

多孔爆破岩石破坏机制及起爆方式选择

阚吉亮^{1,2}, 窦林名³, 周坤友², 杨科², 李家卓², 李许伟³, 刘明洪⁴

(1. 安徽理工大学安徽省煤炭安全精准开采工程实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 托克逊县雨田煤业有限责任公司, 新疆 吐鲁番 838000)

摘要 针对多孔爆破岩石破坏机制及起爆方式选择问题,建立了多孔柱状装药爆破应力传播叠加及岩石累积损伤力学模型,对比分析了不同起爆方式下岩石损伤破坏及爆破震动效应,并在新疆某矿开展了5种起爆方式下顶板深孔爆破工程试验,对爆破震动响应特征进行了监测分析。结果表明:所构建的力学模型能够实现多炮孔柱状装药同时起爆所激发的爆炸应力波叠加传播过程的定量求解,揭示了顺序起爆方式下岩石在多层爆炸应力波作用下累积损伤破坏机制,数值模拟结果验证了该力学模型的正确性;多孔同时起爆方式下岩石爆破损伤破坏程度和范围均更大,随着起爆炮孔数量和装药量的增加,爆破所诱发的煤岩体震动强度逐渐增强;新疆某矿同时起爆一组扇形孔(4个)时所诱发的爆破微震震源能量达到 1.1×10^6 J,接近临界安全值,并且强烈爆破震动诱发煤体瓦斯瞬间涌出,易导致巷道瓦斯浓度超限。综合考虑爆破防冲效果、爆破震动控制和施工效率,确定了该矿合理的顶板深孔爆破起爆方式。

关键词 冲击地压; 多孔爆破; 应力叠加; 累积损伤; 震动效应

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2025.0009

Rock failure mechanism of multi-hole blasting and selection of initiation pattern

KAN Jiliang^{1,2}, DOU Linming³, ZHOU Kunyou², YANG Ke²,
LI Jiazhao², LI Xuwei³, LIU Minghong⁴

(1. Engineering Laboratory for Safe and Precise Coal Mining of Anhui Province, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. Tuokexun County Yutian Coal Industry Co Ltd, Turpan, Xinjiang 838000, China)

Abstract To investigate the rock damage mechanism of multi-hole blasting and the selection of initiation pattern, a mechanical model of stress superimposed propagation and rock cumulative damage was established for multi-hole cylindrical charge blasting. With this model, the rock damage and blasting seismic effects under different initiation patterns were comparatively analyzed. Besides, roof deep-hole blasting experiments with five initiation patterns were conducted in a coal mine in Xinjiang, and the blasting vibration responses were monitored and analyzed. The results show that the established mechanical model can realize the quantitative solution of the superimposed propagation process of explosive stress

收稿日期: 2025-01-08

责任编辑: 苗青

基金项目: 安徽省煤炭安全精准开采工程实验室开放课题(ESCMP202401);国家重点研发计划项目(2022YFC3004603);安徽理工大学高层次人才引进人才科研启动基金项目(2023yjrc75);国家自然科学基金项目(52304197)

作者简介: 阚吉亮(1995—),男,山东省临沂市人,博士,讲师,硕士生导师,从事冲击地压、矿震机理及防控等方面的研究。

通信作者: 窦林名

E-mail: 0262@cumt.edu.cn

Tel: 0516-83995904

waves induced by simultaneous initiation of multi-hole cylindrical charge. The cumulative damage mechanism of rock subjected to multiple rounds of explosive stress waves under sequential initiation pattern was revealed. Moreover, the correctness of the established mechanical model was verified by the numerical simulation results. The degree and scope of rock blasting damage was higher under simultaneous initiation pattern, but the blasting-induced seismic intensity rose with the increases in the number of initiation holes and the explosive charge. When a group of (four) fan-shaped holes were initiated simultaneously in a coal mine in Xinjiang, the source energy of blasting seismic reached 1.1×10^6 J, which was close to the critical safety value. At the same time, the strong blasting vibration induced the instantaneous emission of gas from the coal seam, which easily led to the excessive concentration of gas in the roadway. Considering the blasting destressing effect, blasting seismic control, and operation efficiency, the reasonable initiation pattern of roof deep-hole blasting was determined.

Key words rock burst; multi-hole blasting; stress superposition; cumulative damage; vibration effect

随着煤矿开采深度和强度的增加,冲击地压灾害发生频次和强度显著增加^[1-2]。煤层上方近场赋存的坚硬厚层顶板是诱发冲击地压的重要因素。顶板深孔爆破在防控近场厚硬顶板诱发的冲击地压灾害方面具有较好的效果^[3-4]。目前,顶板深孔爆破钻孔布置形式普遍为沿工作面倾斜方向扇形布置 2~4 个柱状倾斜炮孔。对于成组扇形炮孔,其起爆方式(起爆孔数量和顺序)的设计对爆破防冲效果、爆破震动扰动、施工效率及成本均具有重要影响。冲击地压矿井中顶板深孔爆破的目的是破坏顶板岩层结构,调控采场覆岩结构运动及改善应力环境,进而降低冲击风险。因此,岩石爆破破坏程度越充分,防冲效果越好^[5-7]。然而,岩石爆破诱发的震动可能导致巷道围岩结构破坏和煤体瓦斯瞬间逸出,且爆炸应力越大,诱发的震动强度也越大^[8]。另外,井下顶板深孔爆破施工工程量大,起爆方式的选择关系着施工效率和成本,如果同时起爆成组炮孔,能够避免爆破施工中的重复作业流程,提高爆破效率,降低作业成本。因此,设计合理的扇形组孔起爆方式对于实现冲击地压精准高效防治至关重要,需要解决的关键科学问题是多孔爆破中起爆方式对岩石损伤破坏及震动效应的影响机制。

对于多孔爆破,影响岩石爆破损伤效果和震动响应特征的因素较多,如炮孔数量、炮孔布置形式、起爆延时时间和炮孔间距等。国内外学者针对上述影响因素进行了系统研究,并取得了丰硕成果。赵善坤^[5]和 Zuo 等^[9]研究了 3 种炮孔空间布置形式下岩石爆破损伤区分布,认为“深浅组合式”炮孔布置下岩石塑性破坏区范围更大,岩石破坏更加均匀。宋彦琦等^[10]构建了多孔聚能爆破数值模型,再现了聚能射流及爆炸应力波传播与叠加过程,并对

不同间距炮孔煤体单元应力进行了分析。Chen 等^[11]和 Kan 等^[12]研究了多孔爆破中装药长度、炮孔间距、传播路径、延时时间、炸药爆速等因素对岩石爆破震动强度的影响规律。郝琪等^[13]研究了双孔爆破中岩石抗拉强度、炸药装药密度、不耦合系数及爆破孔间距对预裂爆破效果的影响,优化了针对粗粒砂岩层的爆破参数。但上述研究多将柱状装药爆破模型简化为径向平面问题,未考虑柱状装药轴向方向爆炸应力传播;另一方面,多孔(特别是扇形炮孔组)起爆方式对岩石爆破损伤破坏及诱发的震动效应的影响等也鲜有报道。

本文综合采用理论分析、数值模拟和工程实践等方法对多孔爆破岩石破坏机制及起爆方式选择进行深入研究;建立了多孔柱状装药爆破应力传播叠加及岩石累积损伤力学模型;利用 LS-DYNA 软件模拟分析了 3 种起爆方式下岩石损伤破坏效应和爆破震动效应;在新疆某矿开展了 5 种起爆方式下顶板深孔爆破工程试验,利用微震监测系统对爆破震动响应特征进行了监测分析;在此基础上,综合考虑爆破防冲效果、爆破震动扰动和施工效率,确定了该矿起爆方式优化方案。

1 多孔柱状装药爆破应力传播及岩石累积损伤力学模型研究

1.1 多孔柱状装药同时起爆应力传播叠加力学模型

对于单一炮孔的柱状药包,其激发的爆炸应力场可以通过一系列等效球状药包叠加获得,则多孔柱状装药同时起爆条件下爆炸应力场可由每个炮孔柱状药包叠加获得。如图 1 所示,假设一组扇形炮孔由 3 个倾斜、不同长度的炮孔组成,柱状药包长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,且装药段分别被均分为 n_1 、 n_2 、

叠加力学模型,首先确定单元药包所激发的应力波函数 $g(t)$,根据文献[14-15],式(5)中各系数取值为: $A = 0.008, B = 0.012, \zeta = 6.75$ 。煤矿顶板深孔爆破采用煤矿许用乳化炸药,该类型炸药爆轰速度一般为 $3\,000 \sim 5\,000$ m/s,本文中,炸药爆轰速度(C_b)取值为 $3\,600$ m/s,密度(ρ_0)为 $1\,100$ kg/m³,根据文献[17]计算可得该条件下孔壁处爆炸应力波初始应力(p_d)为 $2\,940$ MPa。按照单元球状药包等效半径与柱状药包半径关系式^[18]: $R_b =$

$1.224\,7R_0$, 计算得到单元球状药包等效半径为 49 mm,为便于计算,本文取整为 50 mm。爆破介质为砂岩,爆炸应力波在砂岩中的传播速度(C_r)取值为 $4\,000$ m/s,爆炸应力波衰减系数(α)取值为 2.0 ,起爆位置为装药底端。

求得该条件下多孔柱状装药同时起爆后不同时刻下岩石爆炸应力波传播规律,结果如图3所示。此外,计算得到整个爆炸过程中岩石不同位置所承受的最大爆炸应力(图4)。

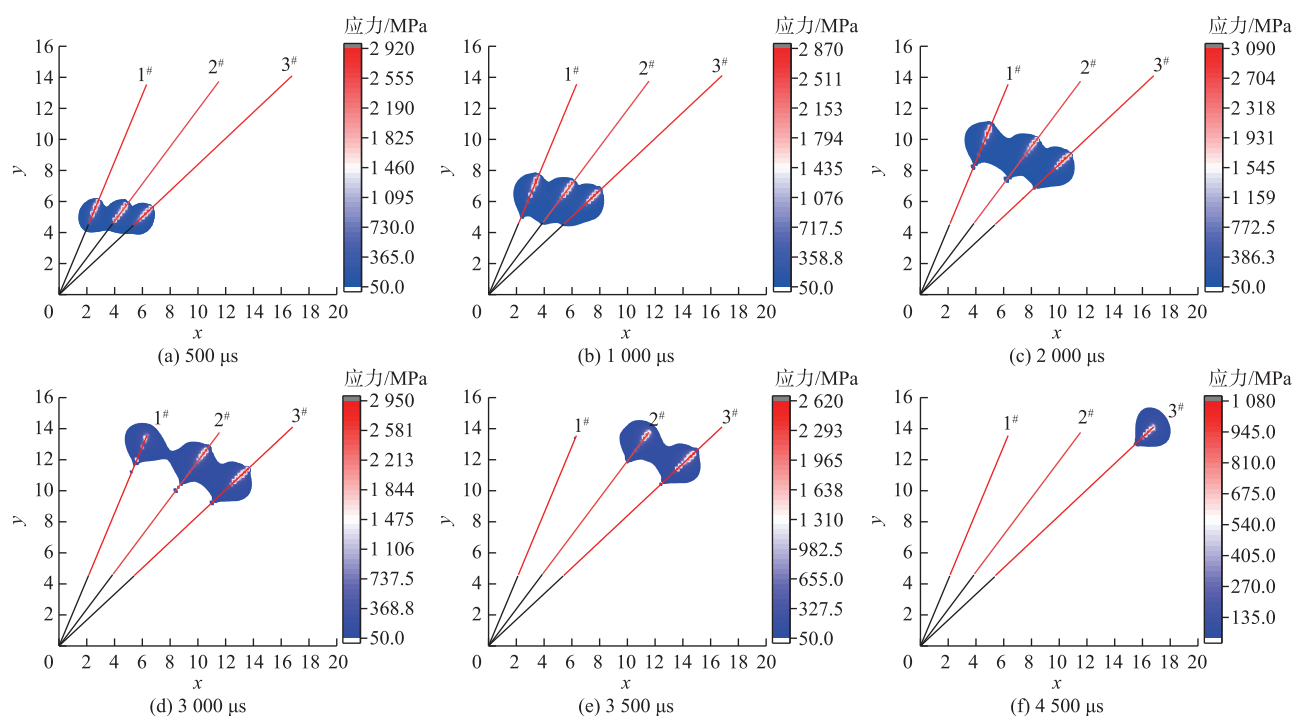


图3 多孔同时起爆后不同时刻岩石爆炸应力分布

Fig. 3 Blasting stress distribution at different times after simultaneous detonation in multi-hole blasting

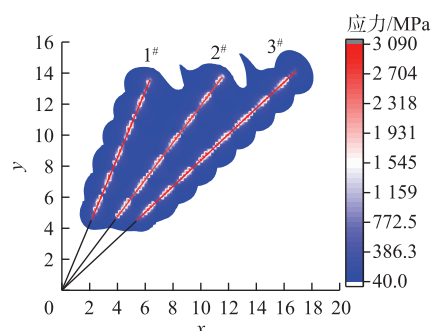


图4 多孔柱状装药同时起爆后岩石承受的最大爆炸应力分布

Fig. 4 Maximum blasting stress in rock after simultaneous detonation of cylindrical charges in multi-hole blasting

炸药起爆后,柱状药包激发的应力场沿爆轰波传播正向叠加增强,炮孔间岩石受到的多炮孔爆炸应力波叠加效应最强。但随着炮孔间距的增加,爆

炸应力波的叠加效应减弱,在炸药起爆 $3\,000\ \mu\text{s}$ 后,1#炮孔完全起爆,起爆 $3\,500\ \mu\text{s}$ 后,2#炮孔完全起爆。此后,岩石内爆炸应力波仅由3#炮孔激发,且应力波强度开始逐渐衰减,直至整个爆破过程结束。结果表明:多孔柱状装药同时起爆条件下,爆炸应力传播叠加力学模型能够表征柱状装药起爆的正向传播作用以及多孔爆破应力波传播的叠加作用。

1.2 多孔柱状装药顺序起爆下岩石累积损伤理论模型

文献[19]表明,爆炸结束后炮孔周围岩石一般会形成粉碎区、裂隙区和弹性震动区。爆炸粉碎区和裂隙区岩石破坏准则为:爆炸应力波产生的径向压应力和切向拉应力分别大于岩石的动态抗压强度和动态抗拉强度。由此可见,岩石的破坏损伤效

果与爆炸应力强度及岩石力学参数密切相关。

相较于同时起爆方式,组孔顺序起爆时各炮孔所激发的爆炸应力波不会发生叠加,但炮孔周围岩石将承受多轮爆炸应力波作用,每次爆破作用结束后会造成炮孔周围岩石结构破坏及力学参数弱化,后续炮孔依次起爆所激发的爆炸应力波将再次作用于岩石损伤区而造成岩石累积损伤。

为描述爆破损伤对岩石力学参数的弱化程度, Hoek 等在 Hoek-Brown 破坏准则的基础上引入爆破损伤因子 D 来定量表征这种影响。Hoek-Brown 破坏准则的表达式^[20]如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (11)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为岩体破坏时的最大及最小主应力; σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度; m_b 、 s 和 a 均为 Hoek-Brown 常数。引入爆破损伤因子 D 后,各参数表达式如下:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (12)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp \left(\frac{-GSI}{15} \right) - \exp \left(\frac{-20}{3} \right) \right] \quad (14)$$

式中: m_i 为表征岩石强度的常数; GSI 为表征岩体完整性的地质强度指标; D 为爆破损伤因子。

考虑爆破损伤因子 D 条件下岩体单轴抗压强度 σ_{cm} 和抗拉强度 σ_{tm} 的表达式分别为:

$$\sigma_{cm} = s^a \sigma_{ci} \quad (15)$$

$$\sigma_{tm} = - \frac{s^a \sigma_{ci}}{m_b} \quad (16)$$

由上述理论可知,岩石在爆破作用下损伤程度越高(即爆破损伤因子 D 越大),岩石力学参数弱化强度就越高,岩石抗压和抗拉强度显著降低,此时较低的爆炸应力即可引起岩石破坏。因此,当岩石承受多轮爆炸应力作用时,其损伤破坏会不断累积,导致损伤程度和损伤区域范围不断增加。

2 不同起爆方式下多孔柱状爆破岩石损伤特征及震动响应数值模拟

LS-DYNA 是以显示为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序,适用于求解各种二维、三维非线性结构高速碰撞、爆炸和金属成形等非线性动力冲击问题,已广泛应用于模拟岩石爆破过程。

2.1 数值模型构建及模拟方案

基于典型顶板深孔爆破孔组布置方式(图2),同时考虑数值模型网格划分质量和模拟结果准确性,对数值模型进行一定简化,最终建立的多孔柱状装药岩石爆破数值模型如图5所示。模型由岩石介质、炸药、空气和封堵材料组成,长×高×宽=32 m×18 m×1.0 m,在模型中布置3个爆破孔,炮孔倾角分别为65°、50°和40°,炮孔长度分别为15.44、18.27和21.78 m,装药长度分别为11.0、13.0和15.55 m,炮孔直径为100 mm,各炮孔底部间距为1.5 m,在模型表面施加透射边界和对称边界条件以消除边界效应。

基于数值模型设计3种爆破方案。方案1:1#、2#和3#爆破孔同时起爆;方案2:1#、2#和3#爆破孔依次单独起爆;方案3:首先同时起爆1#和2#爆破孔,然后单独起爆3#爆破孔。其中,方案2和方案3采用完全重启动法实现多孔顺序起爆的模拟,即第一次起爆完全结束后,保存岩石变形和损伤变量,通过完全重启动命令初始化岩石应力、计算时间等参数,通过重复上述流程完成顺序起爆条件下岩石累积损伤破坏模拟。

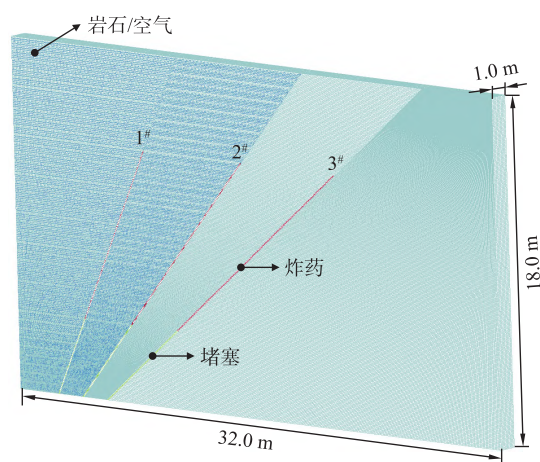


图5 多孔柱状装药岩石爆破数值模型
Fig. 5 Outline of the numerical model for multi-holes rock blasting with cylindrical charge

2.2 模型本构及参数选择

LS-DYNA 通常采用 HJC 模型、JH 系列模型和 RHT 模型来描述岩石在爆炸冲击作用下的损伤破坏行为^[21-22]。其中,RHT 模型被证实在岩石爆破模拟中比其他本构模型表现更佳^[23],因此,本文选择 RHT 模型作为岩石本构模型。

如图6所示,RHT 模型引入了3个极限面(即破坏面、屈服极限面和残余强度面)来分别描述岩

石破坏强度、初始屈服强度和残余强度的变化规律。当应力超过屈服极限面时,材料经历了从弹性变形到塑性变形的过程;当应力达到破坏面时,材料损伤开始发展;当应力达到残余强度面时,材料完全损坏。在 RHT 模型中,材料的损伤程度 D_a 由塑性累积应变来描述。

$$D_a = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon^f}$$

(17)

式中 $\Delta \varepsilon^p$ 和 ε^f 分别为材料的塑性累积应变和破坏应变。因此, $D_a = 0$ 表示没有破坏,而 $D_a = 1$ 表示完全破坏。

文献[24]详细介绍了 RHT 模型参数的确定方法,本文中,岩石密度、弹性模量、抗压强度由实验室测试获得,基于上述 3 个基本参数,通过相关理论计算可确定 10 个材料参数,包括应变率指数、Hugoniot 多项式系数、多项式 EOS 参数、参考压缩应变率和参

考拉伸应变率等,其余参数取自文献[21]。

LS-DYNA 中,炸药采用 MAT_HIGH_BURN 高爆燃材料模拟;空气材料采用 MAT_NULL 材料模拟;封堵材料采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 模型模拟。上述材料的参数选取参考文献[25-26]。

本研究中岩石 RHT 模型参数和炸药模型参数分别见表 2 和表 3。

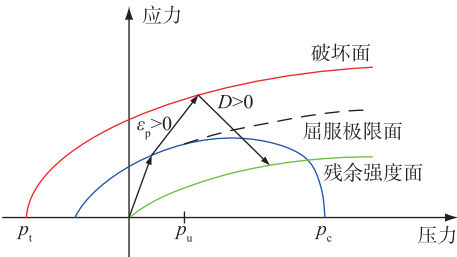


图 6 RHT 模型中的应力极限面

Fig. 6 Stress limit surfaces in the RHT model

表 2 RHT 模型参数的确定

Table 2 Determined parameters of RHT model

参数	取值	参数	取值
岩石密度/(kg·m ⁻³)	2 647	初始损伤参数 D1	0.04
弹性模量/GPa	30	最终损伤系数 D2	1.0
抗压强度/MPa	122	体积塑性应变分数	0.001
压缩应变率指数 β _c	0.010 4	失效拉伸应变率 ET	3.0×10 ²⁵
拉伸应变率指数 β _t	0.014 1	失效压缩应变率 EC	3.0×10 ²⁵
Hugoniot 多项式系数 A1/GPa	42.35	参考拉伸应变率 EOT	3.0×10 ⁻⁶
Hugoniot 多项式系数 A2/GPa	71.15	参考压缩应变率 EOC	3.0×10 ⁻⁵
Hugoniot 多项式系数 A3/GPa	43.48	孔隙率指数 NP	3.0
屈服强度/MPa	81	塑性应变 EPSF	2.0
破坏面参数 A	2.3	剪切模量缩减系数 XI	0.5
破坏面参数 N	0.71	初始孔隙率	1.0
拉伸强度比 FT*	0.04	孔隙完全压实时的压力 PC0/GPa	6.0
剪切强度比 FS*	0.38	最小失效应变 EPM	0.015
压缩屈服参数 GC*	0.40	多项式 EOS 参数 B0	1.68
拉伸屈服参数 GT*	0.70	多项式 EOS 参数 B1	1.68
残余面参数 Af	1.62	多项式 EOS 参数 T1	42.35
残余面参数 Nf	0.62	多项式 EOS 参数 T2	0
罗德角因子参数 Q0	0.68	罗德角因子参数 B	0.05

表 3 乳化炸药及 JWL 状态方程参数

Table 3 Parameters for the emulsion explosive and JWL equation of state

密度/ (kg·m ⁻³)	爆速/ (m·s ⁻¹)	PCJ/ GPa	A/ GPa	B/ GPa	R1	R2	ω	E/ GPa
1 150	3 600	9.7	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2.3 模拟结果分析

图 7 为多孔同时起爆条件下炸药起爆后不同时

刻下 Mises 等效应力云图及岩石损伤破坏云图。炸药起爆后在各炮孔起爆点处产生爆炸应力波 ($t = 500 \mu s$),并沿起爆方向正向传播,各炮孔所产生的爆炸应力波强度逐渐增加,同时在 2[#]和 3[#]炮孔中间位置出现爆炸应力波的叠加,此时各炮孔周围岩体的损伤程度和范围明显增加。当 $t = 1\,000 \mu s$ 时,3 个炮孔所产生的爆炸应力波进一步叠加,炮孔间中部岩石开始出现损伤,由于 2[#]和 3[#]炮孔底部间距较

小,其损伤程度和范围要明显大于1[#]和2[#]炮孔间岩石。当 $t = 2\,000\ \mu\text{s}$ 时,各炮孔间岩石开始出现严重损伤破坏,且随着爆炸时间的增加,岩石损伤程度和范围逐渐扩大,直至 $t = 4\,000\ \mu\text{s}$ 时,3[#]炮孔炸药传爆结束。在该过程中,随着炮孔间距的增加,爆炸应力波的叠加作用逐渐减弱,导致炮孔间中部区域岩石损伤发育程度逐渐降低。随后,爆炸应力波

开始逐渐衰减,岩石损伤区继续发育,直至 $t = 10\,000\ \mu\text{s}$ 时,爆炸应力衰减至较低水平,此时岩石损伤发育基本结束,最终形成的岩石损伤区分布如图7(e)所示。

从多孔同时起爆条件下爆炸应力波传播过程模拟结果来看,与前述所建立的理论模型求解结果近似一致,验证了模型的正确性。

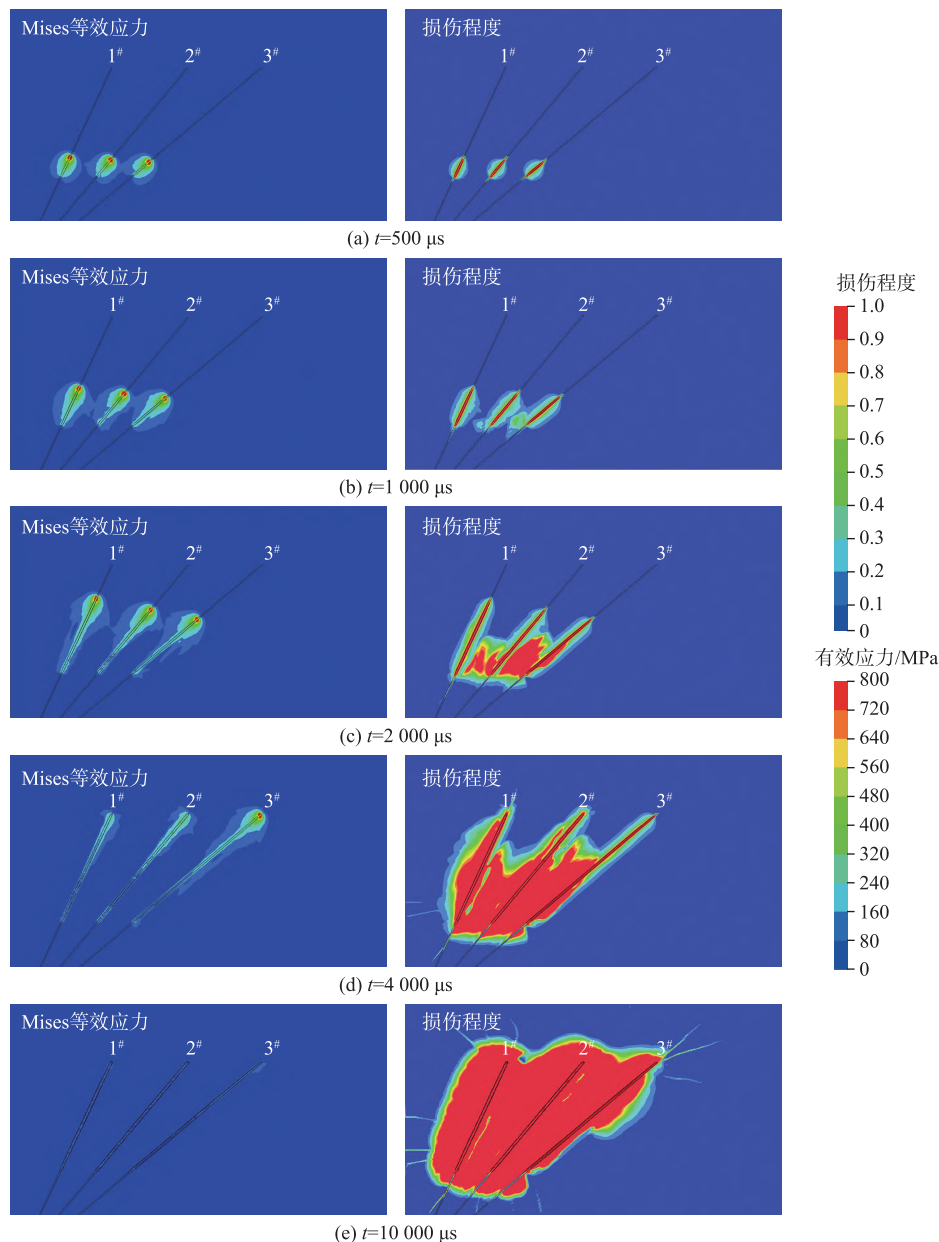


图7 同时起爆方案下不同时刻 Mises 等效应力云图及岩石损伤破坏云图 (方案1)

Fig. 7 Mises effective stress and rock damage under simultaneous initiation pattern (Case 1)

图8为多孔顺序起爆条件下岩石损伤破坏云图。当1[#]炮孔起爆后,该炮孔周围岩石发生损伤破坏,但范围相对有限;由于2[#]炮孔装药长度(装药量)大于1[#]炮孔,2[#]炮孔起爆后所诱发的岩石损伤范围和程度要显著高于1[#]炮孔,表明岩石损伤效果

随着单孔装药量增加而提高。1[#]和2[#]炮孔间的岩石出现严重损伤破坏,且主要集中在炮孔底部区域和1[#]炮孔爆炸后所诱发的初次损伤区域,说明2[#]炮孔爆炸对初次损伤区域造成累积损伤,促使岩石损伤区扩展,加剧了岩石损伤程度。此外,在2[#]和3[#]炮

孔间的岩石区域也形成了一定的损伤破坏,但其损伤程度明显低于 1[#]和 2[#]炮孔中间的岩石。

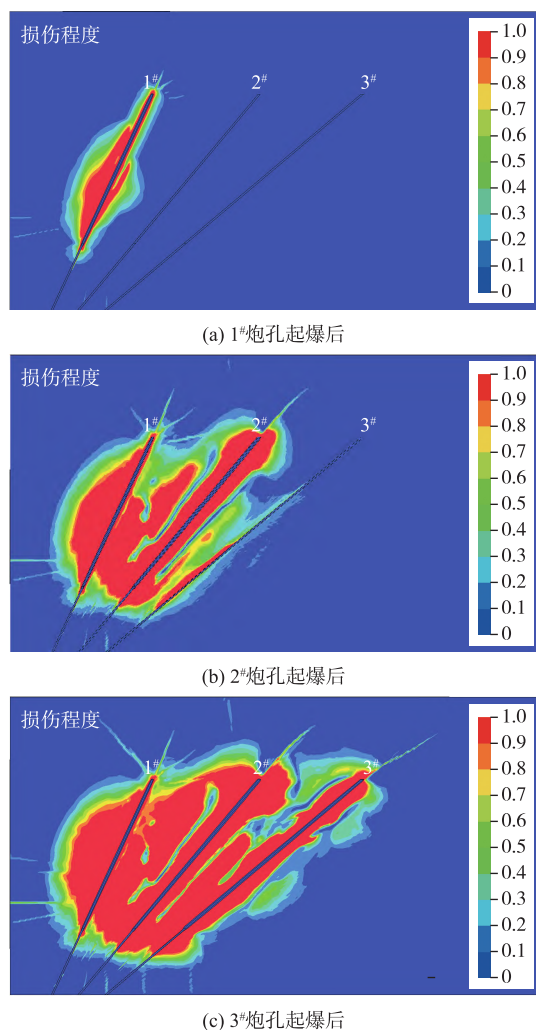


图 8 炮孔顺序起爆条件下岩石损伤破坏云图(方案 2)

Fig. 8 Rock damage nephogram under sequential initiation pattern in multi-hole blasting (Case 2)

二者之间的差别也验证了多孔爆破中顺序起爆对岩石产生的累积损伤作用。3[#]炮孔爆炸结束后,其所造成的岩石损伤破坏规律与前述分析基本一致,除在该炮孔周围岩石产生损伤破坏外,同样也在 2[#]和 3[#]炮孔下部中间区域产生严重累积损伤,而上部区域岩石损伤程度显著减小。对比方案 1 和方案 2 两种起爆方式下岩石损伤破坏终态,发现多孔同时起爆下岩石损伤破坏程度和范围均明显高于顺序起爆,同时起爆条件下各炮孔所激发的爆炸应力波会发生叠加,爆炸应力强度增加,对岩石的损伤破坏效应更强。

图 9 为 1[#]和 2[#]炮孔同时起爆后 3[#]炮孔单独起爆方式下岩石损伤破坏云图(方案 3)。由图 9 可知,1[#]和 2[#]炮孔周围的岩石发生严重损伤破坏,该区

域岩石损伤分布规律与方案 1 类似,而在 3[#]炮孔起爆后,2[#]和 3[#]炮孔间的岩石损伤破坏程度有所减弱,爆破损伤区主要集中在两炮孔周围的岩石。这说明 3[#]炮孔起爆后不仅导致本炮孔周围的岩石发生损伤破坏,还促使 2[#]炮孔初次损伤区域进一步扩展,加剧其损伤程度。

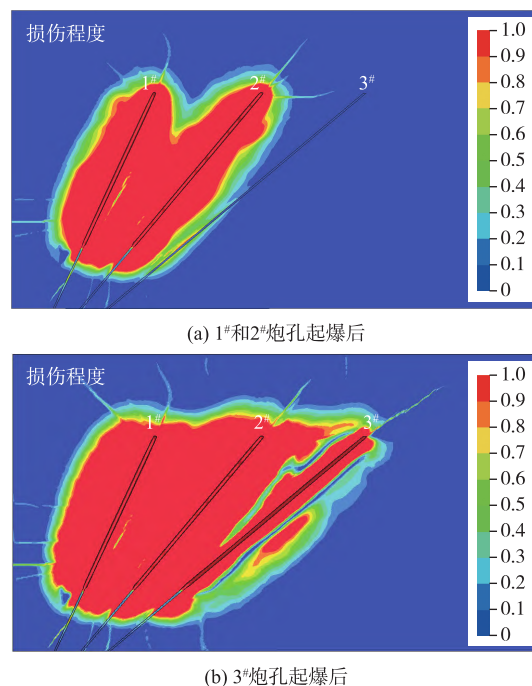


图 9 1[#]和 2[#]炮孔同时起爆后 3[#]炮孔单独起爆方式下岩石损伤破坏云图(方案 3)

Fig. 9 Rock damage nephogram under the pattern simultaneous initiation (1[#] and 2[#]) followed by individual initiation (3[#]) (Case 3)

上述 3 种模拟方案下岩石损伤破坏结果的差别表明起爆方式对爆炸应力波的传播和岩石损伤破坏有显著影响。在同时起爆条件下,各炮孔产生的爆炸应力波发生叠加效应,岩石承受的爆炸应力强度增加,岩石损伤破坏程度高。而顺序起爆方式下,岩石承受多轮爆炸应力波作用,岩石发生累积损伤。整体来看,方案 1 中多孔同时起爆条件下岩石损伤破坏程度最高,方案 3 中同时起爆和单独起爆相结合条件下的效果次之,而顺序起爆条件下岩石损伤破坏程度相对最小。因此,从深孔爆破防冲效果来看,多孔同时起爆方式能够实现对岩石更为充分均匀的破坏,且同时起爆的炮孔数量越多,防冲效果越好。

但正如前言所述,爆破震动对巷道围岩稳定性及瓦斯逸出的影响也是选择起爆方式必须考虑的因素。为分析不同起爆方式对爆破震动的影响,首先提取方案 1 爆破过程中不同位置处岩石质点 Z 方

向震动速度,结果如图10所示。

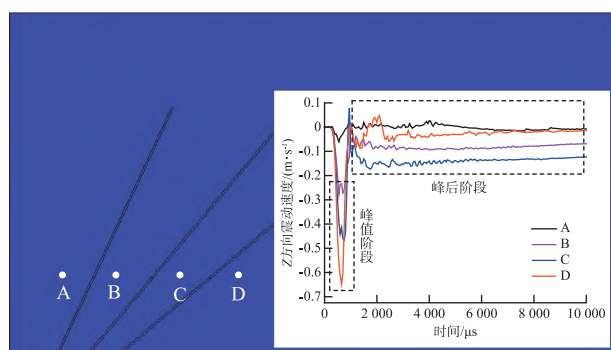


图10 不同位置处岩石质点Z方向震动速度(方案1)

Fig. 10 Z-velocity of rock at different positions during the blasting process of simulation case 1

由图10可以发现,炮孔间岩石与炮孔单侧岩石质点的震动速度差异较大,测点D处岩石的峰值震动速度最大,测点C和测点B次之,测点A最小。但在震动持续期间,各测点峰后阶段的震动速度并不同于前述规律,测点C处的峰后阶段震动速度整体高于测点B,测点D次之,测点A最小。这是因为炸药传爆和爆炸应力波传播过程中存在时间差,爆炸应力波会发生衰减,各炮孔产生的爆炸应力波峰值不会在同一时刻叠加,即爆破所引起的岩石质点震动速度的峰值由距离该质点最近距离的单个药包爆炸所决定,而爆炸应力波的叠加主要发生在震动峰后阶段。本文中炮孔倾斜布置,而爆炸应力波的传播方向与炮孔倾斜方向一致,测点D位于炮孔倾斜方向的内侧,距离炮孔柱状药包距离最近,而测点A位于炮孔倾斜方向外侧,距离最远,故测点D处的峰值震动速度最大。相较于炮孔单侧测点A和D,测点B和C位于各炮孔中间区域,受到的爆炸应力波叠加作用更为强烈,衰减相对缓慢,其峰后震动速度整体水平相对较高。

图11为3种起爆方式下测点E和F在Z方向的震动速度分布。由图11可以看出,测点E处的震动速度曲线在750 μs之前完全重合,该测点与1#炮孔距离最近,震动峰值速度受1#炮孔产生的爆炸应力波传播影响。在峰后阶段,岩石震动速度分布出现显著差异,方案2中震动速度值明显小于方案1和方案3,这是因为方案2为1#炮孔单独起爆,爆炸应力波不会出现叠加,而方案1和方案3为多孔同时起爆,爆炸应力波的叠加造成岩石震动强度增强。事实上,方案1中的震动速度整体上略高于方案3,说明同时起爆孔数量的增加对震动强度有增强效应。在测点F处也观察到类似的震动变化规

律。综合分析可知,在同时起爆方式下,测点E和F处的岩石震动峰值速度并没有提高,但在震动持续时间内,震动峰后阶段的震动强度明显增强,即爆破震动对巷道围岩的扰动效应更加强烈,采用顺序起爆方式可以在一定程度上减弱爆破震动的影响。

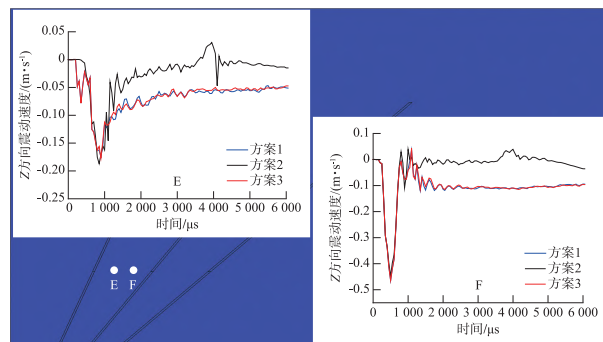


图11 3种起爆方式下爆破过程中测点E和F处Z方向震动速度

Fig. 11 Z-velocity of rock at the points E and F during the blasting process under three kinds of initiation patterns

分析起爆方式对岩石爆破损伤效果和爆破震动的影响规律,发现岩石爆破损伤效果与爆破震动强度呈正相关关系。因此,在设计顶板深孔爆破起爆方式时,在保证爆破震动所产生的动力扰动处于安全范围的前提下,应尽可能采用同时起爆的方式提高岩石爆破损伤效果。

3 多孔柱状装药不同起爆方式爆破工程试验

新疆某矿开采3-3煤层,煤层上方赋存厚硬砂岩组,其中基本顶为砂砾岩,单层厚度为25.03 m,单轴抗压强度超过120 MPa。该煤层自开采以来,采掘区域曾多次发生冲击显现和强矿震事件,分析认为煤层上方的厚层坚硬顶板是诱发该矿冲击地压的关键因素。因此,在工作面开采过程中,对该砂砾岩层实施顶板深孔爆破以降低冲击风险。顶板爆破孔布置方案如图12所示,每组扇形炮孔均由4个倾斜炮孔组成。

该矿顶板深孔爆破工程量大,选择合适的起爆方式对于保障防冲效果、控制爆破扰动和提高施工效率至关重要。为此,在该矿W1103工作面开展5种爆破方案下的工程试验,具体参数见表4。其中,方案1和方案2均采用单孔爆破,炮孔长度分别为35和98 m,装药量分别为132和240 kg;方案3为双孔同时起爆,炮孔长度分别为35和39 m,总装药量为282 kg;方案4为三孔同时起爆,总装药量为492 kg;方案5为四孔同时起爆,总装药量为732 kg。

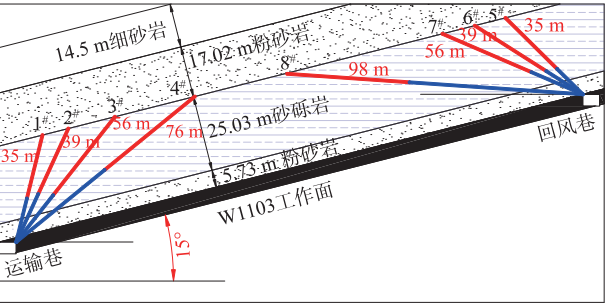


图 12 顶板爆破孔布置方案

Fig. 12 Layout scheme of roof blasting hole

表 4 爆破孔参数及装药参数

Table 4 Parameters of blastholes and explosives

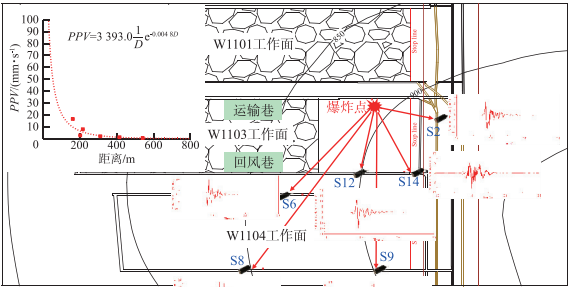
方案	位置	起爆孔数量/ 个	炮孔长度/ m	装药量/ kg	总药量/ kg
1	运输巷	1	35	132	132
2	回风巷	1	98	240	240
3	回风巷	2	39	150	282
			35	132	
4	运输巷	3	39	150	492
			56	210	
			35	132	
5	回风巷	4	39	150	732
			56	210	
			98	240	

该矿配备了微震监测系统用于监测各种生产活动所诱发的矿山震动,该系统能够记录震动过程和计算相关震源参数。图 13 (a)~(e)为 5 种爆破参数下微震监测系统各传感器接收到的爆破震动波形及峰值震动速度 (PPV) 与传播距离之间的关系。峰值震动速度随着传播距离的增加呈非线性衰减,可通过式 (18) 进行拟合:

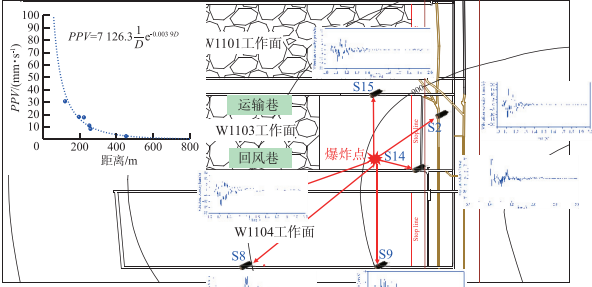
$$PPV_i = C \frac{1}{D_i} e^{-\alpha D_i} \quad (18)$$

式中: C 和 α 为常数; D_i 为传播距离。

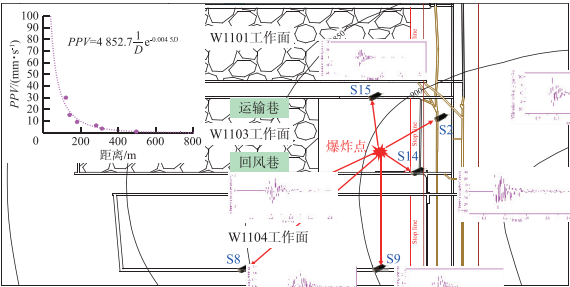
由图 13(f) 可知,方案 2 爆破诱发的峰值震动速度整体大于方案 1,而方案 2 中炮孔装药量比方案 1 多 108 kg,说明装药量增加会导致峰值震动速度增加。在方案 3 中,两个炮孔的装药量分别为 132 和 150 kg,其所诱发的峰值震动速度总体高于方案 1 和 2,说明在多孔爆破中,特别是炮孔间距较小时,爆炸应力波的叠加会导致震动增强。同样,方案 3 和方案 4 的对比结果也表明峰值震动速度随着炮孔数量和总装药量的增加呈增加趋势。但方案 5 与方案 4 的峰值震动速度衰减曲线基本重合,无明显差异,可能是 98 m 炮孔装药段距离其他炮孔装药段较远,故其爆炸产生的应力波对震动叠加效应贡献较小。



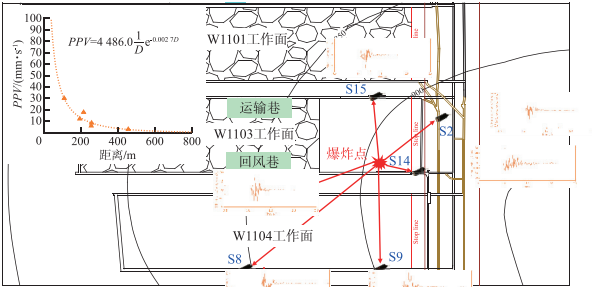
(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3



(d) 方案4

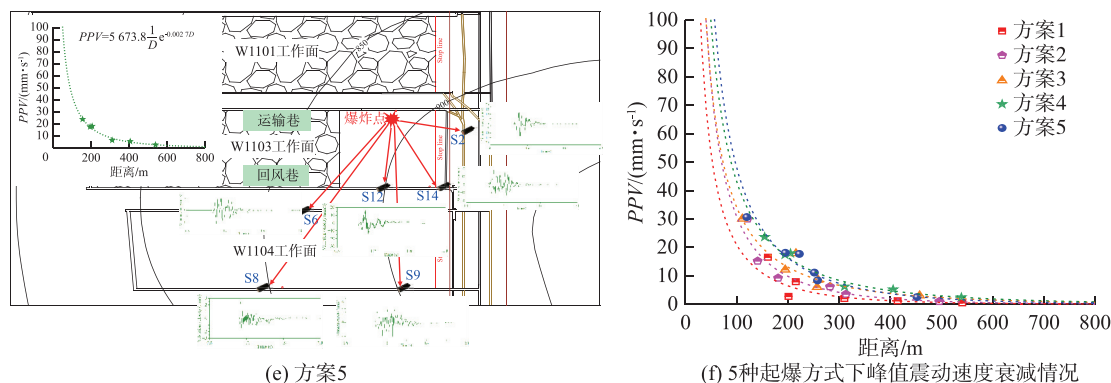


图13 不同起爆方式下爆破震动波形及峰值震动速度随传播距离的衰减情况

Fig. 13 Blasting seismic waveform and attenuation of peak velocity with distance in five cases

数值模拟结果表明多孔同时起爆对爆破震动峰后阶段的震动速度也有增强效应,为进一步量化爆破震动强度,基于爆破震动全波形,计算其震源能量,公式^[27]如下:

$$E = 4\pi r^2 \rho c \int_{t_1}^{t_2} v^2 dt \quad (19)$$

式中: r 为传播距离, m ; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; c 为传播速度, m/s ; v 为震动速度, m/s ; t_1 和 t_2 分别为震动开始和结束时间, s 。

5种爆破方案下爆破诱发的微震震源能量计算结果分别为 3.1×10^4 、 1.9×10^5 、 3.5×10^5 、 7.7×10^5 和 1.1×10^6 J,说明震源能量随着起爆炮孔数量和装药量的增加而增加,爆破震动对巷道围岩的扰动程度逐渐增加。

Cai^[28]提出通过建立煤矿井下微震事件的古登堡-里希特频率震级关系来确定微震能量临界安全值。在W1103工作面开采过程中,共收集到26705次采动诱发微震事件,其古登堡-里希特频率震级关系如图14所示。

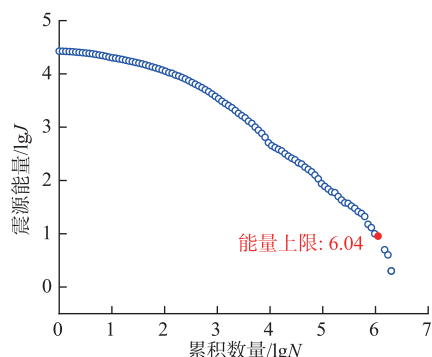


图14 W1103工作面采动微震古登堡-里希特频率震级关系

Fig. 14 Gutenberg-Richter frequency-magnitude relationship of mining-induced seismic events during the mining of W1103 working face

由图14可知,采动微震震源能量上限为 $1 \times 10^{6.04}$ J,可将其视为临界安全值。根据前述计算,方案4(3个炮孔同时起爆)所诱发的微震震源能量为 7.7×10^5 J,处于安全范围。方案5(4个炮孔同时起爆)所诱发的微震震源能量可达到 1.1×10^6 J,接近临界安全值。

现场实践表明,采用方案5时,巷道肩角煤体位置出现局部破坏,强烈震动诱发煤体瓦斯突然逸出,造成巷道瓦斯浓度瞬间增加。方案4和方案5爆破前后巷道瓦斯浓度变化如图15所示,其中,方案5的爆破震动诱发巷道瓦斯浓度瞬间增加至1.3%,超过预警值1.0%。

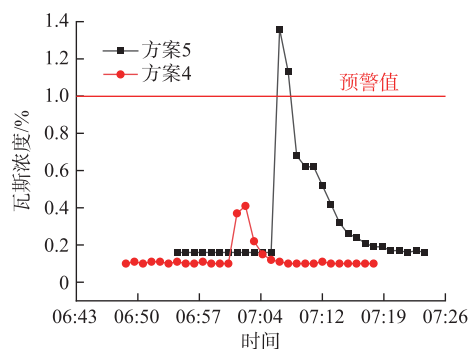


图15 方案4和方案5爆破前后巷道瓦斯浓度变化

Fig. 15 Changes of gas concentration in roadway under blasting schemes 4 and 5

因此,综合考虑爆破防冲效果、爆破震动控制和施工效率,决定采用35、39和56 m的3个炮孔同时起爆、98 m炮孔单独起爆的起爆方式,该方案能够最大程度保证防冲效果,将爆破震动强度控制在安全范围内,同时提高爆破效率。

4 结论

1) 建立了多孔柱状装药同时起爆条件下爆炸

应力传播叠加力学模型,该模型能够兼顾柱状装药爆破正向传播叠加作用及多炮孔爆破产生的应力波传播叠加作用。以某具体爆破条件为例求解得到多孔同时起爆条件下激发的爆炸应力波传播叠加及衰减全过程。建立了多孔柱状装药顺序起爆条件下岩石累积损伤模型,阐释了岩石在多轮爆破应力波作用下累积损伤发生机制。

2) 利用 LS-DYNA 软件模拟了 3 种起爆方式下岩石损伤破坏效应和爆破震动效应。同时起爆方式下,各炮孔起爆后所产生的爆炸应力波在传播过程中会相互叠加,其对岩石介质的损伤破坏作用及所诱发的震动效应均得到提高;采用顺序起爆时,炮孔周围的岩石将承受多轮爆炸应力波的加载作用,造成岩石累积损伤破坏,损伤破坏区在每轮爆破后发生进一步扩展发育。从岩石损伤破坏终态及所诱发的震动效应来看,相较于多孔顺序起爆,同时起爆方式下岩石爆破损伤破坏程度更高,范围更广,诱发的震动强度也越高,对围岩扰动程度更大。

3) 在新疆某矿开展了 5 种爆破方案下顶板深孔爆破工程试验,并对爆破所诱发的煤岩体震动响应特征进行了监测分析。随着起爆炮孔数量和装药量的增加,爆破所诱发的煤岩体震动强度逐渐增强;一组扇形孔(4 个炮孔)同时起爆所诱发的爆破微震震源能量达到 1.1×10^6 J,接近临界安全值,强烈震动容易造成巷道局部破坏损伤和瓦斯浓度超限。综合考虑爆破防冲效果、爆破震动控制和施工效率,确定该矿顶板深孔爆破起爆方式为 35,39 和 56 m 的 3 个炮孔同时起爆,而 98 m 炮孔单独起爆。

参考文献:

- [1] 潘一山,宋义敏,刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081-2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081-2095.
- [2] 窦林名,田鑫元,曹安业,等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [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(增刊 1): 3522-3527.
QI Qingxin, LEI Yi, LI Hongyan, et al. Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup 1): 3522-3527.
- [4] 窦林名,阚吉亮,李许伟,等. 断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 24-32.
DOU Linming, KAN Jiliang, LI Xuwei, et al. Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 24-32.
- [5] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破力构协同防冲机理及工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3419-3432.
ZHAO Shankun. Mechanism and application of force-structure cooperative prevention and control on rockburst with deep hole roof pre-blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3419-3432.
- [6] 解嘉豪,韩刚,孙凯,等. 邻空巷坚硬顶板预裂爆破防冲机理及效果检验[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2078-2091.
XIE Jiahao, HAN Gang, SUN Kai, et al. Rockburst prevention mechanism and effect test of blast presplitting of hard roof in gob-side roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2078-2091.
- [7] 周坤友,窦林名,曹安业,等. 矿震诱发高应力巷道厚顶煤动力失稳机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 25-35.
ZHOU Kunyou, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanisms behind mine earthquake-induced dynamic instability of thick top coals in high-stresses roadways[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 25-35.
- [8] 刘少虹,冯美华,潘俊锋,等. 卸压爆破下强冲击危险巷道围岩振动规律试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 906-918.
LIU Shaohong, FENG Meihua, PAN Junfeng, et al. Experimental analysis on vibration of roadway with strong probability of rockburst subjected to pressure relief blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 906-918.
- [9] ZUO J P, LI Z D, ZHAO S K, et al. A study of fractal deep-hole blasting and its induced stress behavior of hard roof strata in Bayangaole Coal Mine, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 9504101.
- [10] 宋彦琦,李向上,郭德勇. 多孔同段聚能爆破煤层增透数值模拟及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增刊 2): 469-474.
SONG Yanqi, LI Xiangshang, GUO Deyong. Numerical simulation of multi-hole and same delay time of cumulative blasting in coal seam and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Sup 2): 469-474.

- [11] CHEN S H, WU J, ZHANG Z H. Influence of millisecond time, charge length and detonation velocity on blasting vibration[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4787-4796.
- [12] KAN J L, DOU L M, LI X W, et al. Study on influencing factors and prediction of peak particle velocity induced by roof pre-split blasting in underground[J]. Underground Space, 2022, 7(6): 1068-1085.
- [13] 郝琪, 曹安业, 王常彬, 等. 硬厚致灾岩层预裂爆破防冲参数优化及工程实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 481-492.
- HAO Qi, CAO Anye, WANG Changbin, et al. Optimisation of anti-impact parameters and engineering practice of pre-split blasting for hard-thick disastrous rock strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 481-492.
- [14] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 771-784.
- [15] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(6): 966-975.
- [16] 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 Jun. Calculation of radius 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.
- [17] KAN J L, DOU L M, LI X W, et al. Investigating the destressing mechanism of roof deep-hole blasting for mitigating rock bursts in underground coal mines[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2022, 13(1): 2508-2534.
- [18] 陈士海, 李玉民, 林从谋, 等. 条形装药硐室爆破研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(4): 363-373.
- CHEN Shihai, LI Yumin, LIN Congmou, et al. Study on twig charge cavern blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(4): 363-373.
- [19] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 735-739.
- WU Liang, LU Wenbo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 735-739.
- [20] HOEK E, MARINOS P G, MARINOS V P. Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 277-285.
- [21] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.
- [22] PAN C, XIE L X, LI X, et al. Numerical investigation of effect of eccentric decoupled charge structure on blasting-induced rock damage[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 663-679.
- [23] WANG Z L, NI Y, WANG J G, et al. Improvement and performance analysis of constitutive model for rock blasting damage simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2025, 138: 103043.
- [24] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- [25] 孙从煌, 曲艳东, 孔祥清, 等. 岩石介质中双孔爆破效应的数值模拟研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 37-45, 130.
- SUN Conghuang, QU Yandong, KONG Xiangqing, et al. Numerical simulation of explosion effects of double-hole blasting in rock medium[J]. Blasting, 2017, 34(3): 37-45, 130.
- [26] 阚吉亮. 顶板深孔爆破震动释能与结构调控防冲机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [27] SANCHIDRIÁN J A, SEGARRA P, LOPEZ L M. Energy components in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 130-147.
- [28] CAI W. Laboratory-scale insight into fractal dimension indicators for seismic hazard assessment associated with rock failures[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 7600449.