

# 垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及演化规律

高启栋<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>1,2</sup>, 杨招伟<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 严鹏<sup>1,2</sup>

(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:** 明确爆破振动中波的成分构成及不同波的作用有助于更好地预测与控制爆破振动。针对一组垂直单孔爆破试验, 借助地震学中极化偏振分析的方法, 研究垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及其演化规律, 最后基于试验结果, 提出波影响作用分区概念, 并分析各区域主导波的类型。结果表明, 爆破振动中各种波的相对量值并非定值, 主导波的类型会随波成分的演化发生改变, 且某点的优势振动方向也与波的成分构成密切相关。对于垂直孔爆破, P 波在近、远区均为重要成分, 且其主要作用于水平向的振动; S 波仅为近区( $r < 2.3h$ ,  $r$  为到炮孔轴线的距离,  $h$  为药包的埋深)的主导波, 其在远区的作用可忽略; R 波逐渐成长发育, 于  $r = 5h$  处发育明显, 且在  $r = (43 \sim 45)h$  后主导垂直向的振动。爆破振动中波成分的演化有其自身特性, 地震学中的常规认识并非全适用于爆破振动。

**关键词:** 爆破振动; 垂直孔爆破; 爆破地震波; 成分构成; 演化规律

**中图分类号:** O 38

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)01 - 0018 - 10

## Components and evolution laws of seismic waves induced by vertical-hole blasting

GAO Qidong<sup>1,2</sup>, LU Wenbo<sup>1,2</sup>, YANG Zhaowei<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, YAN Peng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** To make clear the wave components in the blast vibration and their influences is of great significance to the control of the blast vibration. Aided by the approach of the polarization analysis in seismology, the components and evolution laws of seismic waves induced by the vertical-hole blasting were investigated based on single-hole blasting experiments. The concept of the partition of the wave influence area was put forward, and the dominant wave type at different areas was investigated. Results indicate that the proportion of different wave components is not a constant, that the dominant wave type changes with the evolution of wave components and that the dominant vibration direction closely correlates to the wave components. For the vertical-hole blasting, the P-wave is a significant component both in the near and far fields and mainly contributes to the horizontal vibration. The S-wave only dominates the vibration within  $r = 2.3h$  ( $r$  is the distance to the blast-hole axis and  $h$  is the buried depth of the explosive), and its effect in the far field can be negligible. The R-wave grows gradually with increasing  $r$  and develops to be identifiable at  $r = 5h$ . While  $r$  exceeds  $(43 - 45)h$ , the R-wave dominates the vertical vibration. The evolution of seismic waves induced by blasting has its own characteristics and the common

**收稿日期:** 2018 - 07 - 17; **修回日期:** 2018 - 09 - 27

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

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51779190) and Major Program of Technological Innovation of Hubei Province(Grant No. 2017ACA102)

**作者简介:** 高启栋(1991 -), 男, 2014年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的研究工作。E-mail: qdgao@whu.edu.cn。通讯作者: 卢文波(1968 -), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: wblu@whu.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0824

sense in the earthquake is not always applicable to the blast vibration.

**Key words:** blasting vibration; vertical-hole blasting; blast-induced seismic waves; components; evolution laws

## 1 引言

爆破作为一种经济、高效的施工技术手段, 已被广泛应用于岩石的开挖或开采中, 但岩石爆破过程中所诱发的爆破振动会不可避免地对临近建(构)筑物或周边居民与民用设施造成负面影响<sup>[1-4]</sup>。因此, 对爆破振动的预测、评价和控制历来是科研及工程人员所关注的热点问题。

关于爆破诱发的振动响应, 通常用质点峰值振动速度(*PPV*)、振动频率(*f*)和持续时间(*T*)3 个参数来描述<sup>[5]</sup>。工程实践已表明, 结构的破坏与 *PPV* 具有较好的相关性<sup>[6]</sup>, 故而对 *PPV* 预测的研究从未间断, 有基于比例药量的经验预测公式, 如广泛采用的萨氏立方根公式<sup>[7-8]</sup>和美国垦物局提出的平方根公式<sup>[9]</sup>; 也有基于子波理论的预测方法, 如 D. P. Blair 等<sup>[10-11]</sup>的研究; 以及多样的神经网络预测方法<sup>[12-13]</sup>。因结构的响应还与频率密切相关<sup>[14]</sup>, 也有不少对爆破振动频谱特性的研究<sup>[15-17]</sup>, 同时, 主流规范也已普遍采用频率相关的 *PPV* 判据<sup>[18]</sup>。地表爆破振动是体波(压缩波和剪切波, 即 P 波和 S 波)和面波(Rayleigh 波, R 波)综合作用的结果<sup>[19]</sup>, 但当前的爆破振动安全判据并未对波型加以区分<sup>[20]</sup>。不同类型的波具有不同的运动或传播特性, 也势必会引起结构不同的响应或破坏模式, 因而在爆破振动的预测或评价中有必要将波的类型考虑在内。

已有的研究多聚焦于爆源所激发的波, 如 R. F. Favreau<sup>[21]</sup>推导了球形空腔的应力解, 结果表明球药包仅激发 P 波; K. F. Graff<sup>[22]</sup>在无限爆轰假定下, 证明了无限长柱药包仅激发 P 波; 但 Heelan 解证明短柱状药包可同时激发 P, S 波<sup>[23]</sup>; D. P. Blair 等<sup>[24-26]</sup>通过理论计算或现场试验发现, 延长药包也可同时激发 P, S 波。此外, 金旭浩等<sup>[27]</sup>还分析了爆破过程中 S 波的形成机制; Q. D. Gao 等<sup>[28-29]</sup>比较评价了爆破地震波的不同模拟方法; 杨招伟等<sup>[30]</sup>研究了爆破过程中 S 波初至时刻的识别。

前人的研究虽解释了爆破振动中不同波的形成过程, 但特定位置处各种波的权重或占比, 即爆破振动中波的成分构成与演化, 以及不同波对爆破振动的总体贡献尚不明确。现有对不同波影响作用的评价, 仍停留在地震学的常规认知水平上, 事实上,

爆破与天然地震在震源机制和距离尺度上有较大差别, 爆破振动中波成分的演化应有其自身特性。本文以垂直孔的爆破为例(见图 1), 针对一组垂直单孔爆破试验, 借用地震学中极化偏振分析的方法, 研究了爆破地震波的成分构成及演化规律, 并基于试验结果和 Heelan 解<sup>[23]</sup>的分析, 提出了波影响作用分区的概念, 分析了不同区域主导波的类型。该研究有助于加深对爆破地震波的认识, 为从波型分析的角度来预测与控制爆破振动提供了可能性。

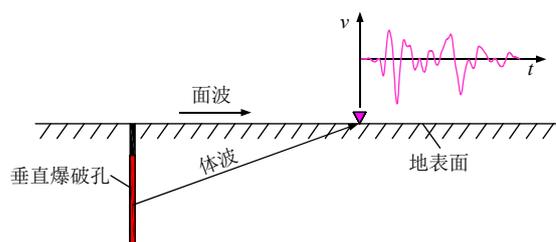


图 1 垂直孔爆破过程中波的传播示意图

Fig.1 Wave propagation in the vertical-hole blasting

## 2 爆破地震波成分的判别

### 2.1 爆破地震波的分类与特征

岩石爆破过程中, 有一部分爆炸能量会以波的形式向外传播, 形成爆破地震波, 按波传播路径的不同, 其可分为体波和面波 2 种。体波在岩体内部传播, 又可分为纵波(压缩波, P 波)和横波(剪切波, S 波), 其中 P 波的质点运动方向与波的传播路径一致, 而 S 波的质点运动方向垂直于波的传播路径。根据偏振方向的不同, S 波又可细分为 SV 和 SH 两种波。面波是一类沿着地表自由面或介质界面传播的波, 主要包括 Rayleigh 波(R 波)和 Love 波(Q 波)两种。R 波通常被认为是一对耦合的非均匀 P 波和 SV 波<sup>[31]</sup>沿自由表面的传播, 其在地表的质点运动轨迹为逆时针椭圆。Q 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。因爆破过程中所形成的 SH 波较少<sup>[32]</sup>, 故本文主要研究 P, SV 和 R 三种波, 图 2 示意了这 3 种波的偏振特性<sup>[22-33]</sup>。

除偏振特性的差别外, 不同波的传播速度也有很大差异。依据弹性波理论<sup>[34]</sup>, 可由下式分别得到 P 和 S 波的波速:

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

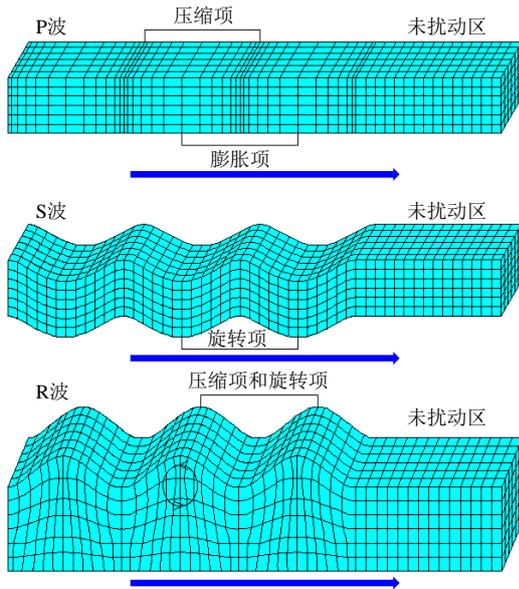


图2 不同波的偏振特性示意图<sup>[22-33]</sup>

Fig.2 Polarization characteristics of various waves<sup>[22-33]</sup>

$$C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中： $C_p$  和  $C_s$  分别为 P 和 S 波的传播速度， $\lambda$  为体积模量， $\mu$  为剪切模量， $\rho$  为介质的密度。而 R 波的传播速度  $C_R$  可由下式近似得到

$$C_R \approx \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} C_s \quad (3)$$

式中： $\nu$  为介质泊松比。对于大多岩石而言，泊松比接近于 0.25，则波速满足  $C_p = \sqrt{3}C_s$  和  $C_R \approx 0.92C_s$ 。因此，P 波是这 3 种波中最快的，S 波次之，R 波的波速略低于 S 波。

## 2.2 基于极化偏振分析的波成分判别

### 2.2.1 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 2 个方面。因此，可基于地震学中的极化偏振分析来判别爆破地震波的成分构成。在判别过程中，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。对于上行波，即爆源位于测点下方，P 波沿第一、三象限的方向运动，而 S 波沿第二、四象限的方向运动，故 P 波在水平和竖直向振动的相位同步，而 S 波的相位相反；对于下行波，即爆源位于测点上方，P 波沿第二、四象限的方向运动，而 S 波沿第一、三象限的方向运动，则 P 波在水平和竖直向振动的相位相反，而 S 波的相位同步。由图 3 可以看出，上行波情况下，P 和 S 波的偏振方向及相位差异，下行波的情况则正好相反。

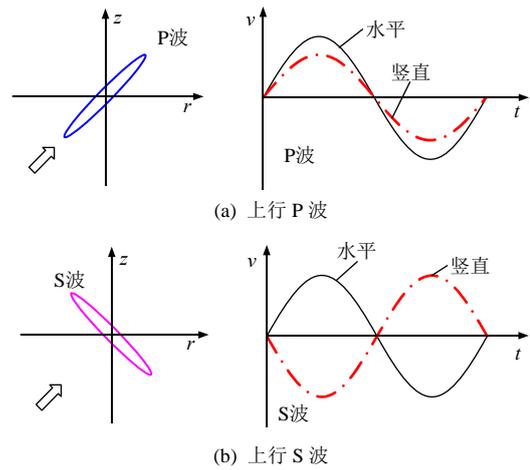
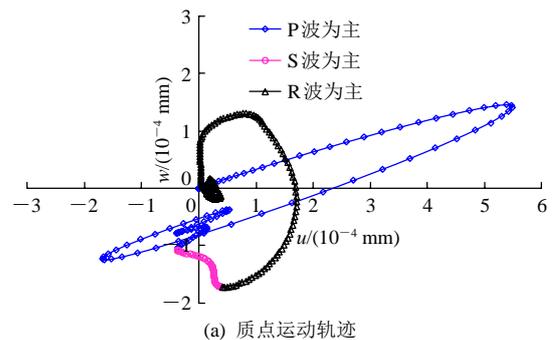


图3 上行波的偏振方向及相位差异示意图

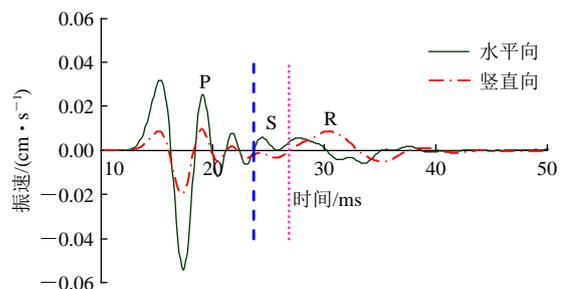
Fig.3 Illustration of the polarization direction and phase differences for up-going waves

### 2.2.2 波成分判别的方法

综上所述，一方面可通过分析质点运动轨迹的特征来判别实测爆破振动中波的成分构成；另一方面，还可通过比较水平与竖直向的振动相位差来识别不同波的到达时刻。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和振动波形的相位差均会随不同波的到达而发生变化。图 4 给出了某一垂直孔爆破对应的地表质点运动轨迹和相应的爆破振动速度波形示意图，其中， $u$  和  $w$  分别为水平和竖直向位移。因质点运动轨迹也是按时序点绘的，故轨迹中的拐点(表征不同波的到达)与波形中相位差的变化点在时间上是一一对应的。



(a) 质点运动轨迹



(b) 爆破振动波形

图4 波成分判别的示意

Fig.4 Illustration of the identification of wave components

### 2.2.3 波成分判别的流程

概括起来，前面所述爆破地震波的成分判别包括如下几个方面：(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) 获得质点运动轨迹，通过分析质点运动轨迹的特征判别波的成分构成；(3) 获得爆破振动波形，通过分析水平和竖直向爆破振动波形的相位差来识别不同波的到达时刻；(4) 校验核对及给出分析结果。图 5 给出了爆破地震波成分判别的流程。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点绘质点运动轨迹。

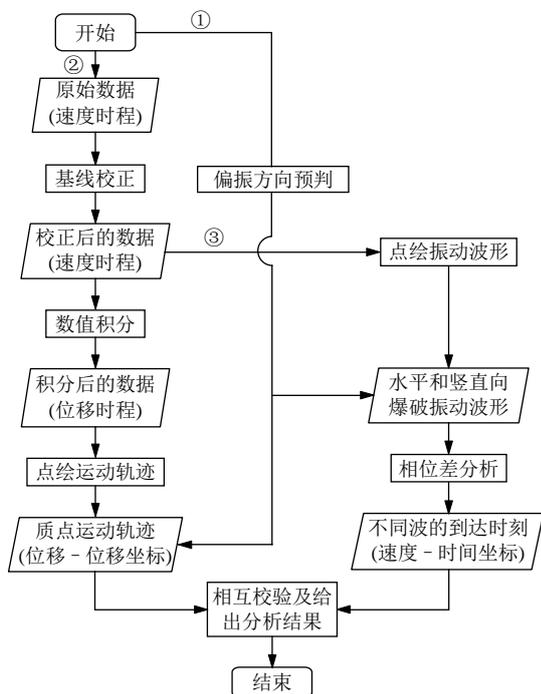


图 5 爆破地震波成分判别流程

Fig.5 Flow chart of the discrimination of wave components induced by blasting

## 3 垂直单孔爆破试验

### 3.1 试验地址

丰宁抽水蓄能电站位于河北省丰宁满族自治县境内，规划装机容量 3 600 MW，电站分两期开发。为研究垂直孔爆破诱发地震波的成分及特性，于电站二期建设过程中某条探洞的底板开展了单孔爆破试验，图 6 为试验场地。

### 3.2 爆破设计及测点布置

在探洞底板共布置了 6 个垂直炮孔，孔间均采用半秒雷管间隔，按炮孔 I→II→III→IV→V→VI 的顺序逐孔起爆，并由近及远在探洞底板布置了 9 个



(a) 丰宁探洞



(b) 试验位置

图 6 试验场地

Fig.6 Site description

爆破振动监测点，炮孔及测点的平面布置如图 7 所示。详尽的钻孔装药参数见表 1，装药结构如图 8 所示。振动传感器为三轴传感器，可同时监测水平径向、水平切向及竖直向的振动速度，采用成都中科测控生产的记录仪 TC-4850 来记录振动时程。图 9 为监测到的典型爆破振动速度时程，其中包括 6 段独立的信号，且在时间轴上未见相互叠加，它们分别表示由 6 个单独炮孔所诱发的爆破振动。需要说明的是，本次研究仅分析了炮孔 II，IV 和 VI 诱发的振动，因这 3 个炮孔的装药结构类似，只有药量和药包埋深  $h$  不同，它们的埋深依次为 5.00，4.00 和 3.15 m。为下文叙述方便，以  $1^{\#}-II$  的方式表示  $1^{\#}$  测点处由炮孔 II 诱发的爆破振动。

### 3.3 试验结果

#### 3.3.1 波成分构成分析

图 10 为 2 个典型测点处的质点运动轨迹和爆破振动波形，图 11 给出了不同距离处其他几个典型的质点运动轨迹，其中， $r$  为地表测点到炮孔轴线的距离。由图 10 可知，垂直孔爆破过程中，地表爆破振动中同时包含 P，S 和 R 三种波。因测点的位置均高于爆源，故 P 波沿第一、三象限的方向运动，其水平和竖直向的振动相位相同；S 波沿第二、四象限的方向运动，其水平和竖直向的振动相位相反；而 R 波的运动轨迹为逆时针椭圆，其水平和竖直向

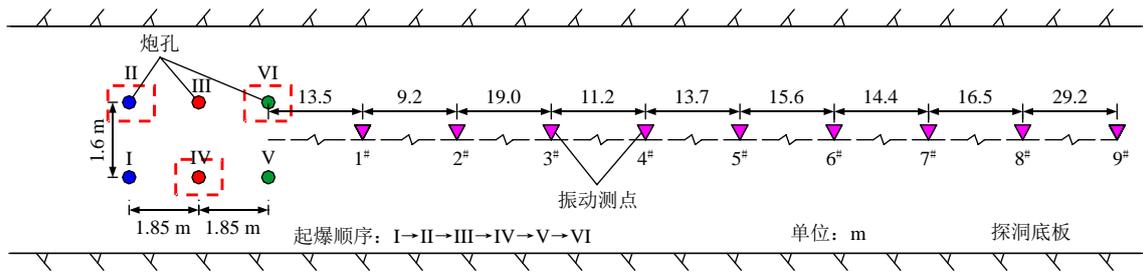


图7 炮孔及振动测点布置示意图

Fig.7 Layout of the blast-holes and vibration monitoring points

表1 钻孔装药参数

Table 1 Drilling and blasting parameters

孔号	起爆位置	孔径/mm	孔深/m	药径/mm	药长/m	药重/kg	堵塞/m	药包埋深 $h/m$
I	上/底部	76	8.0	50	6.0	12.0	2.0	5.0
II	底部	76	8.0	50	6.0	12.0	2.0	5.0
III	中点	76	6.0	50	4.2	8.4	1.8	4.0
IV	底部	76	6.0	50	4.2	8.4	1.8	4.0
V	中点	76	4.5	50	2.7	5.4	1.8	3.15
VI	底部	76	4.5	50	2.7	5.4	1.8	3.15

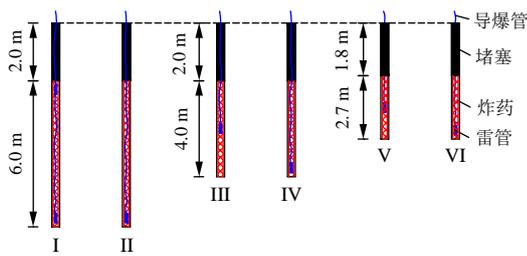


图8 装药结构示意图

Fig.8 Charging structures

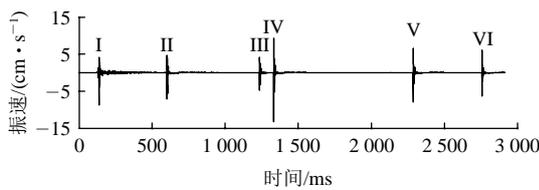


图9 实测典型爆破振速历程

Fig.9 Typical blast vibration velocity time-histories

的振动相位相差 1/4 周期。由图 11 可知，3 种波的

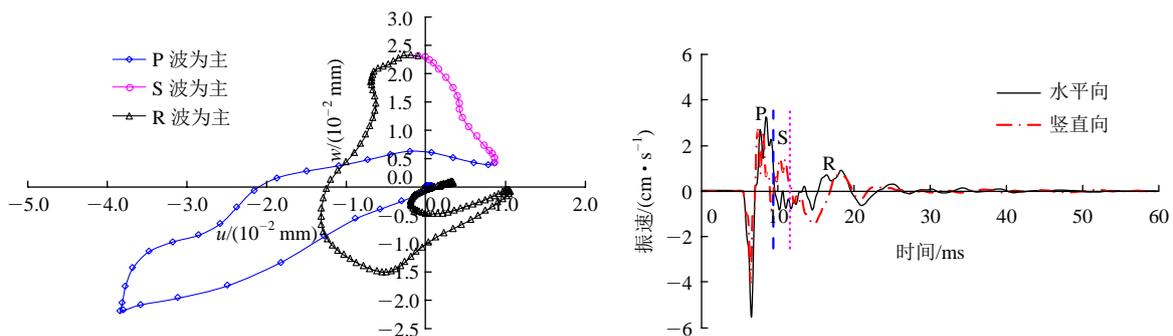
运动特性和相对量值有很大差异，其中 P 波的运动主要在于水平向；S 波易被紧随其后的 R 波淹没，且实测的爆破振动中 S 波的作用比较微弱；R 波逐渐成长发育，且其竖直向的振动优于水平向。

### 3.3.2 P 和 R 波的演化

图 12 为由炮孔 II, IV, VI 诱发的 P 和 R 波的质点峰值振动速度( $PPV$ )随距离的演化，其中， $PPV_P$ ,  $PPV_R$  分别表示由 P, R 波诱发的  $PPV$ 。因监测到的 S 波相对于 P, R 波可忽略，故此处未分析 S 波的演化。各孔内药包的埋深  $h$  不同，为便于统一评价，按指数关系式拟合了  $PPV$  与归一化距离  $r/h$  的关系曲线如下：

$$PPV = K(r/h)^{-\alpha} \quad (4)$$

式中： $K$  和  $\alpha$  为与波型及现场地质条件相关的衰减参数。由图 12 可知，对于水平径向和水平切向的振动，P 波的振速均高于 R 波，且二者的衰减速度  $\alpha$  差



(a) 2# - II,  $r = 5.3h$

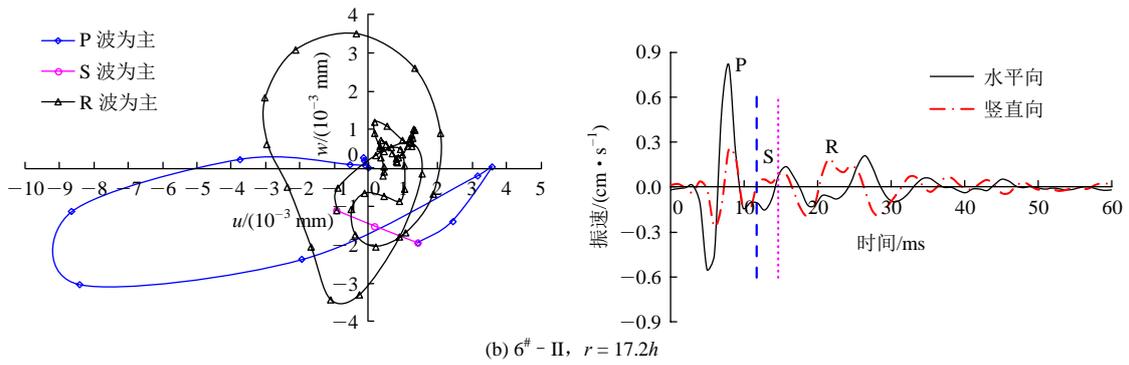


图 10 典型测点爆破地震波成分解读

Fig.10 Components interpretation of blast-induced seismic waves at typical observation points

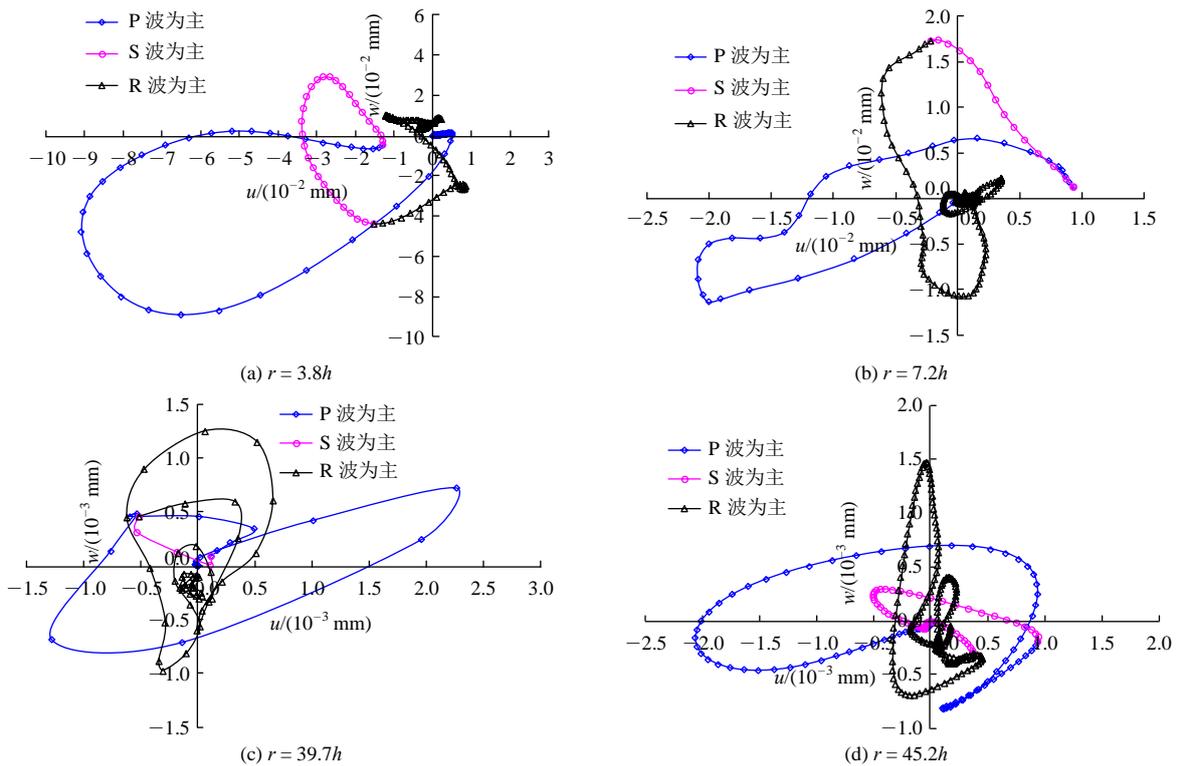
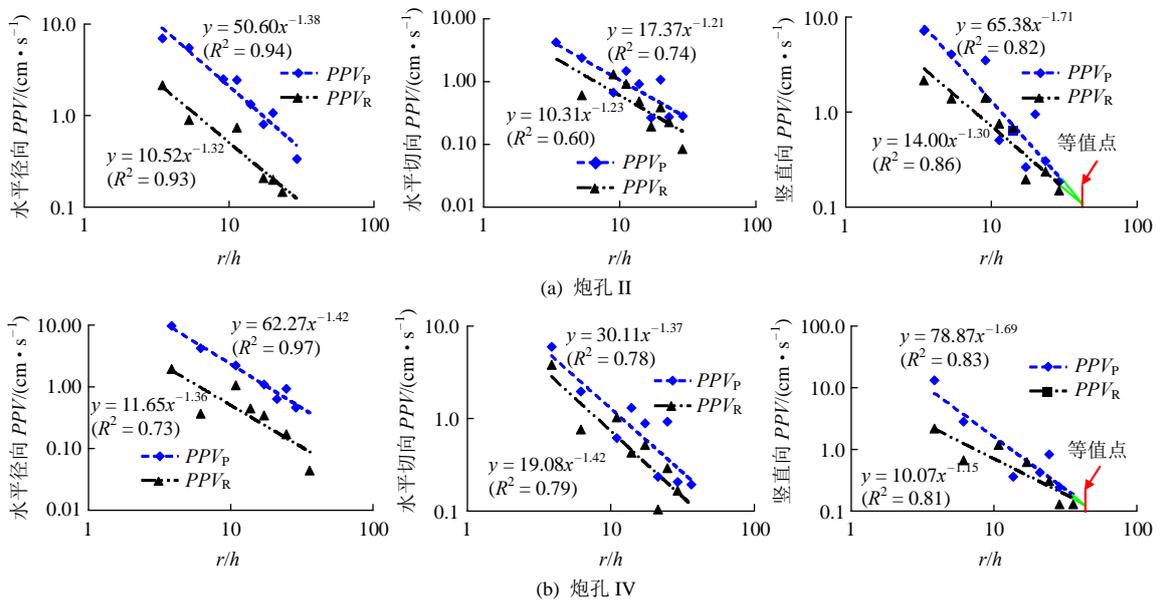


图 11 典型质点运动轨迹

Fig.11 Typical particle motion trajectories



(b) 炮孔 IV

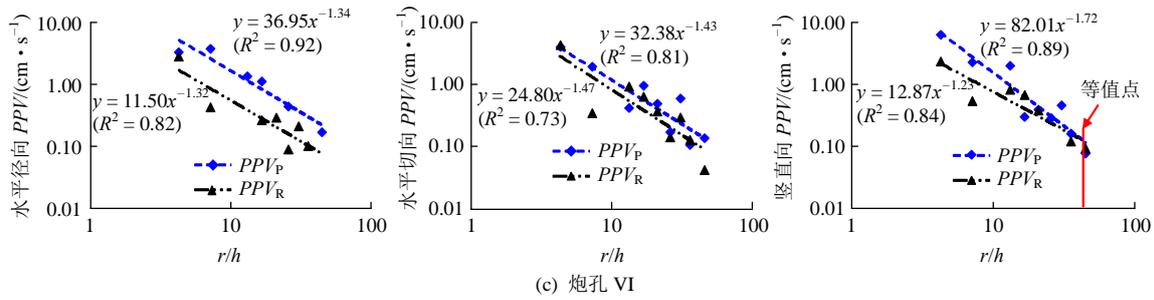


图 12 P 和 R 波随距离的演化  
Fig.12 Evolution of P and R waves versus distance

异较小，说明 P 波在近、远区均为重要成分，并主导水平向的振动；但对于竖直向的振动，R 波的衰减速度比 P 波小 0.41~0.54，即 R 波在远区会主导竖直向的运动，图 13 也给出了竖直向振速比  $PPV_R/PPV_P$  随距离的演化，显然其随  $r/h$  递增。

为预测等值点的位置(即竖直向 R 波的振速开始超过 P 波的位置)，可通过求解下式：

$$K_P(r/h)^{-\alpha_P} = K_R(r/h)^{-\alpha_R} \quad (5)$$

得到的预测公式如下：

$$(r/h) = (K_P / K_R)^{1/(\alpha_P - \alpha_R)} \quad (6)$$

式中： $K_P$ 、 $\alpha_P$ 、 $K_R$  和  $\alpha_R$  分别为对应于 P、R 波的衰减参数。将拟合所得的衰减参数代入式(6)，可得等值点的位置为  $r = (43 \sim 45)h$ ，如图 12 所示。综上所述，不同波的演化规律有很大差别，各种波的相对量值并非定值，主导波的类型会随波的演化发生改变。

### 3.3.3 $PPV_H/PPV_V$ 的演化

图 14 为 P 和 R 波水平向和竖直向振速比  $PPV_H/PPV_V$  随距离的演化。由图 14 可知，P 波的振速比  $PPV_H/PPV_V$  随  $r/h$  递增，表明 P 波的运动逐渐向水平方向偏转，即 P 波在远区将主要作用于水平向的振动；而 R 波的振速  $PPV_H/PPV_V$  逐渐减小，最后趋于稳定，即 R 波充分发育后，其竖直向的振动优于水平向，这也符合 R 波在地表的运动特性。由此可见，各种波的优势振动方向有很大差别，某点的优势振动方向与该点波的成分构成密切相关。

## 4 爆破地震波作用分区的探讨

### 4.1 P 和 S 波的演化

Heelan 解<sup>[23]</sup>表明，P 和 S 波均为短柱药包的源辐射波，且均沿特定的方位辐射(见图 15)，其中，P

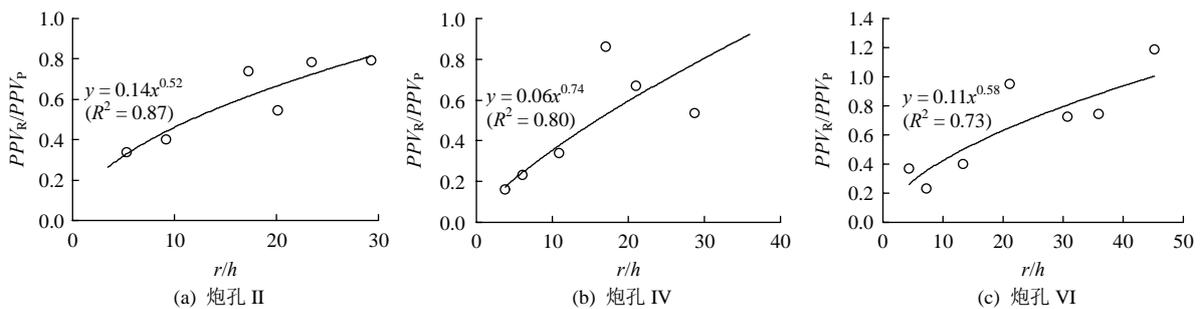


图 13 竖直向  $PPV_R/PPV_P$  随距离的演化

Fig.13 Evolution of the vertical  $PPV_R/PPV_P$  versus distance

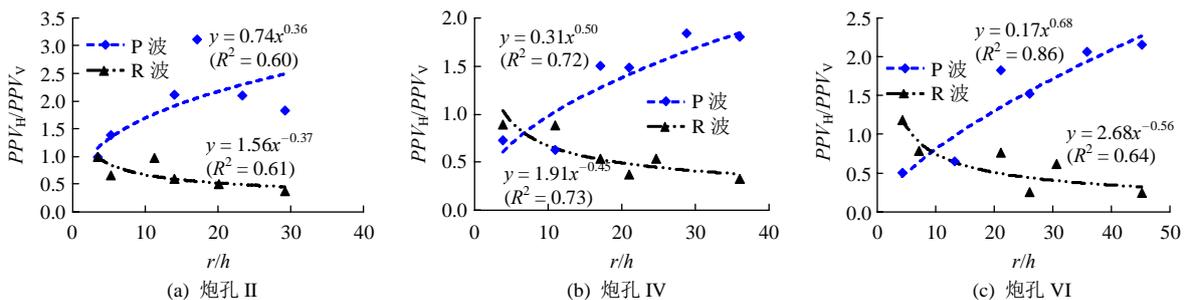


图 14  $PPV_H/PPV_V$  随距离的演化

Fig.14 Evolution of  $PPV_H/PPV_V$  versus distance

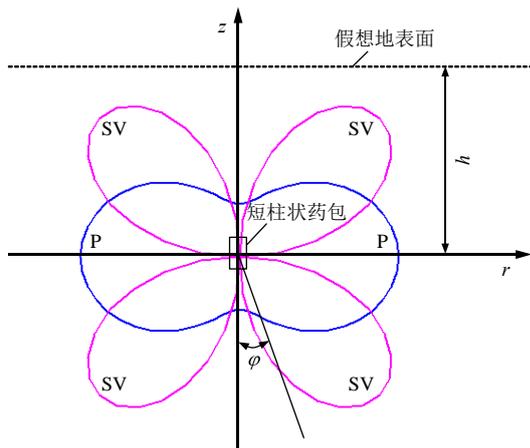


图 15 短柱状药包的源辐射模式

Fig.15 Source radiation pattern of the short explosive column

波的优势方位为药包径向，而 S 波的优势方位与药包轴线成 45° 角。充填于孔内的长柱状药包的应力解可看作是短药包解沿轴线方向的叠加，因此垂直孔爆破过程中，P 和 S 波的演化可从短药包源辐射的角度来分析。Heelan 解<sup>[23]</sup>中表征 P、S 波的源函数如下：

$$F_1(\varphi) = \frac{\Delta}{4\pi\mu V_P} \left( 1 - \frac{2V_S^2}{V_P^2} \cos^2 \varphi \right) \quad (7)$$

$$F_2(\varphi) = \frac{\Delta}{4\pi\mu V_S} \sin(2\varphi) \quad (8)$$

式中：Δ 为短柱空腔的体积，φ 为辐射角。

图 16 为 P、S 波的源函数  $F_1(\varphi)$  和  $F_2(\varphi)$  随  $r/h$  的演化。由图 16 可知，S 波的幅值在  $r = h$  (45° 角) 时达到峰值，当  $r > h$  时，其幅值迅速减小，S 波仅在近区 ( $r < 2.3h$ ) 的幅值高于 P 波，其在远区的幅值可忽略不计，而 P 波的相对幅值随  $r/h$  逐渐增大，最后趋于 1。这是因为随  $r/h$  的增大，测点趋近于 P 波的优势辐射方位(即药包径向)，而偏离 S 波的优势辐射方位，故 P、S 波随  $r/h$  演化的差异应归因于药包的源辐射模式。

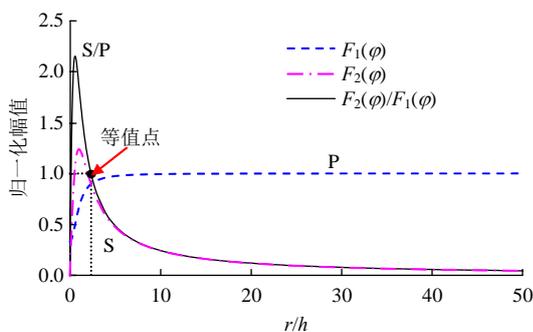


图 16 P 和 S 波的演化

Fig.16 Evolution of P and S waves

### 4.2 R 波的形成

R 波是由曲面体波(P、S 波)在自由表面的反射形成<sup>[31、35]</sup>，相对于 P、S 波，其为次生波源。对于埋藏震源，R 波并非形成于震中，而是随  $r$  逐渐成长发育，K. Aki 等<sup>[31、35]</sup>从数学上估算了 R 波的初始形成位置，如下所示：

$$\tan i_c = \frac{r_1}{h} \geq \frac{C_R}{\sqrt{C_P^2 - C_R^2}} \quad (\text{P 波源}) \quad (9)$$

$$\tan i_c = \frac{r_1}{h} \geq \frac{C_R}{\sqrt{C_S^2 - C_R^2}} \quad (\text{S 波源}) \quad (10)$$

同时 K. Aki 和 P. G. Richards<sup>[31]</sup>也估算了 R 波发育充分(可被明显识别)的位置，如下式：

$$\tan j_c = \frac{r_2}{h} > \sqrt{\frac{2C_R}{C_S - C_R}} \quad (11)$$

式(9)~(11)中： $i_c$  为 R 波开始形成的临界入射角， $j_c$  为 R 波可被明显识别的临界入射角， $r_1$  和  $r_2$  分别对应于  $i_c$  和  $j_c$  的震中距。对大多数岩石而言，满足  $C_P = \sqrt{3}C_S$  和  $C_R \approx 0.92C_S$ ，则  $r_1 \approx 0.6h$ ， $r_2 \approx 5h$ 。垂直单孔试验结果(见图 10 和 11)也表明，当  $r < 5h$  时，质点运动轨迹中的 R 波还不够明显，而当  $r > 5h$  时，R 波的运动易于被识别，与图 17 的预测结果一致。

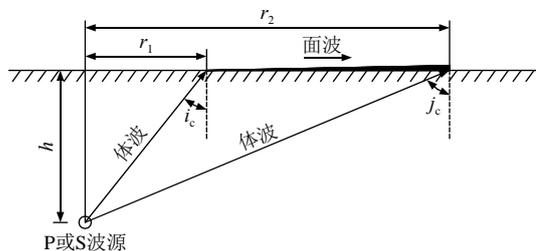


图 17 R 波的形成范围示意图

Fig.17 Generation range of R wave

### 4.3 波影响作用区的划分

根据单孔爆破试验中对 P 和 R 波的演化分析(见图 12 和 13)，以及基于 Heelan 解对 P 和 S 波的演化分析(见图 16)，图 18 以 P 波的幅值为基准，统一给出了 P、S 和 R 波随距离  $r$  的演化。由此可对各种波的影响作用区做如下划分：(1) 当  $r < 2.3h$  时，S 波为主导波型；(2) 当  $2.3h < r < (43 \sim 45)h$  时，P 波为主导波型；(3) 当  $r > (43 \sim 45)h$  时，R 波主导垂直向的振动。换言之，P 波在近远区均为重要成分，且其主要作用于水平向的振动；S 波仅在近区起主导作用，当 R 波充分发育时，其作用可忽略不计；R 波逐渐成长发育，于  $r = 5h$  处发育明显，且其垂直向的振动优于水平向。

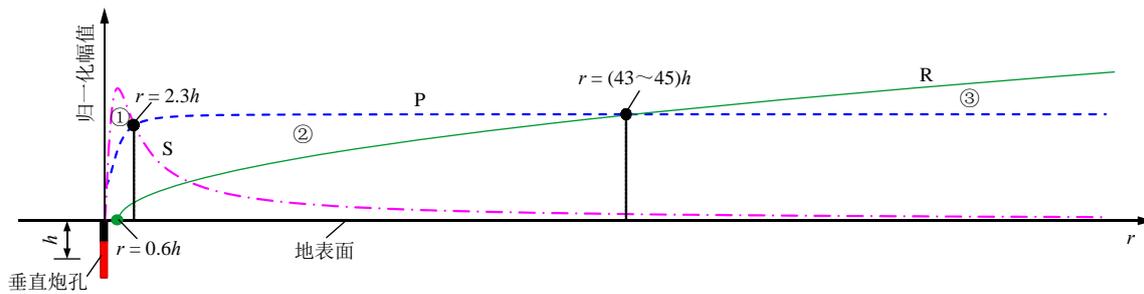


图 18 各种波影响作用区的划分

Fig.18 Partition of the influence areas of various waves

### 4.4 讨论

图 18 表明，在垂直孔爆破中，P 波为不容忽视的重要成分，且其优势运动方向为水平向，故 P 波对地表建筑(结构)的安全构成很大威胁，然而这与地震学的常规认识不同，因在地震领域中，P 波的作用通常被忽略，而主要聚焦于 S 和 R 波的影响。这主要归因于爆破与天然地震在震源机制和距离尺度两方面的差异。地震源主要为剪切源，且其埋深远比常规爆源大，可以达到 km 级；而爆破源主要为膨胀源，且爆破过程中需关注的建筑(结构)距爆源通常只有几十到几百米。因此，爆破振动中波成分的演化有其自身特性，地震学中的常规认识并非全适用于爆破振动。

## 5 结论

为明确爆破振动中不同波的权重及其影响作用，进而更好地预测与控制爆破振动，本文以垂直孔的爆破为例，研究了爆破诱发地震波的成分构成及其演化规律，主要得到如下结论：

(1) 爆破振动中各种波的相对量值并非定值，主导波的类型会随波的演化而发生改变，且某点的优势振动方向也与波的成分构成密切相关。

(2) 对于垂直孔爆破，P 波在近、远区均为重要成分，且其主要作用于水平向的振动；S 波仅为近区( $r < 2.3h$ )的主导波，其在远区的作用可忽略；R 波逐渐成长发育，于  $r = 5h$  处发育明显，且在  $r = (43 \sim 45)h$  后主导竖直向的振动。

(3) 爆破与天然地震的震源机制和距离尺度不同，爆破振动中波成分的演化有其自身特性，地震学中的常规认识并非全适用于爆破振动。

本文中对垂直孔爆破过程中不同波影响作用分区的讨论还有待于更多的现场试验验证，此外，还需开展其他爆破条件下地震波的成分构成及演化分析，但研究的结论基本适用于一类垂直孔的爆破，

同时也加深了对爆破地震波的认识。

### 参考文献(References):

- [1] 吴德伦, 叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 266 - 273.(WU Delun, YE Xiaoming. A comprehensive review and commendation of blast vibration safety velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 266 - 273.(in Chinese))
- [2] 卢文波, 赖世骧, 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.(in Chinese))
- [3] 李海波, 蒋会军, 赵 坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 887 - 1 891.(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): 1 887 - 1 891.(in Chinese))
- [4] 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): 1 815 - 1 822.(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): 1 815 - 1 822.(in Chinese))
- [5] 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.
- [6] MCGARR A. Estimating ground motions for small nearby earthquakes[C]// Seismic Design of Embankments and Caverns. New York: ASCE, 1983: 113 - 127.
- [7] 李新平, 宋桂红, 文建华, 等. 某水电站地下洞室爆破振动控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 506 - 2 509.(LI Xinping, SONG Guihong, WEN Jianhua, et al. Control study of blasting vibration of underground chamber of hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 506 - 2 509.(in Chinese))
- [8] 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): 1 871 - 1 878.(LV 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): 1 871 - 1 878.(in Chinese))
- [9] DUVALL W I, PETKOF B. Spherical propagation of explosion generated strain pulses in rock[J]. USBM Report of Investigation 5483, 1959: 21 - 22.
- [10] BLAIR D P. Non-linear superposition models of blast vibration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 235 - 247.
- [11] 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.(in Chinese))
- [12] 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): 1 214 - 1 222.
- [13] 唐海, 石永强, 李海波, 等. 基于神经网络的爆破振动速度峰值预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 533 - 3 539.(TANG Hai, SHI Yongqiang, LI Haibo, et al. Prediction of peak velocity of blasting vibration based on neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 533 - 3 539.(in Chinese))
- [14] DOWDING C H. Blast vibration monitoring and control[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985: 137 - 149.
- [15] 林俊德. 爆炸地震波的频率特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增 1): 476 - 480.(LIN Junde. Analysis of frequency characteristics of explosive seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supp.1): 476 - 480.(in Chinese))
- [16] 周俊波, 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): 2 171 - 2 178.(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): 2 171 - 2 178.(in Chinese))
- [17] 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): 1 195 - 1 202.(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): 1 195 - 1 202.(in Chinese))
- [18] 中国生, 熊正明. 基于小波包能量谱的建(构)筑物爆破地震安全评估[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1 522 - 1 528.(ZHONG Guosheng, XIONG Zhengming. Safety assessment of structure by blasting seism based on wavelet packet energy spectra[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1 522 - 1 528.(in Chinese))
- [19] DOWDING C H. Construction vibrations[M]. [S. l.]: Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996: 19 - 24.
- [20] 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): 1 513 - 1 520.(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): 1 513 - 1 520.(in Chinese))
- [21] FAVREAU R F. Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(17): 4 267 - 4 280.
- [22] GRAFF K F. Wave motion in elastic solid[M]. New York: Dover publications, Inc., 1975: 271 - 281.
- [23] HEELAN P A. Radiation from a Cylindrical Source of Finite Length[J]. Geophysics, 1953, 18(3): 685.
- [24] BLAIR D P. Seismic radiation from an explosive column[J]. Geophysics, 2010, 75(1): 55 - 65.
- [25] VANBRABANT F, CHACÓN E P, QUIÑONES L A. P and S mach waves generated by the detonation of a cylindrical explosive charge-experiments and simulations[J]. Fragblast, 2002, 6(1): 21 - 35.
- [26] TRIVIÑO L F, MOHANTY B, MILKEREIT B. Seismic waveforms from explosive sources located in boreholes and initiated in different directions[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 87(12): 81 - 93.
- [27] 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, 32(增 2): 228 - 232.(JIN Xuhaio, LU Wenbo, TIAN Yong, et al. Analysis of mechanisms of S wave generated in rock blasting process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.2): 228 - 232.(in Chinese))
- [28] GAO Q D, LU W B, HU Y G, 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.
- [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.(in Chinese))
- [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.(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.(in Chinese))
- [31] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology[M]. 2nd ed Sausalito, California: University Science Books, 2002: 209 - 235.
- [32] 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.(in Chinese))
- [33] BARTON N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy[M]. [S. l.]: Taylor and Francis e-Library, 2007: 4 - 5.
- [34] 阿肯巴赫. 弹性固体中波的传播[M]. 徐植信, 洪锦如, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992: 121 - 190.(Achenbach J D. Wave propagation in elastic solids[M]. Translated by XU Zhixin, HONG Jinru. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 121 - 190.(in Chinese))
- [35] KUZMENKO A A, VOROBEOV V D, DENISYUK II, et al. Seismic effects of blasting in rock[M]. [S. l.]: [s. n.], 1993: 16 - 22.