

文章编号: 1003-1480(2022)02-0069-05

# 分段装药对煤矿岩石爆炸破碎效果影响

刘仙仙, 张华江, 杨浩宇

(神木职业技术学院, 陕西 神木, 719300)

**摘要:** 为增强深部煤矿岩石爆炸破碎效果, 提出了一种分段装药的爆破方法。基于 SPH(光滑粒子流)方法, 对不同分段比例装药结构下岩体破碎情况、岩石飞散速度以及爆破成腔效果进行了分析, 使用分形维数比较了不同装药结构下岩石的破碎效果。研究表明, 孔底起爆效果比孔口起爆效果好, 普通连续装药结构不能最大化利用爆炸的破岩效果, 采用分段装药的方法能为下部岩体破碎增加临空面。当上部装药比例为 0.4 时, 炸药对岩体的破碎效果最好。

**关键词:** 煤矿岩体破碎; SPH; 分段装药; 分形维数

**中图分类号:** TD824 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.015

## Effect of Segmented Charge on Explosive Fragmentation of Coal Mine Rock

LIU Xian-xian, ZHANG Hua-jiang, YANG Hao-yu

(Shenmu Vocational and Technical College, Shenmu, 719300)

**Abstract:** In order to enhance the explosive fragmentation effect of deep coal mine rock, a blasting method of sectional charging was proposed. Based on the SPH (smooth particle hydrodynamics) method, the rock fragmentation, the speed of rock scattering and the effect of blasting cavity formation under different segmented charge structures were analyzed. The fractal dimension was used to compare the rock crushing effects under different charge structures. Studies show that the detonation effect at the bottom of hole is better than that at the orifice. Ordinary continuous charge structure cannot make full use of the rock breaking effect of the explosion. The use of segmented charge method can increase the surface of the lower rock mass. When the upper charge ratio is 0.4, the explosive has the best crushing effect on the rock mass.

**Key words:** Coal mine rock mass fracture; SPH; Sectional charge; Fractal dimension

随着浅层矿产资源的减少, 人们逐渐转向深部的地下资源。目前, 露天煤矿和地下深部煤矿仍然主要采用爆破的方法进行岩体破碎。传统立井爆破施工采用连续装药方法, 其优势在于装药密度均匀、施工过程简单。但随着炮孔深度增加以及施工深度朝着 1000~2000m 的方向迈进<sup>[1-2]</sup>, 特别是当炮孔深度超过 5m 时, 连续装药方法很难达到理想的破碎效果<sup>[3]</sup>。因此, 许多学者对条形装药结构的爆破效果进行了研究。杨仁树<sup>[4]</sup>等研究了条形药包中间起爆时周围应力场的演变规律, 发现通过中间起爆可以改善炮孔方向

的应力场分布, 有利于提高破岩效率。郭洋<sup>[5]</sup>进行了底部起爆柱状药包爆破试验, 研究表明药包附近的应力场表现出明显的非线性分布规律, 炮孔应力场沿着炮孔中轴线逐渐增加。王春先<sup>[6]</sup>研究了起爆位置对条形药包爆破效果的影响, 发现两端起爆对条形药包的效果最好。宋子岭<sup>[7]</sup>研究了堵塞长度和起爆位置对露天煤矿爆破效果的影响。然而上述研究主要针对条形药包的起爆方式, 对于条形药包分段起爆以及分段比例的研究较少。

SPH(光滑粒子流)方法能够处理爆破过程中大

收稿日期: 2021-11-08

作者简介: 刘仙仙(1984), 女, 讲师, 从事煤炭工作面边坡控制与煤炭开采技术研究。

基金项目: 陕西省自然科学基金(20JK0622)。

变形以及运动交界面等问题<sup>[8]</sup>。该方法基于 Lagrange 算法, 优点在于不需要建立网格, 已发展成为研究物体飞散、高速碰撞等工程问题的成熟模拟方法。本文采用 SPH 方法研究装药结构对掏槽爆破的影响, 对不同分段比例下岩体的破碎效果进行了模拟, 通过岩体抛掷速度、岩体爆炸过程应力场演化以及形成槽腔体积确立了合理的分段装药爆破比例。

## 1 模型建立

### 1.1 材料参数

岩石材料选择 RHT 本构模型, 采用煤矿岩体中普遍存在的砂岩作为岩石材料。砂岩的单轴抗压强度为 77 MPa, 密度为 2 570 kg/m<sup>3</sup>, 纵波波速为 3 907 m/s, 弹性模量为 8.61 GPa。计算过程采用 JWL 方程来模拟爆炸过程压力与体积的关系<sup>[9]</sup>:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式(1)中:  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为爆炸产物的参数;  $P$  为爆炸产物压力;  $V$  为和初始爆炸产物相关的体积;  $E$  为爆炸初始能量。炸药选用材料库中的 TNT, 爆轰速度为 6 930 m/s, 密度为 1.63 g/cm<sup>3</sup>, 其他参数见表 1。

表 1 TNT 参数

Tab.1 The parameters of TNT

$A$ /GPa	$B$ /GPa	$\omega$	$R_1$	$R_2$	$E$ / (kJ·m <sup>-3</sup> )
373.7	3.7	0.35	4.15	0.9	$6 \times 10^6$

### 1.2 模型简述

为了研究装药比例对爆破效果的影响, 将传统的连续装药分成上下 2 段装药, 距离炮孔口较近的为上段装药, 距离炮孔底较近的为下段装药。模拟采用平面 2D 模型, 岩石长度为 7 m, 高度为 6 m, 炮孔深度为 4 m。图 1 为不同装药结构示意图。

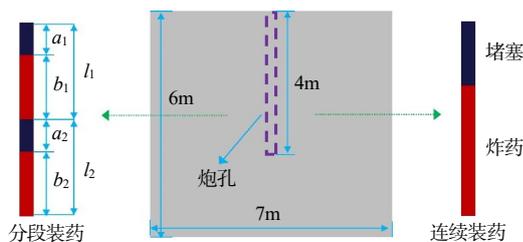


图 1 装药示意图

Fig.1 Charge diagram

图 1 右侧为连续装药示意图, 堵塞长度为 1 m, 炸药长度为 3 m。图 1 左侧为分段装药示意图, 将炸

药和堵塞分为上下 2 段, 上段堵塞长度为  $a_1$ , 炸药长度为  $b_1$ , 下段堵塞长度为  $a_2$ , 炸药长度为  $b_2$ 。上段总长度为  $l_1=(a_1+b_1)$ , 下段总长度为  $l_2=(a_2+b_2)$ , 上段装药占比  $\varepsilon=l_1/(l_1+l_2)$ 。分段装药参数见表 2。

表 2 分段装药参数

Tab.2 The parameters of sectional charge

装药参数	方案 1	方案 2	方案 3
$a_1$ /m	0.4	0.5	0.6
$a_2$ /m	0.6	0.5	0.4
$b_1$ /m	1.2	1.5	1.8
$b_2$ /m	1.8	1.5	1.2
$l_1$ /m	1.6	2	2.4
$l_2$ /m	2.4	2	1.6
$\varepsilon$	0.4	0.5	0.6

为保证模拟中单一变量, 采用控制变量法, 设置 4 种装药的总药量相同、炸药种类相同、堵塞长度相同。分段装药结构分 2 次起爆, 其中上段装药先起爆, 下段装药延迟 5ms 起爆。由于实际应用中, 经常使用细碎的岩石作为堵塞材料, 因此模型中以相同的岩石材料作为堵塞材料。在距离孔底 1m、2m、3m、4m 的位置分别布置了编号为 1、2、3、4 的测点, 用来测量爆炸过程中岩石抛掷速度和压力变化。连续装药模型以及上段装药占比分别为 0.4、0.5 和 0.6 的装药模型如图 2 所示。

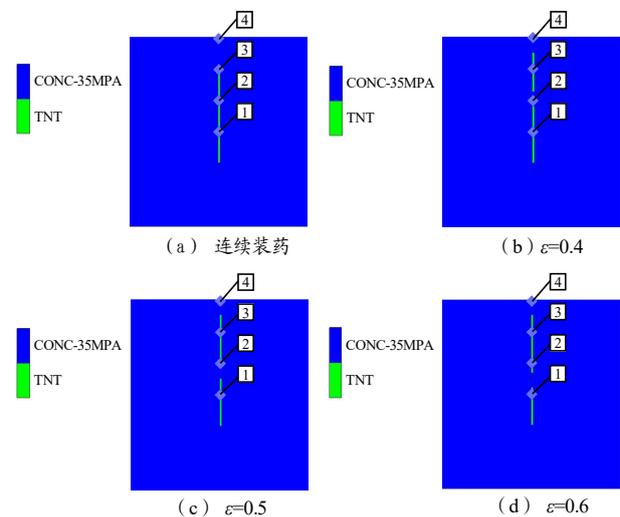


图 2 不同装药模型

Fig.2 Different charge models

## 2 模拟结果

### 2.1 起爆方式对掏槽效果的影响

为了探究起爆方式对立井掏槽爆破的影响, 建立了孔口起爆和孔底起爆 2 种起爆模型, 如图 3 所示。

图4为2种起爆方式下的炮孔附近处的Mises应力云图( $t=0.6\text{ms}$ )。由图4可见:起爆点的位置不同,爆炸初期应力场分布明显不同。对于孔口起爆来说,爆炸应力波从孔口位置迅速朝着孔底传递,形成下部宽、上部窄的V字型应力场。当起爆点在孔底处,爆炸应力波沿着炮孔朝自由面方向传递,形成了倒V字型应力场。从爆炸应力波的传递方向来看,当岩石发生破碎后,孔底起爆方式有利于推动岩石朝着自由面方向抛掷,而孔口起爆相反。

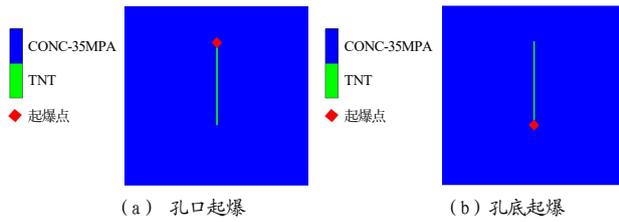


图3 不同起爆方式

Fig.3 Different initiation methods

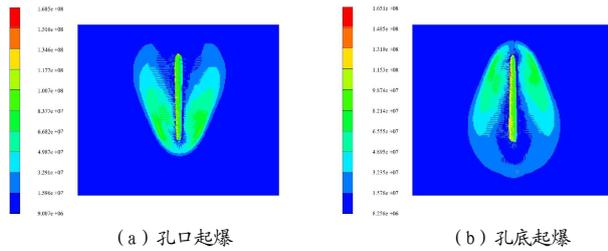


图4 0.6 ms时刻的应力云图

Fig.4 Stress nephogram at 0.6 ms

连续装药结构孔口起爆和孔底起爆岩石掏槽爆破过程如图5~6所示。由图5~6可知:在 $t=3\text{ms}$ 时,采用孔口起爆方式的炮孔上部先受到爆炸能量作用,使起爆点附近岩石迅速破碎并形成一定的槽腔区域;而孔底起爆时,由于岩石底部夹制作用大,无法迅速形成槽腔。当 $t=20\text{ms}$ 时,2种起爆方式的炮孔上部均形成大小相近的爆破槽腔,然而孔口起爆时炮孔下部的槽腔面积明显小于孔底起爆。这是由于孔口起爆时,爆炸应力波随着炸药传递方向运动,导致爆炸应力波朝孔底方向扩展,由于岩石底部采用了无反射边界,相当于无限岩体,爆炸应力波不仅会对炮孔底部岩石进行破碎,还会朝着更远的方向扩散,从而导致爆炸能量的浪费。而采用孔底起爆时,爆炸应力波沿自由面方向传递,当达到岩石与空气的界面时,爆炸应力波会在界面处形成反射拉伸波继续对自由面附近的岩体进行作用,同时爆炸应力波会把破碎后

的岩体朝自由面方向推动。因此,后续模拟均采用孔底起爆方式。

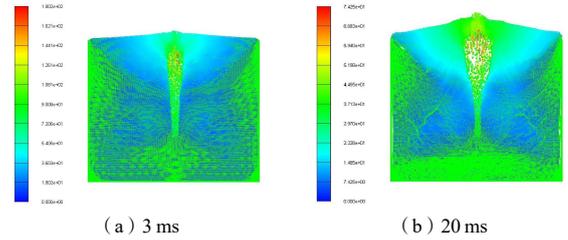


图5 连续装药孔口起爆

Fig.5 Continuous charge orifice initiation

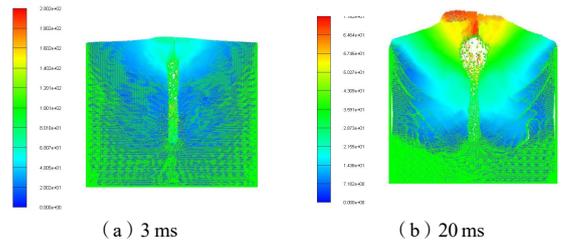


图6 连续装药孔底起爆

Fig.6 Continuous charge hole bottom initiation

### 2.2 不同装药结构爆破模拟分析

分段装药结构中上段装药比例分别为0.4、0.5和0.6时的爆炸过程如图7~9所示。由图7~9可知:由于采用2次起爆的方式,上段装药先起爆,当形成一定槽腔时,下段装药再起爆,这给下部岩石抛掷提供了新的自由面,导致采用分段装药后槽腔半径明显增大。对比20ms时刻连续装药和分段装药形成的槽腔,可见采用分段装药的方法明显增加了槽腔面积。

采用连续装药模型孔底起爆,不同测点处压力和粒子速度随时间变化过程如图10所示。图10(a)中,由于采用孔底起爆方式,爆炸应力波朝孔口处传递,导致靠近孔口处的应力峰值较大。爆炸应力波传递至岩石表面处会沿着水平方向形成反射拉伸波,4#测点在岩石表面处,因此应力峰值小于其他测点。图10(b)中,由于1#、2#、3#测点距离炸药较近,导致爆炸后产生的速度峰值较大,但是由于受到上部岩石的阻挡,速度会快速降低。4#测点在岩石表面,不会受到岩石阻碍和夹制作用,因此4#测点受到炸药爆炸作用会迅速产生一个速度,在不考虑重力的情况下,该处粒子将会一直保持这个速度抛掷。

图11为上段装药比例为0.4时压力和粒子速度随时间变化曲线。与图10对比,1#和2#测点形成了2

次压力峰值，第1次峰值是上段装药爆炸形成的，由于爆炸应力波朝炮孔传递，因此底部受到的压力较小，第2次峰值是下段装药爆炸形成的。3#和4#测点由于上段先起爆，粒子朝自由面飞散，受到下段装药的影响很小，因此只产生了1个明显的波峰。图11(b)中4#测点的速度大于图10(b)中4#测点的速度，这是因为采用分段装药和分次起爆后，4#测点距离起爆点较近，使得4#测点能够迅速获得炸药爆炸提供的能量。分段装药时2#测点峰值后的速度均值也大于连续装药，这是由于上部岩石起爆为下部岩石提供了补偿空间。

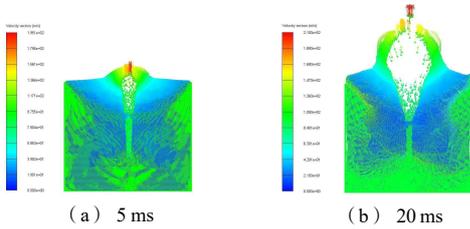


图7 ε = 0.4 时爆炸过程

Fig.7 The explosion process as ε of 0.4

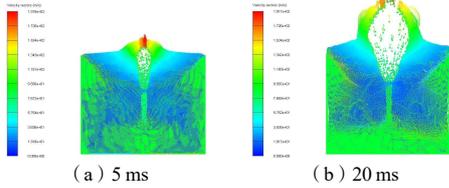


图8 ε = 0.5 时爆炸过程

Fig.8 The explosion process as ε of 0.5

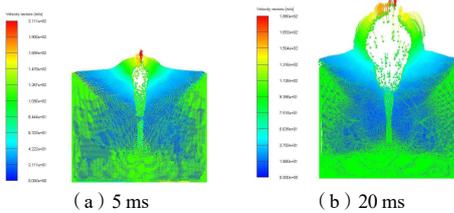


图9 ε = 0.6 时爆炸过程

Fig.9 The explosion process as ε of 0.6

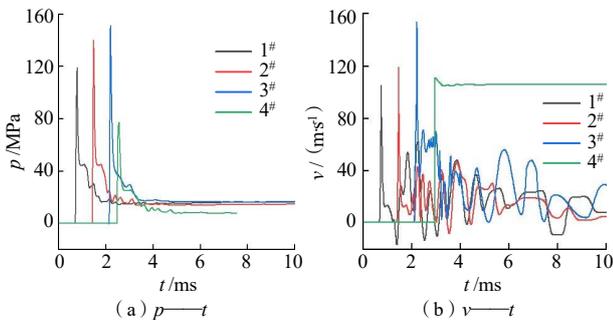


图10 连续装药时压力和粒子速度随时间变化

Fig.10 Variation of pressure and particle velocity with time of continuous charge

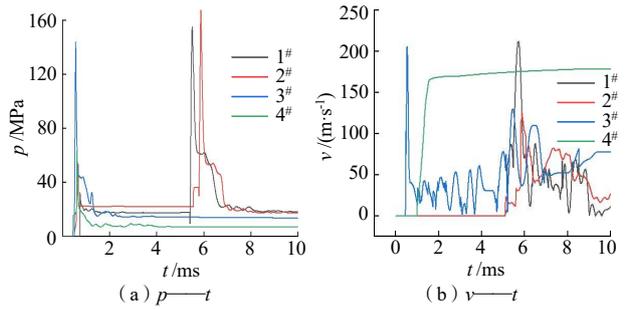


图11 ε = 0.4 时压力和粒子速度随时间变化

Fig.11 The pressure and particle velocity change with time as ε of 0.4

2.3 不同装药结构爆破成腔损伤分析

分形方法最早由谢和平院士<sup>[10]</sup>引入岩石的损伤破坏评价，其他学者对分形理论的应用进行了扩展<sup>[11-12]</sup>。本文利用分形方法对爆炸后形成的槽腔进行图像处理和分析，通过分形维数来判断不同装药结构的爆破效果。分形方法可以用公式(2)表示：

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

式(2)中：D为分析维数；δ为盒子尺寸；N(δ)为非空盒子的个数。

$$\lg N(\delta) = D \lg \delta + b \quad (3)$$

式(3)中：b为截距。

将不同装药结构爆破后岩石成腔结果进行二值化处理，如图12所示。

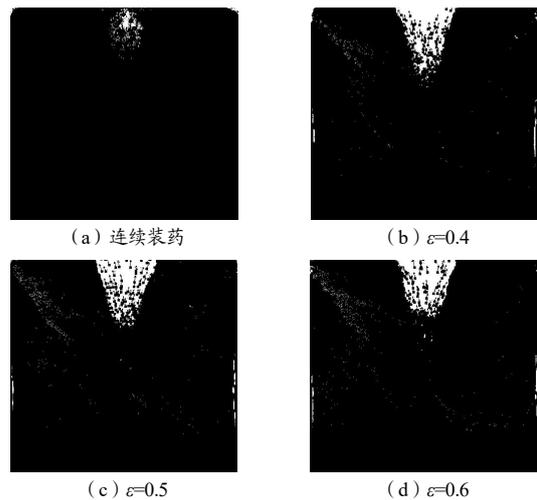


图12 岩石破碎二值化图

Fig.12 Rock fragmentation binarization diagram

由图12可知：连续装药结构形成的槽腔体积最小，分段装药结构明显增加了槽腔体积。并且随着上段装药比例不同，形成的槽腔大小随之发生变化。根据二值化结果得到的分形维数拟合曲线如图13所示。

不同装药结构下的分形维数分别为 1.193 7, 1.278 1, 1.210 9 和 1.226 8。连续装药结构的分形维数最小,这说明连续装药结构爆炸后对岩石造成的损伤程度是最小的,采用分段装药可以明显增强岩石的损伤程度。当上段装药比例为 0.4 时,其分形维数最大,此时对岩石造成的损伤最大。

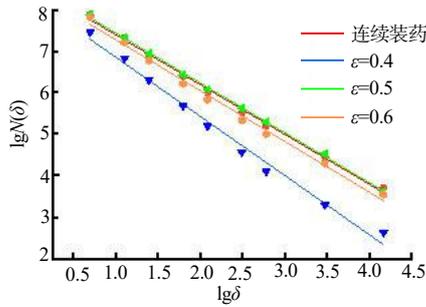


图 13 不同装药结构岩石破碎计盒维数拟合曲线

Fig.13 Fitting curve of box-counting dimension for rock crushing with different charge structures

### 3 结论

为了研究不同装药结构对岩石爆炸破碎效果的影响,采用 SPH 方法对起爆方式、连续装药结构和 3 种分段装药结构的爆炸过程进行了模拟,对模拟结果采用分形方法进行分析,得到以下结论:

(1) 采用 SPH 方法能够很好地模拟不同装药结构下岩石的抛掷过程以及成腔效果,通过模拟得到的爆破槽腔结果可以为工程实践提供指导。

(2) 分段装药结构对岩石的爆破效果优于连续装药结构。分段装药结构采用上段装药先起爆,在破碎上部岩体的同时为下部岩体提供了自由面。2 次起爆不仅延长了炸药对岩石的作用时间,还改善了炸药集中于岩体下部的情况。

(3) 孔底起爆效果优于孔口起爆。当  $\varepsilon=0.4$  并采用孔底起爆时,条形装药结构对岩石破坏程度最高,

掏槽效果最好。

### 参考文献:

- [1] Diering D H. Ultra-deep level mining: future requirements[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997, 97(6): 249-255.
- [2] Vogel M, Andrast H P. Alp Transit-safety in construction as a challenge, health and safety aspects in very deep tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 481-484.
- [3] Zhang ZX. Rock fracture and blasting: theory and applications [M]. Elsevier, 2016.
- [4] 杨仁树,郭洋,李清,等.中间起爆柱状药包爆炸应力应变场演化规律[J].煤炭学报, 2019, 44(11): 3 423-3 431.
- [5] Guo Y, Li Q, Yang R S, et al. Evolution of stress field in cylindrical blasting with bottom initiation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020(133): 106-153.
- [6] 王春先,蒋晓平.条形药包硐室爆破应力场分布规律的数值研究[J]. 路基工程, 2009(2): 155-156.
- [7] 宋子岭,杨星辰,范军富,等.露天矿采空区爆破合理孔底填塞长度与起爆位置确定[J].安全与环境学报, 2017, 17(5): 1 828-1 832.
- [8] 胡嫚.土质滑坡 SPH 运动模型及监测方法研究[D].北京:北京科技大学, 2015.
- [9] 苏洪,龚悦,杨仁树,等.爆炸荷载作用下预裂缝宽度对裂纹扩展的影响[J].中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 579-586.
- [10] 谢和平.分形:岩石力学导论[M].北京:科学出版社, 1996.
- [11] 宋宇,刘保国,任大瑞,等.基于分形理论构建随机粗糙节理模型的方法研究[J].岩石力学与工程学报, 2021, 40(01): 101-112.
- [12] 杨浩宇,刘仙仙,张永贵.爆腔体积对爆炸作用效果的影响[J].火工品, 2021(2): 57-60.