

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1723-06

# 不耦合装药下爆炸应力波传播规律的试验研究

王 伟<sup>1</sup>, 李小春<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道学院 土木工程分院, 石家庄 050043; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 通过室外爆破试验, 利用预埋研制的 PVDF 压力传感器对耦合及水不耦合延长药包装药爆破时爆炸应力波的中远场压力进行测量, 拟合实测结果, 得到 4 种不耦合系数下爆炸应力波峰值随传播距离衰减的指数关系式。分析试验结果可知: ①在试验所涉及的范围, 不耦合装药时爆破应力波峰值衰减幅度小于耦合装药 (即  $K=1$ ) 时爆破应力波峰值衰减幅度, 验证了水介质作为炸药爆轰产物与岩体间的弹性缓冲层作用, 减少了粉碎孔壁岩体造成的能量耗散, 增加了能量传递, 加大了爆炸的作用范围; ②当不耦合系数  $K=3.29$  时, 应力波峰值衰减指数表现出大于  $K=1.79$  及大于  $K=2.57$  时应力波峰值衰减指数的趋势, 表明过大的不耦合系数造成了不耦合介质——水过多的能量耗散 (在高温高压下水并不完全是弹性的), 削弱了不耦合装药爆破的优势; ③在不耦合装药爆破中, 存在最佳的不耦合系数, 此时爆炸应力波峰值衰减最慢, 爆炸能得到充分利用, 达到最优的爆破效果。研究结果对不耦合装药爆破的设计及工程应用有一定的指导意义。

**关键词:** 不耦合装药; 爆破试验; 爆炸应力波; 传播规律; PVDF 压力传感器

中图分类号: O 382

文献标识码: A

## Experimental study of propagation law of explosive stress wave under condition of decouple charge

WANG Wei<sup>1</sup>, LI Xiao-chun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the outdoor blasting experiments, mid and far field pressures of explosive stress waves are measured using self-made PVDF pressure sensor under the condition of couple charges and water-decouple charges. Whereafter, the attenuation exponent relationships between explosive stress wave amplitude and distance of the wave front from the blasting source in the case of four different decouple coefficients are fitted according to experimental results. The conclusions are drawn as follows. ①In blasting experiments involved range, the attenuation of explosive stress wave amplitude of decouple charge is less than those of couple charge (namely  $K=1$ ). According to this result, it is verified that water is suggested as an elastic buffer between detonation products and rock which decreases dissipation of explosive energy caused by crushing the rock surrounding a charge, increases the propagation of explosive energy and enlarges the action region of explosive stress wave. ②The attenuation exponent of explosive stress wave amplitude when decouple coefficient equal to 3.29 is more than those when decouple coefficient equal to 1.79 and 2.57. It is shown that decouple medium (namely water) induces excess dissipation of explosive energy when decouple coefficient is too large, because water is non-perfect elasticity medium under high temperature and high pressure. This weakens the advantage of decouple charge blasting. ③There is an optimal decouple coefficient in the decouple charge blasting. At this moment, in contrast with couple charge and other decouple charge; the explosive stress wave amplitude attenuates most slowly; the explosive energy can be fully utilized; and then the best blasting result will be obtained. The study results have some guiding significance for design of decouple charge blasting and its engineering application.

**Key words:** decouple charge; blasting experiments; explosive stress wave; propagation law; PVDF pressure sensor

### 1 引 言

爆炸应力波理论一直是工程爆破界的重大研究

课题, 其爆炸应力波的传播与衰减规律是了解载介质动态应力场并进行爆破理论分析、计算及设计的基础。因此, 对爆炸应力波传播与衰减规律的研

收稿日期: 2009-08-26

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (No. E2010001062)。

第一作者简介: 王伟, 男, 1978 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土动力学、岩石动力学及工程地质灾害等方面的研究。E-mail: wangweiuuu@163.com

究越来越为工程爆破、岩土力学和采矿工程界所重视。通过现场试验、室内试验和理论分析等手段,国内外学者对耦合装药情况下的爆炸应力波的传播特性进行了大量的研究<sup>[1-12]</sup>。

由于不耦合装药爆破,尤其是水不耦合装药爆破相对于耦合装药爆破具有明显优势<sup>[13-14]</sup>,使不耦合装药爆破在露天矿山开采、铁路、隧道以及水利水电等工程中得到广泛应用。为此,研究不耦合装药时爆炸应力波的传播与衰减规律对进一步改善爆破效果、提高经济效益等方面具有重要的现实意义,而对相关方面的研究,特别是关于不耦合系数的改变对爆炸应力波传播特性的影响规律尚不清楚。

利用室内较成熟的试验手段(如一维撞杆法或平面波发生器加载法<sup>[1]</sup>)难以模拟研究不耦合装药情况对爆炸应力波传播特性的影响。此外,在现场岩体表面布设传感器虽能测量到爆炸应力波的速度或加速度传播规律,但测试结果易受到地形的变化及爆破近区表面P波、S波及Rayleigh波的传播等因素干扰。为此,本文通过室外爆破试验,利用在爆破试件中预埋研制的PVDF压力传感器对水不耦合装药爆破时爆炸应力波的中远场压力进行测量,以研究不耦合装药及不耦合系数变化对爆炸应力波传播与衰减规律的影响。

## 2 室外爆破试验

### 2.1 应力波测试系统

爆炸应力波测试系统由自行研制的PVDF压力传感器、示流电阻盒及采集频率为200 kHz的WS-5921型动态信号并行数据采集仪组成。

PVDF压力传感器采用锦州科信生产PVDF压电薄膜制作而成。其制作的主要步骤为:①在PVDF压电薄膜压接端子处焊接STYV-2低噪音电缆,以减小信号传输过程中外接电缆的噪音对采集信号的影响;②为保证预埋传感器位置的准确和压电传感器元件的平整度,把PVDF压电薄膜粘贴固定在混凝土底座上,其底座的材质和配比与爆破试件的制作一致,以确保埋入传感器的阻抗匹配;③粘贴PVDF压电薄膜时,需在底座表面孔隙较少部分打磨光滑平整,并选择没有孔洞的位置用南大618硅橡胶粘贴PVDF压电薄膜,以减小应力集中效应;④在压接端子及引线处同样用硅橡胶进行密封,一方面起密封、防潮及绝缘作用,另一方面减小传感器埋入试件后引线焊点处受力的影响。传感器粘贴及密封24 h后,进行10 h浸水试验,试验结果表明:该方法制作的压力传感器密封、绝源效果良好、黏

结力强,满足试验要求。制作好后的PVDF压力传感器如图1所示。本试验中采用PVDF压力传感器的电流测量模式,并为了现场试验方便,专门设计了用于并联示流电阻的电阻盒(如图2所示)。



图1 PVDF压力传感器  
Fig.1 PVDF pressure sensor



图2 示流电阻盒  
Fig.2 Current indicator resistance box

余尚江等<sup>[15]</sup>研究指出,国产PVDF压电薄膜的动态压电常数与静态压电常数相接近或一致,并且本试验中PVDF压力传感器制作过程中考虑了与爆破试件阻抗匹配的一致性,因此,其动态压电常数近似取静态压电常数,即 $K \approx 21 \text{ pC/N}$ 。

### 2.2 爆破试件制作

爆破试件选用42.5#普通硅酸盐水泥及中砂浇注而成。为模拟无限介质中不耦合装药爆炸应力波的传播,减小爆破试验的边界效应,本试验在地面挖长×宽×高尺寸大于3.1 m×3.1 m×1 m长方体坑作为浇注爆破试件的模具,挖坑时尽量使坑的四壁成波浪型,以削弱试件中反射波的叠加作用,同时,浇注试件时应使混凝土和坑周围的土体紧密结合,以增加应力波的透射,减小其反射。

为了降低试验成本,充分利用浇注的爆破试件,在每个试件中预留5个炮孔,炮孔布置位置、间距及炮孔编号如图3所示。预留炮孔由上下两个支架固定,根据预留炮孔孔径的不同,以钢筋或钢管作为炮孔预埋件(如图4所示)。试件浇注完成后每隔1~2 h将混凝土中的预留钢筋或钢管轻轻转动,直到试件硬化,抽出预埋件形成所需炮孔。

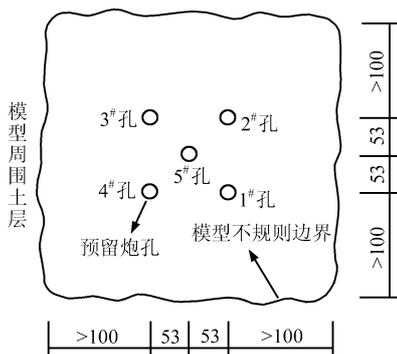


图 3 预留炮孔平面布置示意图 (单位: cm)

Fig.3 Schematic diagram of reserve hole layout (unit: cm)

在浇注试件的同时，制作用来测量混凝土物理力学参数的小试样，小试样和爆破试件制作完成后用草帘遮盖，定期洒水养护不少于 28 d，以达到预定强度。小试样养护 28 d 后制成标准试样，测量得到试件的物理力学参数见表 1。

表 1 试件的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of specimens

密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	波阻抗 /(10 <sup>3</sup> kg/(m <sup>2</sup> ·s))	泊松比
2.14	21.1	1.36	6 899	0.203

为了确保 PVDF 压力传感器的预埋效果，保证传感器位置在浇注水泥砂浆过程中不发生变化。依据传感器预埋位置，在预留炮孔下部支架上焊接传感器固定托架，托架的高度应确保传压力感器位于药包长度的中心线上。托架由钢筋和小钢板焊接加工而成，把加工好的传感器粘贴在预留好的钢托架上，并保证钢托架位于 PVDF 压力传感器的下方，防止因刚托架的影响引起的传感器波阻抗不匹配使测试结果失真，压力传感器的预埋过程如图 4 所示。压力传感器固定好后记录其距炮孔中心的准确距离。



图 4 PVDF 压力传感器预埋方法

Fig.4 PVDF pressure sensor embed method

试件浇注过程及浇注完成试件如图 5 所示。依

据上述方法制作了 4 个试验试件，1#~4#试件的预留炮孔分别对应的径向不耦合系数  $K$  分别为 1、1.79、2.57 及 3.29，其中不耦合系数  $K=1$  代表耦合装药结构。药包采用自制的 TNT 延长药包，药包直径  $d=1.4$  cm，长  $L=24$  cm，装药密度  $\rho=1.05$  g/cm<sup>3</sup>，起爆电雷管位于药包上部。药包装药密度及药量的选择以不使爆破试件产生明显破损为原则。在预留炮孔底部添加高度为 30 cm 细砂并捣实，随后装 TNT 延长药包，封孔方式采用下部黄泥上部加粗砂捣密，并且炮孔上覆盖砂袋的方法。



(a) 试件浇注过程

(b) 浇注完成后试件

图 5 爆破试件

Fig.5 Blasting specimens

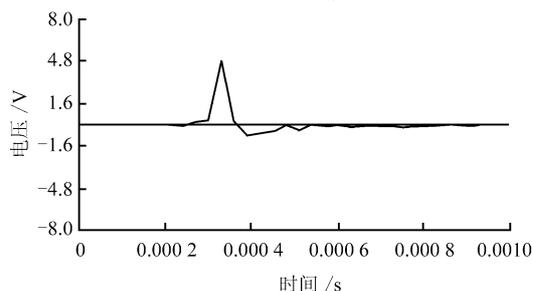
### 3 试验结果及初步分析

#### 3.1 试验结果

完成爆破试验后，PVDF 压力传感器测量得到的典型电压-时间曲线如图 6 (a) 所示，进行电压-时间曲线积分得到所需的应力-时间曲线，如图 6(b) 所示。

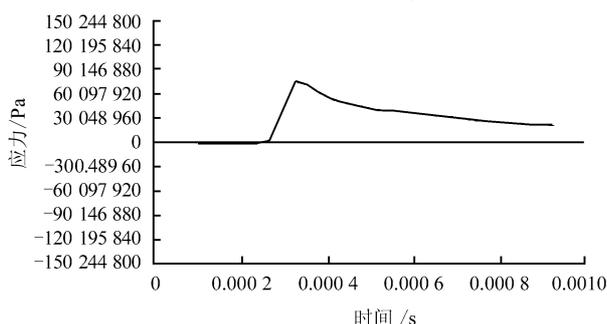
分析大量爆炸应力波实测结果可知，PVDF 压力传感器真实地反映了应力波的上升沿部分，但大部分应力波下降沿的测量信号失真。李焰<sup>[6]</sup>研究认为，造成这种现象的原因是 PVDF 压电薄膜有滞后效应，当应力卸载为 0 时，其电荷不回 0。巫绪涛<sup>[17]</sup>研究认为，这种现象是由于组合式应力计结构在冲击过程中的横向效应所致，特别是在较大外载荷作用后，常会发现 PVDF 压力传感器敏感层和周围绝缘层面积均不同程度地扩大，甚至出现较严重的褶皱现象，这将导致 PVDF 压力传感器测量应力波下降沿部分失真。在本试验中，为了保证爆破测试的安全，测试信号需要经长距离传输到数据采集仪，这将导致外界因素对测试信号较弱的应力波下降沿信号产生较大干扰，这也是导致应力波下降沿信号失真的一个原因。为此，在今后试验中需要进一步改进 PVDF 压力传感器设计方法，提高对应力波下降沿部分测量效果。

最大值为 4.83 V (时间 0.000 36 s), 采样频率为 33 333 Hz



(a) 典型电压-时间曲线

最大值为 75 122 400 Pa (时间 0.000 36 s), 采样频率为 33 333 Hz



(b) 典型应力-时间曲线

图 6 PVDF 压力传感器测量的典型试验结果

Fig.6 Typical experimental result of PVDF pressure sensor

为得到爆炸应力波峰值随距离的衰减关系, 需获得被爆介质中冲击波初始压力。由于炸药爆轰波和爆破近区(几倍药包半径范围内)冲击波的高温、高压, 试验中埋在炮孔壁的 PVDF 压力传感器没有记录到有效信号。因此, 没有实测到爆轰产物与孔壁以及爆轰产物与不耦合水介质交界面上的冲击波压力初始值, 虽然可以通过文献[14]的方法分别求解耦合装药爆破及不耦合装药爆破两种情况下的介质交界面上冲击波初始压力, 但为了比较不耦合装药对爆破应力波衰减的影响, 以药包的爆轰波压力作为的冲击波压力的初始值, 其计算公式为<sup>[7]</sup>

$$p_D \approx \frac{\rho D^2}{\kappa + 1} \quad (1)$$

式中:  $p_D$  为爆轰波峰值压力;  $\rho$  为装药密度;  $D$  为与装药密度  $\rho$  相对应的爆轰波波速;  $\kappa$  为爆轰产物的等熵指数。依据试验用 TNT 延长药包的实际参数  $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$ ,  $D = 4\,916 \text{ m/s}$ ,  $\kappa = 3$ , 计算得到爆轰波峰值压力为  $p_D = 6.3 \text{ GPa}$ 。表 2 列出了 4 种不耦合系数下试验中实测到的距爆心不同距离处爆炸应力波峰值。

根据表 2 拟合出  $\bar{r} > 10$  时 4 种不耦合系数下爆炸应力波峰值随传播距离衰减的指数关系曲线(如图 7 所示), 其相应的表达式为

表 2 不同不耦合系数  $K$  下实测的  $\bar{r}/p$  值 (单位:  $\text{MPa}^{-1}$ )  
Table2 The  $\bar{r}/p$  values at different  $K$  (unit:  $\text{MPa}^{-1}$ )

组别	不耦合系数 $\bar{r}/p$			
	$K=1.00$	$K=1.79$	$K=2.57$	$K=3.29$
1	1.0/6 300.0	1.0/6 300.0	1.0/6 300.0	1.0/6 300.0
2	11.0/132.3	12.9/167.2	11.0/220.8	12.1/160.4
3	14.6/82.7	13.6/146.3	15.7/130.5	17.9/96.7
4	17.1/47.8	19.3/80.6	20.3/100.6	37.1/28.8
5	27.6/20.8	21.4/73.2	67.1/17.47	52.9/17.2
6	25.0/51.84			

注:  $\bar{r}$  为 PVDF 压力传感器预埋位置距离爆心的相对距离,  $\bar{r} = R/R_0$ ;  $R$  为 PVDF 压力传感器预埋位置距爆心的实际距离;  $R_0$  为 TNT 延长药包半径;  $\bar{r}/p$  表示与相对距离  $\bar{r}$  对应的实测应力波峰值压力  $p$ 。

$$\left. \begin{aligned} P &= P_D \bar{r}^{-1.618}, K = 1.00 \\ P &= P_D \bar{r}^{-1.443}, K = 1.79 \\ P &= P_D \bar{r}^{-1.396}, K = 2.57 \\ P &= P_D \bar{r}^{-1.466}, K = 3.29 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为分析不耦合系数对爆炸应力波传播特性的影响, 根据得到的爆炸应力波峰值衰减指数关系曲线, 拟合得到了衰减指数  $\alpha$  随不同不耦合系数  $K$  的变化曲线(如图 8 所示)。

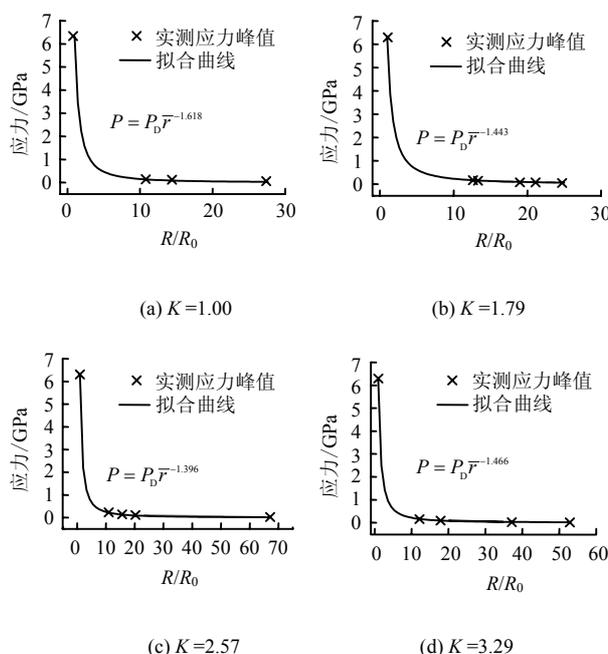


图 7 不同不耦合系数下爆炸应力波峰值随传播距离衰减关系曲线

Fig.7 The attenuation curves of blasting stress wave peak with propagation distance at different  $K$

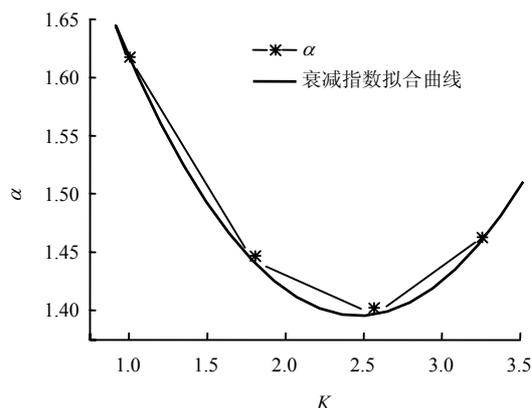


图8 不同不耦合系数时应力波峰值衰减指数拟合曲线

Fig.8 The fitted curves of attenuation exponential with different  $K$

### 3.2 试验结果初步分析

(1) 在试验所涉及的范围, 不耦合装药时爆破应力波峰值衰减幅度小于耦合装药(即  $K=1$ ) 时爆破应力波峰值衰减幅度, 验证了水介质作为炸药爆轰产物与岩体间的弹性缓冲层作用, 减少了粉碎孔壁岩体造成的能量耗散, 增加了能量传递, 加大了爆炸的作用范围, 试验结果与文献[13—14]的相关结论相符。

(2) 不耦合系数  $K=3.29$  时, 应力波峰值衰减指数表现出大于  $K=1.79$  及大于  $K=2.57$  时应力波峰值衰减指数的趋势, 表明过大的不耦合系数造成了不耦合介质——水过多的能量耗散(在高温高压下水并不完全是弹性的), 相比减小了能量传递, 削弱了不耦合装药爆破的优势。

(3) 由图8可知, 在不耦合装药爆破中, 存在最佳的不耦合系数, 本文试验条件下的最佳不耦合系数  $K$  的范围为  $2\sim 3$ , 此时爆炸应力波峰值衰减最慢, 爆炸能得到充分利用, 达到最优的爆破效果。因此, 在工程应用中为取得良好的爆破效果要选取适当的不耦合系数。

## 4 结 语

通过室外爆破试验, 初步探讨了不耦合装药情况下爆炸应力波峰值随距离传播的衰减规律, 得到了4种不耦合系数下爆炸应力波峰值随传播距离衰减的指数关系式。在试验所涉及的范围, 通过分析不同不耦合系数对爆炸应力波传播特性的影响, 得到了不耦合装药时爆破应力波峰值衰减幅度小于耦合装药时爆破应力波峰值衰减幅度, 并且由于水介质的非完全弹性影响, 使不耦合装药爆破中存在最佳的不耦合系数, 本文试验条件下的最佳不耦合

系数范围为  $2\sim 3$ 。相关结论对不耦合装药爆破的设计及实际工程应用有一定的指导意义。但对爆炸应力波的作用时间、下降沿部分的特性以及随时间变化的超压场函数的具体形式等方面还需进一步研究。此外, 本文研制的PVDF压力传感器的设计方法还需进一步改进, 以提高对爆炸应力波的测量效果。

**致谢:** 本工作曾得到李海波研究员、黄理兴研究员和胡元育高工的关心和指导。参加试验工作的还有黄平路、方志明、石露、张法智、杜学飞和任伟, 在此一并致谢!

### 参 考 文 献

- [1] 胡刚, 郝传波, 景海河. 爆炸作用下岩石介质应力波传播规律研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 270—273.  
HU Gang, HAO Chuan-bo, JING Hai-he. Study of the laws of stress wave propagation in rock bar under blasting loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3): 270—273.
- [2] 赵纪生, 陶夏新, 欧进萍, 等. 弹塑性介质内的波速变化[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 149—154.  
ZHAO Ji-sheng, TAO Xia-xin, OU Jin-ping, et al. Wave velocity variation in elastoplastic media[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 149—154.
- [3] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 盐岩冲击特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3613—3620.  
WU Wen, XU Song-lin, YANG Chun-he, et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3613—3620.
- [4] 尚嘉兰, 沈乐天, 赵坚. 粗粒花岗闪长岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 212—215.  
SHANG Jia-lan, SHEN Le-tian, ZHAO Jian. Attenuation law of stress wave in the Bukit Timah granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 212—215.
- [5] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 第. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 717—721.  
ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 717—721.
- [6] 哈努卡耶夫 A H. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中译. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [7] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [8] 陆渝生, 连志颖, 庄明耿. 不同形状地质断层对应力波

- 传播影响的试验研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(2): 48—51.
- LU Yu-sheng, LIAN Zhi-ying, ZHUANG Ming-geng. Effect of different geologic Robbles on stress wave in structure[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology**, 2004, 5(2): 48—51.
- [9] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1365—1371.
- GAO Ming-shi, DOU lin-ming, ZHANG Nong, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1365—1371.
- [10] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1053—1058.
- YE Gen-xi, JIANG Fu-xing, GUO Yan-hua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 1053—1058.
- [11] 卢文波, 董振华, 朱传云. 爆破地震波传播过程中衰减参数的确定[J]. 工程爆破, 1997, 3(4): 12—16.
- LU Wen-bo, DONG Zhen-hua, ZHU Chuan-yun. Calculating of attenuation parameters of rock mass during the propagation of blasting seismic wave[J]. **Engineering Blasting**, 1997, 3(4): 12—16.
- [12] DONG-SOO KIM, JIN-SUN LEE. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2000, 19(2): 115—126.
- [13] 武海军, 杨军, 黄风雷, 等. 不同耦合装药下岩石的应力波传播特性[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(1): 44—47.
- WU Hai-jun, YANG Jun, HUANG Feng-lei, et al. Propagation behavior of stress wave of rock under the conditions of different coupling charges[J]. **Mining Research and Development**, 2002, 22(1): 44—47.
- [14] 王伟, 李小春, 石露, 等. 深层岩体松动爆破中不耦合装药效应的理论探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2041—2046.
- WANG Wei, LI Xiao-chun, SHI Lu, et al. Theoretical analysis of decouple charge loosen blasting in deep rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2041—2046.
- [15] 余尚江, 李科杰. 混凝土结构内冲击波应力传感器设计及其行为[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 350—354.
- YU Shang-jiang, LI Ke-jie. Design and performance of PVDF pressure sensor for shock wave measurement in concrete structures[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2005, 25(4): 350—354.
- [16] 李焰, 张向荣, 谭红梅, 等. 国产 PVDF 压电薄膜的冲击加载及卸载响应研究[J]. 高压物理学报, 2004, 18(3): 261—266.
- LI Yan, ZHANG Xiang-rong, TAN Hong-mei, et al. Response of homemade PVDF Piezofilm under shock loading and unloading[J]. **Chinese Journal of High Pressure Physics**, 2004, 18(3): 261—266.
- [17] 巫绪涛. 钢纤维高强混凝土动力学性质的研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2006.

#### 上接第 1722 页

- [8] 郭诚谦. 土石坝的若干发展[J]. 水利水电技术, 1998, 29(10): 22—25.
- GUO Cheng-qian. Several developments of rockfill dam[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 1998, 29(10): 22—25.
- [9] 陈惠发, 萨里普 A F. 土木工程材料的本构方程(第一卷: 弹性与建模)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [10] YIN J H, SAADAT F, GRAHAM J. Constitutive modelling of a compacted sand-bentonite mixture using three-modulus hypoelasticity[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 27(3): 365—372.
- [11] 殷建华. 土的三模量增量非线性模型及其推广[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 16—19.
- YIN Jian-hua. Three-modulus incremental non-linear models and generalization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 16—19.
- [12] 张宗亮, 贾延安, 张丙印. 复杂应力路径下堆石体本构模型比较验证[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1147—1151.
- ZHANG Zong-liang, JIA Yan-an, ZHANG Bing-yin. Comparison and verification of constitutive models for rockfill materials under complex stress path[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1147—1151.
- [13] 相彪, 张宗亮, 迟世春. 堆石料等应力比路径三模量增量非线性模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1322—1326.
- XIANG Biao, ZHANG Zong-liang, CHI Shi-chun. Three-modulus incremental nonlinear model of rockfill under paths of constant stress ratio[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1322—1326.