

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.02.010

爆破载荷下隧道围岩破坏裂隙范围研究^{*}

费鸿禄 苏 强 蒋安俊 洪陈超
辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

[摘 要] 为确定爆破载荷作用下岩体的裂隙范围,应用摩尔-库伦强度准则确定岩石在冲击波作用下的粉碎区;在考虑粉碎区范围、应力波衰减指数改变和岩石三向受力状态的情况下,用 Mises 强度准则计算裂隙区范围;在不考虑爆生气体在应力波形成的裂隙区损失的前提下,用岩石的断裂韧性来计算爆生气体充满粉碎区后岩石裂隙的二次扩展范围。通过理论计算与现场声波实测值对比,理论计算值比实测值小 8.45%。分析表明,该裂隙范围计算方法合理,并可以对类似工况的裂隙范围进行估算。

[关键词] 爆破载荷;冲击波;应力波;爆生气体;裂隙范围

[分类号] TD235

Damage Fracture Range of Tunnel Surrounding Rock under Blasting Load

FEI Honglu, SU Qiang, JIANG Anjun, HONG Chenchao
Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT] In order to determine the fracture scope of rock mass under blasting load, Mohr-Coulomb strength criterion was used to determine the rock crushing zone under shock wave action. Fracture zone was calculated by Mises strength criterion considering crushing zone, change of stress wave attenuation exponent and three-dimensional stress state of rock. The two expansion range of rock fissure after blasting gas was calculated by using the fracture toughness of rock without considering the loss of explosive gas in the fracture zone formed by the stress wave. By comparing theoretical calculation with measured acoustic wave data at the scene, the former is smaller than the latter 8.45%. Analysis shows that the method for calculating the fissure area is reasonable and can estimate the fracture scope in similar working conditions.

[KEYWORDS] blasting load; shock wave; stress waves; explosion gas; fracture range

引言

 钻爆法是隧道施工常用方法之一,爆破施工过程中对周围岩体的扰动和破坏过程一直是备受关注的问题。专家学者对此展开了一系列研究,冷振东等^[1]通过建立一个四分区损伤范围模型对预测钻孔爆破粉碎区范围的改进模型进行了研究;胡荣等^[2]采用 PMMA 材料制试样,通过改变裂纹与炮孔的角度对爆破载荷作用下裂纹的扩展规律进行了研究;韩森等^[3]采用超声波测试和岩石压缩试验方法,从爆破前、后岩体平均波速和岩石平均抗压强度两个方面研究了白云岩岩体的爆破损伤;林英松等^[4]通过分析数据建立考虑惯性矩的模型,从动力

学的角度,研究了爆生气体作用下孔壁岩石的开裂机理;杨小林等^[5]以断裂力学理论为支撑,通过模拟煤体爆破试验,研究了应力波和爆生气体作用下裂纹扩展长度和破碎原因。尽管专家们已经对裂隙范围有了突破性进展,但在冲击波作用后,爆生气体应该是充满粉碎区,前人们只考虑爆生气体充满炮孔,而没考虑充满粉碎区。

本文中,在考虑粉碎区范围、应力波衰减指数改变和岩石三向受力状态而不考虑初始损伤和地应力的前提下,对粉碎区、裂隙区范围进行计算。在爆生气体充满粉碎区后,通过岩石的断裂韧性来确定裂隙的二次扩展范围。采用理论推导与现场试验相对比的方法,对爆破载荷下隧道围岩的裂隙范围进行研究。对于合理确定爆破参数、分析围岩的稳定性、

^{*} 收稿日期:2018-09-27
第一作者:费鸿禄(1963 -),男,博士,教授,博导,主要从事工程爆破、地下工程教学和科研工作。E-mail:feihonglu@163.com
通信作者:苏强(1992 -),男,硕士,主要从事岩土工程爆破工程方面的研究。E-mail:41810186@qq.com

合理制定安全加固措施、确定隧道围岩的裂隙范围等显得尤为重要。

1 爆炸产生的荷载计算

按声学近似原理求解爆炸瞬间炸药在炮孔壁上产生的冲击波压力。若采用耦合装药^[6-7]:

$$p = \frac{2\rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D} p_0; \quad (1)$$

$$p_0 = \frac{1}{1+\gamma} \rho_0 D^2. \quad (2)$$

式中: p 为冲击波压力, MPa; p_0 为炸药爆轰压力, MPa; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; ρ_0 为炸药密度, kg/m^3 ; C_p 为岩石纵波速度, m/s ; D 为炸药爆速, m/s ; γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数, 一般凝聚炸药取 $\gamma = 3$ 。

若采用径向不耦合装药, 不耦合系数 k 较小时, 爆生气体的膨胀只经过 $p_0 > p_k$ 这一种状态^[8], p_k 为炸药的临界压力, Pa, 对于 2# 岩石乳化炸药, p_k 为 200 MPa。岩石中的透射冲击波压力为^[9]

$$p = 0.5 p_0 k^{-6} n_0. \quad (3)$$

式中: k 为装药径向不耦合系数, $k = r_c/r_b$, r_b 、 r_c 分别为装药半径和炮孔半径, mm; n 为炸药爆炸产物膨胀炮孔壁时的压力值增大系数, 一般取 $n = 10$ 。

冲击波在岩体内传播的过程中逐渐衰减为应力波。岩体中任意一点的径向应力和切向应力可表示为^[7]

$$\sigma_r = p \bar{r}^{-\alpha}; \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -b\sigma_r. \quad (5)$$

式中: σ_r 为径向应力, MPa; σ_θ 为切向应力, MPa; \bar{r} 为比例距离, $\bar{r} = r/r_b$, r 为计算点到炮孔中心的距离, mm; α 为冲击波衰减指数时, 取 $\alpha = 3$, 为应力波衰减指数时, 取 $\alpha = 2 - \mu_d/(1 - \mu_d)$, μ_d 为岩石的动态泊松比; b 为侧向压力系数, $b = \mu_d/(1 - \mu_d)$ 。有研究表明^[10], 在隧道围岩爆破的加载率范围内, $\mu_d = 0.8 \mu$, μ 为岩石的静态泊松比。

2 粉碎区范围计算

冲击波作用范围内, 岩体处于体积压缩状态, 取其中任一单元体进行分析^[11], 如图 1。图 1 中, β 为岩体两组共轭破坏面与 σ_r 的夹角。

按摩尔-库伦破坏准则, 岩体在压缩应力作用下表现为沿剪切面的剪切破坏, 这与实际岩体表现出的破坏形式一致, 因此, 采用摩尔-库伦破坏准则判

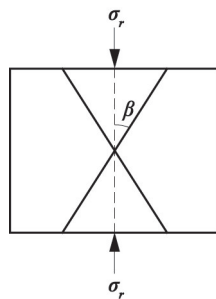


图 1 单元体受力图

Fig. 1 Element force diagram

断岩体破坏与否是合适的。由一点的应力状态分析可得破坏面上的正应力和剪应力分别为

$$\sigma_\beta = 0.5 \sigma_r (1 - \cos 2\beta); \quad (6)$$

$$\tau_\beta = 0.5 \sin 2\beta \sigma_r. \quad (7)$$

式中: σ_β 为破坏面上的正应力, MPa; τ_β 为破坏面上的剪应力, MPa。 σ_r 由式(4)确定。

摩尔-库伦岩石破坏条件为

$$\tau_\beta \geq \sigma_\beta \tan \varphi + c. \quad (8)$$

式中: φ 、 c 分别为岩石的内摩擦角和黏聚力系数。

将式(6)和式(7)代入式(8), 并令 $f(\beta) = \tau_\beta - \sigma_\beta \tan \varphi - c$, 得

$$f(\beta) = 0.5 \sigma_r \sin 2\beta - 0.5 \sigma_r (1 - 2 \cos \beta) \tan \varphi - c. \quad (9)$$

岩石发生破坏时, $f(\beta)$ 必然取得最大值, 则有下式成立:

$$\frac{df(\beta)}{d\beta} = 0. \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得

$$\beta = \pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (11)$$

将式(6)、式(7)、式(11)代入式(8)中, 得压碎区内岩石的破坏条件为

$$\sigma_r \geq \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (12)$$

粉碎区范围为

$$\bar{r} = \left[\frac{0.5 p_0 k^{-6} n (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi} \right]^{\frac{1}{\alpha}}; \quad (13)$$

$$R_1 = \left[\frac{0.5 p_0 k^{-6} n (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi} \right]^{\frac{1}{\alpha}} r_b. \quad (14)$$

式中: R_1 为粉碎区范围的半径, mm。

3 裂隙区范围计算

材料的实际受力情况和性质决定了它在外载荷作用下的破坏准则^[12]。由于岩石属于脆性材料, 岩

石的抗压强度比抗拉强度大很多。已有专家^[6,13]证明在岩石爆破中,岩石处于三向应力状态,岩石受压破坏形成粉碎区,受拉破坏形成裂隙区。

如果将该问题看成平面应变问题,则可以得到

$$\sigma_z = \mu_d(\sigma_r - \sigma_\theta) = \mu_d(1 - b)\sigma_r。 \tag{15}$$

岩石中任一点的应力强度^[9]为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]^{\frac{1}{2}}。 \tag{16}$$

将式(4)、式(5)、式(15)代入式(16),可得

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_r[(1 + b)^2 - 2\mu_d(1 - b)^2(1 - \mu_d) + (1 + b^2)]^{\frac{1}{2}}。 \tag{17}$$

破坏条件为

$$\sigma_i \geq \sigma_{td}。 \tag{18}$$

式中: σ_i 为裂隙区岩石任意一点的应力强度,MPa; σ_{td} 为岩石的单轴动态抗拉强度,MPa。

有关研究表明^[7],岩石的动态抗拉强度与静态抗拉强度在爆破加载应变范围内的关系为

$$\sigma_{td} = \sigma_t。 \tag{19}$$

式中: σ_t 为岩石的静态抗拉强度,MPa。

粉碎区外就是裂隙区,由式(4)、式(14)、式(18)可计算出裂隙区的范围:

$$R_2 = \left(\frac{\sigma_L B}{\sqrt{2}\sigma_{td}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} R_1。 \tag{20}$$

式中: $B = [(1 + b)^2 - 2\mu_d(1 - b)^2(1 - \mu_d) + (1 + b^2)]^{1/2}$; α 为应力波衰减指数, $\alpha = 2 - \mu_d/(1 - \mu_d)$; σ_L 为粉碎区和裂隙区临界面上岩石的径向应力,MPa; R_2 为裂隙区范围的半径,mm。

4 爆生气体作用下裂隙二次扩展范围计算

爆生气体以准静态压力的形式作用于应力波形成的裂隙区,并以膨胀、挤压、气楔等综合作用使径向裂隙产生二次扩展。炸药爆轰完毕,爆生气体迅速膨胀,假定整个过程是等熵绝热的,当时,爆生气体的膨胀规律为^[14-15]

$$p_1 \rho_x^{-k} = A。 \tag{21}$$

式中: p_1 为爆生气体膨胀过程中的瞬时压力,MPa; ρ_x 为爆生气体膨胀过程中的瞬时密度,kg/m³; A 为常数。

假定爆生气体在炮孔中的膨胀规律遵循式(21),则充满炮孔后爆生气体多的压力为

$$p_2 = 0.5 p_0 k^{-6}。 \tag{22}$$

4.1 裂隙扩展的平均宽度

由一维爆生气体膨胀理论可知,爆生气体在粉碎区的压力随时间变化的关系为

$$p(t) = \frac{p_2}{8} \left(1 + \frac{x}{C_0 t}\right)^k。 \tag{23}$$

式中: t 为时间,s; x 为爆生气体沿炮孔轴向运动的距离,m; C_0 为爆生气体的声速,m/s。 C_0 按式(24)确定:

$$C_0 = \sqrt{k p_2 \rho_1^{-1}}; \tag{24}$$

$$\rho_1 = \left(\frac{r_b}{R_1}\right)^2 \rho_H; \tag{25}$$

$$\rho_H = \frac{k + 1}{k} \rho_0。 \tag{26}$$

式中: ρ_1 为爆生气体充满粉碎区时的密度,kg/m³; ρ_H 为爆生气体的初始密度,kg/m³。

裂隙扩展速度极限值为^[14]

$$V_m = \frac{\pi R_1^2 C_0}{2b'A}。 \tag{27}$$

式中: A 为常数, $A = 0.27 L_b$, L_b 为炮孔长度,m。

由裂隙扩展的极限速度 $V_m = 0.38 C_p$ ^[16],可得裂隙扩展过程中的平均宽度为

$$b' = \frac{\pi R_1^2 C_0}{0.76 C_p A}。 \tag{28}$$

4.2 起裂和止裂

假定爆生气体致裂时粉碎区范围不变,其膨胀压力为

$$p_1 = p_2 \left(\frac{\pi R_1^2}{\pi R_1^2 + 2ab'}\right)^\gamma。 \tag{29}$$

式中: γ 为绝热指数, $\gamma = 1.4$; a 为裂隙随爆生气体压力变化的扩展长度,mm。

由断裂力学理论可知,如果岩石的断裂韧性小于裂隙尖端的应力强度因子,就会起裂,反之就会止裂。断裂力学模型如图2,裂隙尖端的强度因子可表示为^[17]

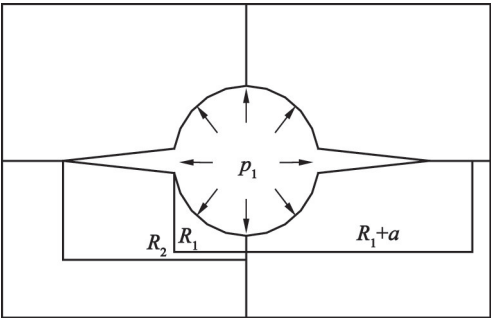


图2 断裂力学模型

Fig.2 Fracture mechanics model

$$K_1 = p_1 F \sqrt{\pi(R_1 + a)}.$$

(30)

式中: F 是与裂隙区半径和裂隙长度有关的系数,取值与 $(R_1 + a)/R_1$ 有关,随着裂隙长度的增大而增大,当 $(R_1 + a)/R_1 > 1.5$ 时, $F \rightarrow 1.0$ 。

裂隙尖端的应力强度因子在起裂前可表示为

$$K_{IC} = p_2 F \sqrt{\pi R_2}.$$

(31)

式中: K_{IC} 为岩石的断裂韧性, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

采用刘军等^[18]的方法对岩石的断裂韧性进行计算。

由裂隙扩展条件 $K_I > K_{IC}$,可得初始起裂条件为

$$p_2 > \frac{K_{IC}}{F \sqrt{\pi R_2}}.$$

(32)

裂隙扩展的临界驱动力为

$$p_c = \frac{K_{IC}}{F \sqrt{\pi(R_1 + a)}}.$$

(33)

式中: p_c 为临界驱动力, MPa 。

如果爆生气体压力与临界驱动力满足 $p_2 > p_c$,裂隙就会扩展。但爆生气体压力会随着裂隙的扩展逐渐降低,当 $p_2 < p_c$ 时,裂隙停止扩展。

4.3 裂隙二次扩展的长度计算

根据止裂条件,考虑到裂隙尖端止裂时 $R_1 + a/R_1$ 远大于1.5,即 $F \rightarrow 1$,故裂隙停止扩展时:

$$p_m = \frac{K_{IC}}{F \sqrt{\pi(R_1 + a_m)}}.$$

(34)

式中: p_m 为止裂时爆生气体的压力, MPa ; a_m 为止裂时裂隙扩展的长度, mm 。

同时, p_m 和 a_m 满足式(29):

$$p_m = p_2 \left(\frac{\pi R_1^2}{\pi R_1^2 + 2a_m b'} \right)^{\gamma}.$$

(35)

联立式(34)、式(35),可求解不考虑爆生气体损失情况下裂隙二次扩展的最终长度。

5 工程实例及现场试验

以福建省福州市福平铁路新鼓山隧道爆破开挖为工程依托,对爆破载荷作用下隧道围岩的损伤情况进行研究。新鼓山隧道穿越福州市鼓山,进口位于福州市东山村东侧,出口位于福州市魁岐村北侧。

隧道设计为单洞双线,总长8 199 m,起止里程为DK5 + 095 ~ DK13 + 294。

5.1 隧道围岩物理参数

在现场选取与声波试验相同的岩样^[19],做巴西劈裂试验,如图3,测岩体的抗拉强度,试验获得的数据如表1,隧道围岩炸药和炮孔计算参数如表2。



图3 劈裂后试件

Fig.3 Post split specimen

表1 劈裂抗拉试验数据

Tab.1 Splitting tensile test data

试验号	试件直径/mm	试件厚度/mm	破坏载荷/kN	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa
1 [#]	50	20	15.42	9.82	10.19
2 [#]	50	20	11.50	7.32	
3 [#]	50	20	18.35	11.69	
4 [#]	50	20	14.48	9.22	
5 [#]	50	20	20.23	12.89	

对表1试验的抗拉强度取平均值,得到试件的平均抗拉强度约为10.19 MPa。

5.2 现场试验

本次现场试验过程中,上台阶爆破作用下掌子面的循环进尺为2.5 m,现场具体的炮眼布置情况如图4,炸药类型为2[#]岩石乳化炸药。爆破参数如表3。现场采用楔形掏槽,单段最大药量为28.8 kg。从表3中可以看出,爆破过程中共选取8个段别的导爆管,采用毫秒导爆管延时起爆。

5.3 计算结果分析

新鼓山隧道属于大断面隧道,周边眼采用不耦合装药。由于周边眼的作用是控制隧道断面规格形

表2 隧道围岩炸药和炮孔计算参数

Tab.2 Tunnel surrounding rock explosives and calculation parameters of blasting holes

围岩密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚度/MPa	炸药密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	炮孔直径/mm	药包直径/mm
2 500	5 020	0.2	55	43	1 240	4 200	40	32

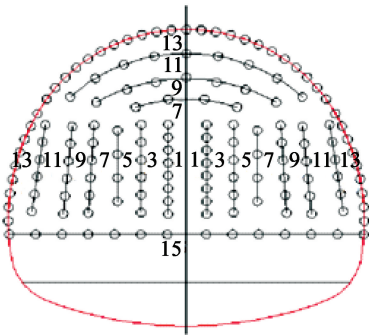


图4 爆破方案炮眼布置图

Fig.4 Arrangement scheme of blasting holes

表3 台阶法上台阶断面爆破参数
Tab.3 Blasting parameters of the upper step section in bench method

段别	炮眼类别	炮眼数量	单孔药量/kg	单段药量/kg	延时/ms
1	掏槽眼	16	1.8	28.8	0
3	辅助掏槽眼	12	1.2	14.4	50
5	辅助眼	8	1.2	9.6	110
7	辅助眼	12	1.0	12.0	200
9	辅助眼	12	0.8	9.6	310
11	辅助眼	12	0.6	7.2	460
13	中下周边眼	20	0.4	8.0	460
7	上槽辅助眼	4	1.0	4.0	310
9	上槽辅助眼	7	1.0	7.0	460
11	上槽辅助眼	9	0.8	7.2	650
13	上周边眼	23	0.4	9.2	880
15	底眼	14	1.0	14.0	880
合计		149		131	

状,因此,理论计算时选取周边眼作为研究对象。按照现场爆破试验的参数并结合隧道围岩的实际情况,用表1、表2中的参数对爆破载荷作用下隧道围岩的裂隙范围进行计算。通过式(2)~式(14)计算,可得粉碎区的半径 $R_1=2.97r_b=47.52\text{ mm}$;按式(15)~式(20)计算,应力波作用下岩体的裂隙范围 $R_2=15.14r_b=242.24\text{ mm}$ 。哈努卡耶夫^[20]的研究表明,炸药在岩石中爆炸时形成的粉碎区半径为装药半径的2~3倍,裂隙圈半径为装药半径的10~15倍,故该方法是可靠的。联立式(34)、式(35),则不考虑爆生气体损失的情况下爆生气体对岩体二次扩展范围理论计算值为 $a_m=856.37\text{ mm}$,岩石的裂隙范围为1 098.61 mm。

NM-4A 非金属超声检测分析仪将电信号转换为超声波信号,从发射探头传入被测围岩,将接收探

头收到的声波信号转为电信号进行处理,并传输给收集系统。通过分析监测到的声波速度的变化情况,确定围岩在爆破载荷作用下的裂隙范围。由于拱顶处无法向声波孔内注水,所以只对侧周边眼的裂隙范围进行声波试验,声波孔现场布置如图5,现场测试如图6。



图5 声波孔现场布置

Fig.5 The site layout of acoustic hole



图6 现场测试

Fig.6 Field test

现场通过 NM-4A 非金属超声检测分析仪,测得在爆破载荷作用下掌子面附近岩体的损伤范围为1.2~1.4 m。通过对比可知,理论计算值比实测值小8.45%,是由于未考虑初始损伤和掘进爆破对隧道围岩造成一定程度的损伤。通过以上分析,该计算方法可以对岩石裂隙范围进行估算。

6 结论

冲击波作用下岩石的粉碎区半径为炮孔半径的2.97倍,在考虑粉碎区的情况下,计算出应力波作用下岩石的裂隙区范围为242.24 mm。

考虑粉碎区和裂隙区存在的情况下,把爆生气体充满炮孔修改为充满粉碎区,用岩石的断裂韧性来计算爆生气体对岩石裂隙造成的二次扩展范围,更具有合理性。从而求得不考虑爆生气体损失情况下,裂隙二次扩展的长度为856.37 mm。

理论得出的围岩裂隙范围比现场采用声波法所测得的围岩裂隙范围小8.45%,其原因可能与掘进

爆破对隧道围岩造成一定程度初始损伤,且为群孔爆破有关,该计算方法可以对类似工况的隧道围岩裂隙范围进行估算。

参 考 文 献

- [1] 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.
- 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.
- [2] 胡荣, 朱哲明, 胡哲源, 等. 爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1476-1481.
- HU R, ZHU Z M, HU Z Y, et al. Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1476-1481.
- [3] 韩森, 张钦礼. 爆破对矿岩损伤规律试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 100-103.
- HAN S, ZHANG Q L. Experimental study on the destructive regularity of the rock mass under the blasting load [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 100-103.
- [4] 林英松, 张宝康, 蒋金宝, 等. 爆生气体作用下孔壁岩石开裂的机理及影响因素研究 [J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 50-54.
- LIN Y S, ZHANG B K, JIANG J B, et al. Mechanism and influencing factors on radial fractures' cracking and propagation under exploding gas [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3): 50-54.
- [5] 杨小林, 孙博, 褚怀保. 爆生气体在煤体爆破过程中的作用分析 [J]. 金属矿山, 2011(11): 65-68.
- YANG X L, SUN B, CHU H B. Analysis on effect of detonation gas in the process of coal blasting [J]. Metal Mine, 2011(11): 65-68.
- [6] 王文龙. 钻眼爆破 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [7] 杨永琦. 矿山爆破技术与安全 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [8] 熊海华, 卢文波, 李小联, 等. 龙滩水电站右岸导流洞开挖中爆破损伤范围研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 432-436.
- XIONG H H, LU W B, LI X L, et al. Study on blast-induced damage zone for excavation of diversion tunnel at right bank of Longtan Hydroelectric Project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 432-436.
- [9] 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(自然科学版), 2001, 20(2): 144-147.
- DAI J. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, 20(2): 144-147.
- [10] 杨善元. 岩石爆破动力学基础 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [11] 高金石, 张继春. 爆破破岩机理动力分析 [J]. 金属矿山, 1989(9): 7-12, 6.
- [12] 孙训方, 方孝淑, 关来春. 材料力学(II) [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] 宗琦. 岩石内爆炸应力波破裂区半径的计算 [J]. 爆破, 1994(2): 15-17.
- [14] 宗琦. 爆生气体的准静态破岩特性 [J]. 岩土力学, 1997(2): 73-78.
- ZONG Q. Investigation on features of rock quasi-static fragmentation by gaseous explosion product [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997(2): 73-78.
- [15] 张玉明, 贡永峰, 张奇. 切缝药包破岩机理及现场应用 [J]. 爆破器材, 2001, 30(5): 5-8.
- ZHANG Y M, YUN Y F, ZHANG Q. The slit-charge breaking rock mechanism and application [J]. Explosive Materials, 2001, 30(5): 5-8.
- [16] LANG L C. 最优延迟时间 [J]. 宗琦, 马芹永, 译. 煤炭科技资料, 1991(3): 80-86.
- [17] 邱崇光. 用较准确的力学模型分析邻近炮孔成缝机理 [J]. 爆破, 1991(1): 11-13, 19.
- [18] 刘军, 孙辉. 一种岩石 I 型断裂韧度 K_{IC} 估算方法 [J]. 土木工程, 2018, 7(1): 74-81.
- LIU J, SUN H. An estimation method for mode I fracture toughness K_{IC} of rocks [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 7(1): 74-81.
- [19] 费鸿禄, 赵春生, 杨朝阳, 等. 爆破荷载作用下隧道围岩损伤范围 [J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 1-4.
- FEI H L, ZHAO C S, YANG C Y, et al. Damage range of tunnel surrounding rock under blasting load [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 1-4.
- [20] 哈努卡耶夫 A H. 矿岩爆破的物理过程 [M]. 刘殿中, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1980.