

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0206

考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载历程研究*

孙鹏昌^{1,2}, 杨广栋², 卢文波³, 范勇², 孟海利¹, 薛里¹

- 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;
- 三峡大学湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
- 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对岩石爆破爆炸荷载历程中未联合考虑岩石爆破动态过程和炮孔周围岩体破坏分区的不足, 开展了考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载历程及其适用性研究。联合岩石爆破动态过程和岩体破坏分区的理论解, 推导了考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载理论公式, 比较了考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载历程与实测炮孔爆炸压力曲线, 开展了单孔爆破现场试验和相应条件下3种爆炸荷载工况的数值模拟, 并对爆破振动现场实测和数值模拟结果进行了对比。研究表明: 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程包括上升段和衰减段 I、II、III, 上升段持续时间极短, 衰减段持续时间较长且主要由堵塞情况控制; 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程理论计算结果与实测炮孔爆炸压力曲线的变化趋势一致, 验证了考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载理论公式的可靠性; 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下, 单孔爆破振动波形的数值模拟结果与现场实测结果的主要特征一致, 该荷载工况下质点峰值振速计算结果与现场实测值偏差率最小, 绝大部分在7%以内, 表明了其应用于数值模拟的优越性; 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载可随岩石爆破系统条件的变化而动态调整, 其可靠性好、适应性强、应用效果佳。

关键词: 岩石爆破; 爆炸荷载; 理论公式; 破坏分区; 破岩过程

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

A study on explosive load history of rock blasting considering rock failure zones

SUN Pengchang^{1,2}, YANG Guangdong², LU Wenbo³, FAN Yong², MENG Haili¹, XUE Li¹

- Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
- Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
- State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Due to the deficiency that dynamic processes of rock blasting and rock failure zones around a blasthole are not simultaneously considered, the explosion load history of rock blasting considering rock failure zones and its reliability were investigated. Combining theoretical solutions of the dynamic processes of rock blasting and the rock failure zones around a blasthole, a theoretical formula of the explosive load history considering rock failure zones was derived, and a comparison was made between the derived explosive load history and a measured explosion pressure curve inside a blasthole. Both the field test on an ideal site and the numerical simulation including three explosion load conditions of single hole blasting were carried out, and the field and numerical results of blasting vibration were compared. The results show that the explosive load history

* 收稿日期: 2023-06-07; 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(52209162); 湖北省自然科学基金(2023AFA048); 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2023KSD01); 北京市科协青年人才托举工程项目(BYESS2022219)

第一作者: 孙鹏昌(1994—), 男, 博士, 助理研究员, sunpch@whu.edu.cn

通信作者: 杨广栋(1992—), 男, 博士, 副教授, ygd@ctgu.edu.cn

considering rock failure zones consists of an ascending stage and three attenuation stages I, II, and III, among which the ascending stage lasts for an extremely short time, while the attenuation stages last for a long time and are controlled by the stemming conditions. The change tendency of the calculated explosive load history considering rock failure zones is consistent with that of the measured explosion pressure curve, indicating the reliability of the explosive load history considering rock failure zones. The numerical results of single hole blasting vibration waveforms under the theoretical explosive load condition are consistent with the filed results, and the deviation ratios between the calculated peak particle velocity (PPV) results under the theoretical explosive load condition and the field PPV results are the smallest, most of which are within 7%, indicating the explosive load history considering rock failure zones has strong reliability. The explosive load history considering rock failure zones can be adjusted as the rock blasting system changes, and it has wide adaptability and good application potentials. The research results may help provide a theoretical basis for realizing efficient and accurate calculation about rock blasting.

Keywords: rock blasting; explosive load; theoretical formula; failure zone; rock breaking process

钻孔爆破由于其经济性和高效性而被广泛应用于交通、水利水电、矿山、市政等工程建设的岩体开挖^[1-4]。岩体开挖爆破过程中,炸药起爆后产生的爆炸荷载使炮孔周围岩体破碎、开裂、抛掷以及振动,爆炸荷载是岩体开挖爆破效果和爆破效应的源头影响因素^[5]。开展爆炸荷载的相关研究可为保障爆破开挖效果和控制爆破有害效应提供科学理论依据。

爆炸荷载历程相关研究是爆炸荷载研究的重要部分。爆炸荷载历程的确定主要有 4 种方法^[6]: (1) 采用特制测量系统的直接测量方法; (2) 基于炸药爆轰过程的数值模拟方法; (3) 结合炮孔周围岩体应力场解和实测资料的半经验半理论公式; (4) 基于岩石爆破简化化学模型的理论公式。由于炸药爆轰过程中的高温高压条件和测量仪器性能的限制,实际应用中多采用后 3 种方法确定爆炸荷载历程。

数值模拟方法利用炸药 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程模拟炸药爆轰过程中气体压力与体积的关系^[7],为获取炮孔壁岩体上的爆炸荷载压力提供了有力手段。半经验半理论公式主要包括三角形和指数函数类爆炸荷载。三角形爆炸荷载由于其简洁性而得到一定应用,它由爆炸荷载峰值、上升和持续时间 3 个参数描述^[8],上升和持续时间与装药和岩体参数等因素有关^[9]。指数函数类爆炸荷载由于与实测数据具有相似性而得到一定应用,它由爆炸荷载峰值、作用时间和待定衰减常数等描述,常见的指数函数类爆炸荷载见表 1,表中 $p(t)$ 为爆炸荷载历程, t 为起爆后的时刻, p_0 为爆炸荷载峰值, α 、 β 和 n 为待定常数, $\zeta = 1/(e^{-\alpha t_0} - e^{-\beta t_0})$, $t_0 = \ln(\beta/\alpha)/(\beta - \alpha)$, $H(t)$ 为 Heaviside 阶跃函数, p_{vN} 为 von Neumann 压力峰值, p_{JWL} 为 JWL 爆轰压力, $p_s(t)$ 为三段压力-时间函数, $p_u(t)$ 和 $p_d(t)$ 分别为爆炸荷载上升、衰减段的函数。

表 1 常见的指数函数类爆炸荷载

Table 1 Typical explosive loads in exponential function forms

指数函数类爆炸荷载	来源	指数函数类爆炸荷载	来源
$p(t) = p_0 e^{-\alpha t}$	文献[10]	$p(t) = p_0 H(t) t^n e^{-\beta t}$	文献[16]
$p(t) = p_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	文献[11]	$p(t) = p_{vN} (e\beta/n)^n H(t) t^n e^{-\beta t}$	文献[17]
$p(t) = p_0 \zeta (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	文献[12-13]	$p(t) = p_{JWL} p_s(t)$	文献[18]
$p(t) = 4p_0 (e^{-\alpha t/\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\alpha t})$	文献[14-15]	$p(t) = p_{vN} p_u(t) p_d(t)$	文献[19]

数值模拟方法主要存在以下不足: (1) JWL 状态方程控制参数多且取值困难; (2) 炸药爆轰模拟对模型网格质量要求高,所需计算资源巨大; (3) 岩石爆破动态过程模拟较难实现。半经验半理论公式受控于荷载上升和衰减时间参数,无法反映复杂岩石爆破系统众多关键因素对爆炸荷载历程的影响,且时间参数确定以经验为主,半经验半理论公式也无法对应岩石爆破主要动态过程。

基于岩石爆破简化化学模型的理论公式能更全面地反映岩石爆破系统众多关键因素和岩石爆破主要动态过程对爆炸荷载历程的影响,能较好地解决数值模拟方法和半经验半理论公式的不足,具有高效

和便捷的应用优势。推导爆炸荷载理论公式常用的力学模型包括岩石爆破破坏动态过程和岩石爆破破坏分区模型。陶振宇等^[20]、卢文波等^[21-22]分析了炮孔空腔膨胀、岩体裂纹扩展、堵塞物冲出和爆生气体喷流等岩石爆破动态过程,确定了相应的爆炸荷载公式;Lu 等^[23]、杨建华等^[24]和卢文波等^[25]发展了上述公式,将爆炸荷载衰减过程分为爆生气体初步膨胀和孔口逸散 2 个阶段;李庆文等^[26]采用相同力学模型开展了相关研究。基于岩石爆破破坏分区模型^[27],陈士海等^[28]推导了岩石爆破破坏界面上的应力时程表达式。上述理论公式分别独立给出了各动态过程的结束条件,而岩石爆破动态过程之间相互影响且与炮孔周围岩体破坏分区密切联系,应将岩石爆破动态过程和炮孔周围岩体破坏分区联合考虑。

本文中,针对岩石爆破爆炸荷载历程已有研究的不足,开展考虑岩体破坏分区的岩石爆破爆炸荷载历程研究。首先,联合考虑岩石爆破破坏分区和岩石爆破动态过程,在改进的岩石爆破破坏分区模型基础上确定岩石爆破各动态过程的结束条件,推导考虑岩体破坏分区的爆炸荷载理论公式,分析岩石爆破各动态过程对爆炸荷载历程的影响。其次,通过实测数据和数值模拟分析,对比考虑岩体破坏分区的爆炸荷载理论公式、半经验半理论公式的应用效果,验证提出的理论公式的可靠性和优越性。最后,对考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程的应用和后续工作进行讨论。以期找到一种可靠的岩石爆破爆炸荷载历程确定方法,为实现理论分析和数值模拟中准确、高效的岩石爆破相关计算提供理论基础。

1 爆炸荷载峰值

爆炸荷载峰值普遍采用 Chapman 等^[29]和 Jouguet^[30]在 19 世纪末 20 世纪初针对爆轰现象提出的爆轰波 C-J (Chapman-Jouguet) 理论计算。根据 Henrych^[31]解得的爆轰波阵面压力,炸药瞬时起爆的理想条件下,炮孔内气态爆轰产物的初始平均压力 p_a 为:

$$p_a = \frac{p_w}{2} = \frac{\rho_e D^2}{2(k+1)} \quad (1)$$

式中: p_w 为爆轰波阵面压力, ρ_e 为炸药密度, D 为炸药爆轰速度, k 为气态爆轰产物的等熵指数。

耦合装药条件下,气态爆轰产物直接作用于炮孔壁岩体上,炮孔壁岩体承受的爆炸荷载峰值由式 (1) 计算。不耦合装药条件下,考虑气态爆轰产物的绝热膨胀过程^[32],炮孔壁岩体承受的爆炸荷载峰值表示为如下分段函数:

$$p_0 = \begin{cases} p_a \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^{k_1} & p_0 > p_{cr} \\ p_{cr} \left(\frac{V_{cr}}{V_b} \right)^{k_2} & p_0 \leq p_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_c 和 V_b 分别为炸药和炮孔的体积, k_1 和 k_2 分别为 $p_0 > p_{cr}$ 和 $p_0 \leq p_{cr}$ 时气态爆轰产物的等熵指数, V_{cr} 为 p_{cr} 条件下气态爆轰产物的体积, p_{cr} 为气态爆轰产物的临界压力。

2 爆炸荷载历程

2.1 岩石爆破动态过程

典型的岩石爆破动态过程如图 1 所示。炸药在炮孔内起爆后,随着爆轰波的传播,数微秒内发生剧烈化学变化,生成高温高压气态爆轰产物;高温高压气体迅速膨胀,作用在炮孔壁上,激发传播速度达数千米每秒的爆炸冲击波,炮孔空腔发生动力膨胀;在爆炸冲击作用下,炮孔周围岩体粉碎、破碎和开裂,岩体裂纹受爆生气体驱动扩展;炮孔堵塞物在爆生气体冲击作用下被压缩和冲出,最终爆生气体从炮孔口和岩体连通裂隙向外逸散。爆生气体压力随上述动态过程的进行而快速衰减,直至降为大气压力。

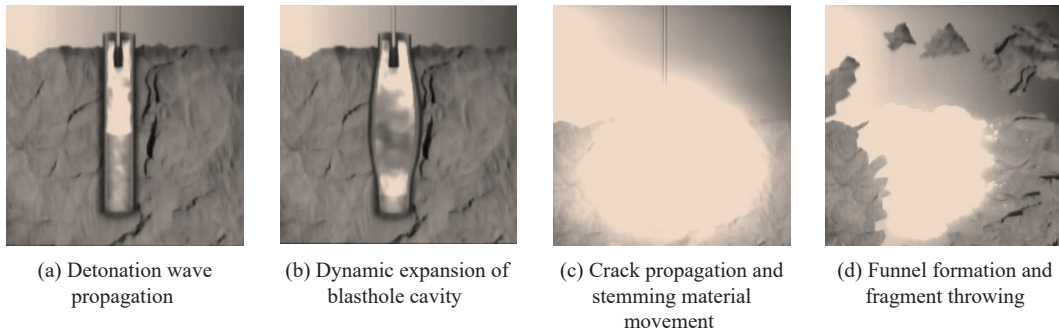


图 1 岩石爆破动态过程

Fig. 1 Dynamic processes of rock blasting

2.1.1 炮孔空腔动力膨胀

炮孔空腔在爆生气体作用下径向膨胀, 该过程按弹性波理论近似求解^[33], 解得炮孔壁径向速度为:

$$v(t) = \frac{p(t)}{\rho c_p} \tag{3}$$

式中: $v(t)$ 为 t 时刻炮孔壁的径向速度, ρ 为岩体的密度, c_p 为岩体的纵波速度。

对式 (3) 进行积分, 得到膨胀后的爆腔半径 $r_b(t)$, 并进一步确定膨胀后的爆腔体积 $V_b(t)$:

$$V_b(t) = \pi L_c [r_b(t)]^2 \tag{4}$$

式中: L_c 为炮孔装药的长度。

2.1.2 岩体裂纹驱动扩展

采用如图 2 所示的楔形裂纹扩展模型, 研究炮孔周围岩体裂纹在爆生气体驱动下的扩展过程。图 2 中: σ_0 为炮孔周围岩体的初始地应力; $w(l, t)$ 为 t 时刻裂纹上到炮孔壁距离为 l 处的张开位移; $l_w(t)$ 为爆生气体楔入裂纹的长度, 可简称为 l_w ; $l_f(t)$ 为裂纹的总长度, 可简称为 l_f 。假设爆生气体压力沿裂纹长度均匀分布, 由线弹性断裂力学理论可确定裂纹上任一点的张开位移^[34]:

$$w(l, t) = \frac{2(1-\mu)}{G} (p(t) - \sigma_0) \sqrt{l_f^2 - l^2} \tag{5}$$

式中: μ 和 G 分别为岩体的泊松比和剪切模量。

将裂纹内爆生气体的运动视为一维流体运动^[21], 可得到裂纹中爆生气体前端的运动速度, 并进一步确定裂纹内爆生气体的体积 $V_w(t)$:

$$V_w(t) = \frac{2L_c(1-\mu)(p(t) - \sigma_0)}{G} \left(l_w \sqrt{l_f^2 - l_w^2} + l_f^2 \arcsin \frac{l_w}{l_f} \right) \tag{6}$$

裂纹随爆炸荷载衰减能稳定扩展需裂纹尖端的应力强度因子 $K_I(t)$ 大于岩体的动态断裂韧度 K_{ID} 。

2.1.3 填塞物压缩冲出

应力波由填塞物底部传至孔口的时间为 $t_s = L_s/c_{ps}$, L_s 为炮孔填塞长度, c_{ps} 为填塞物中爆炸应力波传播速度。考虑爆炸荷载、重力和摩擦力冲量, 可解得填塞物轴向压缩速度 $v_s(t)$:

$$v_s(t) = \frac{\int_0^t p(\tau) d\tau}{c_{ps}\rho_s t} - \frac{2f_d(1 - \sin\varphi_s) \int_0^t p(\tau) \tau d\tau}{r_{b0}\rho_s t(1 + \sin\varphi_s)} - gt_s \tag{7}$$

式中: φ_s 为填塞物的内摩擦角, f_d 为填塞物的动摩擦因数, ρ_s 为填塞物的密度, r_{b0} 为初始炮孔半径, g 为重

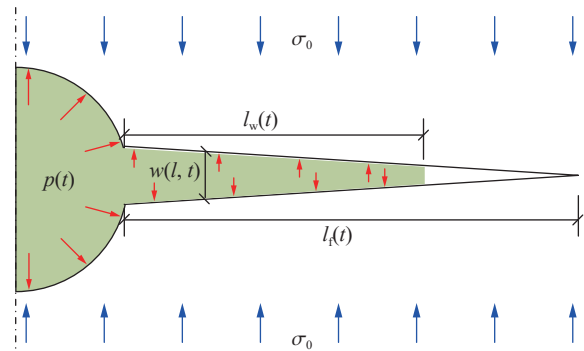


图 2 楔形裂纹扩展力学模型

Fig. 2 A mechanical model of wedge-shaped crack propagation

力加速度。

对式 (7) 积分得到堵塞物的压缩位移 $u_{sc}(t)$, 并求得压缩体积 $V_{sc}(t)$:

$$V_{sc}(t) = \pi r_{b0}^2 u_{sc}(t) \tag{8}$$

堵塞物压缩完后、完全冲出炮孔前 ($t < t_c$), 堵塞物以初速度 v_{s0} 从孔口冲出, 根据牛顿第二定律可求得冲出位移 $y_{sr}(t)$, 并进一步求得堵塞物冲出体积 $V_{sr}(t)$:

$$V_{sr}(t) = \pi r_{b0}^2 y_{sr}(t) \tag{9}$$

结合式 (4)、(6)、(8)~(9) 和多方气体状态方程, 因炮孔空腔动力膨胀、裂纹驱动扩展和堵塞物压缩冲出导致的爆炸荷载衰减可表示为:

$$p(t+dt) = \begin{cases} p(t) \left[\frac{V_b(t) + V_w(t) + V_{sc}(t)}{V_b(t+dt) + V_w(t+dt) + V_{sc}(t+dt)} \right]^k & 0 < t \leq t_s \\ p(t) \left[\frac{V_b(t) + V_w(t) + V_{sc}|_{t=t_s} + V_{sr}(t)}{V_b(t+dt) + V_w(t+dt) + V_{sc}|_{t=t_s} + V_{sr}(t+dt)} \right]^k & t_s < t < t_c \end{cases} \tag{10}$$

2.1.4 爆生气体孔口逸散

堵塞物完全冲出炮孔后, 炮孔为敞口状态, 爆生气体迅速向孔外逸散, 形成向孔底传播的稀疏波, 炮孔内压力降低。稀疏波传至孔底后在固定端反射, 反射稀疏波向孔口传播, 炮孔压力进一步降低。炮孔内反射与入射波作用, 形成包含未扰动区 Z_1 、简单波区 Z_2 和复合波区 Z_3 ^[22] 的波动场, 如图 3 所示。

爆生气体逸散开始时刻炮孔内的气体压力为 p_1 、波速为 c_1 , 根据气体一维非定常等熵流动波动方程可解得各区运动参数, 并进一步求得炮孔内爆生气体开始逸散后爆炸荷载的衰减过程为:

$$p(y,t) = p_1 \left[\frac{c(y,t)}{c_1} \right]^{\frac{2k}{k-1}} \quad t_c < t \tag{11}$$

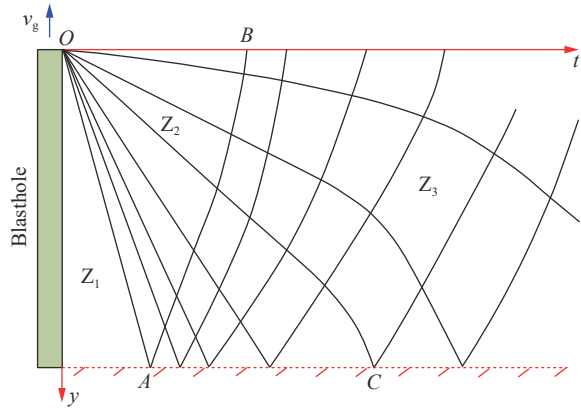


图 3 爆生气体逸散波场示意图

Fig. 3 Stress wave field of escaped explosion gases

2.2 岩石爆破破坏分区

基于冷振东等^[35]和 Lu 等^[36]改进的炮孔周围岩体爆破破坏分区模型, 将炮孔周围岩体分为如图 4 所示的粉碎区 ($r_b \leq r \leq r_1$)、破裂 I 区 ($r_1 < r \leq r_2$)、破裂 II 区 ($r_2 < r \leq r_c$) 和弹性区 ($r > r_c$)。

2.2.1 弹性区

岩体在弹性区与破裂 II 区交界 $r=r_c$ 处满足应力边界条件 $\sigma_\theta = -\sigma_r$ (σ_θ 为环向应力, σ_r 为岩体单轴抗拉强度), 根据弹性力学理论可以得到:

$$\sigma_{r=r_c} = 2\sigma_0 + \sigma_t \tag{12}$$

式中: σ_r 为径向应力。

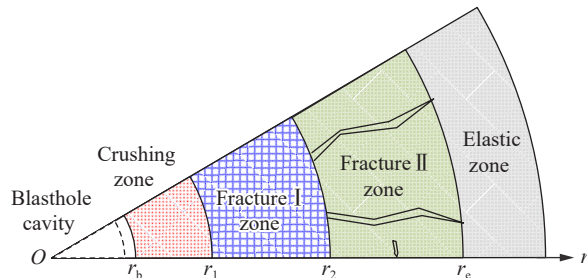


图 4 炮孔周围岩体破坏分区

Fig. 4 Failure zones in rock mass around a blasthole

2.2.2 破裂 II 区

破裂 II 区岩体环向应力为零, 类似于径向弹性柱杆^[28]。破裂 II 区和破裂 I 区交界 $r=r_2$ 处满足应力边界条件 $\sigma_{r=r_2} = \sigma_c$ (σ_c 为岩体单轴抗压强度), 由此得到 r_e 与 r_2 的关系为:

$$r_e = \frac{\sigma_c}{2\sigma_0 + \sigma_t} r_2 \tag{13}$$

2.2.3 破裂 I 区

破裂 I 区岩体为具有剪胀特性的散体介质^[35], 破裂 I 区岩体因塑性破坏产生大量裂隙而膨胀, 其膨胀特性由剪胀率 ψ 描述, 其本构方程采用变换后的 Mohr-Coulomb 模型表示, 根据岩体在破裂 I 区和粉碎区交界 $r=r_1$ 处满足的应力边界条件 $\sigma_r = \sigma_{cd}$ ^[37], 得到 r_2 与 r_1 的关系为:

$$r_2 = \left[\frac{2\sigma_{cd} \sin \phi + (1 - \sin \phi) \sigma_c}{(1 + \sin \phi) \sigma_c} \right]^{\frac{1 + \sin \phi}{2 \sin \phi}} r_1 = \xi r_1 \tag{14}$$

式中: $\sigma_{cd} = (\sigma_c^3 \rho c_p^2)^{\frac{1}{4}}$, ϕ 为岩体内摩擦角。

2.2.4 粉碎区

粉碎区岩体为不可压缩且仅具有内摩擦力的粉体介质^[27], 其本构方程由无黏聚力 Mohr-Coulomb 模型表示。根据岩体在粉碎区和破裂 I 区交界 $r=r_1$ 处满足的应力边界条件 $\sigma_r = \sigma_{cd}$, 考虑粉碎区岩体的不可压缩条件和炮孔壁处的初始条件, 得到 r_1 与炮孔壁半径 r_b 的关系为:

$$r_1 = \sqrt{\frac{1}{\Omega} + \frac{\Omega - 1}{\Omega} \left(\frac{r_{b0}}{r_b} \right)^2} r_b \tag{15}$$

式中: $\Omega = \frac{2(1 + \mu)}{E} \left[\frac{1 - \psi}{1 + \psi} (1 - \mu) + \chi \xi^{\frac{1 + \psi}{\psi}} \right] \sigma_c$, $\chi = \frac{\sigma_0 + \sigma_t}{2\sigma_0 + \sigma_t} - (1 - \mu) \ln \frac{2\sigma_0 + \sigma_t}{\sigma_c} - \delta + \delta \mu$, $\delta = \frac{1 - \psi}{1 + \psi}$ 。

2.3 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程

考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程综合了岩石爆破动态过程的相互影响及其与炮孔周围岩体破坏分区的联系, 式 (10)~(11) 体现了岩石爆破动态过程间的相互影响, 岩石爆破动态过程由式 (13)~(15) 受炮孔周围岩体破坏分区约束, 炮孔空腔动力膨胀至爆炸荷载衰减到岩体动抗压强度时结束、岩体裂纹驱动扩展限于破裂 II 区。考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程包括上升和衰减两段计算。爆炸荷载上升过程极为复杂, 尚无理想力学模型可精准表达, 用表 1 中 Starfield 等^[14] 提出的公式近似表示。爆炸荷载衰减段的计算过程见图 5。首先, 由式 (1) 或 (2) 计算爆炸荷载峰值; 随后, 将爆炸荷载峰值代入式 (3) 得到炮孔壁岩体的初始径向速度; 然后, 由式 (10)~(11) 计算爆炸荷载的衰减过程, 由式 (13)~(15) 判别岩石爆破动态过程的终止; 以上过程循环迭代至岩石爆破动态过程均终止。

对于长度为 5.2 m、直径为 90 mm、填塞长度为 2.0 m 的孔底起爆垂直炮孔, 在取表 2~4 所示常用炸药、岩体和填塞材料参数^[36] 的条件下, 按照前述方法得到考虑岩体破坏分区的爆炸荷

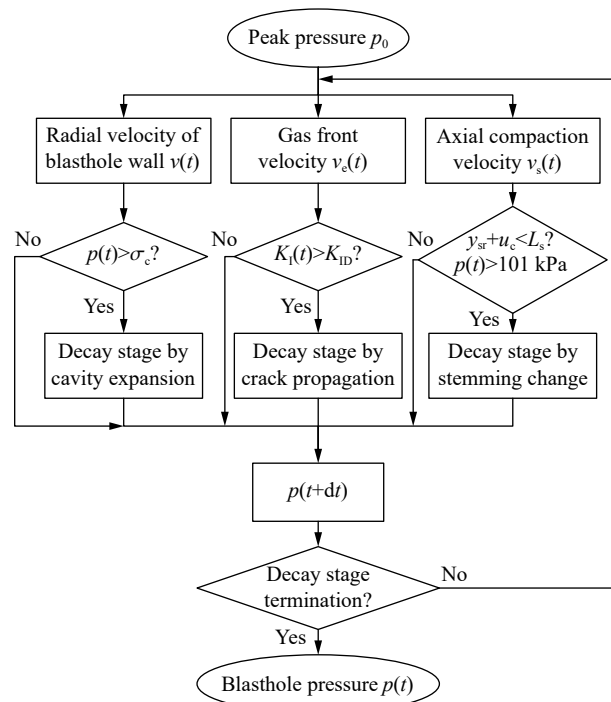


图 5 爆炸荷载衰减段的计算过程
Fig. 5 Calculation flow chart of blasthole pressure combining blasting processes and rock failure zones

载历程如图 6 所示。

由图 6 可知, 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程由上升和衰减段组成, 其中衰减段依其特征又进一步分为衰减阶段 I、II 和 III。根据爆炸荷载计算过程可知, 衰减阶段 I 由炮孔空腔动力膨胀和岩体裂纹驱动扩展主导, 该阶段持续时间极短且衰减迅速; 衰减阶段 II 由炮孔堵塞物压缩冲出主导, 该阶段持续时间较长且衰减缓慢; 衰减阶段 III 由爆生气体孔口逸散主导, 该阶段持续时间相对较长且衰减较快。岩石爆破爆炸荷载上升段持续时间极短, 衰减段持续时间相对较长且荷载衰减主要通过炮孔堵塞物压缩冲出和爆生气体孔口逸散完成。

表 2 爆炸荷载计算用炸药参数^[36]

Table 2 Explosive parameters for explosive load calculation^[36]

药卷直径 d_d /mm	ρ_d /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	D /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	爆热 Q /($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
70	1200	4000	3.991

表 3 爆炸荷载计算用岩体参数^[36]

Table 3 Rock mass parameters for explosive load calculation^[36]

ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	E /GPa	μ	σ_c /MPa	σ_t /MPa	ϕ ($^\circ$)	ψ
2670	59.5	0.23	129.1	10.3	45	2

表 4 爆炸荷载计算用堵塞材料参数^[36]

Table 4 Stemming parameters for explosive load calculation^[36]

ρ_s /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E_s /GPa	泊松比 μ_s	φ_s ($^\circ$)	f_d
1800	0.2	0.30	28	0.055

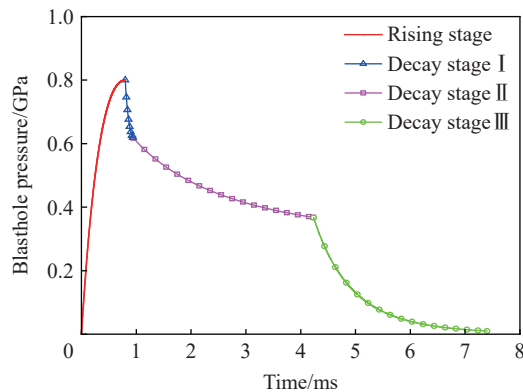


图 6 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程

Fig. 6 Explosive load history considering rock failure zones

3 验证分析

考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程主要应用于: (1) 岩石爆破理论分析中爆炸荷载直接计算; (2) 岩石爆破数值模拟中炮孔壁岩体上等效荷载施加。考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程在理论分析中的应用考虑了岩石爆破动态过程的相互影响及其与炮孔周围岩体破坏分区的联系, 使理论分析的物理力学意义更明确充分; 在数值模拟中的应用避免了炸药爆轰模拟耗时、复杂等不足, 与其他经验的等效荷载施加方法相比, 能将岩石爆破动态过程和炮孔周围岩体破坏分区包含在荷载历程公式中, 更符合岩石爆破的实际情况。与实测炮孔爆炸压力曲线对比, 验证考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程的理论可靠性; 开展单孔爆破现场试验和数值模拟, 对比现场实测数据与数值模拟结果, 验证考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程在数值模拟应用中的可靠性和优越性。

3.1 理论计算结果验证

Mencacci 等^[38] 在图 7 所示炮孔的堵塞段底部布置压力传感器, 得到了铵油炸药(ammonium nitrate and fuel oil, ANFO)起爆后炮孔内的爆炸压力曲线, ANFO 的性能参数见表 5, 实测炮孔爆炸压力曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 实测炮孔爆炸压力曲线可分为上升段和衰减段, 且衰减段可分为与图 6 中衰减段类似的 3 段。ANFO 起爆后约 2 μs , 炮孔内爆炸压力迅速升至峰值 7.4 GPa; 爆炸压力达到峰值后约 12 μs , 急剧衰减至 2.0 GPa 左右; 此后爆炸压力衰减较慢, 起爆后约 80 μs , 爆炸压力约为 1.5 GPa; 此后爆炸压力缓慢衰减, 起爆后约 150 μs , 爆炸压力约为 1.0 GPa。

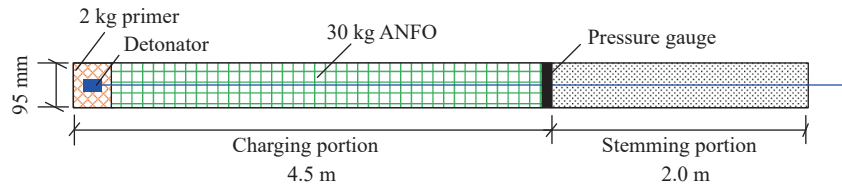


图 7 铵油炸药装药结构^[38]

Fig. 7 Charge configuration with ANFO^[38]

根据图 7、表 5 以及文献 [38] 所列炮孔、炸药和岩体的具体参数,按照图 5 所示流程计算得到考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程,并将它与图 8 所示的实测炮孔爆炸压力曲线进行对比,归一化的实测和理论爆炸荷载压力曲线如图 9 所示。

图 9 中,考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程与实测爆炸压力曲线变化趋势一致,两者上升段和衰减段高度吻合,衰减段的细分阶段基本一致,验证了考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程的理论可靠性。

表 5 铵油炸药性能参数^[38]

Table 5 Performance parameters for ANFO^[38]

密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	爆热/(kJ·g ⁻¹)	装药直径/mm
821	3 800	4.0	95

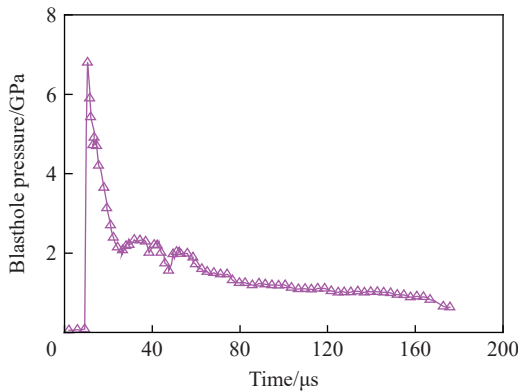


图 8 实测炮孔爆炸压力曲线^[38]

Fig. 8 Measured explosive load history^[38]

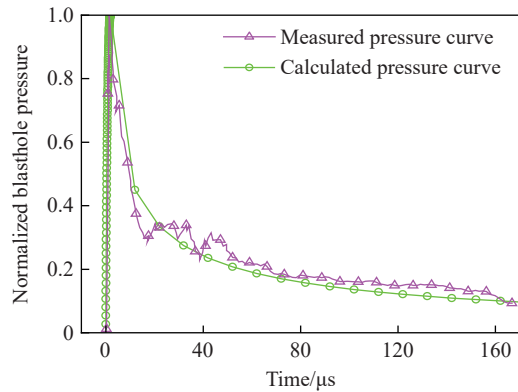


图 9 实测与理论爆炸荷载压力曲线对比

Fig. 9 Comparison of measured and calculated explosive loads

3.2 数值模拟应用验证

3.2.1 单孔爆破试验

于舟山绿色石化基地一处开阔平整且岩体条件单一的场地进行单孔爆破试验,场地岩体为微风化凝灰岩,节理裂隙不发育,具体岩体参数见表 6。炮孔布置如图 10 所示,炮孔内采用 2 发同段别导爆管雷管起爆药卷以保证准爆,装药结构如图 11 所示,具体钻孔装药参数见表 7。

表 6 单孔爆破试验岩体参数

Table 6 Rock mass parameters for single hole blasting test

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa
2 400	60	0.26	116	10.9

采用 Blast-UM 型爆破振动监测仪开展单孔爆破振动监测,如图 12(a) 所示,其振动速度幅值和频率监测范围分别为 0.001~35 cm/s(大量程传感器幅值监测范围为 200 cm/s)和 5~500 Hz,爆破振动监测仪布置如图 12(b) 所示。

距离单孔由近及远布置 6 个爆破振动监测点,水平爆心距为 4~230 m。紧邻炮孔的监测点 M1 和 M2 布置大量程(200 cm/s)振动速度传感器,距离炮孔相对较远的监测点 M3~M6 布置常规量程(35 cm/s)振动速度传感器,爆破振动监测点布置如图 13 所示。

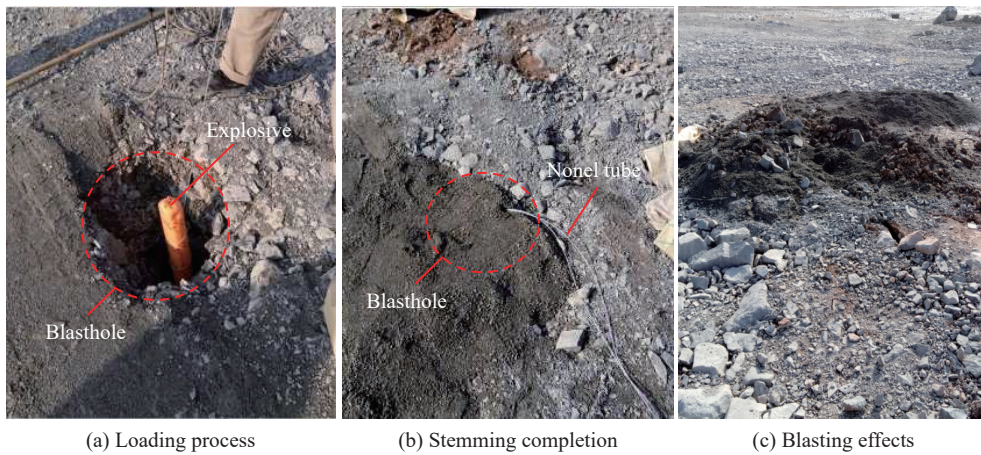


图 10 单孔爆破试验现场炮孔布置

Fig. 10 Blasthole layout for single hole blasting test

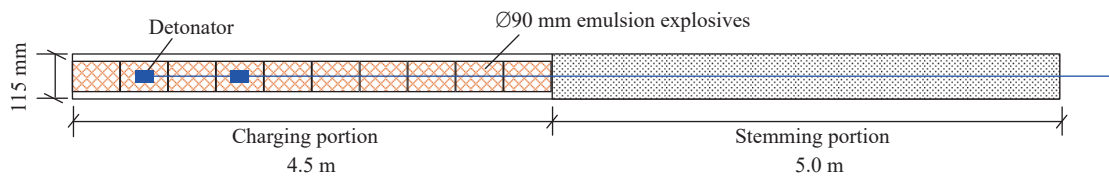


图 11 单孔爆破试验装药结构示意图

Fig. 11 Charge configuration for single hole blasting test

表 7 单孔爆破试验钻孔装药参数

Table 7 Blasting parameters for single hole blasting test

炮孔直径/mm	炮孔长度/m	炮孔倾角/(°)	药卷直径/mm	装药长度/m	单孔药量/kg	填塞长度/m
115	9.5	90	90	4.5	30	5.0

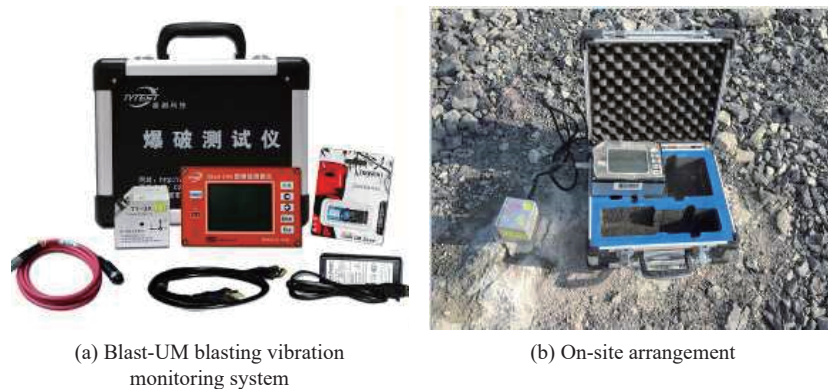


图 12 爆破振动监测系统

Fig. 12 Blasting vibration monitoring system

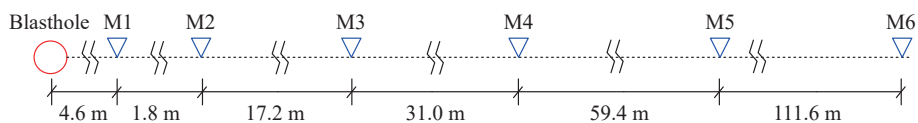


图 13 爆破振动监测点布置

Fig. 13 Layout of blasting vibration monitoring points

单孔爆破典型爆破振动波形如图 14 所示。由图 14 可知, 监测点 M3 爆破振动波形约持续 50 ms。读取监测点 M1~M6 处爆破振动波形的质点峰值振速 (peak particle velocity, PPV), 绘制得到各监测点 PPV 与水平爆心距的关系曲线, 如图 15 所示。由图 15 可知, 单孔爆破振动随爆心距增大而衰减, 爆心距 40 m 范围内, 爆破振动随水平爆心距增大迅速衰减; 爆心距 40 m 范围外, 爆破振动随水平爆心距增大平缓衰减。水平径向 PPV 最大、竖直向 PPV 次之, 而水平切向 PPV 最小。

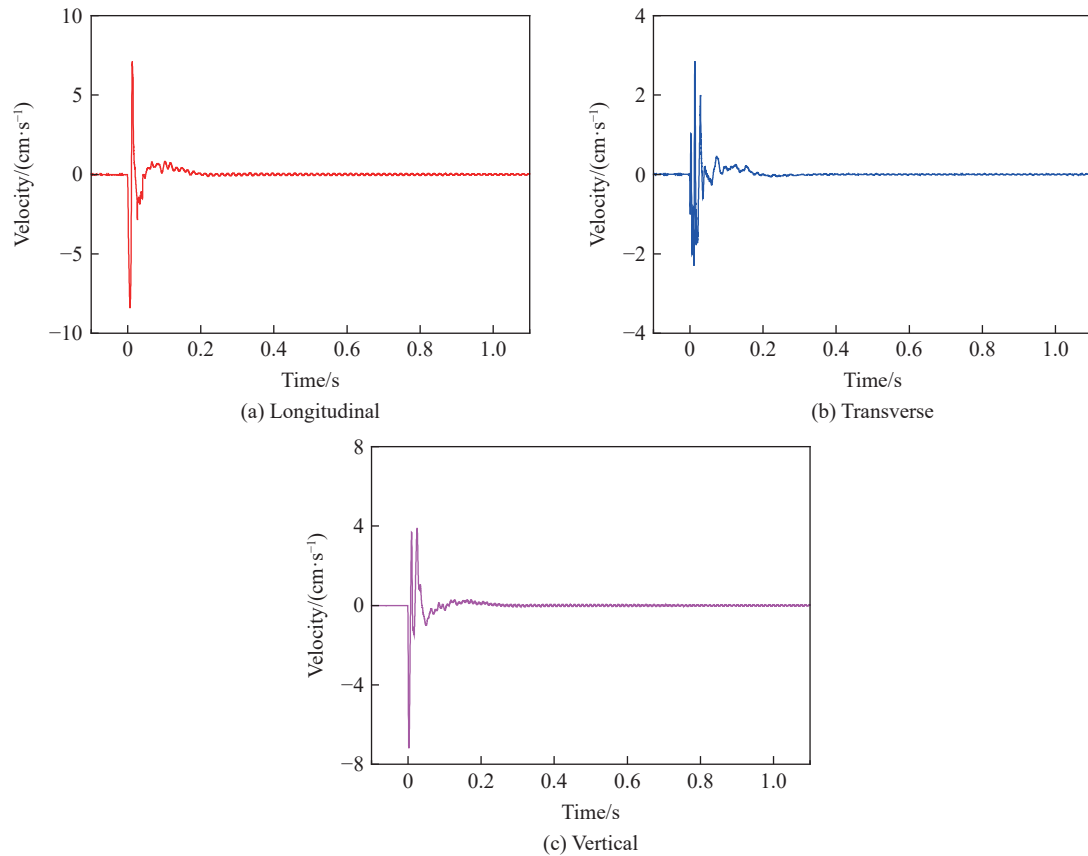


图 14 监测点 M3 的爆破振动波形

Fig. 14 Blasting vibration waveforms at monitoring point M3

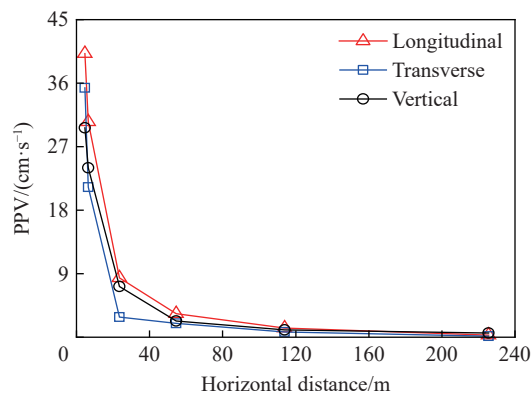


图 15 单孔爆破实测 PPV 随水平爆心距的变化

Fig. 15 Variation of measured PPV with horizontal distance from the explosive center

3.2.2 单孔爆破数值模拟

根据表 6~7 中单孔爆破相关参数, 建立图 16 所示的单孔爆破四分之一对称模型。模型整体尺寸

为 $230\text{ m} \times 10\text{ m} \times 12\text{ m}$, 炮孔参数与单孔爆破试验保持一致, 具体见表 2 和表 7, 模型共划分单元 326 908 个、节点 353 120 个。模型对称面施加对称约束, 炮孔口平面为自由边界, 其余界面施加透射边界以消除模型中人工截断边界处应力波反射对数值模拟结果的影响。由于单孔爆破试验中爆破振动监测点范围内的岩体处于弹性振动状态, 模型中岩体物理力学特征采用弹性本构模型表征, 具体岩体参数见表 6。

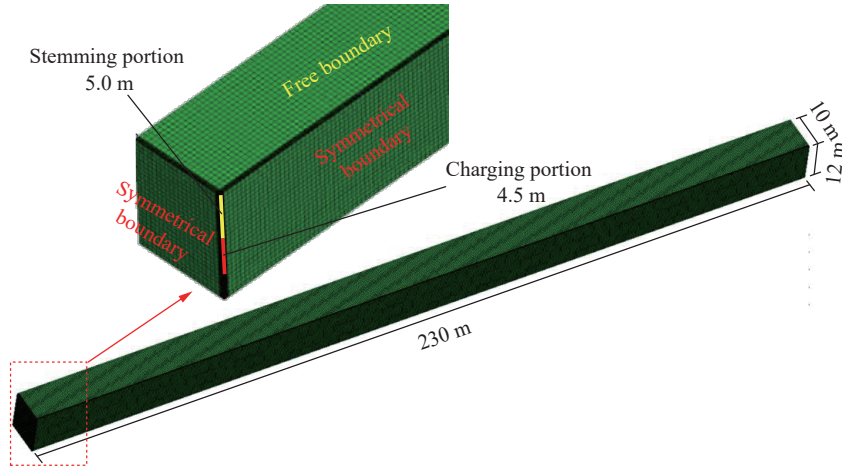


图 16 单孔爆破的数值模型

Fig. 16 A numerical model for single hole blasting

炸药爆炸产生的动力荷载在模型中等效施加在炮孔壁上, 为了验证考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程应用于数值模拟的可靠性及其相对于其他形式爆炸荷载的优越性, 将炮孔壁上施加的爆炸荷载分为 3 种工况: (1) 三角形爆炸荷载; (2) Triviño 等^[19]提出的指数函数类荷载; (3) 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载。3 种工况爆炸荷载的具体参数见表 2、表 6~7, 3 种工况爆炸荷载历程曲线如图 17 所示。

3.2.3 结果分析

在数值模型中取与图 13 中爆破振动监测点对应位置的节点 M1~M6, 输出各节点的爆破振动计算结果。不同工况下典型爆破振动波形的

计算结果及其实测波形如图 18 所示, 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下计算得到爆破振动波形的持续时间、变化趋势、波峰波谷出现位置与单孔爆破现场试验实测爆破振动波形一致, 两者吻合度最高。说明在数值模型中施加考虑岩体破坏分区的爆炸荷载得到的单孔爆破振动结果是可靠的, 且效果优于三角形和指数函数类爆炸荷载工况。

将不同工况下各监测节点的 $PPV(v_n)$ 与对应位置处现场实测 $PPV(v_m)$ 进行比较并计算其偏差率 d_r , 其中偏差率采用下式:

$$d_r = \frac{|v_n - v_m|}{v_m} \quad (16)$$

进行计算, 计算结果如图 19 所示。由图 19 可知, 指数函数类爆炸荷载工况下不同监测点处 PPV 计算结果与实测值的差异变化大, 对于监测点 M1 和 M2, 3 个方向 PPV 偏差率均在 75% 以上, 其中水平切向和竖直向 PPV 偏差率甚至超过 105%, 而对于监测点 M3~M6, 3 个方向 PPV 偏差率相对较小, 在 7%~

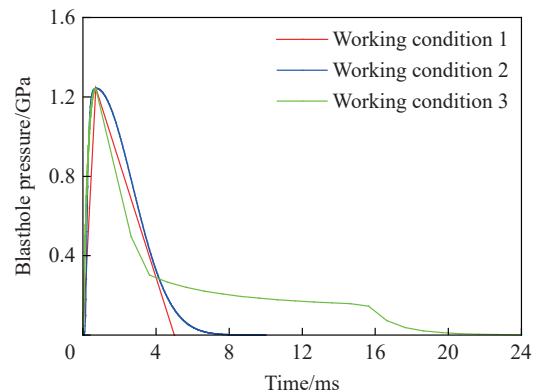


图 17 3 种工况下的爆炸荷载历程曲线

Fig. 17 Explosive load-time history curves for three working conditions

50% 之间, 绝大部分在 12% 以上。三角形爆炸荷载工况下不同监测点处 PPV 计算结果与实测值的差异变化较小, 监测点 M3 的 3 个方向 PPV 偏差率均最大, 均为 40% 左右, 其余监测点 PPV 偏差率相对较小, 但绝大部分在 15% 以上。考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下不同监测点 PPV 计算结果与实测值基本在 12% 以内, 绝大部分在 7% 以内。上述结果表明, 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下 PPV 计算结果与实测值相差最小, 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载在数值模拟计算结果可靠性方面有明显优势。

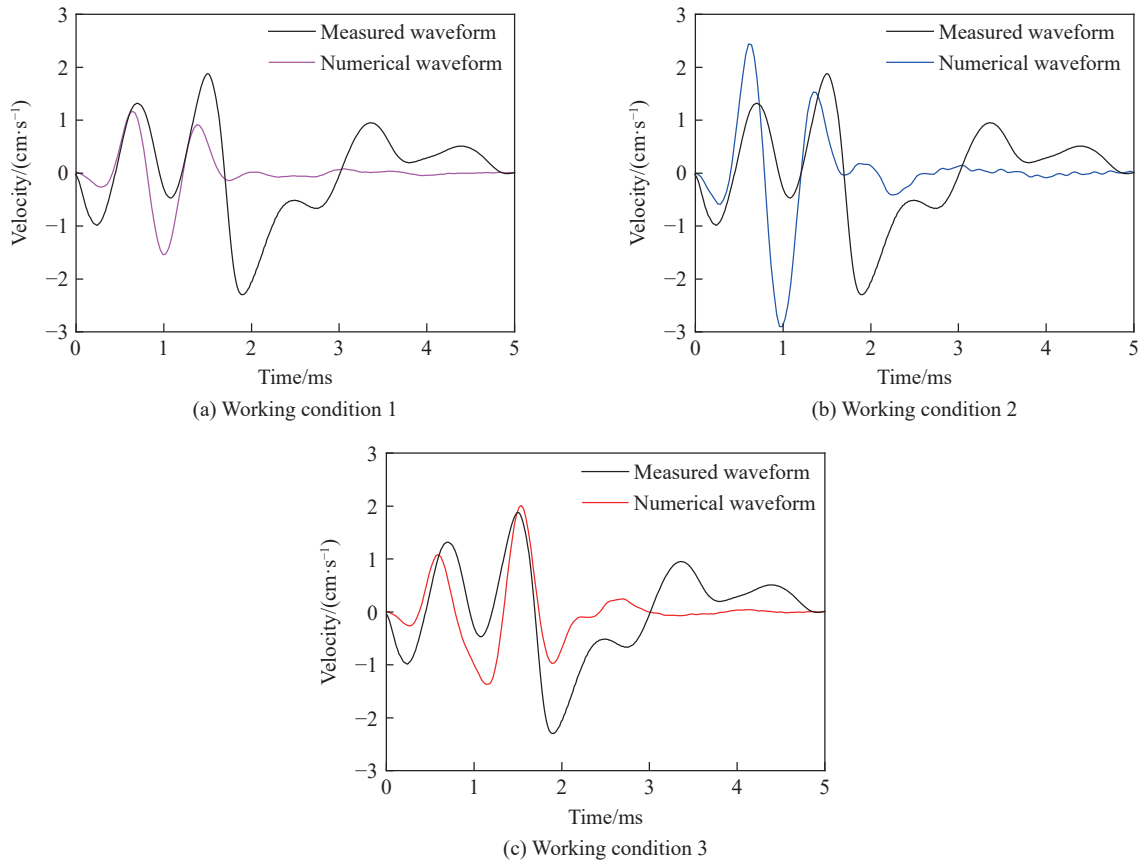


图 18 实测和数值模拟爆破振动波形比较(监测点 M4)

Fig. 18 Comparison of measured and numerical blasting vibration waveforms at monitoring point M4

4 讨 论

结合图 17 和图 19 所示结果, 分析考虑岩体破坏分区的爆炸荷载的优势。由图 17 可知, 3 类爆炸荷载中, 爆炸荷载上升速率由快到慢依次为指数函数类爆炸荷载、考虑岩体破坏分区的爆炸荷载、三角形爆炸荷载, 爆炸荷载冲量由大到小依次为考虑岩体破坏分区的爆炸荷载、指数函数类爆炸荷载、三角形爆炸荷载。岩石爆破振动大小主要由爆炸荷载冲量控制, 在炮孔近区还受爆炸荷载上升速率影响。因此, 对于距离炮孔较近的监测点 M1~M3, 爆炸荷载上升速率最大的指数函数类爆炸荷载对应的 PPV 在 3 种工况中最大且超过现场实测 PPV, 而对于距离炮孔较远的监测点 M5~M6, 指数函数类爆炸荷载冲量小于考虑岩体破坏分区的爆炸荷载, 其 PPV 也相对较小。对于三角形爆炸荷载, 其冲量与另 2 种爆炸荷载相差较大, 导致其对应的 PPV 基本上最小。上述分析表明, 岩石爆破振动与采用的爆炸荷载形式密切相关, 且爆炸荷载的上升、冲量等特性对岩石爆破振动影响尤为重要。然而, 三角形和指数函数类爆炸荷载过于简化, 不能充分表征岩石爆破动态过程和岩体破坏分区等, 因而其上升、冲量等特性相对固化, 2 种荷载形式仅在某些特定参数条件下可能取得比较理想的应用效果, 但对本文中单孔爆破现场试验的长填塞炮孔等情况则无法适用。而考虑岩体破坏分区的爆炸荷载由于结合了岩石爆破动态过程和

岩体破坏分区,能随岩石爆破系统中炸药、岩体以及边界条件的变化而变化,其适应性更强,应用效果更佳。

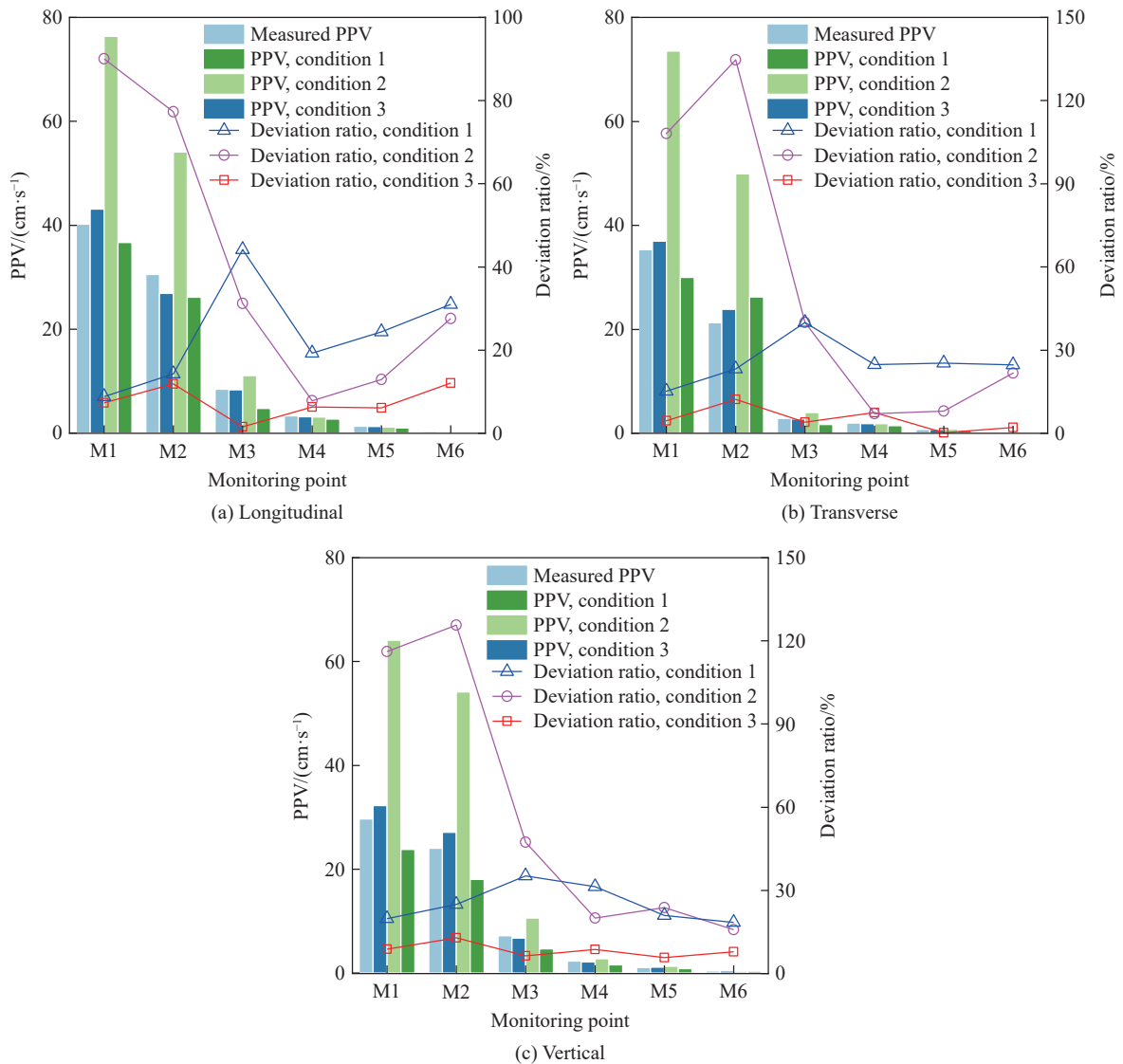


图 19 PPV 实测值和数值模拟结果比较

Fig. 19 Comparison of measured and numerical PPVs

考虑岩体破坏分区的爆炸荷载除了应用于数值模拟中施加等效爆炸荷载外,还可以应用其频域形式于岩石爆破振动频谱的理论分析^[39],或者结合结构动力学开展爆炸荷载作用下结构的动力响应分析^[40],或者直接应用于爆破参数设计中单耗、最小抵抗线、孔间距的经验公式^[41]等,且考虑岩体破坏分区的爆炸荷载公式中包含地应力选项 σ_0 等与深部环境相关的变量,其可应用于深部环境下岩石爆破相关计算,具有十分广泛的应用前景。需要指出的是,岩石爆破是一个复杂的动态系统,本文中仅考虑了炮孔空腔动力膨胀、裂纹驱动扩展和堵塞物压缩冲出等过程,未完全涉及岩体破碎,也未涉及岩体鼓包等其他过程,未涉及内容是影响爆炸荷载的重要因素,也是后续需要深入研究的内容。

5 结 论

采用理论分析、现场试验和数值模拟结合的方法,推导了联合岩石爆破动态过程和岩体破坏分区的

爆炸荷载历程,通过实测数据对比、单孔爆破现场试验和数值模拟结果对比等,验证了考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程的可靠性及其优势,得到了如下主要结论。

(1) 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程包括上升和衰减段,衰减段可细分为衰减阶段 I、衰减阶段 II 和衰减阶段 III。衰减阶段 I 持续时间极短且衰减迅速,由炮孔空腔动力膨胀和岩体裂纹驱动扩展主导;衰减阶段 II 衰减缓慢且持续时间较长,由炮孔堵塞物压缩冲出主导;衰减阶段 III 衰减较快且持续时间较长,由爆生气体孔口逸散主导。

(2) 考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程理论计算结果与实测炮孔爆炸压力曲线变化趋势一致,两者上升段和衰减段高度吻合,衰减段的细分阶段一致,表明考虑岩体破坏分区的爆炸荷载历程在理论上是可靠的。

(3) 在数值模拟中,考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下计算得到爆破振动波形与单孔爆破现场试验实测爆破振动波形的基本特征一致,与实测爆破振动波形的吻合度优于三角形和指数函数类爆炸荷载工况;指数函数类爆炸荷载工况下,PPV 计算结果与实测值的偏差率超过 105%,三角形爆炸荷载工况下绝大部分偏差率超过 15%,考虑岩体破坏分区的爆炸荷载工况下偏差率绝大部分在 7% 以内,考虑岩体破坏分区的爆炸荷载在数值模拟应用中具有明显优势。

(4) 三角形和指数函数类爆炸荷载过于简化,不能充分表征岩石爆破动态过程和岩体破坏分区,荷载上升、冲量等特性相对固化,缺乏普遍的适用性。考虑岩体破坏分区的爆炸荷载结合了岩石爆破动态过程和岩体破坏分区等,能根据岩石爆破系统中炸药、岩体以及边界条件的变化而动态调整,适应性更强,应用效果更佳。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 中国工程爆破与爆破器材的现状与展望 [J]. *工程爆破*, 2007, 13(4): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2007.04.001.
WANG X G. Current status and future prospect of engineering blasting and explosive materials in China [J]. *Engineering Blasting*, 2007, 13(4): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2007.04.001.
- [2] WANG M L, LI X, LI Q H, et al. Study on blasting technology for open-pit layering of complex mine adjacent to high and steep slope [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 773872. DOI: 10.3389/feart.2021.773872.
- [3] 王志亮, 毕程程, 李鸿儒. 混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合法数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1419-1428. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0209.
WANG Z L, BI C C, LI H R. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1419-1428. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0209.
- [4] 杨建华, 代金豪, 姚池, 等. 爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡位移突变特征与能量机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(3): 035201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0126.
YANG J H, DAI J H, YAO C, et al. Displacement mutation characteristics and energy mechanisms of anchored jointed rock slopes under blasting excavation disturbance [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(3): 035201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0126.
- [5] HUSTRULID W. Blasting principles for open pit mining: theoretical foundations [M]. Rotterdam: Balkema, 1999: 992.
- [6] 孙鹏昌. 基于模态分析的岩石高边坡爆破振动影响评价 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021: 47-60.
SUN P C. Impact evaluation of blasting vibration on high rock slope based on modal analysis [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021: 47-60.
- [7] CASTEDO R, NATALE M, LÓPEZ L M, et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 290-301. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.027.
- [8] KUZMENKO A A, VOROBEV V D, DENISYUK I I, et al. Seismic effects of blasting in rock [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993: 35-37.
- [9] 王文龙. 钻眼爆破 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 178-179.

- WANG W L. Drilling and blasting [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 178–179.
- [10] 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.
- [11] DUVALL W I. Strain-wave shapes in rock near explosions [J]. *Geophysics*, 1953, 18(2): 310–323. DOI: 10.1190/1.1437875.
- [12] CHO S H, MIYAKE H, KIMURA T, et al. Effect of the waveform of applied pressure on rock fracture process in one free-face [J]. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2003, 64(3): 116–125.
- [13] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 771–784. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.02.006.
- [14] STARFIELD A M, PUGLIESE J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1968, 5(1): 65–77. DOI: 10.1016/0148-9062(68)90023-5.
- [15] JONG Y, LEE C, JEON S, et al. Numerical modeling of the circular-cut using particle flow code [C]//Proceedings of the 31st Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Orlando, 2005: 289–298.
- [16] BLAIR D, MINCHINTON A. On the damage zone surrounding a single blasthole [J]. *Fragblast*, 1997, 1(1): 59–72. DOI: 10.1080/13855149709408390.
- [17] BLAIR D P. A comparison of Heelan and exact solutions for seismic radiation from a short cylindrical charge [J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): E33–E41. DOI: 10.1190/1.2424543.
- [18] CHO S H, KANEKO K. Rock fragmentation control in blasting [J]. *Materials Transactions*, 2004, 45(5): 1722–1730. DOI: 10.2320/matertrans.45.1722.
- [19] TRIVIÑO L F, MOHANTY B, MUNJIZA A. Seismic radiation patterns from cylindrical explosive charges by analytical and combined finite-discrete element methods [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009: 415–426.
- [20] 陶振宇, 董振华, 卢文波. 敞口炮孔压力变化历程的理论分析与计算 [J]. *武汉水利电力大学学报*, 1994, 27(4): 394–399.
- TAO Z Y, DONG Z H, LU W B. A theoretical analysis and calculation of the pressure course of unstemmed borehole [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1994, 27(4): 394–399.
- [21] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1994, 14(3): 264–268.
- LU W B, TAO Z Y. A study of fracture propagation velocity driven by gases of explosion products [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(3): 264–268.
- [22] 卢文波. 岩石爆破中应力波的传播及其效应研究 [D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1994: 15–24.
- LU W B. Propagation and effect of stress wave in rock blasting [D] Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1994: 15–24.
- [23] LU W B, YANG J H, CHEN M, et al. An equivalent method for blasting vibration simulation [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19(9): 2050–2062. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.05.012.
- [24] 杨建华, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
- YANG J H, LU W B, CHEN M, et al. An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
- [25] 卢文波, 杨建华, 陈明, 等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1089–1096.
- LU W B, YANG J H, CHEN M, et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1089–1096.
- [26] 李庆文, 乔兰, 陈璐. 基于精确爆破荷载分析的安全距离判据 [J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 123–129. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0248.
- LI Q W, QIAO L, CHEN L. Based on the accurate blasting loading to estimate the safety criterion [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 123–129. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0248.
- [27] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 1945–1968. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.001.
- QIAN Q H. Some advances in rock blasting dynamics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10):

- 1945–1968. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.001.
- [28] 陈士海, 王明洋, 赵跃堂, 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: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.11.006.
- CHEN S H, WANG M Y, ZHAO Y T, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1784–1788. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.11.006.
- [29] CHAPMAN D L, OXON A B. VI. On the rate of explosion in gases [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1899, 47(284): 90–104. DOI: 10.1080/14786449908621243.
- [30] JOUGUET E. On the propagation of chemical reactions in gases [J]. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1905, 1: 347–425.
- [31] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use: developments in civil engineering [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979: 59–64.
- [32] Л. Д. 朗道, E. M. 栗弗席兹. 连续介质力学 (第二册) [M]. 彭旭麟, 译. 北京: 人民教育出版社, 1960: 500–509.
- [33] WANG L L. Foundations of stress waves [M]. Oxford: Elsevier, 2007: 337–347.
- [34] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 23–25.
- LI S Y, HE T M, YIN X C. Rock fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2015: 23–25.
- [35] 冷振东, 卢文波, 陈明, 等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 101–107. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0101-07.
- LENG Z D, LU W B, CHEN M, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 101–107. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0101-07.
- [36] LU W B, LENG Z D, CHEN M, et al. A modified model to calculate the size of the crushed zone around a blast-hole [J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2016, 116(5): 413–422. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n5a7.
- [37] RAKISHEV B, RAKISHEVA Z B. Basic characteristics of the stages of rock massif destruction by explosive crushing [C]// Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Symposium on Blasting Techniques. Kunming, 2011: 65–69.
- [38] MENCACCI S, CHAVEZ R. The measurement and analysis of detonation pressure during blasting [C]// Proceedings of 2005 European Federation of Explosives Engineers. Brighton, 2005: 231–237.
- [39] SUN P C, LU W B, ZHOU J R, et al. Comparison of dominant frequency attenuation of blasting vibration for different charge structures [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(2): 448–459. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.002.
- [40] 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. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.010.
- [41] LANGEFORS U, KIHLESTRÖM B. The modern technique of rock blasting [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1979: 28–56.

(责任编辑 张凌云)