

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.05.019

# 复杂应力扰动下围岩稳定性评价与采场参数优化

张 飞, 杨天鸿, 胡高建

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 夏甸金矿采矿活动已经进入深部, 临近崩落法与充填法影响区域的采场受到多重扰动应力的影响, 该区域围岩稳定性与采场尺寸的合理选取对矿山安全生产至关重要. 采用先进的数字摄影测量技术, 获取试验采场周围岩体结构面参数; 并从多角度对采场围岩稳定性进行评价; 在此基础上, 运用 Mathews 图表法与跨度经验公式对试验采场的参数进行优化; 最后, 通过数值模拟, 对得到的试验采场参数合理性进行分析与验证. 图表法优化的采场尺寸在矿山开采的成功应用, 验证了图表法在复杂应力下采场尺寸设计的可行性.

**关 键 词:** 数字摄影测量; 围岩稳定性评价; 节理裂隙; Mathews 图表法; 采场参数优化

**中图分类号:** TD 853.391+2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)05-0699-06

## Stability Evaluation of Surrounding Rock and Parameter Optimization of Stope Under Complex Stress Disturbance

ZHANG Fei, YANG Tian-hong, HU Gao-jian

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Fei, E-mail: z\_fei1990@163.com)

**Abstract:** The Xiadian gold mine has already experienced the deep mining, the stope by the caving method and filling method is affected by multiple disturbance stress. It is very important to determine the reasonable stope size and the stability of surrounding rock for the safety operation of the mine. The parameters of discontinuities around the experimental stope were obtained by using the advanced photogrammetry technique, and the stability of surrounding rock mass of the experimental stope was evaluated by multi-method. On the basis of this, the parameters of the stope are optimized by using the Mathews method and the span experience formula. Finally, through the numerical simulation, the rationality of the obtained experimental stope size is analyzed and verified. The successful application of the optimized stope size in the mine designed by Mathews method, verified the feasibility of the graphic method in the design of the stope size under complex stress.

**Key words:** digital photogrammetry; stability evaluation of surrounding rock mass; joint fissure; Mathews stability method; stope parameter optimization

采矿活动过程中, 地下岩体的稳定性直接影响到矿山的生产安全. 地下岩体在长期地质演化过程中, 受到断层、节理裂隙等地质构造的影响, 岩体表现出不连续性、非均质性与各向异性. 结构面作为影响岩体稳定性的一个重要因素, 在实际工程中常被重点研究. 数字化非接触结构面测量技术<sup>[1]</sup>, 以其诸多优点, 在实际工程中有着大量的应用. 但岩体中的节理裂隙发育等很不规则, 节理裂隙在岩体内部的发育情况非常复杂, 具体分布形态未知. 杨天鸿等<sup>[2]</sup>在数字摄影测量基础上通过离散裂隙网络模拟结构面分布情况, 并据此在相关方面展开了大量研究. 南非科学与工业研究委员会(CSIR)于1976年提出的RMR(rock mass rating)方法将岩块强度、节理条件等纳入考虑因素, 并在许多工程中得到了广泛应用<sup>[3]</sup>. 上述研究在结构面对岩体稳定性影响方面取得了一

定的成果,对岩体的稳定性评价,更为准确.

采场尺寸参数选取与矿山日常生产息息相关,合理的参数选取,不仅可以保证矿山安全开采,还可以提高矿山的生产效率. Barton 等<sup>[4-5]</sup>提出  $Q$  分级系统,并给出了工程跨度经验法计算公式,计算与评价采场的安全跨度. Mathews 等<sup>[6]</sup>在  $Q$  系统分级的基础上,提出了基于半经验的采场稳定性图表法. 董金奎等<sup>[7]</sup>运用 Mathews 图表法对焦家金矿采场参数进行优化,并取得了良好效果.

本文针对夏甸金矿处于复杂应力扰动下的试验采场,运用数字化摄影测量技术获取采场围岩结构面详细信息;开展了岩体质量评价分析;应用 Mathews 图表法对现有条件下采场围岩稳定性进行评价,并对采场尺寸进行优化,对所优化的尺寸用数值模拟进一步验证合理性. 本文研究结果对矿山的实际开采具有指导意义.

## 1 工程背景

夏甸金矿位于山东省招远市城南 28 km 处的夏甸镇西芝下村附近,根据 2010 年夏甸矿区深部金矿详查报告,主矿体Ⅶ-1 分布在 495~553 线间,赋存标高在-600~-1 470 m 之间. 矿山的采矿方法主要有崩落采矿法和充填采矿法,崩落采矿法位于矿山中部 529~546 线之间,两侧均为充填采矿法,矿山现已进入到深部开采,进入深部开采的采场,特别是位于临近崩落法空区的采场,该区域的采场围岩受到高地应力、临近采场开挖扰动应力以及临近空区支承应力等多重应力的共同作用. 本文选取-615 水平 549 线的 54902 与 550 线的 55002 两个典型试验采场进行研究,试验采场紧邻崩落采空区与上部充填采空区,受两种采矿方法应力场叠加影响明显. 矿山在实际生产过程中采用 6m 跨度,与一次崩落矿石 3.5m 的上向水平分层充填采矿法开采,试验采场的形态见图 1.

## 2 岩体结构面参数获取

ShapeMetrix 3D 岩体几何参数获取系统可以从岩体左右两个不同视角进行数字成像,并经过后期的处理,得到一系列结构面相关参数,为危岩体稳定性鉴定、块体移动分析等提供一定的基础数据. 立体合成原理示意图如图 2a 所示,结构面识别结果如图 2b 所示.

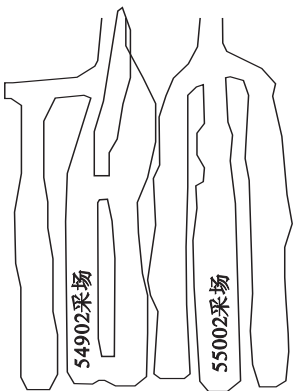


图 1 试验采场示意图  
Fig. 1 Sketch map of the experimental stope

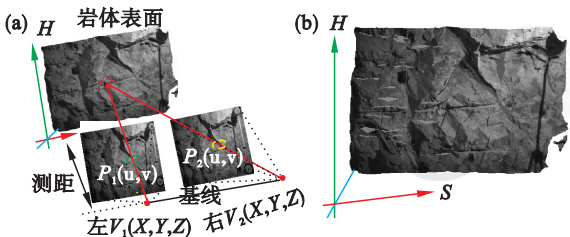


图 2 ShapeMetrix 3D 成像系统原理与分组识别结果图  
Fig. 2 Principle of ShapeMetrix 3D imaging system and group identification results  
(a)—立体图像合成原理;(b)—节理分组识别结果.

结构面的测量主要选择在 54902 采场和 55002 采场周围的进路中进行,统计摄影测量获得采场周围结构面的信息,将测量的结构面信息进行统计与处理,考虑到测量点较多,因此本文只列出最优节理组产状等相关信息(表 1). 根据摄影测量技术获得的结构面参数可为采场围岩稳定性分析提供依据,对 Mathews 图表法优化采场参数提供基础的数据.

表 1 结构面参数汇总表  
Table 1 Parameters summary of joints

采场	倾向 (°)	倾角 (°)	迹长 m	线密度 条·m <sup>-1</sup>	体密度 条·m <sup>3</sup>	发育 程度
54902	130.12	49.2	0.89	2.60	9.76	较发育
55002	124.01	67.05	0.67	0.51	8.98	较发育

## 3 采场稳定性与安全跨度研究

### 3.1 岩体地质力学分类法

Bieniawski 于 1973 年建立了围岩分级体系 RMR 指标,目的是在量化方面对工程岩体的相关性质进行评价,并最终对围岩体的稳定性作出评价. 根据 RMR 分级评价指标,共有 5 项指标用来评价岩体的稳定程度. 根据文献[8]中列出的标准确定各指标的数值,将各项指标的数值求和

(见式(1)), 获得岩体 RMR 的数值. 根据 RMR 不同的数值, 可以确定出研究区域岩体的所属分级, 进而对所研究区域的岩体岩性好坏作出评价, 为工程开挖提供一定的参考. 采场的 RMR 指标值及分级结果如表 2 所示.

$$RMR = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5.$$

(1)

表 2 RMR 值以及岩体分级结果

Table 2 RMR values and classification results of rock mass				
项目	54902 顶板	54902 两帮	55002 顶板	55002 两帮
RMR 值	62	56	58	63
分级	II	III	III	II
质量描述	好岩体	较好岩体	较好岩体	好岩体

3.2 Barton 工程跨度经验法

挪威岩土工程研究所的 Barton 首次建立了岩体质量指标  $Q$  的概念, 他认为决定岩体质量的因素包括: 岩体完整程度、节理性状和发育程度、地下水状况、地应力状况等几个方面<sup>[4]</sup>. 岩体质量指标与相关参数之间的关系可用式(2)表示:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left( \frac{J_w}{SRF} \right).$$

(2)

式中: RQD 为反映岩石质量指标的数值, %;  $J_n$  为岩体节理组数;  $J_r$  为节理粗糙度影响系数;  $J_a$  为节理组蚀变系数;  $J_w$  为节理水对岩体影响系数; SRF 为地应力对岩体稳定性影响系数. 其中各参数根据工程地质调查取值见表 3.

表 3  $Q$  中各参数取值

Table 3 Related parameters selected of $Q$						
参数	RQD/%	$J_n$	$J_r$	$J_a$	$J_w$	SRF
54902 顶板	67	9	4	4	1	1
54902 两帮	67	12	4	6	1	1
55002 顶板	62	9	4	6	1	1
55002 两帮	75	6	4	6	1	1

将已知量代入式(2)可得 54902 和 55002 顶板与两帮的  $Q$  值为 7.44, 3.67 与 4.59, 8.33.

采场安全跨度<sup>[5]</sup>由式(3)确定:

$$W = 2E_z Q^{0.4}.$$

(3)

式中:  $W$  为在没有任何支护情况下巷道开挖所能达到的最大安全跨度, m;  $E_z$  为支护比, 一般地对于临时性矿山巷道或工程支护  $E_z = 3.0 \sim 5.0$ , 本研究中  $E_z$  取值 3.0.

将数据代入式(2)与式(3)可求得 54902 和 55002 采场的安全跨度分别为 10.09 ~ 13.39 m 与 11.03 ~ 14.01 m.

3.3 基于 Mathews 稳定图表法的采场参数优化

Mathews 图表法是一种相对简单且基于实践的岩石分类系统, 此方法最早由 Mathews 等<sup>[6]</sup>提出, 经 Potvin<sup>[9]</sup>进行了改进. Mathews 稳定图表法主要由稳定数  $N$  和水力半径  $HR$  确定, 将水力半径和稳定数绘制在稳定图上, 进而对采场围岩暴露面稳定性进行评价(图 3).

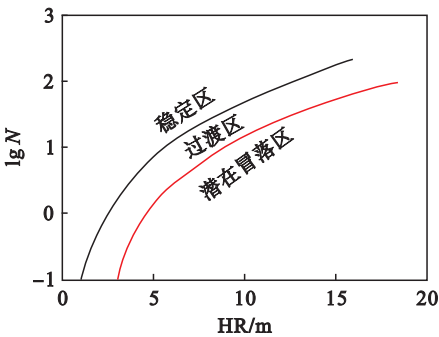


图 3 修正的 Mathews 稳定图  
Fig. 3 Modified Mathews stability method

3.3.1 稳定数  $N$

岩体处于特定的环境中在给定应力下保持自身稳定的能力称之为稳定数, 稳定数  $N$  可由式(4)表示:

$$N = Q'ABC.$$

(4)

式中:  $Q'$  为修正的  $Q$  值;  $A$  为岩石应力系数;  $B$  为节理方位系数;  $C$  为重力调整系数. 各参数代表的意义如表 4 所示<sup>[10]</sup>.

表 4 稳定数中各参数含义

Table 4 Meaning of parameters in stability number	
参数	描述
$Q'$	假设节理水对岩体影响系数和地应力对岩体稳定性影响系数均为 1 时, 此时所得到的 $Q$ 值即为 $Q'$ 值;
$A$	取决于完整岩石自身的单轴抗压强度值与采场中线由于采矿所引起的诱导应力值的比值所确定, 本文采用数值模拟方法获得多应力共同作用下试验采场中线处的诱导应力;
$B$	通过采场或矿柱壁面倾角与主要节理组的倾角的差值来获得, 其取值如图 4 所示;
$C$	反映了采场或矿柱壁面产状对其围岩稳定性的影响情况, 其计算关系式如式(5)所示, 取值与采场壁面倾角关系如图 5 所示.

对于采场两帮: 夏甸金矿采场基本垂直于矿体开采, 因此, 两帮暴露面的倾角约为  $90^\circ$ , 重力调整系数  $C = 8 - 6\cos 90^\circ = 8$ ; 对于矿体顶板  $C = 8 - 6\cos 0^\circ = 2$ .

$$C=8-6\cos\alpha.$$

(5)

3.3.2 水力半径

水力半径 HR 反映了采场的尺寸和形状,如图 6 所示,为矿房暴露面的示意图,水力半径由式(6)确定.

$$HR=xy/(2x+2y).$$

(6)

式中:HR 为开挖面水力半径,m; $x,y$  分别为采场的跨度与斜长(本文中为采矿过程中一次崩落矿石的高度),m.

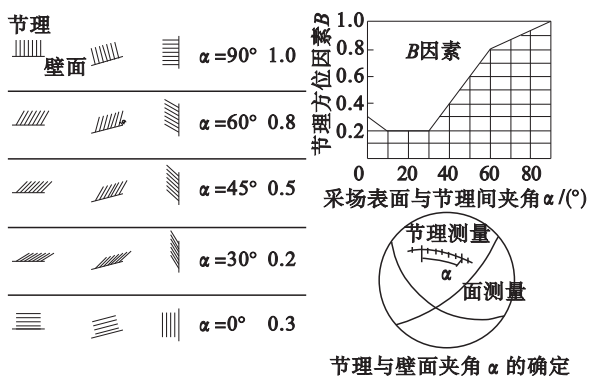


图 4 节理组方位系数 B 图解  
Fig. 4 Joint iconography of B

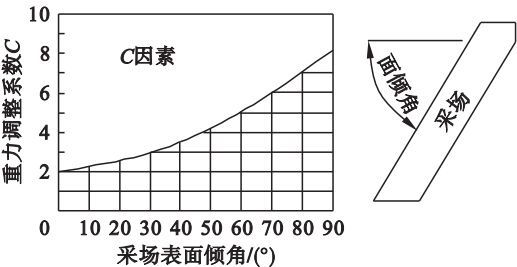


图 5 重力调整系数 C 图解  
Fig. 5 Gravity adjustment iconography of C

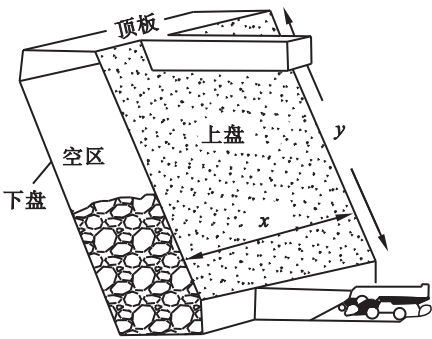


图 6 采场暴露面示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of stope exposed surface

综上,可以得出试验采场的相关参数,根据公式(4)与式(6)得到采场的稳定数与水力半径,再结合 Mathews 稳定图(图 3)可以求得试验采场的容许水力半径,各相关参数见表 5 所示.

表 5 Mathews 相关参数汇总表  
Table 5 Summary of relevant parameters of Mathews

参数	$Q'$	A	B	C	N	水力半径 HR/m	容许水力半径 R/m	跨度、 半径崩落高 度/m
54902 顶板	7.44	0.3	0.58	2	2.59	2.68	3.42	7.92
54902 两帮	3.67	0.21	0.42	8	2.62	1.63	3.46	8.03
55002 顶板	4.59	0.3	0.8	2	2.20	2.68	3.25	7.47
55002 两帮	8.33	0.21	0.2	8	2.80	1.63	3.65	8.55

依据试验采场的容许水力半径 R 和式(6),以顶板作为主要暴露面,按规则的矩形设计,矿体的平均厚度为 50 m,可以得到 54902 和 55002 采场的临界跨度分别为 7.92 m 与 7.47 m;以采场两帮作为主要的暴露面可以求得 54902 和 55002 采场一次崩落矿石的临界高度为 8.03 m 和 8.55 m. 运用 Barton 工程跨度经验公式确定出的 54902 与 55002 采场的临界跨度分别为 10.09 ~ 13.39 m 与 11.03 ~ 14.01 m. 可以看出由 Mathews 图表法确定的采场临界跨度小于 Barton 工程经验公式所获得的跨度值,这是因为 Barton 经验公式法未考虑采场上部扰动应力对于采场跨度的影响,并且也不会因为采场的具体条件考虑节理裂隙对采场围岩稳定性的影响.

综上,经 Barton 工程跨度经验公式与 Mathews 稳定图法计算的矿房跨度,其值均比目前夏甸金矿采用的 6 m 矿房跨度要大,确定出的一次崩落矿石高度也比先行采用的 3.5 m 要大,出于安全角度和采矿施工方便的角度考虑,扩大原有充填法试验采场的跨度为 7 m,一次崩落矿石的高度为 8 m. 为了进一步验证采场参数的合理性,针对这一情况展开了数值模拟研究.

4 数值模拟验证采场尺寸合理性

4.1 数值模型建立及计算

运用 Ansys 建立数值计算模型,模型中的矿山采场结构主要包括崩落采空区、充填采空区、此次的试验采场 54902,55002 及周围共同开采的采场,模型的尺寸为 1 400 m × 980 m × 960 m,模型单元数为 304 799,其数值模型如图 7 所示.

假定模型中所有材料均满足摩尔库伦特性,根据室内试验与现场的相关测试,矿体岩体力学参数见表 6. 数值计算模型顶部为自由表面,模型左侧边界以及右侧边界均约束水平位移,底边界固定,应力边界条件按照公式(7)施加. 在开挖前



采用弹性模型对岩体的天然应力场进行模拟,之后模型采用莫尔 – 库仑模型进行计算,并采用瞬间开挖来模拟爆破开挖. 矿体的开挖基本遵照实际生产过程中的开采顺序: 首先开挖 – 350 ~ – 555 中段崩落采场; 其次开挖 – 555 以下崩落采场以及两翼充填采场并充填; 最后开挖 – 615 中段试验采场. 原岩状态下的应力分布如图 8 所示. 研究选取 1 – 1 剖面 (图 7b) 对试验采场附近的受力情况进行分析.

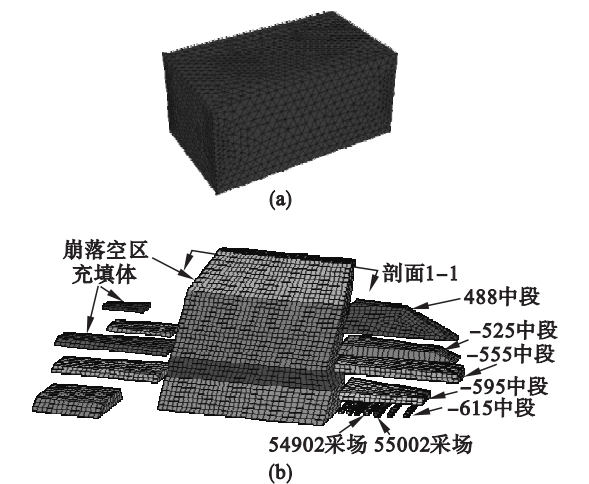


图 7 三维数值模型  
Fig. 7 Three-dimensional numerical models  
(a) — 整体计算模型; (b) — 采空区开采形态图.

表 6 力学计算参数表						
Table 6 Mechanical calculation parameters						
名称	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	容重/kN·m <sup>-3</sup>
围岩	8.1	22.0	0.25	5.0	29	26.8
矿体	8.6	28.0	0.23	6.5	33	27.0
充填体	0.5	6.1	0.36	0.84	38	21.6

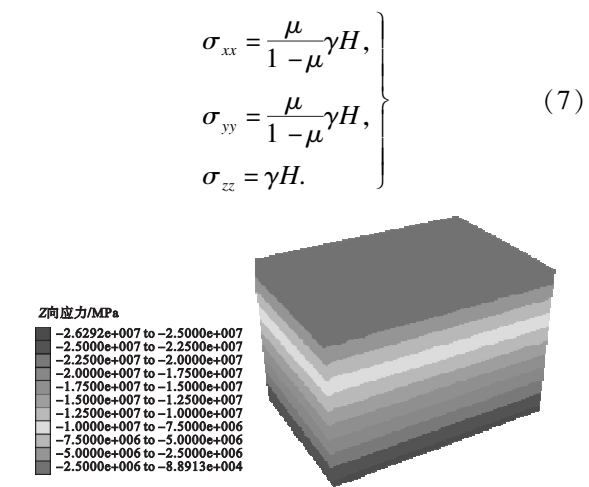


图 8 Z 方向原岩应力分布云图  
Fig. 8 Stress distribution nephogram of the original rock in the Z direction

4.2 模拟结果分析

4.2.1 最大主应力分析

从图 9a 中可以看出,在 – 555 中段崩落采场以及两翼的充填采场开采并充填后, – 615 水平试验采场及附近区域均处于两种采矿方法的应力叠加扰动影响下,应力相比正常应力梯度提升了 40%. 充填空区与崩落空区之间的预留隔离矿柱受到两种采矿方法应力扰动明显,隔离矿柱的不同部位均出现了压应力集中现象.

当 – 615 水平试验采场及周围采场打开后 (图 9b), – 615 水平之前所受的叠加扰动应力一部分得到释放,另一部分则发生转移. – 615 水平开采后 54902 与 55002 采场受到两种采矿方法空区矿柱支撑压力及邻近采场开采的扰动应力影响,应力相比正常应力梯度提升了 50%. 从开采后试验采场周围的应力分布可以看出,扰动应力向采场中间及周围的矿柱发生了转移,两个试验采场的中间矿柱出现了小范围的应力集中现象,采场两帮 3 m 范围内未出现应力集中现象,试验采场顶板与底板的应力相比 – 615 水平开采前均有所减小,试验采场较为稳定.

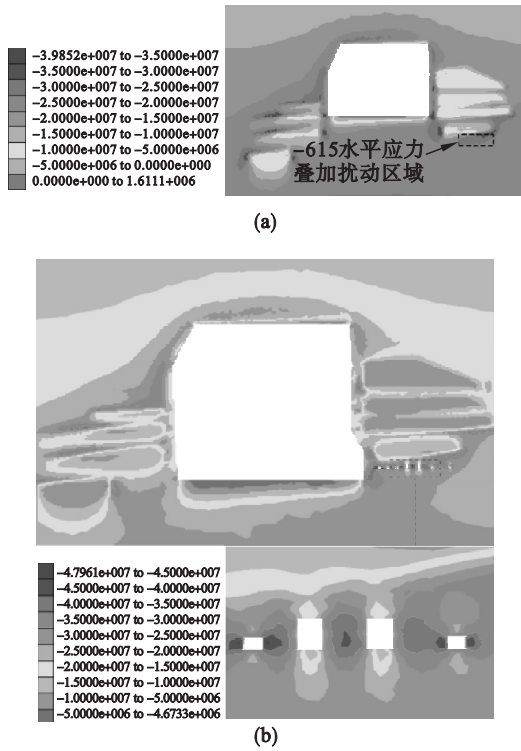


图 9 1 – 1 剖面最大主应力云图  
Fig. 9 Contour of maximum principal stress of section 1 – 1  
(a) — – 615 水平开采前; (b) — – 615 水平试验采场开采后.

4.2.2 位移云图分析

从模拟结果的垂直位移云图 (图 10) 中可以

看出,在 -615 水平采场开采后,试验采场顶板最大的位移下沉量为 2 cm,试验采场底板位置最大的鼓起量为 1 cm,试验采场周围均未出现较大的位移,说明采场在较短的暴露时间内,不会出现较大的变形破坏。

上述结果表明,运用 Mathews 图表法设计的采场尺寸具有一定的合理性,试验采场在一定时间内不会出现大的破坏,可以满足充填采矿法工艺的要求。矿山在实际的生产过程中,在具有类似条件 -700 水平的 55003 试验采场应用了跨度为 7 m,一次崩落矿石高度为 8 m 的采场参数,从实际的开采过程中观察到,采场顶板与两帮围岩在短时间内较为稳定,未出现大面积的破坏与失稳,完全可以满足充填采矿工艺的要求。

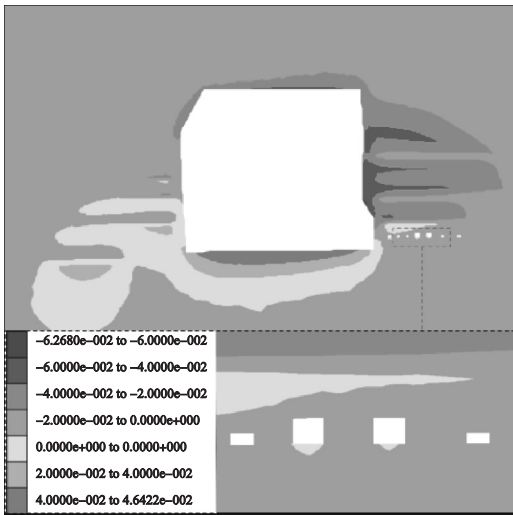


图 10 1-1 剖面位移云图

Fig. 10 Contour of displacement of section 1-1

## 5 结 论

1) 运用非接触摄影测量技术、RMR 分类法以及 Mathews 图表法可以得出 54902 与 55002 采场优势结构面产状分别为  $130.12^\circ \angle 49.2^\circ$ ,  $124.01^\circ \angle 67.05^\circ$ ; 54902 与 55002 采场两帮与顶板围岩均较为稳定; Mathews 图表法中两采场围岩均位于稳定区。试验采场有扩大开采尺寸的条件。

2) 通过 Mathews 图表法与 Barton 安全跨度经验公式对两采场参数进行优化,图表法得出 54902、55002 采场的安全跨度分别为 7.92 m 与 7.47 m,一次崩矿高度分别为 8.03 m 与 8.55 m; Barton 安全跨度经验公式得到采场的安全跨度分

别为 10.09 ~ 13.39 m 与 11.03 ~ 14.01 m,由于经验公式法考虑因素较少,出于生产安全角度与实际施工考虑,选取两个试验采场尺寸均为跨度 7 m,一次崩矿高度 8 m。

3) 数值模拟结果表明,在上部采场开采后, -615 水平处于复杂应力叠加扰动下,采用优化后参数的两采场顶板和两帮均较为稳定,可以满足充填采矿工艺的要求;优化后参数在 -700 水平 55003 采场的实际应用表明 Mathews 图表法在复杂应力扰动下对采场尺寸优化的可行性。

## 参考文献:

- [1] 范留明,李宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 792-797.  
(Fan Liu-ming, Li Ning. Study of rock mass joint measurement based on digital photo-grammetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(5): 792-797.)
- [2] Yang T H, Wang P T, Xu T, et al. Anisotropic characteristics of fractured rock mass and a case study in Shirengou metal mine in China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 48(3): 129-139.
- [3] Hamidi J K, Shahriar K, Rezai B, et al. Performance prediction of hard rock TBM using rock mass rating (RMR) system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(4): 333-345.
- [4] Barton N. Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock mass[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1978, 15(6): 319-368.
- [5] Barton N, Lien R, Lunde J. Estimation of support requirements for underground excavations[C] // Proceedings 16th Symposium on Rock Mechanics. Minneapolis: American Rock Mechanics Association, 1977: 1-18.
- [6] Mathews K E, Hoek E, Wyllie D C, et al. Prediction of stable excavations spans for mining at depths below 1000 metres in hard rock[M]. Ottawa: CANMET Library, 1981.
- [7] 董金奎,冯夏庭,张希巍,等. 地下采场破碎岩体稳定性评价与参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(9): 1322-1366.  
(Dong Jin-kui, Feng Xia-ting, Zhang Xi-wei, et al. Stability evaluation and parameter optimization on the fractured rock mass around underground stope[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(9): 1322-1366.)
- [8] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics: for underground mining[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] Potvin Y. Empirical open stope design in Canada[D]. Perth: University of British Columbia, 1988.
- [10] Mitri H S, Hughes R, Zhang Y. New rock stress factor for the stability graph method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 141-145.