

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.008

## 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析\*

张艳军<sup>1a</sup>, 陈岩武<sup>2</sup>, 雷美荣<sup>1b</sup>, 张东让<sup>1a</sup>

(1. 山西大同大学 a. 建筑与测绘工程学院; b. 机电工程学院, 大同 037003;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了考察钻孔爆破炮孔合适的堵塞长度及应力波在孔内传播规律, 采用理论分析和数值模拟相结合的方法对炮孔堵塞机理进行分析, 在基本假设的基础上, 通过对堵塞物动力学规律研究, 并考虑了堵塞物的压缩变形, 建立了堵塞长度的计算模型并验证了其合理性。通过有限元分析软件建立区域尺寸为1.5 m × 1.5 m, 炮孔深度为0.62 m, 孔径为0.04 m的力学模型, 模拟了孔底矩形连续耦合装药时, 堵塞长度为0.35 m时的单孔爆炸应力云图及炮孔底部和临空面处的动力响应曲线。结果表明: 应力波以球面波的形式向外传播, 炮孔装药中心区域最先出现应力, 而且应力最大, 应力波经过反射叠加最终释放。炮孔底部的应力在极短时间迅速达到峰值, 然后上下震荡, 逐渐在某一值上趋于稳定。炸药爆炸产生的应力波在很小一段时间后传到临空面, 临空面应力迅速达到峰值, 然后迅速下降直至应力波全部释放。该方法可以为炮孔堵塞分析提供参考, 并应用于煤矿炮掘工作面爆破分析中。

**关键词:** 钻孔爆破; 炮孔; 堵塞机理; 堵塞长度; ANSYS /LS-DYNA

中图分类号: TD235.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0045-05

## Analysis of Stemming Length of Borehole in Blasting

ZHANG Yan-jun<sup>1a</sup>, CHEN Yan-wu<sup>2</sup>, LEI Mei-rong<sup>1b</sup>, ZHANG Dong-rang<sup>1a</sup>

(1. a. Building and Surveying and Mapping Engineering College;

b. Mechanical and Electrical Engineering College, Shanxi Datong University,

Datong 037003, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to investigate the appropriate stemming length of borehole in blasting and the propagation law of stress wave in the borehole, theoretical analysis and numerical simulation were used to analyze the mechanism of the borehole stemming mechanism. On the basis of the basic hypothesis, a calculation model of the stemming length was established by studying the stemming dynamics and compression deformation of the stemming. Furthermore, the rationality of this model was verified. To simulate the explosion stress nephogram of the single hole and dynamic response curve at the bottom of the blasthole and free face of the blasthole with a stemming length of 0.35 m when rectangular coupling charge at the bottom of the continuously coupled hole, a mechanical model with a regional size of 1.5 m × 1.5 m, a hole depth of 0.62 m and a hole diameter of 0.04 m was established by using the finite element analysis software. The results show that the stress wave propagates outward in the form of spherical wave, and the stress appears first in the center area of the blasthole charge and reaches the maximum. The stress wave is finally released after reflection and superposition. Especially, the stress at the bottom of the hole reaches its peak rapidly in a very short time, then oscillates up and down, and gradually stabilizes at a certain value. It is a very short period of time for the stress wave caused by the explosion that reaches the free face. However, the stress on the free face reaches the peak value quickly, and then decreases rapidly until the stress wave is released completely. This method can provide reference for the analysis of blasthole stemming and be applied in blasting analysis of coal mine blasting face.

**Key words:** drilling blasting; blasthole; stemming mechanism; stemming length; ANSYS /LS-DYNA

钻孔爆破是煤矿掘进和岩体开挖的重要手段<sup>[1]</sup>,为了达到好的爆破效果,就必须堵塞炮孔<sup>[2]</sup>。由于堵塞长度,堵塞结构等堵塞参数不科学,会导致爆破效果差,易冲孔等现象<sup>[3-5]</sup>。其中,堵塞长度对爆破效果的影响尤为明显<sup>[6-10]</sup>。罗勇等根据气体膨胀作用破岩理论采用理论分析和实验研究相结合的方法研究了炮孔堵塞长度的计算公式<sup>[8]</sup>,结果表明:炮孔堵塞长度过大或过小均对控制破碎块度不利,大块率可能提高。李延龙和赵新涛等根据应力波和气体膨胀压力联合作用破岩理论采用理论分析和实验研究相结合的方法研究了炮孔堵塞长度的计算公式<sup>[10,11]</sup>,结果表明:合适的堵塞长度能取得比较好的爆破效果。罗伟等采用数值模拟的方法研究了炮孔的最佳堵塞长度<sup>[3]</sup>,结果表明:堵塞长度过长或过短都不利于爆破效果,适当堵塞爆破效果最好。杨东辉等研制了一套价格便宜、堵塞密实、装填快捷、运输方便的新型炮眼堵塞结构<sup>[12]</sup>,并采用试验方法对其进行力学验证。周志强等论述了爆破中炮孔填塞结构、填塞长度及研究进展<sup>[13]</sup>。任少峰等通过数值模拟和实验研究的方法研究了不同堵塞长度对爆破效果的影响<sup>[14]</sup>。以上文献研究炮孔堵塞长度鲜有考虑压缩变形,采用理论分析和数值模拟相结合的方法对堵塞机理进行分析,在考虑堵塞物压缩的基础上,建立了堵塞长度的计算模型。通过有限元分析软件模拟了该堵塞长度下的爆炸应力云图及炮孔底部和临空面处的动力响应曲线,为炮孔堵塞分析提供参考。

## 1 堵塞机理分析

合理的堵塞长度可以增大孔内应力波压力及其作用时间,延长爆生气体的作用时间,使炸药在炮孔内充分反应,减少烟尘排放。文献[15]指出爆炸冲击波先使堵塞物发生压缩变形,而后才冲出炮孔。因此在爆炸过程中,爆生气体对堵塞物的作用可分为两个阶段:第一阶段:爆生气体迅速充满爆破腔体后,堵塞物开始被压缩,直至被压实;第二阶段:堵塞物作为不可压缩的固体移动,直到最终从炮孔中移出。合适的堵塞长度就是在堵塞物被移出前,炮孔

岩壁破碎。堵塞长度太短,应力波能量衰减不彻底,爆生气体对岩壁的作用时间不够,堵塞效果不佳,在裂纹扩展至自由面之前,堵塞结构已从炮孔冲出,在这个过程中,爆破体积较小,爆破效果不好;堵塞长度太长,造成成本增加,在裂纹扩展至自由面时,堵塞物仍停留在炮孔内,这样导致爆生气体破岩过度,会产生较多小块,爆破效果不理想;堵塞长度合理,在裂纹扩展至自由面时,堵塞物刚好从炮孔冲出,既不会造成爆炸能量的浪费也不会造成堵塞成本的增加,爆破效果较好。可见堵塞长度对爆破效果的影响具有重要意义<sup>[16,17]</sup>。

## 2 堵塞长度力学模型

图1为堵塞物运动受力模型,为了便于计算,需对此模型做以下假设:

- (1) 堵塞物在炮孔内做匀加速直线运动;
- (2) 爆生气体为理想气体;
- (3) 被压缩后的堵塞物视为刚体。

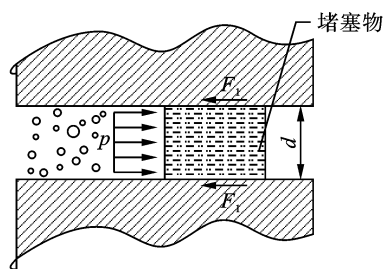


图1 堵塞物动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of stemming

### 2.1 堵塞物被压缩变形量的计算

假定炸药爆炸前堵塞物的直径为 $d$ ,堵塞物长度为 $l_0$ ,爆炸后由于爆生气体的作用,堵塞物产生了径向变形导致堵塞物与炮孔壁结合紧密,而此时堵塞物的轴向变形减小,即堵塞物发生了轴向压缩变形,记为 $\Delta l$ 。爆炸后,堵塞物的直径增加为炮孔直径 $d_1$ 。根据堵塞物在爆炸前后体积不变规律,知

$$\frac{1}{4}\pi d^2 l_0 = \frac{1}{4}\pi d_1^2 (l_0 - \Delta l) \quad (1)$$

根据(1)式知

$$\Delta l = \frac{d_1^2 - d^2}{d_1^2} l_0 \quad (2)$$

### 2.2 被压实堵塞物的堵塞长度的计算

假设被压实的堵塞物与炮孔口平齐,当被压实的堵塞物冲出炮孔之时,岩石完全破碎。

被压实的堵塞物质量为

收稿日期:2021-04-22

作者简介:张艳军(1982-),男,汉族,山西朔州人,副教授,硕士,主要从事工程力学、地下工程方面的教学研究, (E-mail) zjhappy2000@163.com。

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2020L0492);大同市重点工业研发计划项目(2018027)

$$m = \frac{1}{4} \pi d_1^2 l_1 \rho_0 \quad (3)$$

式中: $d$ 为炮孔直径, $m$ ; $l_1$ 为堵塞物压实后的堵塞长度, $m$ ; $\rho_0$ 为堵塞物密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据牛顿第二定律和运动学的计算规律,有

$$F - F_1 = ma \quad (4)$$

$$F = pA = p \frac{1}{4} \pi d_1^2 \quad (5)$$

由于堵塞物受到炮孔壁的法向约束力,根据泊松效应,堵塞物运动时受到的摩擦力为<sup>[17]</sup>

$$F_1 = \pi d_1 (l_0 - x) \lambda f p \quad (6)$$

其中

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (7)$$

式中: $F_1$ 为堵塞物移动时所受炮孔的摩擦阻力, $N$ ; $\lambda$ 为侧向压力系数; $x$ 为堵塞物在炮孔中的位移, $m$ ; $f$ 为堵塞物与炮孔壁的动摩擦系数; $\mu$ 为岩石动态泊松比,一般为 $0.8\mu_0$ ; $\mu_0$ 为岩石静态泊松比。

联立公式(3)、(4)、(5)、(6)、(7),得堵塞物在炮孔内的加速度为

$$a = \frac{F - \pi d_1 (l_1 - x) \lambda f p}{m} \quad (8)$$

很明显堵塞物在炮孔内部做变加速运动,根据假设(1),堵塞物在炮孔内做匀加速直线运动,可取平均加速度作为匀加速直线运动的加速度,则 $x = \frac{l_1}{2}$ ,有

$$a = \frac{2F - \pi d_1 l_1 \lambda f p}{2m} \quad (9)$$

根据动量定理有

$$(F - F_1) t_1 = m v_1 - m v_0 \quad (10)$$

式中: $t_1$ 为堵塞物在炮孔内运动的时间; $v_1$ 为堵塞物离开炮孔时的速度; $v_0$ 为堵塞物在炮孔中的初速度,由于从静止开始运动,故 $v_0$ 为0。

根据运动学知识得

$$l_1 = \frac{v_1^2}{2a} \quad (11)$$

联立公式(7)、(8)、(9)得

$$t_1 = \sqrt{\frac{l_0^2 \pi d_1 \rho_0}{2F - \pi d l_0 \lambda f p}} \quad (12)$$

### 2.3 堵塞长度力学模型建立

按照气体膨胀作用破岩理论,认为裂纹扩展速度是爆生气体膨胀引起的,假设裂纹扩展至自由面的时间即是爆生气体的破岩时间,则破岩时间为

$$t_2 = \frac{w}{V_k} \quad (13)$$

$$V_k = 0.28 C_p \quad (14)$$

如果破岩时间 $t_2$ 等于堵塞物整体被推出时间 $t_1$ 时,则破岩较好,堵塞长度最佳,即

$$t_1 = t_2 \quad (15)$$

联立式(10)、(11)、(12)、(13)式得出堵塞物被压实时最优长度计算公式

$$l_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{w}{V_k}\right)^4 \lambda^2 f^2 p^2 + 2\left(\frac{w}{V_k}\right)^2 d_1^2 \rho_0 p - \left(\frac{w}{V_k}\right)^2 \lambda f p}}{2\rho_0 d_1} \quad (16)$$

式中: $w$ 为最小抵抗线, $m$ ; $l_1$ 为堵塞物被压实时最优堵塞长度, $m$ ; $a$ 为堵塞物受到爆生气体作用时的加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ; $V_k$ 为裂纹扩展速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $t_1$ 为堵塞物在炮孔停留的时间, $s$ ; $t_2$ 为破岩时间, $s$ ; $\rho_0$ 为堵塞物密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $d$ 为炮孔直径, $m$ ; $C_p$ 为岩体中纵波速度, $\text{m}/\text{s}$ 。

堵塞物最优堵塞长度计算公式为

$$l_2 = l_1 + \Delta l \quad (17)$$

将公式(2)和公式(16)代入公式(17)得

$$l_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{w}{V_k}\right)^4 \lambda^2 f^2 p^2 + 2\left(\frac{w}{V_k}\right)^2 d_1^2 \rho_0 p - \left(\frac{w}{V_k}\right)^2 \lambda f p}}{2\rho_0 d_1} + \frac{d_1^2 - d^2}{d_1^2} l_0 \quad (18)$$

令 $l_0 = l_2$ ,代入公式(18)得到最优堵塞长度计算公式

$$l_2 = \frac{d_1 \sqrt{\left(\frac{w}{V_k}\right)^4 \lambda^2 f^2 p^2 + 2\left(\frac{w}{V_k}\right)^2 d_1^2 \rho_0 p - d_1 \left(\frac{w}{V_k}\right)^2 \lambda f p}}{2\rho_0 d^2} \quad (19)$$

当炮孔内轴向连续装药的情况下,爆生气体初始压力为<sup>[18,19]</sup>

$$p = \frac{\rho_1 V_b^2}{2(\alpha + 1)} k^{-2\alpha} n \quad (20)$$

式中: $\rho_1$ 为炸药密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $V_b$ 为炸药爆速, $\text{m}/\text{s}$ ; $k$ 为冲击波的透射系数; $\alpha$ 为爆轰产物的等熵指数<sup>[10]</sup>,一般取3; $n$ 为轴向装药系数。

为了得到堵塞物的最优长度,采取径向连续耦合装药,根据文献[11]已知的爆破参数和炸药参数:炮孔直径 $d_1$ 为0.04 m,炮孔深 $l_s$ 为1 m,最小抵抗线 $w$ 为0.5 m,堵塞物密度 $\rho_0$ 为2000  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,炸药爆速 $V_b$ 为4000  $\text{m}/\text{s}$ ,泊松比 $\mu_0$ 为0.3,摩擦系数 $f$

为0.05,侧向压力系数 $\lambda$ 为0.316,岩体中纵波速度 $c_p$ 为3600 m/s,冲击波的透射系数 $k$ 为1.45,岩体爆破裂缝的扩展速度 $V_k$ 为1008 m/s,炸药密度 $\rho_1$ 为1000 kg/m<sup>3</sup>,轴向装药系数 $n$ 取10。

假设堵塞物直径 $d$ 为0.038 m,按照气体膨胀作用破岩理论的最优堵塞长度计算模型将以上参数代入公式(19)中,可得堵塞物最优堵塞长度为 $l_2$ 。根据文献[11]知:堵塞的合理长度范围在0.35~0.45 m,在合理范围之内。

### 3 数值模拟分析

采用ANSYS/LS-DYNA建模,如图2所示,模拟区域尺寸为1.5 m×1.5 m,模拟炮孔深度为0.62 m,孔径为0.04 m,堵塞长度为0.35 m,孔底矩形连续耦合装药,装药量0.3 kg。划分网格如图3所示,设置临空面为反射面,在模型的对称面施加对称边界条件,其余边界施加无反射边界条件。

炸药使用乳化炸药,采用\* MAT-HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN关键字定义,参数如表1所示;岩体使用花岗岩模拟,采用\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC关键字定义,材料参数如表2所示。

表1 乳化炸药参数

Table 1 Parameters of emulsion explosive

炸药密度 $\rho$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	炸药爆速 $D$ / (m·s <sup>-1</sup> )	爆压 $P$ / GPa	表征炸药特性 参数 $A$ /GPa	表征炸药特性 参数 $B$ /GPa	表征炸药 特性参数 $R_1$	表征炸药 特性参数 $R_2$	表征炸药 特性参数 $\omega$	单位体积 内能 $E$ /GPa
1.24	5500	27	214	0.18	4.15	0.95	0.15	4.19

表2 花岗岩材料参数

Table 2 Granite material parameter

密度 $\rho$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	切变模量 $E_T$ /GPa	屈服极限 $\sigma_Y$ /MPa	失效 应变 $e$
2.5	12	0.21	0.5	48	0.06

堵塞物采用黏土,采用关键字\* MAT\_SOIL\_AND\_FOAM定义。炸药、花岗岩岩体、堵塞黏土均采用Euler网格建模,使用\* ALE\_MULTI-MATERIAL\_GROUP关键字定义多物质ALE算法。计算炸药爆炸后的等效应力云图,如图4中所示,应力波以球面波的形式向外传播,炮孔装药中心区域最先出现应力,而且应力最大, $t=0.0399$  ms时,应力波以近似椭圆形状向外扩散, $t=0.149$  ms时,应力波开始在堵塞物中传播,应力波以波的形式向外传播, $t=0.229$  ms时,应力波到达临空面并开始反射, $t=0.389$  ms时,应力波反射并叠加, $t=0.929$  ms时,爆轰产生的应力场卸载,应力波基本释放。最后考察



图2 爆破模型图

Fig. 2 Blasting model drawing

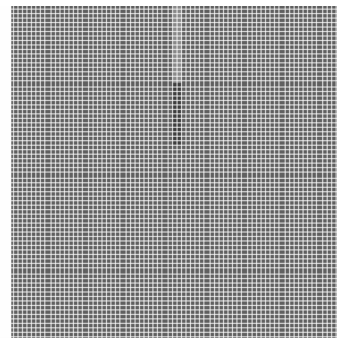


图3 网格划分图

Fig. 3 Grid generation diagram

节点 $H106$ 和 $H268$ 处的应力随时间的变化曲线,考察点位置如图5所示, $H106$ 处代表炮孔底部, $H268$ 代表临空面。 $H106$ 和 $H268$ 处的应力随时间的变化曲线如图6、图7所示,从图6可以看出 $H106$ 处的应力在极短时间迅速达到峰值,为1.41 GPa,然后逐渐稳定在0.45 GPa左右;从图7可以看出 $H268$ 处的应力在很小一段时间为0,在接近于0.2 ms时,应力波传播到自由端,应力波显现,达到0.1 MPa左右,然后迅速下降。

### 4 结论

(1)考虑了堵塞物的压缩因素建立的堵塞长度计算模型较为合理。该计算模型为堵塞物长度的合理设计提供了理论依据。

(2)数值模拟方法结果表明:应力波以球面波的形式向外传播,炮孔装药中心区域最先出现应力,而且应力最大,应力波经过反射叠加最终释放。炮孔底部的应力在极短时间迅速达到峰值,然后上下

震荡,逐渐在某一值上趋于稳定。炮孔临空面的应力,在很小一段时间过后才传到临空面

应力迅速达到峰值,然后迅速下降直至应力波全部释放。该方法可为堵塞分析提供借鉴。

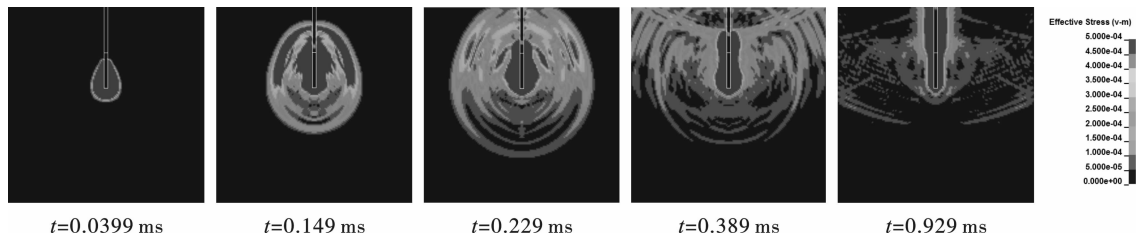


图 4 堵塞长度为 0.35 m 时不同时刻的等效应力云图

Fig. 4 Equivalent stress nephogram at different moments with a plugging length of 0.35 m

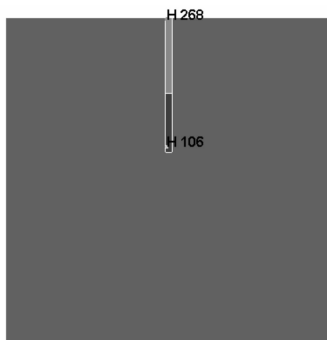


图 5 考察点位置图

Fig. 5 Location map of investigation point

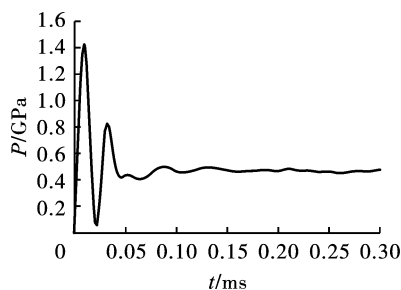


图 6 H106 处的应力随时间的变化曲线

Fig. 6 Stress variation curve with time at H106

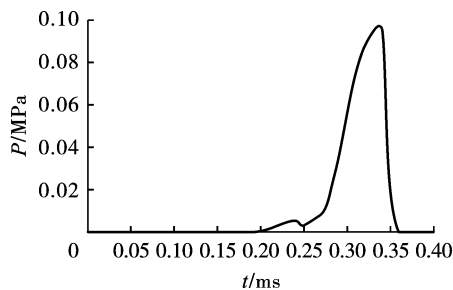


图 7 H268 处的应力随时间的变化曲线

Fig. 7 Stress variation curve with time at H268

参考文献 (References)

[1] 牛江瑞,杨建华,姚池. 炮孔内爆炸荷载非均匀性对激发应力场的影响[J]. 人民长江,2016,47(3):83-87.  
 [1] NIU Jiang-ru, YANG Jian-hua, YAO Chi. Study on effect

of non-uniform blast loading in a cylindrical blast-hole on-induced dynamic stress field [J]. Yangtze River, 2016, 47(3):83-87. (in Chinese)

[2] 马春德,刘泽霖,王业顺,等. 大断面隧道掘进中炮孔快速堵塞新方法研究[J]. 矿冶工程,2020,40(4):6-9.  
 [2] MA Chun-de, LIU Ze-lin, WANG Ye-shun, et al. A new method for rapid blockage of boreholes in large-section tunneling excavation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4):6-9. (in Chinese)  
 [3] QIU X Y, SHI X Z, ZHANG S, et al. Experimental study on the blasting performance of water-soil composite stemming in underground mines [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018(1):1-11.  
 [4] 张艳军,雷美荣,宁掌玄. 炮眼堵塞结构设计及参数优化[J]. 爆破,2017,34(2):55-59.  
 [4] ZHANG Yan-jun, LEI Mei-rong, NING Zhang-xuan. Structure design and parameters optimization of blasthole stemming [J]. Blasting, 2017, 34(2):55-59. (in Chinese)  
 [5] 李国平,杨伟,王华,等. 露天台阶爆破炮孔路料堵塞工业试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(5):42-45.  
 [5] LI Guo-ping, YANG Wei, WANG Hua, et al. Industrial experiment study on paving material for stemming blasting hole in open-pit bench blasting [J]. Mining Research and Development, 2016, 36(5):42-45. (in Chinese)  
 [6] 李启月,刘冰川,陈亮,等. 掏槽爆破一次成井炮孔合理堵塞长度[J]. 科技导报,2013,31(19):15-19.  
 [6] LI Qi-yue, LIU Bing-chuan, CHEN Liang, et al. Deep hole blasting in a reasonable suppling hole plug length [J]. Science and Technology Leader, 2013, 31(19):15-19. (in Chinese)  
 [7] 梁瑞,吕亚茹,周文海,等. 地下采场爆破炮孔堵塞效应及长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5):1546-1554.  
 [7] LIANG Rui, Lü Ya-ru, ZHOU Wen-hai, et al. Study on blockage effect and the stem length in underground stope blasting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5):1546-1554. (in Chinese)