

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0280

水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征*

高启栋^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 杨招伟^{1,2}, 严 鹏^{1,2}, 陈 明^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 借助极化偏振分析方法, 针对一组现场爆破实验, 分析了水平光面爆破激发地震波的成分构成及特性, 比较了不同波的衰减特征及各自对爆破振动的影响, 并探讨了水平光面爆破的内在力学机理。结果表明, 爆破振动中不同波的相对量值及主导波的类型均会随测点位置的变化而变化, 爆源特性和沿传播路径的不同衰减共同决定波的成分构成及演化, 各测点的优势振动方向也与波的成分构成密切相关。对于水平光面爆破, 在光爆孔平面上, P 波的影响可忽略, S 波主要在竖直向振动, R 波对水平及竖直向的振动均有贡献, 其中水平向的振动主要由 R 波引起, 而 S 波的竖直向振速在近区远高于 R 波, 但归因于 S 和 R 波的不同衰减, R 波在距离爆源 22.5 m/kg^{1/2} (58~67 m) 处开始主导竖直向的振动; 在光爆孔平面外, P 波的影响不可忽略, 且在特定位置会成为优势波型。

关键词: 水平光面爆破; 爆破振动; 爆破地震波; 成分构成; 衰减特征

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

爆破振动作为工程爆破的主要负面效应, 对它的预测与控制历来是关注的热点^[1-3]。因结构的破坏与质点峰值振动速度 (PPV) 具有良好的相关性^[4], PPV 通常被选为评价爆破振动危害的重要指标。关于 PPV 预测的研究不胜枚举, 如传统的比例药量经验预测公式^[5]、子波理论叠加方法^[6-7]、神经网络预测手段^[8-9]等。因结构的破坏是频率相关的, 关于爆破振动频谱特性的研究也不少^[10-12]。此外, 也有不少研究是关于地形、雷管延时、地应力、临空状态和起爆方式等因素对爆破振动的影响^[13-17]。地表爆破振动是体波 (压缩波和剪切波, 简称 P 波和 S 波) 与面波 (Rayleigh 波, 简称 R 波) 综合作用的结果^[18], 因此, 非常有必要加深对不同波传播或衰减特征及影响作用规律的认识。然而, 因爆破地震波的成分构成及特性受爆源特性、测点相对位置及爆破边界条件等因素的影响, 且受制于波成分识别及分离等方面的困难, 爆破地震波的研究相对滞后, 当前对爆破振动的控制鲜有将波型考虑在内。

现有的研究主要聚焦于爆源特性或波的形成机理, 如: Favreau^[19] 给出了球形空腔的应力解, 结果显示球药包只激发 P 波; Graff^[20] 在无限爆裂假定下, 证明了无限长柱形空腔也仅激发 P 波; Heelan^[21] 推导了短柱形空腔的应力解, 并证明短柱状药包可同时激发 P、S 波; Blair^[22]、Frédéric 等^[23] 也通过理论计算或现场实验分析了延长药包的应力解; Aki 等^[24]、阿肯巴赫^[25] 和王礼立^[26] 从数学推算的角度, 结合应力波的透射、反射理论研究了各种波的形成机理; Gao 等^[27]、金旭浩等^[28]、胡英国等^[29] 和杨招伟等^[30] 对爆破过程中 S 波的形成机理、S 波的数值模拟及 S 波初至时刻的判别等也做了研究。

本文中, 针对白鹤滩水电站坝基开挖过程中的一组爆破实验, 借助于地震学中极化偏振分析方法, 分析水平光爆激发地震波的成分构成及特性, 比较不同波的衰减特征及各自对爆破振动的影响, 并简要探讨水平光面爆破的内在力学机理, 以加深对爆破地震波的认识与了解, 从而更好地预测与控制爆破振动的危害。

* 收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51779190); 湖北省技术创新专项重大项目 (2017ACA102)

第一作者: 高启栋 (1991—), 男, 博士研究生, qdgao@whu.edu.cn;

通信作者: 卢文波 (1968—), 男, 博士, 教授, wblu@whu.edu.cn。

1 爆破地震波的分类与识别

1.1 爆破地震波的形成与分类

所谓波,是指某种扰动信号的传播。炸药在岩土体中爆炸时,除用于破岩等工程目的,还有部分能量会对炸药周围的岩土体引起扰动,这种扰动由此及彼、由近及远地传播即形成爆破地震波,因此爆破地震波实际上是岩体介质中由爆炸所引起的扰动的传播,属于固体介质中应力波的传播。

在弹性动力学的发展过程中,Poisson 和 Stokes 最早发现并证明^[31]:在无界、均匀弹性介质中,存在两种弹性波的传播,即纵波和横波。在三维的一般情况下,当忽略体积力时,无限、均匀弹性介质中波传播的运动方程为^[26]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + \mu) \partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + \mu) \partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + \mu) \partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 和 μ 为拉梅常数, ρ 为介质密度, u 、 v 、 w 分别表征 x 、 y 、 z 向的位移, $\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ 为体积膨胀项, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子。

首先,将方程组(1)的第1~3式分别对 x 、 y 、 z 微分,然后相加,即得:

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta \quad (2)$$

这是对体积膨胀项 Δ 的线性双曲线偏微分方程,表示体积膨胀 Δ 以波速 $c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ 传播,即为膨胀波或压缩波。

再者,通过对方程组(1)作适当变换、消去体积膨胀项 Δ ,可得:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega \quad (3)$$

这是对旋转项 $\omega = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u}$ 的线性双曲偏微分方程,表示旋转 ω 以波速 $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ 传播,即为旋转波或剪切波。

另外,由式(2)~(3)不难看出,膨胀波是无旋波($\omega = \mathbf{0}$),而剪切波是等容波或无散波($\Delta = 0$)。依据亥姆霍兹矢量分解定理,无旋场必为某标量 φ 的梯度,而无散场必为某矢量 ψ 的旋度,则位移场也可写为^[26]:

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi + \nabla \times \psi \quad (4)$$

则式(2)~(3)可分别改写为:

$$\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \psi \quad (6)$$

即无旋波和等容波的传播也可分别由位移势函数 φ 和 ψ 来表征。

假定一个任意平面波以波速 c 在均匀各向同性的弹性介质中传播,若取此平面波的传播方向为 x 轴,则3个方向的位移可表示为 $\xi = x - ct$ 的函数,即 $u = u(x - ct)$ 、 $v = v(x - ct)$ 、 $w = w(x - ct)$ 。将他们代入式(1),进行求解,则只得到两种可能解:

$$c^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} = c_p^2, \quad v'' = w'' = 0 \quad (7)$$

$$c^2 = \frac{\mu}{\rho} = c_s^2, \quad u'' = 0 \quad (8)$$

式中: (“”)表示对 ξ 的二阶微商。式 (7) 表示无旋波只沿 x 方向运动, 即质点的运动方向与波的传播方向一致, 也即无旋波为纵波; 而式 (8) 表示等容波只有 y 和 z 方向的运动, 即质点的运动方向与波的传播方向垂直, 也即等容波为横波。显然, 纵波比横波传播得快, 最先被观测到, 其次是横波, 因此这两种波又称为 P 波(primary wave)和 S 波(secondary wave)。S 波按质点运动方向的不同, 又可分为平行于自由表面的 SH 波和垂直于自由表面的 SV 波。

当体波的传播遇到自由表面时, 还会形成另一类沿自由表面传播的波, 即表面波。Rayleigh 最早发现并证明了表面波的存在, 并由此得名 Rayleigh 波, 简称 R 波。实际上, 表面波是体波遇自由表面反射时, 为满足应力为零的边界条件而形成的另一类沿自由边界传播的波^[32], 且其可看作是一对耦合的非均匀 P 和 SV 波沿自由表面的传播^[24]。由此定义, 可得表征 Rayleigh 波传播的方程^[32]:

$$\left(\frac{c_r}{c_s}\right)^6 - 8\left(\frac{c_r}{c_s}\right)^4 + 8\left(\frac{c_r}{c_s}\right)^2 \left[1 + 2\left(1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}\right)\right] - 16\left(1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}\right) = 0 \tag{9}$$

$$\begin{cases} u = \frac{ic_r s A}{\omega(1 - c_r^2/2c_s^2)} \left[\left(1 - \frac{c_r^2}{2c_s^2}\right) e^{-sz} - e^{-rz} \right] e^{i(kx - \omega t)} \\ w = \frac{c_r^2 r s A}{\omega^2(1 - c_r^2/2c_s^2)} \left[\left(1 - \frac{c_r^2}{2c_s^2}\right)^{-1} e^{-sz} - e^{-rz} \right] e^{i(kx - \omega t)} \end{cases} \tag{10}$$

式中: c_r 为 Rayleigh 波的传播速度, $\omega = kc$ 为角频率, A 为表征位移势的常数, r 和 s 分别为位移推导过程中引进的参量, $r^2 = k^2 - \omega^2/c_p^2$, $s^2 = k^2 - \omega^2/c_s^2$ 。由式 (10) 可知, Rayleigh 波的水平向位移与竖直向位移在相位上相差 $\pi/2$ (1/4 周期), 其运动轨迹必为椭圆, 且在自由表面 ($z = 0$) 为逆时针的椭圆, 同时竖直向位移为水平向位移的约 1.5 倍。此外, Rayleigh 波的幅值沿深度方向迅速衰减, 它的能量主要集中于自由表面附近, 因而 Rayleigh 波在自由表面传播时, 其能量为二维发散。在约 0.2 倍波长的深度处, Rayleigh 波的水平向位移由正转为负, 在此以下质点运动轨迹转为顺时针, 如图 1 所示^[32]。

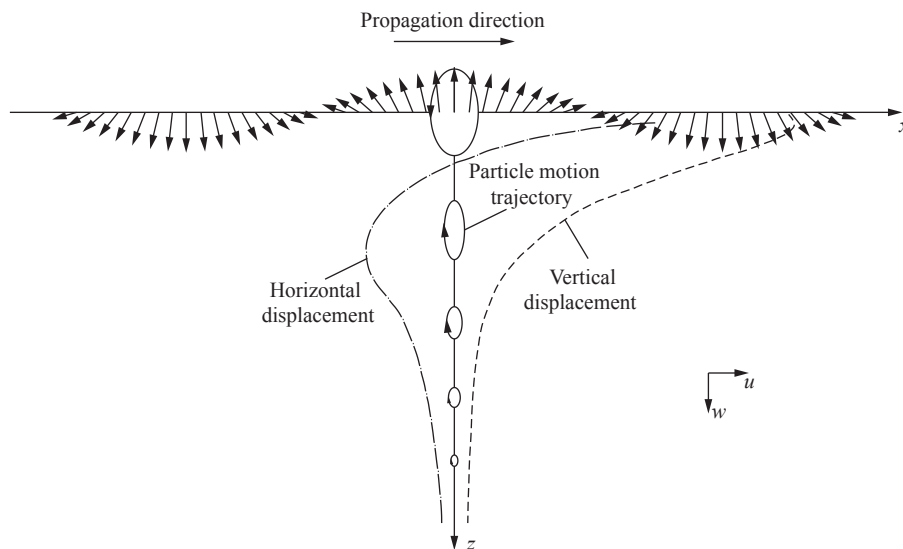


图 1 Rayleigh 波的传播特性示意图^[32]

Fig. 1 Illustration of Rayleigh wave's propagation^[32]

Rayleigh 波是由于自由表面的存在而形成的一种表面波, 除此之外, 还有其他类型的表面波, 如 Stoneley 波和 Love 波等。Stoneley 波是指一种广义的 Rayleigh 波, 表征存在于不同介质界面处沿界面传播的非均匀波。Love 波是由上软下硬的介质层之间 S 波的相互干涉所形成, 属于 SH 型波。

综上所述, 根据传播路径的不同, 爆破地震波可分为体波和面波两种。体波在介质内部传播, 属三维发散波, 又可进一步分为纵波和横波。纵波的质点运动方向与波的传播路径一致, 在传播过程中仅引

起介质的压缩和拉伸变形,也称为压缩波、疏密波和无旋波;横波的质点运动方向垂直于波的传播路径,在传播过程中仅引起介质的剪切变形,也称为剪切波、等容波和旋转波。面波沿自由表面或介质界面传播,属于非均匀的二维发散波,包括 Rayleigh 波、Stoneley 波和 Love 波等。因为爆破加载通常为轴对称问题,S 波中的 SH 分量相对较少^[33],因而本文中主要针对 P 波、SV 波和 Rayleigh 波 3 种波,图 2 示意了 3 种波的传播特性。

求解式 (9),可得到 Rayleigh 波速的近似表达式^[25]:

$$c_r \approx \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_s \quad (11)$$

式中: ν 为介质泊松比。对于大多数岩石而言,泊松比接近于 0.25,则波速满足 $c_p = \sqrt{3}c_s$ 和 $c_r \approx 0.92c_s$,因而 P 波是最快的,S 波次之,而 Rayleigh 波的波速略低于 S 波。

1.2 偏振方向的预判

不同波的差别主要体现在偏振特性和传播速度两个方面,因此可基于地震学中极化偏振分析的方法来识别波的成分。在识别过程中,需事先根据爆源与测点的相对位置关系,预判各种波的偏振方向,主要包含 3 种情况:(1)测点位于爆(震)源之上,即属上行波,则 P 波在第一、三象限偏振,其水平和竖直向振动的相位相同(相位差为零),而 S 波在第二、四象限偏振,其水平和竖直向振动的相位相反(相位差为 1/2 周期);(2)测点位于爆(震)源之下,即属下行波,则 P 波在第二、四象限偏振,其水平和竖直向振动的相位相反(相位差为 1/2 周期),而 S 波在第一、三象限偏振,其水平和竖直向振动的相位相同(相位差为零);(3)测点与爆(震)源同高程,则 P 波主要在水平向偏振,而 S 波主要在竖直向偏振。这 3 种情况下,Rayleigh 波均为椭圆偏振,它在地表的质点运动轨迹为逆时针的椭圆,且水平和竖直向振动的相位差为 1/4 周期。图 3 以上行波为例,示意了 3 种不同波的偏振方向和相位差异。

1.3 矢量图分析

综上所述,一种简便且直观的方法识别波的成分构成,即在位移坐标系中绘制质点的运动轨迹,也称矢量图分析。因各种波偏振方向和传播速度的差别,质点运动轨迹的形状将随不同波的到达而发生变化。图 4 为埋藏药包爆破情况下(上行波),地表某测点的质点运动轨迹,其中 u 和 w 分别表示水平和竖直方向的位移。因质点运动轨迹是按时序点绘制的,因而轨迹中的拐点表征在此之后将由另外一种波主导质点的运动。

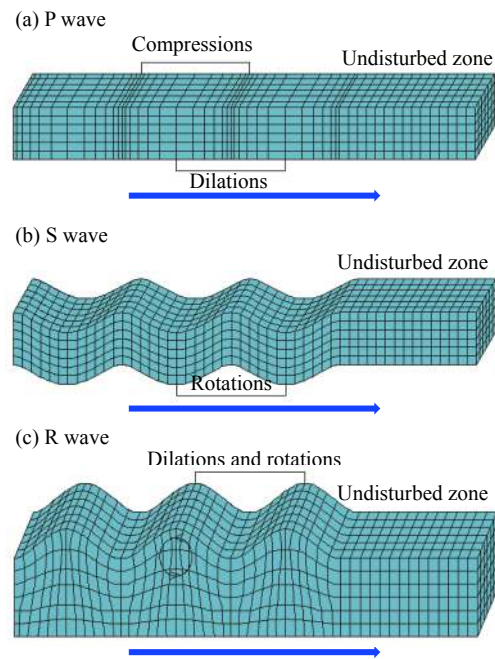


图 2 不同波的传播特性示意图

Fig. 2 Illustration of propagation characteristics of different waves

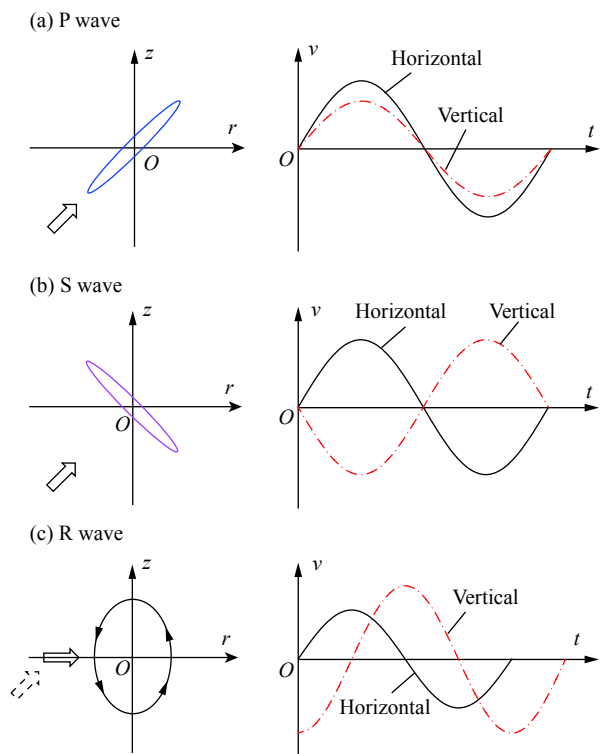


图 3 上行波的偏振方向和相位差异示意图

Fig. 3 Illustration of polarization direction and phase differences for up-going waves

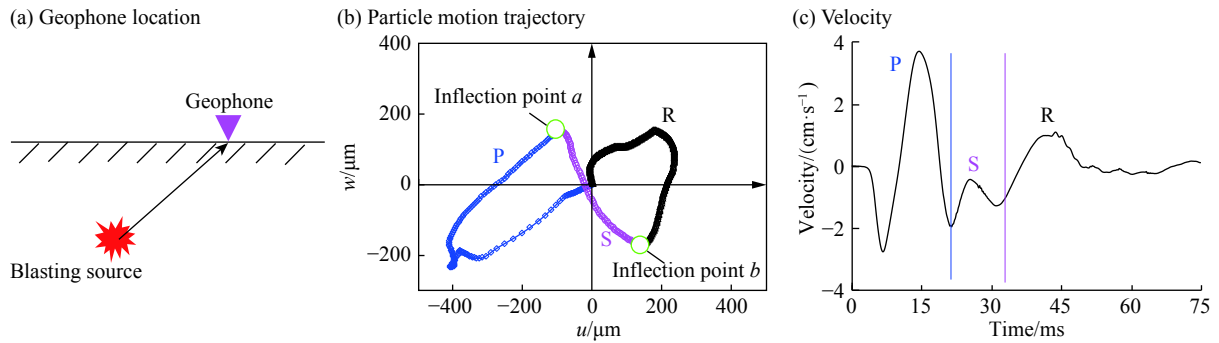


图 4 矢量图分析识别爆破地震波

Fig. 4 Hodogram identification of seismic components induced by blasting

1.4 爆破地震波的识别流程

实测的爆破振动多为速度时程, 因此需通过数值积分得到位移时程, 而后才能在位移坐标中绘制质点运动轨迹。在进行数值积分前, 原始数据需先经基线校正处理, 否则积分得到的位移会发生漂移。概括起来, 前面所述爆破地震波的成分判别包括如下两个方面: (1) 偏振方向的预判, 明确爆源与测点的相对位置关系, 对可能出现的各种波的偏振方向进行预判; (2) 矢量图分析, 主要包含原始数据(速度时程)的收集与整理、基线校正处理、数值积分(获得位移时程)、质点运动轨迹的绘制。图 5 为爆破地震波的识别流程。

2 工程概况及实验方案

2.1 工程概况

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内, 是金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个梯级水电站中的第 2 级, 坝址距上游乌东德水电站 182 km, 距下游溪洛渡水电站 195 km, 具有以发电为主, 兼有防洪、拦沙、改善下游航运条件和发展库区通航等作用。电站装机容量 16 000 MW, 仅次于三峡, 是当今世界上的第二大水电站。如图 6

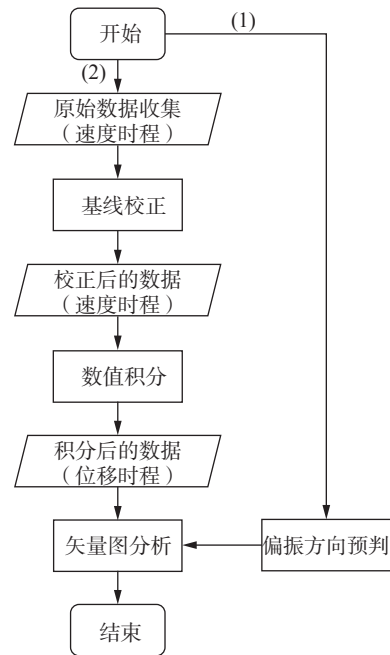


图 5 爆破地震波的识别流程

Fig. 5 Flowchart of identification of wave components induced by blasting

(a) Overall view of Baihetan Hydropower



(b) Experiment area

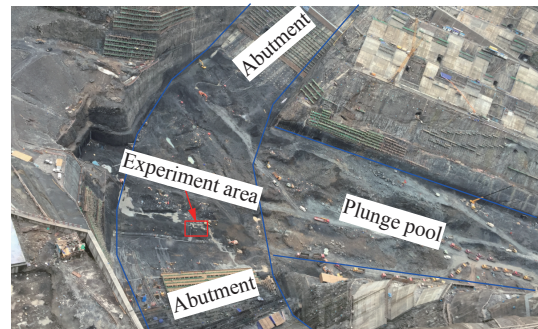


图 6 白鹤滩水电站全貌及实验选址

Fig. 6 Overall view of Baihetan Hydropower and experiment area

所示,在白鹤滩水电站水平坝基 EL 555~550 m 的开挖过程中,开展了一组水平光爆实验。实验区岩体的物理力学参数分别为:密度 2 700~2 800 kg/m³,弹性模量 13~16 GPa,泊松比 0.24~0.26,单轴抗压强度 65~90 MPa,抗剪强度 0.6~0.7 MPa,声波速度 4.5~4.7 km/s。

2.2 测点布置

如图 7 所示,在光爆孔同高程平面和光爆孔以上 3.5 m 处共布置了 4 个地表测点#1~#4,以监测地表爆破振动,图 8 以立视图的形式示意了测点与炮孔的相对位置关系。实验中,采用的传感器可同时监测水平径向、水平切向和竖直向的爆破振动速度,可监测振速的范围为 0.001~35.4 cm/s,所有传感器均采用速凝石膏与基岩紧密粘接。记录仪采用成都中科测控生产的 TC-4850,采样频率为 8 000 s⁻¹,触发值为 0.25 cm/s,记录时长为 5.0 s,预触发为 0.1~0.2 s。实验智能爆破振动监测系统如图 9 所示。

2.3 爆破参数

此次水平光面爆破共包含 32 个炮孔,且采用毫秒延时雷管 MS5(110 ms)分成了 8 段,每段包含 3~6 个炮孔,起爆网络如图 10 所示。炮孔间距为 0.6 m,抵抗线为 1.0 m,孔深为 10.0 m。炸药为 2#岩石乳化炸药,装药采用空气间隔装药的方式,线装药密度为 220 g/m,钻孔装药参数分别为:孔径 76 mm,孔深 10 m,间距 0.6 m,药径 32 mm,线密度 220 g/m,药量 2.2 kg,堵塞 1 m。典型炮孔装药结构如图 11 所示。各段爆破的药量(即单响药量)为 6.6~13.2 kg,测点距各段爆破的水平距离为 1.8~37.4 m(见表 1)。

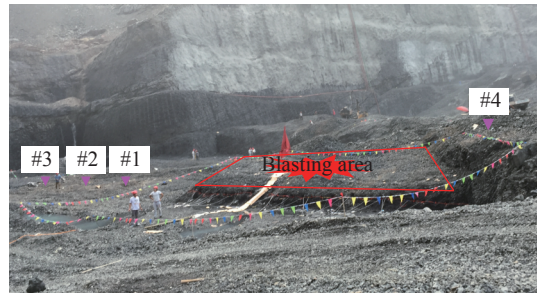


图 7 现场测点的布置

Fig. 7 Layout of in-situ observation points

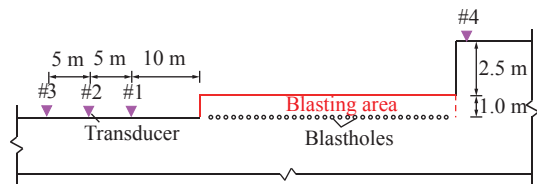


图 8 测点与炮孔的相对位置

Fig. 8 Relative location of observation points and blastholes



图 9 智能爆破振动监测系统

Fig. 9 Intelligent blast vibration monitoring system

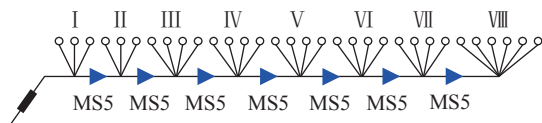


图 10 起爆网络

Fig. 10 Initiation network

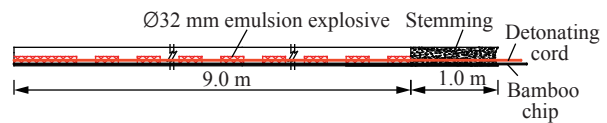


图 11 典型炮孔装药结构

Fig. 11 Typical charging structure

表 1 各段的爆破药量和测点距离

Table 1 Charge weight and distance of each blast

测点	水平距离/m							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
#1	10.9	12.7	14.8	17.2	19.6	22.0	24.4	27.4
#2	15.9	17.7	19.8	22.2	24.6	27.0	29.4	32.4
#3	20.9	22.7	24.8	27.2	29.6	32.0	34.4	37.4
#4	18.3	16.5	14.4	12.0	9.6	7.2	4.8	1.8
药量/kg	6.6	6.6	7.7	7.7	8.8	8.8	8.8	13.2

3 实验结果

图 12 为一个实测的爆破振动时程, 其中包含 8 段明显的信号, 且每段信号的起始时间与起爆网络 (见图 10) 中雷管的延迟时间吻合, 他们分别代表 8 段光爆孔诱发的振动。为方便描述, 以 #1-I 表示 #1 测点处由第 I 段光爆孔诱发的振动。

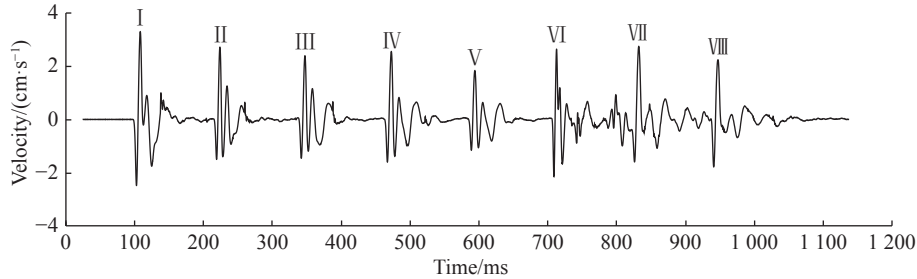


图 12 实测爆破振动时程

Fig. 12 Measured blast vibration histories

3.1 光爆孔平面上的地震波

图 13 为与光爆孔同高程平面上测点的典型质点运动轨迹, 其中 u 和 w 分别表示水平径向和竖直向的位移。在工程实践中, 多关注径向和竖直向的振动, 而切向振动的规律性较差, 图中的轨迹仅是质点在水平径向和竖直向二维空间的运动情况。因测点 #1~#3 与炮孔在同一高程 (平行波, 见图 8), 因而 P 波应在水平向偏振, S 波在竖直向偏振, 而 R 波为逆时针椭圆偏振。由图 13 可知, 对于光爆孔同平面上的测点, 几乎无 P 波的轨迹, 其作用可忽略, 但 S 与 R 波的运动轨迹非常明显, 说明 S 和 R 波均为重要分量, 且 S 波主要在竖直向振动, 而 R 波对水平向和竖直向的振动均有贡献。

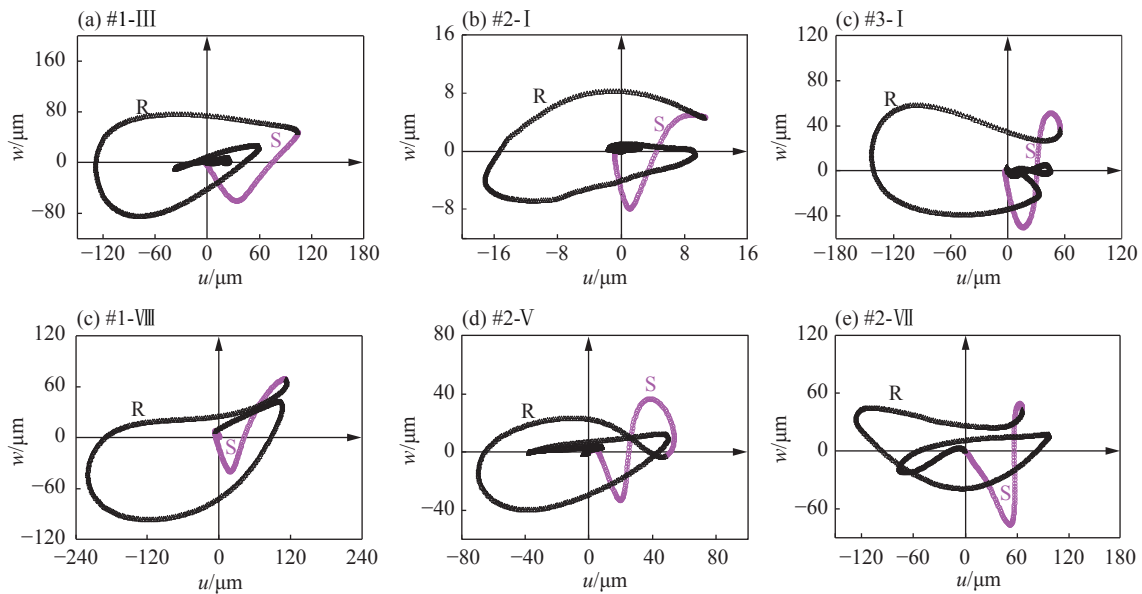


图 13 光爆孔同平面上的典型质点运动轨迹

Fig. 13 Particle motion trajectories of smooth blastholes on the same plane

图 14 为测点 #2 监测到的由第 V 段光爆孔所诱发的爆破振动速度时程, 其中粉色虚线表示 S 与 R 波的分界点, 该分界点与质点运动轨迹 (见图 13(d)) 中拐点出现的时刻相吻合。因 S 与 R 波的波速差异较小, S 波段含有部分初至的 R 波, R 波段也不可避免的包含 S 波的尾波段, 因而图中所做的标记仅代表相应时间段的主导波型。由图 14 可知, 测点 #2 处水平向 S 波的分量较少, 但竖直向 S 波的振速相对较高, 下面将进一步比较 S 和 R 波的影响。

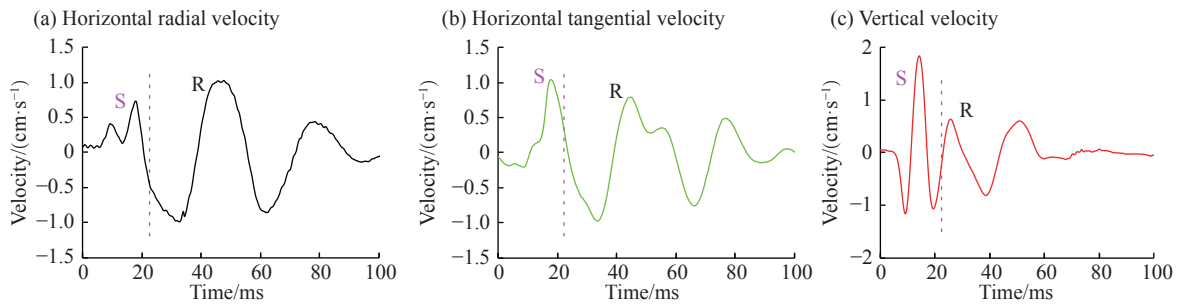


图 14 光爆孔同平面上的典型爆破振动速度

Fig. 14 Blast vibration velocities of smooth blastholes on the same plane

3.2 光爆孔平面外的地震波

图 15 为光爆孔同高程平面以外的测点#4 的典型质点运动轨迹。因测点#4 高于炮孔 3.5 m(上行波, 见图 8), 因而 P 波主要沿着第一、三象限的方向运动, 而 S 波主要沿着第二、四象限的方向运动, R 波仍为逆时针椭圆偏振。受传感器偏斜等因素的影响, P 波的质点运动轨迹并非严格落在第一、三象限, 同样 S 波的质点运动轨迹也并非严格落在第二、四象限, 但质点的运动方位基本可反映不同波的偏振特性, 并不影响对波成分的判别。由图 15 可知, 对于光爆孔平面外的测点, P、S 和 R 波的运动均很明显, P 波的作用不可忽略, 说明爆破地震波的成分构成与测点的相对位置密切相关。

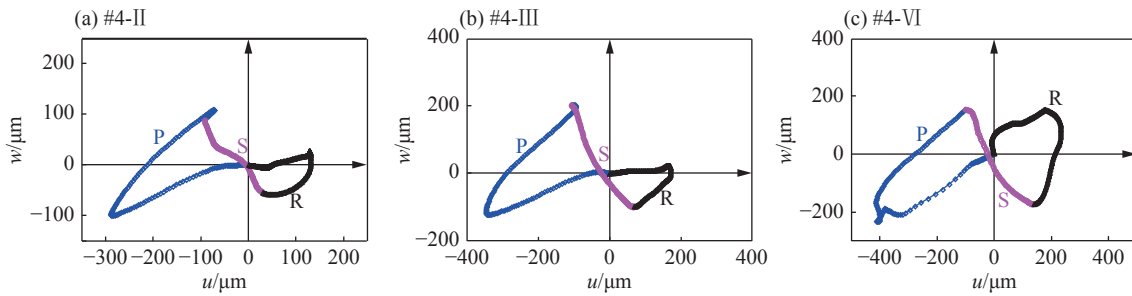


图 15 光爆孔平面外测点的典型质点运动轨迹

Fig. 15 Particle motion trajectories of smooth blastholes outside the same plane

图 16 为测点#4 监测到的由第 II 段光爆孔所诱发的爆破振动时程, 其中蓝色虚线代表 P 与 S 波的分界点, 粉色虚线仍代表 S 与 R 波的分界点。图 16 表明, 测点#4 处 P 波的振速明显高于另外两种波, 而 S 和 R 波的振速相当, 即 P 波在测点#4 处为 3 种波中的优势波。

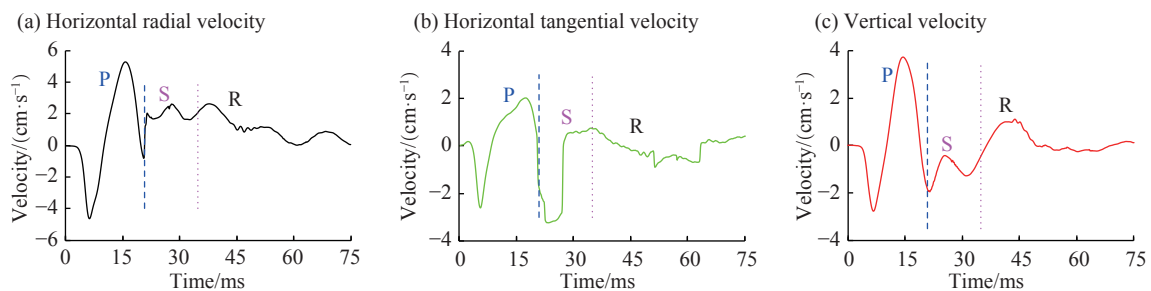


图 16 光爆孔平面外测点的爆破振动速度

Fig. 16 Blast vibration velocities of smooth blastholes outside the same plane

3.3 不同波的衰减特征及影响评价

3.3.1 光爆孔平面上 S 和 R 波的衰减

图 17 为光爆孔同平面上 S 和 R 波的质点峰值振动速度 (PPV) v_p , 并拟合了 PPV 随比例距离 (SD)

d_s 的衰减关系:

$$v_p = K d_s^{-\alpha} \tag{12}$$

式中: K 和 α 分别为与波型及现场地质参数相关的衰减系数。

本次光面爆破分为 8 段, 且在光爆孔平面上布置了 3 个测点, 因此共有 24 组数据可用, 但为获得最佳的拟合曲线, 图 17 已剔除了部分异常值。

由图 17 可知, 对于光爆孔平面上的测点, S 和 R 波对总体振动的影响有很大区别。其中, 水平向 R 波的 PPV 远高于 S 波, 且其衰减速度 α 比 S 波小, 说明水平向的振动主要由 R 波引起; 而对于竖直向的振动, 监测到的 S 波的 PPV 高于 R 波, 但从 PPV 的衰减趋势来推测, R 波的振速在 SD 足够大时仍然会超过 S 波。关于竖直向 R 波的振速超过 S 波的具体位置, 有预测关系式:

$$K_s d_s^{-\alpha_s} = K_r d_s^{-\alpha_r} \tag{13}$$

$$d_s = (K_s / K_r)^{1/(\alpha_s - \alpha_r)} \tag{14}$$

式中: K_s 、 K_r 、 α_s 和 α_r 分别表示对应于 S 和 R 波的衰减系数。将图 17(b) 中拟合所得的衰减参数代入式 (14), 可得 $d_s=22.5 \text{ m/kg}^{1/2}$ (58~67 m, 取单响药量为 6.6~8.8 kg)。

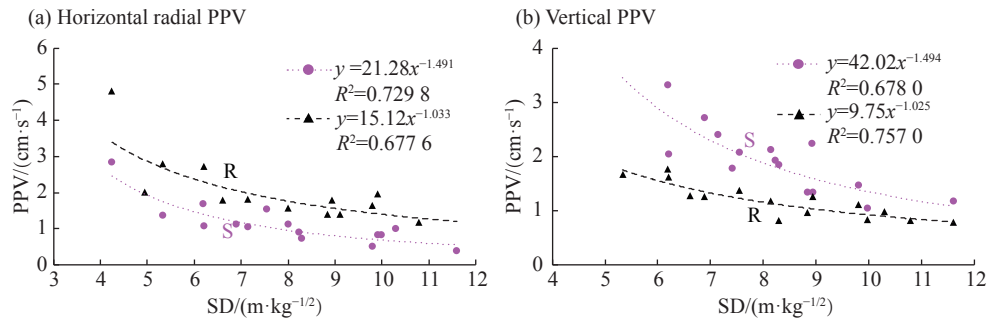


图 17 光爆孔同平面上测点 S 和 R 波 PPV 的比较

Fig. 17 Comparison of PPVs associated with S and R waves of smooth blast-holes on the same plane

3.3.2 光爆孔平面外 P 波的影响评价

为评价光爆孔平面外 P 波的影响, 图 18 为 P 波和另两种波诱发的 PPV, 其中 SR 表示 S 与 R 波的联合作用, 即 S 和 R 波中 PPV 的最大值。因测点#4 距爆区较近, 使得第 VII 和 VIII 段光爆孔诱发的振速超过了仪表量程, 而第 I 段光爆孔诱发的振动时程发生异常, 因而这 3 组数据已被剔除, 即图 18 中共包含 5 组数据。由图 18 可知, 测点#4 处 P 波的 PPV 均高于 S 和 R 波, 即 P 波的影响不可忽略, 且在此处为优势波, 但随水平距离的增大, P 波的 PPV 会低于 S 和 R 波, 说明主导波的类型会随测点位置的变化而发生变化。

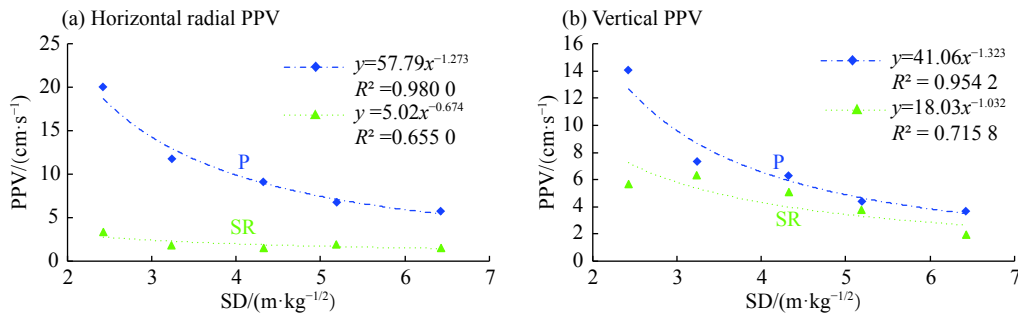


图 18 光爆孔平面外测点 P 波和 SR 波 PPV 的比较

Fig. 18 Comparison of PPVs associated with P and SR waves of smooth blast-holes outside the same plane

3.4 分析与讨论

如图19所示,水平光面爆破可被解读为半无限岩体在垂直荷载和水平小力偶作用下的动力学问题,若忽略水平力偶,则可进一步简化为经典的Lamb问题,即半无限空间下的地震学问题。Lamb解表明^[20],半无限空间在垂直点荷载作用下,P、S和R波各占总能量的7%、26%和67%,但这仅适于全场域能量的分配,而对于某个特定的测点,实验结果表明,不同波的相对量值及主导波的类型均和测点的相对位置密切相关,而未严格遵循7%、26%和67%的能量配比规律。因此,在分析评价爆破地震波的影响时,有必要事先明确测点的相对位置,以初步判定主导波的类型。

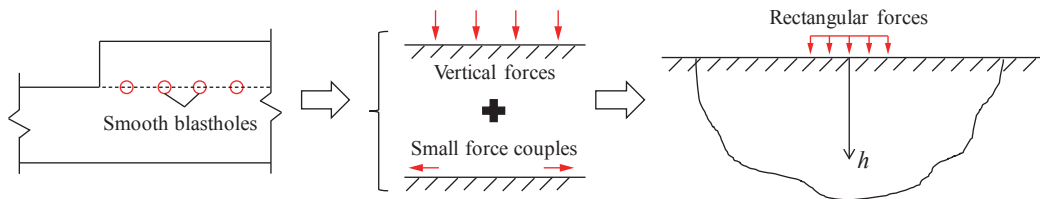


图19 水平光爆的内在力学机理示意图

Fig. 19 Illustration of mechanical mechanism of horizontal smooth blasting

由图19可知:对于光爆孔同平面上的测点,光爆孔的加载主要为剪切源,几乎不包含压缩项;而对于光爆孔平面外的测点,除剪切项,还包含压缩项,若测点离光爆孔平面足够远,则压缩项就会起主导作用。因而P波分量在光爆孔平面上基本可忽略不计,而在光爆孔平面外的特定位置会成为优势波型,即爆源(震源)的特性会对波的成分构成及主导波的类型起决定性作用。

图17表明,对与光爆孔同平面上的竖直向振动,会经历主导波型由S波转为R波的过程,这应归因于S和R波不同的几何衰减。S波为介质内部的三维扩散波,其衰减和距离成反比;而R波主要在二维地表面上传播,其衰减和距离的平方根成反比,因此:S波的几何衰减因子高于R波 $1/2$ ^[20],该差值也与图17中的拟合值相吻合。图17、19综合表明,爆源(震源)的特性和沿传播路径的不同衰减共同决定波的成分构成及演化。此外,图13、15还表明,某测点的优势振动方向与波的成分构成密切相关。综上所述,在爆破振动的预测和控制过程中,有必要结合爆源特性、测点相对位置、衰减特征及演化规律等综合因素,来分析爆破地震波的成分构成及评价不同波的影响。

4 结论

针对白鹤滩水电站坝基开挖过程中的一组现场实验,详细分析了由水平光面爆破激发的地震波成分构成及衰减特征,主要得出如下结论。

(1)爆破振动中不同波的相对量值及主导波的类型均会随测点位置的改变而变化,爆源特性和沿传播路径的不同衰减共同决定波的成分构成及演化,某测点的优势振动方向也与波的成分构成密切相关。

(2)对于水平光爆平面上的测点,P波的作用可忽略不计,且S波主要在竖直向振动,而R波对水平和竖直向的振动均有贡献;而对于水平光爆平面外的测点,P波的作用不可忽略,且其在特定位置会成为优势波型。

(3)关于水平光爆平面上S和R波的不同影响,其中水平向的振动主要由R波引起,而S波的竖直向振速在近区远高于R波,但因S和R波的不同几何衰减,R波于 $22.5 \text{ m/kg}^{1/2}$ (58~67 m)处开始主导竖直向的振动。

本文中,仅初步探索了水平光面爆破激发地震波的特性,为获得更普适的结论,后续还将开展对其他爆源所激发的地震波的研究。另外,文中采用的地震波成分识别方法还不能实现波的完全分离,仍有待于探索更有效的波成分分离方法。

参考文献:

- [1] 卢文波, 赖世襄, 朱传云, 等. 三峡工程岩石基础开挖爆破震动控制安全标准 [J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(1): 67–71.
LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun, et al. Safety standards of blast vibrations adopted in rock base excavation of the Three Gorge Project [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1): 67–71.
- [2] 李海波, 蒋会军, 赵坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1887–1891.
LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO Jian, et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1887–1891.
- [3] 卢文波, 李海波, 陈明, 等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1513–1520.
LU Wenbo, LI Haibo, CHEN Ming, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1513–1520.
- [4] MCGARR A. Estimating ground motions for small nearby earthquakes [C] // *Seismic Design of Embankments and Caverns*. New York: ASCE, 1983: 113–127.
- [5] 吕涛, 石永强, 黄诚, 等. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1871–1878.
LYU Tao, SHI Yongqiang, HUANG Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1871–1878.
- [6] BLAIR D P. Non-linear superposition models of blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(2): 235–247.
- [7] 卢文波, HUSTRULID W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进 [J]. *工程爆破*, 2002, 8(3): 1–4.
LU Wenbo, HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity [J]. *Engineering blasting*, 2002, 8(3): 1–4.
- [8] KHANDELWAL M, SINGH T N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(7): 1214–1222.
- [9] 施建俊, 李庆亚, 张琪, 等. 基于 Matlab 和 BP 神经网络的爆破振动预测系统 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1087–1092. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1087-06.
SHI Jianjun, LI Qingya, ZHANG Qi, et al. Forecast system for blasting vibration velocity peak based on Matlab and BP neural network [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1087–1092. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1087-06.
- [10] SINGH P K, ROY M P. Damage to surface structures due to blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(6): 949–961.
- [11] 周俊汝, 卢文波, 张乐, 等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(11): 2171–2178.
ZHOU Junru, LU Wenbo, ZHANG Le, et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2171–2178.
- [12] 杨建华, 姚池, 卢文波, 等. 深埋隧洞钻爆开挖围岩振动频率特性研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1195–1202.
YANG Jianhua, YAO Chi, LU Wenbo, et al. Vibration frequency characteristics of surrounding rock of deep tunnel induced by borehole-blasting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1195–1202.
- [13] 武旭, 张云鹏, 郭奇峰. 台阶地形爆破振动放大与衰减效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1017–1022. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1017-06.
WU Xu, ZHANG Yunpeng, GUO Qifeng. Amplification and attenuation effect of blasting vibration on step topography [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1017–1022. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1017-06.
- [14] 钟冬望, 何理, 操鹏, 等. 基于精确毫秒延时控制的爆破降振试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 107–112.
ZHONG Dongwang, HE Li, CAO Peng, et al. Experimental study of reducing vibration intensity based on controlled blasting

- with precise time delay [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 107–112.
- [15] 朱俊, 杨建华, 卢文波, 等. 地应力影响下隧洞边墙的爆破振动安全 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(2): 153–160. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0153-08.
ZHU Jun, YANG Jianhua, LU Wenbo, et al. Influences of blasting vibration on the sidewall of underground tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 153–160. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)02-0153-08.
- [16] 冷振东, 卢文波, 胡浩然, 等. 爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1815–1822.
LENG Zhendong, LU Wenbo, HU Haoran, et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1815–1822.
- [17] 高启栋, 卢文波, 冷振东, 等. 隧洞开挖过程中掏槽孔起爆位置的优选 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(9): 8–16.
GAO Qidong, LU Wenbo, LENG Zhendong, et al. Optimization of cut-hole detonator position in tunnel excavation [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 37(9): 8–16.
- [18] DOWDING C H. *Construction vibrations* [M]. NJ: Prentice Hall, 1996.
- [19] FAVREAU R F. Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(17): 4267–4280.
- [20] GRAFF K F. *Wave motion in elastic solid* [M]. Oxford University Press, 1975.
- [21] HEELAN P A. Radiation from a cylindrical source of finite length [J]. *Geophysics*, 1953, 18(3): 685.
- [22] BLAIR D P. Seismic radiation from an explosive column [J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): 55–65.
- [23] FRÉDÉRIC V, ENRIQUE P C, LUIS A Q. P and S Mach waves generated by the detonation of a cylindrical explosive charge: experiments and simulations [J]. *Fragblast*, 2002, 6(1): 21–35.
- [24] AKI K, RICHARDS P G. *Quantitative Seismology* [M]. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books, 2002.
- [25] 阿肯巴赫. 弹性固体中波的传播 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [26] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [27] GAO Qidong, LU Wenbo, HU Yingguo, et al. An evaluation of numerical approaches for S-wave component simulation in rock blasting [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(5): 830–842.
- [28] 金旭浩, 卢文波, 田勇, 等. 岩石爆破过程 S 波的产生机制分析 [J]. *岩土力学*, 2011(S2): 228–232.
JIN Xuhao, LU Wenbo, TIAN Yong, et al. Analysis of mechanisms of S wave generated in rock blasting process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011(S2): 228–232.
- [29] 胡英国, 卢文波, 高启栋, 等. 不同爆破模拟方法下 S 波产生机制的比较 [J]. *爆破*, 2015, 32(3): 10–16.
HU Yingguo, LU Wenbo, GAO Qidong, et al. Comparison of generation of S-wave with different simulation approach [J]. *Blasting*, 2015, 32(3): 10–16.
- [30] 杨招伟, 卢文波, 高启栋, 等. 爆破地震波中 S 波识别方法及其应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 28–36. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0178.
YANG Zhaowei, LU Wenbo, GAO Qidong, et al. A S-wave phase picking method for blasting seismic waves and its application in engineering [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 28–36. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0178.
- [31] KUZMENKO A A, VOROBEV V D, DENISYUK I I, et al. Seismic effects of blasting in rock [M]. 1993: 16–22.
- [32] FOTI S, LAI C, RIX G, et al. *Surface wave methods for near-surface characterization* [M]. Boca Raton, FL, Crossref: CRC Press, 2014.
- [33] 郑治真, 朱传镇, 胡祚春. 爆破与地震的差异 [J]. *地球物理学报*, 1975, 18(3): 208–216.
ZHENG Zhizhen, ZHU Chuanzhen, HU Zuochun. Differences between explosions and earthquakes [J]. *Chinese journal of geophysics*, 1975, 18(3): 208–216.

Components and attenuation of seismic waves induced by horizontal smooth blasting

GAO Qidong^{1,2}, LU Wenbo^{1,2}, YANG Zhaowei^{1,2}, YAN Peng^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,*

Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering (Ministry of Education),*

Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: In this paper, using polarization analysis, we characterized the seismic waves induced by the horizontal smooth blasting in a group of onsite blasting experiments, presenting interpretation of wave components and offering comparison of attenuation characteristics and evaluation of the influences of different waves. We also examined the inherent mechanical mechanism of the horizontal smooth blasting under some simplifications. The results show that the proportion of different waves and the dominant wave type both vary with the relative location of interest, and the dominant motion direction at a specific position closely correlates with the wave components. The pattern of the blasting source and the different attenuation characteristics jointly determine the wave components and their evolutions. For the horizontal smooth blasting, only S and R waves are included on the same plane of smooth blastholes, while the P wave component is negligible. The horizontal vibration is mainly caused by the R wave, while the S wave mainly vibrates in the vertical direction and its vertical velocity in the near field is much higher than that of the R wave. However, the R wave still dominates the vertical vibration if the scaled distance exceeds $22.5 \text{ m/kg}^{1/2}$ (58–67 m), due to the different attenuation speeds of S and R waves. As for the seismic waves outside the same plane of smooth blastholes, the influence of the P wave cannot be ignored and it might become the dominant wave type somewhere. This study can help to enhance the understanding of blast-induced seismic waves.

Keywords: horizontal smooth blasting; blast vibration; blast-induced seismic waves; components; attenuation characteristics

(责任编辑 丁 峰)