



移动阅读

张召冉,陈华义,矫伟刚,等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报,2020,45(S2):791-800.
ZHANG Zhaoran, CHEN Huayi, JIAO Weigang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2):791-800.

含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究

张召冉¹, 陈华义², 矫伟刚³, 于天富¹

(1. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144; 2. 平顶山神马工程塑料有限责任公司, 河南 平顶山 467013; 3. 北京市勘察设计院有限公司, 北京 100038)

摘要: 掏槽是岩石井巷爆破的关键, 含空孔直眼掏槽技术在岩石爆破中应用广泛, 针对含空孔直眼掏槽参数确定没有可靠依据的问题, 以大空孔直眼掏槽为对象, 在分析掏槽空孔效应的基础上进行了掏槽参数确定的理论分析, 并结合算例验证掏槽爆破参数设计的有效性。研究表明: 含空孔直眼掏槽, 掏槽区岩石的破坏是炮孔产生的裂隙区以及由空孔的应力集中效应、自由面效应和碎胀空间效应共同作用的结果, 3种效应对破岩的作用机理不同, 应力集中效应对岩石的破坏是因为空孔附近的切向应力起主要作用, 切向应力导致径向裂纹的产生, 且径向裂纹的产生与炮孔和空孔距离有关, 该距离存在临界值; 自由面效应与空孔直径相关, 大直径空孔加剧了应力波的反射, 反射的应力波产生的拉伸破坏范围在空孔与炮孔连心线处存在最大值, 连心线两侧拉伸破坏范围逐渐减小, 即形成“凹”状片裂破坏; 碎胀空间效应为破岩提供了充足的空间, 有利于提高爆破效率, 提出了动态碎胀系数的概念。从爆生气体对爆生裂纹扩展影响角度, 分析了炮泥运动距离对爆生气体压力和裂纹扩展长度的影响, 推导了爆生裂纹长度计算公式, 空孔处片裂区范围公式、空孔处径向裂纹产生判据公式。含空孔直眼掏槽参数中炮孔与空孔距离 L 由爆生裂纹区、片裂区、空孔径向裂纹区共同决定, 炮孔间距 a 由爆生裂纹区、空孔的碎胀空间(空孔半径 r_2) 确定。

关键词: 岩巷; 大直径空孔; 直眼掏槽; 空孔效应; 爆破参数

中图分类号: TD236

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2020)S2-0791-10

Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole

ZHANG Zhaoran¹, CHEN Huayi², JIAO Weigang³, YU Tianfu¹

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Pingdingshan Shenma Engineering Plastics Co., Ltd., Pingdingshan 467013, China; 3. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The cutting is the key to the blasting of rock roadway. The straight-hole cutting with empty-hole is widely used. Aiming at the problem that there is no reliable basis for determining the parameters of straight-hole cutting with empty-hole, taking straight-hole cutting with large empty-hole as object, based on the analysis of the effect of empty-hole, the theoretical analysis of the cut blasting parameters was performed, combined with a numerical example to verify the effectiveness of the design of the blasting parameters. Research shows that the cut-breaking rock is the result of the combination of fissures caused by explosive explosion in the blasthole, stress concentration effect, free surface effect and fragmentation space effect. The effect of three effects on rock breaking is different. The stress concentration effect

收稿日期: 2019-11-15 修回日期: 2020-06-29 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1591

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51934001); 北京教育委员会科研计划一般资助项目(KM202110009008)

作者简介: 张召冉(1981—), 男, 山东临朐人, 副教授, 博士。E-mail: zhaoran2011@foxmail.com

causes rock failure to be the main role of tangential stress. The generation of cracks is related to the distance between the blastholes and the empty-holes, there is a critical value for their distance. The free surface effect is related to the diameter of the empty-hole. The large diameter hole exacerbates the reflection of stress waves, the tensile failure range produced by the reflected stress wave has a maximum value at the center line of the empty-hole and blast-holes, and the range of the tensile failure on both sides of the center line gradually decreases, concave chip crack failure is formed. The broken expand space effect provides sufficient space for rock breaking, improves blasting efficiency, and proposes the concept of dynamic broken-expansion coefficient. The influence of the moving distance of the stemming on the crack propagation length was analyzed. The formulas for calculating the length of blast cracks, formula of the range of the chipping area at empty-hole, and the formula for the criterion of radial cracks at empty-hole were derived. In the parameters of straight-hole cutting with holes, the distance L between the blast-hole and empty-hole was determined by the blast crack zone, the chip crack zone, and the radial crack zone of empty-hole.

Key words: rock roadway; large diameter empty-hole; straight-hole cutting blasting; empty hole effect; blasting parameter

掏槽爆破是岩巷掘进的关键,直眼掏槽是应用最广泛的两大掏槽技术之一^[1-2]。直眼掏槽的优点是掏槽孔是相互平行的^[3],施工简单,形成的槽腔形状规整,破碎后块度均匀^[4]。但是直眼掏槽一般需要多个不装药炮孔提供弱自由面和碎胀空间,导致掏槽炮孔距离较近,炮孔数量多。

基于以上原因,国内外学者开始对能够提供大碎胀空间及自由面的大直径空孔掏槽技术和机理进行研究,本文中大直径空孔指的是空孔直径超过100 mm的空孔。如林大能等^[5-6]认为掏槽孔与大直径空孔之间拉应力的大小与空孔半径大小有关,并分析了空孔的空孔效应和应力集中效应;李萍^[7]对渐进式大空孔螺旋掏槽的炮孔数目、空孔直径等参数进行分析;刘优平等^[8]认为应力集中效应与空孔直径呈正相关,适当加大空孔孔径能有效提高爆破效果。宗琦和邵连军^[9]采用理论分析和数值模拟的方法,研究得到空孔可为掏槽孔提供自由面和补偿空间,有利于应力波的反射拉伸和应力集中,利于掏槽破岩,岩石爆破中心空孔应处在掏槽孔形成的爆破裂隙区之内。

以上学者针对大直径空孔的作用进行了分析,但是鲜有具体给出大直径空孔爆破时爆破参数的计算方法,笔者从大直径空孔的爆破机理分析出发,分析大直径空孔爆破参数确定方法,并结合实践检验其效果。

1 大直径空孔掏槽破岩机理

炸药在炮孔内爆炸后,对岩体的破坏主要表现为冲击波(应力波)的动作用和爆生气体的准静态作用^[10]。冲击波在岩壁形成初始损伤区,冲击波衰减为应力波促使初始裂纹继续扩展,同时爆生气体楔入

裂纹加剧裂纹扩展,直至裂纹相互贯通,岩体破坏,达到岩体爆破的工程目的。对单炮孔而言,炸药爆炸后会沿炮孔径向形成3个区域,分别为粉碎区、裂隙区和震动区,由于粉碎区半径为炮孔半径的2~3倍,而裂隙区半径为炮孔半径的10~15倍,对工程爆破来讲,炮孔之间(图1)粉碎区或震动区的重合均达不到爆破的技术和经济性的目的,而炮孔之间裂隙区的重合程度是达到不同爆破目的(抛掷、松动等)的爆破参数设计的重要依据^[1]。

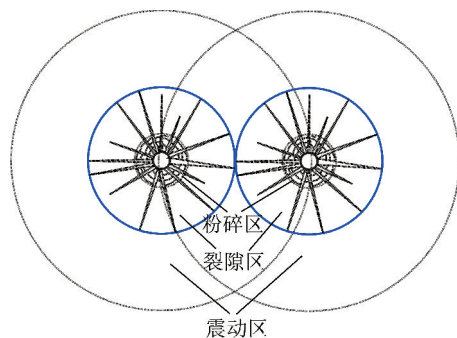


图1 炸药在岩石中爆炸后分区

Fig. 1 Partition after blasting

1.1 空孔的应力集中效应

当炸药在岩石介质中爆炸后,对岩石介质施加动态荷载,炸药能量以应力波的形式在岩石介质中传递,当无空孔时,某观察点(假设位于空孔迎爆侧边缘)的应力为 σ_0 ,当有空孔时,根据弹性力学原理,此时空孔附近的应力发生重分布,空孔壁附近观察点相对于无空孔时,其应力值 $>\sigma_0$,这种现象称为空孔的应力集中效应^[11-13]。

柱状药包在炮孔中爆炸形成的荷载可以近似认为是柱面波,由于实际施工中,炮孔围绕空孔对称布置,且炮孔与空孔的距离相对较近(图2),由于空孔

迎爆侧曲面引起的应力差较小,故可以近似认为均布荷载 q ,在此荷载作用下,空孔附近产生应力集中,应力集中后空孔附近计算单元应力状态^[6]为

$$\begin{cases} \sigma'_r = \frac{1}{2}[(1-k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + (1-4k^2+3k^4) \times (\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta)] \\ \sigma'_\theta = \frac{1}{2}[(1+k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) - (1+3k^2) \times (\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta)] \\ \tau' = \frac{1}{2}(1+2k^2-3k^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \\ k = \frac{r}{r_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ'_r 为应力重分布后计算点的径向应力,MPa; k 为比例系数; σ_θ 为应力波传播至计算点时的切向应力,MPa; σ_r 为应力波传播至计算点时的径向应力,MPa; θ 为计算点与炮孔和空孔连心线夹角, ($^\circ$); σ'_θ 为应力重分布后计算点的切向应力,MPa; τ' 为应力重分布后计算点的剪应力,MPa; r 为空孔附近某点距离空孔中心距离,m; r_2 为空孔半径,m。

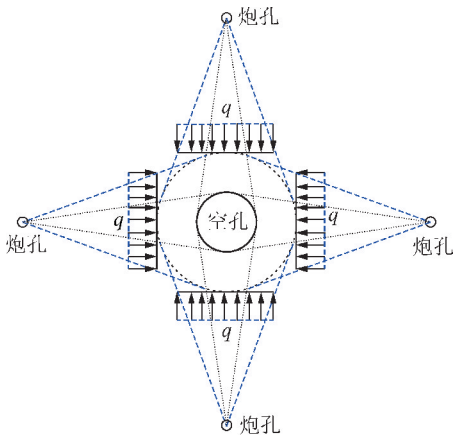


图 2 应力集中分析

Fig. 2 Stress concentration analysis

由式(1)可知,当 $\theta = \pm\pi$ 时,即炮孔和空孔连心线与空孔交点处(即 $k = 1$) 存在切向应力最大值 σ'_{\max} , 其表达式为

$$\sigma'_{\max} = -(\sigma_\theta + 3\sigma_r) \quad (2)$$

炮孔和空孔连心线与空孔边缘交点处的应力波强度为

$$\begin{cases} \sigma_r = P_0 \left(\frac{L-r_2}{r_b} \right)^{-\alpha} \\ \sigma_\theta = -\lambda\sigma_r \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_b 为炮孔半径。

将式(3)代入式(2),得到最大切向拉应力如

式(4)所示:

$$\sigma'_{\max} = (1-3\lambda_d)P_0 \left(\frac{r_b}{L-r_2} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中, λ_d 为炮孔壁的侧应力系数,与动态泊松比有关; P_0 为透射入炮孔壁的初始压力,MPa; L 为炮孔与空孔距离,m; α 为应力波衰减系数。

由式(4)可以看出,空孔处应力集中产生的切向应力与爆炸荷载强度有关,还与炮孔到空孔迎爆侧的距离有关。当炮孔半径和爆炸荷载一定的情况下,炮孔到空孔迎爆侧的距离越小,空孔处由应力集中产生的切向应力越大,空孔迎爆侧产生径向裂纹越长,当爆生裂纹从炮孔向外扩展时,越容易与应力集中区重合,从而引导爆生裂纹向空孔方向发展,并与由于空孔本身应力集中产生的破坏区重合。

1.2 空孔的自由面效应

当炸药爆炸后,应力波在岩石介质中传播,当到达自由面时会发生应力波的反射,此时压缩应力波变为拉伸应力波,自由面处岩石受到拉伸应力,由于岩石的抗拉强度仅为抗压强度的 $1/8 \sim 1/15$,如果反射的拉伸应力波的强度大于岩石抗拉强度,则自由面处岩石被拉伸破坏,此即为空孔的自由面效应。

自由面大小和形状是影响自由面效应的重要因素,如爆破漏斗研究中,自由面的大小和形状近似为无限岩体中的直线形自由面(图 3(a)),而在岩石井巷中,自由面单一且相对较小(掘进工作面),为提高破岩效率,一般需要采用机械成孔形成新的弧形自由面(图 3(b))。无论何种形式的自由面,其大小均取决于曲率半径的大小,直线形可以看成为曲率半径无穷大时的弧形自由面。

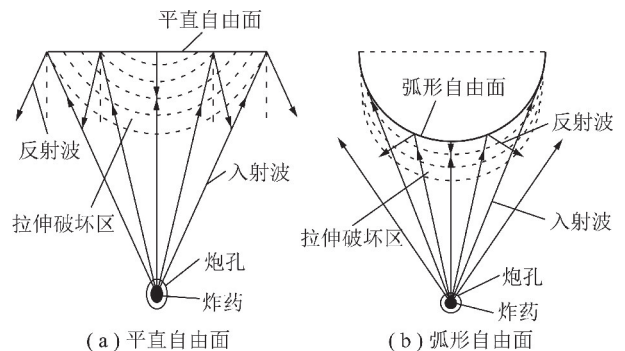


图 3 应力波在自由面的反射与拉伸破坏

Fig. 3 Reflection and tensile failure of stress waves on the free surface

对于含空孔直眼掏槽而言,空孔即为新自由面,对于同一炮孔发出的应力波,空孔曲率半径越大,则迎波面越长,如图 4 中弧 ABC 的长度大于弧 $A'B'C'$,即反射应力波的岩体范围越大,对自由面处的岩石拉

伸破坏范围更大。

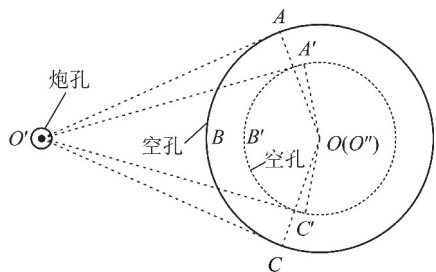


图 4 空孔直径对自由面效应的影响

Fig. 4 Effect of empty-hole diameter on free surface effect

如前所述,直线形自由面是弧形自由面的特殊形式,以此分析不同自由面对应力波反射破岩的影响。如图 5 所示,假设在炮孔周围同时存在弧形自由面(弧 CAB)和直线形自由面(A'B'),从炮孔发出的两束应力波 OA, OA'与炮孔和空孔连线的夹角均为 θ ,由于 A, A' 点与炮孔的距离均为 l ,假设岩石为均质的,则其应力波的强度相同,由于应力波到达自由面时发生透射和反射,透射应力波进入空孔内部,为此只考虑反射回岩体中的应力波(反射波)。

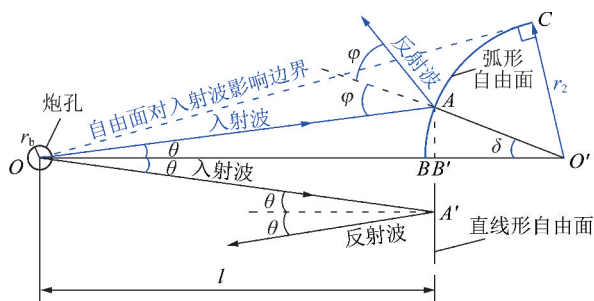


图 5 不同形式自由面对应力波反射的影响

Fig. 5 Effect of different forms of freedom on stress wave reflection

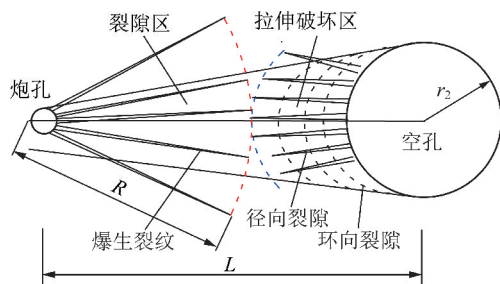
根据应力波理论,反射波的强度与应力波反射前的强度有关,还与应力波的入射角度有关。假设应力波到达 A, A' 点时的强度为 P ,当自由面为弧形时,入射和反射角为 φ ,当自由面为直线形时入射与反射角均为 θ ,从图 5 中可以看出, φ 是 θ 与 δ 之和。相关研究表明,当应力波正入射自由面时,即入射角为 0° 时,应力波会全部反射回岩体中,强度不发生改变,只是由压缩应力波变为拉伸应力波,据此可以推知,入射角度越大,反射回岩体中的应力波强度越低。可以看出,由于空孔曲率的不同,导致反射后应力波强度发生改变,相对于直线形(曲率为 0)自由面,曲率较大的弧形自由面强度衰减更严重。由于岩石的抗拉强度较低,在曲率较小的自由面处容易发生拉伸破坏,形成拉伸破坏区,也就是说空孔直径越大,拉伸破坏越容易且破坏区越大。岩石的拉伸破坏在炮孔与空孔连心线处最剧烈,连心线两侧逐渐减弱,其形状

为沿着炮孔与自由面连心线方向对称分布的“凹”状“片裂破坏区”(图 3(b)),此即空孔处环状裂纹产生机理。

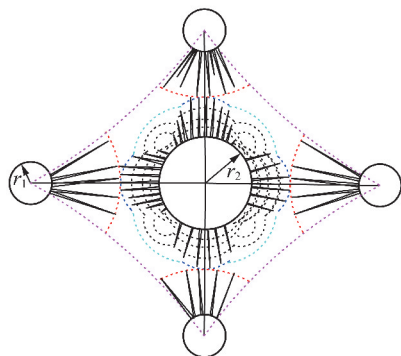
1.3 空孔的碎胀空间效应

掏槽孔中炸药爆炸后掏槽区内岩体破碎,由于岩体具有碎胀的特性,爆破后体积增大到原来的 K_s 倍, K_s 即为岩石的碎胀系数。增大的部分体积需要新的空间来容纳,不然就容易产生岩石的“再生”,这种现象容易导致炮孔利用率降低,致使掏槽失败。大直径空孔的存在,使得炮孔在径向的抵抗线要远小于轴向的抵抗线,因此,破坏的岩体在爆生气体的推动作用,优先向空孔方向移动,若空孔提供的空间部分甚至全部抵消掉岩石的碎胀效应,有利于岩石抛掷出腔,此即为空孔的碎胀空间效应。

综上所述,带空孔直眼掏槽机理是复杂的,其是应力集中效应、自由面效应、空孔碎胀空间效应共同作用的结果。单炮孔和多炮孔如图 6 所示,爆炸应力波首先产生爆生裂纹,形成炮孔附近的初始裂隙区,而后爆生气体推动裂隙持续发展,形成“爆生裂纹区”;当炮孔附近有空炮孔存在时,由于空孔的应力集中效应导致空孔附近形成“径向裂隙区”,以及空孔的自由面对应力波的反射,形成空孔附近的“拉伸破坏区”(片落破坏),使得裂纹最终与空孔贯穿。可以看出,含空孔掏槽区岩石的破坏为“三区耦合破坏”。同时由于空孔提供的碎胀空间,有利于破碎岩



(a) 单炮孔时岩石的破坏



(b) 多炮孔时岩石的破坏

图 6 有空孔掏槽区岩石破坏

Fig. 6 Rock failure in cutting area

体在爆生气体的推动作用下抛出,形成槽腔。

2 大直径空孔掏槽技术参数分析及确定

2.1 掏槽布置

大直径空孔掏槽孔布置,一般以空孔为中心,在其四周对称布置数对掏槽孔,有时为获得更好的掏槽效果及扩大槽腔体积,在主掏槽孔的周围再对称布置数对辅助掏槽孔,以 4 个主掏槽孔、4 个辅助掏槽孔为例,示意图如图 7 所示,图中炮孔(编号 0)为空孔,炮孔(编号 1~8)均为掏槽孔,其中,炮孔(编号 1~4)为主掏槽孔,炮孔(编号 5~8)为辅助掏槽孔。空孔、掏槽孔均垂直于自由面。

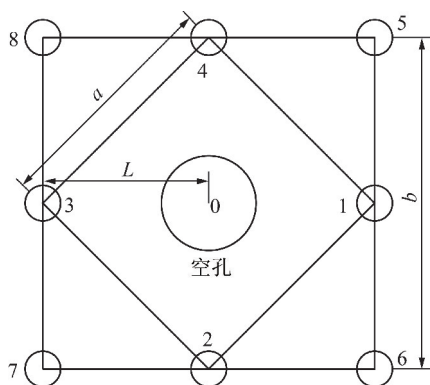


图 7 大直径空孔及掏槽孔布置示意

Fig. 7 Large diameter hole and cut blasting hole layout

除 0 号空孔外,各个炮孔均适当装药,1~4 号掏槽孔先起爆,5~8 号辅助掏槽孔后起爆,爆破成腔。一般情况下,1~4 号掏槽孔采用一段雷管起爆,5~8 号掏槽孔采用二段雷管起爆。

2.2 掏槽参数设计

由大直径空孔掏槽机理可知,要想获得良好的掏槽效果,掏槽爆破参数需要从炮孔附近裂隙区半径、空孔在应力集中作用下产生的径向裂隙、空孔的碎胀空间、片裂区宽度等 4 个方面考虑进行掏槽爆破参数的设计。因此,掏槽区内岩体的破坏主要为炮孔与炮孔之间裂隙区的贯通,炮孔产生的裂隙区与空孔产生的裂隙区连通,以及足够的碎胀空间。

2.2.1 炮孔与空孔距离

(1) 爆炸应力波作用下裂隙圈半径

井巷工程中,炸药在岩石中爆破,若采用耦合装药,炸药爆炸后对炮孔壁的荷载为强冲击荷载,根据声学近似原理^[14]:

$$P_0 = \frac{\rho_0 D_0^2}{1 + \gamma \rho_r C_p + \rho_0 D_0} \cdot \frac{2\rho_r C_p}{\rho_0 D_0} \quad (5)$$

式中, ρ_0 为炸药密度, g/cm^3 ; C_p 、 D_0 分别为纵波波速和炸药爆速, m/s ; γ 为等熵指数,一般为 3; ρ_r 岩石密

度, g/cm^3 。

采用不耦合装药时,根据文献[15]:

$$P_0 = \frac{\rho_0 D_0^2}{2(1 + \gamma)} \left(\frac{r_c}{r_b}\right)^6 m \quad (6)$$

式中, r_c 为炸药半径, m ; m 为压力增大系数, $m = 8 \sim 11$ 。

岩石为脆性材料,导致其抗拉强度低于抗压强度,根据 Mises 准则,炸药爆炸后,在岩石中形成的有效应力 σ_i 如果大于岩石的动态抗拉强度 σ_{td} ,则形成裂隙区。裂隙区半径 R_2 ^[16]为

$$R_2 = r_b \left(\frac{P_0 A}{\sqrt{2} \sigma_{cd}}\right)^{1/\beta} \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}}\right)^{1/\alpha} \quad (7)$$

式中, A 为与动态泊松比及侧向压力系数有关的系数; σ_{cd} 为动态抗压强度,MPa; β 为冲击波衰减系数。

(2) 爆生气体作用下爆生裂纹的扩展长度

式(6)考虑了爆炸应力波形成的裂隙长度,而爆生气体在炮孔及裂隙内形成的高压对裂纹的扩展具有促进作用。炸药爆轰后产生的冲击波作用完毕后,爆生气体充满炮孔并开始膨胀,由于膨胀时间很短,可以认为整个过程符合理想气体等熵绝热状态方程^[10],膨胀规律计算公式为

$$P'_0 \rho'^{-\gamma} = \text{const} \quad P \geq P_k \quad (8)$$

$$P'_0 \rho'^{-k} = \text{const} \quad P < P_k \quad (9)$$

式中, P'_0 、 ρ' 分别为爆生气体作用在炮孔壁上的初始压力和其密度,MPa, g/cm^3 ; k 为绝热指数, $k = 1.4$; P_k 为等熵和绝热状态的分界点,即临界压力,一般取 200 MPa^[17]。

对于爆生气体的初始压力,根据阿贝尔方程,其表达式^[18]为

$$P'_0 = \frac{PVT}{273(\nu - \tau)} \quad (10)$$

式中, P 为大气压力,MPa; V 为爆容, L/kg ; T 为爆温, K ; ν 为炸药比容,即炸药密度的倒数, m^3/kg ; τ 为炸药余容, L/kg ;

岩体在爆炸应力波作用下产生了粉碎区和初始裂隙区,当爆生气体充满粉碎区和初始裂隙区时,由于初始裂隙区相对较小,由式(8),(9)可知,爆生气体密度和爆生气体压力变化也较小,此时爆生气体的压力可以近似认为是恒定的,常称之为“准静态作用”。

但是 2 种情况除外,1 是炮孔中炮泥运动,2 是初始裂纹再扩展并与空孔贯通。出于爆破经济性和合理性考虑,下述讨论时 2 种情况同时考虑。

炮孔内爆生气体的质量为定值,爆轰结束后其瞬

时体积为 V_0 , 假设为耦合装药且炮孔中爆生气体按照式(8)进行膨胀扩张, 如图8所示, 则

$$P'_0 \rho_0^{-\gamma} = P_x \rho_x^{-\gamma} \quad (11)$$

$$P'_0 V_0^\gamma = P_x V_x^\gamma \quad (12)$$

显然, 可得

$$P_x = P'_0 (V_0^\gamma / V_x^\gamma) \quad (13)$$

由图8可知,

$$V_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 L_p \quad (14)$$

$$V_x = \left(\frac{1}{4} \pi D^2 + na'w \right) L_p + 1/4 \pi d^2 x \quad (15)$$

式中, ρ_x 为 x 时时爆生气体密度, kg/m^3 ; P_x 为炮泥运动后某一时点压力, MPa ; V_0 和 V_x 为装药段炮孔体积和炮泥运动后某一时点体积, m^3 ; D 为冲击波作用后炮孔直径, 采用不耦合装药时取 $2r_b$, 采用耦合装药时取破碎区直径, m ; L_p 为装药长度, m ; n 为产生的爆生主裂纹数目; a' 为爆生裂纹平均宽度, m ; w 为爆生主裂纹的平均长度, m ; d 为炮孔直径, m ; x 为炮泥在炮孔内运动距离, m 。

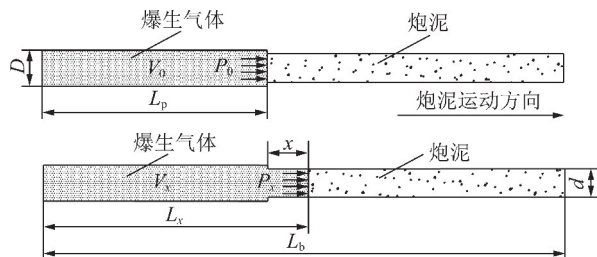


图8 炮泥运动时爆生气体体积变化

Fig. 8 Volume change of explosive gas during stemming movement

则由式(13)~(15)得:

$$P_x = P'_0 \left(1 + \frac{4na'wL_p + \pi d^2 x}{\pi D^2 L_p} \right)^{-\gamma} \quad (16)$$

炮孔中爆生气体的驱裂关键在于爆生气体的压力大小, 当裂纹尖端处裂纹压力大于岩石的动态抗拉强度时, 裂纹得以扩展, 随着炮泥的运动, 压力下降到岩石的动态抗拉强度 σ_{td} 时, 裂纹止裂, 如图9所示。

结合式(16)可得

$$P_x \geq \sigma_{td} \quad (17)$$

$$P'_0 \left(1 + \frac{4na'wL_p + \pi d^2 x}{\pi D^2 L_p} \right)^{-\gamma} \geq \sigma_{td} \quad (18)$$

$$w \leq \frac{1}{4a'n} \left\{ \pi D^2 \left[\left(\frac{P'_0}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] - \frac{\pi d^2 x}{L_p} \right\} \quad (19)$$

式中, w 实际为应力波产生的裂隙区半径 R_2 与爆生气体作用下裂纹的二次扩展长度 R_3 之和。则仅有爆生气体作用裂纹的扩展长度 R_3 为

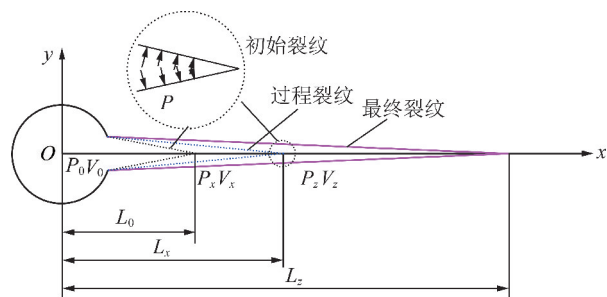


图9 裂纹扩展过程简要模型

Fig. 9 Brief model of crack propagation process

$$R_3 \leq \frac{1}{4a'n} \left\{ \pi D^2 \left[\left(\frac{P'_0}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] - \frac{\pi d^2 x}{L_p} \right\} - R_2 \quad (20)$$

由式(20)可知, 当爆生主裂纹数目 n 一定, 裂纹扩展过程中炮泥始终不动, 即 $x=0$ 时, 爆生主裂纹存在极大值 $R_{3\max}$ 。

$$R_{3\max} \leq \frac{1}{4a'n} \left\{ \pi D^2 \left[\left(\frac{P'_0}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \right\} - R_2 \quad (21)$$

同理, 炮泥正好全部抛出时, 即 $x=L_b-L_p$ 时, 裂纹扩展长度存在极小值 $R_{3\min}$ 。

$$R_{3\min} \leq \frac{1}{4a'n} \left\{ \pi D^2 \left[\left(\frac{P'_0}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] - \frac{\pi d^2 (L_b - L_p)}{L_p} \right\} - R_2 \quad (22)$$

其中, L_b 为炮孔长度, m 。比较式(21)和(22)可得, 当其他条件相同时, 2者相差 $\pi d^2 (L_b - L_p) / (4a'nL_p)$ 。也就是说炮泥堵塞对裂纹扩展和岩石破碎有重要影响, 堵塞质量越高, 越有利于岩石的破碎。实际爆破中炮泥的运动是常态, 随着裂纹的扩展, 炮孔内压力变化均发生变化。当裂纹扩展与空孔贯通时, 掏槽即完成, 当炮泥完全抛出炮孔时, 若裂纹没贯通, 炮孔内压力急剧下降, 则掏槽可能失败。

(3) 空孔处迎爆侧片裂区范围

空孔附近的“片裂区”形成是由于应力波在空孔壁处反射所形成, 反射的拉伸应力波超过岩石的动态抗拉强度则岩石破坏, 如1.2节所述, 在炮孔与空孔连心线上拉应力最大, 即拉伸范围最大, 设为 z_1 。如图10所示。

当反射拉伸波强度大于岩石的抗拉强度, 即

$$\sigma_z = P_0 \left(\frac{r_b}{w + 2z_1} \right)^\alpha \geq \sigma_{td} \quad (23)$$

式中, σ_z 为爆生裂纹长度。

则在炮孔与空孔连心线处存在 $z_{1\max}$:

$$z_{1\max} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{P_0}{\sigma_{td}}} r_b - w \right) \quad (24)$$

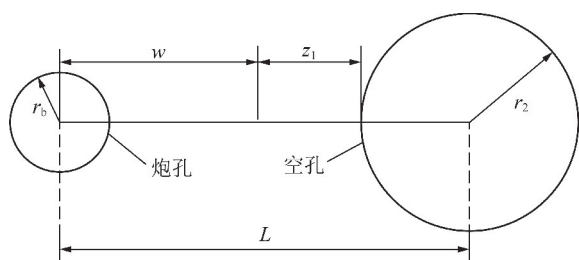
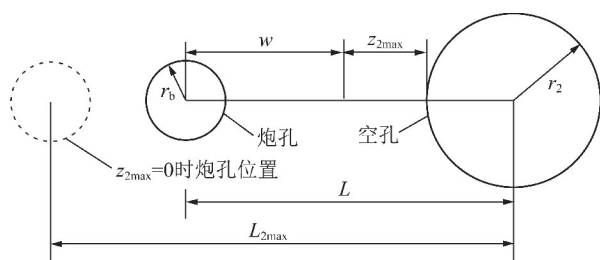


图 10 反射拉伸破坏区计算模型

Fig. 10 Reflection stretch damage zone calculation model

图 11 $L < L_{2max}$ 时计算模型Fig. 11 Calculation sketch when $L < L_{2max}$ (4) 炮孔与空孔距离 L ① 由爆生裂隙区与片裂区确定的 L_1 炮孔与空孔距离 L_1 的距离为

$$L_1 = w + z_{1max} + r_2 \quad (25)$$

② 考虑空孔应力集中效应确定 L_{2max}

充分利用空孔的应力集中效应是提高破岩效率和炸药能量高效利用的手段。如前所述,如果应力集中区切向应力大于岩石的抗拉强度 σ_{td} ,则在空孔壁产生径向裂纹,则此时裂纹起裂和扩展应该满足的条件为

$$(1 - 3\lambda_d)P_0 \left(\frac{r_b}{L_2 - r_2} \right)^\alpha \geq \sigma_{td} \quad (26)$$

显然,当炮孔距离空孔 L_2 较大时,产生的应力集中效应强度较弱,切向应力不足以破坏岩石,所以在一定的爆破条件下,存在 L_{2max} 使得产生的切向应力正好达到岩石的抗拉强度, L 只要小于此值,则存在空孔迎爆侧径向裂纹区,由式(26)可得:

$$L_{2max} = r_b \left[\frac{P_0(1 - 3\lambda_d)}{\sigma_{td}} \right]^\alpha + r_2 \quad (27)$$

③ 片裂区宽度和空孔径向裂纹长度关系对 L 的影响

如前所述, L_{2max} 只是应力集中区径向裂纹产生与否的临界值, L_1 为爆生裂纹和片裂区长度之和;若 $L_1 > L_{2max}$,说明应力集中区范围内空孔迎爆侧不会产生径向裂纹,应力集中对空孔径向裂纹起裂扩展无效,可不考虑,只需考虑片裂区范围宽度,此时炮孔与空孔的距离 $L = L_1$;若 $L_1 < L_{2max}$,说明应力集中对空孔迎爆侧裂纹起裂扩展产生作用,此时需要考虑应力集中区的影响。此时,炮孔与空孔距离 L 应为炮孔爆生裂隙区 w 、片裂区 z_{1max} 和空孔径向裂隙长度 z_{2max} 共同决定。

对于 z_{2max} 来说,由于 L_{2max} 为临界值,当 $L < L_{2max}$ 时,如图 11 所示,在此种状态下,空孔迎爆侧必然产生径向裂纹,且产生的裂纹长度存在最大值 z_{2max} 。

$$z_{2max} = L_{2max} - L \quad (28)$$

由于裂隙的贯通可视为掏槽区岩石破坏的依据,

同时片裂区和径向裂纹可能同时发生在空孔迎爆侧,二者中较大者必然先与爆生裂纹贯通,所以 z_{1max} 和 z_{2max} 两者大小直接影响到 L 的取值。所以存在下述 2 种情况:

当 $z_{2max} > z_{1max}$ 时,

$$L = w + z_{2max} + r_2 \quad (29)$$

将式(28)代入式(29)可得:

$$L = (L_{2max} + w + r_2) / 2 \quad (30)$$

当 $z_{2max} < z_{1max}$ 时,

$$L = L_1 = w + z_{1max} + r_2 \quad (31)$$

需要指出的是,上述公式成立的条件为确定的 $L \geq w$ 时才成立,当 $L < w$ 时,不需要考虑片裂区和空孔径向裂纹对 L 的影响。

2.2.2 相邻炮孔之间距离的确定

(1) 掏槽炮孔间距

① 碎胀空间效应确定炮孔间距

如前所述,碎胀效应对空孔掏槽具有重要的影响,因此在爆破参数设计时应充分考虑其影响。需要特别指出的是,通常所说的碎胀系数 K_s ,其值为静态状态下测量获得,而实际爆破时,岩石在爆生产物的推动下破碎且向槽腔外运动(抛掷),所以破碎的岩石(矸石)充满槽腔时的某个时点,已经有部分矸石抛出槽腔,因此槽腔内矸石体积理应小于槽腔岩石体积与静态碎胀系数的乘积。也就是说,假设要爆破破碎的岩石体积不变,去掉部分抛掷出腔的矸石,实际在槽腔内矸石体积要小,因此,碎胀系数的取值应比 K_s 小,所以需要调整爆炸动荷载作用下的碎胀系数,称之为动态碎胀系数 K_{sd} ,取 $K_{sd} = 0.8K_s$ 。

当碎胀系数为 K_{sd} 时,假设空孔周围掏槽孔,均匀分布,如图 6 所示,则 a 应满足:

$$K_{sd} \leq \frac{S_N + 3\pi r_b^2}{S_N - \pi r_b^2 - \pi r_2^2} \quad (32)$$

其中, S_N 为炮孔之间连线所形成正 N 边形面积, $S_N = \frac{Na^2}{4 \tan(\pi/N)}$ 。

由式(32)可得:

$$a \leq 2 \left[\frac{(K_{sd} + 3) \pi r_b^2 + K_{sd} \pi r_2^2}{N(K_{sd} - 1)} \tan(\pi/N) \right]^{1/2} \quad (33)$$

② 由裂隙区确定炮孔间距

直眼掏槽相邻炮孔的孔底距与孔口距相同,为保证掏槽效果,相邻炮孔同时起爆产生的裂隙区(裂隙区半径 w)需要尽量重合。则 a 的计算公式:

$$w \leq a \leq 2w \quad (34)$$

③ 掏槽孔孔间距

综上, a 的取值综合考虑碎胀空间、裂隙区半径、空孔与炮孔的几何关系(正 N 边形中 a 与 L 的关系),则 a 的取值需同时满足条件:

$$a \leq \min \left\{ 2 \left[\frac{(K_{sd} + 3) \pi r_b^2 + K_{sd} \pi r_2^2}{N(K_{sd} - 1)} \tan(\pi/N) \right]^{1/2} \right\}, \quad (35)$$

$$w \leq a \leq 2w \quad (35)$$

$$a = 2L \sin \frac{\pi}{N} \quad (36)$$

(2) 辅助掏槽孔孔间距

辅助掏槽具有扩大掏槽槽腔的目的,由于辅助掏槽孔在主掏槽孔爆破后起爆,要满足岩石破坏条件,需要满足 2 个条件:① 相邻辅助掏槽孔之间的裂隙区能够贯通;② 辅助掏槽孔到主掏槽孔爆破后形成的槽腔的距离在辅助掏槽孔的破碎半径范围内。

两相邻辅助掏槽孔孔之间存在一个主掏槽孔(如图 12 中孔 5 和孔 8 之间的孔 4),单个辅助掏槽孔的破坏范围如虚线所示,则相邻辅助掏槽孔间距 b 为

$$b \leq 2a \quad (37)$$

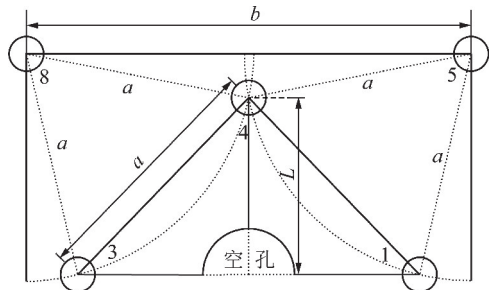


图 12 a 与 b 的关系

Fig. 12 Relation of a and b

3 算例分析

3.1 工程概况

某大巷岩性为砂岩,坚固性系数 $f=8$ 。采用钻爆法掘进。原爆破方案使用 7655 型风锤打眼;采用煤矿许用 2 号乳化炸药,炸药直径为 32 mm,长度 200 mm,单卷 200 g。1~5 段毫秒延期电雷管起爆,

正向装药。炮孔直径 42 mm。原爆破方案采用单向斜眼掏槽技术,掏槽效果差,平均单循环进尺为 1.5 m,炮孔利用率仅为 70%。岩石物理力学参数见表 1。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	静态泊 松比	动态泊 松比	动态抗压 强度/MPa	动态抗拉 强度/MPa
2 850	0.25	0.2	88.9	11.0

3.2 爆破方案优化

为解决单循环进尺低导致的月进尺不能满足要求的问题,通过分析可知,原方案单循环进尺较低,主要因为掏槽不合理。岩石坚硬,掏槽爆破时没有足够的自由面导致对岩石的破碎效果差。为此采用大直径空孔直眼掏槽技术,空孔采用专用钻孔机械进行施工,其余炮孔钻孔采用气腿式凿岩机配合施工,其他所需设备及器材与原方案相同。为发挥机械钻孔的优势,钻孔深度为 3.0 m,目标单循环进尺为 2.7 m 以上。

3.2.1 炮孔与中心空孔距离 L

钻孔专用机械可施工直径为 400 mm 空孔的钻头,为此空孔半径确定为 $r_2 = 200$ mm。根据式(25)~(31), L 的大小由应力波和爆生气体作用裂纹扩展长度 w 、片裂区范围 $z_{1\max}$ 和空孔半径 r_2 、空孔处径向裂纹长度 $z_{2\max}$ 共同决定。

(1) 爆生气体作用裂纹扩展长度 w

根据式(10), $P=1.01 \times 10^5$ Pa ≈ 0.1 MPa,炸药爆容 $V=0.8$ m^3/kg ,矿用炸药爆温在 2 000~2 500 $^{\circ}\text{C}$,则取爆温 $T=2\ 300$ K,气体产物余容与密度有关, $\tau=0.6$ $\text{L}/\text{kg}=6 \times 10^{-4}$ m^3/kg ,则爆生气体初始压力 $P'_0=1\ 684$ MPa。

根据式(19),主裂纹条数通过实验获得,一般为 8 条左右^[16],取 $n=8$,爆生裂纹宽度一般为 1~2 mm^[19],取裂纹平均宽度 $a'=1.5$ mm,不耦合装药时 D 与炮孔直径相同,即 $D=d$ 。 L_p 的选取与装药量有关,本试验装药系数为 0.7,则 $L_p=2.0$ m,动态抗拉强度 $\sigma_{td}=11.0$ MPa, $\gamma=3$, $D=42$ mm。当炮泥不运动时,计算 $w=0.502$ m;当炮泥正好脱离炮孔时,计算 $w=0.444$ m。

(2) 片裂区区域长度 z_{\max}

根据式(6),炸药密度 $\rho_0=1\ 000$ kg/m^3 ,爆速 $D=3\ 200$ m/s, $\gamma=3$, $r_c=16$, $r_b=21$ mm, $m=10$,则 $P_0=3\ 293$ MPa;根据式(26),取 $w=0.444$ m,则 $z_{1\max}=$

0.012 m。

根据式(25),则 $L_1 = 0.444 + 0.012 + 0.2 = 0.656$ m。

根据式(27), $\lambda = 0.25$, $\alpha = 1.75$,则 $L_{2\max} = 0.412$ m。

由于 $L_1 > L_{2\max}$,根据式(31),则 $L = 0.656$ m,取 0.6 m。

3.2.2 炮孔间距 a 的确定

炮孔周围均匀布置 4 个主掏槽孔 ($N=4$),砂岩 $K_s = 1.5$,则 $K_{sd} = 1.2$,根据式(33),计算 $a = 0.885$ m,由式(34)可得, $0.444 \leq a \leq 0.888$,则根据式(35)取 $a = 0.885$ m。根据式(36), $L = 0.6$ m,可得 $a = 0.848$ m。

综上,取 $a = 0.848$ m 时,满足碎胀空间、裂隙半径贯通、几何关系的要求。

3.2.3 辅助掏槽孔间距 b

根据式(37),辅助掏槽 $b \leq 1.696$ m,取 $b = 1650$ mm。则该方案的炮孔参数如图 13 和表 2 所示。

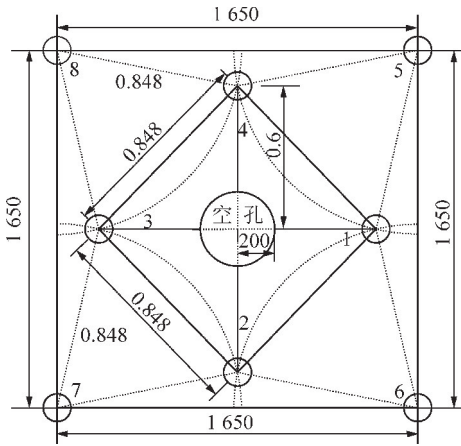


图 13 掏槽炮孔布置

Fig. 13 Cutting hole layout

表 2 掏槽装药

Table 2 Cutting blasting explosive loading

孔编号	深度/ m	角度/ (°)	单孔装药 量/kg	总装药 量/kg	炮泥堵 塞/m	雷管 段别
0	3.1	90	0	0	—	—
1	3.0	90	2.0	8.0	1.0	1
2	3.0	90	1.8	7.2	1.2	2

3.2.4 爆破方案效果对比

通过现场试验可以看出,对于硬岩巷道爆破而言,关键是掏槽效果的优劣。在炮眼深度一定的条件下,通过改变掏槽技术的形式,爆破效率显著提高,具

体参数的对比见表 3。

表 3 爆破效果对比

Table 3 Blasting effect comparison

指标	原爆破方案	优化爆破方案
掏槽形式	楔形掏槽	大空孔直眼掏槽
爆后槽腔深度/m	1.5	2.7
炮眼利用率/%	75	90
槽腔形状	棱台形	棱柱形
抛掷距离	远	近
大块率	高	低

4 结 论

(1)直眼掏槽中由于空孔的存在,使之产生应力集中效应、自由面效应、碎胀空间效应,提高了直眼掏槽破岩效率。爆生气体在裂纹扩展中的作用不容忽视;从理论上分析得到炮泥堵塞质量对爆生气体作用下裂纹扩展长度具有较重要的影响,爆破参数设计中要重点考虑。

(2)含空孔直眼掏槽中,关键爆破参数为炮孔与空孔距离和炮孔之间距离的确定,空孔与炮孔距离确定要考虑炮孔裂隙区、空孔径向裂隙区和片裂区的范围;炮孔间距需由炮孔的裂隙区确定。

(3)工程实践表明,大直径空孔在单循环进尺、炮眼利用率等方面优势明显,验证了考虑爆生气体作用的参数计算模型及公式具有较好的可靠性,技术效果良好。

参考文献 (References):

- [1] 张召冉,杨仁树. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):551-559.
ZHANG Zhaoran, YANG Renshu. Multi-step cutting technology and application in rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 551-559.
- [2] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术,2013,41(9):18-23.
YANG Renshu. Present status and outlook on safety and high efficient heading technology of mine rock roadway in China [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 18-23.
- [3] 单仁亮,黄宝龙,高文蛟,等. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(2):224-232.
SHAN Renliang, HUANG Baolong, GAO Wenjiao, et al. Case study of new technology application of quasi-parallel cut blasting in rock roadway drirage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 224-232.
- [4] 戴俊,杨永琦. 三角柱直眼掏槽爆破参数研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 364-368.

- DAI Jun, YANG Yongqi. Researches on blasting parameters of triangle burn cut [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(4): 364-368.
- [5] 林大能, 陈寿如. 空孔直眼掏槽成腔模型理论与实践分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(3): 479-483.
- LIN Daneng, CHEN Shouru. Theoretical and practical analysis of cavity model of straight hole cut with empty hole [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(3): 479-483.
- [6] 林大能. 平巷掏槽爆破空孔尺寸效应及围岩频繁震动损伤累积特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 21-38.
- LIN Daneng. Research on size effect of empty hole in horizontal roadway cut blasting & accumulating characteristic of surrounding rock damage caused by frequently blasting vibration [D]. Changsha: Central South University, 2006: 21-38.
- [7] 李萍. 渐进式大直径空孔螺旋掏槽爆破参数的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 10-29.
- LI Ping. Study on blasting parameter of progressive large hole spiral cutting [D]. Wuhan: Wuhan Technology of University, 2010: 10-29.
- [8] 刘优平, 周正义, 黎剑华. 井巷掏槽爆破中空孔效应的理论与试验分析[J]. *金属矿山*, 2007, 36(2): 12-14.
- LIU Youping, ZHOU Zhengyi, LI Jianhua. Theoretical and experimental study on empty-hole effect in tunnel cut blasting [J]. *Mental Mine*, 2007, 36(2): 12-14.
- [9] 宗琦, 邵连军. 立井深孔直眼掏槽大直径中心空孔作用分析和参数计算[J]. *爆破*, 2015, 32(1): 11-15.
- ZONG Qi, SHAO Lianjun. Large diameter empty hole effect analysis and parameters calculation of parallel cut in rock shaft [J]. *Blasting*, 2015, 32(1): 11-15.
- [10] 宗琦. 爆生气体的准静态破岩特性[J]. *岩土力学*, 1997, 18(2): 73-78.
- ZONG Qi. Investigation on features of rock quasi-static fragmentation by gaseous explosion product [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(2): 73-78.
- [11] 刘殿魁. 各向异性介质中SH波引起的圆孔附近的动应力集中[J]. *力学学报*, 1988, 20(5): 443-452.
- LIU Diankui. Dynamics stress concentration around a circular cavity by SH wave in an anisotropic media [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 20(5): 443-452.
- [12] 王祥林, 郭靖华. 冲击载荷下孔洞附近的动应力集中[J]. *地震工程与工程振动*, 1984, 4(4): 50-60.
- WANG Xianglin, GUO Jinghua. On dynamics stress concentration in the neighborhood of a cavity under impulse loading [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984, 4(4): 50-60.
- [13] 刘殿魁, 盖秉政, 陶贵源. 论孔附近的动应力集中[J]. *地震工程与工程振动*, 1980: 97-110.
- LIU Diankui, GAI Bingzheng, TAO Guiyuan. On dynamics stress concentration in the neighborhood of a cavity [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1980: 97-110.
- [14] 李翼祺, 马素贞. *爆炸力学* [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] 王文龙. *钻眼爆破* [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 92-93.
- [16] 肖思友, 姜元俊, 刘志祥, 等. 高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(15): 143-149.
- XIAO Siyou, JIANG Yuanjun, LIU Zhixiang, et al. Hard rock blasting energy distribution and fragmentation characteristics under high earth stress [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(15): 143-149.
- [17] 林大能, 胡伟, 彭刚. 爆炸挤压成腔中的不耦合效应研究[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(2): 144-147.
- LIN Daneng, HU Wei, PENG Gang. Study of decoupling effect in the form of underground space compacted by explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(2): 144-147.
- [18] 费鸿禄, 洪陈超. 应力波和爆生气体共同作用下裂隙区范围研究[J]. *爆破*, 2017, 34(1): 33-36, 107.
- FEI Honglu, HONG Chenchao. Study on crushed and fracture zone range under combined action of stress and detonation gas [J]. *Blasting*, 2017, 34(1): 33-36, 107.
- [19] 孙可明, 王金彧, 辛利伟. 不同应力差条件下超临界CO₂气爆煤岩体气楔作用次生裂纹扩展规律研究[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(2): 466-472, 516.
- SUN Keming, WANG Jinyu, XIN Liwei. Research on the law of secondary cracks propagation in coal and rock caused by gas wedging during supercritical CO₂ explosion under different stress differences [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(2): 466-472, 516.