

# 基于 CMS 的隐患空区三维特征信息获取

刘晓明,罗周全,袁雯妮,朱青凌

中南大学资源与安全工程学院;深部金属矿开发与灾害控制湖南省重点实验室,长沙 410083

**摘要** 在三维激光扫描原理基础上,针对井下不同作业环境提出了相适应的隐患空区激光探测系统(CMS)现场探测方法,即空区底部探测、封闭空区探测和通过空区上部通道探测。针对探测原始数据格式及其特点,研究了 CMS 空区探测点云数据过滤与探测数据拼接的原理,提出了多点扫描数据的拼接方法,实现了空区探测原始点云数据格式的转换,为建立空区三维实体模型提供了数据基础。结合 Delaunay 三角网剖分法,提出采用矿业软件 Surpac 构建可视化程度更高、可编辑性更强和实用性更好的空区三维模型方法,并将该技术成功应用于广西高峰矿复杂隐患空区三维特征信息获取及其可视化中。研究表明,采用该方法获取的空区三维特征信息为矿山实施空区评价与治理、开采质量控制、资源有效回收方案制定提供了技术支持。

**关键词** 隐患空区;空区探测系统;空区三维模型;三维信息;可视化

**中图分类号** TD853.391

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.05.004

## 3D Information Acquisition of Disaster Cavity Based on CMS

LIU Xiaoming, LUO Zhouquan, YUAN Wenni, ZHU Qingling

*Hunan Key Laboratory of Mineral Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines; School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China*

**Abstract** On the basis of research involving the principle of 3D laser scanning, the different cavity detection methods are put forward according to the different conditions, such as cavity bottom detection, closed cavity detection, and through the cavity upper channel detection. Aiming at the original data format of monitor and its characteristic, the principle of cloud data filtering and data splicing of CMS cavity detection points are studied, the multi-point scanning data splicing method is put forward and the format conversion of cavity detection initial point cloud data is successfully realized, which provides a data base for establishing a cavity 3D solid model. The Delaunay Triangulation Method of cavities 3D modeling is researched. The cavity 3D model method based on mine software of Surpac, which has higher visual degree, editable, and better adaptability, is proposed, and it has been successfully applied to the 3D information acquisition and visualization of complex disaster cavity in Gaofeng Mine of Guangxi Province. The results indicate that cavity 3D information obtained by this method provides the technical support for cavity evaluation and management, quality control, and formulation of the effective resource recycling scheme, etc.

**Keywords** disaster cavity; cavity monitoring system; cavity 3D model; 3D information; visualization

### 0 引言

金属矿产资源地下开采形成的隐患空区,因其形态复杂、分布无规律、安全性差,不仅危及矿山的安全,而且对资源的充分回收造成困难,隐患空区业已成为中国矿山安全、高效开采过程中迫切需要解决的难题之一<sup>[1]</sup>。因此,如何准确获取隐患空区三维信息,对开展空区调查、安全性评、灾害预测与控制等工作具有重要的现实意义。

隐患空区探测条件复杂,目前国内外均处于起步和探索阶段,主要是以采矿调查、工程钻探、地球物理勘探为主,辅以变形观测、水文试验等<sup>[2]</sup>。物探方法探测井下未开采区域的溶洞有其优势,可以在开采前掌握溶洞位置和大小,但对于已形成的复杂隐患空区,往往受周围复杂地质条件限制,导致探测结果精度低,并且探测完成后需要专业人员对数据进行解释,难度大、过程繁琐,可视化功能差,无法形成三维的

收稿日期:2010-11-16;修回日期:2011-01-07

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAK22B04-12,2006BAB02B04-1-3-2);中南大学研究生学位论文创新资助项目(1960-71131100008)

作者简介:刘晓明,讲师,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:liuxiaoming33@163.com

空区模型。

空区激光探测系统 (Cavity Monitoring System, CMS) 可以快速获得被测点空间立体坐标, 获得空区壁三维点云数据。采集的三维点云数据经过滤可以进行标准格式转换, 输出其他工程软件能识别的文件格式, 并利用三维可视化建模技术将离散点构成不规则三角网 (TIN) 实体模型或进一步构成规则格网的块体模型。

本文在研究激光扫描测距原理的基础上, 综合利用 CMS 和矿业软件 Surpac 等数字化工具, 开展金属矿隐患空区三维信息获取及其可视化技术研究。

### 1 三维激光扫描原理

假如激光在 A、B 两点间往返一次所需时间为  $\Delta t$ , 则两点间距离  $D$  可表示为<sup>[3]</sup>

$$D = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1)$$

其中,  $c$  为光在大气中的传播速度。

由公式 (1) 可知, 如何精确测量时间  $t$  的值是测距的关键。根据测量时间  $t$  的方法不同, 分为脉冲测距和相位测距两种测距方法。

脉冲激光测距利用发射和接收激光脉冲信号的时间差实现对被测目标的距离测量, 只要测出激光脉冲发射与接收所用的往返时间, 即可求出被测量的距离。相位式激光测距是利用发射连续激光信号和接收信号之间的相位差所含有的距离信息实现对被测目标距离的测量。

目前, 大多数激光扫描仪采用脉冲激光测距, 采用无接触式高速激光测量, 以点云形式获取扫描物体表面阵列式几何图形的三维数据。常见的仪器有 CMS、C-ALS、LRIS-3D、LMS-Z420i 和 GS200 等扫描系统。

### 2 隐患空区 CMS 探测方法

CMS 因其能准确测定井下危险采空区及其他洞室空间的三维形态而被广泛应用于国内外金属地下矿山<sup>[4-7]</sup>。探测成果可直接用于计算空区体积、确定矿柱实际边界, 指导空区充填、矿柱爆破设计、回采贫损控制以及空区稳定性分析等相关采矿管理和过程控制。

总结多次金属矿隐患空区现场探测经验, 结合国内隐患空区和 CMS 应用的特点, 对空区 CMS 常规探测方法进行系列改进, 提出 3 种典型的隐患空区的 CMS 现场探测方法。

#### (1) 空区底部探测

对只有底部通道的隐患空区实施探测, 采用传统的方法不能有效固定探测杆和扫描头, 必须借助其他工具, 如采用高强度碳化玻璃钢支架或者利用井下石头和木板等作为支撑进行探测 (图 1)。

#### (2) 封闭空区探测

基于安全原因, 空区提前封闭, 此时根据空区的封闭方



(a) 以碳化玻璃钢支架 (a) Supported by carbonization FRP bracket (b) 以石头和木板为支撑 (b) Supported by stone and wood

图 1 空区底部 CMS 探测方法

Fig. 1 Monitor method at the bottom of cavity

式以沙包和水泥砖墙为支撑完成仪器的架设 (图 2), 此时两个测点靶标位置需要根据现场探测环境进行调整, 测点 1 不能置于扫描头上, 必须置于测量人员通过全站仪等仪器能够观测到的位置, 并记录测点 1 在水平支撑杆上的坐标, 测点 2 置于距离测点 1 大于 2m 的位置。



(a) 以沙包为支撑 (a) Supported by sandbags (b) 以水泥砖墙为支撑 (b) Supported by cement bricks

图 2 封闭空区 CMS 探测方法

Fig. 2 Monitor method of close cavity

#### (3) 通过空区上部通道探测

如果空区顶板上部有钻孔、溜井、天井等通道, 扫描头通过接杆直接利用上部通道进入空区上部进行探测 (图 3)。此时需要记录接杆数目, 并测量接杆与插销相交点坐标, 通过以下换算公式计算得到扫描头中心点坐标:

$$x_i = x_c \quad y_i = y_c \quad z_i = z_c - 1.5n \quad (2)$$

其中,  $(x_1, y_1, z_1)$  为扫描中心点坐标,  $(x_c, y_c, z_c)$  为 0 接杆与插销相交点坐标,  $n$  为接杆数。

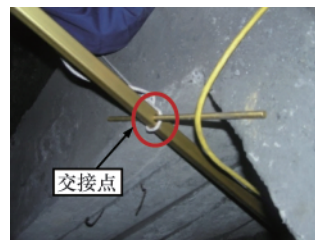


图 3 空区上部通道 CMS 探测方法

Fig. 3 Monitor method on the top of cavity

### 3 点云数据过滤与拼接

#### 3.1 点云数据过滤

在扫描过程中受外界环境因素的影响,以及空区壁反射特性不均匀,导致最终获取的扫描点云数据包含无距离点和坏点。同时,激光测距装置在扫描时快速运转,也将导致激光光束在不同相位上出现“中介质点”的现象,造成点位的偏移。为此,采用滤掉扫描中单个明显坏点的方法进行点云数据的处理,具体方法如下:首先根据工作区域的固定空间范围判断,超过这个范围的点可以认为是噪声点滤去;其次在同一个扫描平面上,如果某点与其相邻的两点的距离都超过某个可信值,认为该点是失真点滤去(图4)。但是考虑边缘的点,由于远离扫描中心,采样点之间的距离本身很大,如果此时结合点在扫描线上与前后两点连线的夹角小于某一可信值,方可确认该点为失真点<sup>[8]</sup>。

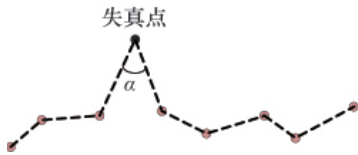


图4 扫描线上的失真点

Fig. 4 The distortion point on the scan line

#### 3.2 扫描数据拼接原理

由于激光沿直线传播,扫描过程中如遇遮挡或阻挡(顶板锚索、矿柱、空区存留矿石等),部分区域将无法准确探测<sup>[8]</sup>。因此,为了尽可能准确探测空区的实际边界,选择合理的探测位置至关重要。对于形态复杂的空区,应当设法进行多点探测,再将多次探测扫描获取的点数据进行拼接,形成完整的空区点云数据。

由于每次扫描得到的点云数据的点坐标都是相对于该扫描的坐标系,因此不同扫描次数(探测位置或视角不同)获取的点的三维坐标是处在不同的坐标系下。因此必须设法将多次扫描获取的三维点云数据置于一个公共的坐标系下,从而获取完整的空区三维点数据,此过程称为多点扫描数据的拼接,原理如图5所示。

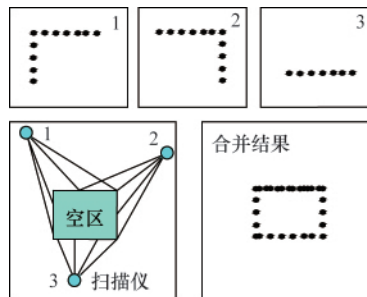


图5 多点扫描数据拼接

Fig. 5 Multi-points scanning data splicing

#### 3.3 多点扫描数据拼接方法

如果可以确定每次扫描点云坐标系在公共坐标系中的

坐标,就可以将每次探测扫描点云坐标转化在公共坐标系中,从而完成多点扫描数据的拼接。点云数据拼接的最终目标是把多次探测扫描采集到的点云坐标转换到空区模型公共坐标系中。坐标变换过程中,第*i*次探测扫描的点云数据在公共坐标系下的坐标(*x, y, z*)取决于在自己坐标系下的坐标(*x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>*)与公共坐标系的相对位置,可以表示为平移参数(*X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>*)和旋转参数  $R(\omega, \alpha, \beta)$  的坐标变换式<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R(\omega, \alpha, \beta) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过坐标变换将多次探测扫描的数据融合在公共坐标系下,以供建模处理。

#### 3.4 点云数据格式转换

点云数据经过滤与拼接后,即可采用CMS预处理软件CMSPosProcess将.txt的原始数据文件转换成其他软件可以使用的.dxf或.xyz文件。

### 4 隐患空区三维信息获取及其可视化

采用CMS对隐患空区进行扫描后,输出的点云数据经过滤、拼接及坐标、格式转换,采用三维矿业软件Surpac生成空区三维实体模型,并以此为基础开展模型计算、剖面输出及三维可视化等应用。隐患空区三维信息获取及可视化过程如图6所示<sup>[4]</sup>。

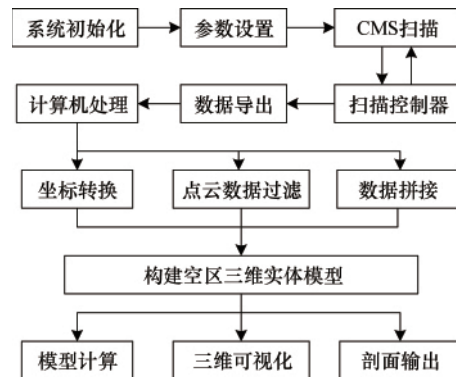


图6 隐患空区三维信息获取和可视化过程

Fig. 6 Process of 3D information acquisition of disaster cavity and its visualization

#### 4.1 工程概况

广西高峰矿业有限责任公司所属100#矿体是世界罕见的多种金属共生的特富矿体,具有很高的经济效益。多年来,大量矿民非法进入100#矿体乱采滥挖,使100#矿体千疮百孔,隐患空区分布错综复杂,多次发生大规模空区冒落,地表大面积塌陷,造成多次恶性事故。为了避免100#矿体发生特重大事故灾害,保证矿山井下安全生产,如何获取井下空区的实际形态、空间位置、体积大小及顶板面积等方面的信息至关重要。因此,采用CMS对-114、-124、-132和-145m共4个

典型中段复杂隐患空区进行探测, 准确获取空区三维信息。由于井下条件复杂, 探测条件恶劣(高温、高湿), 研究决定, 采用底部探测方法对空区进行探测。

#### 4.2 测点基本数据

采用 CMS 所扫描测量的点坐标是相对扫描头中心点的坐标, 因此, 为了精确获取空区各个扫描点坐标, 首先需要准

确求出扫描头中心点的坐标。系统通过计算扫描头支撑杆上的两个测点的坐标自动求出扫描头中心点的坐标值, 并且规定距离扫描头相对较近的测点作为测点 1, 较远的为测点 2。一般使用全站仪测定测点 1 和测点 2 的坐标  $(X, Y, Z)$ 。表 1 为高峰矿隐患空区现场探测时获得的扫描头支撑杆上测点基本数据。

表 1 扫描头支撑杆上测点基本数据

Table 1 Basic data for monitoring points data on the support bar

空区所在中段/m	测点编号	测点坐标			测点 1 与扫描头中心距离/m
		Y	X	Z	
-114	1	7805.514	8386.876	-112.998	0.25
	2	7807.286	8385.136	-113.415	
-124	1	7840.349	8391.066	-120.400	0.25
	2	7839.303	8389.072	-120.653	
-132	1	7658.907	8385.788	-131.270	0.25
	2	7657.698	8388.108	-131.947	
-145	1	7623.406	8351.297	-145.754	0.25
	2	7625.451	8351.286	-146.122	

#### 4.3 点云数据处理

高峰矿是典型的高温矿床, 井下探测现场温度高达  $38^{\circ}$ , 作业环境恶劣, 同时由于是民采空区, 空区边界复杂、形态各异, 空区周围锚杆、矿车设备等遮挡物较多, 给空区探测结果造成了不良影响, 扫描原始数据中产生了大量的坏点和无距离点, 如表 2 所示。

表 2 高峰矿探测空区坏点和无距离点数

Table 2 Number of bad and no distance points on cavities

空区所在中段/m	坏点	无距离点
-114	32	24
-124	15	21
-132	23	43
-145	46	51
合计	116	139

为此, 采用点云过滤方法对原始扫描数据进行过滤处理。同时, 由于空区形态复杂, 部分空区使用了多点探测, 为此, 多点探测数据经点云过滤处理后需进行数据拼接, 将同一空区多次探测数据进行拼接形成一个数据文件, 再将拼接好的文件转换成 .dxf 或 .xyz 格式。

#### 4.4 隐患空区三维模型生成

经转换后的隐患空区 .dxf 或 .xyz 文件, 通过矿业软件如 Surpac、3Dmine 和 Dimine 等均可以生成空区三维可视化模型, 不同软件生成方法不同, 但均是基于 Delaunay 三角网剖分法, 国内外许多文献均有研究<sup>[9-13]</sup>。

隐患空区 Surpac 建模的具体方法如下<sup>[11-12]</sup>: ① 利用 Surpac 数据导入接口将 .dxf 文件转换成实体模型 .dtm 文件; ② 验证 .dtm 文件有效性; ③ 如果实体模型验证有错误进行

④, 否则进行⑤; ④ 重新进行原始探测数据转换及处理, 返回①; ⑤ 利用 Surpac 的实体模型编辑工具对空区模型进行必要的编辑(通常采用实体模型布尔运算的方法对空区旁的巷道部分进行切割处理); ⑥ 再次验证修改后的模型, 如错误返回⑤, 重新对模型进行编辑, 反之完成采空区三维模型 Surpac 构建。

运用上述空区三维模型 Surpac 生成方法依次完成高峰矿隐患空区三维可视化模型的生成, 结果如图 7 所示。

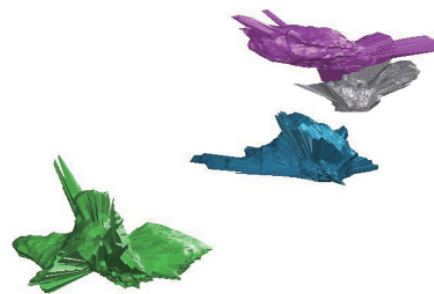


图 7 高峰矿 CMS 探测空区三维可视化模型

Fig. 7 3D cavity model of Gaofeng Mine

#### 4.5 隐患空区体积与顶板面积计算

##### 4.5.1 空区体积计算

隐患空区的体积大小是评价空区稳定性一项重要指标, 相同外界条件下, 空区体积越大, 空区周围围岩应力越集中, 越容易出现顶板垮塌或片帮等空区失稳情况, 为此, 控制单个空区体积大小是确保空区稳定的重要环节。通常, 采场回采后形成的空区, 随着时间的延长, 空区体积也会经常发生变化, 主要表现为体积增大, 因此, 及时准确地掌握空区体积

能为空区处理提供重要依据。

空区三维模型生成后,采用 Surpac 和 QVOL 软件均可计算空区体积。实践表明,不同软件计算所得空区体积结果相同。采用 Surpac 计算采空区体积的方法是:① 将空区实体模型导入 Surpac 软件;② 验证空区实体模型有效性,如验证错误需要对模型进行修改;③ 空区实体模型验证无误后,利用自带的体积计算功能即可算出空区体积<sup>[11]</sup>。

#### 4.5.2 顶板面积计算

顶板面积,即空区顶板暴露面积是评价空区是否安全的一项重要指标。空区高度相同时,顶板暴露面积越大,空区危险性越高。在进行采场设计时,通常会根据周围岩层的稳固性、采矿方法等设置合理的开采后空区顶板面积,但受各种条件的影响,开采后顶板面积经常增大,因此,经常出现空区冒顶、片帮等事件。

利用空区三维模型计算顶板面积的方法如下:① 将空区实体模型导入 Surpac 软件中;② 验证空区实体模型有效性,如验证错误需对模型进行修改;③ 空区实体模型验证无误后,利用模型剖切功能在空区顶板位置对空区进行水平剖切,生成剖面线;④ 计算剖面线的面积,即为空区顶板面积。

采用体积和顶板面积计算方法,分别计算了高峰矿探测空区的体积和顶板面积,结果如表 3 所示。

表 3 高峰矿探测空区体积和顶板面积计算结果

Table 3 Computational result of volume and roof area of cavities

空区所在中段/m	体积/m <sup>3</sup>	顶板面积/m <sup>2</sup>
-114	1367	335.96
-124	554	301.52
-132	1627	252.17
-145	2581	432.48
合计	6129	1322.13

## 5 结论

(1) 研究三维激光扫描原理的基础上,针对井下不同作业环境提出了相适应的隐患空区 CMS 现场探测方法。

(2) 在研究探测原始数据格式及其特点的基础上,研究了点云数据过滤与探测数据拼接的原理与方法,实现了探测原始点云数据格式的转换。

(3) 结合 Delaunay 三角剖分法,提出采用矿业软件 Surpac 构建可视化程度更高、可编辑性更强和实用性更好的空区三维模型技术,实现了复杂隐患空区三维信息有效获取及其可视化技术。

### 参考文献 (References)

[1] Liu X L, Li X B, Li F B, et al. 3D cavity detection technique and its

application based on cavity auto scanning laser system [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(4): 285-288.

- [2] 刘菁华, 王祝文, 朱士, 等. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(6): 715-719.  
Liu Jinghua, Wang Zhuwen, Zhu Shi, et al. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(6): 715-719.
- [3] Huber D, Vandapel N. Automatic 3D underground mine mapping [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2005, 25(1): 7-17.
- [4] Optech System Corporation. Cavity monitoring system wireless user manual[M]. Toronto: Optech System Corporaten, 2004.
- [5] Liu X M, Luo Z Q, Chen Q F, et al. 3D dynamic monitoring of collapse area based on CMS-Surpac [C]. 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, Beijing, 2009, 2: 637-641.
- [6] Liu X M, Luo Z Q, Yuan W N, et al. CMS applications in metal mines of China [C]. Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, Wuhan, 2009: 353-356.
- [7] Luo Z Q, Liu X M, Zhang B, et al. Cavity 3D modeling and correlative techniques based on cavity monitoring [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(5): 639-644.
- [8] 李菁. 基于激光传感器点云数据的开挖地貌三维重建与显示 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
Li Jing. 3D Reconstruction and display of pneumatic caisson excavated surface based on laser scan point cloud[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [9] 王盛玺, 宋松和, 邹正平. 基于约束 Delaunay 三角化的二维非结构网格生成方法[J]. *计算物理*, 2009, 26(3): 335-348.  
Wang Shengxi, Song Songhe, Zou Zhengping. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2009, 26(3): 335-348.
- [10] 黄争舸, 陈建军, 郑耀. 基于不规则三角网的分块地形网格生成算法 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2009(10): 1939-1944.  
Huang Zhengge, Chen Jianjun, Zheng Yao. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition*, 2009(10): 1939-1944.
- [11] Luo Z Q, Liu X M, Su J H, et al. Deposit 3D modeling and application [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14 (2): 225-229.
- [12] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(3): 547-555.
- [13] 罗周全, 刘晓明, 张木毅, 等. 大规模采场三维探测及回采指标可视化计算[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2009, 40(6): 1722-1736.  
Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, Zhang Muyi, et al. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2009, 40 (6): 1722-1736.
- [14] 王恩德, 李艳, 鲍玉斌. 矿体三维可视化建模技术 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(9): 890-892.  
Wang Ende, Li Yan, Bao Yubin. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2005, 26(9): 890-892.
- [15] Gong J Y, Cheng P G, Wang D Y. Three dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 391-404.

(责任编辑 刘志远)