

# 炮孔孔底空气间隔装药降低爆破震动

罗尧东, 罗冰

西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010

**摘要** 针对爆破作业中因岩体结构和构造的差异, 爆破地震传递的能量不同, 为了减少爆破地震在地下岩体传播过程中的爆破地震效应, 通过理论研究以及模型试验, 分析了爆破对炮孔孔壁的应力应变作用过程, 并得出孔底空气间隔装药长度与震动持续时间、震动峰值的关系。同时结合现场浅孔、深孔爆破中炮孔空气间隔层不同间隔方式的地震效应对比, 综合比较震动幅值、震动频率和震动持续时间等因素, 证明不同空气间隔方式的间隔装药均能降低爆破地震效应, 减小前冲、后冲, 孔底空气间隔装药在 3 种装药方式中降震效果都较好, 其降震可达 10%~25%。其中, 孔底间隔装药结构的爆破地震效应最小, 其次为孔上部间隔装药, 炮孔中部间隔装药地震效应最大。

**关键词** 地震效应; 间隔装药; 爆破震动

**中图分类号** TB41

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.25.005

## Reducing Blasting Vibration During Air-deck Charging at the Bottom of the Hole

LUO Yaodong, LUO Bing

School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

**Abstract** In blasting operation, energy of blasting seismic transfers differently due to differences in rock structure and construction. In order to control blasting seismic effect effectively, the borehole stress-strain of blasting process is researched by the theoretical study and model test. The relationship of the hole length between duration of vibration and peak strain is investigated respectively. Meanwhile, the seismic effect is compared in different intervals between the shallow hole and deep hole. In addition, amplitude, frequency and duration of vibration are also comprehensive compared. The results show that air interval charge can decrease the blasting seismic effect, and reduce the impact and backlash. Moreover, compared with three loading modes, the vibration reduction is up to 10%~25%. Concretely, the vibration reduction effect is the best through the air interval charge in bottom of hole, and the upper is followed. Blasting seismic effect is maximum in the middle of air-spaced.

**Keywords** seismic effect; interval charge; blasting vibration

### 0 引言

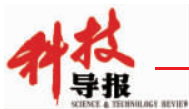
矿山爆破存在不安全因素, 主要危害是产生爆破地震冲击波和爆破飞石。有研究显示, 只要最小抵抗线和填塞长度符合设计要求, 就能控制冲击波和飞石, 使其不产生危害<sup>[1-3]</sup>。但是爆破地震在地下岩体中传播, 由于岩体、构造差异, 地震传递能量不同, 控制有一定难度。因此, 只有从源头控制爆轰

压力, 降低做功的能量, 才能控制或降低爆破地震能量<sup>[4]</sup>。

实践中, 采用炮孔轴向空气间隔装药结构, 能降低爆破地震, 改善爆破质量, 提高爆炸能量利用率。1940年前苏联里尼科夫教授曾提出了采用这种装药结构的建议。1957年中国海州露天矿开始试用深孔爆破, 同一期间新疆可可拓海矿务局一矿露天采矿场用木制间隔器在炮孔中部间隔。1958—

收稿日期: 2013-03-01; 修回日期: 2013-05-29

作者简介: 罗尧东, 助教, 研究方向为岩土工程安全, 电子信箱: uaodong@qq.com

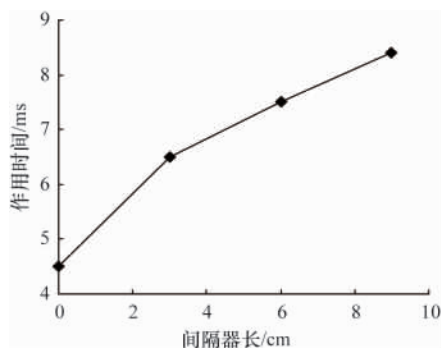


1963年长沙矿山研究院、中国科学院矿业研究所等单位在大冶铁矿、凤凰山铁矿及某些水利工程中开展了试验研究,取得了实验室和半工业性试验与深孔、硐室爆破工业试验的肯定效果。鞍钢矿山曾在20世纪60年代、80年代研究空气间隔分段装药结构,用以调整药柱高度,改善炸药在炮孔中的分布,延长爆炸气体作用时间。实践中,现有3种装药方式,即底部间隔、中部间隔和顶部间隔<sup>[5]</sup>。吕淑然<sup>[6]</sup>对炮孔轴向不同间隔方式的爆破地震效应进行了研究。

### 1 炮孔孔底空气间隔装药降震原理

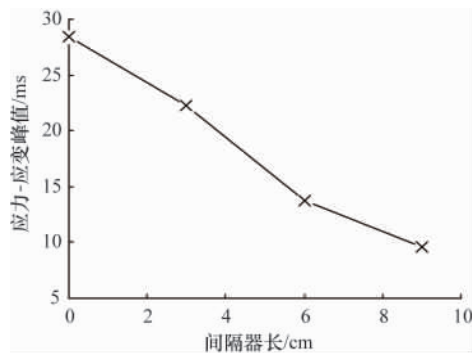
孔底空气间隔装药结构降震爆破的降震原理是通过轴向空气介质不耦合装药,主要是采用间隔器实现。缓冲炸药爆炸对孔壁的作用,降低初始压力及爆破应力峰值,从而达到降低爆破震动的目的<sup>[7,8]</sup>。

水泥砂浆试块的空气柱装药爆破研究表明:应力-应变峰值随轴向不耦合系数(装药长度与空气长度之比)的增大而降低。作用时间随不耦合系数增大而延长。如图1所示。



(a) 间隔器长度与振动持续时间的关系

(a) Relationship between length of the spacer and duration of vibration



(b) 间隔器长度与应变峰值的关系

(b) Relationship between length of the spacer and peak strain

图1 间隔器长度与振动持续时间、应力-应变峰值的关系

Fig. 1 Relationship among length of the spacer, peak strain and duration of vibration

由图1可知,利用轴向不耦合装药的空气介质可在一定程度上降低应力-应变峰值,而应力波在岩体地层中的衰减

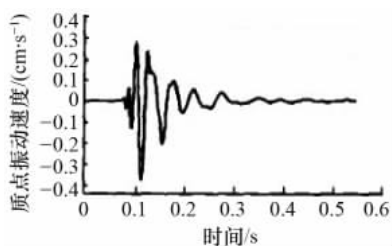
传播正是爆破震动形成的主要来源。因此,在震源处减小能量幅值能够在很大程度上降低爆破震动。

### 2 炮孔不同间隔装药方式的爆破地震效应

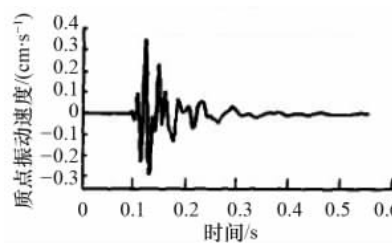
不同间隔装药方式的爆破地震效应存在较大差异,对于间隔装药结构而言,当采用的间隔介质相同时,吕淑然<sup>[9]</sup>针对底部间隔、中部间隔及顶部间隔装药方式的地震效应进行了系统的比较性研究。

#### 2.1 不同间隔方式地震波三分量的时域幅值规律

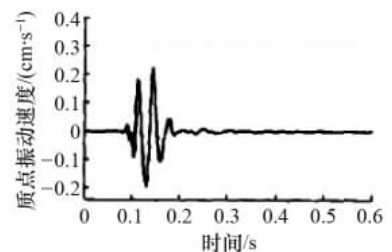
本研究选择承钢黑山铁矿1号露天采场南侧的中等风化的浅色辉长岩,监测点不动,测点距炮孔均为19m,炮孔间距3m。3种装药方式的地震试验参数均相同:介质为空气,炮孔深度150cm,装药量750g,装药长度70cm,间隔长度20cm,堵塞长度60cm。试验结果见图2。



(a) 上部  
(a) Upper



(b) 中部  
(b) Middle



(c) 底部  
(c) Bottom

图2 不同空气间隔方式地震波三分量时域

Fig. 2 Time region of seismic synthesis of three components under different decked fashions

从图2可以看出,地震波三分量的时域幅值规律一致,

即垂直分量最大,切向分量和径向分量相差不大,而切向与径向分量的大小与装药间隔方式有关。

### 2.2 不同装药方式地震波三分量合成同一时间的时域特征

爆破地震振动持续时间分为一段地震波振动持续时间和全部地震波振动持续时间。一段地震波可分为主振波和尾振波<sup>[9,10]</sup>,从初始波到地震波幅值衰减到  $A=A_{max}/e$  时的地震波,即为地震波的主振波,主振波历时时间为地震波一段振动波持续时间。

爆破振动时间的危害作用主要发生在结构反应进入非线性之后,反应谱不能明确表示振动持续时间,只考虑了线性反应中持续时间的影响。为了比较分析不同装药结构爆破地震波的

主振波持续时间,统一采用空气间隔孔爆破地震波的幅值,即  $A=A_{max}/e$  确定各自的主振波持续时间。

炮孔空气间隔层分为底部、中部、顶部,不同间隔方式下,由试验数据可以得出,地震效应中的振动幅值大小呈现出中部>顶部>底部的趋势,而振动持续时间则表现为顶部>中部>底部,底部的地震效应都较小。

### 2.3 不同装药间隔方式的三分量在时域内的比较

不同装药间隔方式地震波三分量合成在时域内具有一定的差别、有各自的特点。对三分量振动幅值最大者为中部空气间隔孔,其次为顶部空气间隔,最小者为孔底空气间隔。

不同装药方式的地震波三分量时域如图3所示。

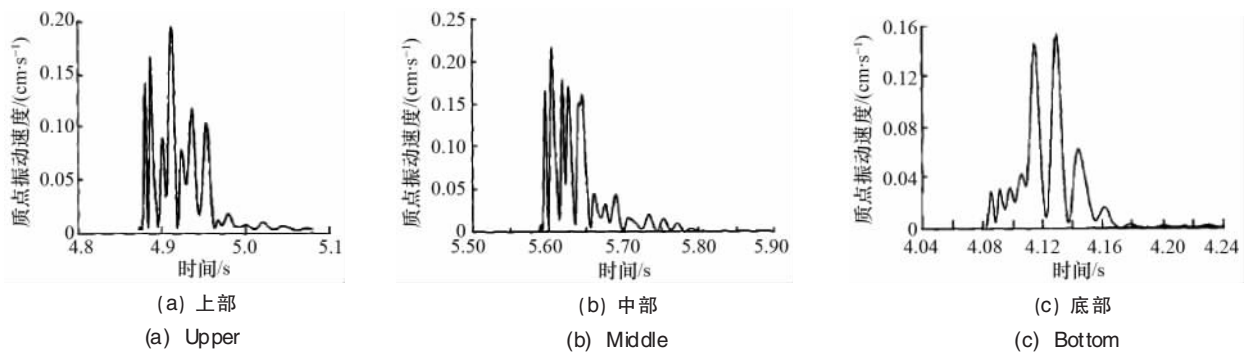


图3 不同装药方式的地震波三分量时域

Fig. 3 Seismic wave synthesis of three components under different charge fashions in time region

### 2.4 不同装药间隔方式的地震波三分量频域内的特征

不同装药间隔方式(上部、中部、底部)地震波三分量频域内也有各自的特点,在频域内确定主频带,按3种装药间

隔方式中振动幅值最小的来确定频带范围,即采用  $A=A_{max}/e$  统一的尺度划定频带范围。不同装药方式的地震波三分量特征见表1。

表1 炮孔空气不同间隔方式的地震波三分量频域内的特征

Table 1 Characteristics on seismic of three-component seismic in different intervals

切向频率/Hz			径向频率/Hz			垂直频率/Hz		
底部	中部	顶部	底部	中部	顶部	底部	中部	顶部
高频 59.4	高频 84.4	高频 50.0	高频 44.6	高频 56.8	高频 27.3	高频 42.0 低频 20.0	高频 56.0 低频 20.0	高频 66.1 低频 20.0

## 3 深炮孔孔底空气间隔降低爆破震动的试验

### 3.1 孔底间隔装药与常规连续装药爆破震动试验

金川集团有限公司和中南大学资源与安全工程学院在某矿现场进行了深孔爆破试验。矿石普氏硬度为6~8,上层石灰岩为8~10,台阶高度8m,用 $\phi 150\text{mm}$ 潜孔钻机穿孔。两个炮孔深度都为8.8m,采用不同的装药方式(即孔底间隔装药与常规连续装药),同等药量,同时起爆,其填塞长度分别为3.5和4.3m,空气间隔长度分别为0和0.8m,相同爆心测点距离,共进行3次。通过对比震动的峰值质点振速观察降震效果。根据爆破震动监测,取得有效波形和对比数据20组,各组实测爆破地震速度和降震率列于表2。存盘10-7,10-9的波形与轴向空气不耦合介质降震理论预计反常的原因可

表2 现场深孔孔底空气间隔装药试验结果

Table 2 Results of spaced loading at the bottom of blast hole on site

存盘号	无空气间隔测定速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	有空气间隔测定速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	降震率/%
9-4	0.1804	0.1486	17.0
9-9	0.5531	0.3703	33.1
10-4	0.6570	0.4748	27.7
10-7	1.8083	2.2787	-26.0
10-9	4.3953	4.8219	-9.7
10-6	0.1486	0.1046	29.6
11-11	4.4764	3.0545	31.8
11-13	0.6194	0.3657	40.9
11-14	0.1335	0.0926	31.7
平均值			18.9



能为两侧点距爆心较近,因空气间隔器升高了装药中心而影响较大所致。

### 3.2 孔底空气间隔装药爆破前后冲的试验

涞源钢铁厂支家庄铁矿属于小型露天铁矿,采用 YQ-150 型潜孔钻穿凿斜,该矿岩普氏硬度系数为 8~12,台阶高度为 10m,孔距为 6m,抵抗线和排距为 4m,炮孔直径为 150~

170mm,炮孔倾斜角为 75°,水孔采用水胶炸药,干孔采用 2 号岩石粉状炸药,应用塑料导爆管非电起爆系统,实现微差对角起爆技术。对孔底空气间隔装药,进行 8 次 922 个炮孔试验的系统记录,如表 3 所示(表中,孔数平均分两组检测炸药单耗及大块率,药柱高、前冲、后冲的检测点分别为上部、中部和底部)。

表 3 孔底空气间隔装药爆破前后冲的试验  
Table 3 Test of spaced loading before and after blasting

岩种	孔数	超深/m	药柱高/m	间隔器长/m	炸药单耗/ (kg·L <sup>-1</sup> )	大块率/%	前冲/m	后冲/m
矿石	402	0~0.80	3.60~6.10	1.00~1.20	0.11~0.12	1.90~2.60	10.00~22.00	1.00~1.50
		0~0.37	4.40~6.00	1.00~1.06			13.00~20.00	1.00~2.00
			4.19~5.40				(1130~20.40)	(1.00~1.80)
白云岩	258	0~0.30	4.00~6.30	1.20	0.1021	2.00~2.50	10.00~18.00	1.00~1.40
		0~0.11	4.40~6.00				12.00~19.00	1.00~1.90
			4.07~4.83				(11.00~18.80)	(1.00~1.60)
蛇纹岩	138	0~0.10	4.00~6.30	1.20	0.10~0.12	2.00~2.20	10.00~17.00	1.00~1.70
		0~0.10	4.10~5.40				12.00~20.00	1.00~2.00
			4.10~4.60				(11.00~18.00)	(1.00~1.90)
砂卡岩	124	0~0.20	4.30~5.70	1.20	0.10~0.11	2.00~2.20	9.00~21.00	1.00~1.40
		0~0.17	3.90~5.60				11.00~22.00	1.00~2.10
			4.07~5.63				(1030~20.70)	(1.00~1.70)

## 4 深孔孔底空气间隔装药应用中的降震实例

国内部分露天矿山采用孔底间隔装药爆破的降震实例如表 4 所示(表中“—”表示未做该项检测)。

表 4 国内矿山深孔孔底空气间隔装药降低爆破震动实例  
Table 4 Examples of spaced loading to reduce the blasting vibration in domestic mining

矿山名称	岩矿名称	普氏硬度	爆破前冲	爆破后冲	爆破震动
齐大山铁矿	赤铁石英石混合岩	10~15	—	后冲减小	—
	石英石	6~12	前冲 12m 左右,比连续装药小 6~7m	后冲减小	—
歪头山铁矿	磁铁石英石 斜长阔闪石	—	前冲减少 21.8%	后冲减少 19.6%	—
南芬铁矿	磁铁石	—	12m,比连续装药小 4~5m	后冲较小	—
朱家包包铁矿	磁铁石	12~15	—	没有后冲	降低了震动强度
金川集团公司	矿石灰岩 1	6~8	—	—	爆破震动降低 10%~15%
	矿石灰岩 2	8~10	—	—	—
连湾采石场	花岗岩	8~10	—	—	爆破震动效应大大降低
云浮硫铁矿	磁铁石	10~17	—	—	震动明显减弱
支家庄铁矿	蛇纹岩	—	10m	1m	—
	白云岩	8~12	12~17m	1~6m	—
	砂卡岩化大理岩	—	22m	2.1m	—
大孤山铁矿	磁铁石英岩	14~16	—	—	爆破震动降低 20%~25%
	花岗岩	<10	—	—	—

## 5 结论

(1) 理论分析、水泥砂浆模型试验爆破时孔壁应力波(应变波)作用过程、现场浅孔爆破模拟试验及现场台阶深孔爆破,都证明孔底空气间隔装药具有一定的降震效果,其降震率可达10%~25%。

(2) 3种装药结构和间隔方式,三分量中垂直分量最大,径向分量和切向分量的大小与装药结构和间隔方式有关,规律性较差;在频率成分上也同样与装药结构和间隔方式有关,规律较差。

(3) 综合比较地震幅值、频率和振动持续时间等因素,3种不同空气间隔装药方式都能降低地震效应,其中,孔底间隔装药结构的爆破地震效应最小,其次为孔上部间隔装药,炮孔中部间隔装药地震效应最大。

(4) 前冲、后冲减小,说明爆炸能量用于爆破破岩,能降低爆炸能量的危害耗量,降低前后冲及地震危害。

### 参考文献 (References)

[1] 顾义磊, 李晓红, 杜云贵, 等. 隧道光面爆破合理爆破参数的确定[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(3): 95-97.  
Gu Yilei, Li Xiaohong, Du Yungui, et al. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(3): 95-97.

[2] 钱七虎, 陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破, 2004, 21(2): 1-5.  
Qian Qihu, Chen Shihai. Blasting, 2004, 21(2): 1-5.

[3] Bakhshandeh A H, Siamaki A, Soltani S. Design of blasting pattern in

proportion to the peak particle velocity (PPV): Artificial neural networks approach[J]. Safety Science, 2012, 50(9): 1913-1916.

[4] Afeni T B, Osasan S K. Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine—A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria[J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(4): 420-424.

[5] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645.  
Zong Qi, Meng Dejun. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641-645.

[6] 吕淑然. 炮孔轴向不同间隔方式的爆破地震效应研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(S1): 102-105.  
Lü Shuran. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(S1): 102-105.

[7] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破, 2010, 27(1): 14-22.  
Luo Yi, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. Blasting, 2010, 27(1): 14-22.

[8] 夏红兵, 汪海波, 宗琦. 爆破震动效应控制技术综合分析[J]. 工程爆破, 2007, 13(2): 83-86.  
Xia Hongbing, Wang Haibo, Zong Qi. Engineering Blasting, 2007, 13(2): 83-86.

[9] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 隧道爆破近区爆破振动测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 335-340.  
Fu Hongxian, Zhao Yong, Xie Jinshui, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 335-340.

[10] Ren S, Bai Y M, Jiang D Y, et al. An extension evaluation model for building safety under the influence of blasting seismic [J]. Procedia Engineering, 2012, 43: 168-173.

(责任编辑 赵业玲)

### ·学术动态·



## 第16届中国科协年会征集承办分会场单位

第16届中国科协年会拟于2014年5月24—26日在昆明举办,主题为“开放、创新与产业升级”,由中国科协和云南省人民政府共同主办。

为充分发挥全国学会的学科、人才和组织优势,做好中国科协年会筹备工作,现面向全国学会、协会、研究会征集分会场承办单位。

第16届年会拟设立20个分会场,各分会场规模控制在100人以下,注册代表50人以上,以一线科技工作者为主;代表构成须具有全国性。国际分会场会议交流语言为英语,来自国外科技工作者所占比例须不少于与会代表的1/4,人数最少不得少于12人。

中国科协给予每个分会场一定数额的经费补助,其中每个国际分会场人民币10万元,其他分会场人民币5万元。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/h35081/n35488/14937419.html>。