

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.001

钻孔爆破炮孔孔壁压力计算模型*

张馨^{1,2a}, 孙金山^{2a,2b}, 张湘平¹, 贾永胜^{2a,2b}, 姚颖康^{2a,2b}

(1. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 2. 江汉大学 a. 爆破工程湖北省重点实验室;
b. 精细爆破省部共建国家重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 针对钻孔爆破数值模拟过程中炮孔孔壁压力取值较为复杂的问题, 通过分析炸药爆轰过程以及爆破介质的破坏和运动过程, 构建了孔壁压力的简化计算模型。该模型将爆破过程分为4个阶段: 炸药爆轰炮孔升压、炮孔初步弹性膨胀、孔壁裂纹张开且气体流入、介质剥离抛掷且气体逸出。通过简化分析介质的爆破破坏过程, 分别确定了各阶段的持续时间。通过简化分析爆炸气体体积的变化, 并基于理想气体状态方程, 分别确定了各阶段孔壁压力随时间变化的数学函数。通过现场实验结果对计算模型进行了验证, 计算结果与实验结果吻合情况良好。该计算模型考虑了多种因素对爆破过程的影响, 又未引入难以确定的系数, 方便实际应用, 可用于理论分析或数值模拟中爆破荷载的取值。

关键词: 爆破; 炮孔; 爆破荷载; 孔壁压力; 力学模型

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0001-05

Calculation Model of Blasthole Pressure

ZHANG Xin^{1,2a}, SUN Jin-shan^{2a,2b}, ZHANG Xiang-ping¹, JIA Yong-sheng^{2a,2b}, YAO Ying-kang^{2a,2b}

(1. China Railway 18 Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. a. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering;

b. The State Key Laboratory of Fine Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: To calculate the blasthole pressure in the numerical simulation of blasting, a simplified calculation model was proposed by analyzing the explosive detonation process and the dynamic fracture process of blasted medium. In this model, the blasting process is divided into four stages: the pressure rising, the initial elastic expansion, the crack opening and gas inflow, and the medium stripping and throwing and gas escaping. By analyzing the blasting process, the approximate duration of each stage is determined respectively. By analyzing the change of explosive gas volume and based on the state equation of ideal gas, the time history function of blasthole pressure in each stage is determined. The calculation model is verified by field experiment results and the calculated results are in good agreement with the experimental results. The model takes into account the influence of many factors on the blasting process, but without the coefficient which is difficult to determine. It can be used to determine the blasting load in theoretical analysis or numerical simulation.

Key words: blasting; blasthole; blasting load; blasthole pressure; mechanical model

收稿日期: 2021-04-01

作者简介: 张馨(1968-), 男, 教授级高级工程师、学士, 主要从事爆破工程方面生产与科研, (E-mail) 465723885@qq.com。

通讯作者: 孙金山(1980-), 男, 教授、博士, 主要从事工程爆破方面的教学与研究, (E-mail) sun99001@126.com。

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2020BCA084); 湖北省自然科学基金重点项目(2020CFA043)

爆炸荷载是工程爆破理论分析和数值模拟的重要边界条件。目前, 在对钻孔爆破过程进行分析时, 炮孔爆炸荷载计算模型主要有两类, 一类是简化的半理论半经验模型, 一类是气体状态方程模型。

简化的半理论半经验模型常用的是双折线模型

和双指数模型。双折线三角形分段函数模型简单实用^[1,2],该模型仅有升压时间、卸压时间和峰值压力三个参数,其中,峰值压力可通过 C-J 爆轰模型计算,时间参数则主要通过经验公式估算得到。该荷载模型未考虑炸药爆炸特征,也未考虑炮孔的孔深、孔径和堵塞对爆炸荷载的影响,因此峰后荷载的时间历程难以准确确定。双指数函数由 Starfield 提出^[3],该模型为连续光滑函数,更易应用于理论分析和数值模拟中。Jong 对该模型进行了改进,提出了其关键参数的计算公式,使荷载时程曲线更接近实验结果^[4]。但该模型中关键参数 M 和 N 的取值同样未考虑爆破破岩过程的特征,因此其适用范围也受到限制。

爆轰产物状态方程是计算爆轰产物压力、体积、温度等物理量之间的数学方程。不同学者提出了 BKW、J CZ、VLW、Davis、JWL 等多种方程^[5-9],其中, JWL 状态方程在爆炸数值模拟中应用广泛,然而该方程的大量未知参数需要通过圆筒试验及流体动力学计算确定,且其忽略了岩石破碎及气体逸出过程的影响。

因此,以往爆炸荷载半理论半经验模型以及爆轰产物状态方程主要考虑了炸药本身参数对荷载的影响,忽视了爆破介质及其动态响应特征的影响,难以精确计算工程爆破场景中的爆破荷载,例如不同单耗、不同抵抗线条件下炮孔爆破荷载的差异性模拟。因此,针对工程爆破过程中,连续装药的柱状炮孔的爆破荷载计算问题,考虑炸药爆轰、炮孔弹性膨胀、炮孔周围裂纹扩展、岩石抛掷及气体逸出过程等因素对炮孔孔壁压力的影响,利用理想气体状态方程和经典力学理论构建了炮孔孔壁压力的数学函数。

1 炸药爆轰炮孔升压阶段

炮孔内的炸药发生爆轰后,产生的气体在炮孔内膨胀并对炮孔壁施加冲击荷载,根据炸药爆轰理论与理想气体状态方程,耦合装药和不耦合装药条件下炮孔壁上的峰值压力 P_1 为^[10]

$$P_1 = \frac{n\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b}\right)^{2\gamma} \quad (1)$$

式中: n 为爆轰产物碰撞炮孔壁时的压力增大系数,耦合装药时一般取 $n = 1$,不耦合装药时常取 $n = 10$; ρ_e 为炸药密度; D 为炸药爆轰速度; d_b 为炮孔直径; d_c 为装药直径; γ 为炸药爆轰的等熵指数,简化计算时 $\gamma \approx 3.0$ 。

远离炮孔壁稍远的介质中可测到的爆炸压力升

压时间为炸药爆轰所需时间

$$T_1 = \frac{L_c}{D} \quad (2)$$

式中: T_1 为炮轰时间; L_c 为装药长度。

将距离炮孔壁稍远的介质中爆炸压力视为线性增大时,得到炸药爆轰阶段炮孔孔壁的平均压力函数为

$$P_A(t) = \frac{D}{L_c} P_1 t \quad (3)$$

式中: t 的起始时刻为 0,结束时刻为炸药爆轰完成时刻 T_1 。

2 炮孔初步弹性膨胀阶段

炸药爆轰后爆轰产物撞击炮孔壁时将使炮孔发生膨胀,并导致爆炸压力的迅速下降。该过程中炮孔周围的介质将受到径向的压缩与切向的拉伸,并使炮孔壁附近的介质形成粉碎区,粉碎区以外的岩石将被拉裂。不耦合装药条件下,孔壁受到的爆炸荷载较低,粉碎区半径相对较小。

粉碎区的形成过程较为复杂,目前仍以半理论计算为主进行估算,为简化炮孔的膨胀过程的分析,假定孔壁上未形成粉碎区,此时炮孔孔径的变化主要受爆炸荷载和岩石的弹性参数影响。根据无限边界中受内部压力圆孔的弹性力学分析^[11],距离炮孔中心 $2.5d_b$ 处的质点位移为孔壁处的 $1/25$,因此可认为该处质点位移达到其最大值时,炮孔的弹性膨胀基本完成。受惯性的影响,质点位移最大值出现的时刻滞后于应力波峰值到达的时刻。因此, $2.5d_b$ 处的质点位移最大值出现的时刻可由受内部动压力圆孔的波动方程进行求解,在极坐标系下可表示为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1}{C_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中: u 为质点位移; r 为质点距离孔中心的距离; t 为时间; C_p 为介质中的弹性波波速。

然而,上述方程求解无解析解,数值解求解也很困难,考虑炮孔膨胀是在裂纹扩展至炮孔中心约 $2.5d_b$ 处之前完成的,因此可近似认为爆炸荷载产生的弹性膨胀所需时间为裂纹扩展长度为 $2d_b$ (孔壁到距离孔中心 $2.5d_b$ 处的距离)时所经历的时间,即裂纹到达前发生弹性膨胀,裂纹到达后发生塑性膨胀。同时考虑炸药爆轰所需时间,以及炸药与测点的位置关系,炮孔弹性膨胀所需时间为

$$T_2 = \frac{2d_b}{\zeta C_p} + \omega T_1 \quad (5)$$

式中: ζ 为系数,根据 Griffith 理论^[12],裂纹稳定

扩展时 $\zeta = 0.38$; ω 为爆轰时间系数,当测点位于孔壁附近时,不考虑炸药沿炮孔轴线方向的爆轰时间,仅考虑某个炮孔截面处的膨胀过程时, $\omega = 0$; 当测点远离炮孔时,需要考虑炸药爆轰时间,并考虑整个炮孔的膨胀过程时, $\omega = 1$ 。

炮孔弹性膨胀后,直径则由 d_b 增大为 $d_b + 2\Delta r$, 爆炸压力自 P_1 降低至 P_2 , 设炮孔弹性膨胀所导致的半径增量由 P_1 控制,且膨胀前后满足理想气体状态方程,可得方程组

$$\begin{cases} \Delta r = \frac{(1 + \mu)d_b P_1}{2E} \\ P_1 \left[\pi \left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \right]^k = P_2 \left[\pi \left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2 \right]^k \end{cases} \quad (6)$$

式中, k 为炸药气体膨胀或流动的等熵指数, $k = 1.25 \sim 1.4$ 。

解得 P_2 近似解为

$$P_2 = \frac{EP_1}{E + 2\gamma(1 + \mu)P_1} \quad (7)$$

将爆炸压力视为线性减小时,得到炸药爆轰过程中炮孔的平均爆炸压力函数

$$P_B(t) = P_1 - \frac{P_1 - P_2}{T_2} t \quad (8)$$

式中, t 的取值区间为 $[0, T_2]$ 。

3 孔壁裂纹张开且气体流入阶段

炮孔径向裂纹扩展过程中,岩石失去环向承载

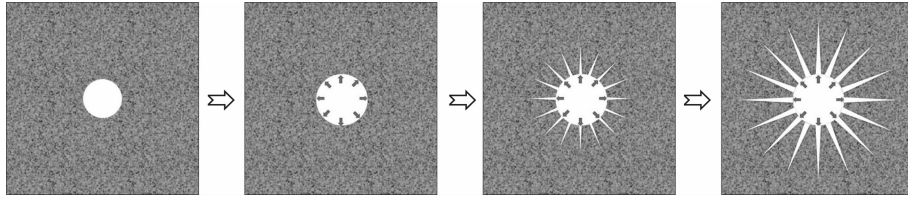


图1 炮孔弹性膨胀与裂纹扩展过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blasthole elastic expansion and crack propagation process

根据气体体积与压力间的关系,可得 T_3 时刻孔壁压力为

$$P_3 = P_2 \left[\frac{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2}{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2 + \Delta r C_1 T_3} \right]^k \quad (12)$$

因此,忽略炮孔进一步弹塑性膨胀,且主要考虑裂纹的扩展和气体的流动时,由气体状态方程得

$$P_c(t) = P_2 \left[\frac{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2}{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2 + \Delta r C_1 t} \right]^k \quad (13)$$

力,径向荷载和爆生气体将进一步驱动张拉裂纹的张开并向周围扩展,直至裂纹扩展至自由边界使介质破碎,该阶段所经历的时间约为

$$T_3 = \frac{b}{\zeta C_p} \quad (9)$$

式中, b 为炮孔与介质自由面某点的距离,即抵抗线长度。

如图1所示的炮孔弹性膨胀与裂纹扩展过程中,设炮孔横截面周长的增加量即为径向裂纹初始张开宽度的总和,即 $2\pi\Delta r$; 爆炸气体流入张开的裂纹中,其流速由0加速至速度 C_1 , 取平均流速 $0.5C_1$, 则流入裂缝的气体体积为

$$\Delta v = \pi \Delta r L_c C_1 t \quad (10)$$

式中, C_1 为气体的流速,近似认为气体流动处于临界状态则 C_1 等于当地声速。由于气体的密度、压力、泄漏量等参数相互影响,使气体压力方程难以求解,因此以气体 T_3 时刻流速代替流速函数。由气体临界状态的当地声速计算公式^[13], 且考虑在气体缝隙中流动时,其边界处流速为0, 则平均流速约为自由流动流速的 $1/3$, 可表示为

$$C_1 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{kP_3}{\rho_{e2}}} = \sqrt{\frac{kP_3 \left[\pi L_c \left(\frac{d_b}{2} + \Delta r \right)^2 + \pi \Delta r b L_c \right]}{m_e}} \quad (11)$$

式中: ρ_{e2} 为 T_3 时刻气体密度; m_e 为装药质量; P_3 为由气体状态方程得到的气体压力。

式中, t 的取值区间为 $[0, T_3]$ 。

4 介质剥离抛掷且气体逸出阶段

炮孔产生的裂纹贯通后,剥离的破碎介质将发生抛掷,进而发生“鼓包”,爆炸气体进一步膨胀并向空气中逸出。设在 $0 \sim T_3$ 时间内,爆炸荷载做功部分转化介质的动能,同时使剥离下来的介质获得一定的动量,在此过程中能量不守恒,但动量守恒。为简化分析过程,取炮孔直径为弹性膨胀结束时的直径 $d_b + 2\Delta r$, 则孔壁侧面积为 $\pi L_c (d_b + 2\Delta r)$, 根据动量定理得

$$\frac{1}{2}P_1\pi L_c(d_b + 2\Delta r)(T_1 + T_2 + T_3) = m_R V_R \quad (14)$$

式中: m_R 为爆破剥离的岩石、混凝土的质量, 可根据实际的爆破方案进行估算; V_R 为剥离介质的初速度。

同时, 考虑 T_3 时间内气体压力已经降至较低水平, 且中间过程有部分动量的损失, 仅考虑 T_1 和 T_2 阶段的动量转化过程时, 可得

$$V_R = \frac{P_1\pi L_c(d_b + 2\Delta r)(T_1 + T_2)}{2m_R} \quad (15)$$

同时, 爆炸气体将自裂纹开口处逸出, 设其以 C_2 速度逸出, 同样设气体流动处于临界状态, 此时气体的流速等于当地声速, 直至停止流动, 则平均流速为

$$C_2 \approx \frac{1}{2}C_1 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{kP_3}{\rho_{e2}}} \quad (16)$$

$$P(t) = \begin{cases} P_A(t), & 0 \leq t \leq T_1 \\ P_B(t - T_1), & T_1 < t \leq T_1 + T_2 \\ P_C(t - T_1 - T_2), & T_1 + T_2 < t \leq T_1 + T_2 + T_3 \\ P_D(t - T_1 - T_2 - T_3), & T_1 + T_2 - T_3 < t \leq T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \end{cases} \quad (18)$$

以多米尼加共和国 Pueblo Viejo 矿 Monte Negro B-370 矿坑爆破试验为算例对模型进行初步验证^[14]。该矿爆破岩体的岩性为安山岩, 密度 2800 kg/m^3 , 弹性模量 $E = 40 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.2$ 。#2 实验方案中, 炮孔孔深 $L = 7.25 \text{ m}$, 装药长度 $L_c = 3.75 \text{ m}$, 堵塞长度 3.5 m , 炮孔直径 $d_b = 0.22 \text{ m}$, 炸药密度 $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$, 炸药爆速 $D = 5500 \text{ m/s}$, 炸药直径 $d_c = 0.22 \text{ m}$, 炸药重量 171 kg 。根据标准抛掷爆破漏斗的形状, 裂纹扩展长度 $b = 10.2 \text{ m}$, 剥离岩石的质量 $m_R = 154000 \text{ kg}$, 取 $n = 1, \gamma = 3.0, k = 1.4, \zeta = 0.38$ 。

在距离炮孔 $5.2 \sim 7 \text{ m}$ 的 4 个监测孔中布置电气石压力传感器对爆炸产生的冲击信号进行监测,

考虑破碎介质的“鼓包”运动以及气体自不断增大的裂缝中匀速逸出时, 根据气体状态方程得到气体溢出时的孔壁压力近似解为

$$P_D(t) = P_3 \left[\frac{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r\right)^2 + \Delta r C_1 T_3}{\left(\frac{d_b}{2} + \Delta r + \frac{1}{2}V_{Rt}\right)^2 + \Delta r C_1 T_3 + V_R C_2 t^2} \right]^k \quad (17)$$

式中, t 的取值区间为 $[0, T_4]$ 。 T_4 为气体压力降至临界状态所需时间, 即压力降低至数个大气压力后认为气体基本停止流动。

5 孔壁压力的分段函数及其算例

将各阶段炮孔压力函数置于统一的时间坐标系下, 得到完整的孔壁压力分段函数

如图 2 所示。监测孔与炮孔深度一致, 且其中充满水, 传感器在孔中的深度为 5.375 m , 与装药中心高度一致。选择波形较好的 2 号监测孔的波形与计算结果进行对比。2 号监测孔距离炮孔 5.8 m , 且由于传感器置于水中时监测到的幅值与岩石中的幅值存在差异, 因此通过下式进行换算

$$P'(t) = \zeta \frac{r^2}{R^2} P(t) \quad (19)$$

由(1)式计算得的孔壁峰值压力为 4.5 GPa , 这与文献[14]给出的炸药爆轰压力计算值基本一致。取 $r = 0.11 \text{ m}, R = 5.8 \text{ m}, \xi = 2.7, \omega = 0$ 时, 得到的测点处爆破压力时程曲线与实验结果具有较好的吻合度(图 3)。

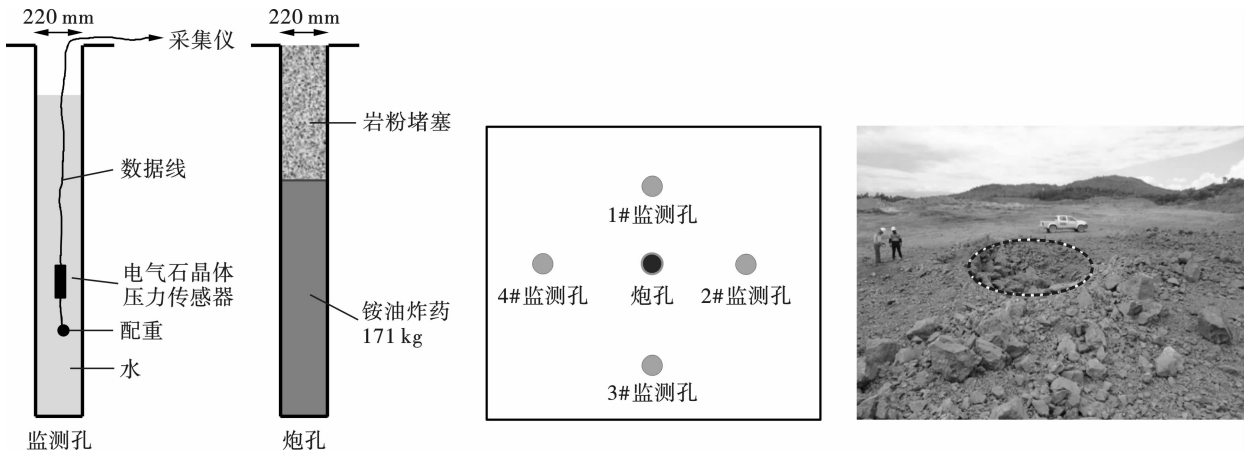


图 2 实验方案

Fig. 2 Experimental plan

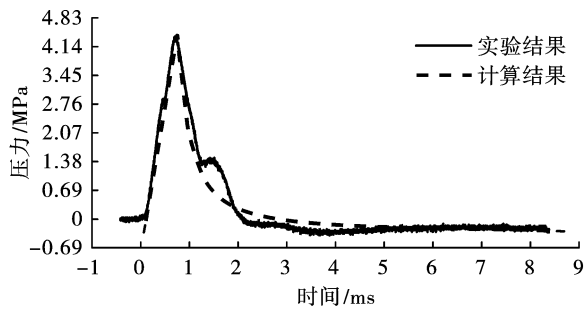


图3 实验结果与计算压力时程曲线对比

Fig. 3 Comparison of experimental and calculated pressure time history curves

6 结语

钻孔爆破炮孔孔壁压力计算通常采用半理论公式或爆轰产物状态方程进行估算,但这些传统的计算方法往往忽略了爆破介质的响应以及爆炸气体的逸出过程。通过对炸药爆轰过程以及爆破介质的响应过程的分析,提出了一种炮孔孔壁压力的简化计算方法。

(1) 计算孔壁压力时,宜将介质爆破过程简化为炸药爆轰炮孔升压、炮孔初步弹性膨胀、孔壁裂纹张开且气体流入、介质剥离抛掷且气体逸出四个阶段。

(2) 炸药爆轰炮孔升压持续时间为炸药爆轰所需时间、炮孔初步弹性膨胀持续时间为裂纹扩展至孔壁外2倍直径处所需时间、孔壁裂纹张开且气体流入持续时间为裂纹扩展至自由边界所需时间、介质剥离抛掷且气体逸出持续时间为压力降至临界状态所需时间。

(3) 通过简化分析炮孔及裂纹中爆炸气体体积的变化过程,基于理想气体状态方程,分别确定了各阶段孔壁压力随时间变化的数学函数。

(4) 利用多米尼加 Pueblo Viejo 矿爆破实验数据对计算模型进行了初步验证,计算结果与实验结果吻合情况良好。

参考文献 (References)

[1] 唐廷,尤峰,葛涛,等. 爆炸荷载简化形式对弹性区应力场的影响[J]. 爆破, 2007, 24(2): 7-10.
 [1] TANG Ting, YOU Feng, GE Tao. Effects of simplified forms of explosion load on stress field of elastic zone during explosion[J]. *Blasting*, 2007, 24(2): 7-10. (in Chinese)
 [2] FRANCIS O, OCUOREY. Measurement and predictions of borehole pressure variations in model blasting system[C]

// First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 1983: 7-20.

- [3] 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]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*, 1968, 5(1): 65-77.
 [4] JONG Y, LEE C, JEON S, CHO Y D, et al. Numerical modeling of the circular-cut using particle flow code [C] // 31st Annual Conference of Explosives and Blasting Technique, Orlando, CO., USA, CD-ROM, 2005.
 [5] MADER C L. Numerical modeling of explosives and propellants [M]. New York: CRC Press, 1998.
 [6] L E Fried, HOWARD W M, SOUERS P C. A new equation of state library for high pressure thermochemistry [C] // Proceedings of 12th International Symposium on Detonation. San Diego, California, USA, 2002: 228-238.
 [7] WU Xiong. Detonation performance of condensed explosives computed with the VLW EOS [C] // Proceedings of the 8th Symposium on Detonation. Albuquerque Office of Naval Research. 1986: 796-804.
 [8] W C Davis. Equation of state for detonation products [C] // Proceedings of 10th International Detonation Symposium, Boston, MA, 1993: 369-376.
 [9] MILLER P J, ALEXANDER K E. Determining JWL equation of state parameters using the gurney equation approximation [C] // Proceedings of 9th Symposium on Detonation, Portland, USA, 1989: 489-505.
 [10] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(2): 144-147.
 [10] DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. *Journal of Liaoning Technical University Natural Science Edition*, 2001, 20(2): 144-147. (in Chinese)
 [11] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
 [12] 张志呈. 岩体爆破裂纹扩展速度实验研究 [J]. 爆破器材, 2000, 29(3): 1-7.
 [12] ZHANG Zhi-cheng. An experimental study of crack expansion speed in rock blasting [J]. *Explosive Materials*, 2000, 29(3): 1-7. (in Chinese)
 [13] 金声明, 袁亚雄. 内弹道气动力原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
 [14] CARLOS Scherpenisse, GUILLERMO Silva, DANIEL Valdebenito, et al. Dynamic pressure study to minimize misfires at pueblo viejo mine [C] // Proceedings of the 46th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Colorado, USA, 2020: 285-296.

英文编辑: 柯波