

文章编号:0253-9993(2010)S0-0068-04

# 复合型切缝药包机理分析及微差爆破试验

谢华刚<sup>1,2</sup>, 阮怀宁<sup>1</sup>, 吴玲丽<sup>3</sup>, 赵正信<sup>2</sup>, 余华中<sup>1</sup>, 吴翔<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 铜陵学院 土木建筑系, 安徽 铜陵 244000; 3. 纺织服装工业城 基建处, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:**利用弹性理论对复合型切缝药包爆破开裂机理进行了探讨, 得出应力在切缝方向最大; 利用相似模拟试验研究, 得出该药包在微差时间为 0.5 ~ 1.5 ms 时, 既可以在纵向利用切缝聚能形成裂缝, 横向利用炮孔导向形成裂缝, 又可以在远区利用脉冲应力波的叠加效应形成裂纹网, 进而形成“爆破裂缝-裂纹网-爆破裂缝”的煤层裂隙连通网络。

**关键词:**切缝药包; 微差爆破; 相似模拟; 岩石损伤

**中图分类号:**TD253.3 **文献标志码:**A

## Compound slit-charge mechanism analysis and millisecond blasting experiment

XIE Hua-gang<sup>1,2</sup>, RUAN Huai-ning<sup>1</sup>, WU Ling-li<sup>3</sup>, ZHAO Zheng-xin<sup>2</sup>, YU Hua-zhong<sup>1</sup>, WU Xiang<sup>3</sup>

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Civil Engineering and Architecture, Tongling University, Tongling 244000, China; 3. Construction Department, Textile and Garment Industry, Tongling 244000, China)

**Abstract:** Using the theory of elasticity to analyze the compound slit-charge explosive cracking mechanism, obtained the biggest stress in the slit direction; using the analog simulation experiment, the charge may form crack in the longitudinal using energy concentration, form crack in the crosswise using hole guidance effect, form the crack net in the far zone using the pulse stress wave superimposition, then form “explosive crack-crack net-explosive crack” coal bed crevasse connection network when the delay time is 0.5 ~ 1.5 ms.

**Key words:** slit-charge; millisecond blasting; analog simulation; rock damage

由于微差爆破具有良好的爆破效果, 在矿山开采, 隧道掘进以及采用微差爆破开采能源方面起到了很大的推动作用。然而, 微差爆破的爆破效果和微差时间是分不开的, 前人研究微差爆破大都建立在对微差时间的研究<sup>[1-3]</sup>, 而忽略了不同装药结构对微差爆破的影响, 本文拟采用一种新型装药结构对微差爆破进行试验研究, 旨在运用微差爆破原理和切缝药包的爆破理论, 有效控制煤体裂缝扩展方向, 达到形成“爆破裂缝-远区微裂纹网-爆破裂缝”的裂纹网状分布, 改善煤层结构的连通性, 提高瓦斯抽放率。

## 1 模拟试验

### 1.1 相似模型的设计

依据相似准则和国际岩石力学协会实验室及现

场实验标准委员会关于“岩体中不连续面定量描述建议方法”所建议的参数, 采用尺寸 400 mm × 400 mm × 270 mm 的试件。为了模拟煤岩, 本试验材料采用水泥: 石膏: 烟道灰: 水 = 1: 0.4: 1.4: 2.24 的配比<sup>[4]</sup>。为了消减边界效应和应力波的反射影响, 在试件四周用钢板加围压, 并在钢板上涂一层黄油。

### 1.2 模拟材料的力学性能参数

为得到模拟材料的力学性能, 用尺寸 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 模具做 8 组小试件。经保养护理 28 d 后用长春试验机研究所研制生产的 CSS-55100 型电子万能试验机进行了测试, 并通过 MTS 公司最新版的 TestWorks4 计算机软件进行了采集、计算等, 得到各物理力学性能参数, 测试结果符合相似准

则<sup>[4]</sup>,其中密度为  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ ,抗压强度  $1.6\ \text{MPa}$ ,弹性模量为  $169.45\ \text{MPa}$ 。

### 1.3 爆破参数

复合型切缝药包是采用两层 PVC 管组合而成,直径分别为  $10\ \text{mm}$ 、 $16\ \text{mm}$ ,并在 PVC 管两侧开  $180^\circ$  对称缝<sup>[4]</sup>。装药结构如图 1 所示。该药包与常规切缝药包的区别是,常规切缝药包通常是一层 PVC 管<sup>[5-6]</sup>,而该药包是两层 PVC 管分别与炸药、炮孔耦合。其它爆破参数为:炮孔直径  $16\ \text{mm}$ ;深度  $190\ \text{mm}$ ;间距  $100\ \text{mm}$ 。

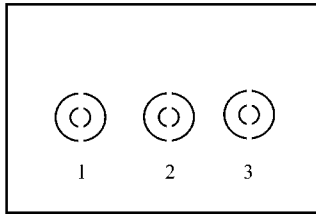


图 1 装药结构

Fig. 1 Structure of charging

为了充分利用微差爆破爆炸应力波叠加效应,微差时间控制就是一个关键问题,为了寻求更合适的微差时间,用瞬发、 $0.75\ \text{ms}$ 、 $1\ \text{ms}$ 、 $2\ \text{ms}$  的微差爆破分别进行了相应的试验研究。

## 2 切缝药包爆炸力学分析

根据岩石爆破理论,在无限大岩体中爆破时,岩体内部将产生爆炸冲击波作用下的压碎区,爆炸应力波和爆生气体作用下的破裂区,以及具有地震效应的震动区。由于冲击波在震动区已经衰减得很弱,只能使质点产生振动,不能引起岩石结构的破坏,因此,重点研究爆破对压碎区和破裂区岩石孔隙结构的影响<sup>[7]</sup>。而压碎区和破裂区的计算理论依据各不相同,本文拟采用弹性力学知识进行力学分析。

切缝药包爆炸力学模型可以简化为在炮孔壁受均布荷载和切缝方向受集中力两种受力状态。下面对爆生气体准静压作用下岩石应力场进行力学分析,简化力学模型如图 2 所示。

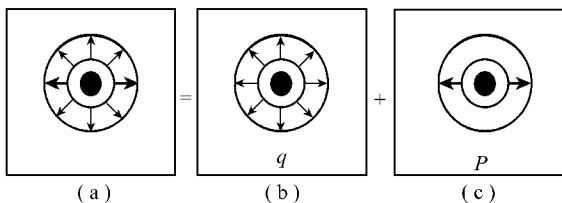


图 2 简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model

### 2.1 炮孔壁受均布荷载作用

爆生气体准静压作用下岩石受均布荷载简化力

学模型如图 2(b) 所示。根据弹性力学知识<sup>[8]</sup>,可得轴对称应力函数  $\varphi$  的极坐标表达式为

$$\varphi = A \ln r + Br^2 \ln r + Cr^2 + D \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为任意常数。

则应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} = \frac{A}{r^2} + B(1 + 2 \ln r) + 2C \\ \sigma_\theta = \frac{d^2\varphi}{dr^2} = -\frac{A}{r^2} + B(3 + 2 \ln r) + 2C \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据位移单值条件,边界条件  $(\sigma_r)_{r=r'} = -q$ ,  $(\sigma_r)_{r \rightarrow \infty} = 0$ , 可得

$$A = -qr'^2, C = 0, B = 0 \quad (3)$$

综合以上可得应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{qr'^2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{qr'^2}{r^2} \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 炮孔壁受集中荷载作用

爆生气体准静压作用下岩石受集中荷载简化力学模型如图 2(c) 所示。近似认为岩石在切缝方向受集中力,所受集中力增量设为  $P$ ,由弹性力学知识,岩石在边界上受集中力应力函数  $\varphi$  的极坐标表达式为

$$\varphi = r\theta(C \cos \theta + D \sin \theta) \quad (5)$$

可得应力分量

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = \frac{2}{r}(D \cos \theta - C \sin \theta) \\ \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = 0 \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据力的平衡条件,解得

$$D = -\frac{P}{\pi}, C = 0 \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{2P \cos \theta}{\pi r} \\ \sigma_\theta = 0 \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

综合式(4)、(8)可得总应力分量

$$\begin{cases} \sigma_r = -\left( \frac{2P \cos \theta}{\pi r} + \frac{qr'^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{qr'^2}{r^2} \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据径向正应力表达式可知,当 $\theta=0$ 时, $\sigma_{r\max} = -\left(\frac{2P}{\pi r} + \frac{qr^2}{r^2}\right)$ ,此时最大径向正应力发生在切缝方向。所以在切缝药包爆炸作用下,岩石在切缝方向优先开裂。

### 3 爆破试验结果与分析

岩石中弹性波速反映了岩石的物理力学性质,在

岩石力学中,通过采用岩石的声波速度来评价岩石的完整性,确定岩石的动态弹性常数以及探测岩体内的缺陷等等已经得到广泛的应用<sup>[9]</sup>。本试验爆破测试仪器采用武汉岩海公司生产的RS-STOIC型非金属声波检测仪。

爆破平均损伤情况见表1。爆破效果如图3所示。微差时间 $T$ 与损伤变量 $D$ 之间的关系如图4所示。

表1 试件爆破平均损伤测试

Table 1 The average damage test of specimen blasting

试件	位置	$C_p$	$C_0$	$D$	微差时间	备注
1	上部	3 657	3 265	0.20	1号孔为瞬发,2号孔为延期 0.75 ms,3号孔为延期1.5 ms	1号孔处出现了裂纹分叉,大量裂纹, 而2,3号孔只在定向方向形成裂缝
	中部	3 978	3 422	0.26		
	下部	4 036	3 687	0.16		
8	上部	2 296	1 876	0.33	1号孔为瞬发,2号孔为延期1 ms, 3号孔为延期2 ms	1号孔裂纹分叉,孔壁处出现可见裂 纹
	中部	2 996	2 469	0.32		
	下部	3 257	2 765	0.39		
11	上部	2 901	2 737	0.11	1号孔为瞬发,2和3号孔为延期 2,4 ms	3孔连线形成裂缝,孔壁其它方向有 一定数目的可见裂纹
	中部	3 236	2 981	0.15		
	下部	3 890	3 573	0.15		
13	上部	4 362	4 261	0.04	1号孔为瞬发,2号孔为延期2 ms, 3号孔为延期4 ms	3孔连线方向形成贯通裂缝,在药包 底部形成上下断裂面
	中部	5 096	4 819	0.10		
	下部	5 150	4 967	0.07		
14	上部	4 211	4 022	0.08	3孔同时起爆	从3孔连线方向形成裂缝
	中部	4 640	4 417	0.10		
	下部	4 879	4 655	0.09		

注:炮孔1,2,3位置见图1; $D = 1 - (C_p/C_0)^2$ ,其中 $C_p$ 、 $C_0$ 分别为损伤岩石及未损伤岩石的波速<sup>[10]</sup>。

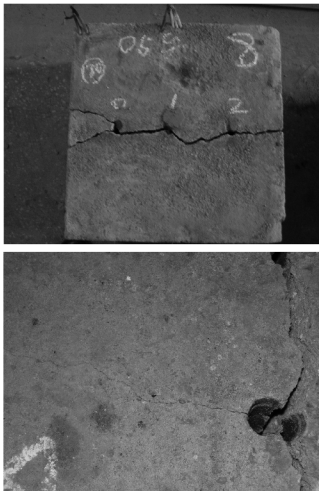


图3 爆破效果

Fig. 3 Blasting effect

综合以上分析可得出:

(1)从爆破效果上可以看出,当微差时间分别为0.75、1.00 ms时,岩石在横向形成裂缝,在纵向形成裂纹网状分布;而微差时间分别为0、2 ms时,在3孔横向形成裂缝,在纵向没有可见裂纹。

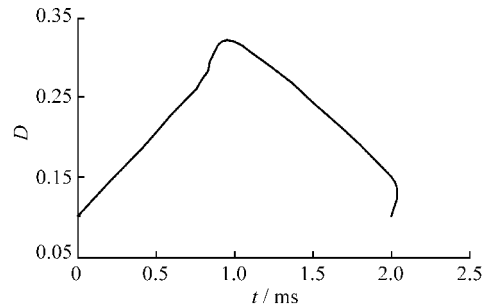


图4 微差时间 $t$ 与损伤变量 $D$ 的关系

Fig. 4 Relationship between the delay time  $t$  and damage variable  $D$

(2)试件声波速度从上到下依次增加,但爆后声波速度在中部衰减比较大,如1号试件中部损伤变量 $D=0.26$ ,而下部损伤变量 $D=0.16$ 、上部损伤变量 $D=0.20$ ;13号试件中部损伤变量 $D=0.10$ ,而下部损伤变量 $D=0.07$ 、上部损伤变量 $D=0.04$ ,表明在药包处出现了裂缝或裂纹。

(3)从图4可看出,当微差时间为0.5~1.5 ms时,岩石在横向形成裂缝,纵向损伤较大。说明本次

试验合理的微差时间是 0.5 ~ 1.5 ms。

## 4 结 论

(1)从理论上对复合型切缝药包进行力学分析,得出岩石在切缝方向优先开裂。

(2)微差爆破微差时间的选取在一定的合理范围内。本试验中,合理的微差时间是 0.5 ~ 1.5 ms,既保证在横向形成裂缝,又保证在纵向形成裂纹网状分布。

(3)复合型切缝药包微差爆破在横向利用炮孔的导向作用形成裂缝,在纵向利用切缝聚能作用形成裂缝,在远区利用微差爆破脉冲应力波的叠加效应形成裂纹网,进而形成“爆破裂缝-远区微裂纹网-爆破裂缝”的煤层裂隙连通网络,改善煤层透气性系数,提高瓦斯抽放率。

### 参考文献:

- [1] 王汉军,付跃升,张庆明. 露天深孔梯段爆破后冲破坏的成因及控制[J]. 煤炭学报,2001,26(2):129-131.  
Wang Hanjun, Fu Yuesheng, Zhang Qingming. Cause and control of impulsive damage from deep-hole bench-blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 129-131.
- [2] Starfield A M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges in a comparison between a computer model and field measurements[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1968, 5(1): 65-77.
- [3] 徐颖,宗琦,孟益平,等. 大断面硐室大孔距崩落爆破技术模型试验研究[J]. 煤炭学报,2001,26(6):596-600.  
Xu Ying, Zong Qi, Meng Yiping, et al. Study on model test of wide borehole distance blast in large cross-section tunneling[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 596-600.
- [4] 谢华刚,梁为民,杨小林,等. 复合型切缝药包爆破试验研究[J]. 爆破,2006,23(1):10-13.  
Xie Huagang, Liang Weimin, Yang Xiaolin, et al. Experimental study of compound slotted charge blasting[J]. Blasting, 2006, 23(1): 10-13.
- [5] 梁为民,刘永胜,杨小林,等. 定向断裂爆破装药结构实验研究[J]. 煤炭学报,2006,31(6):765-769.  
Liang Weimin, Liu Yongsheng, Yang Xiaolin, et al. Experimental study of charging constitution of directional splitting blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 765-769.
- [6] 李清,杨仁树. 爆炸载荷裂纹扩展的应力强度因子及其断裂行为[J]. 煤炭学报,2002,27(3):290-293.  
Li Qing, Yang Renshu. Stress intensity factor and fracture behavior for crack propagation under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 290-293.
- [7] 曹树刚,李勇,刘延保,等. 深孔控制预裂爆破对煤体微观结构的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4):673-678.  
Cao Shugang, Li Yong, Liu Yanbao, et al. Influence of deep-hole controlled pre-cracking explosion on micro-structure of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 673-678.
- [8] 徐芝纶. 弹性力学简明教程(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,1980.  
Xu Zhilun. Elasticity theory concise course(second edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1980.
- [9] 杨军,金乾坤. 应力波衰减基础上的岩石爆破损伤模型[J]. 爆炸与冲击,2000,20(3):241-246.  
Yang Jun, Jin Qiankun. A new damage model for rock fragmentation by blasting based on stress wave attenuation[J]. Explosion and Shockwaves, 2000, 20(3): 241-246.
- [10] Rubin A M, Ahrens T J. Dynamic tensile failure induced velocity deficits in rock[J]. Geophysics Res. Lett., 1991, 18(2): 219-223.