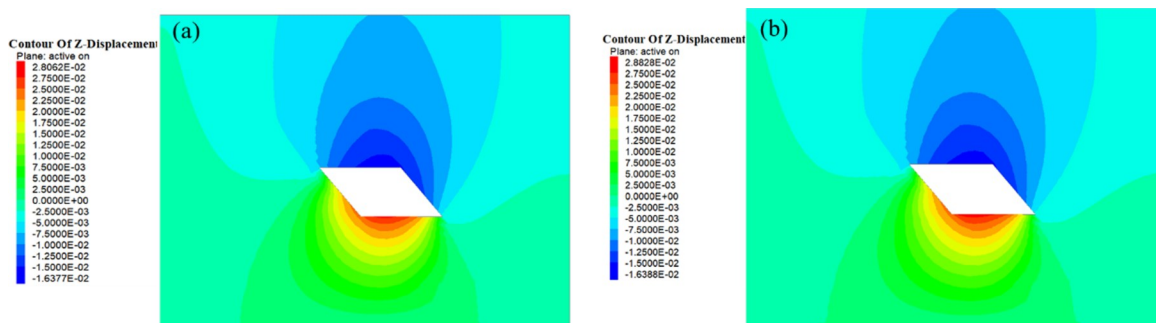


图5 209#N采场横剖面垂直位移云图

Fig. 5 Vertical displacements of 209#N stope cross section: (a) Only static load; (b) Static and dynamic loads

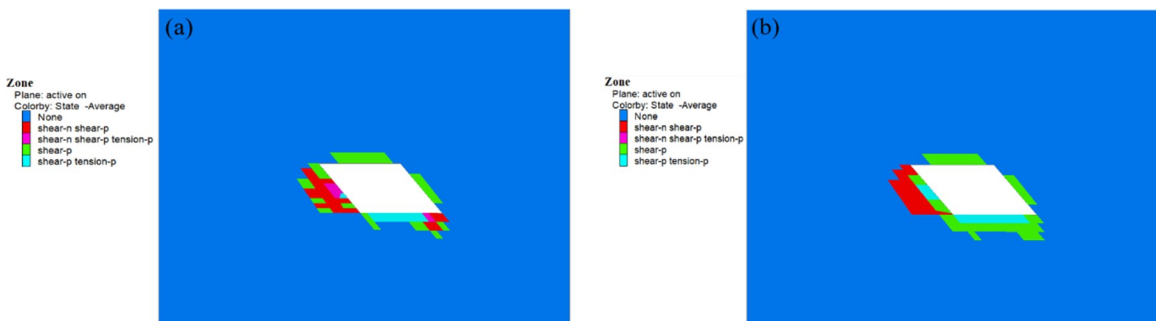


图6 209#N采场横剖面塑性区云图

Fig. 6 Plastic zone distributions of 209#N stope cross section: (a) Only static load; (b) Static and dynamic loads

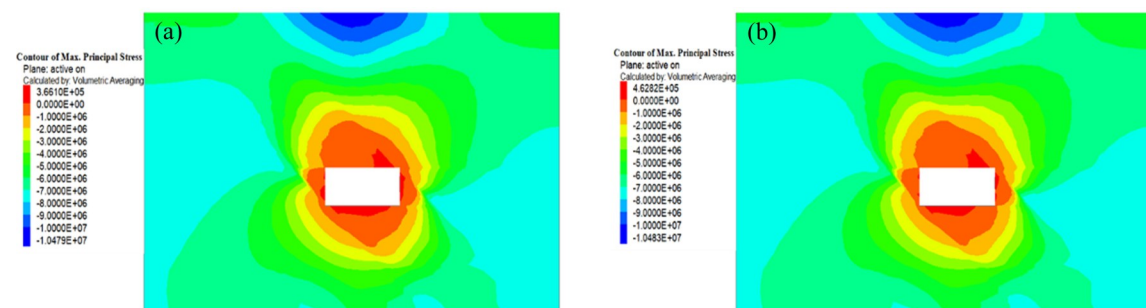


图7 N6-7#采场横剖面最大主应力云图

Fig. 7 Max principal stress of N6-7# stope cross section: (a) Only static load; (b) Static and dynamic loads

FLAC3D 里面压应力表示为负, 拉应力表示为正, 且用最大主应力表示受到的最大拉应力。由图 7 可知, 在采空区靠近顶板处为拉应力, 由顶板往上拉应力逐渐减小, 最终变为压应力。

将监测到的静力学条件下及加入爆破荷载后的垂直、水平位移数值列于表 8 中, 并计算了加入爆破荷载后数值变大的程度。参照文献[25]将位移超过 30 mm 作为顶板及上盘发生破坏的判别标准。表中将超过安全范围的数值用下划线“  ”进行了

标注。

由表 8 可知, 在数值模拟中加入爆破荷载后, 监测到的位移量均增大了。与静力计算相比, 加入爆破荷载后垂直位移、水平位移增大幅度皆未超过 6%, 因此爆破荷载对位移的影响不大。塑性区面积基本相等, 但红色区域(Shear-n、Shear-p)明显增大。由表 8 还可知, ShN6-7#采场稳定性状况较差, Sh209#N 采场的稳定性状况较好, 采用 FLAC3D 模拟的采场稳定性状况与 Mathews 稳定图得到的结果较符合。N6-7#和 209#N 采场采后轮廓如图 8 所示, 可以看出, N6-7#采场稳定性较差, 采后的实际高度(9.7 m)与设计高度(9 m)略有差别, 采后轮廓与设计轮廓存在一定差异, 铲矿及充填过程中出现少量矿石崩落; 209#N 采场的稳定性很好, 采后的实际高度(11.4 m)与设计高度(11.1 m)相差不大, 采场轮廓与设计基本一致, 铲矿及充填过程中未见矿石崩落, 采场实际情况与研究结论基本吻合。

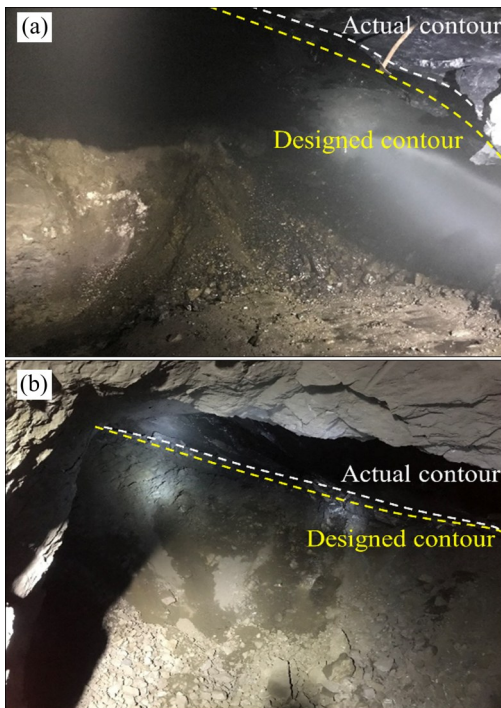


图 8 采场轮廓图

Fig. 8 Contours of stopes: (a) N6-7# stope; (b) 209#N stope

## 4 结论

1) 选取四个倾斜矿体采场, 使用 *RMR* 及 *Q'* 值法进行了采场岩体分级, 将稳定性等概率线加入到 Mathews 稳定图中组成了合成图, 并拟合了稳定等概率线公式, 计算了四个采场顶板及上盘围岩的稳定概率, 得到 Sh209#S 顶板及上盘稳定概率大于 80%, Sh209#N 顶板及上盘稳定概率大于 90%, ShN6-7#顶板稳定概率大于 8% 且小于 20%, 上盘稳定概率大于 20% 且小于 60%, Shn209#S 顶板稳

表 8 数值模拟结果统计及安全程度评价表

Table 8 Results of numerical analysis and stope safety evaluation

| Parameter                                        | 209#N stope |                     |               | N6-7# stope  |                     |               |
|--------------------------------------------------|-------------|---------------------|---------------|--------------|---------------------|---------------|
|                                                  | Static load | After blasting load | Change degree | Static loads | After blasting load | Change degree |
| Vertical displacement of crown center(1#)/mm     | 15.47       | 15.49               | 0.13%         | <u>51.64</u> | <u>51.78</u>        | 0.27%         |
| Vertical displacement of crown left side(2#)/mm  | 6.03        | 6.06                | 0.50%         | 17.21        | 17.36               | 0.87%         |
| Vertical displacement of crown right side(3#)/mm | 6.13        | 6.15                | 0.33%         | 21.07        | 21.37               | 1.42%         |
| Horizontal displacement of foot wall(4#)/mm      | 10.62       | 10.94               | 3.01%         | <u>38.63</u> | <u>38.94</u>        | 0.80%         |
| Horizontal displacement of hanging wall(5#)/mm   | 3.30        | 3.49                | 5.76%         | <u>41.50</u> | <u>41.67</u>        | 0.41%         |
| Safety degree                                    | Good        |                     |               | Very poor    |                     |               |

定概率大于20%且小于60%，Shn209#S上盘稳定概率大于60%；

2) 考虑了暴露时间对稳定性的影响，岩性较差的ShN6-7#顶板稳定概率由大于8%且小于20%降到小于8%，暴露时间对岩性较差采场影响尤其显著；

3) 在FLAC3D中加入了爆破荷载分析了采场在静力和动力下的稳定性，加入爆破荷载后采场顶板垂直位移、上下盘水平位移及塑性区面积增加幅度不大，但塑性区中“Shear-n、Shear-p”区域变化显著。Mathews合成图法与FLAC3D数值模拟两者确定的采场稳定性状态相符。

## REFERENCES

- [1] MATHEWS K E, HOEK E, WYLLIE D C, et al. Prediction of stable excavations for mining at depths below 1000 metres in hard rock[J]. Canmet Report, 1980: 802-1571.
- [2] MAWDESLEY C A. Using logistic regression to investigate and improve an empirical design method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 756-761.
- [3] 冯兴隆, 王李管, 毕林, 等. 基于Mathews稳定图的矿体可崩性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 600-604.  
FENG Xing-long, WANG Li-guan, BI Lin, et al. Collapsibility of orebody based on Mathews stability graph approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 600-604.
- [4] ZHOU J, LI X, MITRI H S. Comparative performance of six supervised learning methods for the development of models of hard rock pillar stability prediction[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 291-316.
- [5] MOHANTO S, DEB D. Prediction of plastic damage index for assessing rib pillar stability in underground metal mine using multi-variate regression and artificial neural network techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(1): 767-790.
- [6] GOH A T C, ZHANG Y, ZHANG R, et al. Evaluating stability of underground entry-type excavations using multivariate adaptive regression splines and logistic regression[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 148-154.
- [7] HEIDARZADEH S, SAEIDI A, ROULEAU A. Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(3): 399-408.
- [8] SAEIDI A, HEIDARZADEH S, LALANCETTE S, et al. The effects of in situ stress uncertainties on the assessment of open stope stability: case study at the Niobec Mine, Quebec (Canada) [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2021, 25: 100194.
- [9] QIU X, CHEN J, SHI X, et al. Deformation prediction and analysis of underground mining during stacking of dry gangue in open-pit based on response surface methodology[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 406-417.
- [10] HEIDARZADEH S, SAEIDI A, ROULEAU A. Assessing the effect of open stope geometry on rock mass brittle damage using a response surface methodology[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 106: 60-73.
- [11] 李东阳, 王波, 刘波, 等. 城市浅部双层不规则老采空区岩层稳定性试验[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 84-92.  
LI Dong-yang, WANG Bo, LIU Bo, et al. Stratum stability test of double-layer irregular old goaf in shallow part of city[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 84-92.
- [12] ZHANG L, HU J, WANG X, et al. Optimization of stope structural parameters based on Mathews stability graph probability model[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1754328.
- [13] 赵永, 杨天鸿, 王薪荣, 等. 基于Mathews稳定图法的采空区稳定性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 74-78.  
ZHAO Yong, YANG Tian-hong, WANG Xin-rong, et al. Stability evaluation of stope based on Mathews graph method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(1): 74-78.
- [14] 解联库, 熊代余, 杨天鸿, 等. 露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析及其治理[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2503-2512.  
XIE Lian-ku, XIONG Dai-yu, YANG Tian-hong, et al. Analysis on disaster impact of concealed goaves underneath open-pit slope and its treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2503-2512.
- [15] BARTON N. Some new  $Q$ -value correlations to assist in site

- characterisation and tunnel design[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(2): 185–216.
- [16] 胡高建, 杨天鸿, 胡忠强, 等. 基于 Mathews 稳定图等方法的多角度采空区群稳定性分析评价[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(2): 348–354.
- HU Gao-jian, YANG Tian-hong, HU Zhong-qiang, et al. Mathews-stability-method-based multi-angle analysis and evaluation of mined-out zones stability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 348–354.
- [17] SUORINEN F T. The stability graph after three decades in use: experiences and the way forward[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2010, 24(4): 307–339.
- [18] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC<sup>3D</sup> 分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2894–2899.
- YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2894–2899.
- [19] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic modelling of fault-slip with Barton's shear strength model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 155–163.
- [20] 袁松, 王峥峥, 周佳媚. 隧道地震动力计算边界取值范围研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(11): 166–172.
- YUAN Song, WANG Zheng-zheng, ZHOU Jia-mei. Study on the model boundary determination in tunnel's earthquake dynamic analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(11): 166–172.
- [21] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(2): 204–209.
- LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu. Dynamic response and blast-resistance analysis of a tunnel subjected to blast loading[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2004, 38(2): 204–209.
- [22] 张玉成, 杨光华, 刘鹏, 等. 爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 56–64.
- ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, LIU Peng, et al. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic numerical simulation of blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 56–64.
- [23] EMAD M Z, MITRI H, KELLY C. Effect of blast-induced vibrations on fill failure in vertical block mining with delayed backfill[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(9): 975–983.
- [24] LOW H Y, HAO H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading[J]. *Structural Safety*, 2001, 23(2): 157–178.
- [25] 陈佳耀, 史秀志, 周健, 等. 基于正交设计的露天转地下空区变形预测及可靠度分析[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(11): 2383–2392.
- CHEN Jia-yao, SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, et al. Deformation prediction and reliability analysis of underground mining shifted from open-pit based on orthogonal experiment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(11): 2383–2392.

## Stability evaluation of inclined orebody stopes by using Mathews stability synthetic graph and numerical modeling of static and dynamic loads

ZHANG Zong-guo, SHI Xiu-zhi, QIU Xian-yang

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

**Abstract:** The stopes of the inclined orebody expose two surfaces of the crown and the hanging wall after mining, so the stability analysis of the inclined orebody stopes is one of the most complicated issues of mining. To study the stability and the stable probability of the inclined orebody stopes, this paper carried out the research through two methods of Mathews synthetic graph and FLAC3D numerical modeling of static and dynamic loads. First, four stopes of the inclined orebody in a Lead-Zinc mine were selected, and the rock mass of them was classified using the *RMR* and *Q'* value method. Later, the stable probabilities of the crown and the hanging wall of the four stopes were obtained by the fitted stable isoprobability line equations and the redrawn Mathews stability synthetic graph considering the stable isoprobability lines. Finally, the stabilities of the inclined orebody stopes under static and dynamic loads were studied by adding blasting load to numerical modeling. The results show that exposure time has a significant impact on the stopes with poor rock mass when considering the influence of exposure time on stopes stability. The stope stability of the inclined ore body can be analyzed comprehensively through mutual verification of Mathews stability diagram and FLAC3D numerical simulation.

**Key words:** rock mass classification; Mathews stability graph; numerical modeling; dynamic disturbance; stable probability

**Foundation item:** Project(52004329,51874350) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2021-04-23; **Accepted date:** 2021-07-08

**Corresponding author:** SHI Xiu-zhi; Tel: +86-13974801752; E-mail: baopo@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)