

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809005



爆破振动震源荷载函数的确定

刘小鸣¹, 陈士海^{1,2}, 胡帅伟¹

(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: 为研究集中装药爆炸作用下的爆破振动的震源荷载函数,提出确定装药爆破破坏区发展的动力学计算简图.通过爆破振动震源荷载的理论计算公式,讨论炸药类型、岩石性质对震源荷载特性的影响.结果表明:不同炸药类型和岩石性质的震源荷载曲线形状差别不大,在相同的装药条件下,对于同一种岩石,岩石震源荷载峰值随着弹性模量的增大而减小,随着内摩擦角和黏聚力的增大而增大;震源荷载作用的衰减速度随着黏聚力的增大而加快,但内摩擦角对震源荷载的衰减影响较小;常见的指数衰减型函数能很好地拟合理论计算结果,证明文中震源荷载计算结果的可靠性.

关键词: 爆破振动; 爆破; 震源荷载; 破坏区

中图分类号: TD 23 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)02-0172-07

Determination of Blasting Vibration Source Load Function

LIU Xiaoming¹, CHEN Shihai^{1,2}, HU Shuaiwei¹

(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: In order to study the source load function of blasting vibration caused by concentrated charge explosion, a simplified dynamic calculation diagram was presented to determine the development of the blasting damage zone. Based on the theoretical calculation formula of the blasting vibration source load, and the influence of explosive types and rock properties on the blasting vibration source load characteristics was discussed. The calculation results show that the shapes of the source load curves of different explosive types and rock properties are similar. Under the same charging conditions, for the same rock, the peak value of source load decreases as the elastic modulus of rock increases, but increases as the internal friction angle and cohesion of rock increase; the attenuation of source load increases as the cohesion increases, but the internal friction angle has little effect on the attenuation of source load. The common exponential decay function can fit the calculation results well, which proves the reliability of the calculation results of the source load.

Keywords: blasting vibration; blasting; vibration source load; damage zone

工程爆破在人类生产活动中,特别是在岩土开挖工程中,具有不可替代的作用,已广泛地应用于城镇改扩建工程、城市地铁建设、隧道工程等众多重大工程建设领域中.但随着爆破环境的复杂化、人们环

收稿日期: 2018-09-05

通信作者: 陈士海(1964-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事岩土与地下工程的研究. E-mail: cshblast@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672112); 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室开放课题资助项目(DPMEIKF201307); 华侨大学高层次人才科研启动项目(13BS402)

保和法制意识的增强, 爆破振动造成的结构损坏事件及周围居民的投诉事件屡有发生, 损失惨重. 因此, 在实施爆破作业时, 爆破振动安全的控制成为突出问题^[1-2]. 为充分研究爆破地震的预测与爆破振动的响应, 需明确爆破振动震源的物理特征. Sharpe^[3]研究无限大、均匀且弹性介质中的球形空腔受爆炸压力作用的问题. Duvall^[4]研究粘弹性介质的球形空穴爆炸振动, 得到与实验记录波形吻合较好的结果. Blake^[5]研究在无限介质中, 点源爆炸对脉冲压力、球面波的传播和介质结构的影响, 指出爆炸产生的应力脉冲在记录中是一个高阻尼振荡波列, 它的特征与介质的物理性质、空穴大小和炸药特性密切相关. De Hoop^[6]研究在半无限空间中的临近地表的脉冲式点源, 并提出相关的点源理论. 丁桦等^[7]利用点源矩和等效孔穴理论研究爆破震源等效模型, 认为爆破振动主要来源于爆破后的爆破区邻近范围内的地质结构的自振. 陈士海等^[8]建立岩石介质的爆炸变形与破坏模型, 研究岩石爆破破坏界面上的应力时程. 许红涛等^[9]在 C-J 爆轰条件的基础上, 讨论并得到不同不耦合系数下的爆破荷载峰值的压力计算公式. Triviño 等^[10]在不同爆轰方向上, 研究爆破振动波的速度与频率衰减关系. Blair^[11]从柱状炸药的长度、爆轰速度及地震波在层状介质中的传导等方面对柱状药包爆破展开研究. 此外, Rodriguez-martínez 等^[12]建立球形空腔扩张的数值模拟模型, 并引入 Hubere-Mises 准则, 系统地研究在无限介质中, 复杂本构关系下的冲击波响应. Katzir 等^[13]在可压缩理想弹塑性介质中, 研究得到球形空腔扩张的动力近似解. 高富强等^[14]采用量纲分析, 建立爆破振动主频与爆心距、药量等主要影响因素的函数关系式. 刘小明等^[15]利用等效孔穴理论和 Hoop 点源理论, 研究球形空腔压力作用下的地表振动响应. 由于上述研究成果大多是将爆破震源等效为时间关系荷载, 在等效荷载的基础上, 研究爆破振动的传播, 并没有直接建立炸药爆炸与其围岩介质相互作用的动力学过程, 缺乏研究炸药量、炸药类型及岩石性质对震源荷载和振动特性的影响. 因此, 本文将采用岩石动力学、爆炸动力学理论, 结合现有岩石爆炸动力学的试验研究和理论研究成果, 研究炸药爆炸与其围岩介质相互作用的过程, 确定岩石介质在爆炸作用下产生的破坏区、弹性振动区的变形与破坏特征, 并建立球状装药爆破破坏区发展的动力学计算模型; 通过给出与装药量、岩石性质等有关的球状装药爆破振动震源荷载函数, 讨论炸药类型和岩石性质对震源荷载特性的影响.

1 装药爆破破坏区分区模型

根据装药围岩破坏的程度, 装药爆炸对岩石作用后, 将形成空腔区、破碎区和弹性区, 其中, 弹性区又分为径向裂隙区和弹性振动区, 如图 1 所示. 图 1 中: a , b , c 分别为空腔区与破碎区交界面的半径, 破碎区与径向裂隙区交界面的半径, 径向裂隙区与弹性振动区交界面的半径, a , b , c 均为关于时间 t 的函数.

破碎区的特征是介质受到爆炸的挤压形成松散材料; 径向裂纹区的特征是介质受到裂缝的破坏, 形成类似径向柱杆, 丧失环向承载力, 它的作用主要是把破碎带传来的压力过渡到弹性区介质中去; 弹性振动区的特征是具有原始性质的弹性介质. 在爆破时, 地震波的传播是先经过破碎区, 再传到径向裂隙区.

在震源的研究中, 应涉及炸药爆炸产物高压膨胀与岩体的相互作用、空腔壁在爆生气体的作用下不断膨胀与收缩的脉冲过程、破坏区范围大小及破坏与弹性振动区交界面上的应力时程等问题的分析, 而震源荷载的确定是爆破振动效应研究中最基础的工作.

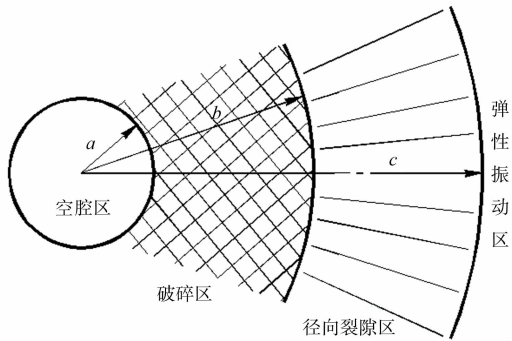


图 1 爆破破坏分区

Fig. 1 Partition of blasting damage zones

2 震源荷载的确定

2.1 空腔区

假设在无限弹性介质中, 在半径为 a_0 的球形空腔中装药爆炸, 爆炸腔室内的气体压力按照变性的 Jonse-Miller 绝热曲线计算^[16], 即

$$p(a)=\begin{cases} p_0\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3\gamma_1}, & a\leqslant a^*, \\ p_0\left(\frac{a^*}{a_0}\right)^{-3\gamma_1}\left(\frac{a}{a^*}\right)^{-3\gamma_2}, & a\leqslant a^*. \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中: a^* 为临界膨胀半径; a_0 为装药的半径; a 为膨胀空腔半径; p_0 为炸药爆炸压力,对于一种烈性炸药(TNT)而言, $p_0=10\text{ GPa}$; $\gamma_1=3$; $\gamma_2=1.27$; $\frac{a^*}{a_0}=1.53$.

2.2 破碎区

在靠近装药的破碎区中,采用松散介质的运动方程式,对于中心对称的一维情况^[17],可得

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial r}\right)=\frac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\frac{2(\sigma_r-\sigma_\theta)}{r}. \tag{2}$$

式(2)中: ρ 为介质的密度; V 为径向质点速度; σ_r, σ_θ 分别为径向应力和环向应力.

在破坏区内,径向应力和环向应力满足摩尔库伦强度准则,即

$$\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{2}=C\cdot\cos\phi+\frac{\sigma_r+\sigma_\theta}{2}\sin\phi. \tag{3}$$

式(3)中: C, ϕ 分别为介质的黏聚力和内摩擦角.

当爆炸腔室膨胀时,中心对称问题的主应力中有

$$(1+\alpha)\sigma_\theta-\sigma_r-Y=0. \tag{4}$$

式(4)中: $Y=\frac{2C\cdot\cos\phi}{1-\sin\phi}; \alpha=\frac{2\sin\phi}{1-\sin\phi}.$

介质体积变形与剪切变形间的简单关系^[18] 为

$$\dot{\epsilon}=\psi\dot{\chi}. \tag{5}$$

式(5)中: ψ 为膨胀系数; $\dot{\chi}$ 为剪切变形; $\dot{\epsilon}$ 为体积变形.

由此得出膨胀的条件为

$$\frac{\partial V}{\partial r}+2\frac{V}{r}=\psi\left(\frac{V}{r}-\frac{\partial V}{\partial r}\right). \tag{6}$$

考虑介质密度 ρ 的变化对解答的影响很小,可认为 ρ 是一个常数. 根据破坏区的膨胀条件和球腔膨胀的边界条件可以得出

$$V(r,t)=\frac{\dot{a}(t)a^n}{r^n}. \tag{7}$$

式(7)中: \dot{a} 为空腔表面的膨胀速度; $n=\frac{2-\psi}{1+\psi}$. 球腔膨胀的边界条件为 $V|_{r=a,t}=\dot{a}(t)$.

将式(4)中的 σ_θ 代入式(2)中,并对 r 进行积分,结合式(7)得到破坏区的通解为

$$\sigma_r=\frac{Y}{\alpha}+\rho\left[\frac{S_1(\dot{a}a^n)'_t}{r^{n-1}}-\frac{nS_2(\dot{a}a^n)^2}{r^{2n}}\right]+G(t)r^{\frac{-2\alpha}{1+\alpha}}. \tag{8}$$

式(8)中: $S_1=\frac{1+\alpha}{(3-n)\alpha+(1-n)}$; $S_2=\frac{1+\alpha}{2\alpha(1-n)-2n}$; $G(t)$ 为任意时间函数.

破碎区在空腔壁上的应力边界条件为 $r=a(t), \sigma_r(a)=-p(a)$,其初始条件为 $t=0, \sigma_r=-p_0, r=a_0$. 带入边界条件,并求解式(8),可得

$$G(t)=\left[-p(a)-\frac{Y}{\alpha}-\rho\left(\frac{S_1(\dot{a}a^n)'_t}{a^{n-1}}-nS_2\dot{a}^2\right)\right]a^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}}. \tag{9}$$

联立式(8),(9),则破碎区内径向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{Y}{\alpha} + \rho\left(S_1\frac{\ddot{a}a^n + na^{n-1}\dot{a}}{r^{n-1}} - nS_2\frac{\dot{a}^2a^{2n}}{r^{2n}}\right) - \\ & \left[p(a) + \frac{Y}{\alpha} + \rho(S_1(\ddot{a}a + n\dot{a}^2) - nS_2\dot{a}^2)\right]\left(\frac{a}{r}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}}. \end{aligned} \tag{10}$$

2.3 径向裂隙区

径向裂隙区的特点是介质受到径向裂缝破坏,失去环向承载能力($\sigma_\theta=0$),但径向仍具有弹性. 由于

径向裂缝区的精确动力条件对解的影响不大,径向裂缝区介质的惯性效应可不作考虑,所以可用准静力的方法研究径向裂隙区.

平衡微分方程可以简化为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\sigma_r}{r} = 0. \tag{11}$$

由式(11)可得, $\sigma_r=C_0/r^2$,其中, C_0 为解中带常数. 在径向裂隙区内边界上满足式(4),由边界条件 $\sigma_r(b)=-Y$ 可得, $C_0=-Yb^2$,则径向裂隙区应力为

$$\sigma_r=-Y\frac{b^2}{r^2}. \tag{12}$$

根据爆炸破碎区与径向裂隙区应力连续的边界条件 $\sigma_r(b-0)=\sigma_r(b+0)$,可得

$$p(a)=\rho R_1\ddot{a}a+\rho(R_1-R_2)n\dot{a}^2+R_3. \tag{13}$$

式(13)中: $R_1=-S_1\left[1-\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{S_1}}\right]$; $R_2=-S_2\left[1-\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{S_2}}\right]$; $R_3=-\frac{Y}{\alpha}+\left(\frac{Y}{\alpha}+Y\right)\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}}$.

在爆炸过程中,破碎区内和径向裂隙区内的位移,可由介质不可压缩条件 $r^3-a_0^3=(r-u_r)^3-a^3$ 来获得. 在 $u_r\ll r$ 时,破碎区位移有近似解,即

$$u_r=\frac{a^3}{3r^2}. \tag{14}$$

2.4 弹性震动区

采用准静力的方法研究弹性区,可采用弹性力学进行求解. 在球对称情况下,半径为 c 的径向裂隙区与弹性区交界面上压力 $q=Yb^2/r^2$ 的作用下,弹性区解^[19]为

$$\sigma_r=-Y\frac{b^2c}{r^3}, \quad \sigma_\theta=Y\frac{b^2c}{2r^3}. \tag{15}$$

弹性震动区位移为

$$u_r=\frac{Y(1+\nu)}{2E}\frac{b^2c}{r^2}. \tag{16}$$

根据在弹性震动区与径向裂隙区交界面上的位移连续条件 $u_r(c-0)=u_r(c+0)$,可得空腔区与破碎区交界面的半径(a)与径向裂隙区与弹性震动区交界面的半径(c)的关系为

$$\frac{a^3}{3c}=\frac{Y(1+\nu)}{2E}b^2. \tag{17}$$

式(17)中: ν 为泊松比; E 为弹性模量.

在弹性震动区与径向裂隙区交界面上,环向应力达到岩石的单轴抗拉强度,即 $\sigma_\theta(c)=\sigma_t$,可得

$$\frac{b^2}{c^2}=2\frac{\sigma_t}{Y}. \tag{18}$$

根据式(17),(18),可得

$$\frac{a^3}{b^3}=3\frac{Y(1+\nu)}{2E}\sqrt{\frac{Y}{2\sigma_t}}. \tag{19}$$

联立式(13),(18),(19),可计算得到 a,b,c 和 p_b,p_c . 其中, p_b 为破碎区与径向裂隙区交界面上的压力; p_c 为径向裂隙区与弹性区交界面上的压力.

3 实例与分析

3.1 界面压力时程曲线

假设装药半径为 0.05 m 的球形 TNT 在花岗岩中爆炸,取如下岩石基本参数值:弹性模量为 62 GPa;密度为 2 600 kg·m⁻³;泊松比为 0.22;岩石动态单轴抗拉强度为 20 MPa;内聚力为 30 MPa;内摩擦角为 50°.

取界面 I 为破碎区与径向裂隙区的交界面,界面 II 为径向裂隙区与弹性震动区的交界面,绘制出的界面压力时程曲线,如图 2 所示. 图 2 中: t 为时间; p 为界面压力. 由图 2 可知:界面 I, II 的应力迅速上

升到最大值,然后单调地减小到最小值,但界面Ⅰ上的应力衰减得更快。

3.2 震源荷载函数的合理性分析

目前,在国内外的实际工程应用中,震源荷载多半采用半理论半经验的指数衰减型荷载、三角形荷载^[3-4],或者采取与弦函数组合的形式^[20],这些荷载形式大多基于现场试验和数值模拟,且已被工程爆破界广泛认可。

在爆炸过程中,大部分的爆炸能被消耗在非弹性变形区。因此,文中将炮孔破碎区和裂隙区视为爆破振动源,径向裂隙区与弹性振动区分界面上的压力视为震源荷载。对上述的理论计算结果,采用已被广泛认可的指数衰减函数、弦函数等 3 种形式进行曲线拟合,得到分界面上压力时程曲线,如图 3 所示。

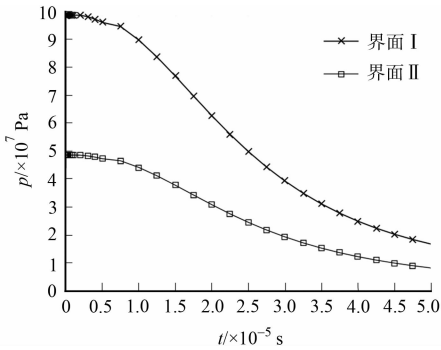


图 2 界面压力时程

Fig. 2 Time history curve of pressure on interface

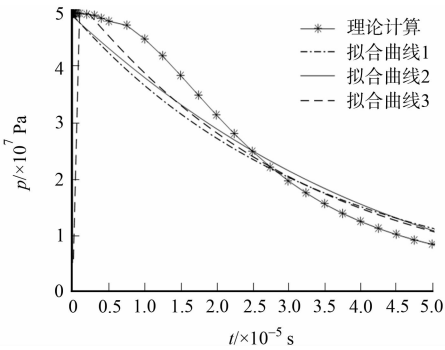


图 3 拟合波形曲线

Fig. 3 Fitted curve of blast waveform

1) 拟合曲线 1 的理论计算式为

$$p_c(t) = A_0 \exp(\alpha_0 t) = 4.84 \times 10^7 \exp(-6\,442.74t).$$
 (20)

2) 拟合曲线 2 的理论计算式为

$$p_c(t) = A_0 \cos(\omega t) \exp(\alpha_0 t) = 4.81 \times 10^7 \cos(-14\,687t) \exp(-24\,013t).$$
 (21)

3) 拟合曲线 3 的理论计算式为

$$p_c(t) = A_0 t^n \exp(\alpha_0 t) = 5.82 \times 10^7 t^{0.008\,237} \exp(-3\,246t).$$
 (22)

由图 3 可知:在理论计算的时程压力曲线中,界面压力突然上升到最大值,然后,按指数衰减到零;3 条拟合曲线与理论计算曲线具有良好的一致性,证明文中爆炸震源荷载计算理论的可靠性和简单方便性,同时,也揭示爆破震源的机制。

3.3 主要爆源参数对震源荷载的影响分析

为探索不同炸药类型、岩石性质等对震源荷载峰值、荷载作用上升和下降时间等规律的影响,取不同爆源参数进行计算,得到爆破径向裂隙区与弹性振动区分界面上的震源荷载时程曲线,如图 4 所示。图 4 中: E 弹性模量; C 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角。

3.3.1 不同炸药类型的影响 不同的炸药类型表现为爆破孔壁压力峰值($p_0 = \rho_0 D^2 / 8$)不同, ρ_0, D 分别为炸药密度和爆速。取相同装药量的乳化炸药、硝铵炸药分别进行计算,并与 TNT 炸药比较。乳化炸药和硝铵炸药的密度分别取 $1\,400, 1\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,炸药爆速分别取 $4\,200, 3\,200\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图 4(a)可知:炸药类型对荷载峰值的影响较为明显,对峰值荷载作用上升和下降时间的影响较小。这是由于炸药密度和炸药爆速越大,炸药烈性越强,导致炸药在不同部位的能量释放时间越集中,荷载峰值越大。

3.3.2 岩石性质的影响 为研究岩石性质对震源荷载峰值、荷载作用时间等规律的影响,改变岩石的弹性模量、黏聚力和内摩擦角分别计算爆破震源荷载时程。由图 4(b)~(d)可知:岩石性质对荷载峰值的影响较为明显,其中岩石的黏聚力影响最大。

在装药相同的条件下,对于同一种岩石,岩石弹性模量越大,其荷载峰值越小。根据弹性模量的定义分析,岩石的弹性模量越大,岩石越难被破坏,故需要更多的能量用来破坏岩石,从而传播到径向裂隙区与弹性振动区分界面的能量越少,导致荷载峰值越小。

在装药相同的条件下,对于同一种岩石,岩石内摩擦角和黏聚力越大,震源荷载峰值越大。由于岩石

黏聚力对峰值荷载作用下降时间影响巨大,黏聚力越大,峰值荷载下降得越快;而岩石内摩擦角对震源荷载的衰减影响较小.这是因为文中是依据摩尔库伦强度准则进行计算的,由于岩石的抗剪切强度 $\tau=c+\sigma\cdot\tan\phi$ 直接决定界面压力,粘聚力和内摩擦角越大,岩石的剪切强度越大,故内摩擦角和黏聚力越大,其荷载峰值越大;强度较大的岩石聚集的能量较多,岩石破碎时,释放能量的速率也较快;此外,相对于内摩擦角,岩石的粘聚力对岩石的剪切强度影响更大,故黏聚力越大,峰值荷载下降得越快,而内摩擦角则对震源荷载的衰减影响较小.

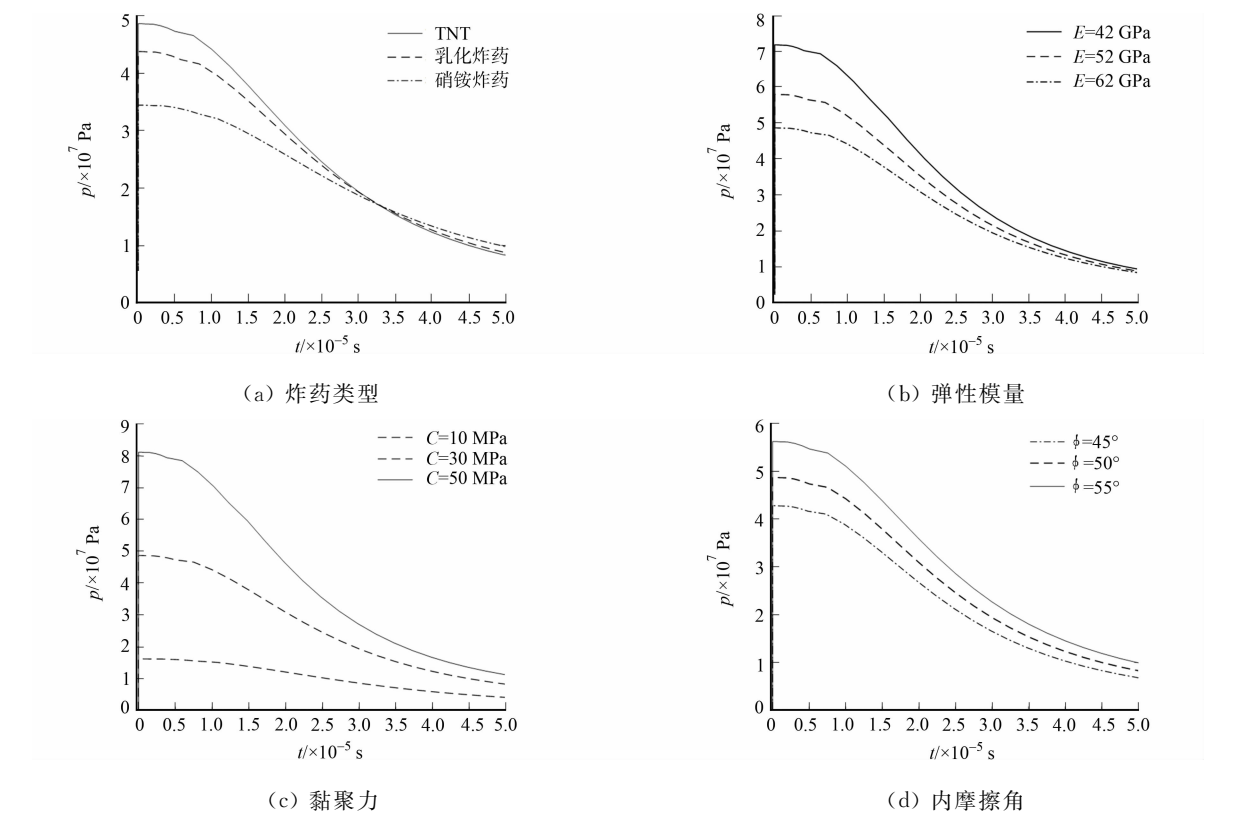


图 4 不同爆源参数下的震源荷载时程

Fig. 4 Time history curve of vibration source load for different explosion source parameters

4 结论

根据岩石爆破变形与破坏特征,利用空腔膨胀理论,结合岩石准静力的破坏条件,推导集中装药爆破条件下的爆破破碎区、径向裂隙区和弹性震动区半径的计算公式,给出爆破振动震源荷载函数,并讨论炸药类型和岩石性质对震源荷载特性的影响规律,得到以下 3 点主要结论.

- 1) 将炮孔破碎区和裂隙区视为爆破振动源,径向裂隙区与弹性震动区分界面上的压力视为震源荷载.爆破震源荷载在极短的时间内上升到最大值,然后单调地减小到最小值.
- 2) 采用常见的指数衰减型函数和弦函数曲线可以很好地拟合出震源荷载曲线,证明文中计算爆炸震源荷载的方法是可靠的.
- 3) 炸药类型和岩石性质对震源荷载特性的影响分析表明:炸药类型对荷载峰值影响较为明显,密度和炸药爆速越大,炸药烈性越强,相同装药量爆炸时的震源荷载越大;岩石弹性模量越大,其荷载峰值越小,岩石内摩擦角和黏聚力越大,其荷载峰值越大;黏聚力对峰值荷载作用下降时间影响很大,黏聚力越大,峰值荷载下降得越快.

参考文献:

[1] 魏荣丰,郭子雄,黄群贤. 闽南地区农村石结构房屋的爆破振动损伤特点[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2009, 30 (5): 568-571. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013. 2009. 05. 0568.

- [2] 郑强,林从谋,林丽群,等.小净距隧道爆破山顶石房楼层振动效应[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(1):81-86. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2011.01.0081.
- [3] SHARPE J A. The production of elastic waves by explosion pressures; I, theory and empirical field observations [J]. Geophysics, 1942, 7(2): 144-154. DOI: 10.1190/1.1445002.
- [4] DUVAL W I. Strain wave shape in rock near explosions[J]. Geophysics, 1953, 18(2): 310-323. DOI: org/10.1190/1.1437875.
- [5] BLAKE F G. Spherical wave propagation in solid media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1952, 24(2): 211-215. DOI: org/10.1121/1.1906882.
- [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 Ébranlements Dans Les Milieux Hétérogènes. Marseille: Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, 1961: 21-30.
- [7] 丁桦,郑哲敏.爆破震动等效载荷模型[J].中国科学(E辑),2003(1):82-90. DOI:10.3969/j.issn.1674-7259.2003.01.011.
- [8] 陈士海,王明洋,钱七虎,等.岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1784-1788. DOI: org/CN/Y2003/V22/I11/1784.
- [9] 许红涛,卢文波,周小恒.爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(1):67-71.
- [10] 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. DOI: org/10.1016/j.jappgeo.2012.09.004.
- [11] BLAIR D P. Blast vibration dependence on charge length, velocity of detonation and layered media[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 65(1): 29-39. DOI: org/10.1016/j.ijrmms.2013.11.007.
- [12] RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ J A, COHEN T, ZAERA R. Approaching steady cavitation: The time scale in hypervelocity cavity expansion in work hardening and transformation hardening solids[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 73(11): 43-55. DOI: org/10.1016/j.ijimpeng.2014.06.005.
- [13] KATZIR Z, RUBIN M B. A simple formula for dynamic spherical cavity expansion in a compressible elastic perfectly plastic material with large deformations[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 2011, 16(7): 665-681. DOI: org/10.1177/1081286510387723.
- [14] 高富强,侯爱军,杨小林,等.基于量纲理论的爆破振动频率分析[J].爆破,2010,27(3):1-3. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2010.03.001.
- [15] 刘小鸣,陈士海.弹性半空间球形药包爆破引起的地表振动波形预测[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(6):826-831. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201804088.
- [16] SHER Y N, ALEKSANDROVA N I. Dynamics of breaking zone development during explosion of a concentrated charge in a brittle medium[J]. Journal of Mining Science, 2000, 36(5): 462-475. DOI: org/10.1023/A:10166167.
- [17] 陈士海,魏海霞,杜荣强,等.建筑结构爆破地震效应[M].北京:煤炭工业出版社,2011.
- [18] 戚承志,钱七虎.岩体动力变形与破坏的基本问题[M].北京:科学出版社,2009.
- [19] 戴宏亮.弹性动力学[M].长沙:湖南大学出版社,2014.
- [20] BLAIR D, MINCHINTON A. On the damage zone surrounding a single blasthole[J]. Fragblast, 1997, 1(1): 59-72. DOI: 10.1080/13855149709408390.

(编辑:李宝川 责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)