

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804088



弹性半空间球形药包爆破引起的 地表振动波形预测

刘小明¹, 陈士海^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 对球形爆源在弹性半空间内爆破引起地表质点的振动波形预测进行研究. 利用等效孔穴理论, 将球形药包的爆破简化为球腔压力源的作用, 推导出球腔压力源 $p(t)$ 作用下的等效震源强度函数; 然后对 Hoop 点源理论的位移解进行修改, 得到在球腔压力源 $p(t)$ 的作用下地表质点的振动位移和速度函数; 最后画出地表质点振动速度函数波形, 并对波形进行拟合. 根据萨道夫斯基公式和等效爆源强度函数, 构造一个与装药量直接相关且更为简洁的质点振动速度函数. 结果表明: 构造函数与理论解得到的波形非常吻合, 且验证了构造函数的适用性, 实现爆破振动波形预测.

关键词: 球形药包; 等效震源; 地表运动; 速度函数; 曲线拟合

中图分类号: TD 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)06-0826-06

Prediction of Vibration Waveform on Ground Caused by Elastic Semispace Spherical Charge Blasting

LIU Xiaoming¹, CHEN Shihai^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The prediction of vibration waveform of surface particles caused by spherical blasting source blasting is studied in elastic half space. The equivalent cavity theory is used to simplify the blasting of spherical charge to the action of spherical cavity pressure source, and the equivalent source intensity function under the action of spherical cavity pressure source $p(t)$ is deduced. The displacement solution of Hoop point source theory is modified to obtain the vibration displacement and velocity function of surface particles under the action of spherical cavity pressure source $p(t)$. The waveform of surface particle vibration velocity function is drawn and fitted. According to the sadosky formula and the equivalent explosive source strength function, a more concise particle vibration velocity function directly related to the explosive charge is constructed. The results are consistent well with the waveform obtained by theoretical solution. The applicability of concise function is verified, the prediction of blasting vibration waveform is realized.

Keywords: spherical charge; equivalent source; surface motion; velocity function; curve fitting

收稿日期: 2018-04-27

通信作者: 陈士海(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程的研究. E-mail: cshblast@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672112); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13BS402); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17013086024)

在工程爆破中,炸药爆炸所释放的能量不可能被完全利用,还有相当部分能量以振动波的形式在岩体中传播,造成周围岩体和地下结构的破坏.当振动波传播到地表时,还会对地表的建筑物造成破坏,这是造成爆破安全问题的主要原因.虽然国家对此制定了相关的爆破安全规程,但大多都是经验性或半经验性的,而且计算参数也非常单一.根据大量的工程实践可知,现有的爆破地表振动安全预测是不完全可靠的,在理论研究和工程应用方面都存在一定程度的不足.由于爆破振动时程波形蕴含丰富的爆破振动信号特征,爆破振动波形预测近些年来开始发展.实现了爆破振动波形的预测,就可以通过技术手段改变振动波形,进而根据预测与控制结果优化爆破参数,实现爆破安全作业. Sharpe^[1] 提出均匀弹性介质中爆炸震源等效孔穴模型,将爆破问题简化为弹性介质中的扰动问题;加拿大的 Favrean 弹性波理论模型^[2]以应力波理论为基础,给出质点速度关于时间和距离的函数.而在实际的工程中,自由面对爆破波的传播具有很大的影响^[3].对于半空间问题,最早的理论结果为 Lamb^[4] 提出的各向同性均匀弹性半空间表面突加荷载时的位移解. Achenbach^[5] 在 1973 年得出平面波在自由面反射的性质.目前,平面波的反射性质已经相当成熟了,而球面波在自由面的反射性质比较复杂,理论还不是很成熟,但也有部分学者用不同的方法对其进行了相关的研究. De-Hoop^[6] 对弹性半空间的点源进行研究,得到点源作用下自由面上质点的振动波形函数,即 Hoop 点源理论. 舍米亚金^[7] 用不完全分离变量法得到在球腔压力作用下自由表面上质点的运动时程曲线. Jiang 等^[8] 使用数值方法研究反射球面波的偏振与振幅特性. 同时, Jiang 等^[9] 还利用 Hoop 点源理论的无量纲化,将点源修改成球腔压力源,从而研究半空间中掩埋球形震源的动力响应.而近些年,研究爆破振动都是依托实际工程,对某一特定工况进行动力学模拟或直接对工程监测得到的波形进行分析^[10-13],或者对速度峰值或频率单一参数进行研究^[14-15],很少有学者对波形函数理论进行研究. 本文根据 Hoop 点源理论,推导球形药包等效震源函数和等效震源作用下的地表质点振动速度函数,构造一个更为简洁的地表质点振动速度函数.

1 球形药包等效震源强度函数

虽然研究的重点是自由面上质点的爆炸振动效应,但爆源是位于半空间介质内的,单独考虑爆源时,可以不考虑自由面边界的影响,故可以在无限介质讨论震源函数.

球形药包在岩石中爆破后,根据周围岩石破坏的程度,形成空腔区、破碎区、径向裂隙区和弹性区.根据等效孔穴模型,将球形药包的爆破等效为半径为 a 、压力为 $p(t)$ 的球腔压力源的作用,等效球腔压力源,如图 1 所示.

De-Hoop^[16] 推出的点源强度函数 $f(t)$ 与介质中质点的位移函数 $u_r(x, y, z, t)$ 的关系为

$$f\left(t-\frac{R}{v_p}\right)=4\pi R u_r(x, y, z, t).$$
 (1)

式(1)中: v_p 为 P 波的传播速度.

对于半径为 a 的球腔压力源, Achenbach^[5] 根据点源的关系式推出球形药包爆源强度函数 $f(t)$ 与介质中质点的位移函数 $u_r(x, y, z, t)$ 的关系式为

$$f\left(t-\frac{R-a}{v_p}\right)=4\pi R u_r(x, y, z, t).$$
 (2)

根据林大超等^[17] 的爆炸地震效应可知,球腔压力源产生的地震波的强迫振动方程为

$$h''(t)+2\xi\omega_0 h'(t)+\omega_0^2 h(t)=\zeta p(t).$$
 (3)

式(3)中: $\omega_0=\frac{2v_s}{a}$; $\xi=\frac{v_s}{v_p}$; $\zeta=-\frac{a}{\rho}$, a 为球腔半径, ρ 为介质密度.

取球腔压力 $p(t)=H(t)p_0\exp(-\alpha_0 t)$, 其中, $H(t)$ 为 Heaviside 单位阶跃函数, 将压力函数 $p(t)$ 代入强迫振动方程中, 可得

$$h(t)=\exp(-\xi\omega_0 t)[A\cos(\omega_d t)+B\sin(\omega_d t)]-\frac{ap_0\exp(-\alpha_0 t)}{(\omega_0^2-2\xi\omega_0\alpha_0+\alpha_0^2)\rho}.$$
 (4)

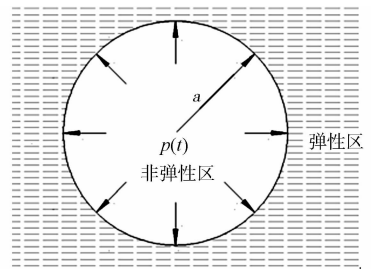


图 1 等效球腔压力源
Fig. 1 Equivalent pressure source of spherical cavity

根据波前的条件,当 $R \geq a + v_p t$ 时,位移函数和位移都为 0. 由于位移及位移函数的连续性要求,当 $t = \frac{(R-a)}{v_p}$ 时,位移函数和位移也应为 0,即

$$\phi(R,t) = \frac{h(0)}{R} = 0, \tag{5}$$

$$u(R,t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial R} = -\frac{h'(0)}{v_p R} - \frac{h(0)}{R^2} = 0. \tag{6}$$

由式(4)~(6)可得

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{ap_0}{(\omega_0^2 - 2\xi\omega_0\alpha_0 + \alpha_0^2)\rho}, \\ B &= A \frac{(\xi\omega_0 - \alpha_0)}{\omega_d}. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

$$h(\tau_1) = h\left(t - \frac{R-a}{v_p}\right) = A \exp(-\xi\omega_0\tau_1) \left[\cos(\omega_d\tau_1) + \frac{\xi\omega_0 - \alpha_0}{\omega_d} \sin(\omega_d\tau_1) \right] - A \exp(-\alpha_0\tau_1). \tag{8}$$

式(8)中: $\tau_1 = t - \frac{(R-a)}{v_p}$; $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$.

球形药包等效震源强度函数为

$$f\left(t - \frac{R-a}{v_p}\right) = 4\pi R \left[-\frac{1}{v_p R} \frac{\partial h(\tau_1)}{\partial R} - \frac{h(\tau_1)}{R^2} \right]. \tag{9}$$

2 自由面质点振动效应

半空间介质的密度为 ρ ,杨氏模量为 E ,泊松比为 ν . 自由面位于 $z=0$ 平面上,球形药包位于 z 轴上,震源在 $t=0$ 时开始作用. 在均匀、各向同性的弹性半空间内,自由面以下深 h 处有一个球形药包,根据节 1,可将球形药包爆破等效为球腔压力源作用. 半空间中的球腔压力源,如图 2 所示. 图 2 中: r, R 分别为地表质点 $B(x, y, 0)$ 到原点,震源的距离.

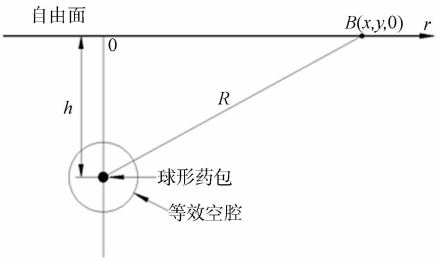


图 2 半空间中的球腔压力源
Fig. 2 Pressure source of spherical cavity in semispace

De-Hoop^[6]推导出在点源作用下自由面上质点 $(x, y, 0)$ 的位移函数 $u(x, y, 0, t)$,根据点源与球腔压力源能量传播到自由面质点的时间、源函数的不同,将球腔压力源用 $\frac{(R-a)}{v_p}$ 代替 $\frac{R}{v_p}$ 的点爆源解法求解,并将点源强度函数改为节 1 得到球形药包等效的震源函数.

在球腔压力源作用下,地表质点振动的位移函数为

$$\left. \begin{aligned} u_r(x,y,0,t) &= \int_{\frac{(R-a)}{v_p}}^t f''(t-\tau) g_r(x,y,0,\tau) d\tau, & \frac{R-a}{v_p} \leq t \leq \infty, \\ u_z(x,y,0,t) &= \int_{\frac{(R-a)}{v_p}}^t f''(t-\tau) g_z(x,y,0,\tau) d\tau, & \frac{R-a}{v_p} \leq t \leq \infty. \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式(10)中: $f(t)$ 为节 1 所求的球形药包等效震源强度函数; $g(x, y, 0, t)$ 为格林函数,其分量的表达式为

$$\left. \begin{aligned} g_r(x,y,0,\tau) &= \frac{1}{\pi^2 R} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{Re}(w_r \gamma_p) d\Psi, \\ g_z(x,y,0,\tau) &= \frac{1}{\pi^2 R} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{Re}(w_z \gamma_p) d\Psi. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式(11)中: $w_r = \frac{p\gamma_s}{2v_s^2\eta}$, $w_z = \frac{p^2 - (q^2 + \frac{1}{2v_s^2})}{2v_s^2\eta}$; $\eta = [q^2 + \frac{1}{2v_s^2} - p^2]^2 + (p^2 - q^2)\gamma_p\gamma_s$; $\gamma_{p,s} = [q^2 + 1/v_{p,s}^2 - p^2]^{1/2}$; $\text{Re}(\gamma_{p,s}) \geq 0$, $q(\Psi) = \frac{1}{R} \left(\tau^2 - \frac{(R-a)^2}{v_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \Psi$, $0 \leq \Psi \leq \pi/2$; $p(\Psi) = (\frac{r}{R^2})\tau + i(\frac{h}{R^2})(\tau^2 -$

$$\frac{(R-a)^2}{v_p^2})^{1/2} \cos \Psi, 0 \leq \Psi \leq \pi/2.$$

P 波的传播速度 $v_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$; S 波的传播速度 $v_s = \sqrt{\mu/\rho}$. 故球形药包爆破引起的地表质点的速度分量为

$$\left. \begin{aligned} v_r(t) &= f''(0)g_r(t) + \int_{\frac{(R-a)}{v_p}}^t f'''(t-\tau)g_r(\tau)d\tau, \\ v_z(t) &= f''(0)g_z(t) + \int_{\frac{(R-a)}{v_p}}^t f'''(t-\tau)g_z(\tau)d\tau. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

3 波形拟合及函数构造

假设一个装药量为 0.42 kg, 药包半径为 0.045 m 的球形药包在埋深 2 m 的岩石中爆破. 岩石的密度为 $2\,350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 18 GPa, 泊松比为 0.25. 数据分析计算结果表明^[18]: 较硬岩石空腔区、破碎区、径向裂隙区半径分别为装药半径的 1.33, 2.97 和 22.7 倍. 因爆破地震波是经过破碎区、径向裂隙区滤波后的波的传播, 故球腔压力源半径为爆破形成的非弹性区半径, 即为药包半径(d)的 22.7 倍. 因此, 球形非弹性区的半径 $a = 22.7 \times d$, 即球腔压力源半径为 1.021 5 m.

球腔压力为 $p(t) = H(t)p_0\exp(-\alpha_0 t)$, 其中: p_0 为非弹性与弹性界面的峰值压力; 而 α_0 为衰减系数. 峰值压力可由 $p_0 = \frac{p_m}{\bar{r}^n}$ 计算得出, 其中: p_m 为岩石与炸药界面处的压力, $p_m = k p_h$, k 为透射系数, $k = 2 \frac{\rho_0 c_p}{\rho_0 c_p + \rho D}$, ρ_0, c_p 分别为岩石密度与声速, ρ, D 分别为炸药密度和爆轰速度, p_h 为爆轰压力, $p_h = \frac{\rho D^2}{4}$; \bar{r} 为相对距离, $\bar{r} = \frac{R}{R_0}$, R 为爆源距离, R_0 为装药半径; n 为衰减指数.

爆破时使用的炸药为乳化炸药, 密度为 $1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 爆速为 $3\,600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 对破裂区, 裂隙性发育, 同时考虑粉碎区的强衰减, 可取 $n = 2.2$. 故可得球腔压力峰值 $p_0 = 5.6\text{ MPa}$, 取衰减系数 $\alpha = 2\,000$. 已知压力 $p(t)$ 后, 可根据式(9)得到等效震源函数 $f(t)$.

选取距药包水平距离 $r = 10\text{ m}$ 处的 B 点, 根据得到的等效震源函数 $f(t)$ 和式(10)~(12), 可计算出地表质点 B 点处水平、垂直方向上的速度波形, 分别如图 3, 4 所示.

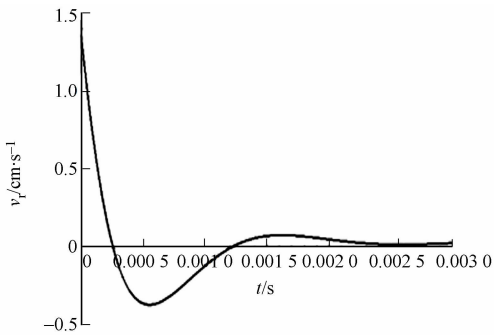


图 3 水平方向上的速度波形

Fig. 3 Velocity waveform of horizontal component

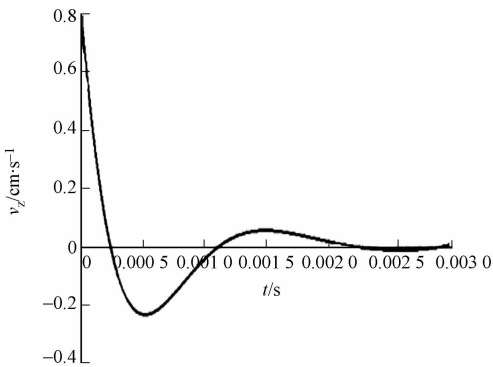


图 4 垂直方向上的速度波形

Fig. 4 Velocity waveform of vertical component

根据式(8)的形式, 对于地表振动波形的拟合式为

$$v(t) = a_1 e^{-b_1 t} [\cos(c_1 t) + d_1 \sin(c_1 t)]. \tag{13}$$

式(13)中: a_1, b_1, c_1 和 d_1 为需要拟合的系数. 分别对垂直方向和水平方向上的速度波形进行拟合, 系数如表 1 所示. 再将理论解得到的速度波形与拟合得到的速度波形进行对比, 拟合效果相当吻合. 水平、垂直方向上的速度波形, 分别如图 5, 6 所示. 由图 5, 6 可知: 拟合函数的形式(式(13))是

表 1 函数拟合系数

Tab. 1 Function fitting coefficient

速度	a_1	b_1	c_1	d_1
v_r	1.32	2 381	3 326	-0.89
v_z	0.72	2 336	3 513	-0.93

正确的. 分别对 $r=5, 15$ m 处的波形进行拟合, 根据拟合系数变化的规律, 可以将式(13)中系数与萨道夫斯基公式和等效震源函数式(8)中的系数联系起来, 函数构造为

$$v(t) = k\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha} \exp\left(-\frac{\xi\omega_0 + \alpha_0}{2}t\right) [\cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)].$$

(14)

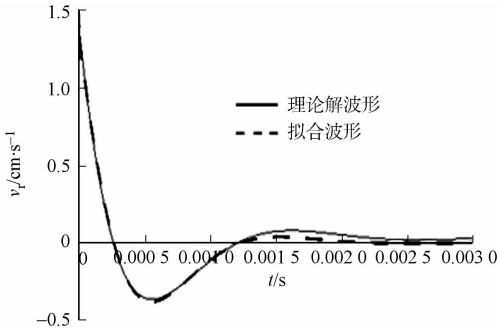


图 5 水平方向的速度对比图

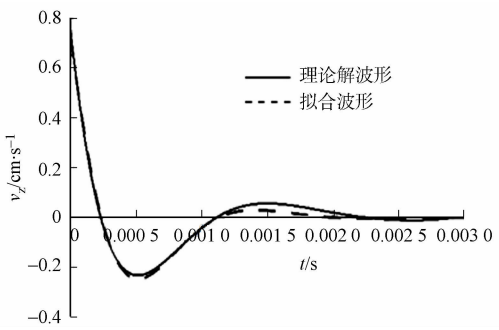


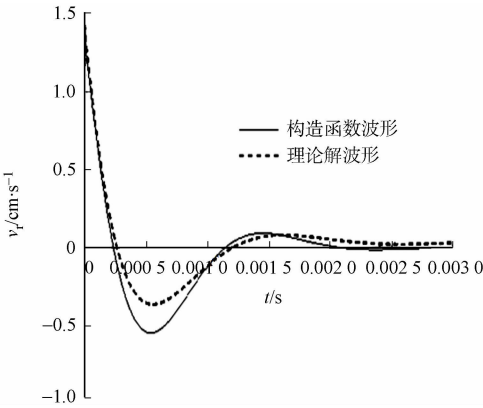
图 6 垂直方向的速度对比图

Fig. 5 Comparison of velocity of horizontal component Fig. 6 Comparison of velocity of vertical component
式(14)中; Q 为装药量,kg; k, α 为与岩土特性有关的系数, $k=30\sim70, \alpha=1\sim2$.

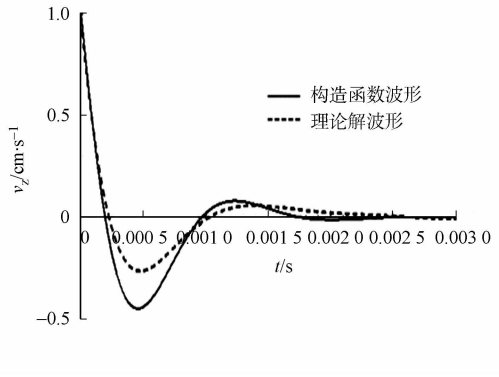
取 $k=50, \alpha=1.4$, 由式(14), 得出在 $r=10$ m 处的波形图. 因为爆破安全规程中的质点允许振速为水平和垂直方向中的较大值, 故将构造函数得到的波形与速度振幅较大的速度波形进行对比, 对比图如图 7(a)所示.

由图 7(a)可知: 由构造的速度函数得到的波形与由理论解得到的波形较为一致, 峰值、频率比较接近. 为验证构造函数适用性, 对比不同性质的岩石对理论解和构造函数. 假设一个装药量为 0.576 kg, 药包半径为 0.05 m 的球形药包在埋深 3 m 的岩石中爆破. 岩石的密度为 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 38 GPa, 泊松比为 0.2. 爆破使用的炸药为乳化炸药, 密度为 $1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 爆速为 $3\,600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 对破裂区, 裂隙性发育, 同时考虑粉碎区的强衰减, 可取 $n=2.2$. 故可得球腔压力峰值 $p_0=5.68\text{ MPa}$, 取衰减系数 $\alpha=2\,000$.

取 $k=45, \alpha=1.5$, 得出在 $r=10$ m 处的构造函数波形图. 因爆破安全规程中的质点允许振速为水平和垂直方向中的较大值, 故将构造函数得到的波形与振幅较大的水平方向上的速度波形进行对比, 对比图如图 7(b)所示. 由图 7(b)可知: 构造的速度函数得到的波形与理论解波形较为相似; 构造函数具有一定的适应性.



(a) $k=50, \alpha=1.4, r=10$ m



(b) $k=45, \alpha=1.5, r=10$ m

图 7 理论解与构造函数速度波形对比图

Fig. 7 Comparison between theoretical solution and constructed function velocity waveform

4 结束语

根据等效震源强度函数和 Hoop 点源理论, 推导出在球腔压力源 $p(t)$ 作用下弹性介质中球形药包

爆破引起的地表振动波形函数,并根据震源强度函数形式构造拟合函数形式,再对不同爆心距处的理论解波形进行拟合.将拟合系数与萨道夫斯基公式和等效震源强度函数中的系数建立联系,构造一个更为简洁的地表质点振动速度函数,用不同岩性的岩石,对构造函数的适用性进行验证.由于研究的是弹性介质,与实际介质有所差别,还需进一步深入研究,以达到运用到实际工程的要求.

参考文献:

- [1] SHARPE J A. The production of elastic waves by explosion pressure [J]. *Geophysics*, 1942(S2):144-154. DOI:10.1190/1.1445002.
- [2] 杨军,金乾坤,黄风雷.岩石爆破理论模型及数值计算[M].北京:科学出版社,1999.
- [3] BLAIR D P. The free surface influence on blastvibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77:182-191. DOI:10.1016/j.ijrmms.2015.04.006.
- [4] LAMB H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1904, 72(477-486):128-130. DOI:10.1098/rspl.1903.0029.
- [5] ACHENBACH J D. Wave propagation in elastic solid[M]. Amsterdam:North-Holland, 1973.
- [6] DE-HOOP A T. Theoretical determination of the surface motion of a uniform elastic half-space produced by a dilatational, impulsive, point source[C]// *La Propagation des Ebranlements Dans Les Milieux Hétérogènes*. Marseille: Colloques Internationaux du CNRS, 1961:21-32.
- [7] 舍米亚金 Е И. 弹塑性理论的动力学问题[M]. 戚承志,译.北京:科学出版社,2009.
- [8] JIANG Jinjun, BAIRD G, BLAIR D. Polarization and amplitude attribute of reflected plane and spherical waves[J]. *Geophy*, 1998, 132:577-583. DOI:10.1046/j.1365-246X.1998.00479.x.
- [9] JIANG Jinjun, BAIRD G, BLAIR D. Dynamic response of a half-space to a buried spherical source[J]. *Geophy*, 1994, 119:753-765. DOI:10.1111/j.1365-246X.1994.tb04014.x.
- [10] 楼矗云,刘军,蓝鹏.基于样条插值的爆破振动时域波形预测方法[J]. *工程爆破*, 2017, 23(2):24-31. DOI:10.3969/j.issn.1006-7051.2017.02.005.
- [11] 李洪梅,王小委,耿大新.爆破振动下地表建筑物振动位移研究[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(6):38-44. DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.06.004.
- [12] 张震,周传波,路世伟,等.超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017(8):2119-2125. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2017.08.020.
- [13] 张在晨,林从谋,黄志波,等.爆破振动特征参量的 BP 小波预测[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(1):77-81. DOI:1000-5013(2013)01-0077-05.
- [14] 张晏,郭连军,张大宁.不同岩体条件下爆破振动衰减规律研究[J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(9):97-99. DOI:10.13827/j.cnki.kyyk.2015.09.023.
- [15] 卢文波,周俊汝,陈明,等.爆破振动主频衰减公式研究[J]. *工程爆破*, 2015, 21(6):1-6. DOI:1006-7051(2015)06-0001-06.
- [16] DE-HOOP A T. A modification of cagniard's method for solving seismic pulse problems[J]. *Appl Sci Res*, 1960, 8(1):349-356. DOI:10.1007/BF02920068.
- [17] 林大超,白春华.爆炸地震效应[M].北京:地质出版社,2007:131-132.
- [18] 陈士海,逢焕东.爆破灾害预测与控制[M].北京:煤炭工业出版社,2006:6-12.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)