

陈秋宇,李海波,夏祥,等.爆炸荷载下空孔效应的研究与应用[J].煤炭学报,2016,41(11):2749–2755. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0462
Chen Qiuyu, Li Haibo, Xia Xiang, et al. Research and application of empty hole effect under blasting loading [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2749–2755. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0462

爆炸荷载下空孔效应的研究与应用

陈秋宇^{1,2}, 李海波¹, 夏祥¹, 张国凯¹, 于崇¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 湖北 武汉 430071; 2. 安徽理工大学 化学工程学院 安徽 淮南 232001)

摘 要: 在深部岩石的破碎中,深孔爆破具有高效安全的特点,为改善爆破效果,使岩体的完整性降低,采用空孔控制裂纹的扩展,同时利用空孔补偿岩石的位移。根据爆破理论,确定压碎区、裂隙区、弹性区的范围,通过实验研究空孔位于不同作用区时岩石的断裂方向,分析空孔与装药孔间的距离对裂纹扩展的影响,并测量不同孔间距时空孔周围的应变。实验结果表明,空孔位于爆破裂隙区时,可以有效控制裂纹的扩展方向,空孔有定向致裂的作用,此时空孔周围的应变最大。在淮北矿业集团煤矿顶板弱化中,合理布置爆破参数,使难冒顶板变为易冒顶板,爆破后岩体声速降低40%~50%,爆破区域裂纹扩展,工作面推进阻力降低,达到爆破设计要求,提高了生产效率。

关键词: 空孔效应; 定向致裂; 顶板; 爆破理论

中图分类号: TD235.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)11-2749-07

Research and application of empty hole effect under blasting loading

CHEN Qiu-yu^{1,2}, LI Hai-bo¹, XIA Xiang¹, ZHANG Guo-kai¹, YU Chong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Institute of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The characteristics of deep hole blasting are effective and safe in deep underground rock breaking. To improve the blasting effect and decrease the integrity of rock mass, an empty hole was used to control the crack growth and supply rock displacement. The range of blasting zone, such as crush zone, fracture zone and elastic zone, was determined according to the blasting theory. The fracture direction was investigated through experiment when the empty hole situated in different zones. The influence of distance between charging hole and empty hole on crack extension was analyzed by experiment. The strain around the empty hole was measured at different conditions. The results show that when the empty hole is located at fracture zone, the empty hole is able to control the direction of crack growth effectively. It plays a role in directional fracture, and the strain reaches maximum in this situation. In the application of coal mine roof weakening in Huaibei Mining Group, the difficult-caving roof was changed into easy-caving roof, which was attributed to the reasonable arrangement of blasting parameters. After blasting, the rock acoustic velocity was reduced by 40%–50%, and the cracks were extended in the blasting area. The resistance of the working face was less than that before. The blasting result is in line with the design requirements and the production efficiency is improved.

Key words: empty hole effect; directional fracture; rock roof; blasting theory

爆破技术在我国基础建设中应用广泛,为水利、工程应用中,控制爆破能量的作用范围是保证工程安全的基石,完善爆破设计,提高爆破效率和爆破质量

收稿日期: 2016-04-11 修回日期: 2016-08-20 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41572307); 国家自然科学基金重点资助项目(51439008); 国家自然科学基金资助项目(41302239)

作者简介: 陈秋宇(1985—),男,湖北仙桃人,博士研究生。E-mail: cqyhb1985@163.com

是爆破技术发展的动力。

随着工程环境的日趋复杂,爆破工程也面临着更多的挑战,优化爆破设计完善爆破效果是亟待解决的问题。在深部岩石的破碎时,由于空间有限,大型机械施工很难实现,而采用爆破法破碎岩石具有显著优势。在大范围的岩石破碎中,常规的钻爆法效率低且很难达到理想的爆破效果。深部岩石的自由面空间有限,岩石的破碎裂隙主要来自岩石在高压条件下的压缩,且强度较高的岩石的压缩量有限,提高岩体变形位移空间有利于岩体形成较大的宏观裂纹。爆破法在治理深部灾害问题中应用较多,在瓦斯治理、坚硬顶板破碎、岩石巷道掘进等实践中,取得了理想的爆破效果^[1-8]。空孔效应在深部岩石破碎、高瓦斯煤层增透等方面发挥了较大的作用,空孔使岩体局部的应力场发生变化,在改善爆破效果方面作用明显。国内外学者对空孔效应已做过相关研究和应用,岳中文^[9-10]以实验为基础,采用动态焦散线测试系统的方法,分析了爆炸荷载作用下有机玻璃中空孔周围应力场的变化过程和裂纹随时间的扩展规律。张奇、郑祥滨^[11-12]等研究了掏槽爆破中空孔的作用,以空孔应力集中效应和应力波的相关理论为基础阐述了空孔孔径与掏槽爆破循环进尺的关系,分析了空孔孔径对掏槽过程中槽腔面积、形成时间、掏槽效率的影响,并对不同空孔孔径的爆破效果进行了对比分析。罗勇、龚敏^[13-14]等针对煤层中瓦斯突出的问题,利用空孔效应提高煤层松动爆破的作用范围,增大煤层的渗透系数,并研究了空孔对爆破过程中应力波传播的影响以及大孔径下煤层的抽放效果,在应用中取得了较好的成果。

上述研究已对空孔的作用机理和应用做了较多论述,在空孔与爆破孔距离的变化对爆破效果影响方面的研究较少。在实践中,空孔的布置位置与爆破效果密切相关,研究空孔效应中装药孔与空孔间的距离对完善空孔效应的作用机理有重要的作用,对工程应用有指导意义。

1 岩石爆破理论

埋在半无限边界岩石中的炸药爆炸后,产生大量的爆生气体和强烈的冲击波,依次形成压裂区、裂隙区和弹性区。在压裂区,爆炸产生的大部分能量消耗在岩石的过度破碎上,裂隙区主要是爆生气体作用于裂纹的尖端,气体的压力大于裂纹尖端的断裂强度,裂纹开始继续扩展,多条裂纹同时发育并且相互贯通,使该区域岩石的完整性降低,抗压强度、抗拉强度等力学参数劣化。

炸药爆炸后产生的冲击波压力为

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

式中 p_0 为炸药的爆压; ρ_0 为炸药的密度; D_v 为炸药的爆速; γ 为爆生气体的绝热膨胀指数。

透射入岩石中的孔壁的冲击波荷载的压力为

$$p = \frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho_0 D_v} p_0 \quad (2)$$

式中 c_p 为岩石的声速; ρ 为岩石的密度。

冲击波经过透射进入岩石,在岩石中逐渐衰减为应力波和弹性波。在裂隙区与弹性区的界面上,岩石的应力状态满足式: $\sigma_i \geq \sigma_{td}$, 其中 σ_i 为岩石中某点的应力; σ_{td} 为岩石动态单轴抗拉强度。

破坏区半径受装药结构的影响,当装药为耦合装药时,压碎区的半径为

$$R_c = \left(\frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho D_v} \frac{\rho D_v^2 B}{4\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (3)$$

当装药为耦合装药时,裂隙区的半径为

$$R_p = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho D_v} \frac{\rho D_v^2 B}{4\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (4)$$

$$B = [(1+b)^2 + (1+b^2) - 2\mu(1-\mu)(1-b)^2]^2 \quad (5)$$

其中 σ_{cd} 为岩石动态单轴抗压强度; α β 分别为压裂区和裂隙区的应力波衰减系数; r_b 为装药孔孔径; b 为侧向压力系数; μ 为动态泊松比; 文中参数的意义和取值范围可以参见文献[15-16]。在耦合装药时,裂隙区和压碎区的半径不仅与装药的爆炸特性、岩石的阻抗有关,还与装药孔的半径有关,在炸药和岩石的物理参数一定时,破坏区的半径与装药半径呈线性关系。

2 空孔效应的力学模型

岩石中炸药爆炸后,离爆破孔一定距离的空孔周围应力集中的现象称为空孔效应^[17],炸药爆炸产生的冲击荷载在岩石中形成准静态应力场,空孔可以改变岩石周围的应力场分布状态,使岩石在空孔与装药孔的连线处拉应力最大。如图1所示, A 为装药孔, B 为空孔, B 孔对 A 孔具有应力集中效应。

A 孔起爆后,透射入岩石中的爆炸应力波向外传播,随着距离的增加,该应力波峰值按如下规律衰减:

$$\sigma_r = P \left(\frac{r_1}{r} \right)^\alpha \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = b\sigma_r \quad (7)$$

式中 σ_r 为岩石中某一点的径向应力; σ_θ 为岩石中某

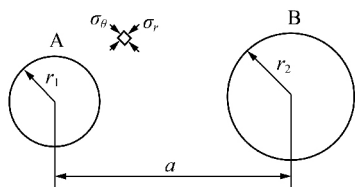


图 1 空孔效应的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of empty hole effect

一点的切向应力; P 为炮孔壁的透射压力峰值; r_1 为炮孔半径; r 为岩石中某一点距炮孔中心的距离。

当应力波传播到达 B 孔时,空孔周围的应力分布发生改变。根据弹性力学理论,空孔附近的峰值应力状态为

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(1 - k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 - 4k^2 + 3k^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(1 + k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 + 3k^2) \times (\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (9)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(1 + 2k^2 - 3k^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (10)$$

式中, $\sigma_{\theta\theta}$ 为空孔周围岩石中的切向应力; σ_{rr} 为空孔周围岩石中的径向应力; $\tau_{r\theta}$ 为空孔周围岩石中剪应力; $k = r_2/r_1$; r_2 为空孔半径; r_1 为岩石中某一点到空孔中心的距离; θ 为任意方向与装药孔和空孔连线的夹角。

在式(8)~(10)中,当 $k=1$ 时, $\sigma_{rr}=0$, $\tau_{r\theta}=0$, 令 $d\sigma_{\theta\theta}/d\theta=0$, 可得 $\theta = \pm\pi$, 此时,

$$\sigma_{\theta\theta} = 3\sigma_\theta + \sigma_r = (3b+1)P\left(\frac{r_1}{a-r_2}\right)^\alpha \quad (11)$$

$\sigma_{\theta\theta}$ 为极大值, 可知在垂直空孔与装药孔连线方向拉应力最大。

3 空孔效应实验与结果分析

3.1 空孔效应实验设计

空孔效应的模型实验装置如图 2 所示。模型材料为水泥砂浆, 在制作的过程中埋入预制贴有应变片的应变砖。应变片布置在空孔与装药孔的连线上, 测量水平平面内空孔周围的切向应变状态。

孔内装药为二硝基重氮酚(DDNP), 装药密度为 $\rho = 0.82 \text{ g/cm}^3$, 爆速为 3991 m/s 。空孔的直径为 6 mm , 装药孔的直径为 4 mm , 装入 1 g 二硝基重氮酚, 采用耦合装药, 装药长度约为 100 mm , 利用桥丝产生的高温引爆装药。

用水泥砂浆制作模型试块的过程中, 同时制作立

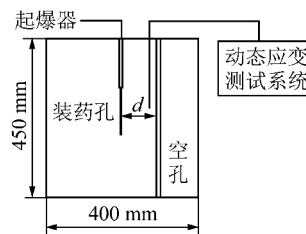


图 2 空孔效应模型实验示意

Fig. 2 Model test of empty hole effect

方体试件, 养护 28 d 后通过实验测得其力学参数见表 1。

表 1 试块力学参数

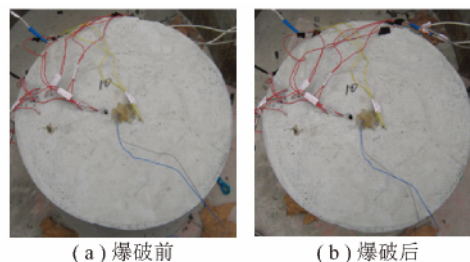
Table 1 Mechanical parameters of specimen

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
2.2	50.6	1.65	26.3	4 445	0.29

将上述参数代入式(3)、(4)计算, 分别计算压碎区、裂隙区的半径分别为 35 mm 、 80 mm , 在布置空孔时, 使空孔位于不同的破坏区, 装药孔与空孔的距离分别为 30 、 60 、 90 mm , 对应的装药孔与空孔间的距离与装药孔直径之比 d/r 分别为 7.5 、 15 、 22.5 , 并制作做无空孔的试件做对比。

3.2 空孔与装药孔间距变化对爆破效果的影响

当 $d/r = 7.5$ 时, 试样爆破前后情况如图 3 所示。

图 3 $d/r = 7.5$ 时的爆破图Fig. 3 Contrast of the rock blasting when $d/r = 7.5$

装药孔内的炸药爆炸后试样没发生断裂, 在爆炸的瞬间爆生气体从空孔中逸出。炸药与岩石的作用过程中, 爆炸产生的能量转化为气体的内能、应力波和其他形式的能量, 爆生气体的内能约占整个爆炸过程产生能量的 70% , 应力波携带的能量约 20% , 而气体从空孔中逸出使爆炸产生的大部分能量以内能的形式释放, 以至于应力波不足以使岩石破坏, 同时可以说明爆破岩石破碎是爆生气体和应力波共同作用的结果。

当 $d/r = 15$ 时, 试样爆破前后情况如图 4 所示。

试样沿空孔与装药孔的连线方向断裂, 空孔对岩石的致裂具有导向作用, 空孔改变了岩石周围应力场



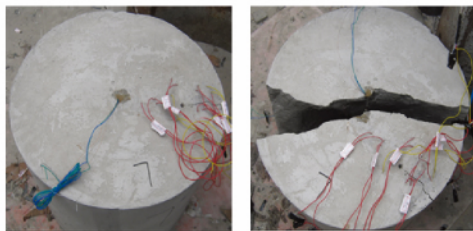
(a) 爆破前 (b) 爆破后

图 4 $d/r = 15$ 时的爆破图

Fig. 4 Picture of the rock blasting when $d/r = 15$

的分布。在气体与应力波的共同作用下,空孔附近岩石应力集中区域的裂纹被激活扩展,最后形成平整的裂缝。

当 $d/r = 22.5$ 时,试样爆破前后情况如图 5 所示。



(a) 爆破前 (b) 爆破后

图 5 $d/r = 22.5$ 时的爆破图

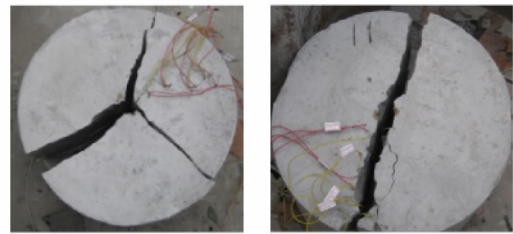
Fig. 5 Picture of the rock blasting when $d/r = 22.5$

当装药孔与空孔之间的距离较大时,试块不沿装药孔与空孔间的连线断裂。虽然有空孔的存在,但是空孔起不到定向致裂的作用,在弹性作用区,空孔的应力集中效应很小,岩石的应力状态达不到断裂强度,岩石的断裂根据其内部的损伤裂纹分布规律断裂,与空孔无关。由上述可得,装药孔与空孔之间的距离对岩石的断裂方向控制有重要的作用。由式(11)分析可得,切向应力的大小与透射入岩石的应力波峰值和孔间距的有关,当距离增大时,切向应力衰减的很迅速。研究表明,空孔位于裂隙区时,空孔才能起到定向作用,且能很好的利用爆炸产生的能量,使岩石破碎。根据爆破作用产生的破裂区、裂隙区和弹性区的特点,空孔布置于裂隙区的空孔效应最理想,且能达到定向致裂的作用,起到改善爆破效果的作用。

3.3 有无空孔时试件的断裂对比

在有、无空孔的条件下,岩石的断裂方向如图 6 所示。

在没有空孔的试件中,爆破后岩石断裂为 3 部分,断裂的方向具有随机性,断裂方向由试件内部损伤裂隙确定。在有空孔的岩石的断裂沿两孔的连线方向断裂,表明空孔具有定向致裂作用。



(a) 无空孔 (b) 有空孔

图 6 有、无空孔时试件断裂效果

Fig. 6 Contrast picture of empty hole action

3.4 空孔周围的动态应变

当装药孔与空孔之间的距离不同时,测得空孔周围的应变随时间的变化曲线如图 7 所示。

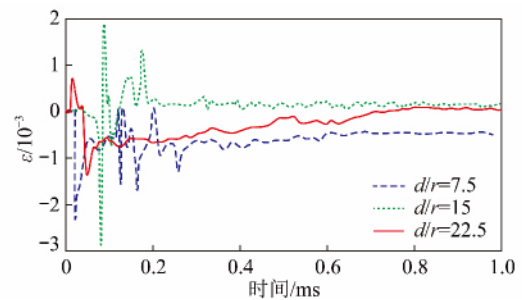


图 7 空孔周围的应变随时间的变化关系

Fig. 7 Relationship between the strain around the empty hole and the time

空孔所在的爆破作用区不同,空孔周围应变的大小不同。在当 d/r 分别为 7.5, 15, 22.5 时,孔周应变的峰值分别为 2.3×10^{-3} , 2.9×10^{-3} 和 1.4×10^{-3} 。在空孔位于裂隙区时,应变最大,空孔使岩石局部应力增大。尽管在压裂区应变与裂隙区应变相差不大,但是缺少爆生气体的协同作用,空孔不能产生定向致裂的作用,所以空孔在裂隙区的定向致裂是应力波和爆生气体共同作用的结果。

4 工程应用

4.1 工程概况

淮北朱庄煤矿某工作面位于地面以下约 600 m,地质构造复杂,给工作面的开采带来很多困难。顶底板岩石的力学参数见表 2。煤层的地质综合柱状图如图 8 所示。

表 2 顶底板岩石力学参数

Table 2 Mechanics parameters of roof and floor rock

岩石名称	密度 / ($g \cdot cm^{-3}$)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比
砂岩	2.45	80	3.4	0.25
砂质泥岩	2.31	52	2.8	0.28
泥岩	2.23	32	2.4	0.30










组	煤岩名称	柱状	厚度/m	岩性描述
二 叠 系 山 西 组	砂质泥岩		12.0~18.0	灰黑色砂质泥岩,块状
	中粒砂岩		8.0	灰白色中粒砂岩
	细~中粒砂岩		10.0	细~中粒砂岩,灰~灰黑色,薄层状
	6煤		1.6~1.9 1.8	6煤层,瘦煤,半亮型
	砂质泥岩		1.6	砂质泥岩,黑色块状含植物化石
	细粒砂岩		6.0~10.0	灰黑色条带状中、细砂岩
	中粒砂岩		18.0	灰色细中粒砂岩
组	泥岩		30.0	泥岩,黑色块状
	石灰岩		1.50	K1灰岩,灰白色,块状坚硬

图 8 煤岩层综合柱状图

Fig. 8 Integrated histogram of the coal bed

根据柱状图和顶底板岩石的力学性质判断煤层上方的岩石具有厚度大、强度高、完整性好且不易垮落的特点,在生产中,顶板的垮落没有周期性,采空区未垮落顶板的面积增大,给安全生产带来很大的隐患,而且工作面支架的推进阻力增大,严重影响生产进度。为使难冒顶板变为易冒顶板,采用超前预裂爆破的方式,使岩石局部强度降低,从而降低岩石的完整性。

4.2 超前预裂爆破参数设计

根据煤层的地质构造和前期开采的参数确定顶板垮落的步距,在顶板断裂的位置从机巷和风巷两侧进行深孔爆破。为了达到爆破效果,在装药孔较近的区域布置空孔,能使岩石破坏的同时,最大限度的降低其完整性。由于深部岩石爆破的空间有限,空孔还可以起到补偿位移的作用。炸药选用煤矿二级许用水胶炸药,其密度为 1.2 g/cm^3 ,爆速为 3800 m/s ,结合现场的实际情况,空孔与装药孔直径均为 71 mm ,根据实验得到的结论,装药孔与空孔间的距离与装药孔直径之比 $d/r = 15$ 时,空孔位于裂隙区,能起到应力集中的作用,所以空孔与装药孔的间距为 1.5 m ,装药孔与空孔的布置如图 9 所示。

根据顶板岩石的走向,设计爆破方案,装药孔的

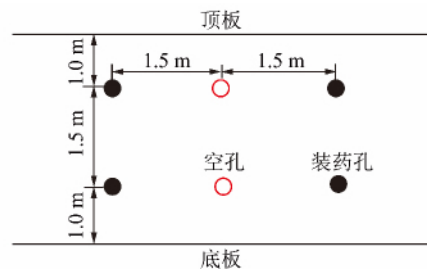


图 9 装药孔与空孔的布置

Fig. 9 Arrangement diagram of charge hole and empty hole
孔深和钻孔角度根据顶板坚硬岩石厚度和工作面的长度确定,爆破区域的剖面如图 10 所示。

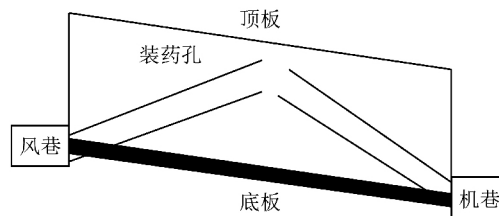


图 10 爆破区域剖面

Fig. 10 Profile of blasting area

岩体完整性与岩体的声速有关,从两空孔间岩体爆破前后波速的对比确定岩体完整性的变化,并采用微型相机观察空孔爆破前后孔壁的裂纹扩展情况,监测爆破前后工作面支架的工作阻力、顶板断裂的步距和岩石垮落特征。

4.3 实验效果

顶板受爆炸荷载作用产生裂隙,裂隙的影响范围取决于爆炸荷载的强度和爆破孔的布置。顶板爆破的效果与爆破产生的裂隙在顶板和岩层弯曲区的扩展、采空区岩层沿弱面的离层能力有关,其主要表现为工作面来压强度和步距的减小。通过对综采工作面进行深孔预裂爆破前后支架工作阻力观测,将爆破前后的支架工作阻力进行对比,工作面阻力对比如图 11 所示。

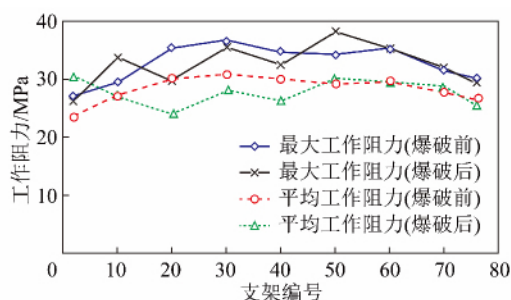


图 11 爆破前后工作面支架工作阻力对比情况

Fig. 11 Comparison of work resistance of working face support before and after blasting

根据工作面的矿压监测数据,将超前预裂爆破前后矿压数据进行对比,工作面靠近巷道的支架荷载变

化不大,在工作面中部支架的支护强度降低。根据矿压监测,调整爆破孔设置的布局,优化超前爆破参数。在工作面回采的过程中,顶板基本在预定的区域垮落,顶板仍然具有一定的完整性,岩石没有过度破碎的现象,也没发生漏顶事故,基本杜绝了支架推进困难的问题,提高了回采的效率。

顶板岩石在爆破后的完整性降低,采用爆破前后岩体声速的变化来判断岩体中裂隙的发育情况,爆破区域的声波变化如图 12 所示。

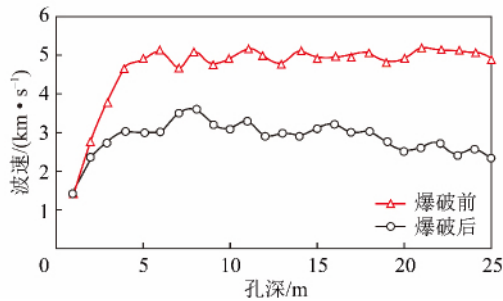


图 12 爆破区域的声波变化

Fig. 12 Acoustic variation of blasting area

爆破前后岩石的声波传播速度降低的幅度较大,在靠近巷道的部位,岩石的声速较低,由于巷道的变形等因素影响,靠近巷道区域的岩石声速较低,爆破前后此区域的声速变化不大,在 5 m 之后的装药段,岩石的声速降低率为 40% ~ 50%,波速降低反映岩体的完整性降低,岩层的弱面基本形成,为顶板岩体垮落提供了必要的条件。

在爆炸荷载的强冲击作用下,岩体中的裂隙必然被激活,裂纹在外界条件影响下扩展,空孔所在的区域处于爆破作用的裂隙区,对于空孔孔壁的裂隙扩展情况如图 13 所示。

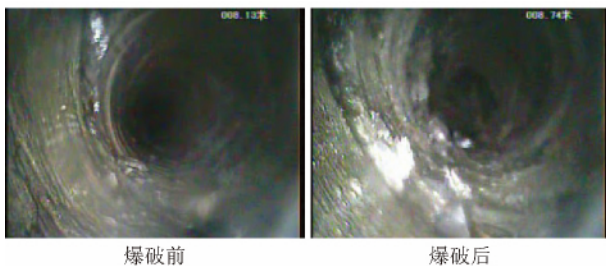


图 13 爆破前后孔内窥视图

Fig. 13 View of hole before and after blasting

爆破前孔内壁光滑,壁面平整,爆破后孔壁粗糙,孔壁破碎,孔内有掉落的碎石,从宏观上可以看出爆炸荷载使岩体中裂纹扩展。

深孔爆破的主要目的是降低岩体的强度和完整性,在声波和孔内窥视的结果来看,岩体的强度降低明显,岩石的破碎效果较好,顶板的强度降低。在开

采的过程中,工作面支架的推进阻力降低,顶板周期性垮落,顶板来压强度可控,达到爆破设计的目的,大大的降低了生产成本,提高了生产效率。

5 结 论

(1) 在爆炸荷载的作用下,空孔改变周围岩石中的应力分布,使爆炸荷载在装药孔与空孔的连线上产生应力集中,该方向上的拉应力最大,空孔能达到定向致裂的效果。

(2) 空孔与装药孔之间的距离与岩石的定向致裂作用密切相关,当空孔位于爆炸裂隙区时,岩石沿空孔和装药孔的连线方向断裂,当空孔位于压裂区和弹性区时,空孔定向致裂的作用不明显,岩石的断裂方向由其内部微裂隙分布决定。

(3) 空孔在深部顶板破碎中的应用效果明显,使难冒顶板变为易冒顶板。空孔在深部岩石的破碎中,不仅能控制裂纹的扩展方向,而且在爆破空间有限的情况下还能起到位移补偿的作用,使岩石尽可能产生较多裂隙。

参考文献:

- [1] Zhu Zheming, Bibhu Mohanty, Xie Heping. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2007 44(3): 412-424.
- [2] 来兴平, 崔峰, 曹建涛, 等. 特厚煤体爆破致裂机制及分区破坏的数值模拟[J]. 煤炭学报 2014, 39(8): 1642-1649.
Lai Xingping, Cui Feng, Cao Jiantao, et al. Extra-thick coal blasting mechanism and numerical simulation of partition failure[J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(8): 1642-1649.
- [3] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报 2007 26(S1): 3522-3527.
Qi Qingxin, Lei Yi, Li Hongyan, et al. Theory and application of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(S1): 3522-3527.
- [4] Li Chunrui, Kang Lijun, Qi Qingxing. The numerical analysis of borehole blasting and application in coal mine roof-weaken [A]. Proceedings of the International Conference on Mining Science & Technology [C]. Procedia Earth and Planetary Science 2009: 451-459.
- [5] Wei X Y, Zhao Z Y, Gu J. Numerical simulations of rock mass damage induced by underground explosion [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 2009 46(7): 1206-1213.
- [6] 赵宝友, 王海东. 深孔爆破技术在高地应力低透气性高瓦斯煤层增透防突中的适用性[J]. 爆炸与冲击 2014, 34(2): 145-152.
Zhao Baoyou, Wang Haidong. Feasibility of deep-hole blasting technology for outburst prevention and permeability enhancement in high-content coal seams with low-permeability subjected to

- high geo-stresses [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(2): 145–152.
- [7] 郝朝瑜, 王继仁, 万清生, 等. 煤层深孔控制预裂爆破的可拓工程设计方法及应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S): 72–75.
Hao Chaoyu, Wang Jiren, Wan Qingsheng, et al. Extension engineering method for parameter design of deep-hole controlling presplitting blasting in coal seam and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S): 72–75.
- [8] 陈秋宇, 黄文尧, 袁胜芳, 等. 煤矿深孔预裂爆破技术应用研究[J]. 工程爆破, 2011, 17(2): 37–39.
Chen Qiuyu, Huang Wenyao, Yuan Shengfang, et al. Research on application of deep-hole presplitting blasting technology in the coal mine[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(2): 37–39.
- [9] 岳中文, 杨仁树, 郭东明, 等. 爆炸作用下空孔周围应力场变化的模型实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 624–628.
Yue Zhongwen, Yang Renshu, Guo Dongming, et al. Model experimental of stress field around empty hole under blasting loading[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 624–628.
- [10] 岳中文, 郭洋, 许鹏, 等. 定向断裂控制爆破的空孔效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 304–311.
Yue Zhongwen, Guo Yang, Xu Peng, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting[J]. Explosion and Shock Wave, 2015, 35(3): 304–311.
- [11] 张奇, 杨永琦, 员永峰, 等. 直眼掏槽爆破效果的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 144–147.
Zhang Qi, Yang Yongqi, Yuan Yongfeng, et al. Study on the factors affecting parallel hole cut blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 144–147.
- [12] 郑祥滨, 谭世杰, 范利华, 等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2589–2594.
Zheng Xiangbin, Tan Shijie, Fan Lihua, et al. Numerical simulation of cavity formation process by single helix parallel hole cut blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2589–2594.
- [13] 龚敏, 王德胜, 黄毅华, 等. 突出煤层深孔控制爆破时控制孔的作用[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 310–315.
Gong Min, Wang Desheng, Huang Yihua, et al. Action of control holes on deep-hole blasting in outburst coal seams[J]. Explosion and Shock Wave, 2008, 28(4): 310–315.
- [14] 罗勇, 沈兆武. 深孔控制卸压爆破机理和防突实验研究[J]. 力学季刊, 2006, 27(3): 469–475.
Luo Yong, Shen Zhaowu. Study on mechanism and test of controlled stress relaxation blasting in deep hole[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(3): 469–475.
- [15] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Yang Jun, Jin Qiankun, Huang Fenglei. Theory model and numerical analysis of rock blasting[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
Dai Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [17] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 2000.
Zhang Zhicheng. Directional fracture controlled blasting[M]. Chongqing: Chongqing Press, 2000.