



推荐阅读：

- [综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)
- [高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)
- [超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)
- [风速对近距离煤层采空区漏风及煤自然影响研究](#)
- [深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)
- [水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)
- [巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)
- [高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)
- [高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)
- [寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)
- [我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)
- [基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)
- [松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)
- [综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)
- [我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)
- [高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)
- [原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)
- [不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)
- [顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)
- [煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

毛小艺,马衍坤,赵敖寒.不同介质作用下爆生裂隙的形态特征试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(6):116-121. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.06.014

MAO Xiaoyi, MA Yankun, ZHAO Aohan. Experimental study on morphological characteristics of blasting-induced cracks under the action of different media[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 116-121. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.06.014

# 不同介质作用下爆生裂隙的形态特征试验研究

毛小艺<sup>1,2</sup>,马衍坤<sup>1,2</sup>,赵敖寒<sup>1,2</sup>

(1.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; 2.安徽理工大学 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽 淮南 232001)

**摘要:**为研究不同介质对爆生裂隙形态特征的影响规律,分别开展了空气、水、空气-悬砂颗粒和水-悬砂颗粒作用下的有机玻璃爆破试验,分析了爆生裂隙的长度、宽度和空间偏转角度,得到了爆生裂隙的形态特征和悬砂颗粒在裂隙中的分布规律。试验结果表明:采用水作为介质时,主裂隙的长度和宽度明显大于采用空气作为介质时,分别增大了16.9%和33.3%,可见,含水条件下爆破能量的利用率较高;相比于单纯的空气和水作为介质时,悬砂颗粒的添加使主裂隙长度分别增大了45.2%和45.0%,主裂隙宽度分别增大了133.3%和100.0%。在爆生气体的膨胀作用下,悬砂颗粒被气流带入到爆生裂隙中,很好地支撑了裂隙,使裂隙宽度增大。而且,悬砂颗粒的存在弱化了裂隙扩展的偏转作用,使裂隙偏转角度分布范围分别降低了81.3%和30.0%。试验结论对爆破增透强化瓦斯抽采技术具有一定的理论指导意义。

**关键词:**不同介质;爆生裂隙;悬砂颗粒;爆生气体

**中图分类号:**TD712    **文献标志码:**A    **文章编号:**0253-2336(2020)06-0116-06

## Experimental study on morphological characteristics of blasting-induced cracks under the action of different media

MAO Xiaoyi<sup>1,2</sup>, MA Yankun<sup>1,2</sup>, ZHAO Aohan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for the Safe and Efficient Mining of Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different medium on the morphological characteristics of blasting-induced cracks, the blasting tests of plexiglass under the action of air, water, air-suspended particles and water-suspended particles were carried out respectively. The length, width and spatial deflection angle of blasting-induced cracks were analyzed. The morphological characteristics of blasting-induced cracks and the distribution of suspended particles in the cracks under the action of different medium were obtained. The experimental results show that when water is used as the medium, the length and width of the main crack are significantly larger than that when air is used as medium, which is increased by 16.9% and 33.3% respectively. When pure air and water are used as the medium, the addition of suspended particles increases the length of the main crack by 45.2% and 45.0% respectively and the main crack width increases by 133.3% and 100% respectively. Under the expansion of the explosive gas, the suspended sand particles are brought into the blasting-induced cracks by the airflow, supporting the crack well and increasing the width of the crack. Moreover, the existence of suspended sand particles weakens the deflection of crack propagation, reducing the distribution range of crack deflection angle by 81.3% and 30% respectively. The experiment conclusion has a certain theoretical guiding significance for enhancing gas extraction technology by blasting.

**Key words:** different medium; explosive cracks; suspended sand particles; explosive gas

收稿日期:2019-12-28;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808000);国家自然科学基金面上基金资助项目(51674009);安徽省重点研究与开发资助项目(1704a0802129)

作者简介:毛小艺(1995—),女,浙江丽水人,硕士研究生。E-mail:maoxy107@163.com

通讯作者:马衍坤(1985—),男,山东泰安人,副教授,博士。E-mail:mykunbest@126.com

## 0 引言

深孔预裂爆破是利用炸药爆炸产生的能量在煤层中造成裂隙,为瓦斯运移提供通道,进而提高煤层瓦斯的抽采效率<sup>[1-2]</sup>。

目前国内外学者在空气、水介质爆破方面的研究较为丰富,褚怀保等<sup>[3]</sup>设计模拟了煤体爆破损伤断裂试验,测试煤体中的超声波波速、应变和裂纹扩展速度,发现当介质为空气时,煤体爆破损伤断裂是爆炸应力波、爆生气体、瓦斯和远场应力共同作用的结果;文献[4-6]建立了高速数字图像相关试验系统,通过改变爆破条件,研究有机玻璃板在介质为空气的条件下爆炸应力波与爆生气体对被爆介质的作用,提出爆炸应力波的作用是粉碎区微裂纹形成的主要原因,爆生气体的作用是裂隙区裂纹形成的主要动力,爆生气体不仅具有准静态的“气楔作用”,也具有动态作用;文献[7-9]研究了水压爆破的爆破机理,分析了损伤破坏区域、裂纹形态等爆破效果,发现水压爆破传能效率高,水楔作用效果明显,破碎区能量损耗小;张袁娟<sup>[10]</sup>运用 LS-DYNA 软件分别对水和空气作为间隔介质的露天矿台阶爆破进行数值模拟,并结合现场爆破试验,得出水作为柔性介质可以有效地、均匀地传递爆轰波,使岩石破碎得更加充分。

然而,不论采用空气还是水作为介质,都存在爆破后裂隙受力闭合从而阻塞瓦斯运移通道的问题。为解决爆生裂隙较快被压实的问题,采用悬砂爆破技术,即在药柱与爆破孔间隙内填充悬砂颗粒,爆炸时悬砂颗粒楔入裂隙中,起到支撑裂隙的作用,进而提高瓦斯抽采效率<sup>[11]</sup>。

因此,笔者开展以有机玻璃为研究对象的爆破试验,研究不同介质作用下爆生裂隙的形态特征,并分析悬砂颗粒在裂隙中的分布规律。

## 1 试验方案与步骤

### 1.1 试验方案

本试验选用的模型材料为有机玻璃板(PMMA),在动载荷的作用下,PMMA 表现出和岩石类材料类似的断裂行为<sup>[12-14]</sup>。模型几何尺寸(长度×宽度×厚度)为 300 mm×300 mm×40 mm,模型厚度选取 40 mm,以便更直观地观察分析裂隙的空间偏转以及悬砂颗粒的分布特征。有机玻璃板的各力学参数为:弹性模量为 6.1 GPa,纵波、横波波速分别为 2 320、1 260 m/s,泊松比为 0.31。爆破孔位于模型中心位置,孔径为 12 mm,孔深为 30 mm,如图 1

所示。

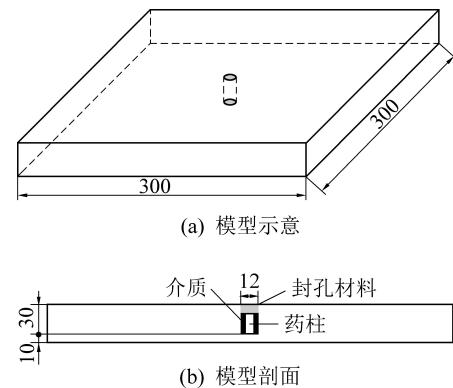


图 1 模型

Fig.1 Model

为研究不同介质作用下爆生裂隙的形态特征,分别开展空气、水、空气-悬砂颗粒和水-悬砂颗粒(悬砂液)作为介质的爆破试验(记作 1—4 号)。试验采用粒径为 0.005 ~ 0.180 mm 的核桃壳颗粒作为悬砂颗粒,悬砂液由蓝墨水和核桃壳颗粒配制而成,3 号模型与 4 号模型悬砂颗粒的添加量相同,均为 8 g。试验采用叠氮化铅(PbN<sub>6</sub>)炸药,药量为 300 mg,药柱直径 10 mm,高度 20 mm。

### 1.2 试验步骤

根据试验方案,进行 4 次爆破试验,试验步骤如下:①将药柱置于 1 号模型爆破孔,并采用环氧树脂胶进行封孔。②将药柱置于 2、3、4 号模型的爆破孔,在药柱与爆破孔的间隙分别填充水、悬砂颗粒和悬砂液,并采用环氧树脂胶进行封孔。③将有机玻璃板模型放入反力系统,施加应力 F 下以减小模型边界的爆破碎片<sup>[15]</sup>,如图 2 所示。④分别起爆 1、2、3、4 号模型,采集爆破后裂隙形态图像,测量裂隙长度、宽度和角度等数据。

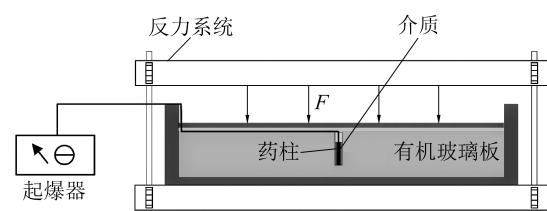


图 2 试验系统

Fig.2 Experimental system

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 爆生裂隙形态

有机玻璃模型爆破后的裂隙形态呈现为主裂隙和次裂隙 2 类,如图 3 所示。其中主裂隙贯穿模型上下表面,次裂隙未贯穿模型上下表面,部分次裂隙为主裂隙的分支裂隙。笔者主要针对主裂隙的形态

特征展开分析讨论。



图3 爆生裂隙形态

Fig.3 Explosive crack pattern

为研究爆生裂隙的分布特征,分析裂隙宽度变化及偏转特征,选取爆破孔中心为坐标原点,有机玻璃板平行两边中点连线为x轴、y轴建立二维坐标系;同时选取爆破孔中心为圆心,爆破孔壁面为起点,步长为15 mm,绘制多个等距同心圆,圆形与裂隙上、下表面的交点即测点,裂隙的起始点和终止点也为测点,如图6所示,图中实线为裂隙上表面,虚

线为裂隙下表面。使用型号为 MG10085-1A 100×读数显微镜观测测点处裂隙宽度,如图4所示。

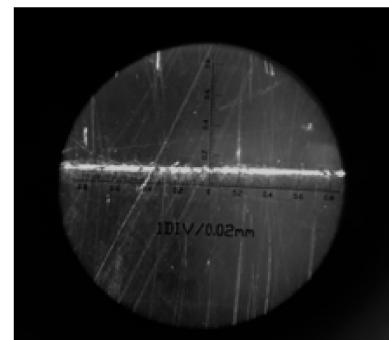


图4 裂隙宽度观测示意

Fig.4 Crack width observation

## 2.2 爆生主裂隙的长度变化

使用毫米刻度尺分别测量主裂隙上下表面的长度,并计算上下表面裂隙长度的平均值,见表1。

表1 主裂隙长度

Table 1 Main crack length

模型 编号	裂隙 编号	裂隙长度 $l_i/\text{mm}$		
		上表面	下表面	平均值
1	1	51.1	56.5	53.8
	2	30.4	29.9	30.2
	3	45.1	40.5	42.8
2	1	55.6	70.2	62.9
	2	35.4	31.9	33.7
	3	29.2	29.8	29.5
3	1	72.9	66.4	69.7
	2	79.5	74.5	77.0
	3	78.1	78.1	78.1
4	1	60.1	53.6	56.9
	2	100.9	81.5	91.2
	3	84.1	68.8	76.5

由表1可知,当介质为空气、水、空气-悬砂颗粒和水-悬砂颗粒时,主裂隙长度分别能达到53.8、62.9、78.1、91.2 mm。采用水作为介质时的主裂隙长度比采用空气作为介质时的主裂隙长度增大了16.9%,可见含水条件下爆破能量的利用率较高。

3号模型(介质为空气-悬砂颗粒)的主裂隙长度比1号模型(介质为空气)的主裂隙长度增大了45.2%;4号模型(介质为水-悬砂颗粒)的主裂隙长度比2号模型(介质为水)的主裂隙长度增大了45.0%,可见,相比于单纯的空气和水作为介质时,悬砂颗粒的添加都会使主裂隙长度显著增大。

## 2.3 爆生主裂隙的宽度变化

测量不同测点处主裂隙宽度并记录数据,主裂

隙的宽度变化趋势如图 5 所示。在相同介质条件下,随着测点与爆破孔之间距离的增加,主裂隙的宽度普遍呈现降低的趋势,即裂隙测点与爆破孔距离越远,裂隙宽度越小,符合爆破能量衰减规律<sup>[16-17]</sup>。

当介质为空气时,主裂隙最大宽度为 0.03 mm;当介质为水时,主裂隙最大宽度为 0.04 mm,水介质作用下的主裂隙宽度比空气介质作用下的主裂隙宽度增大了 33.3%。当介质为空气-悬砂颗粒时,主裂

隙最大宽度为 0.07 mm;当介质为水-悬砂颗粒时,主裂隙最大宽度为 0.08 mm,可见,相比于单纯的空气和水作为介质时,悬砂颗粒的添加使主裂隙宽度分别增大了 133.3% 和 100.0%。炸药爆炸后,爆生气体迅速膨胀,推动介质楔入裂隙。当介质为空气-悬砂颗粒或水-悬砂颗粒时,悬砂颗粒进入裂隙中,起到支撑裂隙的作用,此时裂隙宽度达到最大值<sup>[18-20]</sup>。

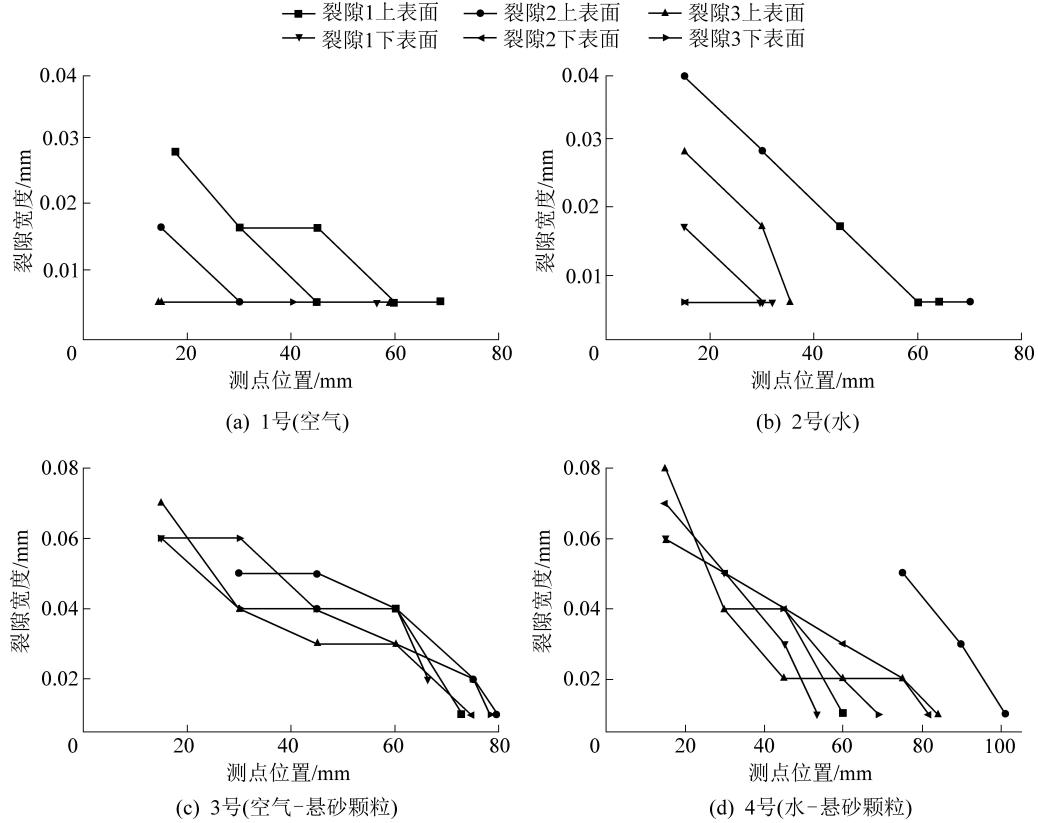


图 5 主裂隙宽度变化趋势

Fig.5 Main crack width change trend

## 2.4 裂隙空间偏转及悬砂颗粒分布特征

### 2.4.1 裂隙空间偏转特征

通过建立二维坐标系分析主裂隙的形态特征,如图 6 所示,其中实线表示裂隙上表面,虚线表示裂隙下表面,裂隙上下表面的夹角为裂隙的偏转角。

爆破过程中裂隙会发生不同程度地偏转,主裂隙偏转角度如图 6 所示。对比 1 号模型与 3 号模型,当介质为空气时,偏转角度最小值为 4°,最大值为 20°;当介质为空气-悬砂颗粒时,偏转角度最小值为 6°,最大值为 9°。对比 2 号模型和 4 号模型,当介质为水时,偏转角度最小值为 2°,最大值为 12°;当介质为水-悬砂颗粒时,偏转角度最小值为

5°,最大值为 12°。相比于单纯的空气和水作为介质时,悬砂颗粒的添加使裂隙偏转角度分布范围分别降低了 81.3% 和 30.0%,可见,悬砂颗粒的存在弱化了裂隙扩展的偏转作用。

### 2.4.2 悬砂颗粒分布特征

依照实物中观察到的悬砂颗粒分布位置在图中进行标记,如图 6 黑点所示。悬砂颗粒在裂隙中呈现不均匀分布,且主要集中在裂隙的前中部,证明了爆生气体对悬砂颗粒的推动作用。在裂隙形成过程中,悬砂颗粒楔入裂隙起到支撑作用,裂隙进一步扩展后,粒径较大的悬砂颗粒无法向前运动而滞留,粒径较小的悬砂颗粒则继续运动直至无法向前运动。

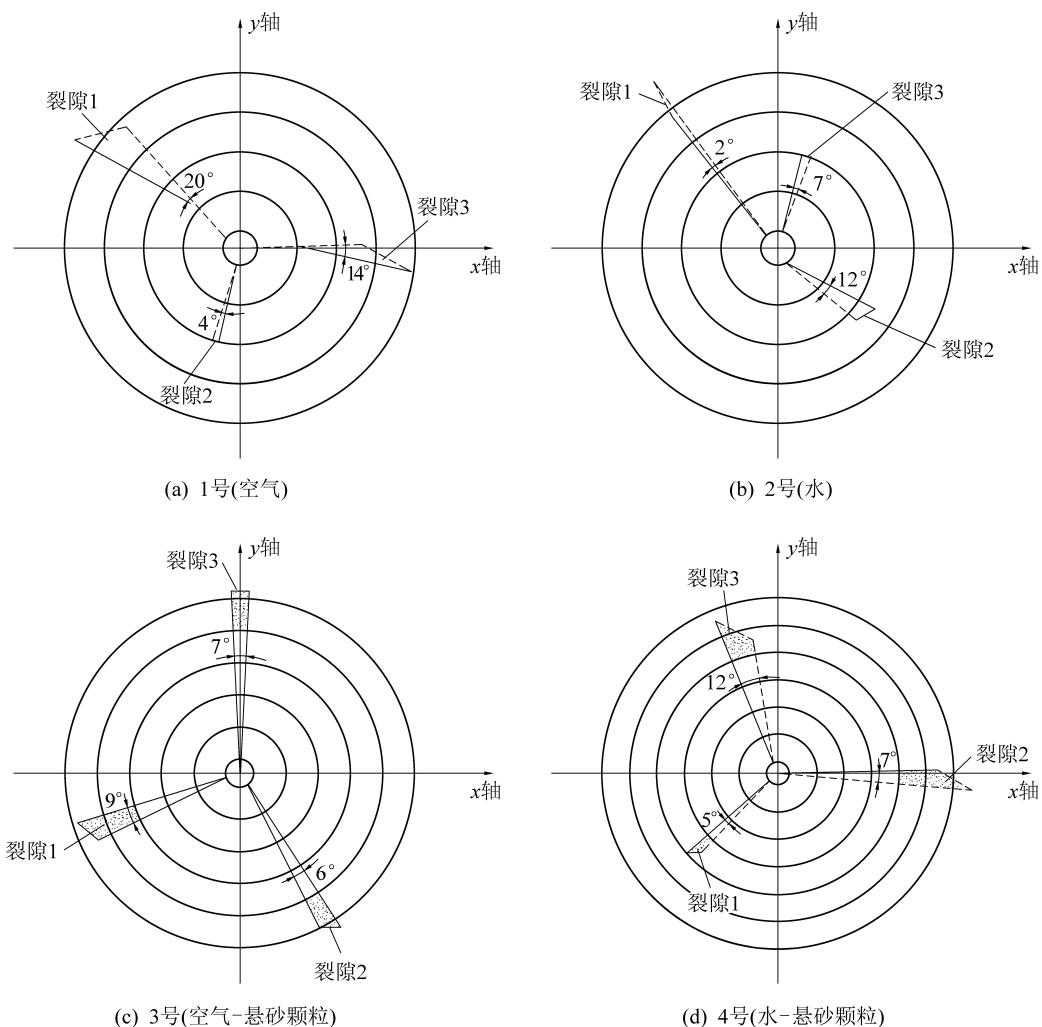


图6 主裂隙的偏转及悬砂颗粒的分布

Fig.6 Deflection of the main crack and the distribution of suspended sand particles

### 3 结 论

1) 通过分析空气、水、空气-悬砂颗粒和水-悬砂颗粒介质作用下的主裂隙长度,发现水介质作用下主裂隙的长度明显大于空气介质作用下,可见含水条件下爆破能量的利用率较高,且悬砂颗粒的添加使主裂隙长度显著增大。

2) 通过分析空气、水、空气-悬砂颗粒和水-悬砂颗粒介质作用下的主裂隙宽度,发现当介质为空气-悬砂颗粒或水-悬砂颗粒时,裂隙最大宽度增加。可见爆破作用下水、空气携砂楔入裂隙起到支撑裂隙的作用,从而解决爆生裂隙较快被压实的问题。

3) 爆破过程中裂隙会发生不同程度地偏转,而悬砂颗粒的存在弱化了裂隙扩展的偏转作用,使裂隙偏转角度分布范围减小。

4) 裂隙形成过程中,悬砂颗粒楔入裂隙,并在裂隙中呈不均匀分布,且主要集中在裂隙的前中部。

### 参考文献(References) :

- [1] 贾腾,黄长国,刘公君,等.不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):109-113.  
JIA Teng, HUANG Changguo, LIU Gongjun, et al. Study on gas drainage boreholes with different space distances between boreholes affected to pre-cracking blasting enhancement effect of deep boreholes[J]. Coal Science and Technology, 2018,46(5):109-113.
- [2] 赵宝友,王海东.深孔爆破技术在高地应力低透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. Applicability of deep hole blasting technology in increasing permeability and preventing outburst in high ground stress, low permeability and high gas coal seam[J]. Explosion and Shock Waves,2014,34(2):145-152.
- [3] 褚怀保,杨小林,梁为民,等.煤体爆破损伤断裂过程与机理研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(2):410-414.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, LIANG Weimin, et al. Study on the damage-fracture process and mechanism of coal blasting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(2):410-414.

- [4] YANG Renshu, DING Chenxi, YANG Liyun, *et al.* Visualizing the blast-induced stress wave and blasting gas action effects using digital image correlation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112:47-54.
- [5] 杨仁树,左进京,杨立云,等.爆炸应力波作用下动、静裂纹相互作用的实验研究[J].爆炸与冲击,2017,37(6):952-958.
- YANG Renshu, ZUO jinjing, YANG Liyun, *et al.* Experimental study on interaction of dynamic and static cracks under the action of explosion stress wave [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37 (6): 952-958.
- [6] 杨仁树,丁晨曦,王雁冰,等.爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35 (S2): 3501-3506.
- YANG Renshu, DING Chenxi, WANG Yanbing, *et al.* Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (S2): 3501-3506.
- [7] 蔡永乐,付宏伟.水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究[J].煤炭学报,2017,42(4):902-907.
- CAI Yongle, FU Hongwei. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 902-907.
- [8] 孙婷,李科.水压爆破在煤矿中的应用研究[J].煤炭技术,2019,38(2):47-49.
- SUN Ting, LI Ke. Application of hydraulic blasting in coal mines [J]. Coal Technology, 2019, 38(2): 47-49.
- [9] 夏彬伟,刘承伟,卢义玉,等.缝槽水压爆破导向裂隙扩展实验研究[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.
- [10] 张袁娟.不同间隔介质对爆破效果影响研究[J].化工矿物与加工,2019,48(1):1-3,6.
- ZHANG Yuanjuan. Study on the influence of different spaces on blasting effect [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019, 48 (1):1-3,6.
- [11] 马衍坤.一种悬渣水封爆破增透与抽采瓦斯的方法:中国,201710356183.4[P].2017-09-22.
- [12] 杨仁树,苏洪.爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究[J].煤炭学报,2019,44(2):482-489.
- YANG Renshu, SU Hong. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosion load [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 482-489.
- [13] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, NASMILLNER R E K, *et al.* Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008, 20(11):1617-1636.
- [14] 李清,于强,朱各勇,等.不同药量的切缝药包双孔爆破裂纹扩展规律试验[J].岩石力学与工程学报,2017,36 (9): 2205-2212.
- LI Qing, YU Qiang, ZHU Geyong, *et al.* Experimental study of crack propagation under two-hole slotted cartridge blasting with different amounts of charge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (9): 2205-2212.
- [15] HE Chenglong, YANG Jun. Experimental and numerical investigations of dynamic failure process in rock under blast loading [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 552-564.
- [16] 蒋复量,周科平,邓红卫,等.基于小波理论的井下深孔爆破振动信号辨识与能量衰减规律分析[J].煤炭学报,2011,36 (S2):396-400.
- JIANG Fuliang, ZHOU Keping, DENG Hongwei, *et al.* The underground mine's deep-hole blasting vibration signals' identification and energy attenuation law's analysis based on wavelet theory [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36 (S2): 396-400.
- [17] 陶铁军,汪旭光,池恩安,等.基于能量的爆破地震波衰减公式[J].工程爆破,2015,21(6):78-83.
- TAO Tiejun, WANG Xuguang, CHI En'an, *et al.* Attenuation formula of blasting seismic wave based on energy theory [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(6):78-83.
- [18] LAK M, MARJI M F, BAFGHI A Y, *et al.* A coupled finite difference-boundary element method for modeling the propagation of explosion-induced radial cracks around a wellbore [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 64:41-51.
- [19] 杨仁树,左进京,李永亮,等.不同切缝管材下切缝药包爆炸冲击波传播特性研究[J].中国矿业大学学报,2019,48 (2): 229-235.
- YANG Renshu, ZUO Jinjing, LI Yongliang, *et al.* Experimental study of slotted cartridge explosion shock wave propagation characteristic with different cutting seam pipe material [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48 (2): 229-235.
- [20] 孙可明,王金彧,辛利伟.不同应力差条件下超临界CO<sub>2</sub>气爆煤岩体气楔作用次生裂纹扩展规律研究[J].应用力学学报,2019,36 (2):466-472,516.
- SUN Keming, WANG Jinyu, XIN Liwei. Study on secondary crack propagation law of gas wedge in supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion coal under different stress differences [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36 (2): 466-472,516.