

文章编号:0253-9993(2011)03-0398-05

# 切缝药包空气间隔装药爆破的动态测试

岳中文<sup>1</sup>,杨仁树<sup>1,2</sup>,陈 岗<sup>1</sup>,潘长春<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083)

**摘 要:**为了研究不同装药结构的爆破效应,利用超动态应变测试系统,研究了水泥砂浆中切缝药包空气间隔装药爆破介质的动态响应。研究表明:采用空气间隔装药后,与连续装药相比,试件内同一位置应变峰值降低,空气柱起到了缓冲和储能的作用;切缝药包爆破中,切缝方向应变衰减速度较快,而随着距炮孔距离的增加在平行和垂直切缝方向的应变值则越来越接近;轴向不耦合系数在1.5~2.0之间爆破效果较好,间隔长度过大时,切缝方向和垂直切缝方向应变的比值有降低的趋势,影响定向爆破效果。研究结果为实际工程爆破提供了实验依据。

**关键词:**切缝药包;空气间隔装药;动态测试;动态响应

中图分类号:TD235.44

文献标志码:A

## Dynamic test on silt-charge blasting of air-deck charge

YUE Zhong-wen<sup>1</sup>, YANG Ren-shu<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, PAN Chang-chun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics &amp; Civil Engineering, China University of Mining &amp; Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study explosive effect of different charge, dynamic response in cement mortar was researched under blasting of air-deck silt-charge using super-dynamic strain test system. The research results show that when air-deck charge is used, the peak strain in the same location within the specimen reduces compared with the continuous charge, and this presents that air column plays a cushion and the role of energy storage; the strain of slit direction weakens faster and the strain of slit direction is closer to that of vertical slit direction with the increase of the distance from the hole under slot cartridge blasting; Axial-coupling coefficient between the blasting is better in the 1.5~2.0, and when interval length is too large, strain ratio of slit direction to vertical slit direction has a trend downward, so, directional blasting effect is influenced. The results provide the experimental basis for the actual blasting.

**Key words:** silt-charge; air-deck charge; dynamic test; dynamic response

在井巷爆破掘进过程中,质量控制的关键在于周边眼,因此周边眼爆破引起了人们的极大关注,人们在长期的工程实践中已经认识到不同的装药结构对周边眼爆破质量都有重要影响<sup>[1-2]</sup>。在光爆机制及光爆参数的理论计算上,一些学者进行了大量的研究,形成了以爆炸应力波和爆生气体综合作用为主的光面爆破成缝机制,得出了采用切缝药包空气间隔装药爆破效果较好等有益的结论和一些经验计算公式<sup>[3-8]</sup>。然而,由于岩石条件复杂多变及炸药爆炸破岩机制的复杂性和不确定性,现有切缝药包空气间隔

装药爆破参数理论计算公式适应性有限,工程上经常出现爆破效果不理想,仍有许多问题需要研究解决。因此,本文采用超动态应变测试方法,分析间隔装药条件下切缝药包爆破的动态应变场变化,研究不同空气间隔长度对不均匀应变场的影响,探讨切缝药包爆破的合理装药结构,为工程实际提供实验依据。

## 1 超动态应变测试系统

试验测试系统主要包括:① 内置应变砖;② 屏蔽电缆线;③ 1/4 电桥盒;④ SDY2107A 型动态电阻

应变仪(图1);⑤ TST3406C 动态数据采集卡。



图1 SDY2107A 型超动态电阻应变仪  
Fig.1 Dynamic resistance strain gage instrumentation SDY2107A

## 2 模型试件和切缝药包的制作

### 2.1 水泥砂浆模型及测点布置

试验制作的水泥砂浆模型尺寸为 600 mm × 400 mm × 400 mm,模型试件由 425 号普通硅酸盐水泥、筛选后的中砂,加水搅拌浇注而成,配比为水泥:砂:水 = 1 : 2 : 0.4,浇筑时试件中心预留直径 10 mm 炮孔,孔深为 250 mm。炮孔和切缝药包的位置如图 2 所示。应变砖在浇筑过程中预埋,每个试件中放置 6 个,埋置深度 190 mm,平面布置如图 3 所示。模型试件养护 28 d 后进行爆破试验。模型试件抗压强度为 41.6 MPa,泊松比为 0.17,弹性模量为 17.8 MPa,纵波声速为 3 781 m/s。

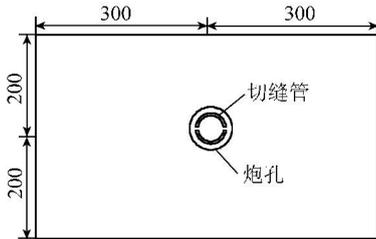


图2 炮孔和切缝药包的位置

Fig.2 Blast hole and location of slit charge

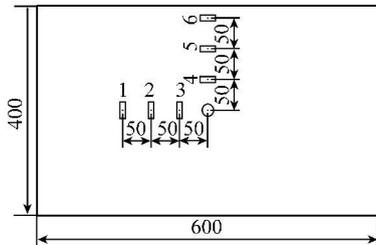


图3 应变片的平面布置

Fig.3 Plane layout of strain gauges

### 2.2 切缝药包

切缝药包所用切缝管为普通硬质塑料管加工制成,内径 6 mm,外径 8 mm,厚度 1 mm,在轴对称位置沿长度方向刻出两道切缝,切缝宽度均为 1 mm。切缝管如图 4 所示。试验中装药分别为连续装药、空气

间隔长 12.5、25.0 和 50.0 mm 四种装药方式。药包主装药为黑索金,起爆药为 DDNP,装药量为 700 mg。电火花从药柱上端同时起爆。



图4 切缝管

Fig.4 Slotted pipe

## 3 试验结果及分析

### 3.1 爆破效果

图 5 表示不同装药方式的试件爆破效果。从图 5(a)可以看出,连续装药爆炸作用下,沿切缝方向产生两条主裂纹,同时非切缝方向也产生了两条较大裂纹。从图 5(b)、(c)和 (d)可以看出,在采用较小的间隔长度时,沿短轴方向容易出现应力波作用产生的贯通裂纹。采用 50 mm 间隔时,沿切缝裂纹的方向有一定的偏转,但沿短轴方向的宏观裂纹明显较少,说明采用空气间隔后试件的破碎程度降低。随着空气间隔长度的增加,切缝方向产生的主裂纹越来越平直,同时裂缝也越来越窄。

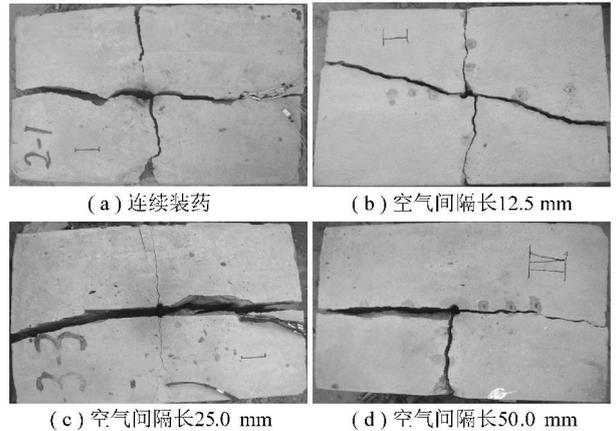


图5 不同装药方式的爆破效果

Fig.5 Blasting effect of different charging methods

### 3.2 动态应变测试结果

图 6 ~ 8 分别为连续 (S-1)、空气间隔长 12.5 mm (S-2) 和空气间隔长 25.0 mm (S-3) 装药方式时试件的应变波形。鉴于篇幅的原因,空气间隔长 50.0 mm 装药方式的试件应变波形略去。从图 6 ~ 8 中的波形可以看出,空气间隔装药时应力峰值较小,峰值上升时间变化不大,主要是应力下降持续时间的延长,可见间隔装药使爆生气体的准静态作用在岩石破坏中所占的比例增加。

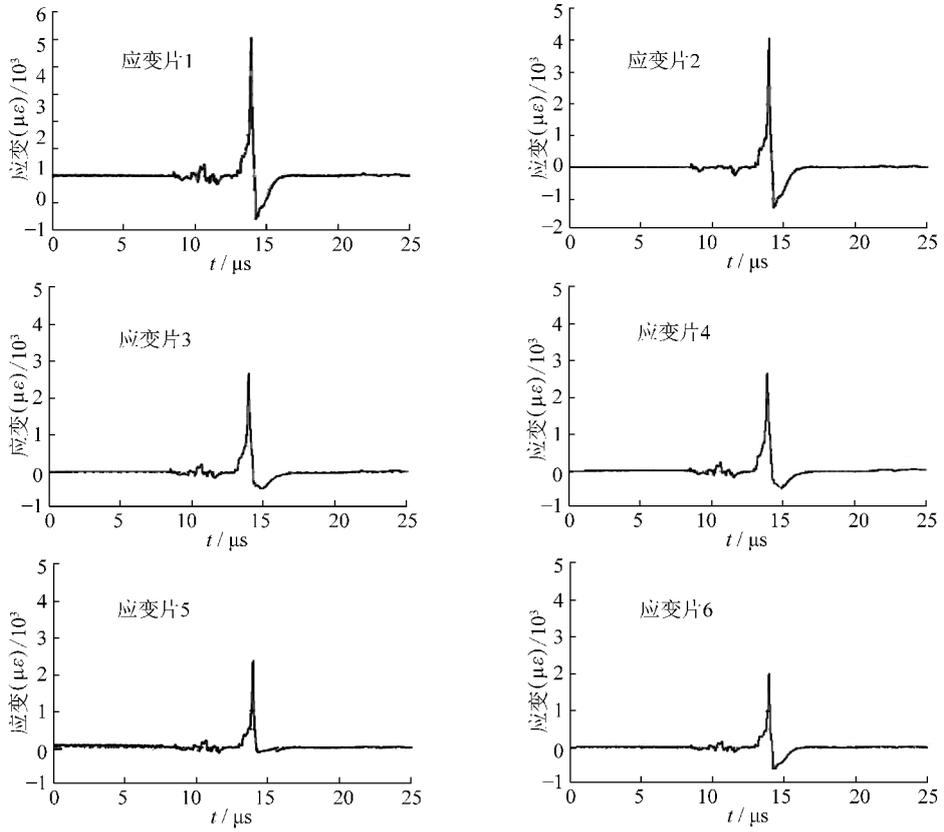


图6 试件 S-1 的应变波形

Fig. 6 Strain waves of test specimen S-1

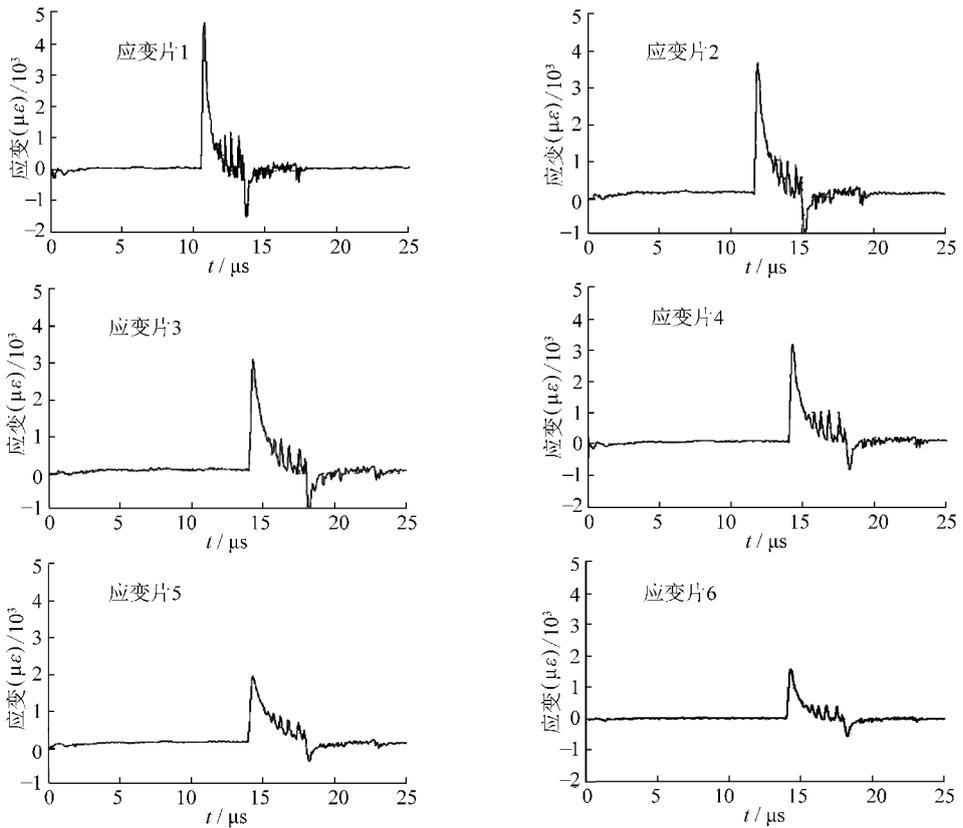


图7 试件 S-2 应变波形

Fig. 7 Strain waves of test specimen S-2

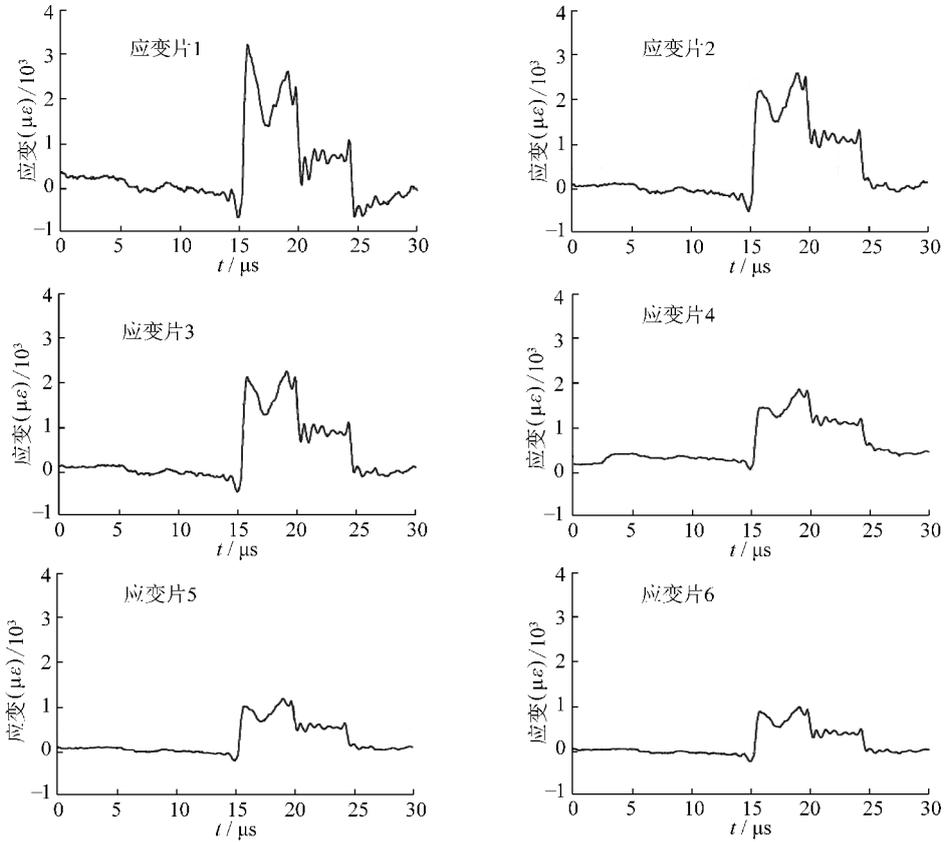


图8 试件 S-3 的应变波形

Fig. 8 Strain waves of test specimen S-3

图9表示爆破试验中拉应力作用时间与间隔长度的关系。由图9可知,间隔长度的增加可以明显延长应力的作用时间,有利于裂纹的定向扩展。间隔长度为50.0 mm,即不耦合系数为2.0时,应力作用时间约为连续装药时的3倍。

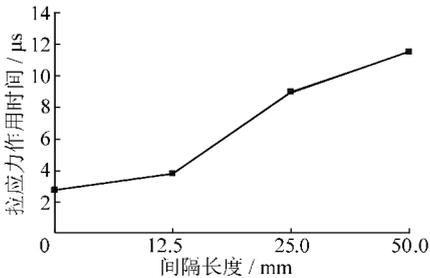


图9 拉应力作用时间与间隔长度的关系

Fig. 9 Relations between tensile stress duration and air column length

空气间隔长度增加的过程中,爆破作用时间随间隔长度的增大而明显增长,原因是空气柱的存在使爆炸作用过程中产生二次和后续系列加载波的作用,爆炸气体冲击波波阵面、在堵头和孔底反射引起冲击波的阵面,以不同的速度在炮孔内相互碰撞和叠加,最终形成稳定的孔壁压力。冲击压力持续时间的长度和间隔空气长度有直接的关系,Fourney 和 Melnik-

ov<sup>[9]</sup>的试验中,间隔装药条件下冲击压力作用比连续装药时延长了2~5倍。

改变空气间隔长度时,测点处峰值应变的变化规律如图10所示。由图10可知,切缝方向和垂直切缝方向距炮孔等距离处拉应变峰值与间隔装药系数的关系有:①相同位置处动应变峰值随比例距离增大呈指数减小;②距离炮孔相同距离处,切缝方向应变峰值都大于垂直切缝方向,距离炮孔距离越远,两者比值越小,这说明切缝方向应力衰减较快。

增加空气间隔长度时,切缝方向和垂直切缝方向平均峰值应变的比值变化如图11所示。由图11的变化趋势可知,空气间隔长度25.0 mm,即不耦合系数为1.5,峰值应变比最大。空气间隔长度过大时,不利于达到定向爆破的目的。

#### 4 结 论

(1)切缝药包空气间隔装药爆破作用下试件表面形成次生裂纹减少,且沿主裂纹方向成缝明显,因而改善定向断裂效果,提高了能量利用率。

(2)采用空气间隔装药后,与连续装药相比试件内同一位置应变峰值降低,空气柱起到了缓冲和储能的作用。

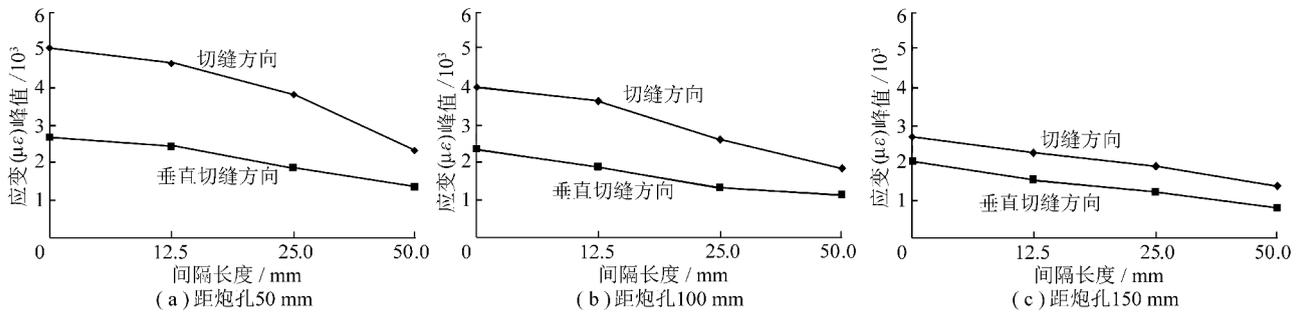


图10 距炮孔50、100和150 mm拉应变与间隔长度的关系

Fig. 10 Relations between tensile stress 50, 100, 150 mm away from blast hole and air column length

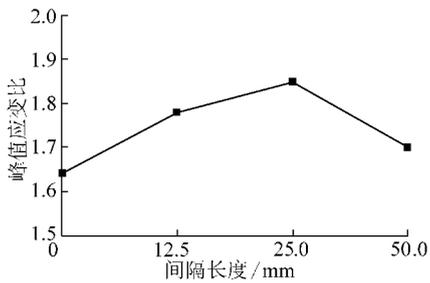


图11 峰值应变比与间隔长度的关系

Fig. 11 Relations between strain ratio and air column length

(3)切缝药包爆破中,形成了不均匀应力场,在应变的衰减过程中,切缝方向衰减速度较快,而随着距炮孔距离的增加在平行和垂直切缝方向的应变值越来越接近。

(4)轴向不耦合系数在1.5~2.0之间爆破效果较好,空气间隔长度过大时,切缝方向和垂直切缝方向应变的比值有降低的趋势,影响定向爆破效果。

#### 参考文献:

- [1] 戴俊,杨永琦. 光面爆破相邻炮孔存在起爆时差的炮孔间距计算[J]. 爆炸与冲击,2003,23(3):253-258.  
Dai Jun, Yang Yongqi. Calculation of the distance between the adjacent delay-explosion shotholes in smooth blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 253-258.
- [2] 宗琦. 软岩巷道光面爆破技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 45-49.  
Zong Qi. Study and application of soft rock tunnel smooth blasting technology[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 45-49.
- [3] 蒲传金,张志呈,郭学彬,等. 切缝药包空气间隔装药爆破试验

研究[J]. 化工矿物与加工,2006,35(1):23-25.

Pu Chuanjin, Zhang Zhicheng, Guo Xuebin, et al. Testing study on silt-charge blasting of air-deck charge[J]. Industrial Minerals & Processing, 2006, 35(1): 23-25.

- [4] 朱红兵,卢文波,吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学,2007,28(5):986-990.

Zhu Hongbing, Lu Wenbo, Wu Liang. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 986-990.

- [5] 吴亮,卢文波,钟冬望,等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):58-64.

Wu Liang, Lu Wenbo, Zhong Dongwang, et al. Blasting mechanism of air-decked charge in concrete medium[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 58-64.

- [6] 陆守香,林玉印. 间隔聚能装药爆破技术与应用[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 42-46.

Lu Shouxiang, Lin Yuyin. Blasting technique with discrete shaped charges and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(1): 42-46.

- [7] Zhu Hongbing, Lu Wenbo, Wu Liang. Air-decking technique in bench blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 16(2): 184-188.

- [8] 杨军,黄风雷. 深孔爆破空隙装药损伤演化过程的数值模拟[J]. 爆破,1997,14(2):1-6.

Yang Jun, Huang Fenglei. A numerical calculation on damage evolution in deep-hole blasting with bottom gap charging[J]. Blasting, 1997, 14(2): 1-6.

- [9] Fournery W L, Barker D B, Holloway D C. Model studies of well stimulation using propellant charges[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1983, 20(2): 91-101.