

*

坚硬顶板预裂爆破模拟分析与研究

崔广甲, 秦 阳, 臧 涛, 赵 凯

(山东方大工程有限责任公司, 山东 淄博 255150)

摘 要: 阐述了坚硬顶板爆破成缝的原理, 并根据 402 工作面实际情况选择了不同的参数, 建立了不耦合装药、切缝药包以及 V 型刻槽三种爆破模型。针对上述三种模型, 对比分析相应的孔壁压力发现, 切缝药包爆破产生的预裂效果最好。通过对此模型进行模拟计算, 得到了测点应力随时间变化的曲线, 进一步发现在与炮孔间隔 2.75 m 处所测得的最大拉应力高于顶板岩层的抗拉强度, 说明两炮孔互相贯穿, 从而证明了此次爆破的炮孔间距确定为 5.5 m 是合适的。

关键词: 坚硬顶板; 预裂爆破; 孔壁压力; 模拟分析; 炮孔参数

中图分类号: TD235

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation Analysis on Pre-split Blasting of Hard Roof

CUI Guangjia, QIN Yang, ZANG Tao, ZHAO Kai

(Shandong Fangda Engineering Co., Ltd., Zibo 255150, China)

Abstract: In this paper, the principle of blasting a hard roof into a seam was introduced. In addition, parameters were selected for the actual No. 402 working face and three blasting models were established, including decoupling charge, slotted cartridge and V-shaped notching blasting. The comparison of their corresponding pressure on borehole wall showed that the pre-split effect produced by the slotted cartridge blasting was the best. The simulation calculation obtained the stress variation curves at measuring points. Moreover, it was found that the maximum tensile stress measured at 2.75 meters from the blasting borehole was higher than the tensile strength of the top strata, indicating the two blasting boreholes penetrating each other, which could prove suitable the 5.5 meters of the blasting borehole spacing.

Key words: hard roof; pre-splitting blasting; pressure on borehole wall; simulation analysis; blasting parameters

煤炭是重要的工业原料,然而在煤炭生产过程中往往存在着诸多的安全隐患,其中顶板事故是造成伤亡较多的隐患之一。当煤层上方有坚硬顶板时,更易发生顶板事故^[1-2]。这主要是由于坚硬顶板的整体性好,不易断裂,且上方的岩石比较坚硬,往往形成一个整体,当工作面不断向前推进时,坚硬顶板不会及时陷落,从而形成安全隐患^[3-4]。因此,需要对坚硬顶板加以防控。

坚硬顶板预裂爆破是对坚硬顶板加以防控的有

效措施之一。坚硬顶板爆破的目的是利用爆炸产生的能量破坏顶板的完整性,使顶板能够及时坍塌,降低因大面积冒落造成的潜在风险^[5]。普通爆破与坚硬顶板预裂爆破的目的和环境有所差别,因此,在对坚硬顶板进行爆破时,应解决以下问题:应进一步探索预裂机理,理论分析是否正确将会对设计参数和仿真结果产生直接影响;炮孔间距、炮孔直径和不耦合系数等爆破参数需要经过科学的理论分析才能确定。

* 收稿日期: 2020-09-23

作者简介: 崔广甲(1984—),男,山东济宁人,本科,工程师,从事煤矿冲击地压治理、煤矿防治水及巷道工程等工作, E-mail: azgssgk@163.com

1 预裂爆破成缝机理

预裂爆破的实质是在预裂孔连接线方向形成一条具有一定宽度,且对周围岩石损伤不大的贯通缝隙,贯通缝隙一般是由爆裂气体和爆裂应力波两种因素共同作用产生的。在爆裂应力波的作用下炮孔壁会形成环向裂纹和径向裂纹,但因为径向裂纹扩张所需要的能量比环向裂纹少,所以在爆裂气体压力作用下,径向缝隙将会首先扩展^[6]。因此,裂隙将沿相邻炮孔的连线方向继续扩展,其他方向的裂隙扩展较小^[7-8]。之后,由于爆炸产生的气体在狭小的孔内膨胀,形成气楔进入裂缝,使得缝隙进一步扩大,这便是“气刃效应”。同时,因为爆裂应力波的毁伤作用,受损的岩体会在准静态应力场和原岩应力场的相互作用中产生二次裂隙扩展,断裂过程如图 1 所示^[9]。

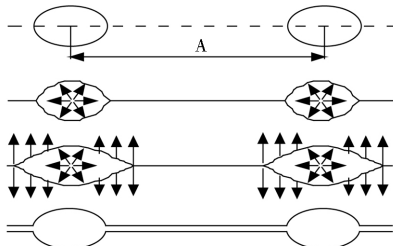


图 1 岩石断裂过程
Fig.1 Rock fracture process

2 爆破参数设置

煤矿位于伊金霍洛旗札萨克镇和红庆河镇境内,3-1 煤层煤种为不黏煤,该煤层位于延安组的三岩段(J1-2y3),全区赋存,3-1402 工作面赋存标高为+676~+720 m,平均 698 m,倾角 1°~3°。402 工作面煤层的顶板岩石特征如表 1 所示。

表 1 402 工作面顶底板情况
Table 1 Roof and floor of 402 working face

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	特征
基本顶	中粒砂岩、含粗砂岩	48.84~107.74 77.53	浅灰绿色-灰绿色,主要成分为长石,石英及少量暗色矿物,分选,磨圆较差
直接顶	粉砂岩-砂质泥岩	5.90~24.73 19.76	浅灰色-灰色,泥质胶结,波状-微波状层理,含植物叶化石
直接底	砂质泥岩	3.84~44.50 16.76	灰色,微波状-波状层理,夹泥岩条带,含植物叶化石
老底	粉砂岩	0~36.40 18.20	灰白色,局部为灰黑色,层状主要成份为长石和少量的石英碎屑和岩屑,胶结物为泥质,与下部岩层界线清楚

2.1 炸药参数

炸药爆轰的产物体积和所受压力的关系如下:

$$p=A(1-\frac{\omega\eta}{R_1})e^{\frac{R_1}{\eta}}+B(1-\frac{\omega\eta}{R_2})e^{\frac{R_2}{\eta}}+\omega\rho e \quad (1)$$

式中:A、B、R₁、R₂、ω 为实验拟合参数;η=ρ₀/ρ₀,ρ₀ 为初始密度,kg/m³;e 为比内能,J/kg。具体计算参数如表 2 所示。

表 2 炸药参数
Table 2 Explosive parameters

密度 ρ/(kg·m ⁻³)	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω
1 194	42	0.44	3.55	0.16	0.41

2.2 硬质 PVC 管参数

PVC 管参数如表 3 所示,爆破初期采用 *mat-elastic 模拟聚能管,爆破后期采用 *mat-add-erosion 准则模拟失效。

表 3 PVC 管参数
Table 3 PVC parameters

密度 ρ/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
1 300	1.30	0.38

3 爆破数值模拟

3.1 数值模型的建立

使用 ANSYS/LS-DYNA 分别建立了 V 型刻槽、切缝药包和不耦合装药三种爆破模型^[10],如图 2 所示。模型几何尺寸如表 4 所示。

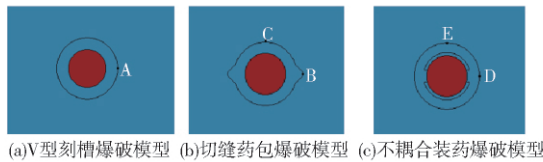


图 2 爆破数值模型
Fig.2 Numerical model of blasting

表 4 模型几何尺寸

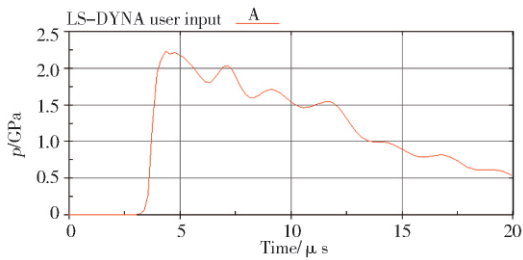
Table 4 Geometric dimension of models

爆破模型	岩体截面/(mm×mm)	炮孔直径/mm	炸药直径/mm	不耦合系数
不耦合装药	200×200	42	26	1.59
V 型刻槽	200×200	42	26	1.59
切缝药包	200×200	42	26	1.59

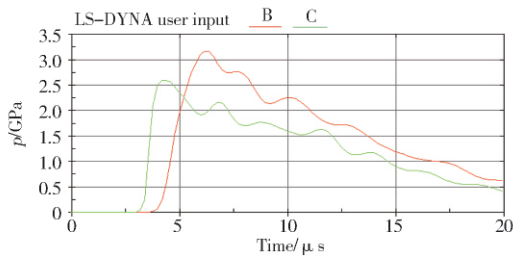
3.2 不同装药结构爆破对炮孔壁应力的影响

图 3 中对 A 处和 C 处进行比较发现,两个点所受应力差别不大,证明当不耦合系数为 1.59 时,在 C 处 V 型刻槽孔没有较大的应力变化。将图 3 的 A 处和 E 处进行比较发现,E 处的应力小于 A 处的应力,证明当不耦合系数相同时,切缝药包定向断裂爆破产生的效果对孔壁的损坏更小。通过对 A、B、D 三处进行比较发现,B 和 D 两处的应力值均远超 A 处,这证明当装药量和不耦合系数相同时,使用定向爆破的方式能够增加炮孔间的距离。对比图 3(a)、3(b)、3(c)发现,与 V 型刻槽断裂爆破相比,切

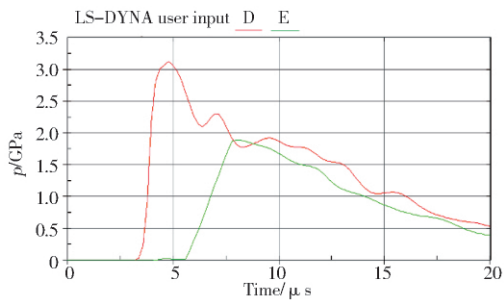
缝药包定向断裂爆破对炮孔孔壁的作用力更小,说明切缝药包定向断裂爆破用于成缝的能量比 V 型刻槽断裂爆破多,爆破效果也更好。



(a) V 型刻槽爆破模型受力示意图



(b) 切缝药包爆破模型受力示意图



(c) 不耦合装药爆破模型受力示意图

图 3 不同测点压力变化图

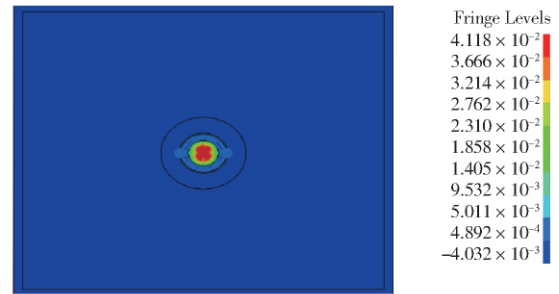
Fig. 3 Pressure variation at different measuring points

4 切缝药包定向断裂爆破模拟

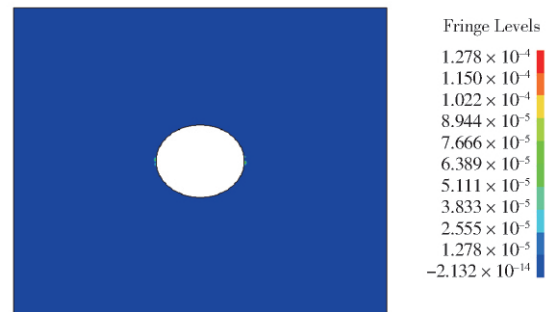
4.1 径向不耦合装药系数的确定及模拟

爆炸发出高温高压气体的作用时间和强度决定了炮孔初始裂隙形成的大小。当径向不耦合装药系数过大时,切缝的宽度会相应增大,炮孔孔壁上受到气体射流影响的面积会增加,受到的强度会降低;当径向不耦合装药系数过小时,裂隙受到气体射流作用的时间将会减小,裂隙的发展将会受到影响。因此,径向不耦合装药系数太大或者太小都会对初始裂隙的发展产生负面影响^[11-12]。在模拟过程中,切缝开口宽度取 8 mm,炮孔直径取 90 mm,硬质 PVC 管的厚度取 2 mm,所得结果如图 4 所示。由图 4(a) 可以看到,在时间 $t = 6.9961 \times 10^{-6}$ s 时,由于爆炸产生的气流,迅速冲出裂隙,形成射流;图 4(b) 可知,当时间在 $t = 8.4962 \times 10^{-6}$ s 时,气流到达孔壁;当时间 $t = 8.4962 \times 10^{-6} \sim 11.4990 \times 10^{-6}$ s (图 4(c))

时,缝隙处的切应力比较集中,顶板岩石无法承受巨大的剪切力差,从而形成裂缝。



(a) $t = 6.9961 \times 10^{-6}$ s 时的应力云图



(b) $t = 8.4962 \times 10^{-6}$ s 时的应力云图



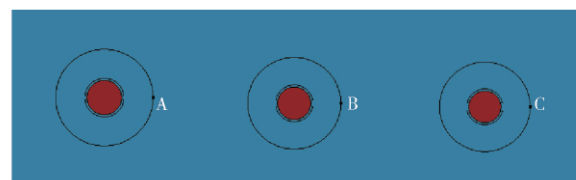
(c) $t = 11.4990 \times 10^{-6}$ s 时的应力云图

图 4 炮孔不同时刻的应力云图

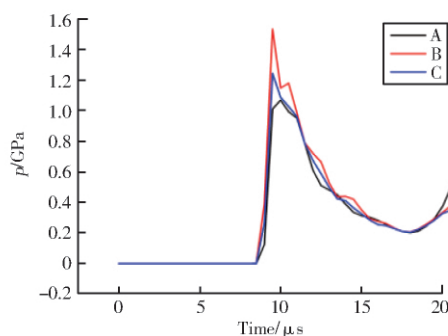
Fig. 4 Stress nephogram of blast borehole at different time

4.2 切缝宽度的确定

为保证模拟的合理性,选取厚度为 2 mm、径向不耦合系数为 2.81 的 PVC 管,同时控制其他条件不变,对切缝分别为 4, 6, 8 mm 的情况进行模拟。如图 5 所示,得到同一位置不同切缝宽度的应力值(A、B、C 测点),观察发现当切缝宽度为 6 mm 时,爆破能产生较大的应力,爆破效果最好。综合上述情况考虑,在此选取厚度为 6 mm 的硬质 PVC 管。



(a) 三种不同切缝宽度模型



(b) A、B、C 点的应力曲线图

图5 三种不同切缝宽度模型及其应力曲线图

Fig. 5 Three different slit width models and stress curves

5 普通不耦合装药下炮孔间距模拟

在普通不耦合装药条件下,通过计算设定此次模拟的炮孔间距为 5.5 m,并选取距离炮孔 0.55, 1.10, 1.65, 2.20, 2.75 m 处的最大应力分别与顶板岩石抗拉强度进行比较,从而验证本次试验选取的炮孔间距是否合适。

为了分析顶板的应力,如图 6 所示,沿炮孔方向分别布置 A、B、C、D、E 五个测量点,分别距离炮孔 0.55, 1.10, 1.65, 2.20, 2.75 m,测量处的应力变化如图 7 所示。

通过分析图 7 可知,在爆破孔 A 点的 0.5 m 内,爆破产生的应力波远远高于岩石的抗压强度,所以周围岩石由于爆炸产生的应力波基本都处于完全破碎状态。应力波不断扩展,峰值会一直降低,而 B、C、D、E 点的最高应力则依次降低,小于顶板抗压强度,因此爆破产生的影响范围大约为 0.5 ~ 1.0 m。而顶板岩石的抗拉强度为 5.94 MPa,由模拟结果可知,A、B、C、D、E 各点的最大拉应力分别为 18.6, 13.4, 18.5, 15.7, 21.6 MPa, 5 个点均大于 402 工作面顶板岩层的抗拉强度,证明炮孔之间的裂缝已贯穿,所以此次爆破的炮孔间距取 5.5 m 是

合适的。



图6 距爆破孔不同位置处测点分布

Fig. 6 Distribution of measuring points at different positions from blasting boreholes

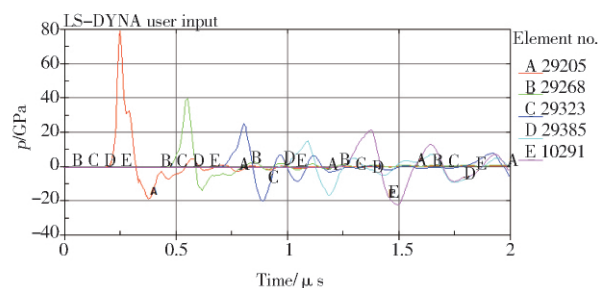


图7 距爆破孔不同位置处测量点应力曲线

Fig. 7 Stress curves of measuring points at different positions from blasting borehole

6 结论

1)通过对比三种模拟爆破方式可知,当装药量和不耦合系数都相同时,采用定向断裂爆破的方法可以增大炮孔间距。结果表明,切缝药包定向断裂爆破用于成缝的能量比 V 型刻槽断裂爆破多,爆破效果亦更好。

2)当切缝宽度为 6 mm, PVC 管壁厚度为 2 mm,径向不耦合系数为 2.81 时切缝药包定向断裂爆破效果达到最佳。

3)在与炮孔间隔 2.75 m 处所测得的最大拉应力高于顶板岩层的抗拉强度,所以两个炮孔间的裂缝已经互相贯穿,故此次爆破的炮孔间距取 5.5 m 是合适的。

参考文献:

- [1] 霍丙杰,荆雪冬,于斌,等.坚硬顶板厚煤层采场来压强度分级预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1828-1835.
HUO B J, JING X D, YU B, et al. A classification forecasting method for the weighting intensity of stopes of thick coal seams with hard roofs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1828-1835.
- [2] 高小强,谢永昌,于宏溪.综放工作面厚层坚硬顶板深孔预裂爆破技术研究[J].煤炭技术,2019,38(9):82-85.
GAO X Q, XIE Y C, YU H X. Study on deep-hole pre-splitting blasting technology of thick and hard roof in fully mechanized caving face[J]. Coal Technology, 2019, 38(9): 82-85.
- [3] 刘啸.基于深孔预裂爆破的厚硬顶板控制实践[J].工矿自动化,2019,45(12):1-6.
LIU X. Control practice of thick and hard roof based on deep-hole pre-splitting blasting[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 1-6.
- [4] 郑上上,孔德中.工作面坚硬顶板破断特征与覆岩运移规律[J].煤矿安全,2019,50(5):257-262.

- ZHENG S S, KONG D Z. Fracture characteristics of hard roof and overlying rock movement in working face[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 257-262.
- [5] 冯龙飞, 龚林名, 王晓东, 等. 回采速度对坚硬顶板运动释放能量的影响机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3329-3339.
FENG L F, DOU L M, WANG X D, et al. Mechanism of mining advance speed on energy release from hard roof movement[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3329-3339.
- [6] 苏波. 水力压裂技术在煤矿坚硬难垮顶板中的应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(4): 54-57.
SU B. Application of hydraulic fracturing technology in hard and stable roof of coal mine[J]. Coal Engineering, 2019, 51(4): 54-57.
- [7] 郭正超, 王红胜, 李树刚, 等. 预裂爆破弱化坚硬顶板技术在沿空留巷的应用[J]. 爆破, 2017, 34(3): 53-56.
GUO Z C, WANG H S, LI S G, et al. Application of pre-splitting blasting technology in weakening hard roof on gob-side entry retaining[J]. Blasting, 2017, 34(3): 53-56.
- [8] 高林生, 蒋大峰, 郑学军, 等. 坚硬顶板工作面回采巷道底鼓诱因分析及控制技术[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 10-13.
GAO L S, JIANG D F, ZHENG X J, et al. Cause analysis and control technology for floor heave in mining roadway with hard roof[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 10-13.
- [9] 贺纯纯. 沿空留巷顶板预裂爆破机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [10] 孙闯, 陈东旭, 程耀辉, 等. 急倾斜煤层坚硬顶板塌落规律及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1647-1658.
SUN C, CHEN D X, CHENG Y H, et al. Study on collapse rule and control of hard roofs in steeply inclined coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1647-1658.
- [11] LIU T, LIN B Q, XIAO W, et al. A safe mining approach for deep outburst coal seam groups with hard-thick sandstone roof: Stepwise risk control based on gas diversion and extraction[J]. Energy Science and Engineering, 2020, 8(8): 2946-2965.
- [12] 王新民. 预掘通道切顶卸压安全快速回撤技术及应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 96-101.
WANG X M. Safe and quick retracement through pre-driven gateway with roof cutting and pressure releasing[J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 96-101.

(编辑: 安娜)