

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0108

考虑爆源特征的岩石爆破诱发地震波的波型与组分分析

高启栋¹, 卢文波², 冷振东³, 王亚琼¹, 周海孝¹, 张士朝¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 中国葛洲坝集团易普力股份有限公司, 重庆 401121)

摘要: 爆破地震波通常由压缩波(P波)、剪切波(S波)和瑞利面波(R波)等共同组成, 但现有爆破振动衰减规律和安全判据研究中并未区分波型和组分。采用一种基于偏振方向预判的爆破地震波波型判别方法, 通过理论分析和数值模拟, 研究了不同形状药包的爆源特征及其激发的波型; 结合现场爆破试验, 分析了垂直单孔、水平光爆孔和边坡预裂孔3种典型爆破孔诱发地震波的波型与组分, 探讨了不同爆破孔的爆源特征与力学作用机制, 并对特定位置处的主导作用波型进行了预判。结果表明: 垂直单孔的爆源可近似为短柱药包的延时叠加, 地表爆破振动同时包含P、S和R波的贡献, 随着爆心距增大, S波逐渐偏离其优势辐射方位, 而P波主要作用于水平径向振动, R波将主导垂直向振动; 水平光爆孔和边坡预裂孔均属轮廓爆破孔, 二者力学作用机制相似, 以轮廓面上的法向荷载为主, 且轮廓面上的爆破地震波主要由S和R波组成, 而P波的作用比较微弱, 随爆心距增大, R波将成为主导作用波型, 但轮廓面外P波的作用则不可忽略。

关键词: 岩石爆破; 爆破地震波; 爆源特征; 波型与组分; 主导作用波型

中图分类号: O 382

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)10-2830-15

Analysis of wave-type and seismic component induced by rock blasting considering source characteristics

GAO Qi-dong¹, LU Wen-bo², LENG Zhen-dong³, WANG Ya-qiong¹,
ZHOU Hai-xiao¹, ZHANG Shi-chao¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of the Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. China Gezhouba Group Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: The blasting induced seismic waves are generally composed of compressional wave (P-wave), shear wave (S-wave), and Rayleigh wave (R-wave), however, wave-type and seismic components are not differentiated in the attenuation law and safety criteria for the current blast vibration studies. In this study, a method of wave-type discrimination is used for the seismic wave prediction based on polarization direction. Using theoretical analysis and numerical modelling, the blasting source characteristics and the radiated wave-types are investigated for different shapes of explosive charge. Combined the results of the site blasting experiments, the wave-type and seismic components induced by three typical blast-holes are analyzed and three blast holes include the single vertical blast-hole, the smooth blast-hole, and the slope pre-splitting blast-hole. The source characteristics and acting mechanism are then discussed for different blast-holes. The dominant wave-type at special location is predicted for three blast types. The research results indicate that the blasting source of the vertical blast-hole can be viewed as a delay superposition of the short explosive column. All the P-, S-, and R-waves contribute to the ground surface vibration from the vertical blast-hole. With the increase of the blasting-target distance, it is found that the S-wave gradually deviates from its dominant radiation direction, while the P-wave mainly contributes to the horizontal radial vibration, and the R-wave dominates the vertical vibration. Because the horizontal smooth blast-hole and the slope pre-splitting blast-hole are both contour blast-holes, the two blast holes have a similar acting mechanism, in

收稿日期: 2021-01-15

修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52009003, No. 51809016); 中央高校基本科研业务费专项基金(No. 300102210123); 水工岩石力学教育部重点实验室开放研究基金(No. EMHSE1903)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52009003, 51809016), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102210123) and the Open Research Funds of Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of the Ministry of Education (EMHSE1903).

第一作者简介: 高启栋, 男, 1991年生, 博士, 讲师, 主要从事工程爆破与岩石动力学等相关的教学与科研工作。E-mail: qdgao@chd.edu.cn

通讯作者: 冷振东, 男, 1989年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩石动力学及工程爆破技术研究。E-mail: zdleng@whu.edu.cn

which the main acting force is the loading from the normal surface. The S- and R-waves are the dominant seismic wave types within the blasting contour surface, whereas the role of the P-wave is negligible. Besides, the R-wave becomes the dominant wave-type as the blasting center distance increases; however, the contribution of P-wave outside the contour surface cannot be ignored.

Keywords: rock blasting; blasting-induced seismic wave; source characteristics; wave-type and seismic components; dominant wave-type

1 引言

采矿、水利、交通及市政等重要基础建设领域均广泛涉及岩石爆破开挖或开采。炸药在岩土体中爆炸时,除用于破岩等工程目的外,还有部分能量会转化为爆破地震波。爆破地震达到一定强度时,不仅会危及工程本身的安全,还会对周边的建(构)筑物及设施设备等造成振动破坏^[1-2]。因此,爆破振动安全评价与控制历来是岩石爆破领域所关注的重点问题^[3-5]。

关于爆破振动, 一般采用幅值、频率和持续时间 3 个参数来描述^[1], 故而对爆破振动的预测与控制也基本围绕这 3 个参量展开。因质点峰值振速 (PPV) 与结构的破坏具有良好的相关性^[6], 故 PPV 常被选为衡量及评价爆破振动安全的指标, 国内外也涌现出了大量对 PPV 衰减规律及其预测公式的研究, 如以萨氏立方根公式^[7]和美国矿业局平方根公式^[8]为代表的经验预测公式, 以及基于现代计算机技术的软科学 (soft-computing) 方法, 如人工神经网络^[9-10]、灰度关联分析^[11]及遗传算法^[12]等预测方法。再者, 因建 (构) 筑物的破坏还与频率 f 密切相关, 故而也有学者在主频衰减规律及其预报等方面开展了一些研究^[13-14], 国际上目前也普遍采用与频率相关的 (PPV- f) 安全判据。

已有研究表明,地表爆破振动通常是压缩波(P波)、剪切波(S波)和瑞利面波(R波)等共同作用的结果^[15],如图1所示,这些波在传播速度、偏振特性与衰减规律等方面的差异会导致爆破地震波组分和主导作用波型的演变。但是现有爆破振动衰减规律和安全判据的研究并未区分波型和组分,

然而主导作用波型的改变势必引起结构不同的响应模式或破坏类型。因此,极有必要对岩石爆破诱发地震波的波型和组分进行分析。

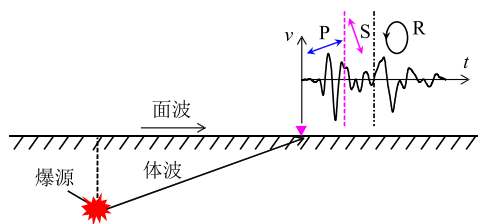


图 1 地表爆破地震波的波型与组分
Fig.1 Wave-type and seismic components of ground blasting

另一方面,实际的钻孔爆破会涉及不同类型的爆破孔,如主爆或缓冲孔、光爆孔及预裂孔等,图2以坝基开挖为例示意了不同典型爆破孔。这些爆破孔在装药结构、起爆方式及布孔方位等方面差别显著,故而也具有不同的爆源特征,与之相对应的爆源、爆炸荷载和岩体之间的相互作用机制也不尽相同,势必会引起爆破地震波的波型和组分差异^[16-17]。关于爆破地震波的爆源特征与作用机制,已有的研究多聚焦于不同形状药包激发应力波场的分析,如 Favreau^[18]、Graff^[19]、Achenbach^[20]等采用球形空腔作用模型分析了球形药包激发的应力波场,且结果显示球形药包仅激发均匀辐射的P波;Heelan^[21]采用短柱空腔模型推导分析了短柱药包的位移解,结果表明短柱药包可同时激发P波和SV波,且均有特定的优势辐射方位;Blair^[22]考虑了炸药的爆轰速度及药包的长度,且基于Heelan短柱解推导了延长药包叠加计算模型,并探讨了P波和SV波的Mach效应。

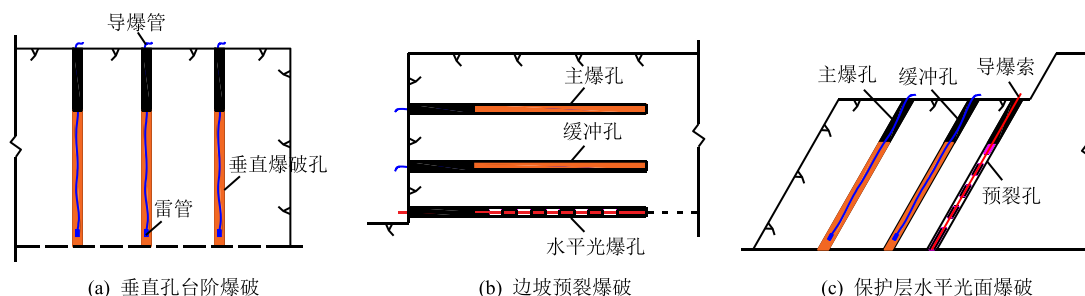


图 2 坝基开挖中不同典型爆破孔

Fig.2 Different typical blasting holes in dam foundation excavation

考虑到实际爆破中爆源特征的差异以及爆破地震波波型与组分的演变,本文采用一种基于偏振方向预判的爆破地震波波型判别方法,通过理论分析和数值模拟相结合的方法研究不同形状药包的爆源特征及其激发的波型;结合现场实测振动波形,选取岩石爆破中的几种典型爆破孔,分析不同爆破孔诱发地震波的波型与组分,并对其力学作用机制进行探讨。该研究成果有助于丰富岩石爆破地震效应研究的内涵,并为考虑波型的爆破振动安全评价与控制提供参考。

2 岩石爆破地震波的分类及波型判别

2.1 爆破地震波的分类与特征

炸药在岩土体中爆炸时,除用于破岩等工程目的外,还有一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、由近及远的传播即形成爆破地震波。Poisson 和 Stokes 最早发现并证明^[23]:在无界、均匀弹性介质中,存在两种相互独立的弹性波的传播,即纵波和横波,且传播速度满足:

$$\left. \begin{aligned} C_p &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ C_s &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_p 和 C_s 分别为纵波和横波的传播速度; ρ 为介质密度; λ 、 μ 为拉梅常数。纵波的质点运动方向与波传播方向一致,仅存在体积变形项,而无旋转变形,也称为膨胀波或压缩波。横波的质点运动方向与波传播方向垂直,仅存在旋转变形项,而无体积变形,也称为旋转波或剪切波。因纵波比横波传播得快,通常纵波最先被观测到,其次是横波,这两种波又被称为 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 SH 和 SV 分量。因这两种波仅在介质内部传播,与边界效应无关,故而统称为体波。

无界、均匀介质中只存在体波,但当体波遇到自由表面时,还会形成另一类沿自由表面传播的波,即为表面波。Rayleigh 最早发现并证明了表面波的存在,并由此命名为 Rayleigh 波(瑞利波,简称 R 波),其扰动被限制在介质表层,且位移沿深度方向呈指数衰减,同时 R 波的水平向位移与竖直向位移在相位上相差 $\pi/2$,其质点运动轨迹在自由表面为逆时针的椭圆^[24]。R 波的传播速度略小于 S 波,可近似表示为^[20]

$$C_R \approx \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} C_s \quad (2)$$

式中: C_R 表示 R 波的传播速度; ν 为泊松比。除 Rayleigh 波外,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且沿界面传播的非均匀波,而 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。

因炸药膨胀加载通常是对称的,且 SH 波与 P 波和 SV 波不在同一平面,故爆破中 S 波的 SH 分量通常可忽略不计^[25]。故本文主要聚焦于 P 波、SV 波和 R 波 3 种波的分析,图 3 展示了这 3 种波的传播与运动特性^[26]。

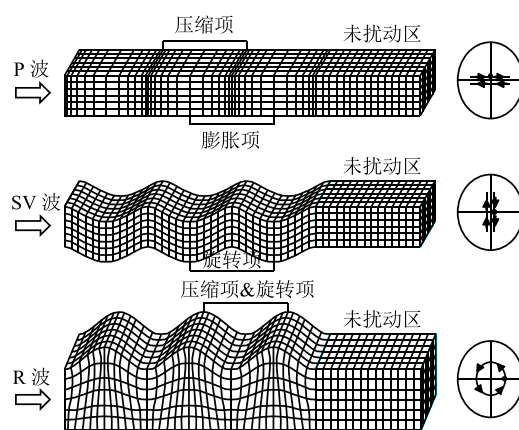


图 3 不同波的传播与运动特性^[26]

Fig.3 Propagation and motion characteristics of different seismic waves^[26]

2.2 基于偏振方向预判的爆破地震波波型判别

如前文所述,不同类型波的差异主要体现在传播速度和偏振方向两个方面,地震学领域已衍生出了多种震相识别与波场分离的方法,大体可分为两类:一类是基于运动学(视速度)的方法^[27],另一类是基于动力学(偏振特性)的方法^[28-29]。但地震学中的众多方法需要对原始数据进行大量的计算处理,波的传播路径较为复杂且不明确,而爆破的边界条件较地震简单的多,其爆源机制及波的传播路径也比较明确,可实现对不同波传播路径及偏振方向的预判。因此,高启栋等^[16-17]借助地震学中极化偏振滤波的思想,提出了基于偏振方向预判的爆破地震波波型判别方法。

2.2.1 偏振方向预判

在分析爆破地震波的波型前,可先根据爆源与测点的相对位置关系,对各类波的偏振方向进行预判,主要包含如下 3 种情形:① 测点位于爆(震)源高程以上,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 π); ② 测点位于爆 (震) 源高程以下, 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 π), 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 0); 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。3 种情况下, R 波均为椭圆偏振, 其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 $\pi/2$ 。图 4 以上行波为例展示了 3 种不同波的偏振方向和相位差异。

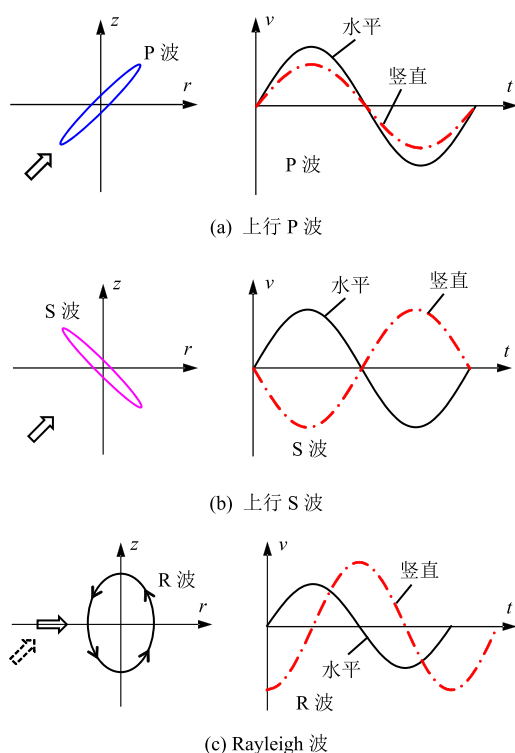


图 4 上行波的偏振方向及相位差异

Fig.4 Polarization direction and phase difference of the upstream wave

2.2.2 波型判别方法

综上所述, 一方面可通过分析质点运动轨迹的特征来判别爆破地震波的波型与组分, 即质点运动矢量图分析; 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, 即爆破振动相位差分析。因各种波偏振方向和传播速度的差异, 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。此外, 因质点运动轨迹也是按时序点绘的, 故质点运动轨迹中的拐点 (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, 二者可相互校核, 具体判别

流程参见文献[16-17]。

3 不同形状药包的爆源特征及其激发的波型

3.1 不同形状药包的力学简化

3.1.1 球形药包的力学简化

对于无界均质岩体中球形药包的爆破, 通常可将其等效为球形空腔受动内压作用的力学问题 (如图 5 所示)^[19]。由于在球形空腔的均匀内压作用下, 岩体只有径向位移, 环 (切) 向位移为 0, 故在球药包的爆破过程中仅会形成沿径向传播的膨胀波 (P 波), 扰动将以球面波的形式向外扩散。

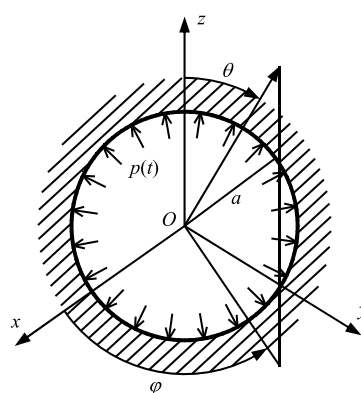


图 5 球形药包的力学简化模型^[19]

Fig.5 Simplified mechanical model of the spherical charge^[19]

3.1.2 短柱药包的力学简化

与球形药包不同, 柱状药包的爆炸应力波场并非均匀辐射, 除 P 波项外, 还会激发明显的 S 波项。Heelan^[21]将短柱状药包的爆破等效为短柱空腔受径向内压作用的力学问题得到了其位移解, 且结果表明 P 波和 SV 波均有特定的优势辐射方位 (见图 6)。

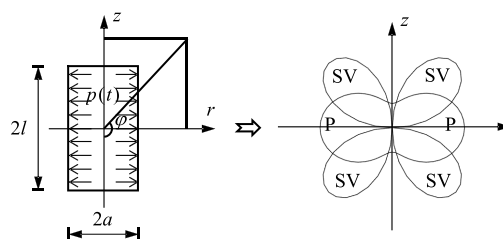


图 6 短柱药包的力学简化模型及其辐射模式^[21]

Fig.6 Simplified mechanical model of the short explosive column and its source radiation pattern^[21]

3.1.3 延长药包的力学简化

对于延长药包, Blair 等^[22]基于 Heelan 短柱解研究了其位移解, 如图 7 所示, 若将长柱药包分解

为 n 个短柱单元, 再按炸药爆轰速度沿药包轴向进行延时叠加, 即可获得延长药包的解。Blair 等^[22]的计算结果表明, 在一定条件下, 各短柱单元激发的应力波会相互干涉, 进而形成锥面 Mach 波, 如图 7 所示。图中的 PL 和 SL 分别表示 P 波和 S 波的加载项, 而 PU 和 SU 分别表示卸载项, 均按球面波的形式向外辐射, 但若有锥面波形成, 加卸载项一般比较微弱。

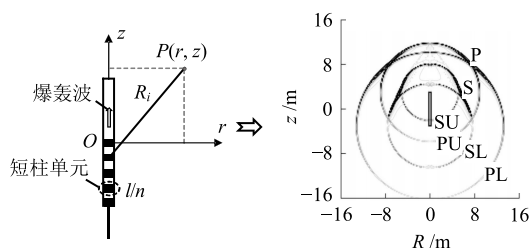


图 7 延长药包应力波场计算模型及位移云图^[22]
Fig.7 Computation model of the stress wave field of the extended charge and its displacement contour^[22]

3.2 不同形状药包爆破的数值模拟

3.2.1 数值模型与计算参数

为进一步研究球和柱两种药包激发地震波的波型, 开展了数值模拟。根据所研究问题的对称性, 建立了如图 8 所示的两组 1/4 模型: 第 1 组为无限岩体模型 (即不含自由面), 模型尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ (长×宽×高), 包含 763 203 个单元和 735 048 个节点, 为消除边界反射波的影响, 除对称边界外, 模型其他边界均施加无反射边界 (non-reflecting boundary); 第 2 组为半无限岩体模型 (含一个自由面), 模型尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 55 \text{ m}$ (长×宽×高), 包含 515 053 个单元和 492 953 个节点。在计算中, 球、柱两种药包的药量相同, 球药包的直径为 0.42 m , 柱药包的直径为 90 mm 、长度为 6.0 m 。球药包的球心和柱药包的中心距自由表面的距离均为 5.0 m 。

炸药爆轰过程中的气体压力采用 JWL 状态方程来描述:

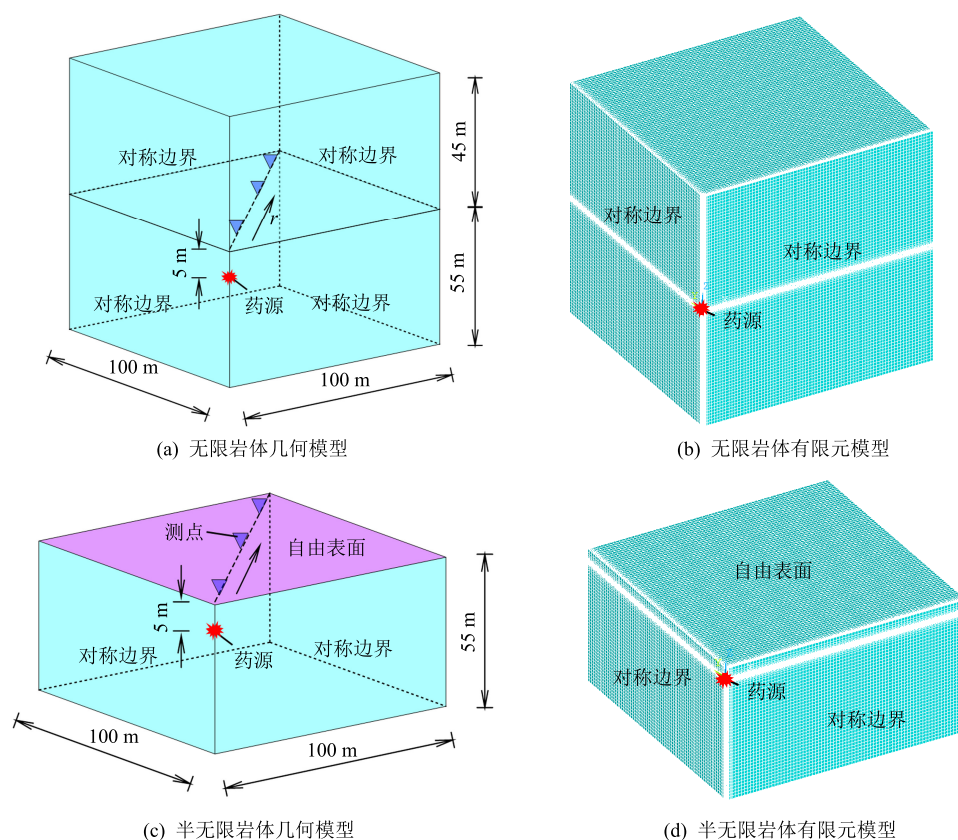


图 8 球和柱药包爆破的数值计算模型

Fig.8 Numerical models of the spherical and cylindrical charges

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: P 为爆轰压力; V 为爆轰产物的相对体积; E_0 为初始比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为与炸药种类

相关的参数, 计算中采用 2#岩石乳化炸药, 其参数取值如表 1 所示。炸药采用 ALE 网格, 岩体采用 Lagrange 网格, 二者之间的荷载传递通过流-固耦合算法实现。

岩石本构选用了均质弹塑性模型,虽一定程度上忽略了爆破近区岩石的非连续力学行为,但可简化边界条件及消除一些复杂因素的干扰,从而更清晰地分析不同形状药包激发的应力波场及波型。岩体的物理力学参数如表 2 所示。

表 1 2#岩石乳化炸药 JWL 参数
Table 1 JWL parameters of rock emulsion No.2

密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆轰速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	P /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω
1 000	4 000	3.24	220	0.2	4.5	1.1	0.35

表 2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	硬化指数
2 700	25	0.25	20	0.3

3.2.2 球形药包的计算结果

图 9 为球形药包在无限岩体中爆破的应力云图,云图也显示球药包激发的应力波场是均匀向外发散的,即球形药包的爆轰仅激发膨胀波(P 波)。图 10 分别给出了无限岩体和半无限岩体模型中球形药包爆破时某典型测点处的爆破振动波形和质点运动矢量图。由图 10 可知,对于无限岩体中的测点,爆破振动波形整洁、光滑,为一段逐渐衰减的正弦波,主要包含一个激励源,且质点运动矢量图中仅包含沿第一、三象限偏振的波(上行波),即为 P 波,说明无限岩体中球形药包的爆破仅激发 P 波;对于半无限岩体中的测点,爆破振动波形并非简单衰减的正弦 P 波,在 P 波之后出现了另一个激励源,质点先在第一、三象限做线性偏振,之后转换为逆时针的椭圆运动,实际上为 R 波的运动。

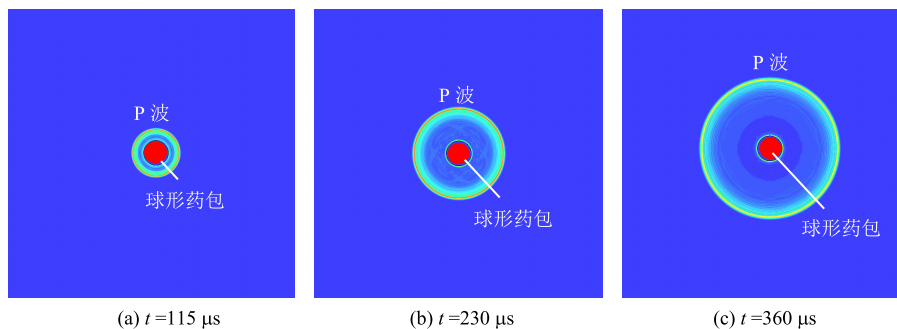


图 9 球形药包在无限岩体中爆破的应力云图

Fig.9 Stress contours of the spherical charge in infinite rock mass

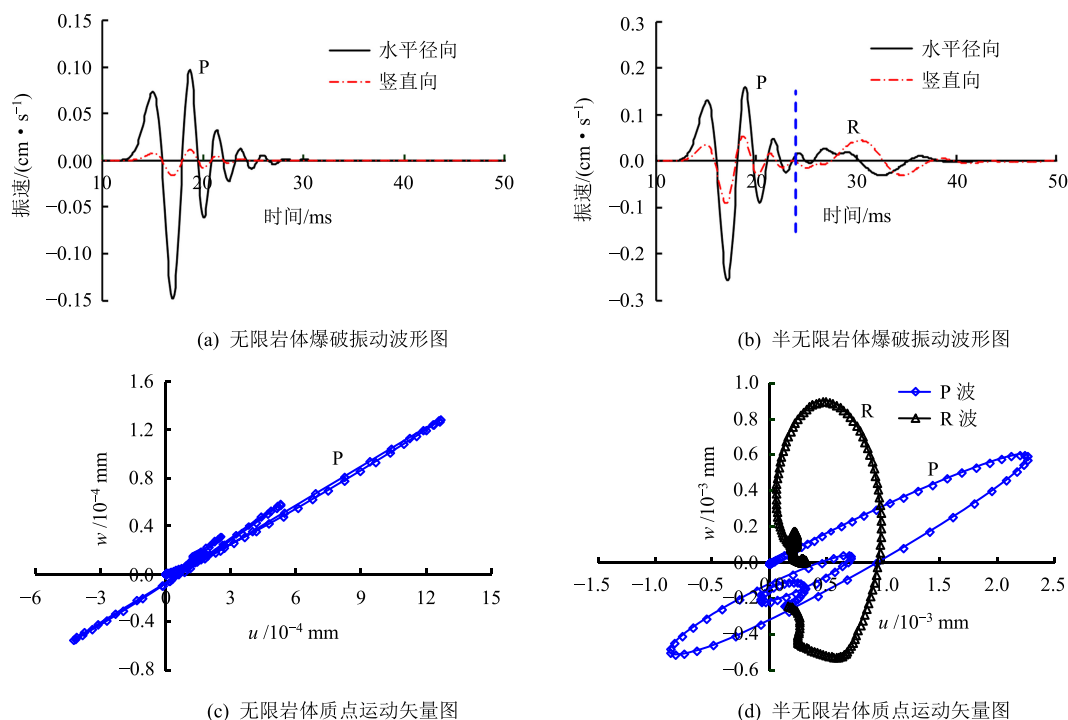


图 10 球形药包爆破诱发地震波的波型与组分分析

Fig.10 Analysis of wave-type and seismic component caused by the spherical charge

3.2.3 柱状药包的计算结果

通过改变岩体或炸药爆轰参数,可得到柱状药包在不同爆轰条件下的爆破应力云图,如图 11 所示。由图可知,在不同的爆轰条件下,柱状药包激发的应力波场形态有很大差别,但不论何种情况,柱状药包均可同时激发 P 波和 S 波,而是否形成锥面 Mach 波,则与炸药爆轰速度 (VOD) 与岩石声速 (C_P) 的相对大小密切相关^[22]。

采用前文所述的岩体和炸药爆轰参数 (即超声速情况, $VOD > C_P$), 图 12 也给出了某典型测点处的爆破振动波形和质点运动矢量图。由图可知,对

于无限岩体模型中的测点, 爆破振动波形和质点运动矢量图中均包含两个激励源, 分别表示柱状药包激发的 P 波和 S 波, 其中 P 波仍沿第一、三象限偏振, 而这两个测点处 S 波的运动比较微弱; 对于半无限岩体模型中的测点, 爆破振动中除 P 波和 S 波两个激励源, 还包含 R 波的运动, 因 R 波和 S 波的波速比较接近, 所以部分 S 波被后到的 R 波覆盖。需要说明的是, 因各种波未在时序上充分错开, 相互之间有叠加, 故而图中标注的字母 P、S 或 R 严格上仅代表相应时段的主导波型, 下文类同。

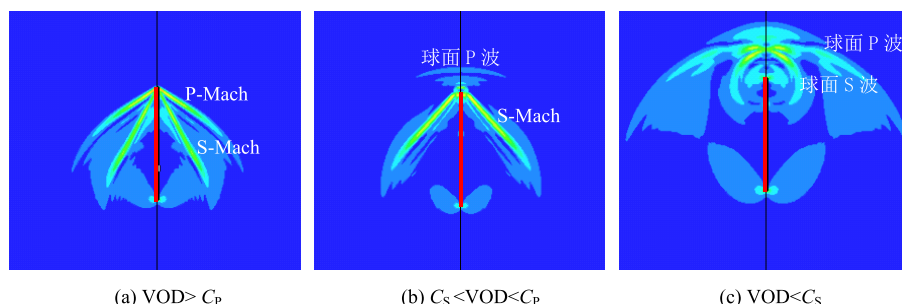


图 11 不同爆轰条件下的柱状药包应力云图

Fig.11 Stress contours of the cylindrical charge under different detonation conditions

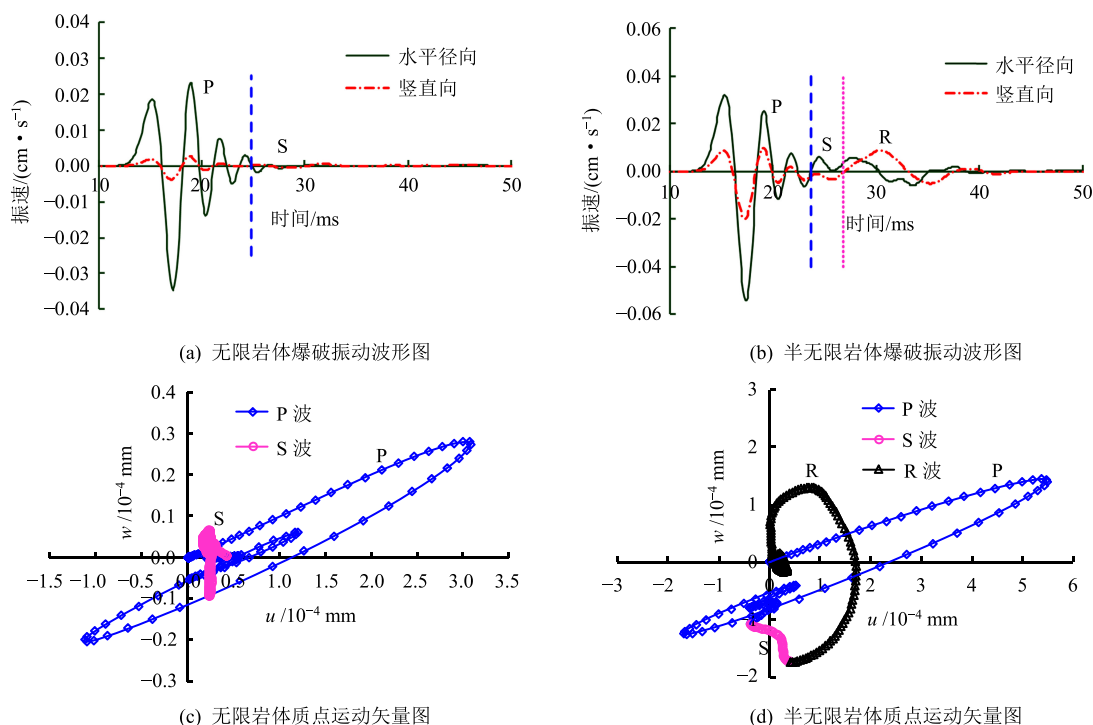


图 12 柱药包爆破诱发地震波的波型与组分分析

Fig.12 Analysis of the wave-type and seismic component caused by the cylindrical charge

4 不同典型爆破孔诱发地震波的现场试验

为进一步研究因爆源特征不同而导致的爆破

地震波的波型和组分差异, 结合某水电站岩石基础爆破开挖, 针对性地选取了几次现场爆破试验或生产爆破振动监测资料, 依次分析了垂直单孔、水平光爆孔和边坡预裂孔 3 种典型爆破孔诱发地震波的

波型与组分。

4.1 垂直单孔爆破

4.1.1 爆破设计与测点布置

垂直孔爆破现场试验如图 13 所示，在边长为 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的正方形四角分别布置了 4 个垂直爆破孔，且 4 个炮孔均在同一爆破网络内起爆（见图 14(a)），采用孔内延迟雷管将各孔的爆破振动波形隔开，炮孔 A、B、C 和 D 内的雷管段别及延迟时间分别为 MS1 (0 ms)、MS5 (110 ms)、MS9 (310 ms)、MS13 (650 ms)。详细的钻孔装药参数及装药结构见图 15。其中炮孔 A 和 B 的起爆雷管置于药包上部（上部起爆），而炮孔 C 和 D 的起爆雷管置于药包底部（底部起爆），不在本研究范畴。

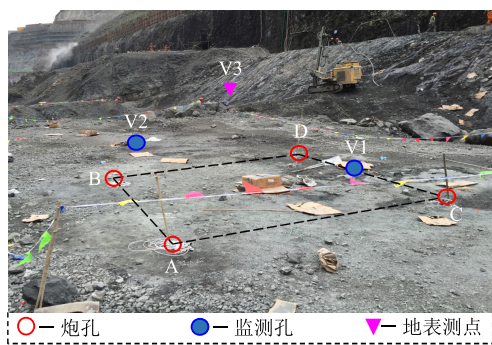
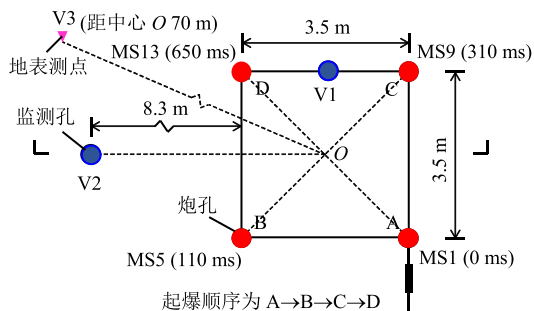
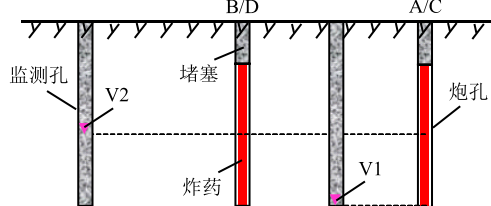


图 13 垂直孔爆破试验现场炮孔布置

Fig.13 Layout of blast-holes in the vertical-hole field blasting experiment



(a) 炮孔及测点布置平面图



(b) 炮孔布置立面图

图 14 垂直孔爆破试验中的炮孔及测点布置

Fig.14 Layout of blast-holes in the vertical-hole field blasting experiment

表 3 垂直孔爆破试验中的钻孔装药参数

Table 3 Drilling and blasting parameters in the vertical-hole blasting experiment

孔径 /mm	孔深 /m	孔距 /m	药径 /m	药长 /m	单孔药量 /kg	堵塞 /m
100	6	3.5	32	4.5	4.5	1.5

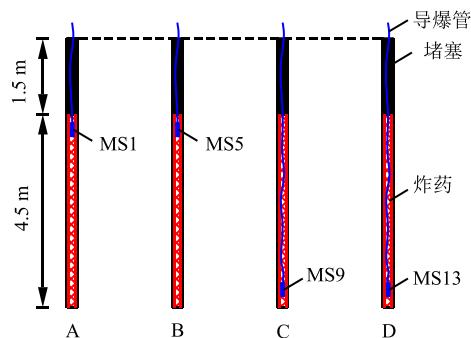


图 15 垂直孔爆破试验中的装药结构图

Fig.15 Charging structures in the vertical-hole blasting experiment

为监测岩体内及地表的爆破振动，分别布置了 2 个孔内测点和 1 个地表测点（如图 13 和图 14(b) 所示），其中 V1 监测孔位于炮孔 CD 连线的中心，且测点的高程与炮孔底部高程一致，V2 监测孔位于距离炮孔 BD 连线 8.3 m 处，且测点的高程与药包中截面高程一致，3#地表测点距四孔中心 70 m。V1 和 V2 孔内测点处各布置一组同时包含水平和竖直向的单向传感器，V3 地表测点处布置一个三向传感器。现场所采用的爆破振动测试系统为成都中科测控有限公司生产的 TC-4850，数据记录仪的采样频率为 $8\,000\text{ s}^{-1}$ ，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，其中三向振动传感器为 TC-4850 记录仪的成套产品，量程为 35 cm/s ，单向振动传感器的型号为 CDJ28，量程为 200 cm/s 。下文两个试验的测试系统类同。

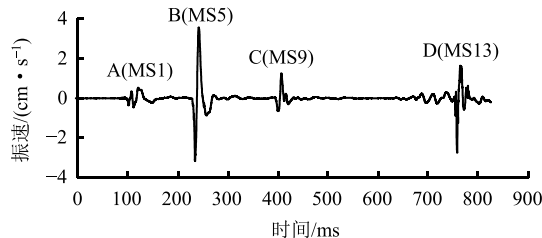


图 16 垂直孔爆破试验中的实测典型爆破振动时程曲线(V2)

Fig.16 Measured blast vibration time-history in the vertical-hole blasting experiment (V2)

图 16 为实测典型爆破振动时程曲线（V2 测

点), 包含 4 个炮孔诱发的振动波形。因各孔的爆破振动充分隔开, 且孔间距离较大, 故而可将这 4 个孔的爆破视为单孔爆破。为便于描述, 以 V1-A 的方式表示由炮孔 A 诱发的 V1 测点处的爆破振动。

4.1.2 试验结果

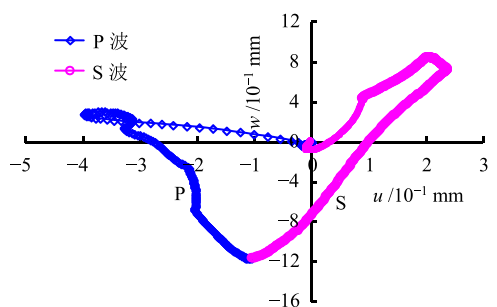
(1) 岩体内的爆破地震波

图 17 为岩体内 V1 和 V2 测点处的典型质点运动矢量图和爆破振动波形。因 V1 测点位于药包中心高程以下(即属下行波), 则 P 波沿第二、四象限偏振, 其水平和竖直向的振动相位相反, 而 S 波沿第一、三象限偏振, 其水平和竖直向的振动相位相同; 而 V2 测点与药包中心在同一高程, 则 P 波主要沿水平向运动, 而 S 波主要沿竖直向运动。由图可知, V1 和 V2 测点处的振动几乎不包含 R 波的贡

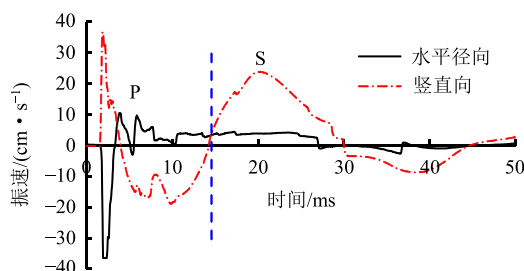
献, 即 V1 和 V2 测点处的振动主要由 P 波和 S 波构成, 这是因为 V1 和 V2 测点均位于岩体内部, 振动主要由体波引起, 而 R 波主要形成于地表自由面, 且两个测点距爆源较近, R 波还未充分发育。

(2) 地表爆破地震波

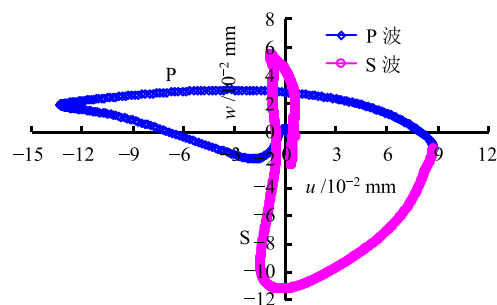
图 18 为地表测点(V3 测点)处的质点运动矢量图和相应的爆破振动波形。因 V3 测点位于药包中心高程以上(上行波), 则 P 波沿第一、三象限偏振, 其水平和竖直向的振动相位相同, 而 S 波沿第二、四象限偏振, 其水平和竖直向的振动相位相反。由图可知, 垂直孔爆破时, 地表爆破振动同时包含 P 波、S 波和 R 波 3 种成分的贡献, 但该测点处 S 波的运动比较微弱, 主要表现为 P 波和 R 波的运动。



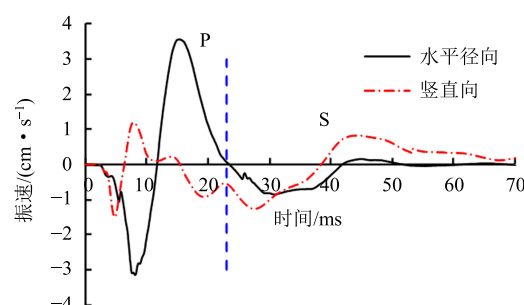
(a) 质点运动矢量图(V1-C)



(b) 爆破振动波形图(V1-C)



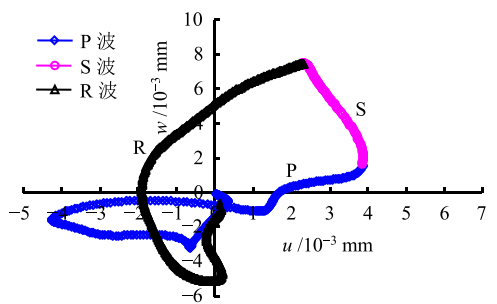
(c) 质点运动矢量图(V2-B)



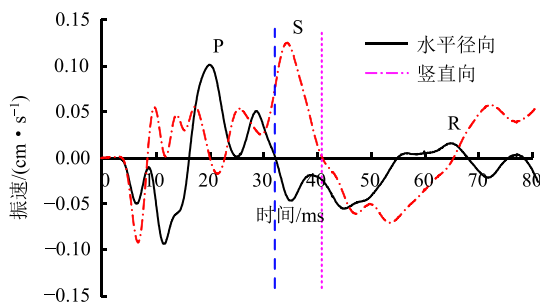
(d) 爆破振动波形图(V2-B)

图 17 岩体内爆破地震波的波型和组分分析

Fig.17 Analysis of the blast-induced wave-type and seismic component within the rock mass



(a) 质点运动矢量图(V3-A)



(b) 爆破振动波形图(V3-A)

图 18 地表爆破地震波的波型和组分分析

Fig.18 Analysis of the blast-induced wave-type and seismic components at the ground surface

4.2 水平光爆孔爆破

4.2.1 爆破设计与测点布置

水平光爆孔现场试验如图 19 所示，在光爆孔同高程平面及光爆孔以上 3.5 m 处共布置了 4 个地表测点（S1~S4）。图 20 为测点与炮孔的相对位置关系的立视图。此次爆破共包含 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。炮孔间距为 0.6 m，平均抵抗线为 1 m，孔深为 10 m。炸药也为 2#岩石乳化炸药，装药采用了空气间隔装药技术，线装药密度为 220 g/m，详细的钻孔装药参数及典型炮孔装药结构分别见表 4 和图 21。图 22 为实测典型爆破振动时程（S2 测点），包含 8 段光爆孔诱发的振动波形。



图 19 水平光爆试验中的现场炮孔及测点布置

Fig.19 Layout of blast-holes and monitoring points in the field horizontal smooth blasting experiment

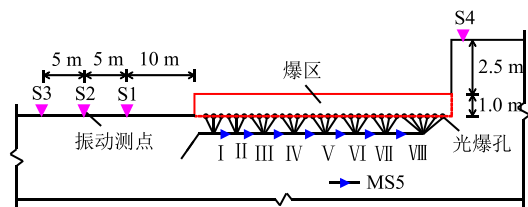


图 20 水平光爆试验中的炮孔与测点相对位置

Fig.20 Location relationship between the blast-holes and monitoring points in the field horizontal smooth blasting experiment

表 4 水平光爆试验中的钻孔装药参数

Table 4 Drilling and blasting parameters in the horizontal smooth blasting experiment

孔径 /mm	孔深 /m	孔距 /m	药径 /mm	线密度 /(g · m ⁻¹)	单孔药量 /kg	堵塞 /m
76	10	0.6	32	220	2.2	1

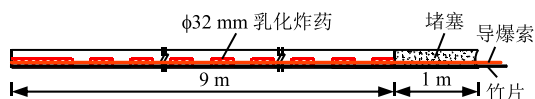


图 21 水平光爆试验中的典型炮孔装药结构

Fig.21 Typical charging structure in the horizontal smooth blasting experiment

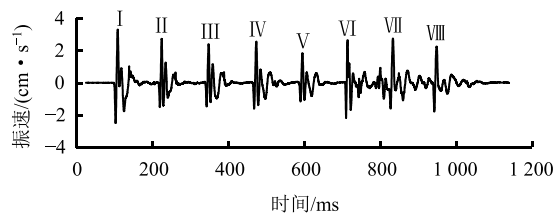


图 22 水平光爆试验中的实测典型爆破振动时程曲线 (S2)

Fig.22 Measured blast vibration time-history in the horizontal smooth blasting experiment (S2)

为方便描述，以 S1-I 的方式表示 S1 测点处由第 I 段光爆孔诱发的振动。

4.2.2 试验结果

(1) 光爆孔平面上的爆破地震波

图 23 为与水平光爆孔在同一高程平面上测点的典型质点运动矢量图和爆破振动波形。因测点 1#~3#与炮孔在同一高程（即属平行波），则 P 波主要在水平向偏振，S 波在竖直向偏振，而 R 波为逆时针椭圆偏振。由图可知，对于光爆孔同平面上的测点，几乎识别不到 P 波的运动，其作用可忽略，但 S 波与 R 波的运动特征非常明显，说明 S 波和 R 波均为重要成分，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。需说明的是，图 23(b)中竖直向的虚线大致表示 S 波和 R 波运动的分界点，同时该分界点与质点运动矢量图 23(a)中拐点出现的时刻是一致的。因为 S 波与 R 波的波速差异较小，S 波段含有部分初至的 R 波，而 R 波段也包含 S 波的尾波段，故图中所做的标记仅代表相应时间段的主导波型。图 23(b)表明，S1-VII 处水平向 S 波的振速远低于 R 波，但竖直向 S 波的振速与 R 波相当，表明该测点处水平向的振动主要由 R 波引起，而竖直向的振动同时包含 S 波和 R 波的贡献。

(2) 光爆孔平面外的爆破地震波

图 24 为水平光爆孔平面外测点的典型质点运动矢量图和爆破振动波形。因 S4 测点的位置高于炮孔 3.5 m（即属上行波），则 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、三象限的方向运动，R 波仍为逆时针椭圆运动。由图可知，对于光爆孔平面外的测点，P 波、S 波和 R 波的运动均很明显，且 P 波的作用不可忽略。此外，图 24(b)还表明，4#-II 处 P 波的振速明显高于另两种波，而 S 波和 R 波的振速相当，即 P 波在 S4-II 处为 3 种波中的主导作用波型。

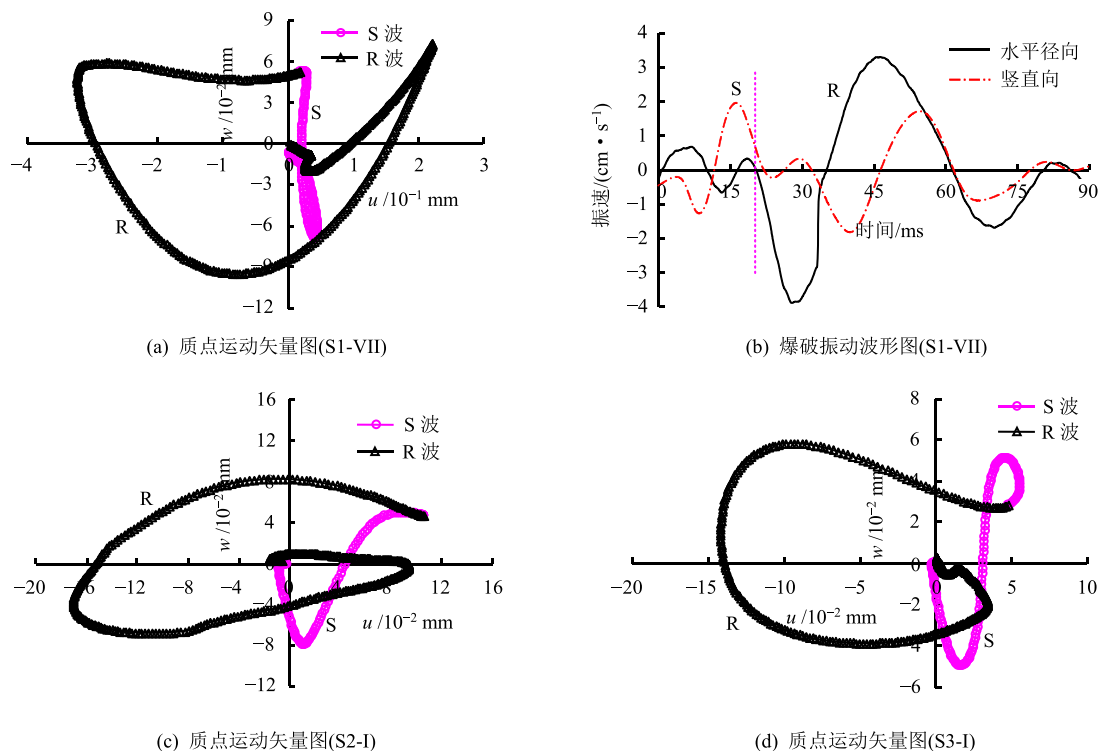


图 23 光爆孔同平面上爆破地震波的波型与组分分析

Fig.23 Analysis of the blast-induced wave-type and seismic component on the same surface of smooth blast-holes

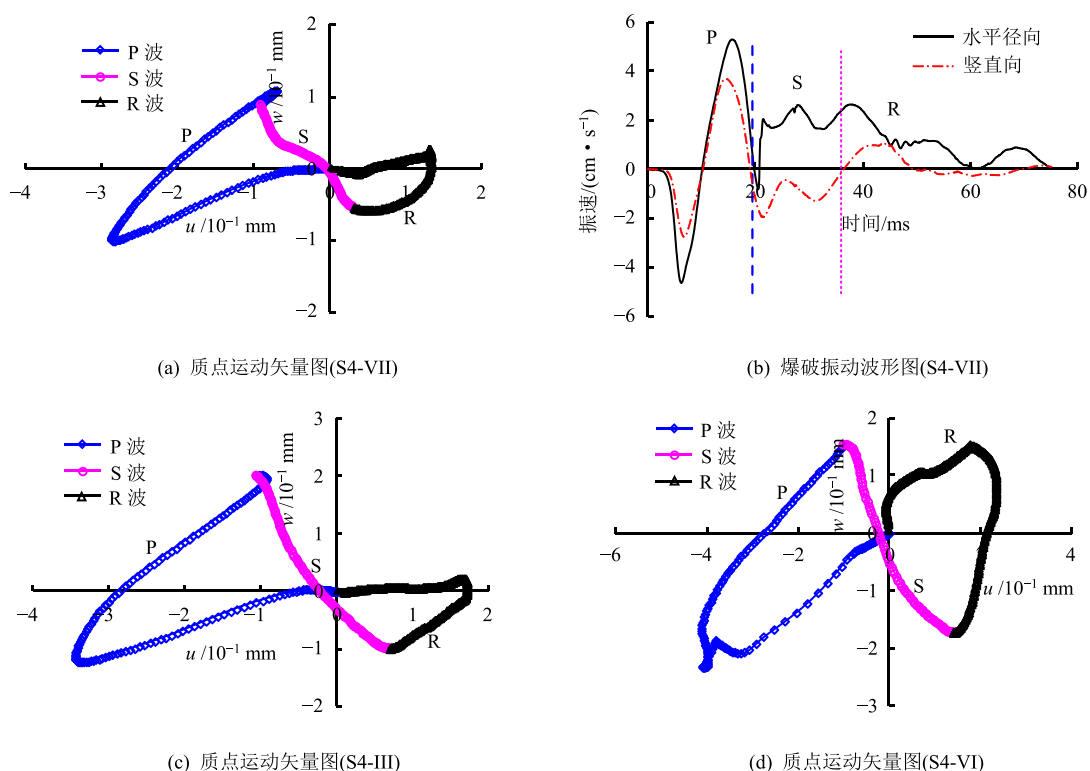


图 24 光爆孔平面外爆破地震波的波型与组分分析

Fig.24 Analysis of the blast-induced wave-type and seismic component outside the surface of smooth blast-holes

4.3 边坡预裂孔爆破

4.3.1 爆破设计与测点布置

结合某水电站坝基缓坡段的开挖,开展了边坡

预裂孔爆破试验,且在已成型的边坡轮廓面上布置了3个地表爆破振动测点(P1~P3),测点距预裂孔顶面10~13 m,如图25所示。图26为炮孔及测

点的布置的剖面图。图 27 为本次试验起爆网络图。本次爆破共包含 1 排预裂孔、3 排主爆孔和 1 排缓冲孔，排间均采用毫秒雷管 MS5（110 ms）延时。预裂孔 3~4 孔一响，段间采用毫秒雷管 MS3（50 ms）延时，共分为 10 段。主爆孔和缓冲孔均为单孔单响，孔内均采用毫秒雷管 MS13（650 ms）延时，孔间也采用毫秒雷管 MS3（50 ms）延时。预裂孔的钻孔装药参数和装药结构见表 5 和图 28。图 29 为实测典型爆破振动时程（P2 测点），包含 10 段预裂

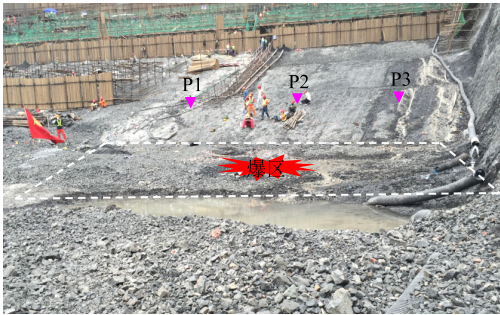


图 25 边坡预裂孔爆破试验中的现场测点布置
Fig.25 Layout of monitoring points in the field slope pre-splitting blasting experiment

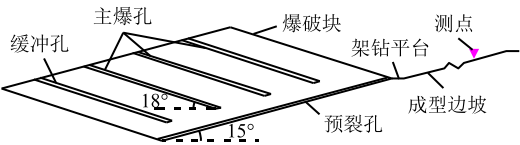


图 26 边坡预裂爆破试验中的炮孔及测点位置剖视图
Fig.26 Cut view of the blast-holes and monitoring points in the slope presplitting blasting experiment

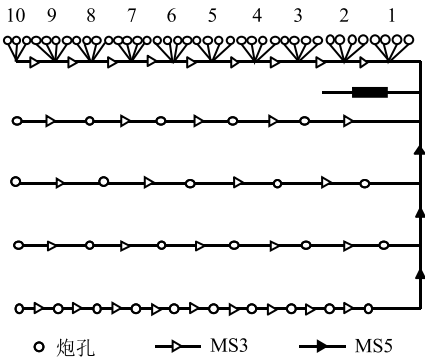


图 27 边坡预裂爆破试验中的起爆网络
Fig.27 Blasting initiation network in the slope pre-splitting blasting experiment

表 5 边坡预裂爆破试验中的钻孔装药参数
Table 5 Drilling and blasting parameters in the slope presplitting blasting experiment

孔径 /mm	孔深 /m	孔距 /m	药径 /mm	线密度 /(g·m ⁻¹)	单孔药量 /kg	堵塞 /m
76	10	0.6	32	220	2.2	1

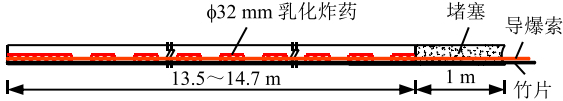


图 28 边坡预裂爆破试验中的典型炮孔装药结构
Fig.28 Typical charging structure in the slope pre-splitting blasting experiment

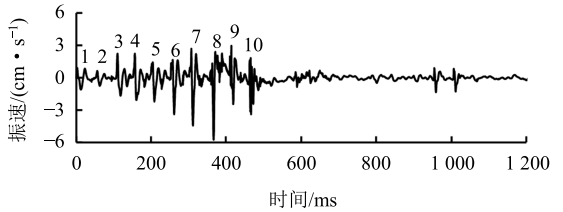


图 29 边坡预裂爆破试验中的实测典型爆破振动时程曲线(P2)
Fig.29 Measured blast vibration time-history in the slope pre-splitting blasting experiment (P2)

孔诱发的振动波形和若干段主爆孔诱发的振动波形。

4.3.2 试验结果

通过提取部分预裂孔的爆破振动波形，可绘制出相应的质点运动矢量图和爆破振动波形，如图 30 所示。因测点均位于已成型边坡轮廓面上，而边坡轮廓面和预裂孔所在平面（即预裂面）基本平行且距离极小，故可近似认为测点均位于预裂面上，图 30 中的质点运动矢量图中也示意了预裂面的方位。若将坐标系旋转至以预裂面为基准，则测点与爆源可视为同高程（即属平行波）。由图可知，预裂面上的爆破地震波主要由 S 波和 R 波组成，几乎识别不到 P 波的运动；其中 S 波主要在垂直于预裂面的方向上运动，而 R 波对沿预裂面方向和垂直于预裂面方向上的运动均有贡献，且近于逆时针的椭圆轨迹；此外，爆破振动波形显示 P2 测点处 R 波的峰值振速高于 S 波，说明此处 R 波为主导波型。需说明的是，因振动波形提取误差、传感器布置偏斜及地形微起伏等因素，绘制出的质点运动矢量图存在部分失真，但通过矢量图中的拐点基本可判断出主导作用波型的变化。

4.4 不同爆破孔的力学作用机制探讨及波型预判

综上所述可知，不同爆破孔诱发地震波的波型与组分存在很大差异，即岩石爆破地震波的波型与组分和爆源特征密切相关。3 种典型爆破孔的区别主要在于装药结构、起爆方式和布孔方位 3 个方面，具体为：① 对于垂直单孔爆破，孔内连续装药且由雷管引爆，需考虑炸药爆轰速度的有限性，其爆源等同于 3.1.3 节所述的延长药包，故而可借鉴延长药

包计算模型(见图 7),对垂直单孔爆破做如图 31(a)所示的力学简化;② 对于水平光爆孔,孔内空气间隔装药且由导爆索起爆,导爆索爆轰速度较高,可近似认为炸药同时起爆,且轮廓孔一般为多孔一响,因此,可将水平光爆孔的作用简化为光爆面上的法

向面荷载(见图 31(b)),同时考虑孔间的力学作用,还存在少部分水平向荷载;③ 对于边坡预裂孔,其装药结构及起爆方式与光爆孔相同,区别主要在于布孔方位,因而其力学简化模型等同于将水平光爆孔的力学模型作一定角度的旋转(见图 31(c))。

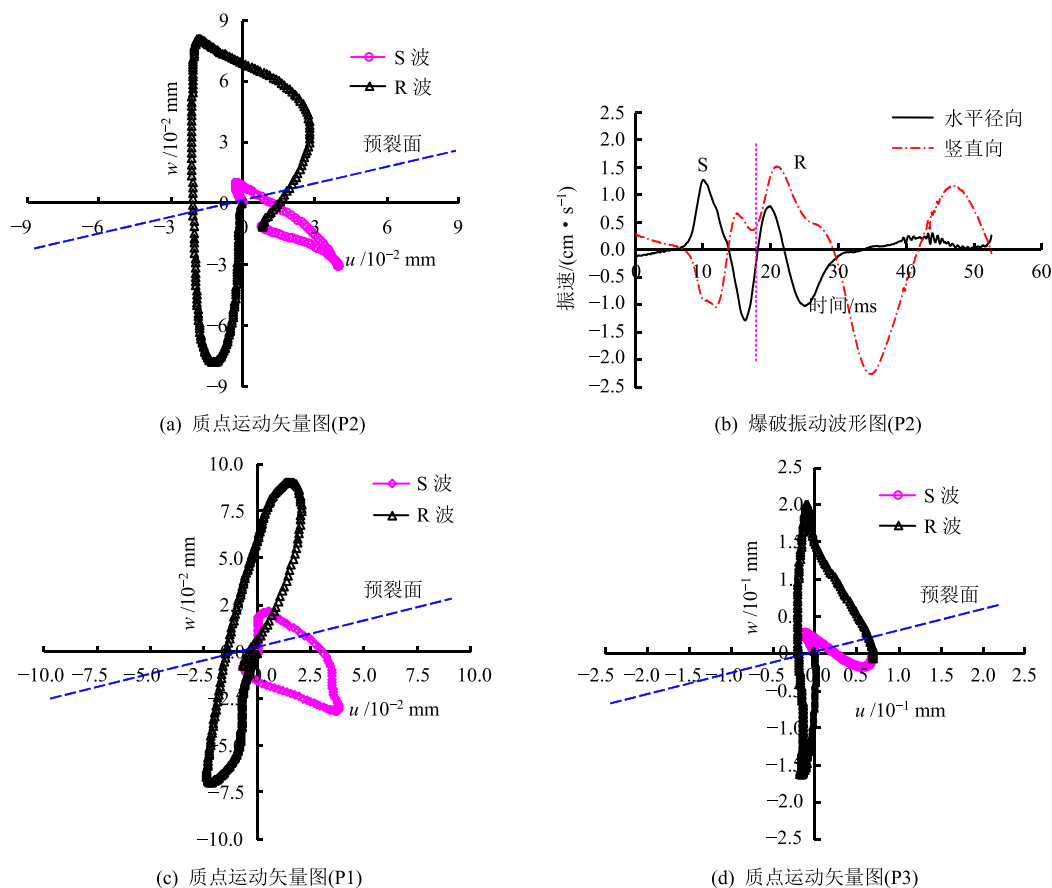


图 30 边坡预裂面上爆破地震波的波型与组分分析

Fig.30 Analysis of the blast-induced wave-type and seismic component on the pre-splitting surface

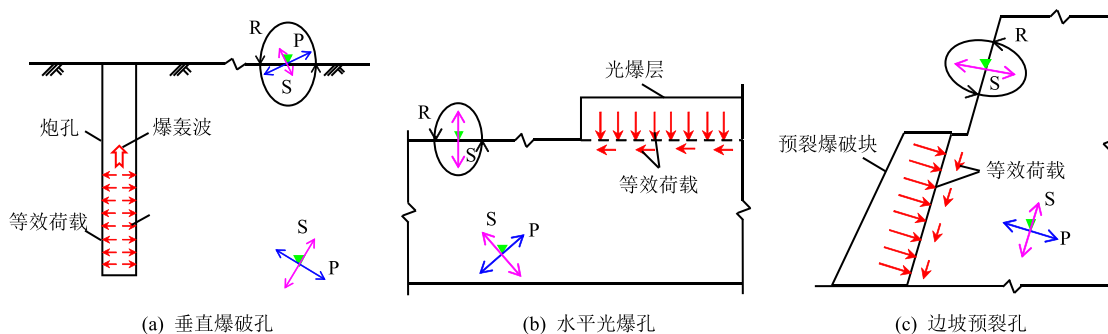


图 31 不同爆破孔的力学简化模型及波型预判

Fig.31 Simplified mechanical model of different types of blast-holes and the wave-type prediction

除爆源特征外,爆破地震波的波型与组分还与测点的相对位置、不同波的传播与衰减规律等因素有关。通过分析不同爆破孔的力学作用机制,结合现场实测结果,可对爆破地震波的波型做如下预判:

(1) 垂直单孔爆破的爆源实际上等同于一埋藏

柱状药包,可同时激发 P、S 波源(见图 11 和图 12)。数值模拟(见图 12)和现场实测结果(见图 18)均表明地表爆破振动同时包含 P、S 和 R 波的贡献,但随爆心距增大,测点逐渐偏离 S 波的优势辐射方位(45° 方位,见图 6),并趋近于 P 波的优势辐射

方位(水平径向), 故地表 S 波的作用比较微弱, P 波主要作用于水平径向的振动, 又因 R 波的衰减速度较慢, 在远区竖直向的振动将由 R 波主导^[16]。对于岩体内的测点, R 波的作用可忽略, P 和 S 波的相对权重则与测点和爆源之间的相对位置有关(见图 17)。图 31(a)为垂直孔爆破中典型位置处的波型。

(2) 水平光爆孔和边坡预裂孔均属轮廓孔, 二者的力学作用机制相似, 以轮廓面上的法向面荷载为主, 且轮廓面上主要为 S 波和 R 波的运动(见图 23、30), 而 P 波的运动比较微弱, 因 R 波的衰减较慢, 随爆心距增大, R 波将成为主导作用波型^[17]。对于轮廓面外的测点, P 波的运动不可忽略(见图 24), 而主导作用波型也与测点和爆源之间的相对位置有关。图 31(b)和 31(c)分别为水平光爆孔和边坡预裂孔爆破中典型位置处的波型。

5 结 论

考虑实际爆破中爆源特征的差异, 对岩石爆破诱发地震波的波型与组分进行了分析, 主要得出如下结论:

(1) 球形药包的爆破相当于球形空腔的动内压问题, 主要激发均匀辐射的 P 波源; 而柱状药包的爆破近似于短柱形空腔动内压的延时叠加, 可同时激发具有特定优势辐射方位的 P、S 波源。

(2) 垂直单孔爆破的爆源等同于一埋藏柱状药包, 其可同时激发 P、S 波源, 地表爆破振动同时包含 P、S 和 R 波的作用。随爆心距增大, S 波逐渐偏离其优势辐射方位, P 波主要作用于水平径向的振动, 而 R 波将主导竖直向的振动。

(3) 水平光爆孔和边坡预裂孔均属轮廓爆破孔, 二者力学作用机制相似, 且轮廓面上的爆破地震波主要由 S 和 R 波的组成, 而 P 波的作用比较微弱。随爆心距增大, R 波将成为主导波型, 轮廓孔面外 P 波的运动则不可忽略。

本次研究仅选取了 3 类典型爆破孔, 分析了因爆源特征不同而导致爆破地震波波型与组分的差异, 仍需开展其他不同爆破孔的研究, 同时下一阶段亟待探索更有效的波成分分离方法, 从而更清楚地研究不同波的传播与衰减规律。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 范勇, 卢文波, 周宜红, 等. 一种高地应力条件下爆破开挖诱发振动峰值的预测模型[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1082-1088.
FAN Yong, LU Wen-bo, ZHOU Yi-hong, et al. A model for predicting vibration peak induced by blasting excavation under high in-situ stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1082-1088.

[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 Wen-bo, LI Hai-bo, 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] 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 Jian-hua, YAO Chi, LU Wen-bo, 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.

[5] 李新平, 边兴, 罗忆, 等. 地下洞室边墙爆破振动传播衰减规律研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 2063-2069.
LI Xin-ping, BIAN Xing, LUO Yi, et al. Study on attenuation law of blasting vibration propagation of side wall of underground cavern[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 2063-2069.

[6] MCGARR A. Estimating ground motions for small nearby earthquakes[C]//*Seismic Design of Embankments and Caverns*. New York: ASCE, 1983: 113-127.

[7] 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.
LÜ Tao, SHI Yong-qiang, 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.

[8] 雷振. 台阶爆破振动效应非线性预测方法研究及应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
LEI Zhen. Research and application on nonlinear prediction methods of bench vibration effect[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2015.

[9] 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.

- [10] 罗学东, 范新宇, 代贞伟, 等. BP 神经网络模型在露天矿爆破振动参数预测中的应用及修正[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5019-5024.
- LU Xue-dong, FAN Xin-yu, DAI Zhen-wei, et al. BP neural network application and model modification in prediction of open-pit mine blasting vibration parameters[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2013, 44(12): 5019-5024.
- [11] 刘亚群, 李海波, 裴启涛, 等. 基于灰色关联分析的遗传神经网络在水下爆破中质点峰值振动速度预测研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 259-264.
- LIU Ya-qun, LI Hai-bo, PEI Qi-tao, et al. Prediction of peak particle velocity induced by underwater blasting based on the combination of grey relational analysis and genetic neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.1): 259-264.
- [12] DINDARLOO S R. Prediction of blast-induced ground vibrations via genetic programming[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2015, 25(6): 1011-1015.
- [13] 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 Jun-ru, LU Wen-bo, 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.
- [14] LI H, LI X, LI J, et al. Application of coupled analysis methods for prediction of blast-induced dominant vibration frequency[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2016, 15(1): 153-162.
- [15] DOWDING C H. Blast vibration monitoring and control[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1985.
- [16] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 18-27.
- GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YANG Zhao-wei, et al. Components and evolution laws of seismic waves induced by vertical-hole blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(1): 18-27.
- [17] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 170-182.
- GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YANG Zhao-wei, et al. Components and attenuation of seismic waves induced by horizontal smooth blasting[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2019, 39(8): 170-182.
- [18] 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.
- [19] GRAFF K F. Wave motion in elastic solid[M]. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- [20] ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solids[M]. New York: North-Holland Publishing, 1973.
- [21] HEELAN P A. Radiation from a cylindrical source of finite length[J]. **Geophysics**, 1953, 18(3): 685-696.
- [22] BLAIR D P. Seismic radiation from an explosive column[J]. **Geophysics**, 2010, 75(1): 55-65.
- [23] KUZMENKO A A, VOROBEEV V D, DENISYUK II, et al. Seismic effects of blasting in rock[M]. [S. l.]: [s. n.], 1993: 16-22.
- [24] FOTI S, LAI C, RIX G, et al. Surface wave methods for near-surface characterization[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [25] 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 Zhi-zhen, ZHU Chuan-zhen, HU Zuo-chun. Differences between explosions and earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1975, 18(3): 208-216.
- [26] KING M. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy[M]. Nick Barton: Taylor and Francis, 2007.
- [27] 李贤, 王文杰, 陈炳瑞. 工程尺度下微震信号及 P 波初至自动识别 AB 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 681-689.
- LI Xian, WANG Wen-jie, CHEN Bing-rui. AB algorithm suitable for identifying the microseismic signal and first arrival of P-wave automatically at the project scale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 681-689.
- [28] 张楚旋, 李夕兵, 董陇军, 等. 三函数四指标矿震信号 S 波到时拾取方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1650-1659.
- ZHANG Chu-xuan, LI Xi-bing, DONG Long-jun, et al. A S-wave phase picking method with four indicators of three functions for microseismic signal in mines[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 1650-1659.
- [29] 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 Zhao-wei, LU Wen-bo, GAO Qi-dong, et al. An S-wave phase picking method for blasting seismic waves and its application in engineering[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2018, 38(1): 28-36.