

定向聚能爆破弱化综掘工作面 逆断层应用研究

高 魁^{1,2}, 刘泽功^{1,2}, 刘 健^{1,2}, 朱飞昊¹, 乔国栋¹, 张树川^{1,2}

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对综掘工作面过逆断层采用普通爆破预先弱化硬岩时巷道围岩和构造区域煤岩体的稳定性问题, 通过理论分析和对比模拟实验研究爆破扰动逆断层构造带的突出原因, 提出改变装药结构, 采用定向聚能爆破的预防对策并进行现场应用。研究发现, 爆破应力波传播到逆断层构造区域时, 在煤岩交界面发生波的透射和反射, 爆破振动的累积损伤使不同煤岩介质交界面的破坏最为严重, 加大了煤岩体的损伤程度和破坏范围, 为瓦斯动力灾害的发生提供了弱面, 有利于突出的发生; 定向聚能爆破可以使爆破作用集中在岩体方向, 减少应力波对构造区域煤岩体的扰动; 在本实验条件下, 聚能方向的应力比普通爆破增加 2 倍左右, 非聚能方向的应力减小约 3 倍。现场应用表明, 采用定向聚能爆破后, 综掘工作面坚硬岩石中的裂纹损伤扩展, 达到了预先弱化的目的和综掘机破碎岩石的要求, 工作面上方逆断层构造区域的煤岩体基本完整, 为综掘工作面安全快速通过硬岩逆断层提供了保证。

关键词: 采矿工程; 煤与瓦斯突出; 爆破应力波; 地质构造带; 逆断层; 定向聚能爆破

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)07 - 1408 - 12

Application research of directional cumulative blasting for weakening reverse faults in fully mechanized excavation face

GAO Kui^{1,2}, LIU Zegong^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, ZHU Feihao¹, QIAO Guodong¹, ZHANG Shuchuan^{1,2}

(1. College of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory of Mine Safety and High Efficient Mining Jointly Built by Province and Education Ministry, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Aiming at the stability problems of the surrounding rock of roadways and the coal-rock in the tectonic area resulted from ordinary blasting in the reverse fault of the comprehensive excavation face, the coal and gas outbursts caused by blasting disturbance in the reverse fault structural zone were studied through theoretical analysis and comparison simulation experiments. Prevention measures such as changing the charge structure and using the directional cumulative blasting were proposed and applied in practice. It was found that the transmission and reflection of the blasting stress wave occur at the interface of coal and rock when the blasting stress wave propagates to the reverse fault structure area. The cumulative damage of blasting vibration causes the most serious

收稿日期: 2018 - 12 - 02; **修回日期:** 2019 - 03 - 04

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808000); 国家自然科学基金资助项目(51604010, 51674009)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant No. 2018YFC0808000) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51604010 and 51674009)

作者简介: 高 魁(1984 -), 男, 博士, 2013 年于安徽理工大学安全技术及工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事矿井瓦斯防治方面的研究工作。E-mail: kgao@aust.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1447

damage to the interface of different coal and rock media, enlarges the damage degree and scope of coal and rock and provides a weak surface for the occurrence of coal and gas outburst even gas dynamic disasters. Directional cumulative blasting can concentrate the blasting action in the direction of rock and reduce the disturbance of the stress wave to the coal-rock in the structural area. Under the experimental conditions, the stresses in the energy accumulation and non-accumulation directions are respectively about 2 times and one third of those of ordinary blasting. The field application of directional accurately cumulative blasting in crossing hard rock faults in fully mechanized excavation face shows that, after blasting, the crack damage expands in the hard rock of the working face which meets the purpose of pre-weakening and the requirement of the rock breaking of the comprehensive excavator, and the coal-rock in the reverse fault structure area above the working face is basically complete which provides a guarantee for safe and rapid crossing the hard rock reverse faults in fully mechanized excavation face.

Key words: mining engineering; coal and gas outburst; blasting stress wave; geological structure belt; reverse fault; directional cumulative blasting

1 引 言

随着煤矿开采深度和强度的增加, 爆破技术在煤矿中的应用越来越广泛, 如张超等^[1-3]进行了低透气性煤层普通爆破增透提高瓦斯抽采率的实验和现场应用; 郭德勇等^[4-5]研究了聚能爆破增透机制; 高魁等^[6]使用普通爆破、何满潮等^[7-9]使用聚能爆破进行了坚硬顶板强制放顶的应用; 刘健等^[10]使用普通爆破对厚煤层综放开采坚硬顶煤进行预先弱化来提高煤炭开采率和瓦斯抽采率; 汪海波等^[11]使用超前深孔爆破技术、杨仁树等^[12]使用切缝药包聚能爆破技术进行了硬岩段快速掘进的现场应用; 刘健等^[13]进行了低透气性突出煤层巷道快速掘进的试验研究; 张春华等^[14]利用爆破增透消突技术进行了石门揭煤应用; 在地质构造区域, 黄文尧等^[15]利用水胶药柱深孔预裂爆破进行了弱化综采面硬岩断层的应用, 韩磊等^[16]利用深孔预裂爆破技术进行了弱化坚硬陷落柱的应用。

然而, 在井下应用过程中, 爆破震动作用对爆破区域的煤岩体稳定性会产生强烈的影响, 特别是地质构造带, 容易诱发煤岩瓦斯动力灾害^[17-18]。但是目前有针对性的研究爆破扰动构造带诱发的突出机制与预防对策的文献还不多见^[19]。

鉴于此, 本文针对综掘工作面过逆断层采用普通爆破预先弱化硬岩时巷道围岩和构造区域煤岩体的稳定性这一科学问题, 采用理论分析、模拟实验和现场应用相结合的方法分析爆破扰动逆断层构造带的突出机制, 研究爆破裂隙的扩展规律和应力演化过程, 考察定向聚能爆破在综掘工作面过硬岩逆

断层的应用效果。论文的研究成果对地质构造带爆破作业优化爆破参数和装药方式的选择具有实际借鉴价值。

2 爆破扰动逆断层构造带突出机制

2.1 工程背景

2004年10月20日, 河南郑煤集团公司大平煤矿21轨道下山岩巷掘进工作面爆破揭穿地质构造复杂的逆断层, 在巷道顶端距离逆断层下盘煤层约5 m位置处发生了特大型煤与瓦斯突出事故, 突出煤岩量共计1 894 t, 瓦斯量总计约25万m³。突出地点剖面如图1^[20]所示。

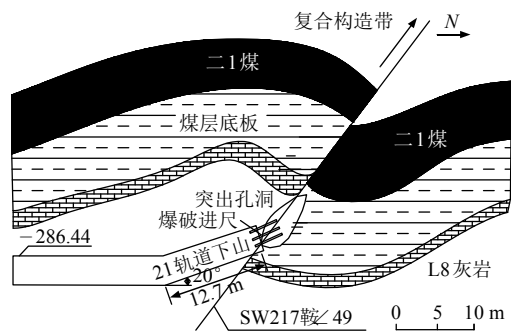


图1 大平煤矿瓦斯突出剖面图^[20]

Fig.1 Cross-section of gas outburst in Daping coal mine^[20]

该矿位于新密矿区 NE 向向斜和逆断层发育地段, 发育有沿 NE 向扩展分布的挤压构造带, 突出位置断层面和突出孔洞如图2所示。

2.2 逆断层形成过程与应力环境

逆断层形成过程如图3所示, σ_1 为水平挤压应力, σ_w 为自重应力, σ'_1 与 σ'_w 分别为水平挤压应力和自重应力的反作用力。在 σ_1 和 σ_w 作用下, 煤岩



图2 突出位置断层面和突出后孔洞

Fig.2 Fault plane and hole of gas outburst

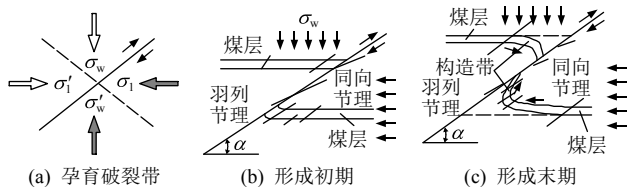


图3 逆断层形成过程

Fig.3 Formation process of reverse faults

体形成 2 组共轭剪切断裂带，如图 3(a)所示。

在共轭剪切断裂带剪切面上的正应力与剪应力满足下式^[21]：

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_w}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_w}{2} \cos(2\alpha) \quad (1)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_w}{2} \sin(2\alpha) \quad (2)$$

式中： σ_α 为剪切面上的正应力(MPa)， τ_α 为剪切面上的剪应力(MPa)， α 为断层面角度(°)。

在水平挤压应力的作用下，煤层沿剪切破裂面持续滑动启动时，应满足下式^[21]：

$$\tau_0 = c_0 + \sigma_\alpha \tan \varphi_0 \quad (3)$$

式中： τ_0 为逆断层剪切破裂面相对滑动时的临界剪应力(MPa)， c_0 为破裂面的黏聚力(MPa)， φ_0 为破裂面的内摩擦角(°)。

当 $\tau_\alpha \geq \tau_0$ 时，煤层沿剪切断裂带剪切面发生剪切逆向滑动，从而形成逆断层的上盘。在逆断层上下两盘沿断层面相对运动的过程中，剪应力的作用导致两盘形成与断层面平行的同向断裂面和与断层面相交的小角度节理等大量的伴生构造。

与此同时，断层面附近区域的煤岩体在剪应力的持续作用下发生弯曲变形，上盘呈现背斜，下盘呈现向斜，逐渐形成牵引褶皱(见图 3(b)和 3(c))。

在牵引褶皱形成的过程中，逆断层构造带会积聚大量的弹性应变能并伴有煤层厚度变化，如薄厚突变带和煤层尖灭等，该地带很可能存在较高的应力集中，为煤与瓦斯突出的发生提供了有利条件。

2.3 爆破扰动逆断层构造带突出机制分析

爆破应力波从岩体入射到逆断层，在构造带和

断层面破碎煤岩体交界面发生透射和反射，在透射压缩应力波和反射拉伸应力波经过的区域，煤岩体会产生压缩和膨胀变形。压应力冲击波首先在坚硬岩体中形成微损伤和微裂纹，拉应力的产生与构造松软煤体和断层面破碎岩体拉伸波的作用紧密相关，集中分布在波阻抗发生变化的区域^[22-23]。在构造带煤岩交界面附近能量处于多次反复的累积状态，压应力和拉应力转换频繁，构造带附近裂纹贯通形成交叉网状裂纹，冲击荷载越大交替分布的裂纹在煤岩内部传播的越远。逆断层构造带松软煤体和断层面破碎岩体的存在会加强爆破应力波的反射拉伸效应，导致爆破附近构造带区域所受应力波的作用最强，损伤破坏也最严重，为煤与瓦斯突出的发生提供了弱面条件。

逆断层构造带煤岩体在没有受到爆破应力波的作用之前，煤层中的游离瓦斯和吸附瓦斯处于动态平衡状态。当拉伸应力波作用于煤岩交界面区域的构造松软煤体时，该区域的煤体发生膨胀变形，导致煤体的孔隙裂隙增加，吸附瓦斯解吸。同时，游离瓦斯向爆破裂隙区域运移扩散，导致煤层瓦斯压力升高^[24]，增加了突出危险性。

为了减小爆破作用对构造带区域煤岩体的扰动强度，可以通过改变装药结构，采用定向聚能爆破的手段，使爆破作用方向集中在某一个方向，预防爆破导致的瓦斯动力灾害。

3 聚能爆破定向损伤破裂机制

定向聚能爆破通过改变药柱结构，在药柱两侧对称位置预留聚能空穴，在空穴上设置紫铜片制作的聚能金属罩，聚能爆破定向损伤岩石动态断裂力学模型如图 4 所示。

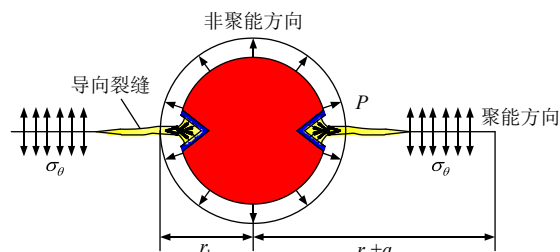


图4 聚能爆破定向损伤力学模型

Fig.4 Accurate directional damage mechanics model of cumulative blasting

利用爆破空穴效应，爆轰产物首先沿空穴的轴

线方向积聚，形成超高压力和密度的聚能射流，提高爆破冲击波在煤岩体预定方向上的损伤破坏作用使爆破裂隙定向扩展^[25-26]。同时，由于紫铜片密度大、可压缩性小，导致爆炸能量在遇到金属聚能罩后，转化为动能形成金属聚能射流^[27]。聚能射流在爆破孔周围预定方向侵彻撕裂出初始导向裂缝，为爆破应力波和爆生气体的进一步作用以及裂隙的定向扩展提供了精准定向的作用。

爆破裂纹扩展过程中，裂隙尖端应力强度因子为

$$K_I = PF\sqrt{\pi(r_b + a)} + \sigma_\theta\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中： P 为爆生气体压力(MPa)， F 为裂隙尖端应力强度因子修正系数， r_b 为炮孔半径(m)， a 为裂隙长度(m)， σ_θ 为切向应力(MPa)。

根据断裂力学理论，当裂隙尖端应力强度因子大于岩石的断裂韧性时裂纹起裂扩展^[28]。因此，满足爆破裂隙持续扩展的爆生气体压力为

$$P > \frac{K_{IC} - \sigma_\theta\sqrt{\pi a}}{F\sqrt{\pi(r_b + a)}} \quad (5)$$

式中： K_{IC} 为岩石的断裂韧性。

聚能方向上产生的初始导向裂缝远大于其他细小裂纹，高压爆生气体进入初始导向裂隙，聚能方向上的压力随之增大；根据能量守恒，非聚能方向上的爆生气体作用能力随之减弱。因此，定向聚能爆破增加聚能方向裂纹扩展能力的同时减弱了非聚能方向上的裂纹演化能力。

4 逆断层构造带爆破对比模拟实验

4.1 相似模拟实验基本原理

采用 Froude 比例方法建立实验模型，要求满足比尺因数关系：

$$K_\sigma = K_\rho K_l \quad (6)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} K_\sigma &= \frac{\sigma_m}{\sigma_p} \\ K_l &= \frac{l_m}{l_p} \\ K_\rho &= \frac{\rho_m}{\rho_p} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： K_σ ， K_ρ 和 K_l 分别为对应应力、密度和长度的相似比例系数， $K_\sigma \in (0.15, 0.4)$ ， $K_\rho \in (1.24, 1.6)$ ，

$K_l = K_\sigma / K_\rho = (0.15/1.6, 0.4/1.24) = (0.09, 0.32)$ ^[29]；下标 m ， p 分别表示模型和原型。

本次爆破模拟实验的煤体为构造软煤，根据应力比例取值范围， K_σ 取 0.4。相应的密度相似比 K_ρ 取 1.6，所以 $K_l = K_\sigma / K_\rho = 0.25$ 。

爆炸荷载相似关系及装药量可由下式^[29]计算：

$$\left. \begin{aligned} K_\sigma &= K_f K_\rho K_C K_{\bar{R}}^{-n} \\ K_{\bar{R}} &= \left(\frac{K_\sigma}{K_f K_\rho K_C} \right)^{-\frac{1}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

实验模型材料与现场煤体的比例距离为

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)_p &= K_{\bar{R}} \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)_m \\ \frac{(W^{1/3})_p}{(W^{1/3})_m} &= \frac{1}{K_{\bar{R}}} \frac{(R)_p}{(R)_m} \\ K_{W^{1/3}} &= \frac{K_L}{K_{\bar{R}}} \\ C &= \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： σ 为应力， ρ 为密度， W 为装药量， C 为应力波速， n 为衰减系数， f 为偶合系数， R 为比例距离 $\bar{R} = R/W^{1/3}$ ， R 为爆心距离。

由于柱状装药预裂爆破很少有能量从煤体中泄露，因此取比例偶合系数 $K_f = 2.0$ ，应力波比例系数 $K_C = 0.41$ ，衰减系数取 $n = 2.5$ 。可以得出 $K_{\bar{R}} = 1.6$ ，对于煤矿现场 100 mm 柱状二级煤矿许用水胶炸药装药，模型实验需要 25 mm 柱状二级煤矿许用水胶炸药装药。

4.2 实验模型构建

实验采用自主研发的气固耦合爆破模拟试验装置系统，可实现充气密封和垂向应力加载，如图 5 所示。箱体内部腔体净尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm，装置上方为液压加载装置，加载装置与主箱体连接处用密封圈密封，箱体前后两个侧面为可拆卸钢板。

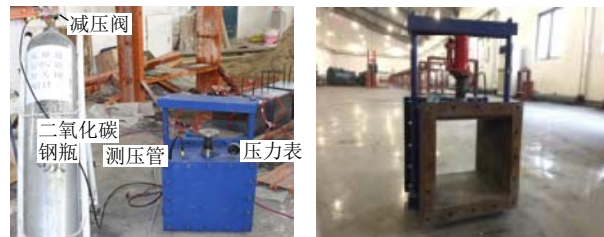


图 5 气固耦合爆破模拟试验装置

Fig.5 Simulation test device of gas-solid coupling blasting

箱体利用高强度硅胶垫和螺栓实现密封，通过高压气瓶向箱体内充气，用来模拟煤矿井下现场实际的瓦斯赋存情况，使模型实验和现场实际更加吻合。实验模型尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm，按照长度相似比可以模拟 1.2 m×1.2 m×1.2 m 的现场煤岩体。爆破孔布置在距离断层上盘煤层 10 cm 的岩层内，煤层厚度 5 cm，如图 6 所示。断层上盘上方岩层厚度 5 cm，断层上盘下方岩层厚度 20 cm，断层面厚度 2 cm，断层下盘上方岩层厚度 12 cm，断层下盘下方岩层厚度 13 cm。

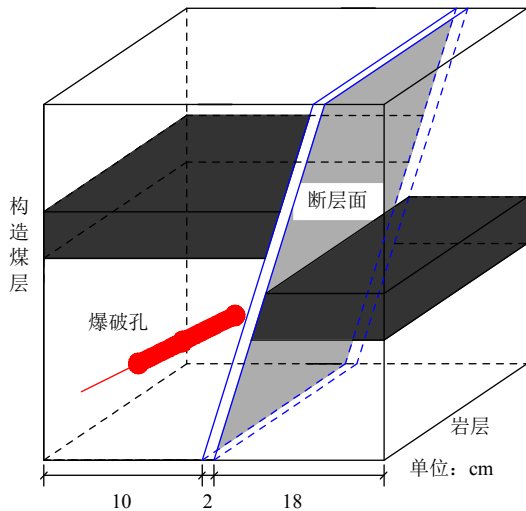
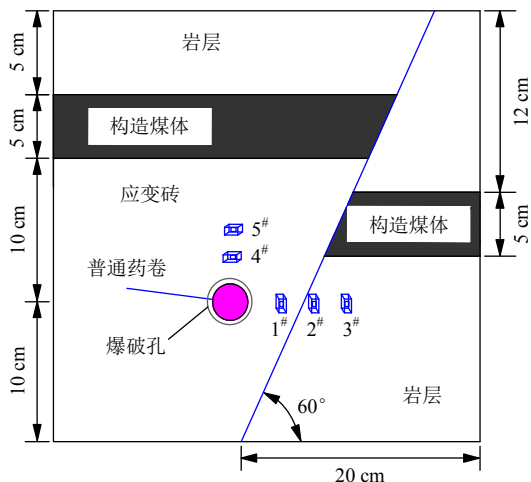
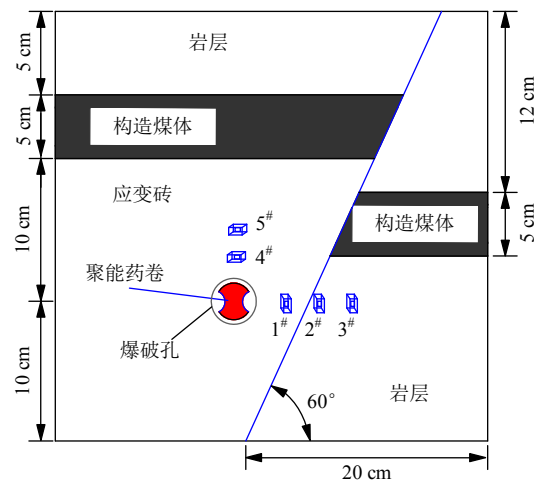


图 6 爆破实验模型及尺寸
Fig.6 Model and dimension of blasting test

水平方向，距离爆破孔 4, 8 和 12 cm 位置分别布置 1[#], 2[#]和 3[#]应力测点；垂直方向，在爆破孔正上方垂直距离 4 cm 处布置 4[#]应力测点，8 cm 处布置 5[#]应力测点，测点布置如图 7 所示，2[#]测点位于断层面附近。



(a) 普通爆破应力测点布置



(b) 聚能爆破应力测点布置

图 7 实验模型应力测点布置图

Fig.7 Stress measurement point layout of blasting test

实验原型取自淮南矿区张集煤矿 6 煤层 14136 工作面，该工作面共发育断层 14 条，其中，落差大于 3 m 的断层有 5 条。实验原型煤岩力学参数见表 1。本次实验模型的材料配比参数见表 2，断层面岩层的硬度小于正常岩层。

表 1 实验原型煤岩力学参数

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	2.6	9.8	0.24	28.2	1.3
6 煤	1.4	5.3	0.32	7.1	0.4

表 2 模拟实验材料配比

Table 2 Ratio parameters of materials in blasting tests

岩性	配比				
	砂子	水泥	石膏	水	煤粉
岩层	6.1	1.2	0.5	0.70	0.0
断层面	6.2	1.0	0.8	0.80	0.0
煤层	2.5	0.2	1.2	0.65	1.8

4.3 实验药卷制作

实验药卷使用直径为 16 mm，厚度为 1 mm 的 PVC 管制作，聚能金属罩使用壁厚 0.1 mm 的纯紫铜片制作。制作时，先将紫铜片裁剪为 200 mm×10 mm 的矩形长条，然后利用模具将矩形紫铜片制成轴向长度为 200 mm，底面半径为 4 mm 的半圆形聚能金属罩，最后将两片聚能金属罩对称布置在 PVC 管内壁。实验时，在药卷内填充二级煤矿许用水胶炸药，在药柱管体内放置一根长度与管体相等的特制传爆体，使用雷管引爆，制作完成的聚能药卷如

图 8 所示。聚能药卷制作完成后在 PVC 管外壁上涂抹一层抗静电漆。



图 8 聚能药卷制作

Fig.8 Production of cumulative explosive rolls

普通爆破实验的药卷不添加聚能罩，采用相同规格的 PVC 管和水胶炸药制作，药卷的装药量和定向聚能爆破药卷的装药量保持一致。

4.4 实验数据测试系统

试验采用 SDY2107A 型超动态应变数据采集系统实时采集爆破过程应变砖的 3 个不同方向上的应变数据，然后根据应变值计算间接换算成相应测点应力值，爆破试验系统和数据监测应变砖如图 9 所示。

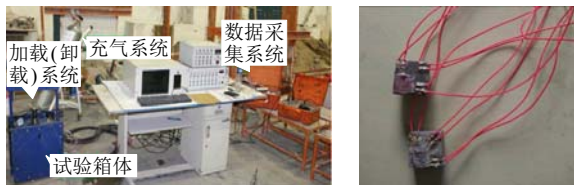


图 9 试验系统和数据监测应变砖

Fig.9 Test system and data monitoring strain brick

对于平面应力模型，根据应变砖的应变值按照如下公式计算相应测点应力值：

$$\sigma = \frac{E}{2(1-\mu)}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \pm \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \quad (10)$$

式中： σ 为测点应力值(MPa)， ε_1 为水平方向应变， ε_2 为 45° 方向应变， ε_3 为垂直方向应变， E 为弹性模量(GPa)。

应变砖在埋设过程中，应将应变花相互垂直的两片应变片中的一片沿垂直应力方向，另一片沿水平应力方向放置。

4.5 实验模型制作过程

实验物理模型在预制的木质箱体内铺设，制作时从箱体的底部逐层铺设，断层面用硬纸板预先放置，按照实验模型设计尺寸在相应的位置预留爆破孔，模型制作过程如图 10 所示。



(a) 逆断层底板岩石铺设

(b) 逆断层上盘煤层



(c) 实验模型制作完成

(d) 实验模型装入箱体

图 10 实验物理模型制作过程

Fig.10 Making process of test model

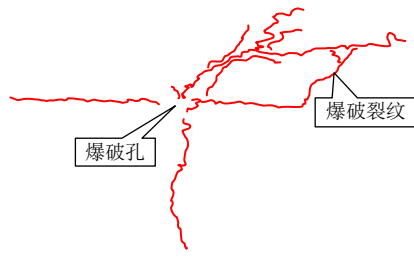
制作好的试样在室温下养护一个月，养护完成后再移入气固耦合爆破模拟试验装置，然后装入特制的药卷，聚能药卷放置时，将平行于煤层的方向设定为聚能方向。最后，向箱体内充入 1 MPa 的 CO₂ 气体，连接雷管和起爆器进行起爆。

4.6 实验结果分析

普通爆破后，实验模型的裂纹发育如图 11 所示，爆破裂纹沿爆破孔向四周扩展，产生爆破粉碎圈，在爆破孔靠近逆断层构造带的一侧底板岩层内破坏比较严重；爆破裂隙扩展到了逆断层下盘煤层内，煤体损伤严重，爆破裂隙发育；由于逆断层上盘煤层距离爆破孔较远，同时受到实验箱体上方所施加的应力影响，在垂直爆破孔方向的上方所产生的爆破裂隙较少。



(a) 爆破模型裂隙发育实物



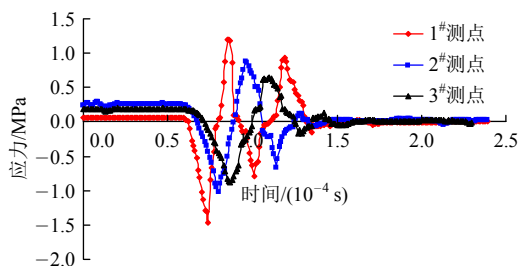
(b) 爆破模型裂隙发育素描

图 11 普通爆破后实验模型裂纹扩展

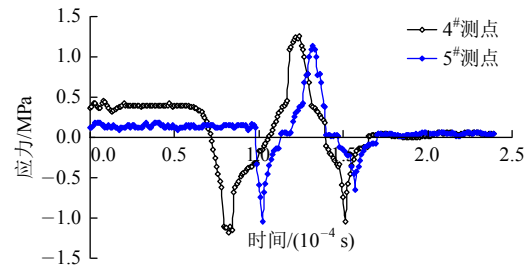
Fig.11 Model crack development after ordinary blasting

实验模型岩层密度为 1.625 kg/m^3 ，纵波速度取 1297 m/s ，则岩层波阻抗为 $2107.6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ；煤层密度为 0.875 kg/m^3 ，纵波速度取 1029 m/s ，煤层波阻抗为 $900.4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。当爆破应力波传播到逆断层下盘煤层时，由于煤层的波阻抗值远小于岩层的波阻抗值，根据爆破应力波的传播特征，应力波在煤岩交界面发生透射和反射，出现透射的压缩波和反射的拉伸波。透射的压缩应力波作用于煤体，使煤层裂隙增加；反射的拉伸应力波反作用于岩体，在靠近煤体一侧的岩体内形成贯通裂纹，加大了岩体的破坏程度和破坏范围。爆破振动的累积损伤使岩层和逆断层下盘煤岩交界面的破坏最为严重，为瓦斯动力灾害的发生提供了瓦斯通道和弱面，有利于突出的发生。

根据预埋应变砖监测到的应变值，反演出相应测点的应力变化曲线如图 12 所示，从曲线中可以看到各个测点应力值随着爆破孔距离增加，应力峰值依次减小；随时间的增加，应力值逐渐衰减。在靠近爆破孔右方底板岩体内 1#测点受到的应力值最大，最大应力值达到 1.46 MPa ，由于煤岩交界面的反射拉伸应力波和入射应力波叠加出现了多次应力峰值；受逆断层下盘煤层和断层面的影响，2#测点应力最大值可达 1.01 MPa ；3#测点应力变化趋势和 2#测点相似，应力值略小于 2#测点，最大值为 0.88 MPa ；4#和 5#测点距离逆断层上盘煤层较远，所受断层面的影响也较小，4#测点应力最大值为 1.25 MPa ，5#测点，应力最大值为 1.14 MPa 。



(a) 水平方向应力测点

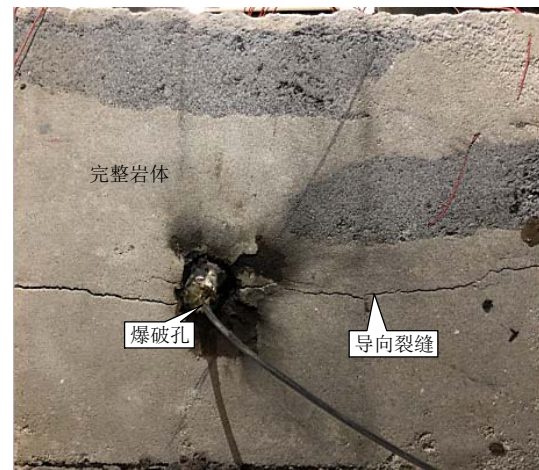


(b) 垂直方向应力测点

图 12 普通爆破应力变化曲线

Fig.12 Stress variation curves due to ordinary blasting

定向聚能爆破后，实验模型的裂纹发育如图 13 所示。在平行煤层底板的方向上出现 2 条明显的导向裂缝，爆破粉碎区范围减小，非聚能方向上裂纹不明显。断层面附近和上覆煤岩体完整，破坏程度较小，煤层的顶底板呈稳定状态。由于逆断层交界面上反射拉伸应力波的作用，在逆断层的断层面方向，向断层下盘煤层延伸的裂纹长度大于爆破孔另外一侧非构造带区域方向的裂纹长度。



(a) 爆破模型裂隙发育实物



(b) 爆破模型裂隙发育素描

图 13 定向聚能爆破后实验模型裂纹扩展

Fig.13 Model crack development after cumulative blasting

定向聚能爆破应力变化曲线如图 14 所示，从图中可以看出，聚能爆破应力变化趋势和普通爆破比较类似，各个应力测点随爆破孔距离增加，应力峰值依次减小；随时间的增加，应力值逐渐衰减。

定向聚能爆破的聚能方向上的应力远大于非聚能方向上的应力，聚能方向的 1#应力测点应力最大值为 2.75 MPa ，非聚能方向的 4#应力测点应力最大

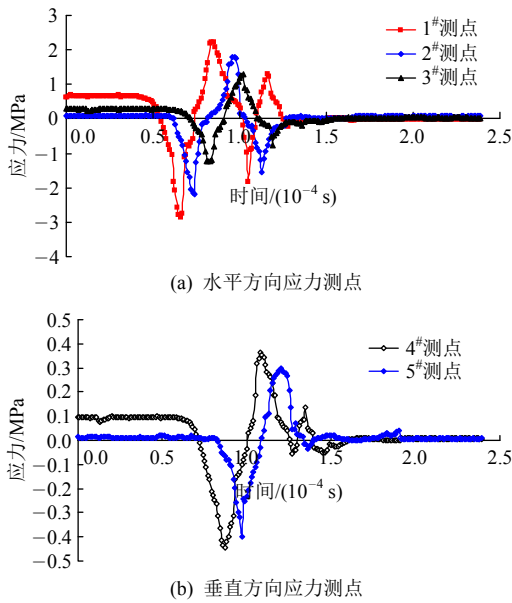


图 14 定向聚能爆破应力变化曲线

Fig.14 Stress variation curves due to cumulative blasting

值为 0.44 MPa。定向聚能爆破的 1#和 4#测点与普通爆破相应位置上的 1#和 4#测点的应力相比，聚能爆破聚能方向 1#测点上的应力值比普通爆破 1#测点上的应力值增加 2 倍左右，聚能爆破非聚能方向 4#测点上应力值比普通爆破 4#测点上的应力值减小约 3 倍。

5 定向聚能爆破预先弱化断层应用

5.1 工程概况

皖北煤电集团有限责任公司钱营孜煤矿位于安徽省宿州市西南，该矿 3212 综采工作面位于-650 水平西一采区北翼，设计工作面进风巷和回风巷方位角 339°；工作面煤层走向为 NW，煤层平均倾角 16°，开切眼斜长 200 m，平均距离 194 m。在工作面煤层中存在一个低角度逆断层 DF64，断层角度为 28°~49°，高度为 13 m，走向 NE，与工作面两巷成锐角约 66°，在工作面进风巷内有全岩段长度 45 m，如图 15 所示。

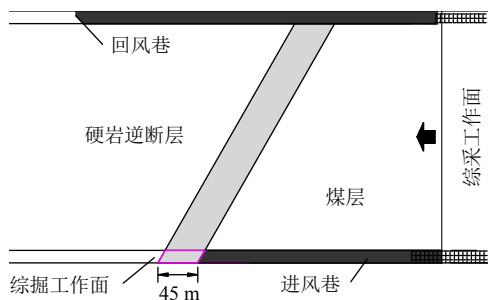


图 15 综掘工作面遇硬岩断层示意图

Fig.15 Diagram of hard rock faults in fully mechanized excavation face

综掘工作面通过逆断层时，如果遇到特别坚硬的岩石，高负荷的施工作业使综掘机截割困难，截齿损耗严重，缩短其使用寿命，工作面推进速度缓慢。3212 综采工作面进风巷综掘工作面断层处的岩石力学参数见表 3。

表 3 逆断层砂岩力学参数

Table 3 Mechanical parameters of sand rock in reverse fault

密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
2.4	0.26	90.0	9.3

从表 3 中可以看出，岩石比较坚硬，此时，如果采用普通深孔预裂爆破处理综掘工作面坚硬岩石，可以达到提高综掘机截割岩体的速度，但是爆破作用对逆断层构造带区域的煤层扰动严重，存在严重的安全隐患；岩石抛掷，难以保证掘进工作面机械设备的安全；同时，对巷道周围保留煤岩体造成直接损伤，影响巷道支护和使用期间的稳定性。

为了确保巷道顶底板安全的同时降低工人的劳动强度和综掘机摇臂的维护及截齿更换费用，通过分析，决定采用定向聚能爆破技术来破碎综掘工作面的坚硬岩石。

5.2 爆破方案

考虑施工安全和提高聚能爆破造成的围岩损伤破坏范围，在相邻的 4 个爆破孔的中心布置 1 个控制孔，在控制孔的自由面效应、曲面特征和位移补偿功能的综合作用下，可以促使岩体裂隙沿着两个爆破孔连线方向定向发育与扩展，在控制孔附近形成由爆生主裂隙、环向裂隙和径向裂隙组成的交叉裂隙网^[30]，增加定向聚能爆破非聚能方向上的岩体裂隙。

聚能爆破孔和控制孔的直径均为 75 mm，深度为 2 m，爆破孔距离巷道底板的高度为 1.0 m，两爆破孔水平方向的间距为 2.0 m，竖直方向的间距为 1.6 m，定向聚能爆破钻孔布置如图 16 所示。

超前工作面进行循环放炮，爆破孔参数和装药量见表 4。掘进期间巷道设计断面 5 m×3.4 m，顶板每排布置 $\Phi 22$ mm×2 500 mm 的 6 根锚杆和 M5 钢带，间排距 900 mm×800 mm。构造区域在原锚索支护的基础上，每排增加 2 根直径 22 mm 长 7.3 m 中空注浆锚索，2 根锚索均以 10°~20° 的角度向煤帮一侧外扎，采用锚-喷-注相结合的形式，加固流程为中空注浆锚索支护→喷浆→中空锚索注浆。

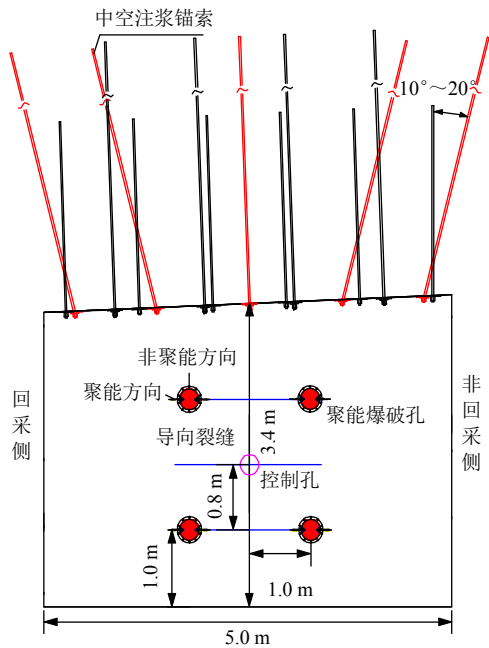


图 16 顶板锚索加固及聚能爆破钻孔布置图

Fig.16 Diagram of anchor cable reinforcement and borehole arrangement for accumulating blasting

表 4 爆破孔参数和装药量

Table 4 Parameters of blast holes and charge weight

巷道名称	炮眼序号	炮眼深度/m	炮孔直径/mm	装药长度/m	装药重量/kg	封孔长度/m
3212 进风巷	1	2	75	1	3.3	1
	2	2	75	1	3.3	1
	3	2	75	1	3.3	1

定向聚能药卷由长 0.5 m，直径 63 mm 的 PVC 管制成，在 PVC 管两侧对称位置设置聚能槽，聚能金属罩采用直径为 20 mm 紫铜制作。在药管内放置传爆体，并装入二级煤矿许用水胶炸药，即制得远距离传爆定向聚能药柱，炸药具体参数见表 5。

表 5 聚能炸药特性参数

Table 5 Parameters of accumulating blasting

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	药柱 长度/m	药柱 直径/mm	单位药量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)
1 090~1 155	6 570	1.0	63.0	3.3

在第一根聚能药卷的顶端沿聚能方向安装导向梭，第二根药卷的底端安装尾塞，导向梭和尾塞之间用连接杆连接。装药时，通过调节连接杆确保聚能方向沿水平方向。为防止爆生气体冲孔，利用水泥砂浆封堵炮孔，封孔长度为 1 m，如图 17 所示。

采用毫秒延期电雷管进行微差控制爆破，为保证药柱在炮孔内正向装药起爆可靠，要求每个爆破

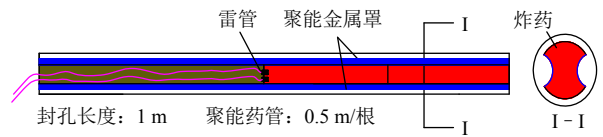


图 17 聚能爆破药卷结构

Fig.17 Structure charge rolls of cumulative blasting

孔安装 2 发同段毫秒延期电雷管，并联引出孔外后封孔，孔与孔之间采用串联网路起爆。

5.3 现场应用效果分析

(1) 爆破振动信号监测分析

为研究爆破应力波对逆断层构造带区域煤岩结构的影响，采用 TOPBOX508 型振动信号仪对爆破振动信号进行监测，在测得的波形图上找出最大振幅，根据最大振幅可以反映出煤体是否被破坏、松动及产生裂隙等。在距离爆破孔聚能方向上 1 m 处和非聚能方向上 1 m 处各挖一个直径约 0.3 m，深约 1.5 m 的孔洞，在孔洞内布置振动信号传感器。

各传感器监测结果如图 18 所示，在聚能方向上距离炮孔 1 m 范围内的岩体受爆破影响程度远大于非聚能方向，聚能方向上离炮孔 1 m 处最大垂向振幅高达 7.94 mm/s。非聚能方向上爆破所产生的振动速度较小，对逆断层构造带煤层的扰动较小。

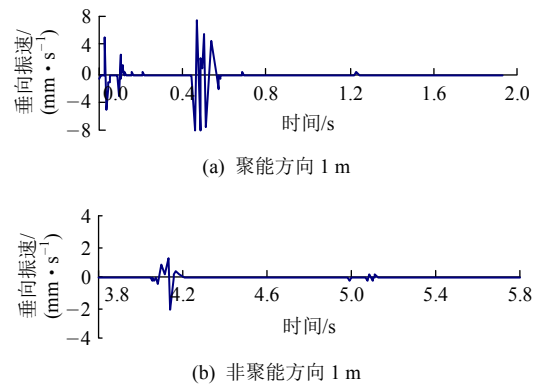


图 18 振动信号监测结果

Fig.18 Wave diagram of self-recording instruments

(2) 钻孔数字成像仪观测

聚能爆破后，利用钻孔数字成像仪对岩体内控制孔进行窥视，岩层距孔口 1.2 m 处的孔内观测情况如图 19 所示，钻孔内岩体破断，整体性降低。

定向聚能爆破后，通过向爆破孔上方的煤层打观测钻孔，煤层的孔内观测情况如图 20 所示。从图中可以看出，煤层内结构相对比较完整，受爆破的影响较小。

(3) 巷道掘进期间维护效果

巷道通过硬岩逆断层后，掘进期间的支护效果



图 19 爆破后岩层 1.2 m 处孔内观测

Fig.19 Observation in hole at 1.2 m of rock after blasting



图 20 爆破后煤层 8.74 m 处孔内观测

Fig.20 Observation in hole at 8.74 m of coal after blasting

如图 21 所示,在掘进期间巷道的围岩变形、顶板离层均控制在合理的范围之内,支护方案达到了预期要求,巷道变形控制效果较好,没有发生煤岩瓦斯动力灾害事故。



图 21 巷道掘进期间维护效果

Fig.21 Maintenance effect during roadway excavation

6 结 论

(1) 爆破应力波从岩层入射到逆断层构造区

域,构造松软煤体和断层面破碎岩体加强爆破应力波的反射拉伸和爆破振动的累积效应导致构造带区域煤岩交界面的煤岩体损伤最为严重,煤岩体的力学性能降低,为煤与瓦斯突出的发生提供了弱面条件,有利于煤与瓦斯突出的发生。

(2) 普通爆破在爆破孔靠近逆断层构造带的一侧底板岩层内破坏比较严重,沿爆破孔右上方逆断层下盘产生爆破粉碎圈,煤层内也损坏严重,爆破裂隙发育,裂隙扩展到了逆断层下盘煤层内;聚能爆破在平行煤层底板的方向上出现 2 条明显的导向裂缝,爆破粉碎区范围减小,非聚能方向上裂纹不明显。断层面附近和上覆煤岩体完整;聚能方向的应力对比普通爆破增加 2 倍左右,非聚能方向的应力减小约 3 倍。

(3) 采用定向聚能控制爆破技术,在聚能方向上使逆断层硬岩断裂破碎,提高了综掘机的破岩速度,非聚能方向上降低了爆破振动,有效减小了爆破载荷对坚硬岩体上方逆断层构造带区域的煤层和破碎岩层以及综掘设备的影响,对巷道开挖后的围岩变形起到了很好的控制作用,具有安全、高效和经济的特点。

参考文献(References):

- [1] 张 超,林柏泉,周 延,等.控制爆破致裂提高矿井瓦斯抽放率试验研究[J].煤炭学报,2014,39(增 1):100-104.(ZHANG Chao, LIN Baiquan, ZHOU Yan, et al. Application of multi-seam metal jet directed pre-split blasting technology in gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Supp.1): 100-104.(in Chinese))
- [2] 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.(in Chinese))
- [3] 余永强,杨小林,梁为民,等.控制爆破致裂提高矿井瓦斯抽放率试验研究[J].煤炭学报,2007,32(4):377-381.(YU Yongqiang, YANG Xiaolin, LIANG Weimin, et al. Testing research of improving mine gas drainage under suction by controlling blasting to cause crack[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 377-381.(in Chinese))
- [4] 郭德勇,张慧杰,吕鹏飞,等.断层对深孔聚能爆破煤层增透的影响[J].北京科技大学学报,2014,36(10):1281-1286.(GUO Deyong, ZHANG Huijie, LU Pengfei, et al. Effect of fault on

- deep-hole cumulative blasting to improve coal bed permeability[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10): 1 281 - 1 286.(in Chinese))
- [5] 穆朝民, 王海露, 黄文尧, 等. 高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2 496 - 2 500.(MU Chaomin, WANG Hailu, HUANG Wenyao, et al. Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2 496 - 2 500.(in Chinese))
- [6] 高 魁, 刘泽功, 刘 健, 等. 深孔爆破在深井坚硬复合顶板沿空留巷强制放顶中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1 588 - 1 594.(GAO Kui, LIU Zegong, LIU Jian, et al. Study on application of deep borehole blasting to gob-side entry retaining forced roof caving in hard and compound roof deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1 588 - 1 594.(in Chinese))
- [7] 何满潮, 郭鹏飞, 张晓虎, 等. 基于双向聚能拉张爆破理论的巷道顶板定向预裂[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 795 - 803.(HE Manchao, GUO Pengfei, ZHANG Xiaohu, et al. Directional pre-splitting of roadway roof based on the theory of bilateral cumulative tensile explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(4): 795 - 803.(in Chinese))
- [8] 何满潮, 高玉兵, 杨 军, 等. 无煤柱自成巷聚能切缝技术及其对围岩应力演化的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, et al. An energy-gathered roof cutting technique in no-pillar mining and its impact on stress variation in surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(in Chinese))
- [9] 郭德勇, 商登莹, 吕鹏飞, 等. 深孔聚能爆破坚硬顶板弱化试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1 149 - 1 153.(GUO Deyong, SHANG Dengying, LÜ Pengfei, et al. Experimental research of deep-hole cumulative blasting in hard roof weakening[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1 149 - 1 153.(in Chinese))
- [10] 刘 健, 刘泽功, 高 魁, 等. 深孔爆破在综放开采坚硬顶煤预先弱化和瓦斯抽采中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 3 361 - 3 367.(LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Application of deep borehole blasting to top-coalpre-weakening and gas extraction in fully mechanized caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 3 361 - 3 367.(in Chinese))
- [11] 汪海波, 徐 轩, 宗 琦, 等. 综掘硬岩段深孔超前爆破研究与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 908 - 915.(WANG Haibo, XU Xuan, ZONG Qi, et al. Research and application of hard rock deep-hole advance blasting in comprehensive roadway excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 908 - 915.(in Chinese))
- [12] 杨仁树, 张召冉, 杨立云, 等. 基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 317 - 323.(YANG Renshu, ZHANG Zhaoran, YANG Liyun, et al. Cumulative blasting experiment study of slotted cartridge based on hard-rock rapid driving technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 317 - 323.(in Chinese))
- [13] 刘 健, 刘泽功, 石必明. 低透气性突出煤层巷道快速掘进的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 827 - 831.(LIU Jian, LIU Zegong, SHI Biming. Study on the roadway excavation rapidly in the low permeability outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 827 - 831.(in Chinese))
- [14] 张春华, 刘泽功, 徐 涛, 等. 石门对掘开急倾斜煤层突出与爆破增透消突技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 85 - 88.(ZHANG Chunhua, LIU Zegong, XU Tao, et al. Coal and gas outburst in steep inclined coal seam uncovered by two reverse drifts and technology of outburst elimination by increasing permeability with blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 85 - 88.(in Chinese))
- [15] 黄文尧, 穆朝民, 宗 琦, 等. 水胶药柱深孔预裂爆破弱化综采面硬岩断层分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(7): 102 - 107.(HUANG Wenyao, MU Chaomin, ZONG Qi, et al. Analysis on weakening hard rock used by long-hole presplitting blast in fully mechanized coal face with water-gel explosive grain[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(7): 102 - 107.(in Chinese))
- [16] 韩 磊, 侯水云, 贾湛永. 深孔预裂爆破弱化坚硬陷落柱技术研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 81 - 84.(HAN Lei, HOU Shuiyun, JIA Zhanyong. Technology research of deep hole presplit blasting for hard collapse column weakening[J]. Coal Engineering, 2018, 50(6): 81 - 84.(in Chinese))
- [17] 国家安全生产监督管理总局和国家煤矿安全监察局. 网站事故调查处理[EB/OL]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/zwgk/tdsgdccl/zwgk_tdsdccl_lm.htm, 2015 - 08 - 15.(State Administration of Safety in Production, State Administration of Coal Mine Safety. Investigation and treatment of accidents on websites[EB/OL]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/zwgk/tdsgdccl/zwgk_tdsdccl_lm.htm, 2015 - 08 - 15.(in Chinese))
- [18] 陈建平, 高文学, 陶连金. 爆破工程地质控制论[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 616 - 619.(CHEN Jianping, GAO Wenxue, TAO Lianjin. Theory of rock blasting control in geology engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 616 - 619.(in Chinese))

- [19] 孙重旭, 孔凡正. 炮采炮掘工作面煤与瓦斯突出的特点与防治[J]. 煤炭工程师, 1998, 25(3): 19 - 22.(SUN Zhongxu, KONG Fanzheng. The characteristics and prevention of coal and gas outburst in blasting mining face[J]. Coal Engineer, 1998, 25(3): 19 - 22.(in Chinese))
- [20] 张子敏, 张玉贵. 大平煤矿特大型煤与瓦斯突出瓦斯地质分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 137 - 140.(ZHANG Zimin, ZHANG Yugu. Investigation into coal-gas outburst occurred in Daping coal mine, by using theories of gas-geology[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 137 - 140.(in Chinese))
- [21] 吕进国, 王 涛, 丁维波, 等. 深部开采逆断层对冲击地压的诱导机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 405 - 416.(LÜ Jinguo, WANG Tao, DING Weibo, et al. Induction mechanisms of coal bumps caused by thrust faults during deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 405 - 416.(in Chinese))
- [22] 胡世丽, 王星光, 王观石. 子波传过软弱夹层的波形变化规律[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1 896 - 1 902.(HU Shili, WANG Xingguang, WANG Guanshi. Waveform change rule of wavelet propagation across soft interlayer[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1 896 - 1 902.(in Chinese))
- [23] 穆朝民, 宫能平. 煤体在冲击荷载作用下的损伤机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2 011 - 2 018.(MU Chaomin, GONG Nengping. Damage mechanism of coal under impact loads[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2 011 - 2 018.(in Chinese))
- [24] 常未斌, 樊少武, 张 浪, 等. 基于爆炸应力波和构造煤带孕育煤与瓦斯突出危险状态的模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2 226 - 2 231.(CHANG Weibin, FAN Shaowu, ZHANG Lang, et al. A model based on explosive stress wave and tectonic coal zone which gestate dangerous state of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2 226 - 2 231.(in Chinese))
- [25] 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.(in Chinese))
- [26] 郭德勇, 裴海波, 宋建成, 等. 煤层深孔聚能爆破致裂增透机理研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1 381 - 1 385.(GUO Deyong, PEI Haibo, SONG Jiancheng, et al. Study on splitting mechanism of coal bed deep-hole cumulative blasting to improve permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1 381 - 1 385.(in Chinese))
- [27] 何满潮, 曹伍富, 单仁亮, 等. 双向聚能拉伸爆破新技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 047 - 2 051.(HE Manchao, CAO Wufu, SHAN Renliang, et al. New blasting technology-bilateral cumulative tensile explosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 047 - 2 051.(in Chinese))
- [28] 宗 琦. 岩石炮孔预切槽爆破断裂成缝机理研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 30 - 33.(ZONG Qi. Investigations into mechanism of fracture formation for grooved hole-well blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 30 - 33.(in Chinese))
- [29] 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.(in Chinese))
- [30] 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 Deyong, ZHAO Jiechao, ZHANG Chao, 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.(in Chinese))