

采空区 C-ALS 探测及稳定性分析

彭林¹, 刘波², 过仕民¹, 刘念苏¹

(1. 安徽工业职业技术学院, 安徽 铜陵 244000; 2. 龙桥铁矿, 安徽 庐江 231500)

摘要: 在分析地下矿开采形成的采空区稳定性时, 对采空区的精密探测是有效手段之一。本文论述了在不同时段下, 运用空区三维激光自动扫描系统(C-ALS)对某采空区进行了多次扫描探测, 构建了基于实测的采空区可视化模型, 通过模型剖面边界线对比分析, 获取了采空区垮塌的重要信息; 在此基础上建立 FLAC^{3D} 力学计算模型, 模拟该采场回采过程, 并对采空区进行了稳定性分析, 揭示了该采空区失稳模式, 提出了采空区处理的建议。

关键词: 空区三维激光自动扫描系统; 采空区三维建模; 稳定性分析

中图分类号: TD175

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2015)04-0005-05

Goaf detection on C-ALS and its stability analysis

PENG Lin¹, LIU Bo², GUO Shimin¹, LIU Niansu¹

(1. Anhui Industry Polytechnic, Tongling 244000, China; 2. Longqiao Iron Mine, Lujiang 231500, China)

Abstract: One of the effective methods to analyze the stability of mined out area formed by underground mining is precision detection of goaf. This paper discusses the precision detection for a goaf by using 3D laser detection system (C-ALS) many times in different periods, combining with mine modeling software Surpac to build three-dimensional entity model of the goaf. It obtains the important information of instability of goaf form edge contrast. Based on the above, this paper also establishes the FLAC^{3D} numerical model of the goaf, simulates the stope, analyzes the stability of mined-out and evaluates the effect of governance. The paper reveals the goaf instability mode and puts forward the suggestions of handling the goaf.

Key words: C-ALS; 3D cavity modeling; stability analysis

由于岩体材料存在着非线性、复杂性的特点, 采空区稳定性分析成为矿山安全技术研究的一项难题, 采空区稳定性分析的方法种类繁多, 但总结前人研究成果来看, 主要可概括为3种: 定量分析法、定性分析法和现场监测分析方法^[1]。定量分析法是以定性分析为基础, 使用一定的计算方法对采空区进行稳定性计算、分析及评价, 例如解析法、模糊数学法、灰色预测法、神经网络法、数值计算法等^[2]。而在进行采空区稳定性定量分析时, 对空区三维形态的掌握是一个关键因素。

在空区形态的探测方面, 以往的做法是先了解空区大致情况, 再进行地球物理勘探法探测, 并加以变形监测、水文试验, 最后通过钻探的方式进行验证。常用的地球物理勘探方法有电阻法、地震反射波勘测法、瞬变电磁法、射气测量法和电磁波透射法等。在物探法的研究与工程应用上, 前人做了大量的工作, 取得了良好的实际效果, 但是, 这些方法在探测结果的精度与实际需求还有一定的距离, 有时甚至达不到探测要求^[3,4]。随着科技不断发展, 运用高精度的三维激光来探测采空区是一种新型的探测法, 它是利用发射并接受激光的模式来定位空区边界点的坐标, 经过专门的软件处理后即可生成空区的三维形态模型, 这类探测方法称为激光探测法, 使用到的设备主要有加拿大的 CMS 空区探测系统和英国 C-ALS 空区三维

激光自动扫描系统。

本文主要论述运用 C-ALS 空区三维激光自动扫描系统对空区进行精准探测,将空区边界坐标数据导入矿山建模软件 Surpac,构建基于实测的空区三维模型,有效性验证后,计算得出空区的边界坐标、表面积与体积大小等三维信息,在此基础上建立 FLAC^{3D} 力学计算模型,模拟分析采空区稳定性,对于指导空区稳定性分析及治理具有重要的意义^[5-7]。

1 采空区三维探测及建模

1.1 C-ALS 探测原理

C-ALS 空区三维激光自动扫描系统采用激光测距原理,扫描探杆前段内置一个激光测距仪的扫描头,扫描头伸入采空区后,后台软件控制测距仪发射激光并扫描头进行 360° 旋转扫描,激光到达空区边界壁后发射回来,被测距仪接受,通过发射和接收的时间差,可计算出边界到扫描头的距离 S , 假定每次激光发射的水平角度为 α , 垂直扫描角度 θ , 可得出每个空区侧壁反射点的坐标计算公式, C-ALS 激光探测原理如图 1 所示^[8-10]。

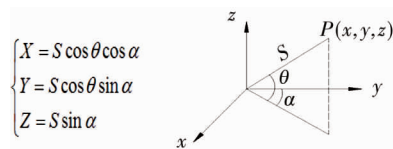


图 1 C-ALS 激光探测原理

1.2 空区模型建立

某大型地下矿山采矿方法采用大直径深孔嗣后充填矿法,回采阶段高度 60 ~ 120 m,某采场回采后,无论是空区顶板还是侧帮,暴露面积都较大,约为 1 000 ~ 5 000 m²,由于该空区处于深部,地压活动剧烈、原岩应力大、围岩二次应力集中,再加之深孔落矿爆破震动大,实际开采过程中充填工作滞后,采空区可能产生顶板冒落、垮帮等采场稳定性问题。

该采场出矿后,采用 C-ALS 空区三维激光自动扫描系统对空区进行精准探测,结合矿山建模软件 Surpac,构建基于实测的采空区可视化模型,采空区建模流程如图 2 所示,采空区模型如图 3 所示,有效性验证后,得到空区的三维信息为空区体积 54 804 m³,表面积 13 128 m²,X 方向上的最小坐标 90 879.027,最大坐标 90 950.319;Y 方向上的最小坐标 494 132.239,最大坐标 494 187.325;Z 方向上的最小坐标 -560.027,最大坐标 -496.809。

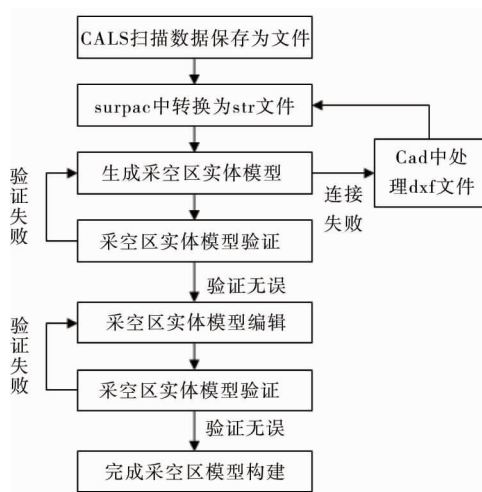


图 2 采空区三维建模流程图

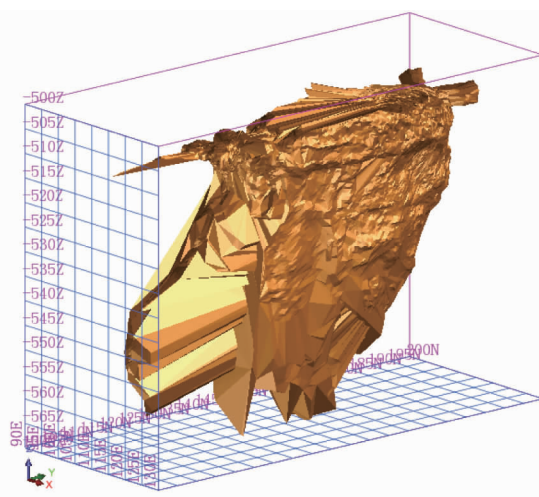


图 3 采空区三维实体模型

2 剖面对比分析空区稳定性

由于该采场是深部回采,地压活动剧烈,空区表面积、体积大,爆破作用对围岩的损伤大,造成顶板冒

顶和围岩垮落现象严重,为定量分析采空区顶板冒落和侧帮垮塌情况,借助 C-ALS 系统先后多次对该采空区进行了探测,并构建了采空区三维模型,在 Surpac 软件中切割若干水平和竖直剖面后,通过前后 2 次切割剖面的实际边界对比可知空区的失稳情况,如图 4 所示.

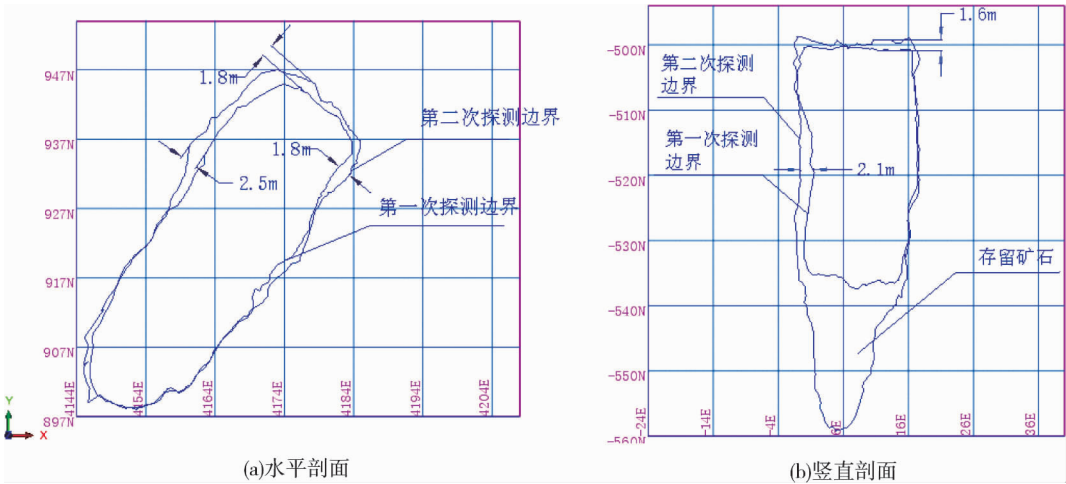


图 4 采空区模型剖面对比

通过剖面对比可以看出,采空区顶板冒落和围岩垮塌程度较大,顶板冒落最大高度达 1.6 m,位于采空区顶板正中央,冒落最大高度在 $Z = -500$ m 处,东面侧帮围岩垮塌最大宽度为 2.5 m,西面侧帮垮塌最大宽度为 1.8 m,该位置均位于两帮中间位置 $Z = -520$ m 处,模型剖面边界对比显示无论是空区顶板还是侧帮垮塌现象均较严重,采空区稳定性较差,若不及时处理,将产生严重后果,建议尽快进行该空区充填工作.

3 数值模拟分析采空区稳定性

3.1 空区力学计算模型建立

在 Surpac 软件中,以空区实体模型为参照,建立带约束的矿块模型,分别导出矿体和围岩的质心坐标,在 EXCEL 表格中编辑 FLAC^{3D} 建模文件,生成采空区力学计算模型. 根据计算精度要求,力学计算模型规划最小单元尺寸为 2 m×2 m×2 m,如图 5 所示.

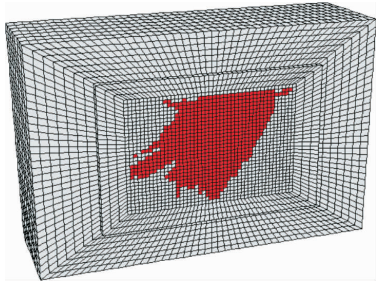


图 5 采空区力学计算模型

3.2 模型参数及相关约定

计算模型中的岩体力学参数由岩石力学参数折减而来,岩体物理力学参数取值列于表 1.

表 1 计算模型中各种介质的力学参数

介质名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	单轴抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
矿岩	3 400	31.8	0.29	3.9	3.7	49.0
闪长岩	2 839	25.6	0.19	2.6	2.9	40.0
大理岩	2 708	19.0	0.23	2.2	1.7	47.6

模型边界设为位移约束,除顶部边界设为自由边界外,模型其他边界分别施加位移约束条件;模型边界应力分别施加地应力分量作用. 矿岩采用莫尔库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\Phi}{1 - \sin\Phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\Phi}{1 - \sin\Phi}}.$$

式中, σ_1, σ_3 :最大主应力和最小主应力; c, Φ :内聚力和摩擦角. 当 $f_s > 0$ 时表示岩体将发生剪切破坏,在

模拟计算过程中,模型变形设置为大变形。

3.3 空区稳定性模拟结果及分析

3.3.1 主应力分布规律

按照该采场从下到上分步回采的顺序,模拟该采场的开采,各步开采完成后,最大与最小主应力分布如图 6 和图 7 所示。

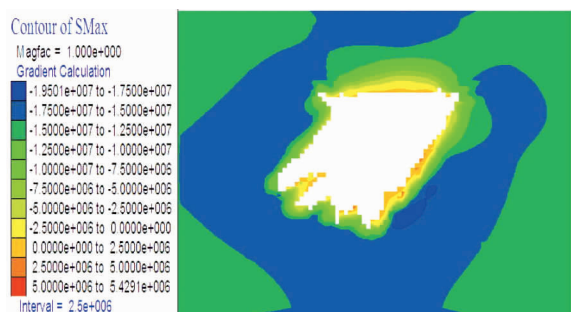


图 6 空区纵剖面最大主应力分布云图

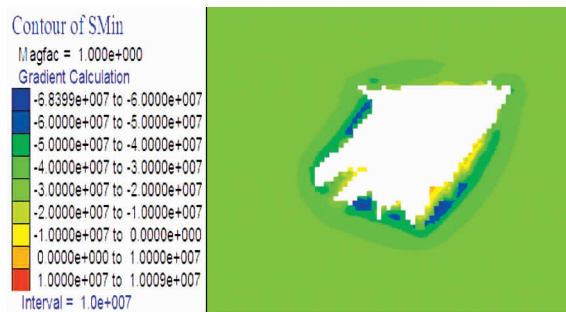


图 7 空区纵剖面最小主应力分布云图

随着采场回采的进行,侧帮及顶板围岩应力重分布,图可看出,采场回采完毕后,与周围应力场比较,采空区顶板临空面应力释放明显,出现拉应力状态,最大拉应力值为 0.73 MPa,远离采空区拉应力逐渐减小,压应力集中区位于空区下盘靠近底板处,其最大主应力值为 -19.5 MPa。在空区底板及下盘位置出现最小主应力集中区,其最小主应力值为 -44.6 MPa,远离采空区顶板,最小主应力值降低,趋近于原岩应力的最小主应力值,从数值上看,最小主应力值和拉应力值均较大,采空区稳定性较差,应尽快充填采空区并加强采空区应力监测,防止采空区失稳发生。

3.3.2 位移分布规律

各分步开采完成后,空区纵剖面上 Z 方向上的位移和横剖面上 X 方向是位移分布如图 8 和图 9 所示。

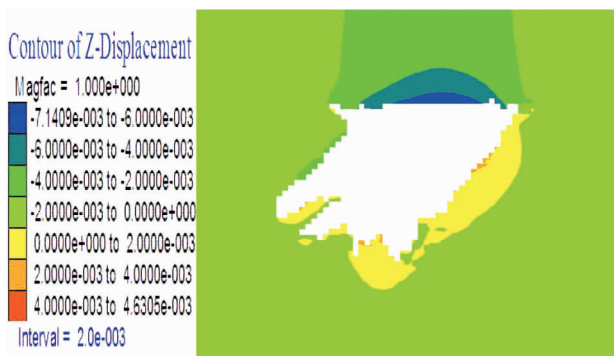


图 8 空区纵剖面上 Z 方向位移云图

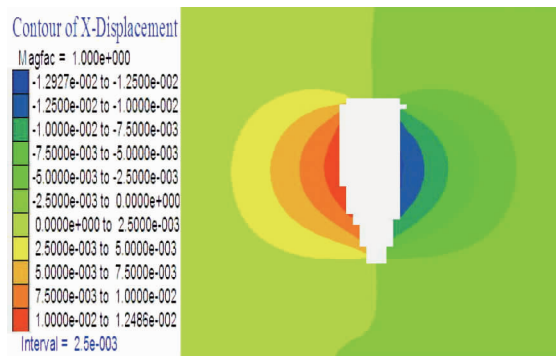


图 9 空区横剖面 X 方向位移云图

随着采场回采的进行,伴随着应力的重新分布,引起采空区围岩移动。采场回采完毕后,围岩位移方向均指向采空区,采空区顶板临空面由于失去支撑,产生竖直向下的位移,最大位移值为 -7.14 mm,位于采空区顶板中心位置,上盘围岩以下沉趋势为主,最大下沉位移为 -4.00 mm,下盘围岩以上升趋势为主,最大上升位移 3.00 mm;两侧帮围岩位移以水平位移为主,越靠近采空区位移值越大,水平位移最大值为 12.92 mm,由此可见,空区对围岩的稳定性有一定的影响,应加强对围岩监测。

3.3.3 塑性区分析

采场回采后,塑性区域主要分布如图 10 和图 11 所示。可以看出,在破坏形式上,围岩主要产生剪切破坏,此外,还有少量的拉伸破坏;从破坏区域上看,剪切破坏发生在大部分围岩中,拉伸破坏少量出现在侧

帮和上下盘区域;从破坏区域的分布上可以看出,塑性面积较大的区域位于采空区两侧围岩中,比空区顶板和上下盘的面积都要大,所以,可以推断出,侧帮围岩的失稳是此类采空区的重要的安全隐患。

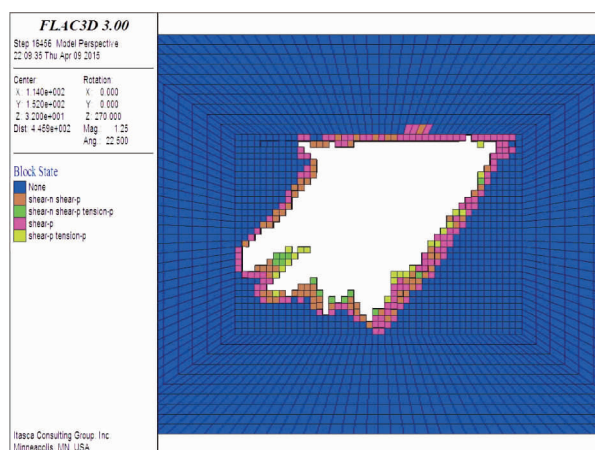


图10 空区纵剖面上塑性区分布图

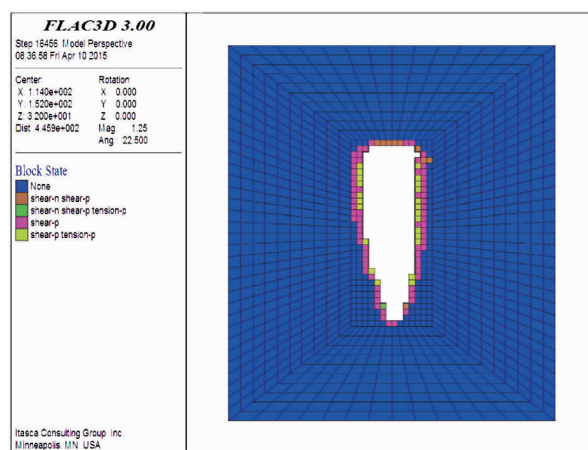


图11 空区横剖面上塑性区分布

4 结论

1) 运用国际先进的 C-ALS 三维激光自动扫描系统对采空区实施精准探测,构建了基于实测的采空区的三维形态模型,获取了空区的三维形态、坐标、表面积及体积大小等信息,对比不同时段探测结果,得到了顶板冒落、围岩垮塌量等采空区失稳的重要信息,为采空区治理提供重要的依据。

2) 以 Surpac-FLAC^{3D}耦合技术建立采空区数值计算模型的方法,不仅可以减少单纯的依靠 FLAC 建模的工作量,还可以极大得提高数值计算结果的精确性和可靠度。

3) FLAC^{3D}数值计算结果表明,空区顶板中央下沉量和侧帮中心围岩移动较大,顶板应力值释放,出现拉应力现象,剪切破坏区域主要出现在侧帮围岩,采空区侧帮破坏是此类采空区失稳的主要方式,建议矿山在今后的开采时加强位移和应力监测工作,监测点重点布置在侧帮和顶板附近的岩体中,同时尽快对空区加以充填,避免空区整体性垮塌,降低矿体开采的安全风险。

参考文献:

- [1] 张青青. 大冶灵宝铁矿采空区稳定性综合评价[D]. 武汉:武汉科技大学,2011.
- [2] 刘洪强. 大面积充填体下采场盘区矿柱留设方案优化及地压监测研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [3] 杨彪. 基于 CMS 实测的采空区危险度分析及其处理[D]. 长沙:中南大学,2008.
- [4] 王运敏,刘海林,孙国权,等. CMS 实测地下矿建模及稳定性分析研究[J]. 金属矿山,2009(8):5-9.
- [5] 罗周全,鹿浩,刘晓明,等. 基于 CMS 实测的采空区群稳定性数值模拟方法[J]. 化工矿物与加工,2008(1):18-21.
- [6] 刘科伟,李夕兵. 基于 CALS 及 Surpac-FLAC^{3D}耦合技术的复杂空区稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1924-1930.
- [7] 寇向宇,贾明涛,王李管,等. 基于 CMS 及 DIMINE-FLAC^{3D}耦合技术的采空区稳定性分析与评价[J]. 矿业工程研究,2010,25(1):31-35.
- [8] 蔡家斌,武淑娟,贺莹,等. 基于反求工程的贵州少数民族建筑文化遗产保护[J]. 四川建筑科学研究,2008(4):252-254.
- [9] 罗周全,冯福康. 基于 CMS 实测的采空区三维建模与回采可视化计算[J]. 中国铝业,2010,34(2):19-23.
- [10] 马海涛,刘勇锋. 基于 C-ALS 采空区探测及三维模型可视化研究[J]. 中国安全生产科学技术,2010,6(3):38-41.