

# 爆破漏斗体积测量方法比较与应用研究<sup>①</sup>

高峰<sup>1</sup>, 李新<sup>1</sup>, 罗增武<sup>2</sup>, 熊信<sup>1</sup>, 李聪<sup>1</sup>, 卢海川<sup>2</sup>

(1.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2.广西高峰矿业有限责任公司, 广西 南丹 547051)

**摘要:** 针对传统爆破漏斗体积测量方法在测量精度和效率上的不足, 对传统基准平面垂直断面法进行了改进, 并以高峰矿深部矿体单孔爆破漏斗试验为例, 分别采用三维激光扫描法与改进基准平面垂直断面法测量其体积, 综合对比结果表明, 三维激光扫描法在测量精度、效率以及操作性上均有较大优势。研究内容为爆破漏斗体积的精准测量提供了一种新思路。

**关键词:** 爆破漏斗; 体积测量; 三维激光扫描; 基准平面垂直断面法

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.009

文章编号: 0253-6099(2023)03-0038-04

## Comparison of Different Ways of Volume Measurement for Explosion-Produced Crater

GAO Feng<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, LUO Zengwu<sup>2</sup>, XIONG Xin<sup>1</sup>, LI Cong<sup>1</sup>, LU Haichuan<sup>2</sup>

(1.School of Resources and Security Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Guangxi Gaofeng Mining Co Ltd, Nandan 547051, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to find a more accurate and efficient way to measure volume of explosion-produced craters, the traditional method by using a reference plane with a vertical section was improved. Taking the crater produced by single-hole blasting of the deep orebody in Gaofeng Mine as an example, the measurement result by using 3D laser scanning was compared to that by using a reference plane with a vertical section. It is found that 3D laser scanning measurement is superior in terms of accuracy, efficiency and measuring operability. This research can provide a new idea for accurately measuring the volume of explosion-produced craters.

**Key words:** explosion-produced crater; volume measurement; 3D laser scanning; measurement by a reference plane with a vertical section

爆破漏斗试验法是确定爆破参数的主要方法之一。在爆破漏斗试验中, 爆破漏斗测量的准确性直接影响爆破参数合理性, 因此选择一种高效、便捷和精准的漏斗体积测量方法就显得极为重要<sup>[1-2]</sup>。传统爆破漏斗体积测量方法<sup>[3]</sup>包括基准平面垂直断面法、体重法以及三点基准定位法。基准平面垂直断面法原理简单, 但实际测量过程中受主观因素影响较大, 且测量步骤缓慢; 体重法对爆堆进行称重时, 劳动强度大, 且相邻爆堆以及与剥落块石之间有时难以区分; 三点基准定位法与基准平面垂直断面法类似, 测量过程繁琐费时, 数据处理较为复杂。

三维激光扫描在矿山领域已经有了丰富的应

用<sup>[4-11]</sup>, 并被证实具有精度高、速度快、效率高、可靠性强以及智能便携等特点。

为了更好地论证各测量方法的优越性, 本文首先对传统基准平面垂直断面法进行简单改进, 再利用改进基准平面垂直断面法与三维激光扫描测量方法开展现场爆破漏斗体积测量。

### 1 测量原理

#### 1.1 三维激光扫描测量原理

本次研究采用的是 MAPTEK 的 R 系列高精度三维激光扫描仪, 其最大测距 600 m, 测量距离精度 4 mm, 测量重复精度  $\pm 3$  mm, 数据采集速率 100 kHz,

① 收稿日期: 2022-11-28

作者简介: 高峰(1981—), 男, 湖南怀化人, 博士, 副教授, 主要从事金属矿开采技术及工艺、矿山岩石力学、环境工程灾害机理与防治的教学和科研工作。

通信作者: 李新(1997—), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿山岩石力学、金属矿山开采技术及工艺。

扫描视角水平方向 360°, 垂直方向 260°。其测量原理主要是利用反射波得到被测目标的距离  $S$ 、水平测量角度  $a$  和垂直测量角度  $b$ , 并通过式(1)计算得到该点的三维坐标<sup>[4]</sup>。其扫描原理如图 1 所示。

$$\begin{cases} x = S \sin a \cos b \\ y = S \cos a \cos b \\ z = S \sin b \end{cases} \quad (1)$$

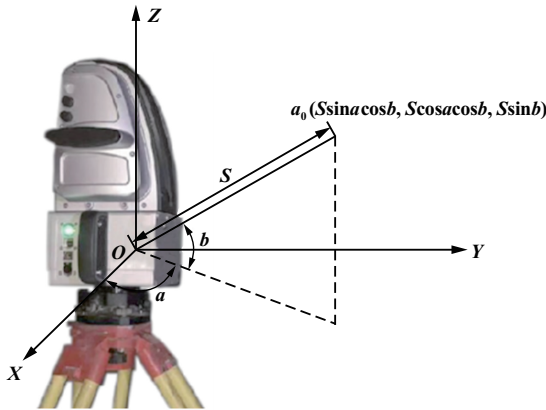


图 1 三维激光扫描原理

利用三维激光扫描进行测量时, 首先对爆破前后的目标区域进行扫描, 并利用相关点云数据处理软件建立爆破漏斗爆破前、后的实体模型。扫描完成后, 采用人工方式测量爆破漏斗半径, 即通过主观经验对爆破漏斗边界与剥落块体进行区别, 以弥补三维激光扫描模型无法准确判断漏斗边界的问题。将人为界定的半径数据导入到模型内, 通过 3Dmine 软件对爆破前、后模型以及半径数据进行处理分析, 计算出爆破前、后模型与漏斗边界的差集模型, 即爆破所形成的爆破漏斗块体模型, 利用软件计算可得到爆破漏斗体积。测量流程如图 2 所示。

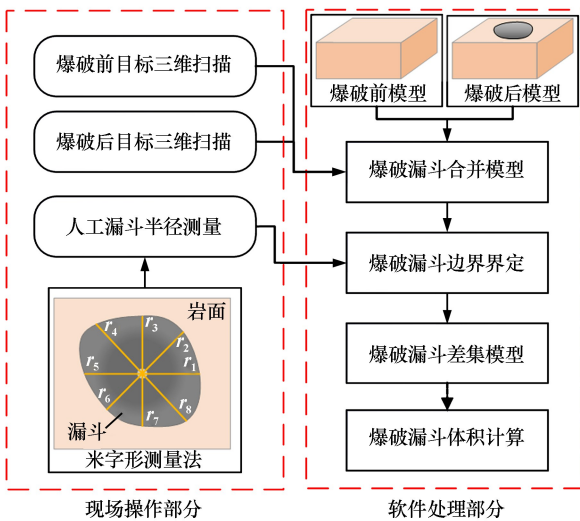


图 2 三维激光扫描测量流程

### 1.2 改进基准平面垂直断面法测量原理

基准平面垂直断面法测量主要是通过设计一个垂直于炮孔轴线的基准面, 并按照一定间距在基准面和漏斗轮廓线之间划分一系列的垂直断面, 根据断面上各点到基准面上的距离计算出各断面的面积, 最后利用各断面面积计算得到爆破漏斗的体积值, 计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$S_i = \frac{B}{3} [(y_0 + y_n) + 2(y_2 + y_4) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{2i+1})] \quad (2)$$

$$V = \frac{B}{3} [(S_1 + S_n) + 2(S_2 + S_3 + \dots + S_{n-1}) + \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i + S_{i+1}}] \quad (3)$$

式中  $V$  为爆破漏斗体积,  $m^3$ ;  $S_i$  为漏斗断面面积,  $m^2$ ;  $y_i$  为各测点对应的爆破深度,  $m$ ;  $B$  为测点间距,  $m$ 。

为了提高测量效率和精度, 对传统基准平面垂直断面法进行了改进, 增加了基准面十字架、断面辅助杆以及垂直测量钢尺。基准面十字架通过十字架的方式来代表基准面, 且四端设有定位点, 以保证爆破前、后基准面位置的固定, 断面辅助杆用以代表被测量的断面, 垂直钢尺则垂直布置于断面辅助杆之上, 以保证测量准确性。同时基准十字架和断面辅助杆上都刻有刻度尺, 以便于测量断面和测点。其测量原理如图 3 所示。

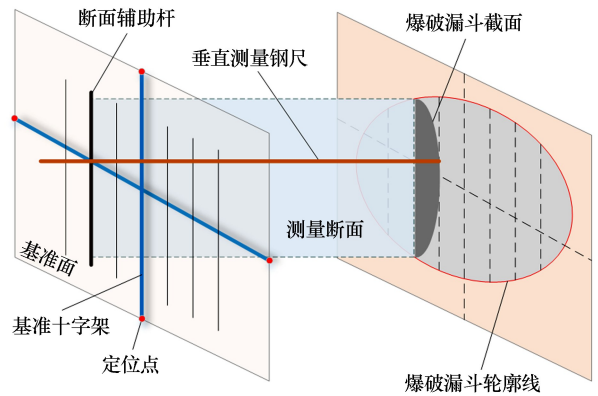


图 3 改进基准平面垂直断面法测量原理

## 2 工程应用

### 2.1 工程背景

广西高峰矿目前井下开采深度超过 800 m, 针对井下深部急倾斜厚大矿体的开采, 矿山开展基于中深孔落矿的开采方案研究。其中, 采用系列爆破漏斗试验对中深孔爆破参数进行反演。以高峰矿单孔爆破漏斗试验为基础, 选择爆破效果较好的 1-3#、2-2#、2-3# 以

及2-4#炮孔为测量对象,其孔深分别为0.55 m、0.50 m、0.55 m和0.60 m,孔径均为40 mm,炮孔间距1.5 m,采用2#岩石乳化炸药,单孔装药量为1卷,药卷直径为32 mm、长度为300 mm,药卷质量为300 g/卷,全孔堵塞,采用单孔孔底起爆、孔间逐孔起爆的方式进行起爆。

## 2.2 三维激光扫描测量

完成炮孔起爆前的准备工作后,先对目标炮孔进行三维扫描;待爆破和通风后,再对目标炮孔爆破后所形成的爆破漏斗区域进行扫描。扫描结束后,将所得点云数据导入点云处理软件进行三维重构,得到爆破前、后的目测区域三维模型,最后将两组模型进行坐标拼接,最终得到爆破漏斗的合并模型,如图4所示。由于爆破振动导致的局部块体剥落以及模型重合时的操作和软件显示等问题,合并模型中无关区域部分并没有完全重合,但该部分体积数值较小,对爆破漏斗体积测量值影响可以忽略。

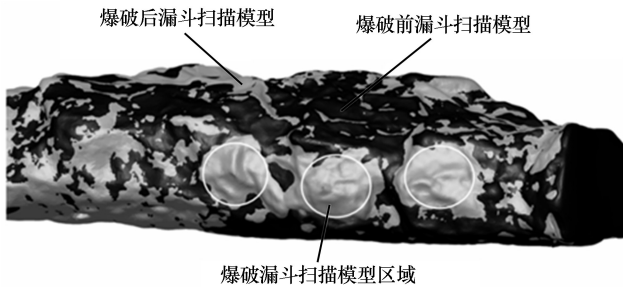
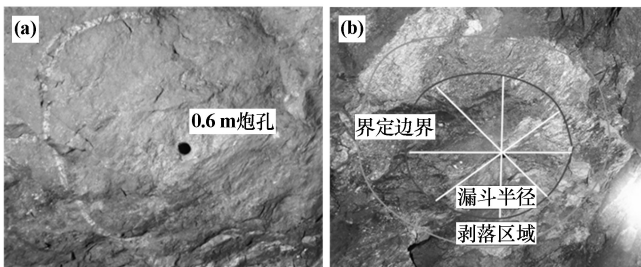


图4 爆破漏斗区域模型

采用人工测量方式对爆破漏斗边界范围进行界定时,需要一定专业经验来判断真实漏斗边界与剥离岩块部分的范围,并做好标记准备测量。测量时按“米”字形每隔45°测量漏斗半径。在后续软件建模中,将测定的半径数据导入到合并模型中,根据各个方向上半径的大小即可确定爆破漏斗的真实范围,如图5和图6所示。



(a) 爆破前; (b) 爆破后

图5 单孔爆破漏斗试验爆破前后对比

在爆破漏斗边界确定后,通过3Dmine三维处理软件,根据边界范围切割出爆破漏斗的差集模型,并根

据差集模型中爆破前、爆破后和边界线,利用软件内置“三角网法”表面-体积计算公式计算出爆破漏斗体积。为便于计算,先利用软件内部命令将单个漏斗从整体模型中分离出来,再通过体积计算命令计算出漏斗体积,如图7所示。

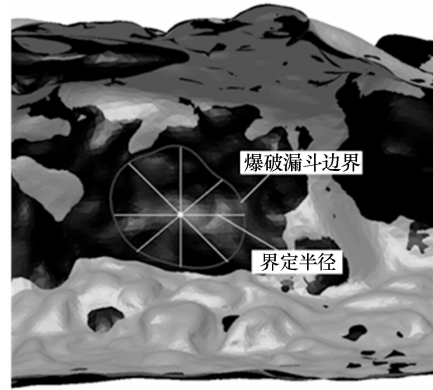


图6 爆破漏斗模型边界界定

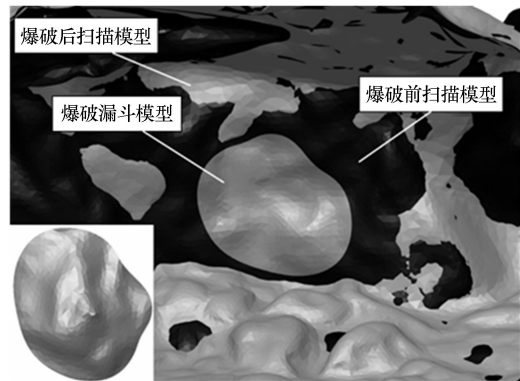


图7 爆破漏斗差集模型

## 2.3 改进基准平面垂直断面法测量

由于巷道壁面不是绝对的平整面,为保证测量准确性,需要对爆破前以及爆破后的炮孔区域进行测量,通过前后差集计算出漏斗体积。爆破前测量首先将基准十字架中心对准炮孔轴心,并对基准十字架上的四个方位点进行定点标记,以基准十字架所在的平面作为基准面。测量时按设计间距,将断面辅助杆固定到基准十字架测量位置,以断面辅助杆的垂直面作为测量断面,通过垂直钢尺对该断面上各测点进行测量。爆破后,按之前标记好的定位点布置好基准十字架,按同样的流程测量爆破后漏斗区域断面,将测量得到的数据按式(2)和式(3)计算得到爆破前后体积差即为所求的爆破漏斗体积。

## 2.4 测量结果对比

三维激光扫描测量和改进基准平面垂直测量法测量结果如表1所示。

表1 爆破漏斗测量方法结果对比

炮孔 编号	测量体积值/m <sup>3</sup>		相对差值/%
	改进基准平面垂直断面法	三维激光扫描	
1-3 <sup>#</sup>	0.229	0.251	8.8
2-2 <sup>#</sup>	0.138	0.153	9.8
2-3 <sup>#</sup>	0.257	0.294	12.6
2-4 <sup>#</sup>	0.296	0.283	4.6

从表1可以看出,改进基准平面垂直断面法测量结果与三维激光扫描测量结果存在较大差值。从测量原理上分析其误差产生的原因可知,改进基准平面垂直断面法测量在断面划分细密程度上以及网格点与基准面测距时的主观操作误差会较大程度地影响测量精度,而三维激光扫描理论上不存在此类误差,因此三维激光扫描测量精度要优于改进基准平面垂直断面法。

在实际操作过程中,采用改进基准平面垂直断面法测量时操作较为繁琐,需要多人配合来分别完成固定基准面、测点测量以及记录数据等工作,同时由于改进基准平面垂直断面法需要测量的网格点较多,完成测量所需时间较长。由于爆破振动以及井下环境复杂,长时间测量工作对测量人员的安全不利。因此,基准平面垂直断面法虽然测量原理简单易懂,但其本质上仍是一种相对费时费力的方法。三维激光扫描技术的显著优势是不需要设置基准面,也不需要漏斗数据进行复杂繁琐的手动测量,扫描时长短,单次扫描的时长在8 min以内,且扫描时的误差主要来源于主观的边界界定误差以及客观的机械误差,测量误差较小,同时扫描后的数据处理过程也相对简单。

### 3 结 语

1) 对传统基准平面垂直断面法进行了改进,并将三维激光扫描测量与改进基准平面垂直断面法测量结果进行综合对比,井下测量实践证明,三维激光扫描测量在测量效率、测量准确度、测量工作量等方面都具有

较大优势。

2) 三维激光扫描在测量精度、效率以及自动化程度上都有较大优势,但局限于爆破漏斗边界控制精度的要求,仍需要人工对边界进行测量,一定程度上制约了该方法的自动化程度以及效率的提高。

### 参考文献:

- [1] 叶图强. 云浮硫铁矿爆破漏斗试验研究[J]. 工程爆破, 2014,20(1): 5-8.
- [2] 黄 尘,李江腾,赵 远,等. 基于 PFC<sup>2D</sup>的冬瓜山铜矿爆破参数优化[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):1-4.
- [3] 江飞飞,李向东. 三点基准定位测量法在爆破漏斗试验中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2014,66(3):81-84.
- [4] 李杰林,杨承业,彭朝智,等. 三维激光扫描技术在地下巷道岩体结构面识别的应用[J]. 黄金科学技术, 2021,29(2):236-244.
- [5] 葛云峰,夏 丁,唐辉明,等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(12): 3050-3061.
- [6] Riquelme A J, Abellan A, Tomas R, et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds[J]. Computers and Geosciences, 2014,68:38-52.
- [7] 任洪文,刘兆富,韩智尧,等. 三维激光扫描技术在测绘采空区中的应用[J]. 黄金科学技术, 2013,21(3):64-68.
- [8] 李泽邦. 基于三维激光扫描技术在矿山采空区边坡变形监测中的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学国土资源工程学院, 2018.
- [9] 李鹏宇,姜 岳,宗 琪,等. 基于三维激光扫描技术的某金矿采场体积测量与计算[J]. 金属矿山, 2018(4):145-149.
- [10] 邱俊玲,夏庆霖,姚凌青,等. 基于三维激光扫描技术的矿山地质建模与应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012,37(6): 1209-1216.
- [11] 鹿 浩,罗周全,张文芬,等. 复杂采空区激光扫描异常点云过滤研究[J]. 矿冶工程, 2015,35(3):14-17.
- [12] 邓 琛,彭泽锋,蒋志明,等. 基准平面垂直断面法在爆破漏斗试验中的应用[J]. 工程爆破, 2021,27(1):85-88.

引用本文: 高 峰,李 新,罗增武,等. 爆破漏斗体积测量方法比较与应用研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):38-41.