



松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用

高魁 王秘 乔国栋 田宇 傅师贵 王有为

引用本文：

高魁, 王秘, 乔国栋, 等. 松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 102–110.
GAO Kui, WANG Mi, QIAO Guodong. Simulation test research and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 102–110.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-0914>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究

Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 89–100 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1622>

柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究

Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 129–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0714>

水力冲孔压裂卸压增透采瓦斯技术研究

Research on gas extraction technology:hydraulic stamping and hydrofracture to pressure relief and permeability improvement
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/62e6392e-04d4-4beb-b8b3-fa0a487156e6>

冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采的影响规律研究

Study on influence laws of coal flushing rate on coal seam stress relief and gas extraction
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 102–109 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f956c730-5ac6-4139-a95a-2c7f30678e31>

水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究

Study on hydraulic fracturing-deep hole pre-splitting blasting composite permeability enhancement technology
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e5c672f8-9e94-41d6-984d-e4ea8f766a54>

液态CO₂煤层增透技术及应用研究

Research and application of anti-reflection technology of liquid CO₂ coal seam
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 107–114 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/382e8724-6e30-4d74-a127-ec810b67ae99>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



高魁, 王秘, 乔国栋, 等. 松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 102–110.

GAO Kui, WANG Mi, QIAO Guodong, et al. Simulation test research and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 102–110.

移动扫码阅读

松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用

高魁^{1,2}, 王秘¹, 乔国栋¹, 田宇¹, 傅师贵¹, 王有为¹

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232000)

摘要: 针对松软煤层爆破增透钻孔施工困难, 爆破增透产生的裂隙不发育且易于重新压实的问题, 提出在底板岩层开展爆破作业, 达到松软煤层增透进而增加瓦斯有效抽采时间的目的。为了监测跨界面应力波传播规律及煤层损伤状况, 在实验室构建了物理模型并开展了煤层底板爆破相似模拟试验。同时使用数值模拟的研究方法对煤层底板爆破过程中煤、岩体内部的损伤及裂隙的演化过程进行补充。结果表明: 松软煤层底板爆破裂纹沿爆破孔向四周岩体扩展, 爆破孔位置和底板煤岩交界面以及煤层内部的破坏较为严重, 产生跨界面损伤裂纹。爆炸应力波从松软煤层底板岩层传播到松软煤层时, 岩体和松软煤体的交界面产生透射压缩应力波和反射拉伸应力波, 透射波作用于松软煤体, 使煤层裂隙增加; 反射波反作用于岩体, 在煤岩交界面形成交叉裂纹, 使底板岩层裂隙和松软煤层裂隙贯通, 有利于松软煤层的瓦斯垂向运移流动和卸压瓦斯抽采。潘一东煤矿现场应用表明, 煤层底板爆破增透后瓦斯抽采纯量及其浓度快速上升, 抽采纯量从 $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高到 $1.46 \text{ m}^3/\text{min}$, 增加了 23.33 倍; 瓦斯浓度从爆破前的 10.46% 上升到 45.50% 左右, 增加了 3.34 倍, 并且长时间维持在较高水平。研究成果可为深部松软煤层瓦斯高效抽采提供理论基础和技术支持。

关键词: 松软煤层; 爆破增透; 裂隙演化; 爆炸应力波; 卸压瓦斯抽采

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)06-0102-09

Simulation test research and application of blasting and penetration improvement in the soft coal seam floor

GAO Kui^{1,2}, WANG Mi¹, QIAO Guodong¹, TIAN Yu¹, FU Shigui¹, WANG Youwei¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan 232000, China)

Abstract: Aimed at the problems of difficult drilling construction of blast penetration, undeveloped fractures produced by blast penetration, and the fractures is easy to recompact in the soft coal seam, the blasting operations carried out in the floor was proposed to achieve the purpose of increasing the penetration of soft coal seams and thus improve the effectiveness of gas extraction. In order to monitor the cross-interface stress wave propagation pattern and the damage state of the coal seam, a physical model was constructed in the laboratory and a similar simulation test of coal seam floor blasting was carried out. Concurrently, the numerical simulation research method was employed to supplement the evolution of damage and fractures within the coal and rock during the blasting process of the coal seam floor. The results shown that, the blast cracks expanded along the blast hole to the surrounding rock mass in soft coal seam floor, causing more serious damage at the location of blast hole, the coal-rock interface of the floor, and within the coal seam, producing cross-interfacial damage cracks. When the explosive stress wave propagated from the soft coal seam base rock layer to the soft coal seam, the interface between the rock and the soft coal generated transmitted compressive stress wave and reflected tensile stress wave. Transmission waves acted on the soft coal to increase the fractures in the coal seam. Meanwhile, the reflected waves reacted on the rock, forming cross-cracks in the coal-

收稿日期: 2023-06-24 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2023-0914

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374179); 安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME125); 安徽省高校优秀青年人才支持计划资助项目(gxyq2022016)

作者简介: 高魁(1984—), 男, 安徽阜南人, 教授, 博士。E-mail: kgao@aust.edu.cn

通讯作者: 王秘(2000—), 女, 安徽石台人, 硕士研究生。E-mail: 3327755161@qq.com

rock interface, making the fractures of the rock floor and the soft coal seam penetrated, which was conducive to the vertical transport flow of gas in the soft coal seam and the extraction of pressure-relief gas. Field application at Pan Yidong coal mine shown that, the pure volume of gas extraction and its concentration increased rapidly after blasting the coal seam floor to improve the penetration. The pure volume of gas extraction increased from $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ to $1.46 \text{ m}^3/\text{min}$, an increase of 23.33 times. Gas concentration surged from 10.46% before blasting to approximately 45.5%, an increase of 3.34 times, and remained at a high level for a long time. The research results can provide theoretical basis and technical support for efficient gas extraction from deep soft coal seams.

Key words: soft coal seam; penetration improvement by blasting; fracture evolution; explosion stress wave; pressure-relief gas extraction

0 引言

随着浅部资源枯竭,我国多数矿井已进入深部开采^[1-2]。深部矿井地应力增大,瓦斯矿井逐渐升级为高瓦斯、煤与瓦斯突出矿井,松软低透气性煤层矿井开采比例越来越大。针对深部松软煤层开采,煤层裂隙不发育,透气性普遍较低,大量瓦斯难以抽采,瓦斯压力、原始瓦斯含量难以降到安全值范围内,受采掘扰动影响容易发生瓦斯事故,瓦斯动力灾害的复杂性、危险性和防治难度增大^[3]。2010年以来,煤与瓦斯突出事故死亡人数总体下降,但所占煤矿灾害比例依然没有降低^[4]。钻孔瓦斯抽采是煤矿井下瓦斯灾害防治的重要举措之一^[5-7],针对高瓦斯煤层开采,国内外学者提出了煤层强化增透技术,如水力压裂、CO₂致裂和深孔爆破等^[8-9]。深孔预裂爆破技术由于适应范围广和造缝效果明显,国内外学者在该领域开展了卓有成效的研究工作,取得了丰硕的研究成果,在国内多个高瓦斯矿区得到应用^[10]。综合国内外专家对爆破作用机理的研究表明煤层的破坏是由爆炸应力波、爆生气体和瓦斯共同作用的结果。其中,应力波的压缩作用在煤体中形成粉碎区,而应力波的拉伸作用和爆炸生产气体的静力作用在煤体中形成裂隙区,瓦斯压力的存在有利于爆生气裂纹的扩展。一些学者研究发现聚能爆破通过特殊的装药结构提高了特定方向上爆炸的破坏作用,利用深孔聚能爆破进行卸压增透可以有效提高煤层的透气性与瓦斯抽采率,如郭德勇等^[11-13]利用聚能爆破定向致裂煤体,通过在现场进行定向聚能爆破煤层增透试验,达到了增加煤体的裂纹和维持围岩稳定的效果。夏彬伟等^[14]针对爆生裂缝无序扩展至顶底板引发顶底板失稳破断的技术难题,提出了缝槽水压爆破技术,试验分析了缝槽水压爆破裂缝特征及应力演化规律。低透气性煤层采用聚能爆破增透技术后,瓦斯抽采初期浓度高、流量大,抽采纯量在短时间内可以达到原始状态的几十倍到几百倍,极大提高了瓦斯抽采效率。

目前,瓦斯与煤炭协调开发的技术体系基本形成。但是,复杂的资源禀赋条件使得我国煤矿瓦斯抽采仍然面临“抽采难度大、抽采效率低、抽采集中度低”等困难^[15]。对于松软低透气性煤层爆破增透,由于爆生裂隙粗短并且很快被压实而失去导流能力,导致煤层瓦斯高效抽采的衰减速度较快,爆破增透后的瓦斯高效抽采期非常短。同时,钻孔在软煤中钻进过程中容易发生钻孔坍塌、埋钻。深部开采所带来的瓦斯防治的新问题没能解决,田坤云等^[16]考察了水力挠动措施对软煤及砂岩的卸压增透效果,龚敏等^[17]将爆破增透钻孔布置在煤巷底板岩石中以提高瓦斯抽采率,为深部松软煤层卸压增透提供了一条新的思路。为方便增透钻孔施工,将钻孔布置在底板岩层,可解决松软煤层钻孔不稳定和爆生裂隙短期容易被压实的问题,从而提高爆生裂隙的长效导流能力。从卸压增透机理方面考虑,爆破致裂坚硬底板和松软煤体是煤层卸压增透的前提,爆生裂隙的网络形态是决定增透效果的关键。因此,针对深部松软低渗煤层开采,研究松软煤层底板爆破载荷作用下,岩体和松软煤体的损伤演化与煤岩交界面裂隙扩展规律,可为松软低渗煤层瓦斯长时效抽采提供坚实的理论基础和技术支持。

1 松软煤层底板爆破模拟试验

1.1 试验系统

在相似模拟试验中,模型与原型应力、密度和长度均要满足比尺因数关系。在本文中 Froude 比例法被用于比尺因数关系的求取^[18-19]。试验模型尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,如图 1 所示,煤层厚度 8 cm。模型爆破孔布置在松软煤层底板位置,距离煤层下端 8 cm。

试验采用应变砖监测爆破过程中的应变数据变化规律,在爆破孔水平方向上,距离爆破孔右侧 3 cm 和 7 cm 的位置分别布置 1 号和 2 号应变测点;垂直方向上,距离爆破孔正上方 3 cm 和 7 cm 的位置分别布置 3 号和 4 号应变测点。

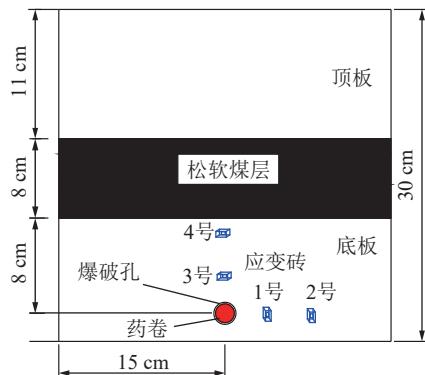


图 1 试验模型和数据测点布置

Fig.1 Experimental model and data measurement layout

试验原型取自淮南矿区 11-2 煤层, 原型煤岩力学参数见表 1, 试验模型的材料配比参数见表 2。

表 1 原岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of prototype coal and rock

岩性	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa
泥岩	2.4	13.8	0.23	21.8	1.3
11-2煤	1.4	2.97	0.32	5.46	0.4

表 2 模拟试验材料质量配比

Table 2 Ratio parameters of materials in blasting tests kg

岩性	砂子	水泥	石膏	水	煤粉
岩层	6.1	1.2	0.5	0.70	0
煤层	2.5	0.2	1.2	0.65	1.8

爆破模拟试验装置如图 2 所示, 箱体内部尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm, 箱体前后两侧为可拆卸钢板。

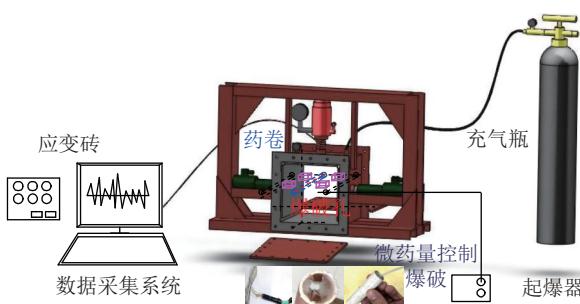


图 2 爆破模拟试验装置

Fig.2 Simulation test device of blasting

试验使用 LK2109A(B) 型超动态应变仪对爆破过程的应变数据进行实时采集, 如图 3 所示。

试验药卷使用长度为 16 mm, 直径为 2 cm, 厚度



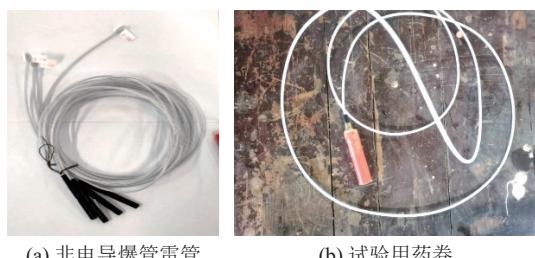
(a) 应变片

(b) 数据采集仪

图 3 应变数据监测装置

Fig.3 Test data monitoring system

为 1 mm 的 PVC 管制作, 在 PVC 管内填充二级煤矿许用水胶炸药, 放置一根长度与管体相等的特制传爆体, 制作完成的爆破药卷如图 4 所示。



(a) 非电导爆管雷管

(b) 试验用药卷

图 4 试验爆破药卷制作

Fig.4 Test blasting cartridge making

1.2 试验模型内部损伤监测

超声波声速的大小能间接反映煤岩体内部损伤破坏情况, 如果煤岩内部有损伤缺陷, 当超声波在煤岩内部裂隙中进行传播时, 声速将会降低。松软煤层底板爆破致裂增透主要关注爆破动载荷对煤层产生的破坏作用, 所以只对煤层中裂隙演化进行分析。

选择试验模型中的松软煤层平面进行超声波检测, 该平面位于距试验模型底部 15 cm(位于煤层中间)位置。通过超声波数据反演爆破前后煤层内部裂隙发育情况, 如图 5 所示。

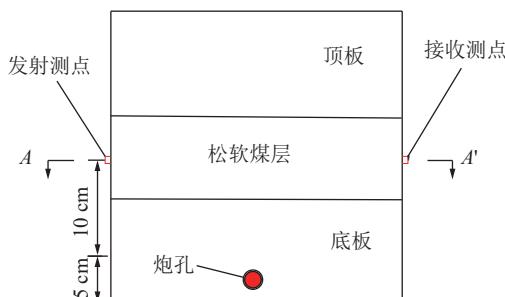


图 5 超声波检测图

Fig.5 Ultrasonic testing diagram

将试验模型侧面的超声波发射测点依次编号 1 ~ 6, 对应的接收测点依次编号为 1' ~ 6', 测点布置如图 6 所示。

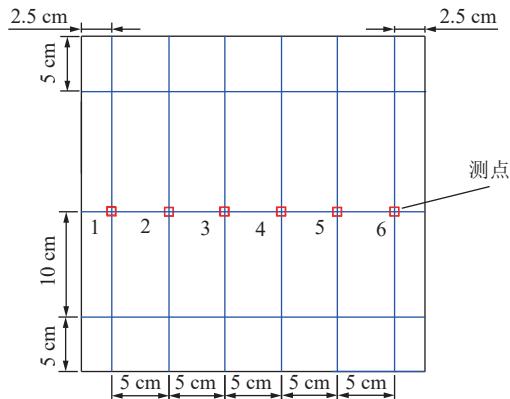


图 6 超声波发射测点布置

Fig.6 Launch measuring point layout

测点 1 为发射测点, 向其他 6 个接收测点发射射线时, 1'~6' 的接收测点都会接收到来自发射测点 1 的超声波信号, 6 个发射测点会在煤层平面产生 36 条超声波射线, 如图 7 所示。

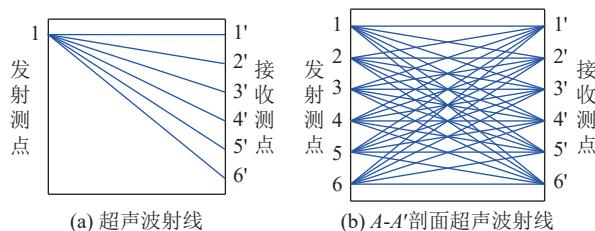


图 7 超声波射线图

Fig.7 Ultrasound radiograph

试验使用 HC-U81 超声波检测仪对松软煤层的破坏情况进行检测, 仪器如图 8 所示。



图 8 超声波检测仪

Fig.8 Ultrasonic testing

1.3 试验过程

先制作尺寸为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的木质箱体, 然后在木质箱体内铺设试验模型。制作时按照试验方案中设计的尺寸在木质箱体内逐层铺设, 并在相应的位置用 PVC 管预留爆破孔, 同时埋设应变片。模型制作完成后抽出 PVC 管, 将试样在室温下风干养护 1 个月备用, 如图 9 所示。

模型风干后, 用超声波检测仪检测爆破前试验

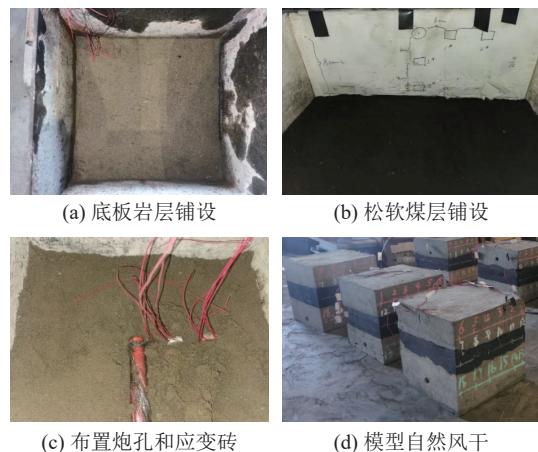


图 9 模型制作过程

Fig.9 Model production process

模型的超声波数据。然后将模型移入试验装置, 装入爆破药卷, 用炮泥塞入炮孔并捣实, 完成封孔操作, 如图 10a 所示。保持预定的载荷对试验模型进行应力加载, 如图 10b 所示。



图 10 封孔和应力加载

Fig.10 Sealing and stress loading

最后, 把雷管引爆线拉至安全区域连接起爆器进行起爆, 如图 11 所示, 并于爆破开始前进行应变数据采集。试验结束后, 将模型从试验箱体内缓慢取出进行爆破后的超声波检测。



图 11 爆破模拟试验引爆装置

Fig.11 Detonating device

1.4 试验结果分析

1) 爆破裂隙扩展和应变数据分析。炸药在试验模型底板岩体爆破后, 瞬间产生爆炸冲击波和高压爆生气体作用于底板炮孔周围岩体产生初始径向裂

隙。随后爆生气体楔入径向裂隙产生爆破粉碎圈，爆破裂纹在爆破孔附近呈放射状扩展分布。爆炸冲击波和高压爆生气体促使爆破裂纹沿爆破孔向四周扩展，裂纹从底板岩体扩展到松软煤层时，在煤岩交界面产生跨界面的裂纹，裂纹一直蔓延到松软煤体中并呈现出交错扩展的形式，在松软煤层中产生了细小交叉贯通的裂纹，如图12所示。

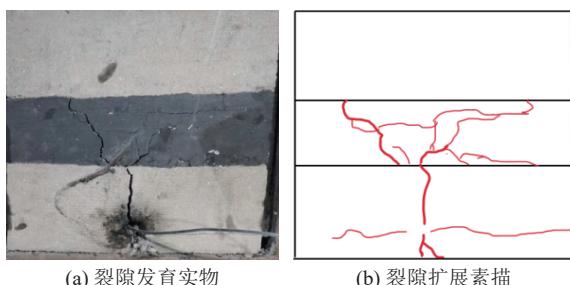
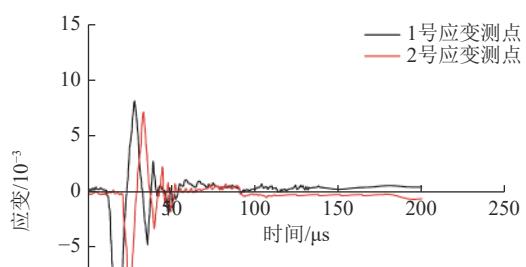


图12 煤层底板岩层爆破裂纹发育

Fig.12 Development of blasting cracks in coal seam floor rock layers

爆炸冲击波在试验模型中传播，产生的爆炸压缩荷载作用于岩体后会在其反方向形成拉伸卸载波，压缩波和卸载波对应于应变曲线的不同方向变化^[20]，如图13所示。从图中可以看到1号测点的第1次压应变和拉应变峰值为 $-13\ 316 \times 10^{-6}$ 和 $8\ 182 \times 10^{-6}$ ，2号测点第1次压应变和拉应变峰值为 $-10\ 035 \times 10^{-6}$



(a) 1号、2号应变测点

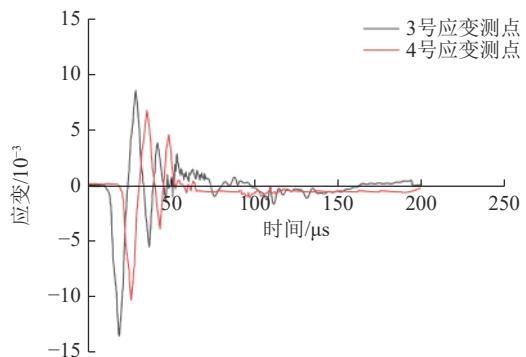


图13 试验模型应变

Fig.13 Strain data of blasting test model

和 $7\ 201 \times 10^{-6}$ ；3号测点的第1次压应变和拉应变峰值分别为 $-13\ 447 \times 10^{-6}$ 和 $8\ 550 \times 10^{-6}$ ，4号测点的第1次压应变和拉应变峰值分别为 $-10\ 244 \times 10^{-6}$ 和 $6\ 751 \times 10^{-6}$ 。

当爆炸应力波从底板岩体传播到上覆松软煤层时，由于煤岩交界面爆炸应力波的透射和反射，3号和4号应变测点出现了多次应力峰值。

2) 超声波CT检测结果分析。根据超声波检测仪采集的超声波数据进行反演成像，如果爆破前后超声波平均波速的衰减程度越大，说明试验模型受到爆破载荷损伤越大，煤岩体的破坏就越严重。试验模型松软煤层断面超声成像如图14所示。

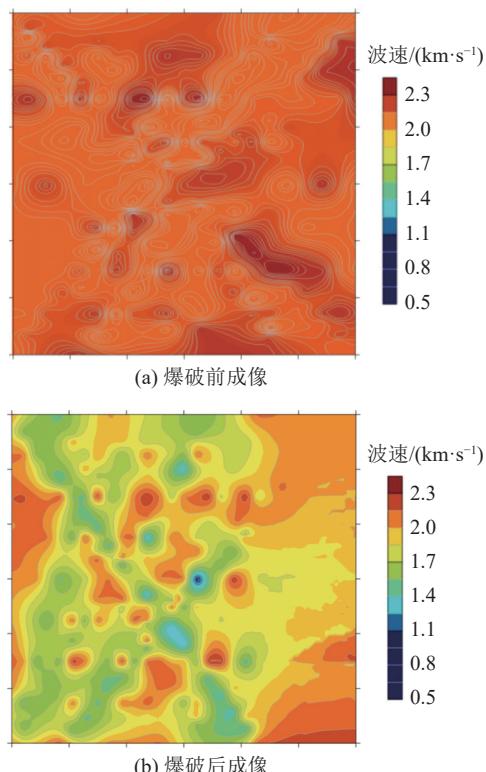


图14 松软煤层断面超声波成像

Fig.14 Soft coal seam section ultrasonic imaging

爆破前的试块超声波波速主要保持在 $2.0 \sim 2.15 \text{ km/s}$ ，局部波速到达 2.3 km/s ，平均波速在 2.1 km/s 左右，说明在试验模型内部存在不均质性，但模型的整体完整性较好，波速没有发生大范围的波动变化。

爆破后试验模型的整体波速减小到了 $1.7 \sim 2.0 \text{ km/s}$ ，松软煤层断面的超声波波速变化与爆破前相比图色差异较大。在爆破孔上方煤层出现了少量波速在 $1.4 \sim 1.7 \text{ km/s}$ 的区域，说明底板爆破损伤影响到了煤层，爆破对松软煤层内部造成了破坏，产生了爆破裂隙。

2 爆破扰动煤岩体数值模拟

2.1 数值模型

数值模拟可以直观再现爆炸冲击波传播和煤岩体内部损伤破坏演化全过程, 根据试验模型尺寸和力学参数建立底板爆破数值模型, 利用 DYNA^{3D} 数值模拟软件进行数值计算, 模型边界条件设置如图 15 所示。

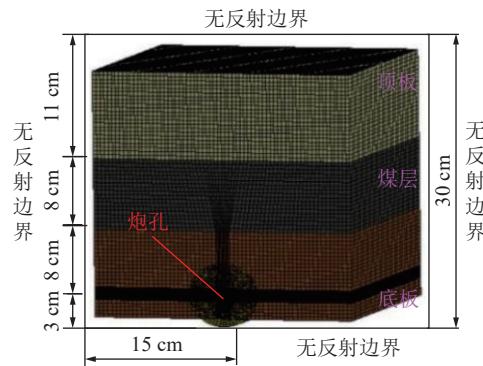
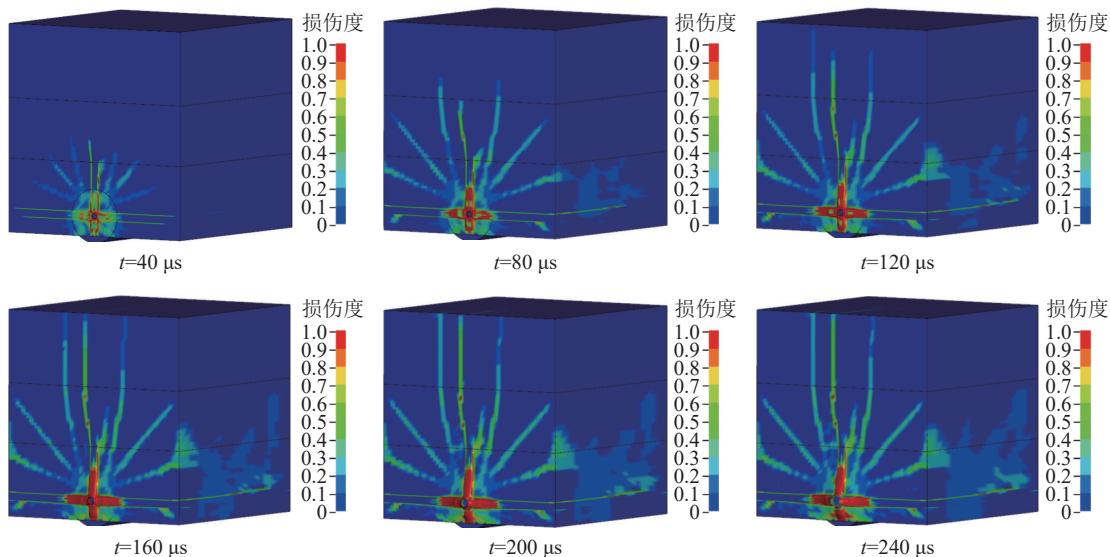


图 15 数值模型尺寸与网格划分

Fig.15 Numerical model sizing and meshing

数值模拟采用 RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) 本构模型, 引入拉、压损伤模拟煤岩脆性材料的动态响应过程。使用 JWL (Jones-Wilkens-Lee) 状态方程对炸药爆炸对外做功及爆轰产物膨胀驱动过程进行描述。JWL 状态方程是描述高能炸药爆轰产物的压力、体积与能量之间的关系:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$



注: 损伤度取值为 0~1, 当损伤度等于 1 时, 表明单元完全损伤, 显示为红色。

图 16 不同时刻数值模型损伤演化过程
Fig.16 Damage evolution process of numerical models at different times

式中: P 为爆轰压力, MPa; A, B 为 JWL 状态方程压力参数, GPa; R_1, R_2, ω 为炸药特性参数, 无量纲; E_0 为爆轰产物内能, MJ; V 为相对体积, m³。 D 为炸药爆速, ρ 为炸药密度。炸药各项材料参数见表 3。

表 3 炸药材料参数

Table 3 Parameter of explosive material

$\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
950	2 800	347	7.33	4.15	0.95	0.3	2

2.2 结果分析

爆破数值模型在不同时刻的损伤演化如图 16 所示, $t=40 \mu\text{s}$ 时, 爆破初始阶段损伤沿爆破孔向四周岩体扩展, 随后损伤蔓延至煤岩交界面; $t=60 \mu\text{s}$ 时, 损伤沿着交界向煤层内部扩展。

应力波在岩体和松软煤体的交界面产生透射压缩应力波和反射拉伸应力波, 透射波作用于松软煤体, 使煤层裂隙增加; 反射波反作用于岩体, 在煤岩交界面形成交叉裂纹, 使底板岩层裂隙和松软煤层裂隙贯通^[18], 爆破后期煤岩交界面损伤程度进一步加剧, $t=120 \mu\text{s}$ 时, 损伤蔓延到煤层顶板, 爆破孔位置和上部煤岩交界面以及煤层内部的损伤较为严重, 在底板岩层、煤岩交界面和松软煤层损伤交叉蔓延贯通。

为直观再现数值模型内部不同位置的损伤演化过程, 沿模型垂直方向每隔 5 cm 进行切片处理, 如图 17 所示, 中间切片为垂直爆破孔中心位置。从图中可以看出, $t=120 \mu\text{s}$ 时, 模型损伤在爆破孔周围和煤岩交界面处最为严重, 岩垂直过炮孔的切片损伤

向上蔓延至煤层内部,爆破孔两侧的切片上也出现了明显的损伤,但随着距离爆破孔位置增加损伤变小。 $t=240\text{ }\mu\text{s}$ 时,爆破孔两侧的损伤贯穿煤岩交界面,在松软煤层和底板岩层的煤岩交界面出现了较长的径向裂纹和放射状裂纹交叉扩展的方式,产生跨界

面致裂卸压裂纹,底板岩层裂隙和松软煤层裂隙贯穿不易在短期内重新被压实,在模型中构成了一个立体的裂隙网络,为瓦斯抽采提供了流动通道。这有利于松软煤层瓦斯运移和底板穿层钻孔卸压瓦斯抽采。

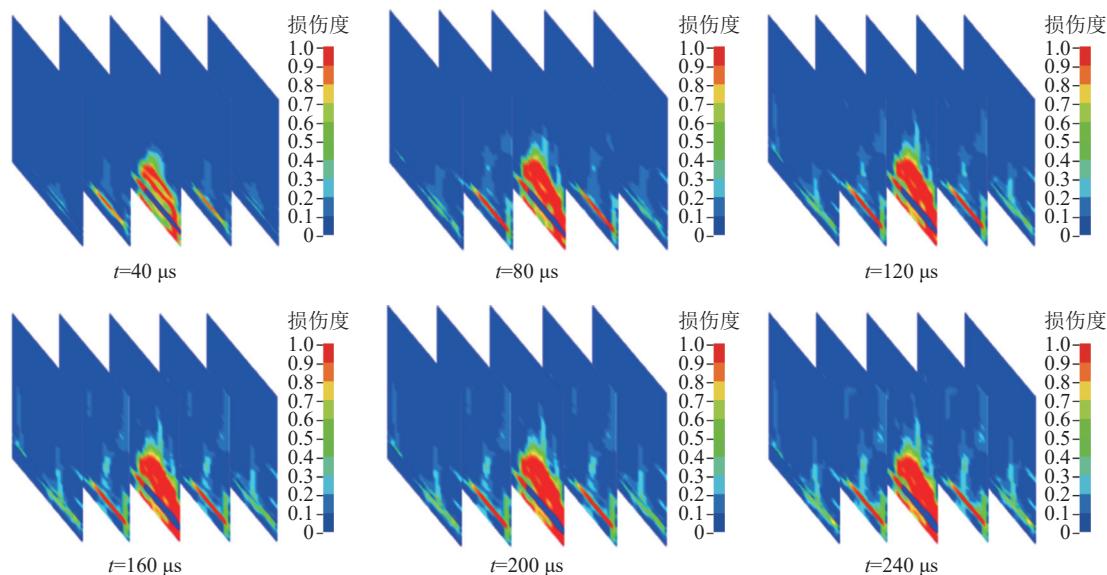


图 17 不同时刻数值模型内部损伤演化过程切片

Fig.17 Slice of internal damage evolution process in numerical models at different times

3 松软煤层底板爆破增透现场试验

3.1 工作面概况

潘一东煤矿位于安徽省淮南市潘集区,矿区内11-2煤层由西向东逐渐变厚,平均厚2.8 m,11-2煤层基本顶为细砂岩,煤层直接底板为泥岩,均厚约3.2 m,其底部发育一层厚0.2 m的煤线;基本底为粉砂岩,厚约4.2 m,岩石致密坚硬。实测11-2煤层瓦斯压力最大值为1.9 MPa,坚固系数 f 为0.47,瓦斯放散初速度 ΔP 为13.5,最大瓦斯含量 W 为 $10.36\text{ m}^3/\text{t}$,为松软低透气性煤层。

为确保1242(1)综采工作面进风巷和回风巷掘进期间的安全,该工作面在掘进前采用底板巷穿层钻孔预抽煤巷条带瓦斯区域防突措施。1242(1)进风底板巷穿层瓦斯抽采钻孔按 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 布置,为提高松软低透气性煤层工作面底板巷穿层瓦斯抽采钻孔的预抽效果,增加瓦斯抽采的浓度和流量,实现煤巷快速掘进,在1242(1)综采工作面底板巷采用穿层深孔预裂爆破技术措施增透,以提高11-2煤层透气性。

3.2 爆破增透方案

现场选取1242(1)底板巷第55组钻场位置设计爆破孔,如图18所示。爆破钻孔设计参数见表4。

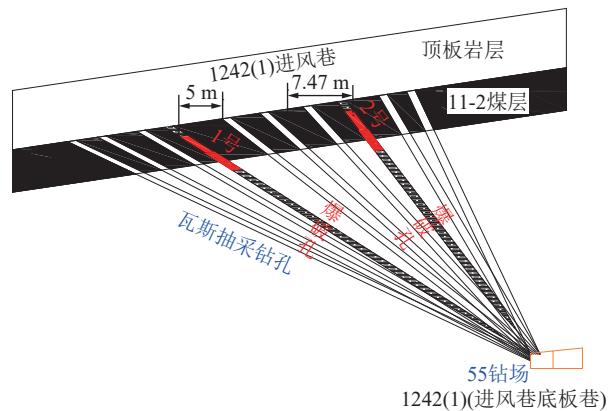


图 18 爆破增透钻孔布置

Fig.18 Deep hole blasting drilling layout

表 4 爆破钻孔设计参数

Table 4 Borehole design parameters

钻场	孔号	方位角/(°)	倾角/(°)	设计孔深/m	见煤长度/m	备注
55	爆1号	右偏1.5°	27.3°	50.5	48.0	见煤后钻进2.5 m
	爆2号	左偏2.5°	40.7°	36.3	34.3	见煤后钻进2.0 m

根据试验结论,如果将爆破增透钻孔全部布置在松软煤层,容易出现塌孔和增透裂隙短时间内闭合,设计爆破1号钻孔和爆破2号钻孔炸药装在松软煤层和底板岩石中,爆破钻孔装药参数见表5。

表 5 爆破装药参数
Table 5 Blasting charge parameters

钻场	孔号	穿煤长度/m	装药长度/m	装药量/kg	封孔长度/m
55	爆1号	2.5	10.0	33	40.5
	爆2号	2.0	10.0	33	26.3

爆破炸药使用专用煤矿瓦斯抽采水胶药柱, 装药方式如图 19 所示。先探孔后, 将药柱装上防滑装置送入炮孔, 最后装入炮头。

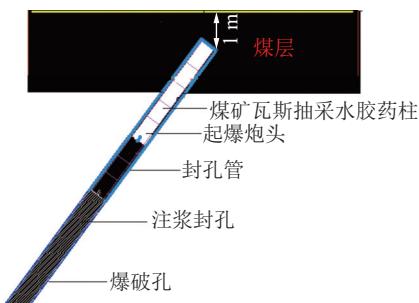
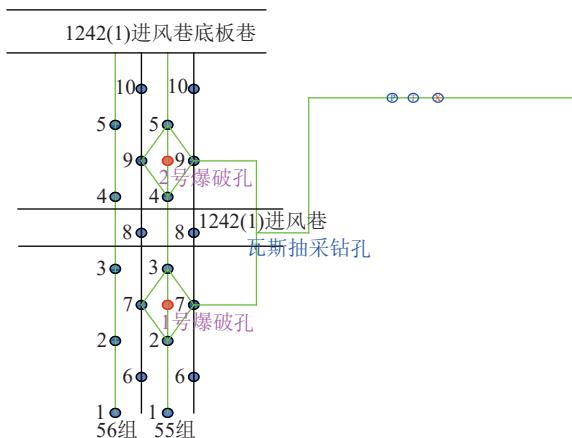


图 19 松软煤层底板爆破装药方式

Fig.19 Charging for blasting of soft coal seam floor

瓦斯抽采孔距离爆破孔 2.5 m, 爆破前将 2 个爆破孔周围的 8 个瓦斯抽采孔串联在一起监测瓦斯抽采浓度和瓦斯抽采流量, 如图 20 所示。



注: 1号爆破孔选择55组的2号、3号和7号, 56组的7号瓦斯抽采钻孔作为增透效果考察钻孔;2号爆破孔选择55组的4号、5号和9号, 56组的9号瓦斯抽采钻孔作为增透效果考察钻孔。

图 20 松软煤层底板爆破效果考察孔布置

Fig.20 Observation hole layout diagram

3.3 爆破效果考察

煤层底板爆破前后抽采瓦斯纯量及浓度变化曲线如图 21 所示, 从图中可以看到, 爆破后瓦斯抽采纯量及其浓度快速上升, 抽采纯量从 $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高到 $1.46 \text{ m}^3/\text{min}$, 抽采混合量由 $0.72 \text{ m}^3/\text{min}$ 提升到 $4.15 \text{ m}^3/\text{min}$, 瓦斯浓度从爆破前的 10.46% 上升到 45.5%, 并且长时间维持在较高水平。

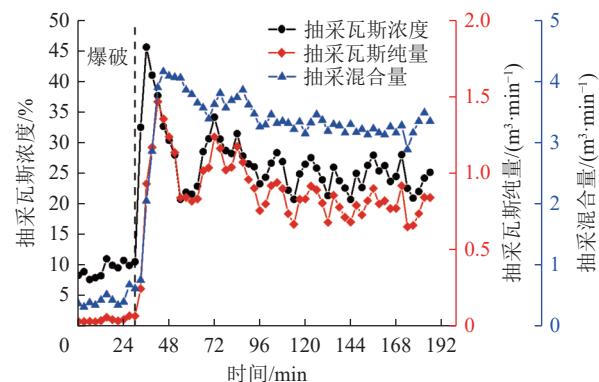


图 21 考察孔瓦斯抽采混合量、纯量及浓度

Fig.21 Gas extraction mixed quantity, pure quantity, and concentration curve

4 结论

1) 松软煤层底板爆破在距爆破孔中远区裂纹从底板岩体扩展到煤层, 在煤岩交界面产生跨界面的裂纹, 裂纹一直蔓延到松软煤体中并呈现出交错扩展的形式。爆破后试验模型波速减小到了 $1.7 \sim 2.0 \text{ km/s}$, 在爆破孔上方煤层出现了少量波速在 $1.4 \sim 1.7 \text{ km/s}$ 的区域, 爆破对松软煤层内部造成了破坏, 产生了爆破致裂增透裂隙。

2) 底板岩层爆炸应力波产生的透射压缩应力波作用于松软煤体, 使煤层产生爆破增透裂隙; 反射的拉伸应力波反作用于底板岩体, 促使松软煤体爆生裂隙和底板岩体爆破裂隙形成贯通裂纹, 有利于松软煤层的瓦斯横向运移和底板穿层钻孔卸压瓦斯抽采。

3) 松软煤层底板爆破现场应用表明, 煤层底板爆破瓦斯抽采纯量及其浓度快速上升, 抽采纯量从 $0.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高到 $1.46 \text{ m}^3/\text{min}$, 瓦斯浓度从爆破前的 10.46% 上升到 45.5%, 并且能长时间维持在较高水平。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325.
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [3] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.

- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716–725.
- [4] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 134–141.
- ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 134–141.
- [5] ZOU Q L, LIN B Q, ZHENG C S, et al. Novel integrated techniques of drilling-eslotting-eseparation-sealing for enhanced coal bed methane recovery in underground coal mines[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 960–973.
- [6] ZONG Q T, SHENG Q Y, CHENG Z, et al. Coal pores and fracture development during CBM drainage: their promoting effects on the propensity for coal and gas outbursts[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 51: 9–17.
- [7] ZHENG C, JIANG B, XUE S, et al. Coalbed methane emissions and drainage methods in underground mining for mining safety and environmental benefits: a review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 127: 103–124.
- [8] CHEN D D, HE W R, XIE S R, et al. Increased permeability and coal and gas outburst prevention using hydraulic flushing technology with cross-seam borehole[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 73: 103067.
- [9] WEI Y, CHANG Z L, GUANG Y S, et al. Coal and gas outburst control using uniform hydraulic fracturing by destress blasting and water-driven gas release[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 79: 103360.
- [10] ZHAO J J, ZHANG Y, RANJITH P G. Numerical simulation of blasting induced fracture expansion in coal masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 28–39.
- [11] 郭德勇, 张超, 朱同功, 等. 深孔聚能爆破起爆位置对煤层致裂增透的影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 302–311.
GUO Deyong, ZHANG Chao, ZHU Tonggong, et al. Effect of detonating position of deep-hole cumulative blasting on coal seam cracking and permeability enhancement[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 302–311.
- [12] 郭德勇, 赵杰超, 朱同功, 等. 双孔聚能爆破煤层裂隙扩展贯通机理[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(12): 1613–1623.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, ZHU Tonggong, et al. Crack propagation and coalescence mechanism of double-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(12): 1613–1623.
- [13] 郭德勇, 赵杰超, 吕鹏飞, 等. 煤层深孔聚能爆破有效致裂范围探讨[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(5): 582–590.
- GUO Deyong, ZHAO Jiechao, LYU Pengfei, et al. Effective fracture zone under deep-hole cumulative blasting in coal seam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(5): 582–590.
- [14] 夏彬伟, 刘承伟, 卢义玉, 等. 缝槽水压爆破导向裂缝扩展实验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 432–438.
- XIA Binwei, LIU Chengwei, LU Yiyu, et al. Experimental study of propagation of directional fracture with slotting hydraulic blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 432–438.
- [15] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 258–267.
LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 258–267.
- [16] 田坤云, 宫伟东, 魏二剑, 等. 松软煤层及砂岩顶板水力扰动卸压增透效果对比分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1888–1897.
TIAN Kunyun, GONG Weidong, WEI Erjian, et al. Gas pressure relief-permeability increase effect comparative analysis about hydraulic disturbance to soft coal seam and its sandstone roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1888–1897.
- [17] 龚敏, 张凤舞, 文斌, 等. 煤巷底板岩石爆破提高瓦斯抽放率的应用与数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(6): 972–977.
GONG Min, ZHANG Fengwu, WEN Bin, et al. Numerical simulation and application on blasting to improve gas drainage rate in floor rock of coal roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(6): 972–977.
- [18] 穆朝民, 齐娟. 爆炸荷载作用下煤体裂纹扩展机理模型实验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(13): 58–61.
MU Chaomin, QI Juan. Model investigation on cracks propagation in coal under blast loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(13): 58–61.
- [19] 高魁, 刘泽功, 刘健, 等. 定向聚能爆破弱化综掘工作面逆断层应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(7): 1408–1419.
GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Application research of directional cumulative blasting for weakening reverse faults in fully mechanized excavation face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1408–1419.
- [20] 高魁, 刘泽功, 刘健, 等. 爆破应力波在构造带煤岩的传播规律及破坏特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 79–86.
GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Propagation law and failure characteristics of blasting stress wave in structural belt coal-rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 79–86.