

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.04.009

周边空孔与炮孔间距对爆破时围岩断裂损伤的影响*

田国宾^{①②} 戴俊^② 高萌^②

①运城职业技术大学建筑工程学院(山西运城,044000)

②西安科技大学建筑与土木工程学院(陕西西安,710054)

[摘要] 为探究周边空孔与炮孔间距对爆破时围岩裂纹扩展和损伤的影响机制,在理论分析炮孔间距对斜入射应力波反射以及卸载波对围岩应力分布影响的基础上,结合数值模型,分析有、无周边空孔和不同炮孔间距爆破时围岩断裂、损伤的变化。结果表明:空孔与炮孔间距是发挥空孔效应的关键因素。间距较小,炸药能量利用率降低,无法发挥空孔对裂纹扩展的导向作用,围岩爆破损伤严重;间距较大,空孔对应力波的反射作用减弱,空孔效应不足以使两孔之间的裂纹相互贯通,无法满足开挖要求;炮孔间距为800~1000 mm时的爆破效果最佳。空孔的增设可将爆破的炮孔间距扩大30%。

[关键词] 爆破;周边空孔;炮孔间距;裂纹扩展;损伤控制

[分类号] TD235

Influence of Spacing between Surrounding Empty Holes and Blast Holes on Fracture and Damage of Rock in Blasting

TIAN Guobin^{①②}, DAI Jun^②, GAO Meng^②

①College of Civil Engineering and Architecture, Yuncheng Vocational and Technical University (Shanxi Yuncheng, 044000)

②College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

[ABSTRACT] In order to explore the influence mechanism of spacing between empty hole and blast hole on blasting crack propagation and surrounding rock damage in perimeter blasting, on the basis of theoretical analysis of the influence of borehole spacing on reflection of oblique incident stress waves and unloading waves on surrounding rock stress distribution, numerical models were combined to analyze the changes of fracture and damage under different blasthole spacing during perimeter blasting with or without empty hole. Results show that the spacing between empty hole and blast hole is a key factor in exerting the empty-hole effect. If the spacing is small, the energy utilization rate of explosives decreases, and the guiding effect of empty hole on crack propagation cannot be exerted, resulting in severe damage to surrounding rock. When the spacing is large, the reflection effect of empty hole on stress waves is weakened, and the empty-hole effect is not sufficient for the cracks between the two holes to penetrate each other, which cannot meet the excavation requirements. When the spacing between two blast holes is 800–1000 mm, the outcome of the empty-hole perimeter blasting is the best, and the addition of empty holes can increase the blasthole spacing by 30%.

[KEYWORDS] blasting; surrounding empty hole; spacing between blast holes; crack propagation; damage control

0 引言

普通岩土爆破中,在形成贯通裂纹的同时,还会在炮孔周围其他方向产生大量的随机裂纹,导致围岩的稳定性和整体性降低^[1]。为同时满足爆破开

挖轮廓规整和降低围岩损伤的要求,人们提出了定向断裂爆破技术。其中,在周边炮孔之间设置空孔,一定距离内的岩石爆破时在空孔周围能够形成应力集中^[2],引导裂纹在两孔之间优先发展、贯通^[3],减少围岩内裂纹扩展的随机性,从而有效地保证开挖轮廓规整,降低爆破对围岩的损伤破坏,实现爆破开

* 收稿日期:2023-12-15

基金项目:国家自然科学基金(51174159)

第一作者:田国宾(1979—),男,博士,讲师,从事爆破工程与技术方面的研究。E-mail:383012020@qq.com

通信作者:戴俊(1964—),男,博士,教授,从事爆破工程和地下工程方面的科研和教学。E-mail:651988237@qq.com

挖的目的。

对于空孔在爆破开挖中的应用及研究, Mohanty^[4]最早提出,并通过试验验证了在装药孔两侧设置空孔,能够产生径向控制裂纹,得到与切槽孔爆破等效的定向断裂爆破效果。学者们采用数值模拟与室内试验相结合的方法,对有、无导向孔以及带切槽导向孔等不同情况下的裂纹扩展规律进行了研究^[5-7]。杨仁树等^[8]利用动态焦散线试验系统研究了空孔直径对裂纹扩展的影响。张召冉等^[9-10]建立了掏槽爆破中裂纹扩展长度的计算表达式,分析讨论了不同情况时空孔对炮孔间距和起爆效果的影响,结果表明:软岩时空孔效应对炮孔间距的影响更为明显。杨赛群等^[11]对比了不同炮孔间距时,空孔对围岩混凝土模型损伤的影响。冀玉豪等^[12]对比了不同炮孔间距时空孔对岩石涨裂效果的影响,得出了空孔周边的应力分布特性,并通过现场试验确定了空孔间距的取值。章彬彬等^[13]通过混凝土模型试验和数值模拟计算分析了不同炮孔间距对爆破效果的影响。江俐敏等^[14]在理论分析、数值模拟及现场试验的基础上,对隧道掏槽爆破时的孔距、空孔半径等参数进行了优化设计。郭德勇等^[15]将空孔作为控制孔,通过理论分析和数值模拟,研究了空孔对爆炸应力波传播特性、围岩爆生主裂隙扩展规律的影响。利用 AUTODYN 软件, Li 等^[16]建立了数值模型,研究了空孔对爆破时围岩裂纹扩展方式的作用机理,发现空孔对外向裂纹具有抑制作用,且抑制作用的大小主要与孔距有关。

已有的研究大都集中在掏槽爆破时空孔的作用及参数计算,对空孔在爆破中围岩的断裂损伤作用以及炮孔间距对爆破效果的影响研究较少。本文中,通过理论分析炮孔间距对应力波反射作用的影响以及周边空孔卸载波对围岩损伤的控制作用,以得出炮孔间距对围岩断裂与损伤控制效果的影响机理;同时,建立数值模型,分析爆后围岩裂纹的扩展及应力分布规律,为实际公路隧道的爆破设计提供参考。

1 孔间距对爆破裂纹扩展的影响

在爆破中,当起爆孔(炮孔)产生的应力波垂直入射至周边空孔时,在空孔迎爆侧会发生反射和透射,即

$$\begin{cases} \sigma_R = -\sigma_I; \\ \sigma_T = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_R = E_I; \\ E_T = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为岩石质点所受的应力; E 为岩石质点具有的能量;下标 I、R、T 分别表示入射波、透射波和反射波。

当入射波垂直进入空孔时,即在起爆孔与空孔连心线方向上,压缩应力波全部转化为反方向的拉伸波,裂纹最先在此方向萌生、扩展,岩石发生拉伸破坏,最终与起爆孔周边的爆生裂纹相互贯通,形成开挖轮廓。

在两孔连心线以外位置,入射波斜入射至空孔周边,反射波的方向与两孔连心线逐渐偏移,拉伸应力波进入两孔之间岩石的能量亦逐渐减小,直到应力波在空孔处的某一点经反射后垂直于连心线方向(图1)。应力波将被全部反射后进入空孔上侧岩石,此时,对两孔之间的裂纹扩展作用可认为0。入射波与连心线方向的夹角为临界角 α 。

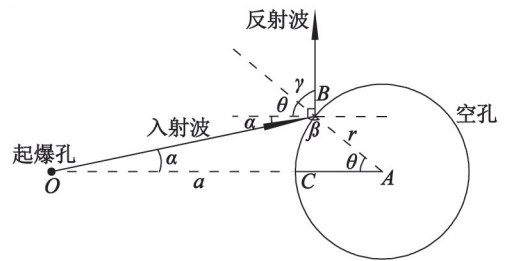


图1 反射波垂直于两孔连心线时的角度分布
Fig. 1 Angle distribution when the reflected wave is perpendicular to the centerline of the two holes

由图1中的几何关系可以看出,当反射波垂直于连心线^[17]时,

$$\alpha + \theta = \gamma; \quad (3)$$

$$\theta + \gamma = 90^\circ. \quad (4)$$

式(3)、式(4)合并可得

$$\theta = 45^\circ - \frac{\alpha}{2}. \quad (5)$$

因此,在由入射波的传播路径、起爆孔与空孔的连心线及空孔半径组成的 $\triangle OAB$ 中,有

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \theta = 135^\circ - \frac{\alpha}{2}; \quad (6)$$

$$\frac{a}{\sin \beta} = \frac{r}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

式中: r 为空孔半径; a 为空孔中心与起爆孔中心之间的距离。

将式(6)代入式(7),化简可得

$$\alpha = 2 \left(\arcsin \frac{r + \sqrt{r^2 + 8a^2}}{4a} - \frac{\pi}{4} \right). \quad (8)$$

式(8)中,当起爆孔与空孔之间的距离 $a = r$ 时,反射波恰好垂直于连心线,临界角 $\alpha = 90^\circ$,即所有入射波均作用于两孔之间的岩石上。此时,起爆孔紧贴于空孔,起爆孔产生的压缩应力波在岩石中引起的径向裂隙直接与空孔贯通,造成炸药利用率降低,无法发挥空孔的作用。因此,应适当增大起爆孔与空孔之间的距离。随着两孔之间距离 a 的增大,入射波临界角 α 逐渐减小,压缩应力波在两孔之间的反射范围变小,从而使得更多的拉伸应力波能量集中于两孔连心线之间,使裂纹在两孔之间扩展、贯通。

由式(8)可得,当起爆孔与空孔距离不断增大,入射波的临界角 α 不断减小,直至趋近于 0° 。此时,经空孔反射后作用于连心线方向的应力波能量为无限小,更多的斜入射波被反射、透射后,进入围岩,无助于贯通裂纹的产生;同时,应力波传播至空孔的衰减效应明显,空孔周边的应力集中作用减弱,无法出现初始导向裂纹,空孔对两孔之间贯通裂纹形成的作用甚微,无法发挥空孔对应力波的反射增强效应。

总之,周边空孔爆破时,当起爆孔与空孔的间距较小时,空孔有可能位于爆炸作用的破碎区范围内,仅冲击波的作用即可使两孔之间岩石破碎,形成断裂,导致两孔之间的裂纹过多,无法形成光滑的开挖轮廓面,造成炸药能量利用率降低,岩石过度破碎。随着间距的增大,空孔对定向裂纹扩展的导向作用逐渐显著,爆炸应力波更多地集中于两孔连心线方向,空孔壁处的初始裂纹不断延伸、扩展,最终形成较为理想的贯通裂纹。当起爆孔与空孔间距太大时,空孔对应力波的反射作用减弱,爆炸应力波的衰减比较明显,在空孔的迎爆侧处不足以产生足够长的初始裂纹,无法引导两孔之间的裂纹定向扩展、贯通,无法满足开挖要求。进一步分析可知,空孔应力集中后的切向应力随孔间距的增加而减小,间距越大,切向应力越小,对岩石的破坏能力越弱,空孔对岩石的定向断裂作用也越弱。因此,空孔只有与起爆孔保持合理的间距,才能有效增强应力波的反射作用,发挥空孔的导向作用,促使裂纹在两孔之间定向扩展,形成良好的开挖轮廓,满足周边爆破开挖的要求。

2 孔间距对周边爆破围岩损伤控制的影响

周边爆破时,起爆孔之间设置合理间距的空孔,

能有效地促进爆生裂纹与空孔周边裂纹的贯通,形成良好的开挖轮廓,并且还能有效控制围岩的损伤破坏,降低爆破振动对围岩稳定的影响。

当周边爆破的装药孔起爆后,应力波到达空孔,由于空孔的应力集中效应^[18],空孔迎爆侧 A 点的岩石最先出现裂纹,切向应力将会被释放,产生卸载波,见图2。

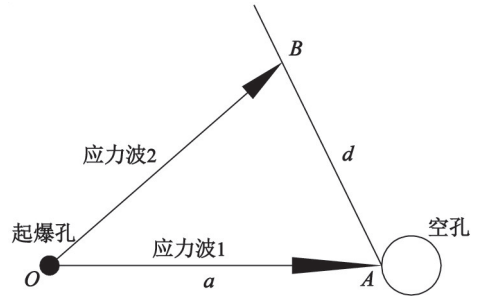


图2 空孔对围岩损伤的控制作用

Fig. 2 Control effect of empty hole on damage to surrounding rock

应力卸载波在围岩内不断传播,当传播至与 A 点距离为 d 的 B 点时,起爆孔在 B 点产生的切向拉应力恰好未达到岩石动态抗拉强度,则 B 点的切向拉应力将被卸载,岩石将不会出现裂纹,围岩内的爆破损伤将会被有效控制。临界状态可以表示为

$$t_A + \frac{d}{c_u} \leq t_B \quad (9)$$

式中: t_A 为应力波传播至 A 点所需时间; c_u 为应力波的传播速度; t_B 为 B 点拉应力达到岩石的动态抗拉强度的时间。

在式(9)中, t_A 是与空孔、炮孔间距 a 正相关的函数,即可以表示为

$$f(a) + \frac{d}{c_u} \leq t_B \quad (10)$$

式(10)显示,为能有效发挥空孔卸载波对围岩损伤的控制作用,必须首先保证空孔处于起爆孔合理的距离范围内,使得爆炸应力波能有效地在空孔周边形成应力集中,形成足够大的切向拉应力,从而在空孔的迎爆侧 A 点产生初始裂纹,在围岩内形成卸载波效应。

在能使空孔周边产生初始裂纹的基础上,空孔与起爆孔之间的距离可以尽可能地小,即 $f(a)$ 减小,空孔周边不出现裂纹的岩石质点与空孔之间的距离 d 将变大,空孔能够控制的围岩损伤破坏范围将增大。

同时,也可以看到,在式(10)中,随着空孔与起爆孔的间距 a 不断减小,周边岩石内出现爆生裂纹

时间也逐渐减小,围岩内的岩石质点在空孔的卸载波未达到前便已出现爆生随机裂纹,导致空孔的卸载波效应能够抑制围岩产生裂纹的范围被缩小,不利于发挥空孔对围岩损伤破坏的控制作用。

因此,周边爆破中起爆孔周边设置合理间距的空孔,可在空孔迎爆侧最先出现初始裂纹,且在围岩内产生的应力波卸载效应能够有效地降低岩石的切向拉应力,使得围岩内出现随机裂纹的数量和长度大大减小,更多的裂纹在两孔之间扩展、贯通,并诱导其他方向的爆生裂纹向两孔连心线方向偏转,抑制围岩内随机裂纹的出现,减少爆破对围岩的损伤破坏。

综上所述,在空孔周边爆破中,合理的空孔与起爆孔间距能够引导裂纹优先在空孔与起爆孔之间萌生、扩展、贯通,形成理想的开挖轮廓面;同时,还能抑制随机裂纹的出现,降低爆破对围岩的损伤破坏,实现更好的周边爆破效果。

3 具有周边空孔的爆破过程的数值模拟

为进一步分析空孔对爆破炮孔间距的影响,确定周边空孔与起爆孔的合理间距设置,以某公路隧道工程为例,对相同炮孔间距的普通爆破和具有周边空孔爆破的起爆过程进行数值模拟。

3.1 计算模型和材料参数的选择

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,以六面体 Solid164 实体单元建立有限元模型。采用平面应变模型,模型的各个边界均为非反射边界。特别的是,考虑到起爆孔周边的应力、应变比较复杂,对起爆孔周边网格划分的尺寸较小,数量较多,而距起爆孔较远的网格相对稀疏。这样能清晰地反映裂纹的发展演化状态,确保计算精确度。

模型尺寸为 4 000 mm × 3 000 mm,纵向仅取一个单位厚度。爆破时,网格中心布置空孔,两侧对称布置 2 个起爆孔,起爆孔与空孔的直径均为 50 mm,见图 3。采用不耦合装药,不耦合系数为 1.8,2 个起爆孔同时起爆,分别模拟炮孔间距为 600、800、

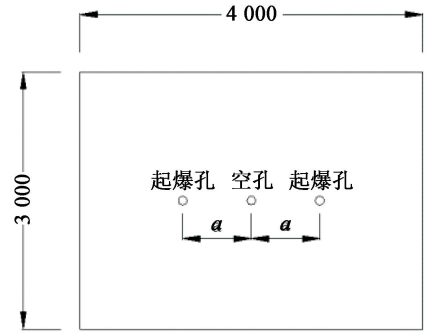


图 3 空孔周边爆破计算模型(单位:mm)

Fig. 3 Calculation model of empty hole directional blasting (Unit: mm)

1 000 mm 和 1 200 mm 时的起爆过程。

此次模拟中,岩石选取 LS_DYNA 软件中的 H-J-C 模型^[19];同时,根据现场地质勘察报告和设计资料,基岩主要为元古界南寺组(Ptns)浅变质紫红色石英砂岩,力学参数如表 1 所示。

表 1 岩石力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock

变形模量/ GPa	泊松比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
1.61	0.27	24.0	50	48	4.0

炸药选用常用的 2[#]岩石乳化炸药,选取 * Mat_High_Explosive_Burn 本构模型,爆轰产物由 JWL 状态方程表示,炸药的参数及状态方程参数如表 2 所示。空气单元选取 * Mat_Null 模型,本构模型可以通过 * Eos_Linear_Polynomial 进行描述。

3.2 有、无周边空孔的爆破效果

普通爆破和具有周边空孔爆破的裂纹扩展如图 4 所示。图 4 中,左列是具有周边空孔爆破时的裂纹分布情况,右列为相同炮孔间距时普通爆破后的裂纹分布情况。

1) 有空孔存在的左列图中,起爆孔在空孔方向形成的裂纹长度和数量要明显大于其他方向。空孔的导向作用引导裂纹首先在两孔连线方向上扩展,形成较长的定向裂纹;同时,其他方向的裂纹长度较

表 2 2[#]岩石乳化炸药的参数及状态方程参数

Tab. 2 Material parameters and state equation parameters of the explosive

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	CJ 压力/ GPa	JWL 状态方程参数					
			A/GPa	B/GPa	R_1	B_2	ω	E/GPa
1 200	4 950	6.125	52.4	0.768	4.2	1.1	0.34	8.5

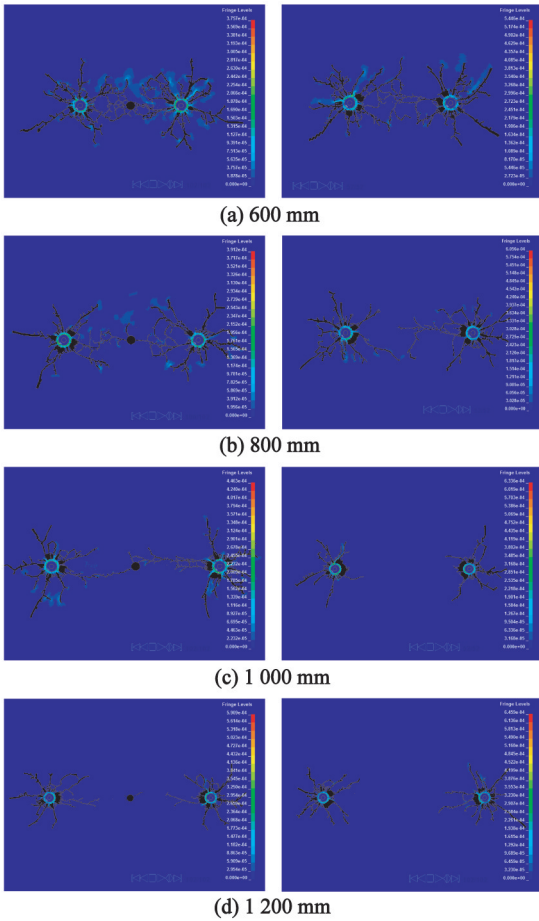


图 4 不同炮孔间距的裂纹分布

Fig. 4 Crack distribution at different spacing between blast holes

短,数量较少。图 4(b)左图显示,两孔之间的主裂纹为 8 条,而两起爆孔背爆侧的主裂纹数量仅为 4 条。这表明空孔的存在使得更多能量集中在起爆孔与空孔之间,减弱了其他方向岩体内的能量分布,抑制了其他方向裂纹的扩展。

2)对于右列图的普通周边爆破,总的来说,在两起爆孔之间的裂纹的长度和数量要优于其他方向。如图 4(b)右图中,两孔之间的主裂纹长度达到了 460 mm,而其他方向的最长的仅为 260 mm,明显小于两孔之间的裂纹扩展长度。这是由于相对起爆孔而言,相邻起爆孔可以发挥类似空孔的作用,引导裂纹优先在两起爆孔之间扩展,造成其他方向的裂纹扩展长度相对较短。

3)左列图与右列图相互对比,在相同的炮孔间距条件下,由于空孔的存在,两起爆孔起爆后形成的裂纹数量和长度明显优于无空孔的。即使在图 4(d)左图中,两炮孔之间未形成贯通裂纹,但在靠近空孔一侧的起爆孔周边还是出现了较长的定向裂纹,方向与两孔连线方向基本一致。而影响裂纹长

度和方向的关键参数是起爆孔与空孔之间的间距。间距越小,形成的裂纹数量较多,长度较短,没有明显的方向性,无法有效地发挥空孔对裂纹扩展的导向作用,如图 4(a)左图;间距越大,空孔应力集中后的切向应力较小,不足以达到岩石的断裂强度,无法在两孔之间形成贯通裂纹,无法满足周边爆破开挖要求,如图 4(d)左图。

4)与起爆后的最大等效应力进行比较。同样的炮孔间距,具有周边空孔的爆破要比普通爆破的小很多,空孔能够减小炸药起爆引起的应力,围岩稳定性提高,损伤控制效果明显。

不同炮孔间距条件下,普通爆破时的最大等效应力分别比具有周边空孔的爆破的最大等效应力大 45%、55%、42%、9%。其中,炮孔间距为 800 mm 时,两者差距最大,如图 5 所示。此时,空孔控制围岩爆破损伤的效果最为明显。随着炮孔间距的增大,空孔的导向作用变弱,周边空孔爆破与普通爆破在围岩内产生的应力相互接近,空孔对围岩应力分布的影响也减小,无法使裂纹相互贯通,这与理论分析结果相一致。

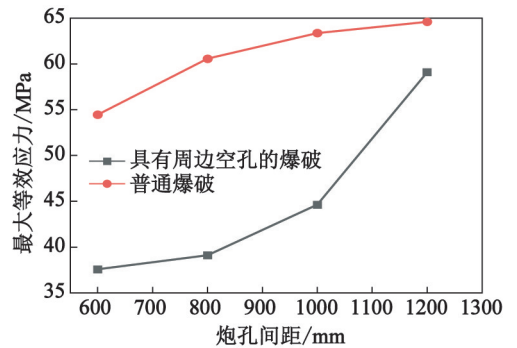


图 5 不同炮孔间距时的最大等效应力

Fig. 5 Maximum equivalent stress at different spacing between blast holes

3.3 不同炮孔间距的爆破效果

普通爆破情况下,炮孔间距 600 mm 时,裂纹相互贯通,但数量较多,围岩损伤较为严重,见图 4(a)左图;炮孔间距 800 mm 时,虽然在两炮孔之间的裂纹长度最大,但未能形成有效连通;当炮孔间距达到 1 000、1 200 mm 时,两炮孔之间相互影响很小,可以认为是 2 个独立的起爆孔起爆,也未能形成贯通裂纹。因此,可以认为普通爆破的最佳炮孔间距为 600 ~ 800 mm,与工程实践中常用的炮孔间距(7 ~ 15 倍炮孔直径)相符。

周边空孔爆破后的裂纹分布显示,在炮孔间距 600 mm 时,起爆孔与空孔之间形成了多条贯通裂纹,其他方向也出现了大量的随机裂纹,不利于围岩

稳定,爆破效果较差。炮孔间距 800、1 000 mm 时,起爆孔与空孔之间均有裂纹形成有效贯通。炮孔间距 800 mm 时,主裂纹两侧的翼裂纹数量较多,两炮孔周边的裂隙区半径较大,对围岩的损伤较为严重;炮孔间距 1 000 mm 时,起爆孔与空孔之间仅有一条贯通裂纹产生,但主裂纹扩展的方向与两孔之间的连心线(开挖轮廓线)偏转较大;炮孔间距 1 200 mm 时,两起爆孔的裂纹处于断开状态,无法满足爆破开挖的需要。

根据周边爆破开挖轮廓要求和围岩损伤破坏最小的原则,通过分析爆破后的裂纹扩展状态和应力分布,可以确定,周边空孔爆破时,两起爆孔间距 800~1 000 mm 为最佳的炮孔间距,与普通爆破相比,空孔可将炮孔间距增大 30%。

4 结论

1) 爆破中通过设置空孔,可创造新的自由面,空孔的应力集中作用使得空孔迎爆侧最先产生初始裂纹,引导裂纹在空孔与起爆孔连心线方向贯通,减小其他方向岩体内的应力分布,抑制随机裂纹的出现,有效地降低爆破对围岩的损伤破坏,较好地实现爆破开挖的目的。

2) 空孔与起爆孔的间距是发挥空孔效应的关键因素。间距较小,炸药利用率降低,无法发挥空孔对裂纹扩展的导向作用,围岩损伤破坏较为严重;间距较大,空孔对应力波的反射作用减弱,裂纹未能有效贯通,无法满足开挖要求。合理的炮孔间距能够有效促进两孔之间的裂纹扩展、贯通,抑制随机裂纹扩展,降低围岩的损伤破坏。

3) 通过对不同炮孔间距下的有、无周边空孔的爆破过程的数值模拟结果进行分析得出,空孔的设置使得爆破的炮孔间距扩大 30%。可为类似条件的炮孔间距设计与施工提供一定的借鉴和参考。

参考文献

[1] 岳中文,郭洋,许鹏,等. 定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 304-311.
YUE Z W, GUO Y, XU P, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 304-311.

[2] 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.

LIN D N. Research on size effect of empty hole in horizontal roadway cut blasting and accumulating characteristic of surrounding rock damage caused by frequently blasting vibration[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[3] CHEN B B, LIU C Y, YANG J X. Design and application of blasting parameters for presplitting hard roof with the aid of empty-hole effect[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(1): 8749415.

[4] MOHANTY B B. Explosion generated fractures in rock and rock-like materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(4): 889-898.

[5] NAKAMURA Y, CHO S H, YONEOKA M, et al. Model experiments on crack propagation between two charge holes in blasting [J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2004, 65(2): 34-39.

[6] 魏炯,朱万成,魏晨慧,等. 导向孔对两爆破孔间成缝过程影响的数值模拟[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 335-339.
WEI J, ZHU W C, WEI C H, et al. Numerical simulation on contribution of guide-hole to crack coalescence of two boreholes [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 335-339.

[7] 蒲传金,杨鑫,肖定军,等. 爆炸载荷下双孔裂纹扩展的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 300-311.
PU C J, YANG X, XIAO D J, et al. Numerical simulation of double-hole crack propagation under explosion load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 300-311.

[8] 杨仁树,陈程,王煦,等. 不同直径空孔对爆生裂纹扩展行为影响规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2498-2503.
YANG R S, CHEN C, WANG X, et al. Experimental investigation on the influence of different diameter empty holes on the crack growth behavior of blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2498-2503.

[9] 张召冉,王岩,刘国庆. 空孔对直眼掏槽参数及爆破效果的影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(1): 139-154.
ZHANG Z R, WANG Y, LIU G Q. Theoretical study of the influence of empty-hole on both the blasting parameters and the blasting effect of straight-hole cutting [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(1): 139-154.

[10] 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(增刊2): 791-800.
ZHANG Z R, CHEN H Y, JIAO W G, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-

- hole cutting with empty-hole [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Suppl. 2): 791-800.
- [11] 杨赛群, 李洪伟, 吴立辉, 等. 影响光面爆破效果和空孔处能量分布的试验研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 58-65.
YANG S Q, LI H W, WU L H, et al. Experimental study on effect of smooth blasting and energy distribution at empty hole[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(6): 58-65.
- [12] 冀玉豪, 李文杰, 康兰方, 等. 基于空孔效应的坚硬岩石胀裂破岩力学特性研究[J]. 爆破, 2023, 40(2): 53-60.
JI Y H, LI W J, KANG L F, et al. Research on mechanical characteristics of rigid rock spallation and fracturing rock based on empty hole effect [J]. Blasting, 2023, 40(2): 53-60.
- [13] 章彬彬, 程金明, 占汪妹, 等. 不耦合装药下炮孔-空孔距离对预裂爆破效果的影响探究[J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 79-85.
ZHANG B B, CHENG J M, ZHAN W M, et al. Study on the influence of hole-empty hole distance on the pre-split blasting effect under uncoupled charge[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 79-85.
- [14] 江俐敏, 吴育谦, 刘存福, 等. 煤系地层隧道石门揭煤爆破掏槽优化研究[J]. 爆破, 2022, 39(1): 51-60.
JIANG L M, WU Y Q, LIU C F, et al. Optimization of blasting cut of uncovering coal at rock cross-cut in coal-bearing strata tunnel [J]. Blasting, 2022, 39(1): 51-60.
- [15] 郭德勇, 赵杰超, 张超, 等. 煤层深孔聚能爆破控制孔作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 919-930.
GUO D Y, ZHAO J C, ZHANG C, et al. Mechanism of control hole on coal crack initiation and propagation under deep-hole cumulative blasting in coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 919-930.
- [16] LI M, ZHU Z M, LIU R F, et al. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 186-194.
- [17] 张召冉, 左进京, 郭义先. 爆炸载荷下空孔及其缺陷对裂纹扩展影响机理研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 115-121.
ZHANG Z R, ZUO J J, GUO Y X. Effects of empty hole and its defects on the crack propagation under explosive loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 115-121.
- [18] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
DAI J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M] 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [19] 陈哲浩. 岩石中相邻炮孔爆破裂缝演化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
CHEN Z H. Research on propagation of blasting crack between adjacent blast holes in rock [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部