

# 爆腔体积对爆炸作用效果的影响

杨浩宇<sup>1</sup>, 刘仙仙<sup>1</sup>, 张永贵<sup>2</sup>

(1. 神木职业技术学院, 陕西 神木, 719300; 2. 北方魏家峁煤电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯, 017000)

**摘要:** 为了研究爆腔体积变化对爆炸效果的影响, 采用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 板作为被爆介质, 在炸药量相同的情况下, 改变起爆点爆腔体积, 使用超动态应变仪测量 PMMA 板表面应变演化规律, 通过分形维数研究了爆破附近裂纹扩展情况。结果表明: 随着爆腔体积的增加, 炮孔附近测得的应变峰值逐渐减小, 炮孔附近裂纹数量以及长度减小, 爆生裂纹分形维数与爆腔体积负相关。

**关键词:** 爆炸; 爆腔体积; 应变; 分形维数

中图分类号: TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.015

## Influence of Chamber Volume on Explosion Effect

YANG Hao-yu<sup>1</sup>, LIU Xian-xian<sup>1</sup>, ZHANG Yong-gui<sup>2</sup>

(1. Shenmu Vocational and Technical College, Shenmu, 719300; 2. North Weijiamao Coal Power Co. Ltd., Eerduosi, 017000)

**Abstract:** In order to study the effect of chamber volume change on the explosion effect, polymethylmethacrylate (PMMA) plate was used as the detonation medium. With the same amount of explosive, the chamber volume at the initiation point was changed, and the surface strain evolution of PMMA plate was measured by super dynamic strain gauge. The crack propagation near the explosion was studied by fractal dimension. The results show that with the increase of cavity volume, the peak strain near the blast hole decreases gradually, the number and length of cracks near the blast hole decrease, and the fractal dimension of blasting cracks is negatively correlated with the cavity volume.

**Key words:** Explosion; Cavity volume; Strain; Fractal dimension

在岩石爆破作业过程中, 爆腔体积变化直接影响岩石块度大小、炸药量成本以及工程实施进度。在深孔爆破过程中, 可以通过改变炮孔直径、封堵长度以及装药耦合系数等参数来改变爆腔体积, 从而得到不同的爆破效果。国内外学者对爆腔体积变化对爆炸产生的影响进行了研究。Yuan 等<sup>[1]</sup>分析了耦合系数对岩石能量渗透率的影响, 研究表明随着耦合系数增加, 爆破引发的有效渗透面积先增大后减小。杨仁树<sup>[2]</sup>利用切缝药包研究了不耦合装药对爆炸动态断裂的影响, 发现不耦合系数为 1.67 时, 切缝药包爆破效果最

好。宋庆刚<sup>[3]</sup>研究了炮孔直径对层状板岩光面爆破的影响, 结合 LS-DYNA 软件进行了数值模拟, 发现当炮孔直径为 115mm 时爆破效果最好。梁瑞等<sup>[4]</sup>研究了地下采场爆破作业过程中堵塞长度对爆破效果的影响, 发现在一定堵塞长度范围内, 爆破漏斗体积和堵塞长度成正比, 同时提出采场爆破最佳堵塞长度为空口 1.6m、孔底 1.1m。

Mandelbort<sup>[5]</sup>等在 1975 年建立了分形概念, 谢和平<sup>[6]</sup>把分形理论应用到岩石力学中, 用于研究岩石损伤演化规律。本文通过有机玻璃板爆炸试验, 利用超

收稿日期: 2020-12-29

作者简介: 杨浩宇(1986-), 男, 讲师, 主要从事爆炸力学研究。

基金项目: 陕西省教育厅 2020 年度一般专项项目 (20JK0622)。

动态应变仪以及分形理论对爆炸效果进行分析,对比不同爆腔体积下炮孔附近应变场演化规律以及炮孔附近损伤范围,研究爆腔体积对二维平面产生的破坏效果和损伤规律,为爆破施工提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 材料模型

选用有机玻璃为试验材料,模型尺寸为 400mm×300mm×5mm,炮孔位于试件中心,炮孔半径为 3mm,与玻璃板相贯穿,如图 1 所示。炮孔上下表面采用堵头进行封堵,如图 2 所示,堵头中间部位掏空,通过增加垫片的方式来改变爆腔体积,定义当垫片把堵头掏空部位全部填充时为 100%堵塞。本试验设计了 25%、50%、75%、100%堵塞 4 种方案,分别命名为 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>,每次炸药使用量相同,为 50mg DDNP。在距离炮孔 50mm 的位置布置应变片,用来测量径向应变。

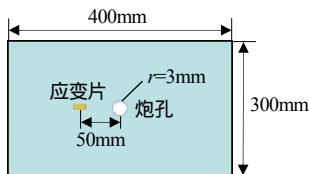


图 1 试件示意图  
Fig.1 Schematic diagram of specimen

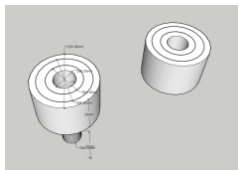


图 2 堵头模型  
Fig. 2 Plug model

### 1.2 测试系统

本试验采用超动态应变测试系统测量应变,该系统主要由电阻式应变片、数据传输线、桥盒、超动态应变采集仪以及笔记本电脑组成,如图 3 所示。超动态应变仪型号为 LK2107A 型,由于其采样频率高、采集精度高,因此被广泛应用于爆炸测试中。本试验采样率为 50MSPS,桥压设置为 4V,增益为 200,应变片使用电阻式应变片,敏感栅尺寸为 2mm×1.2mm,电阻值为 130Ω,凌明渡系数为 (2.15±1)%。

试验测得的信号为电压信号,通过设置桥压和增

益来将电压信号进行调整,测得的电压与应变信号可通过式(1)来转化:

$$\varepsilon = \frac{4U_0}{kU_1A} \quad (1)$$

式(1)中:U<sub>0</sub>为输出电压,单位为V;k为应变片中原值的灵敏度系数;U<sub>1</sub>为桥压,单位为V;A为增益系数。

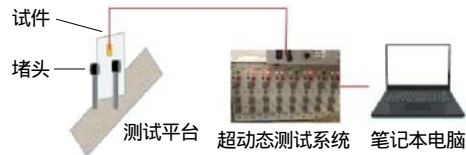


图 3 超动态应变测试系统  
Fig.3 Super dynamic strain test system

## 2 试验结果

### 2.1 试件裂纹扩展结果

爆腔体积不同时试件爆炸后断裂形态如图 4 所示。由图 4 可见,当堵头被堵塞程度为 25%时,产生的爆生裂纹数量较少,而且裂纹长度较短,随着堵塞程度的增加,裂纹数目增多,主裂纹的长度增加,可以从图 4(c)中观察到 2 条明显的主裂纹,长度要远大于堵塞程度为 25%和 50%时的主裂纹。当堵塞程度为 100%时,裂纹数量最多,并且较长裂纹的数目也是最多的。

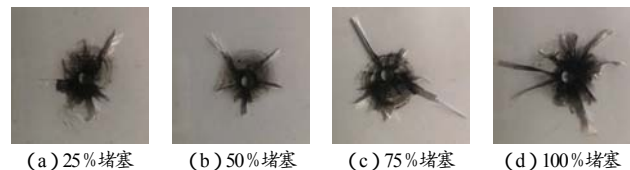


图 4 试件断裂形态  
Fig.4 Fracture morphology of specimen

### 2.2 应变测试结果

测得的应变曲线利用 CEEMD 方法进行分解降噪,得到图 5 的应变重构曲线。由图 5 可以发现当堵塞率较小时,获得的应变峰值较小,随着堵塞程度的增加,也就是爆腔体积的减小,测量得到的应变峰值逐渐增加,几组试件测得的应变峰值依次为 3 447μ $\varepsilon$ , 4 010μ $\varepsilon$ , 5 592μ $\varepsilon$  和 7 510μ $\varepsilon$ 。由于应变片放置的位置相同,测得峰值对应的时间都是 40μs,这说明爆腔体积的改变对于爆炸应力波作用的时间没有影响,而对试件应变造成直接影响。

当堵塞为 25% 时,测得的应力值较小,这是当爆腔体积较大时,炸药爆炸产生的应力波和爆生气体不能直接作用在被爆介质,由于应力波和爆生气体在空气中传播会衰减,导致传递到试件时应力波作用效果减弱。当堵塞程度较大时,应力波会直接较快作用在试件上,使炮孔周围产生裂缝,由于爆腔体积较小,产生的爆炸气体只能沿着裂纹传递,导致裂纹长度和数量增加。4 组试件应变曲线在经历过 1 次上升后均会再次小幅度抖动,这是由于用于封堵炮孔的堵头中间空间较小,导致传递到其他方向的应力波经过堵头内表面的反射同样传递到应变片的方向,造成获得的应变曲线不止 1 个峰值。

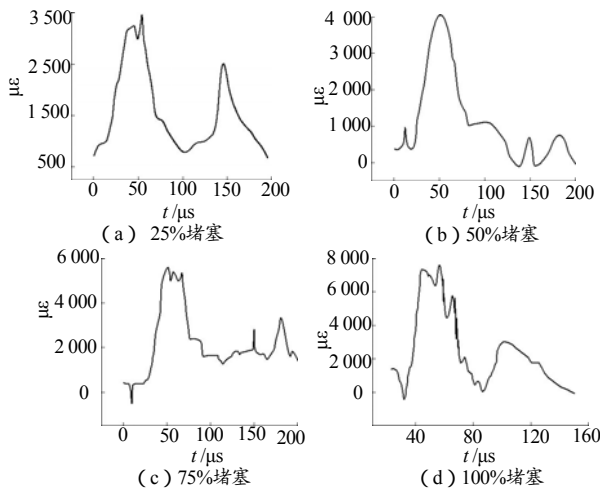


图 5 不同试件爆炸应变曲线  
Fig.5 Explosion strain curves of different specimens

### 3 分形维数计算

#### 3.1 图像二值化处理

通过 MATLAB 软件对爆炸后试件得到的裂纹图像进行二值化处理,设置图像宽为  $m$  像素,高为  $n$  像素,二值化图像由黑色和白色的像素点构成,处理后的 4 组试件二值图如图 6 所示。

#### 3.2 爆破粉碎区面积计算

通过统计二值图炮孔附近粉碎区占有的像素点数,可以计算出爆腔体积不同时爆破粉碎区的面积(无量纲)。粉碎区面积和爆腔体积的关系如图 7 所示,可以观察到当堵塞程度为 25% 时粉碎区面积为 35,堵塞程度为 50% 时,粉碎区面积为 53,增加了 51.34%,当堵塞程度为 100% 时,粉碎区面积为 106,

比起 25% 堵塞的情况,粉碎区面积增加了 100%,由此可见缩小爆腔体积可以有效增加粉碎区的面积。

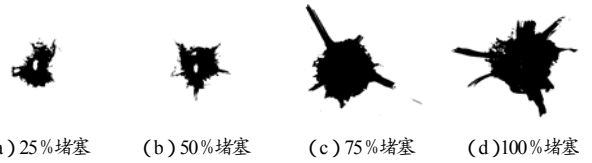


图 6 不同爆腔体积下试件二值化图  
Fig.6 Binarization diagram of specimens with different cavity volumes

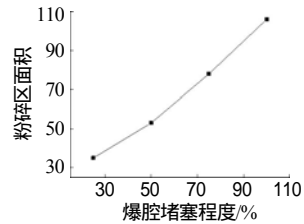


图 7 粉碎区面积随爆腔堵塞变化  
Fig.7 The area of comminution zone changes with the blockage of blast chamber

#### 3.3 分形维数计算

计盒维数适用于表征裂纹的分布情况,从数学角度易于计算,因此被广泛应用于分形研究中。通过将裂纹分布在均匀的网格中,然后调整网格边长,最终得到裂纹分布分形的计盒维数,如图 8 所示。计盒维数的计算公式为<sup>[7]</sup>:

$$D_a = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg N(\delta)}{\lg \delta} \quad (2)$$

式(2)中: $N(\delta)$ 为非空盒子的个数;  $\delta$ 为盒子尺寸。

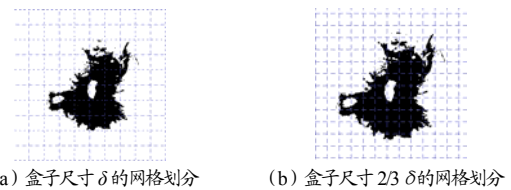


图 8 计盒维数网格划分  
Fig.8 Box counting dimension mesh generation

根据计盒维数的定义和计算公式,编写出 MATLAB 计盒维数程序,对二值化处理后的图像进行分形计算。图 9 为不同爆腔体积下试件爆炸断裂后计盒维数拟合直线图,拟合结果的相关系数  $R^2 > 0.98$ ,因此拟合计盒维数符合线性关系,  $B_1 \sim B_4$  4 个试件的分形维数分别为 1.49、1.56、1.63、1.75。爆腔堵塞程度和分形维数的关系如图 10 所示,可以发现随着爆腔堵塞程度由 25% 增加至 50%,分形维数增加了 4.6%;爆腔堵塞程度由 50% 增加至 75%,分形维数增加了 4.6%。随着爆腔堵塞程度增加,爆腔体

积缩小,使炸药爆炸产生的功主要作用在试件上,导致试件受到冲击后形成破碎区的分形维数增加。

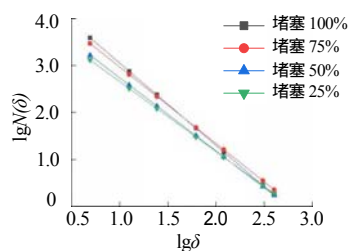


图9 计盒维数拟合直线

Fig.9 Fitting straight line with box counting dimension

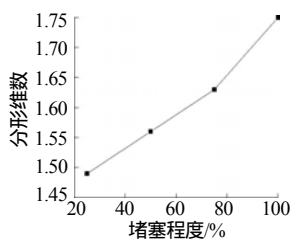


图10 分形维数随堵塞程度变化

Fig.10 The fractal dimension changes with the degree of clogging

## 4 结论

(1) 爆腔体积的改变会直接影响被爆介质的断裂程度,随着爆腔体积的减小,试件被破坏的情况越严重。

(2) 堵塞程度增加会使得试件爆炸后应变峰值增加,但是不会影响爆炸应力波作用在试件的时间。

(3) 分形维数能够很好地反映试件爆炸后裂纹分布状况,随着爆腔堵塞程度增加,分形维数增加。

### 参考文献:

- [1] Yuan W, Wang W, Su X, et al.. Numerical study of the impact mechanism of decoupling charge on blasting-enhanced permeability in low- permeability sandstones[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2018(106): 300-310.
- [2] 杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 7(32): 1 337-1 343.
- [3] 宋庆刚, 李玉能, 田仁永, 等. 炮孔直径对层状板岩光面爆破效果影响的研究[J]. 爆破, 2019, 153(03): 64-68.
- [4] 梁瑞, 吕亚茹, 周文海, 等. 地下采场爆破孔堵塞效应及长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(05): 1 546-1 554.
- [5] MANDELBROT B B, WHEELER J A. The fractal geometry of nature[J]. American Journal of Physics, 1998, 51(4): 468.
- [6] 谢和平. 分形: 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [7] 杨仁树, 许鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3 065-3 071.