

# 基于 CALS 及 Surpac-FLAC<sup>3D</sup> 耦合技术的 复杂空区稳定性分析

刘科伟<sup>1,2</sup>, 李夕兵<sup>1,2</sup>, 宫凤强<sup>1,3</sup>, 刘希灵<sup>1,2</sup>, 王卫华<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083;  
3. Le Laboratoire de Mécanique des Roches, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne CH - 1015, Suisse)

**摘要:** 由于受地质条件和探测技术的限制, 传统探测方法很难获得复杂空区精确的实际空间分布形状, 由此得到的空区用于建立数值分析模型显得过于粗糙, 在此基础上进行空区稳定性分析的可靠性程度不高。采用空区激光自动扫描系统(CALS)对复杂空区进行激光扫描, 在获得精准三维点云数据的基础上, 运用 Surpac 软件模拟出空区的三维地质模型, 通过耦合方法可以在 FLAC<sup>3D</sup> 中生成与实际空区空间分布一致的数值模型, 提高复杂空区稳定性计算的准确性和可靠性。选取三道庄露天矿的地下空区作为工程实例, 利用 CALS 获得不规则空区的实际空间边界。在此基础上, 运用 Surpac 进行三维块体模拟, 研究 Surpac 与 FLAC<sup>3D</sup> 模型耦合技术, 成功地将三维模型数据导入 FLAC<sup>3D</sup> 中, 结合现场实际勘测的围岩力学参数, 对空区进行静力计算, 分析空区的稳定性。

**关键词:** 采矿工程; 复杂空区稳定性; 空区激光自动扫描系统(CALS); 耦合; 数值模拟

**中图分类号:** TD 325

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)09 - 1924 - 08

## STABILITY ANALYSIS OF COMPLICATED CAVITY BASED ON CALS AND COUPLED SURPAC-FLAC<sup>3D</sup> TECHNOLOGY

LIU Kewei<sup>1,2</sup>, LI Xibing<sup>1,2</sup>, GONG Fengqiang<sup>1,3</sup>, LIU Xiling<sup>1,2</sup>, WANG Weihua<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;  
2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 3. Rock Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Lausanne CH - 1015, Switzerland)

**Abstract:** Under the restriction of geological conditions and detection technology, accurate data of real space shape of complicated cavity are very difficult to obtain with conventional detection methods. The cavity data detected by these methods are so rough for building model in numerical analysis; and high reliability of stability analysis based on the model can not be reached. Therefore, 3D laser scanning for complicated cavity with cavity auto scanning laser system(CALS) is put forward. This system is capable of being inserted into voids and cavities via predrilled boreholes to quickly and safely survey old workings; after exact 3D point cloud data are obtained by using CALS, the data can be processed so as to accurately simulate 3D geological model of the cavity in Surpac software; and then, adopting coupled Surpac-FLAC<sup>3D</sup> technology, numerical analysis model with real space shape of the cavity is created in FLAC<sup>3D</sup>, and the stability calculation is conducted in the final phase. Selecting the underground cavity of Sandaozhuang open-pit mine as an example, real space boundary of the irregularly cavity is scanned and 3D block model of the surrounding rock is modelled using the method mentioned above; following that, coupled Surpac-FLAC<sup>3D</sup> technology has been studied and 3D model data is successfully introduced into

**收稿日期:** 2008 - 05 - 14; **修回日期:** 2008 - 08 - 18

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(50490274); “十一五”国家科技支撑计划(2007BAK24B01 - 4); 中南大学研究生学位论文创新选题资助项目(1343 - 77238); 湖南省研究生学位论文创新项目(1343 - 4236000013)

**作者简介:** 刘科伟(1982 -), 男, 2006年毕业于中南大学城市地下空间工程专业, 现为博士研究生, 主要从事矿山、岩土工程灾害预测、稳定性及可靠性分析方面的研究工作。E-mail: keweiliu@126.com

FLAC<sup>3D</sup> software; combining mechanical parameters of surrounding rock based on field tests and other geological conditions, static calculation is performed. According to the calculation results, stability of the cavity is analysed referring to the nephogram of stress and displacement of the surrounding rock, and the accuracy and reliability of the analysis results are greatly improved.

**Key words:** mining engineering; stability of complicated cavity; cavity auto scanning laser system(CALS); coupling; numerical simulation

## 1 引言

在矿产资源开采过程中,应用房柱法、全面法及留矿法等空场类方法采矿,通常会形成大量的地下空区<sup>[1]</sup>。特别是自 20 世纪 80 年代以来,我国矿业开采秩序较为混乱,非法、无规划的乱采滥挖在一些国有矿山周边留下了大量的不明空区,而这些空区形成了目前影响矿山安全生产的最主要的危害源。例如,广西大厂矿区、甘肃厂坝铅锌矿、铜陵狮子山铜矿、河南栾川钼矿、云南兰坪铅锌矿、广东大宝山矿等许多矿山都存在大量老空区,矿柱变形破坏,致使矿山开采条件恶化,引发大面积冒落和岩移,形成地表塌陷;空区突然垮塌的高速气浪和冲击波极易造成人员伤亡和设备破坏,给矿山的安全生产带来严重影响<sup>[2]</sup>。鉴于此,对地下空区进行精确探测技术的研究和空区稳定性安全评判技术的研究显得尤为重要,国内外很多学者<sup>[3~6]</sup>在此方面取得了许多富有成效的研究成果。

目前,对于空区的探测,国内外主要是以采矿情况调查、工程钻探、地球物理勘探为主,辅以变形观测、水文试验等。我国目前以钻探为主,物探为辅,而美国等西方发达国家主要采用物探的手段<sup>[7]</sup>。钻探方法比较直观,但只是“一孔之见”,对于滥采乱挖形成的空区无能为力。地球物理方法以其面积测量的优势得到广泛应用,主要的地球物理方法有高密度电阻率法、电磁法、地震映像法、瞬态瑞利波法、探地雷达法以及综合物探方法等<sup>[8~11]</sup>。物探方法虽然很多,但往往由于周围复杂地质条件的限制,导致探测结果精度低,探测完成后需要对数据进行专业解释,过程烦琐,且往往是二维甚至一维数据,可视化功能差,只能提供定性的资料,不能精确地绘制出空区三维图形。空区三维空间的准确确定直接关系到空区稳定性分析的可靠性,而国内外对于空区围岩稳定性的分析和评价往往是在采用上述诸多探测方法获得定性数据的基础上进行的,从而导致可靠性较差。同时,为了能够实现空区稳定性进行数值计算且考虑到当前数值分析软件在岩土计算方面的优点,很多学者<sup>[12~14]</sup>

应用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对空区进行模拟,但是在 FLAC<sup>3D</sup> 软件本身前处理功能较差及定性探测数据的双重限制的前提下,空区模型必须在很大程度上被简化,构建出的模型过于粗糙,无法反映出空区的真实构造,从而导致稳定性分析和评价结果与实际情况相差甚远,基本不能为矿山的安全生产提供可靠数据。

为此,本文首先采用先进的空区激光自动扫描系统(cavity auto scanning laser system, CALS)对不规则空区进行激光扫描,获得空区空间形态的精准三维点云数据,进而对探测的三维点云数据进行点、线、面处理,生成具有空区实际边界的实体模型。在此基础上,运用 Surpac 软件,以所得的实体模型作为约束面对空区围岩进行了三维块体模拟,并重点研究了 Surpac 三维建模型软件与 FLAC<sup>3D</sup> 三维数值分析软件之间的模型耦合技术,成功地将三维模型数据导入 FLAC<sup>3D</sup> 中,生成既可算又具有真实空区边界的数值计算模型,同时结合现场实际勘测的围岩力学参数,对空区进行静力计算,进而对空区的稳定性进行了分析,从而避免了定性探测在对空区三维空间描述精确度不高问题,突破了空区真实三维建模、空区稳定性评价技术上的局限性,为指导矿区的安全生产提供了可靠的保障。

## 2 空区激光自动扫描系统(CALS)

空区激光自动扫描系统设备及操作示意图见图 1。

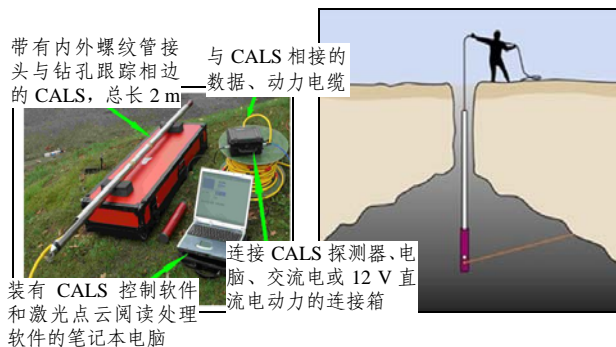


图 1 空区激光自动扫描系统设备及操作示意图

Fig.1 Equipment and operation schematic diagram of CALS

通过地表延伸至空区内部的钻孔将激光探头下放至空区内部，迅速而安全地对空区进行激光三维扫描。激光探头下放过程中，地表操作人员可通过探头前端的红外线摄像机实时观察钻孔内部的实际情况，同时生成钻孔跟踪数据并最终确定探头的最佳扫描位置。扫描过程中，与探头相连的地表单元与计算机通过无线网络连接，最大距离为 100 m，操作人员可在远离地表危险区域的条件下利用控制软件遥控监视和操作扫描系统。

该系统利用位于探头鼻部的激光二极管发出激光脉冲(符合 FDA 和 IEC 标准的一级眼部安全产品)，激光脉冲传播到被测目标点，再经光敏二级管接收由物体表面反射回来的激光信号，计算出激光的“飞行时间”，由光速  $c$  和“飞行时间”  $\Delta t$  算出扫描仪与被测目标点之间的距离  $\rho$ ，无需在目标上放置反射器。这样就可对某些危险和不可进入区域，如废弃空区和放矿溜井等进行精确探测<sup>[15]</sup>。如图 2(a)所示，通过数据采集获得测距观测值  $\rho$ ，精密时钟控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值  $\alpha$  和纵向扫描角度观测值  $\beta$ 。激光扫描三维测量采用仪器内部坐标系， $X$  轴在横向扫描面内， $Y$  轴在横向扫描面内与  $X$  轴垂直， $Z$  轴与横向扫描面垂直。由此可获得三维激光脚点坐标的计算公式：

$$\rho = \frac{1}{2} c \Delta t, \quad \begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \begin{cases} \rho \cos \beta \cos \alpha \\ \rho \cos \beta \sin \alpha \\ \rho \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中： $c$  为激光在大气中的传播速度， $\Delta t$  为激光在待测距离上的往返传播时间， $\alpha$  为横向扫描角度观测值， $\beta$  为纵向扫描角度观测值<sup>[16]</sup>。

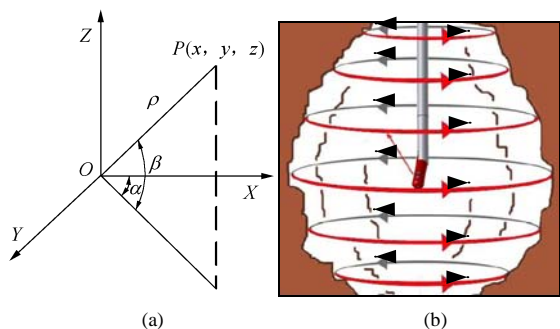


图 2 激光三维扫描坐标及工作原理

Fig.2 3D laser scanning coordinates and working principle

探头扫描时(如图 2(b)所示)扫描头将在  $0^\circ$  垂直角处开始(沿着探头，笔直向后上方看)，以完整的  $360^\circ$  圆环水平旋转，每完成一周水平扫描后，扫描

头将按照先前设定的“步幅增量”垂直向下移动，继续进行扫描直至垂直轴摆动完  $180^\circ$  为止。

由于激光探头直径仅为 50 mm，用于下放探头的钻孔直径不小于 65 mm 即可，扫描同时生成钻孔的三维定位数据和空区的三维点云数据。探头沿垂直向下钻孔延伸深度可达 300 m，沿水平及向上钻孔可延伸至 100 m 的距离。激光探头前端的电动水平和垂直枢轴确保了能够对空区进行  $360^\circ$  全方位的扫描，最大扫描精度为  $0.1^\circ$ ，精确度为  $\pm 5$  cm，数据捕捉率为 200 点/s，扫描半径为 150 m。通过扫描生成的高精度点云数据能够精确地定位空区的空间位置，并且可以直接观察空区内部的实际情况。该数据在经过与设备配套的数据处理软件(Modelace 和 Voidwork)处理后，可生成与实际空区情况相符的空区三维表面模型，如图 3 所示，从而可以报告出空区的体积及表面积的大小。

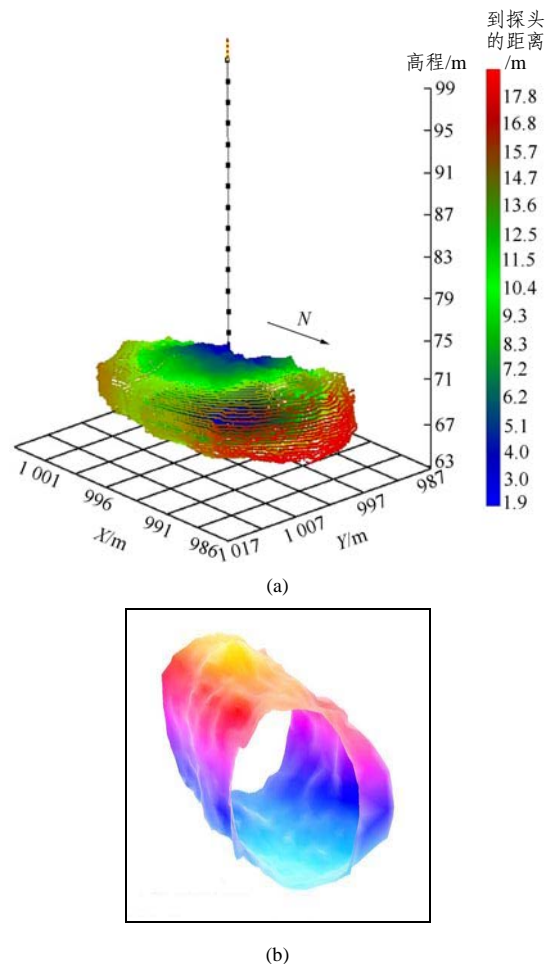


图 3 空区三维点云数据及空区表面剖切图

Fig.3 3D point cloud data and surface profile of cavity

### 3 分析模型构建及拉格朗日分析法

#### 3.1 CALS 探测结果与 Surpac 耦合

工程岩体稳定性是一个非常复杂的地质力学问题, 出于对工程安全和经济效益的考虑, 建立既“可视”又“可算”的数值计算模型, 对有效地分析与评价工程结构的稳定性具有重大的理论和现实意义。为了建立在空间上分布一致, 能够充分反映地质结构和岩性的三维地质模型, 本文将空区三维表面模型导入到 Surpac 软件中作为约束面生成空区围岩的三维块体模型。具体做法是利用空区表面模型作为围岩的内部边界面, 根据空区对围岩的影响范围以及计算要求的精度分别确定围岩的外部边界和内部边界处细分块体单元的大小, 生成所需的空区三维围岩模型, 从而为空区的稳定性数值分析建立了较高准确度的前处理文件, 该模型结构的准确性确保了稳定性计算结果的可靠性。

### 3.2 Surpac 与 FLAC<sup>3D</sup> 耦合技术

为了对模型进行数值计算与分析, 根据 Surpac 建模软件与 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算软件各自的特点, 对三维地质模型和数值计算模型进行耦合, 将 Surpac 三维块体模型数据处理后在 FLAC<sup>3D</sup> 中生成可算的离散网格, 从而构建了能够在后处理中精确反映复杂介质岩性条件的数值计算模型。

Surpac 软件能够对建立的三维岩体块段模型, 即采用正方体或长方体对岩体的实体模型进行三维剖分。剖分后的块段模型能输出后缀为.str 的文件。该文件主要包含每个单元块的中心点地理坐标(float)及单元块各边长度(int)。从数据文件包含的内容可以看出, 该数据文件实际上只包括了该单元块所在位置的几何信息。

FLAC<sup>3D</sup> 中的网格单元与 Surpac 块体单元较相似。Surpac 中存储的块体单元信息为单元中心点地理坐标  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  及各边的边长  $dx, dy, dz$  (见图 4(a)); 而 FLAC<sup>3D</sup> 中存储的网格单元信息为各节点的坐标见图 4(b)所示。因此, 可以根据 Surpac 中存储的块体单元信息推算出 FLAC<sup>3D</sup> 网格单元所需的各节点坐标。

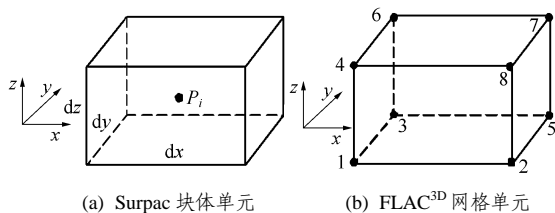


图 4 Surpac 块体单元和 FLAC<sup>3D</sup> 网格单元

Fig.4 Surpac block element and FLAC<sup>3D</sup> grid element

对于空区部分及不同岩性的围岩部分的分类,

首先通过在 Surpac 中就块体模型的某一属性赋予不同值。之后在导出的相应.csv 文件中根据这一不同值来区分数据, 并按上面的公式求出 FLAC<sup>3D</sup> 中不同区域所属的所有节点及其坐标。最后通过编写相应的程序, 生成可直接读入到 FLAC<sup>3D</sup> 中的.txt 文件, 建立复杂空区的三维数值模拟网格模型。本文的耦合方法通过在 FLAC<sup>3D</sup> 中对岩性进行赋值, 可以使模型在能够分类的前提下便于操作, 而且降低了模型耦合编程的难度。

### 3.3 FLAC<sup>3D</sup> 分析方法

FLAC<sup>3D</sup> 在求解时采用了空间离散技术、有限差分技术以及动态求解技术。通过这 3 种方法, 把连续介质的运动方程转化为在离散单元节点上的离散形式的牛顿第二定律, 从而这些差分方程可用显式的有限差分技术来求解。这种方法不但避免了常应变六面体单元常会遇到的位移剪切锁死现象, 而且使四面体单元的位移模式可以充分适应一些本构关系的要求。几个主要方程<sup>[17]</sup>包括:

(1) 本构方程

在 FLAC<sup>3D</sup> 中, 假定在时间  $\Delta t$  内速度保持恒定, 本构方程的增量表达式为

$$\Delta \sigma_{ij} = H_{ij}^*(\Delta \sigma_{ij}, \xi_{ij} \Delta t) \quad (2)$$

式中:  $\Delta \sigma_{ij}$  为共旋应力增量,  $H_{ij}^*$  为一给定函数,  $\Delta \sigma_{ij}$  为应力增量,  $\xi_{ij}$  为应变率张量。

(2) 节点速率

对于常应变四面体单元,  $v_i$  为线性分布,  $n_j$  在每个面上为常量, 节点速率方程为

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^i n_j^l S^l \quad (3)$$

式中:  $V$  为四面体的体积,  $S$  为四面体的外表面,  $n_j$  为外表面的单位法向向量分量, 上标“ $l$ ”为节点  $l$  的变量, “ $(l)$ ”为面  $l$  的变量。

(3) 运动方程

快速拉格朗日分析以节点为计算对象, 在时域内求解。节点运动方程如下:

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t)}{m^l} \quad (4)$$

式中:  $F_i^l(t)$  为  $t$  时刻节点  $l$  在  $i$  方向的不平衡力分量, 可由虚功原理导出;  $m^l$  为节点  $l$  的集中质量, 对于静态问题, 采用虚拟质量以保证数值稳定。

(4) 应变、应力

快速拉格朗日分析由速率来求某一时步的单元应变增量, 即



$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})\Delta t \quad (5)$$

根据应变增量，可由本构方程求出应力增量，进而得到总应力。

(5) 阻尼力

对于静态问题，不平衡力中加入非黏性阻尼，以使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态(即不平衡力接近 0)，阻尼力为

$$f_i^d(t) = -|F_i^t(t)|\text{sign}(v_i^t) \quad (6)$$

(6) 计算循环

拉格朗日元的计算循环如图 5 所示。假定某一时刻各个节点的速度为已知，则根据高斯定理可求得单元的应变率，进而根据材料的本构关系可求得各单元的新应力，进入下一个计算循环。

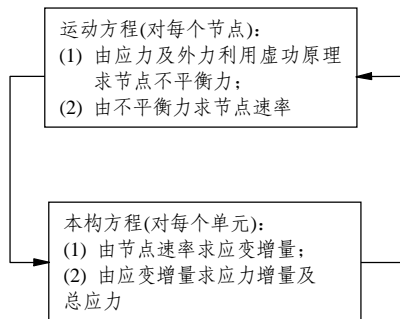


图 5 拉格朗日计算循环

Fig.5 Lagrangian computing cycle

## 4 空区稳定性分析实例

### 4.1 工程概况

三道庄露天矿为一钼、钨、铌多金属共生矿床，是栾川钼矿最大的矿区之一。20 世纪 80 年代后，三道庄矿区出现了集体、个人进入矿区大肆掠夺资源的现象。矿区内采矿单位一度达到 96 个，开拓的坑口达 200 多个。乱采乱挖形成大量形态千奇百怪、上下重叠且空间位置不详的空区。其后，各级政府对于栾川钼矿资源开发中出现的混乱局面进行了整治，民采现象得到遏制。2002 年调查空区总容积达  $1\ 017.2 \times 10^4\ \text{m}^3$ ，矿区范围内年新增空区量  $77.8 \times 10^4\ \text{m}^3$ ，空区主要分布在高程为 1 293~1 469 m 的范围内。1991 年该矿区开始建设 5 000 t/d 露天矿，2003 年公司根据市场需要，决定停止三道庄矿区的地下开采。随着三道庄露天坑底临近空区群，其露天坑底与空区的隔离层厚度越来越薄，露天矿作业人员与大型设备受到空区的直接威胁，随时有可能因地表坍塌而引发重大安全事故。

### 4.2 围岩力学参数确定

空区所处围岩主要为大理岩、硅辉石角岩和矽卡岩，现场取样后在实验室测试得到围岩的主要力学参数，考虑到岩体内岩石的非均质性和节理、裂隙等的存在以及不同介质之间的弱面与水等因素的存在与影响，因而在做工程计算与理论分析时，必须对岩石力学试验数据作工程折减，根据三道庄露天开采现场岩性特征，参照岩石力学标准与相关经验<sup>[18]</sup>选取折减系数，折减后空区围岩力学参数如表 1 所示。在理论分析中，岩体自重应力计算取重力加速度  $g = 10\ \text{m/s}^2$ 。围岩物理力学参数取值为：抗拉强度为 2.66 MPa，抗压强度为 159.85 MPa，抗剪强度为 29.94 MPa，弹性模量为 40.93 GPa，内摩擦角为 41.98°，泊松比为 0.21。

表 1 围岩物理力学参数

岩石类型	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比 $\mu$	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )
大理岩	2.66	221.55	39.80	0.22	1.62	33.96	41.96
硅辉石角岩	2.76	160.00	39.84	0.21	2.24	32.50	42.12
矽卡岩	2.98	159.85	40.93	0.21	2.66	29.94	41.98
平均值	2.80	180.47	40.19	0.21	2.17	32.13	42.02

### 4.3 建模分析

本文选取三道庄矿区 1426 台阶下的 2 号不规则空区作为实例进行稳定性分析。经数据处理软件查询得该空区所处的空间位置为： $X_{\min} = 5\ 838.493\ \text{m}$ ， $X_{\max} = 5\ 862.991\ \text{m}$ ； $Y_{\min} = 5\ 077.083\ \text{m}$ ， $Y_{\max} = 5\ 109.229\ \text{m}$ ； $Z_{\min} = 1\ 416.018\ \text{m}$ ， $Z_{\max} = 1\ 423.309\ \text{m}$ ；空区的尺寸为  $24.5\ \text{m} \times 32.0\ \text{m} \times 7.0\ \text{m}$ 。利用精准的空区点云数据在 Surpac 中生成块体模型，并采用前述的 Surpac 与 FLAC<sup>3D</sup> 模型耦合技术生成 FLAC<sup>3D</sup> 剖分网格(见图 6~8)，该模型网格共有 52 329 个单元，581 832 个节点。

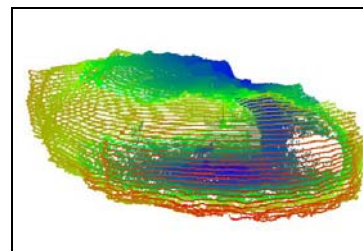


图 6 空区点云数据

Fig.6 Point cloud data of cavity

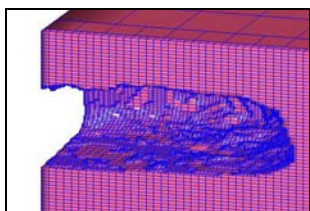


图 7 Surpac 围岩块体模型

Fig.7 Block model of surrounding rock in Surpac

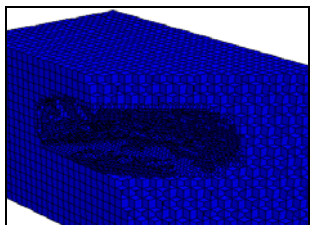


图 8 FLAC<sup>3D</sup> 剖分网格

Fig.8 Discretized grids in FLAC<sup>3D</sup>

模型采用莫尔 - 库仑准则, 对模型的左右(X 方向)边界、前后(Y 方向)边界和底边界均施加位移约束条件, 上边界(高程 1 426.000 m)为自由边界。该空区高程范围为 1 413.018~1 423.309 m, 地表高程为 1 426.000 m, 埋深较浅, 且矿区构造应力不明显, 因此未进行现场地应力测试, 忽略构造应力的影响, 初始地应力场仅按自重应力场考虑。对模型赋予折减后的围岩物理力学参数后进行初始平衡状态计算, 并对模型中的最大不平衡力及空区上方地表中心(节点 5850, 5095, 1426)处的 Z 方向位移值进行监测, 结果分别见图 9, 10。

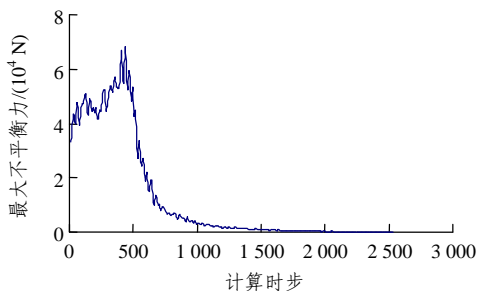


图 9 模型最大不平衡力

Fig.9 The maximum unbalanced force of model

静力计算完成后, 通过观察模型最大不平衡力历史及空区上方地表中心(节点 5850, 5095, 1426)处的 Z 方向位移历史记录可知, 随着计算时步的增加, 模型各单元内的不平衡力经初期震荡后逐渐衰减并趋近于 0, 同时节点处位移趋近于恒定值, 两者均表明模型达到了平衡状态, 未发生失稳, 与实际情况相符。

#### 4.4 位移分析

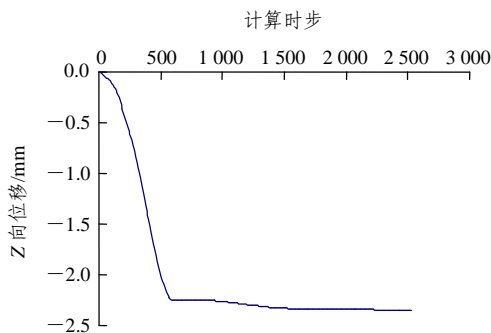


图 10 地表中心节点处 Z 方向位移

Fig.10 Z-displacement at central node of ground surface

图 11, 12 为根据实际地质参数计算出的围岩位移分布图。从模型整体位移(为了便于观察, 模型从中间剖开)及地表位移图可知, 受空区存在的影响, 地表均出现不同程度的沉降。最大位移出现在空区顶板最薄的中心处, 位移值为 2.591 6 cm, 范围呈直径为 3 m 的圆形。远离中心区域后位移值逐步衰减且面积比不断增大, 不同位移值的区域呈不规则空心椭圆状, 在三维范围内呈漏斗状。因为空区存在而形成的地表危险区域, 主要位于位移值 0.25 cm 的椭圆形范围之内。在远离顶板最薄的中心处的范围内, 跨度较大的一侧不同位移值所占的面积均较大, 而跨度较小的一侧不同位移值所占的范围则相反, 这说明随着跨度值的增加, 空区的危险系数越大。同时, 空区危险区域外围也发生不同程度的位移, 但数值不大, 小于 0.5 cm, 底板基本未发生位移。通过比较空区的水平面积及空区形成的危险区域的水平面积可知, 危险区域与空区水平面积比约为 1.23。空区扫描后应及时按计算出的水平危险范围圈定出禁行区, 避免重大安全事故的发生。

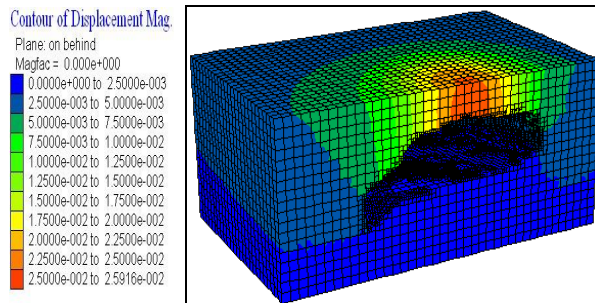


图 11 模型整体位移云图(单位: m)

Fig.11 Global displacement nephogram of model(unit: m)

#### 4.5 应力分析

图 13, 14 分别为模型整体应力图和顶板地表应

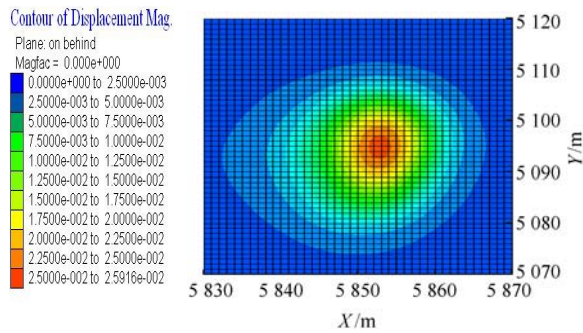


图 12 地表位移云图(单位: m)

Fig.12 Surface displacement nephogram(unit: m)

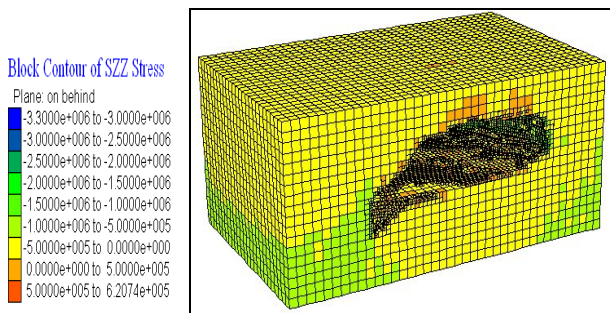


图 13 模型整体应力云图(单位: Pa)

Fig.13 Global stress contours of model(unit: Pa)

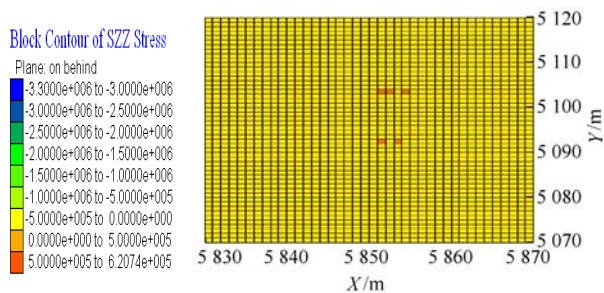


图 14 地表应力云图(单位: Pa)

Fig.14 Surface stress contours(unit: Pa)

力图。由图可以看出，空区的存在使得围岩进行应力重分布，最后达到新的平衡。空区顶板最薄的中心处呈深灰色，表明该处已产生拉应力出现应力集中现象，大小为0~0.620 74 MPa，且局部拉应力延伸至地表，形成危岩。空区底板处由于底板以上空间自重应力的缺失而引起底板以下的压应力(0.0~0.5 MPa)较其他同等水平位置的压应力(0.5~2.0 MPa)小，但随着深度的增加，在空区周围岩体自重应力的影响下而逐渐与其他同等水平位置的压应力趋于一致，且通过观察空区左侧可知，由于该处顶板向左高度不断下降形成桥拱状，在自重应力的作用下对空区左侧边缘处形成挤压，压应力(0.5~2.0 MPa)较其他同等水平位置的压应力(0.0~0.5 MPa)

大。围岩中最大拉应力为0.620 74 MPa，小于岩体的抗拉强度1.62 MPa，因而拉应力较大的顶板岩体将不会发生拉裂破坏，但在爆破振动、采掘机械运转或车辆运输形成对顶板的加载等因素的影响下极易导致空区顶板塌陷，从而引发事故。

## 5 结论与建议

(1) 激光自动扫描系统对复杂空区进行的探测，能够精确地扫描出复杂空区实际空间分布状况，扫描所得的三维点云数据及根据该数据生成的复杂空区三维表面模型使得地下不明空区可视化，提供了更为直观的数字信息，极大地提高了空区探测数据的准确性、可靠性和实用性，将传统的定性探测提高到精确三维定位的水平，为多空区矿山的持续安全开采提供了详尽的信息，从而避免了乱采滥挖而造成重大安全事故。

(2) 重点研究了 Surpac 建模软件与 FLAC<sup>3D</sup> 数值分析软件的耦合技术，成功地将利用 CALS 探测所得的精确空区扫描数据在 Surpac 中构建的三维块体模型耦合到 FLAC<sup>3D</sup> 中，充分结合和发挥了建模软件与数值计算软件各自的优点，生成的数值计算模型既可算又具有真实空区边界，准确地反映了空区和围岩的地质结构及岩性条件，详实而准确地再现了空区的实际存在状态，实现了复杂空区的可视化计算，与之相应的数值计算结果较简化模型更加真实可靠。

(3) 根据空区稳定性计算实例可知，不规则空区空间特征的不同引起位移及应力分布呈现出各自不同的特点，在各种因素的扰动下，空区周边的应力及位移会在原来的基础上结合自身地质结构产生进一步变化，影响范围及破坏效果与自身的空间和地质特征有关，因而，不同空区应不同对待。数值计算完成后，根据位移及应力数据，能够在现场及时圈定出危险区域，在该区域内应尽量禁止采掘机械、运输车辆等通过空区上方，减少爆破荷载的扰动，以避免重大安全事故的发生。

### 参考文献(References):

[1] 冯长根, 李俊平, 于文远, 等. 东桐峪金矿空场处理机制研究[J]. 黄金, 2002, 23(10): 11 - 15.(FENG Changgen, LI Junping, YU Wen Yuan, et al. Mechanism study of abandoned stope disposal in



- Dongtongyu gold mine[J]. Gold, 2002, 23(10): 11 - 15.(in Chinese))
- [2] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 国家安全生产科技发展规划非煤矿山领域研究报告(2004~2010)[R]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局, 2003.(State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety. State technological development programming of work safety: non-coal mine domain research bulletin(2004 - 2010)[R]. Beijing: State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety, 2003.(in Chinese))
- [3] 李夕兵, 赵国彦, 周子龙, 等. 河南洛钼集团三道庄露天矿采空区综合治理技术研究[R]. 长沙: 中南大学, 2005.(LI Xibing, ZHAO Guoyan, ZHOU Zilong, et al. Research on integrated controlling technology of underground mined-out areas in Sandaozhuang mine of China Molybdenum Co., Ltd.[R]. Changsha: Central South University, 2005.(in Chinese))
- [4] 李夕兵, 李地元, 赵国彦, 等. 金属矿地下采空区探测、处理与安全评判[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 24 - 29.(LI Xibing, LI Diyu, ZHAO Guoyan, et al. Detecting, disposal and safety evaluation of the underground goaf in metal mines[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(1): 24 - 29.(in Chinese))
- [5] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军, 等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 323 - 330.(GONG Fengqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 323 - 330.(in Chinese))
- [6] HUBER D, VANDAPEL N. Automatic three-dimensional underground mine mapping[J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25(1): 7 - 17.
- [7] 童立元, 刘松玉, 邱钰, 等. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, et al. Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(in Chinese))
- [8] 程久龙, 胡克峰, 王玉和, 等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 79 - 82.(CHENG Jiulong, HU Kefeng, WANG Yuhe, et al. Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.): 79 - 82.(in Chinese))
- [9] 林厚龙, 岳来群, 刘耘, 等. 高密度电阻率法在阿联酋某城 C9~C11 测区溶洞勘察中的应用[J]. 福建地质, 2001, 20(4): 201 - 206.(LIN Houlong, YUE Laiqun, LIU Yun, et al. Application of the high density resistivity survey to detecting water-eroded caves in the sector C9 - C11 of Khalifa City B, Abu Dhabi, United Arab Emirates[J]. Geology of Fujian, 2001, 20(4): 201 - 206.(in Chinese))
- [10] 姜鹰, 曹哲明, 刘铁. 高频大地电磁法在宜万铁路隧道岩溶的应用[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(3): 206 - 210.(JIANG Ying, CAO Zheming, LIU Tie. Application of high frequency magnetotelluric method to the karst exploration of the tunnel along Yichang - Wanzhou Railroad[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(3): 206 - 210.(in Chinese))
- [11] 王万顺, 张波, 耿玉岭, 等. 高分辨率地震及大能量瑞雷波法在采空区探测中的应用[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(6): 44 - 46.(WANG Wanshun, ZHANG Bo, GENG Yuling, et al. Application of high resolution seismic and large energy Rayleigh wave methods in goaf detection[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(6): 44 - 46.(in Chinese))
- [12] 余卫平, 汪小刚, 杨健, 等. 地下洞室群围岩稳定性分析及其结果的可视化[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 730 - 3 736.(YU Weiping, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Stability analysis of surrounding rock of underground excavations and visualization of its results[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 730 - 3 736.(in Chinese))
- [13] 李仲奎, 戴荣, 姜逸明. FLAC<sup>3D</sup> 分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 387 - 2 392.(LI Zhongkui, DAI Rong, JIANG Yiming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC<sup>3D</sup> and application to a huge underground cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 387 - 2 392.(in Chinese))
- [14] 杨为民, 陈卫忠, 李术才, 等. 快速拉格朗日法分析巨型地下洞室群稳定性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 230 - 234.(YANG Weimin, CHEN Weizhong, LI Shucai, et al. Analysis of stability of surrounding rock of Longtan large underground powerhouse with FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 230 - 234.(in Chinese))
- [15] Measurement Devices Ltd.. Cavity auto scanning laser system(CALS) manual[R]. York, UK: Measurement Devices Ltd., 2006.
- [16] 高山. I-SITE3D 激光成像系统在矿山勘测工程的应用[J]. 铁道勘察, 2004, 30(6): 38 - 40.(GAO Shan. Application of the I-SITE3D laser imagery system in mine survey[J]. Railway Investigation and Surveying, 2004, 30(6): 38 - 40.(in Chinese))
- [17] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC<sup>3D</sup> theoretical background(version 2.1)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2003.
- [18] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))