

文章编号: 1001-1455(2006)03-0279-05

分段爆破地震强度的试验研究*

张丹¹, 段恒建², 曾福洪²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 会东铅锌矿, 四川 会东 615205)

摘要: 在爆破实验中, 通过调整段数、分段炸药量、炸药总量、间隔时间、孔网参数、岩石波阻等爆破相关因素, 以改变各分段爆破地震波持续时间、段间爆破地震波重叠程度来研究爆破地震强度与爆破相关因素间的相互关系。阐明了爆破地震波传播规律及其破坏行为特征, 以及各个爆破相关因素对爆破地震强度的影响程度。获得了确定段数等爆破参数的规则, 从而为生产实践设计最佳爆破参数提供理论依据。

关键词: 爆炸力学; 振动强度; 微差爆破; 分段爆破; 岩石波阻; 间隔时间

中图分类号: O389; TD235

国标学科代码: 130·3599

文献标志码: A

1 引言

爆破地震破坏是爆破工程三大危害之一, 当爆破振动达到一定强度时, 可造成爆区内建(构)筑物破坏, 边坡失稳以及地下工程片帮与冒顶, 控制爆破地震效应已成为爆破工程界重要的研究课题。爆破生产实践中, 常常根据被保护体的结构特性和保护级别所确定的安全震动速度^[1]来设计爆破参数, 因此非常必要研究质点振动速度与爆破相关因素间的相互关系。

目前爆破地震效应研究中, 主要通过实验来研究质点振动速度与炸药量、爆心距、岩石性质、地形条件、药包埋深、不耦合系数和爆破方法等因素间的相互关系^[2~3]及其反应谱等内容, 特别是质点振动速度与炸药量、爆心距间的相互关系。

本文中利用某铅锌矿露天采矿场爆破“QC”管理, 进行微差爆破^[4]地震强度实验, 研究质点振动速度 v 与段数 n 、分段炸药量 q 、炸药总量 Q 、间隔时间 τ 之间的关系以及最优间隔时间 τ_0 。与孔网参数(孔距 $a \times$ 排距 $b \times$ 孔深 h)、岩石波阻 Ω 等的关系, 以获得确定段数等爆破参数的规则, 从而指导爆破安全生产。

2 爆破地震强度与分段数和炸药量的关系

炸药量与分段数是影响爆破地震强度的重要因素, 是研究爆破地震的重要内容。

2.1 爆破地震强度与分段数的关系

为研究爆破地震强度与分段数的关系, 选择采矿场2028台阶4线以东废石场进行实验。该实验场地岩石物理性质稳定, 场地开阔, 裂隙不发育。设计孔网参数为 $4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 14\text{ m}$, 用KQ-150型潜孔钻作业, “V”形微差起爆, 孔内使用一段毫秒电雷管, 孔外使用二段毫秒电雷管, 仅排间串联延时, 每孔装2#岩石炸药 $4 \times 24\text{ kg}$, 孔底反向起爆, 离爆区中心150 m处进行拾震, 使用Instantel's BlastMate III描绘和处理数据。

实验数据分析表明, 炸药总量一定时, 在其他爆破环境和爆破参数不变时, 段数越多, 在等距离上的质点振动速度越小(见图1)。

当分段炸药量一定时, 振动强度随段数增加而加剧, 继续增加段数到4~5时, 振动强度收敛于一个

* 收稿日期: 2005-03-18; 修回日期: 2005-05-10

作者简介: 张丹(1973—), 男, 博士, 工程师。

定值(见图 2)。任意单发爆破所产生的地震波能量总会在一定时间内耗损掉(或者一定时间后余震很小,对其主震而言可忽略不计),因此在多段数微差爆破时,任意时刻只有一定段数所引起的地震波才具有明显的爆破地震效应,因此,当段数增加到一定值时,无论段数怎样增加,振动强度保持不变。

在生产实践中,段数设计很少,段数对爆破地震效应仍有显著影响,因此研究低段数微差爆破仍非常必要。

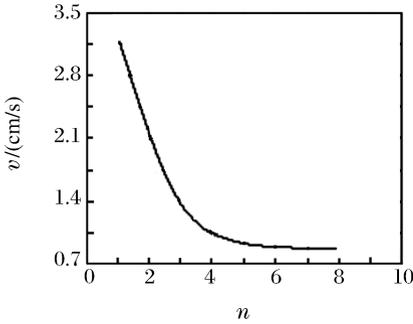


图 1 总炸药量一定时,振动速度与分段数的关系

Fig. 1 The relationship between v and n with fixed Q

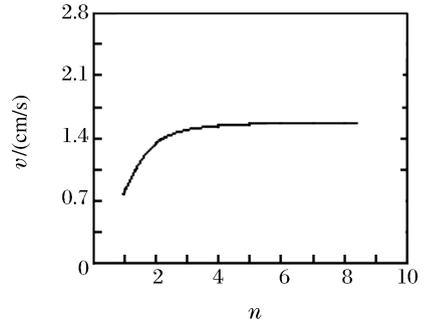


图 2 分段炸药量一定时,振动速度与分段数的关系

Fig. 2 The relationship between v and n with fixed q

2.2 爆破地震强度与分段炸药量的关系

大量实验资料统计分析表明,质点振动速度与分段炸药量之间存在关系^[5]

$$v = \kappa(Q_{\text{等}}^{1/3} / R_{\text{等}})^{\alpha} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{等}}$ 为等效距离(单位为 m), $R_{\text{等}} = \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{q_i} r_i / \sum_{i=1}^m \sqrt[3]{q_i}$; $Q_{\text{等}}$ 为等效炸药量(单位为 kg), $Q_{\text{等}} = \sum_{i=1}^m q_i (R_{\text{等}} / r_i)^3$; κ, α 为与地形、岩石特性相关的系数(可查表^[5]); m 为炮孔个数; i 为炮孔序号; r_i 为第 i 炮孔的爆心距, m; q_i 为换算成 $2^{\#}$ 岩石炸药后第 i 炮孔的装药量, kg。

由质点振动速度和分段炸药量间的相互关系式可知,质点振动速度与分段炸药量成正相关关系。因此控制分段炸药量是控制爆破地震效应最有效的手段。微差爆破时,振动强度不完全取决于炸药总量,而取决于分段炸药量和段数。当炸药总量一定时,段数越多越好,所引起的地震强度越小;当段数小于 4 且分段炸药量一定时,段数对振动强度有显著影响,段数和分段炸药量都是控制地震强度的因素;当分段数很多时,爆破地震强度仅取决于分段炸药量。

3 间隔时间对爆破地震强度的影响

间隔时间也是影响振动强度的另一个重要因素,常与不耦合装药一起使用,以减小爆破地震强度,改善爆破效果,减少炸药使用量。在实际生产中,微差爆破已基本上取代了齐发爆破,它是控制爆破地震效应的主要技术措施。

大量微差爆破试验表明,间隔时间延长,爆破地震强度减弱,继续延长间隔时间,爆破地震强度达到一定极限,再继续延长间隔时间,振动强度反而增加,最后稳定在一个固定值,即单段独立起爆所产生的振动强度。确定该极限对应的最优间隔时间 τ_0 是爆破工程界的重要课题,是确保爆破安全的关键。

3.1 爆破地震强度与间隔时间关系

为了研究爆破地震强度与间隔时间的关系,仍需做齐发爆破、单段独立起爆实验。

实验场地均选择在采矿场 2040 台阶 IV、III 矿段 3~5 线, 2028 台阶 III、II、I 矿段 2~3 线,其矿石物理性质均匀,波阻分别为 21~25、17~21、13~17、9~13、5~9 Gg/((m²s)), 场地开阔,裂隙少,且底板平整。设计孔深 $h=14$ m, 孔径 $d=150$ mm, 每孔装 $2^{\#}$ 岩石炸药 4×24 kg, 均为孔底反向起爆。微差与齐发爆破均设计 9 个孔, 直线分布。单段独立起爆与齐发爆破均使用瞬发电雷管, 重复做 4 次实验。微差爆破使用特制电雷管, 串联, 孔间延时相同, 共做 10 个循环实验, 相邻循环间隔时间等差值为 5 ms,

每个循环重复做4次。在炮孔连心线的中垂线上,离中心炮孔150 m处进行拾震,使用InstanTel's BlastMate III描绘和处理数据。

3.1.1 单段独立起爆与齐发爆破实验

齐发爆破和单段独立起爆实验,主要用于研究二者的振动强度、成因及其地震波持续时间,并比较二者地震波持续时间长短以确定微差爆破间隔时间和间隔时间等差值。

在2028台阶Ⅲ矿段1~3线的实验表明,齐发爆破比单段独立起爆引起的震动剧烈,持续时间稍长,约为0.3 s,二者余震持续时间均占整个震动的5/6。

在相同实验条件下,单段独立起爆药量与齐发爆破每孔装药量相同,齐发爆破释放的能量是单段独立起爆的齐发爆破孔数倍,理论上讲,单段独立起爆与齐发爆破每孔所引起的地震强度和持续时间应相同,齐发爆破地震持续时间应是单段独立起爆的齐发爆破孔数倍。但岩石粘滞性使应力波强度随距离、震动速度随时间均呈类负指数衰减^[6],表现为齐发爆破比单段独立起爆引起的震动持续时间稍长。因此,无论主震还是余震,齐发爆破比单段独立起爆所引起的地震强烈,这是由应力波在复杂地层中衰减及其能量在岩石中的耗损规律决定的,同时齐发爆破比单段独立起爆引起的地震强度高得多,决定了二者地震波持续时间不成齐发爆破孔数倍。

3.1.2 爆破地震强度与间隔时间关系

微差爆破实验主要研究爆破地震强度与间隔时间相互关系。与单段独立起爆和齐发爆破相对应,实验场地选择2028台阶Ⅲ矿段1~3线。

间隔时间选择在0~50 ms(齐发爆破地震波主震持续时间为50 ms)范围内,间隔时间太大,相邻段别所引起的地震波会互不叠加。按照生产要求,孔距 $a=(20\sim50)d=3\sim7.5$ m,取 $a=3,4,5,6,7,7.5$ m,其他爆破参数和观测方法不变。

对各类炮孔,按间隔时间成等差值5 ms进行微差爆破实验。根据每一间隔时间上观测点振动波形包络线^[7],可获得该间隔时间的质点最大振动速度;为减小误差,取4次实验最大值的平均值作为该间隔时间所对应的质点振动速度,质点振动速度、间隔时间和孔距的关系如图3所示。

从图3可以看出,随着间隔时间的增长,质点振动速度减小,在最优间隔时间时达到最小值;继续延长间隔时间,质点振动速度增大,但增大速度越来越慢,最后质点振动速度收敛于一固定值。间隔时间域属于严格的微差爆破时间域;最后收敛的固定值等于单段独立起爆质点振动速度,相邻段别引起的地震波不叠加,形成了事实上的单段独立起爆。当间隔时间接近50 ms时,实际上变成了单段独立起爆,质点振动速度为齐发爆破的0.3~0.4倍,而不是齐发爆破孔数倍的倒数;在20~35 ms范围内,质点振动速度比较接近,收敛于最小值,间隔时间约27 ms时,质点振动速度最小,接近单段独立起爆的30%。

爆破能量在岩石中释放和耗损是一个过程,质点振动波形包络线呈类负指数衰减特性^[8](单个药包独立起爆时),主震仅在一定时间内(<50 ms)存在,一定间隔时间的微差爆破,在任意时刻有产生显著爆破地震效应的段数是确定的,因此间隔时间与产生显著爆破地震效应的段数反相相关。爆破地震波频率、振幅和波长是时间、爆心距、炸药量和岩石性质等因素的函数,而在振动强度与间隔时间关系实验中,仅是时间和爆心距的函数,在不同的观测点,由于爆心距不同,则振幅、波长、频率彼此相差具有相异性,地震波相互干涉而地震强度降低。爆心距确定,传播时间确定,这种相异性具有稳定性,相异性与间隔时间是对应的,于是干扰程度与间隔时间反相相关。因此当间隔时间收敛于0 ms时,段数对爆破地

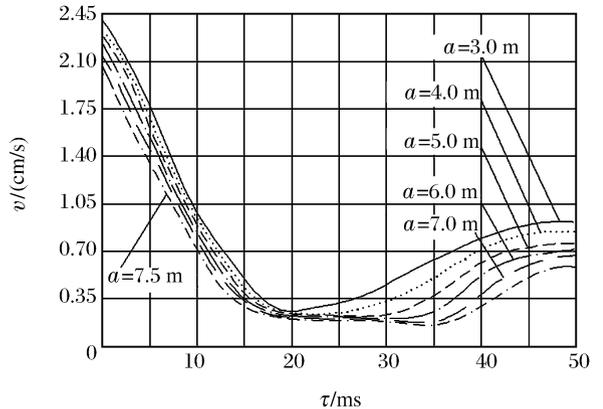


图3 v 、 τ 和 a 的关系

Fig. 3 The relationship among v , τ and a

震强度的影响起主导作用,当间隔时间接近 50 ms 时,分段炸药量起主导作用,从而振动强度与间隔时间的关系表现为图 3 所示的曲线。

3.2 最优间隔时间与孔距、波阻的关系

3.2.1 最优间隔时间与孔距的关系

基于振动强度与间隔时间的关系,以表 1 中的孔距与对应的最优间隔时间数据组研究二者的关系。

从表 1 可见,最优间隔时间随孔距增加而增加。孔距增大,爆心距增大,振动强度减弱;同时后段追上前段爆破地震波的时间变长,达到振动强度的时间相应延后,于是相应间隔时间变长,因此间隔时间与孔距正相关。

3.2.2 波阻对最优间隔时间的影响

波阻是岩石的本质属性,是影响地震波传播的本质因素,也必将影响其传播行为特征。

为了研究岩石波阻对最优间隔时间的影响,选择在 2040 台阶 IV、III 段矿 3~5 线,2028 台阶 III、II、I 矿段 2~3 线中进行,将孔距设计为 5 m,其他爆破环境、实验条件和观测方法不变。

根据实验结果(见图 4),研究不同波阻下爆破地震强度与最优间隔时间的关系。由图 4 中质点振动速度、间隔时间与岩石波阻相关走向可知,随着间隔时间的增加,曲线间出现了交叉,反映了萨道夫斯基公式震动衰减规律,岩石波阻对爆破地震波有重要影响。对于小波阻,较差岩石,爆破地震波能量损耗率高^[9],因而在短时间与短爆心距内地震效应强,而在远时域和远区内地震效应弱(见图 5)。

表 1 最优间隔时间 τ_0 与孔距 a 的关系

Table 1 The relationship between τ_0 and a

a/m	τ_0/ms	a/m	τ_0/ms
3	20	6	34
4	23	7	34
5	29	7.5	37

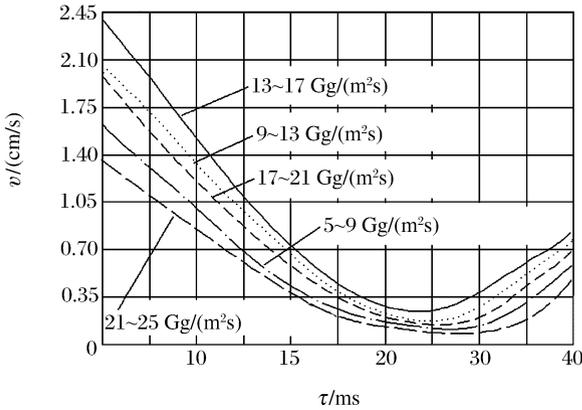


图 4 v 与 τ, Ω 的关系

Fig. 4 The relationship among v and τ, Ω

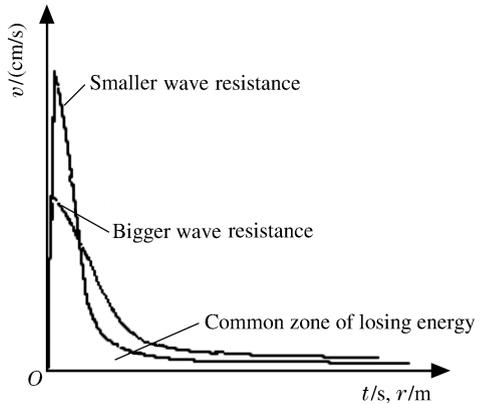


图 5 v 与 t (或 r) 的关系

Fig. 5 The relationship between v and t (or r)

由图 4 可得最优间隔时间与波阻关系:当 $\Omega=9\sim 13, 13\sim 17, 17\sim 21, 21\sim 25$ $Gg/(m^2 \cdot s)$ 时, $\tau_0=35, 30, 25, 25$ ms。可见,最优间隔时间随波阻增大而减小。

岩石波阻是岩石密度与应力波传播速度的乘积,波阻越大,岩石弹性或弹塑性刚度越强,应力波传播速度越快。达到质点振动速度时间减少,相应间隔时间必然缩短,因此最优间隔时间与波阻反相关。

3.2.3 孔距、波阻交叉研究

波阻对最优间隔时间影响的实验,是在孔距 $a=5$ m 时进行的,现改变孔距,做孔距、波阻交叉实验,其他爆破环境、实验条件和观测方法不变,研究最优间隔时间与波阻、孔距间的相互关系。

图 6 反映了最优间隔时间随孔距减小和波阻增大而缩短,因此与岩石物理特性和孔网参数对最优间隔时间的影响是一致的。

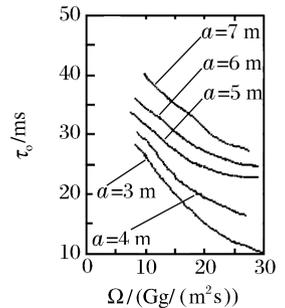


图 6 τ_0 与 Ω, a 的关系

Fig. 6 The relationship among τ_0, Ω and a

4 结 语

通过微差爆破地震强度实验和理论研究,得到以下结论:(1)小段数对爆破地震强度影响大,当段数多时,控制效果不佳,爆破总药量对微差爆破影响小、而分段炸药量才是控制爆破地震强度的主要因素。(2)微差爆破时,地震强度开始时随间隔时间增长而降低,在最优间隔时间时,地震强度最小,随后随间隔时间继续增长,地震强度反而增大,最后稳在单段独立起爆所产生的地震强度上。(3)微差爆破最优间隔时间随孔距增大而增大。(4)微差爆破最优间隔时间随岩石波阻增大而减小。

爆破地震强度是一个多因素控制的结果,其中间隔时间和分段炸药量是一个主要因素,在爆破生产实践中,通过设计控制,可显著降低爆破地震效应。

参考文献:

- [1] GB 6722-86. 爆破安全规程[S]. 1986.
- [2] Langefors V. The Modern Technique of Rock Blasting[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1967:372-389.
- [3] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,1987:504-508.
- [4] 中国力学学会工程爆破专业委员会. 爆破工程[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:54-61.
- [5] 刘殿中. 工程爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:687.
- [6] Cousin C A, Digital J. Analysis of explosion wave propagation[J]. Quarrt Colorado School of Mines, 1997,122(5):177.
- [7] Kitamura H. Seismic analysis methods for performance based design[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004,54(2):57.
- [8] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992:136-137.
- [9] 周维恒. 高等岩石力学[M]. 北京:水利电力出版社,1990:130.

Experimental study on subordinate blasting seismic intensity

ZHANG Dan^{1*}, DUAN Heng-jian², ZENG Fu-hong²

(1. Civil Engineering Faculty Southwest Communication University,
Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Huidong Lead-Zinc Mine, Huidong 615205, Sichuan, China)

Abstract: In blasting experiments, durations of subordinate blasting seismic waves and intensity of influence among them are changed by adjusting the number of subordinate blasting, explosive weigh of subordinate blasting, total quantum of explosive, interval, hole-net parameters and wave resistance of rock, etc. Relation of blasting seismic intensity and related blasting parameters is researched to illustrate propagation law and damage performance of the blasting seismic wave, and influence extent of related blasting factors on blasting seismic intensity. The rule to determine the blasting parameters is obtained to provide a theoretical foundation for the optimal design of the blasting parameters in productive practices.

Key words: mechanics of explosion; vibration intensity; million-second blasting; subordinate blasting; wave resistance of rock; interval

* Corresponding author: ZHANG Dan
E-mail address: zhangdan_zhi@163.com
Telephone: 028-66816068