



## 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究

张鑫 刘泽功 张健玉 傅师贵 乔国栋 杨帅 常帅

### 引用本文：

张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 89–100.  
ZHANG Xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu. Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 89–100.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1622>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究

Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 50–64 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1042>

##### 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-c4ea8f766a54>

##### 松软煤层底板爆破致裂增透模拟试验研究及应用

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

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 102–110 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0914>

##### 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究

Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 79–88 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0852>

##### 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>

##### 煤岩定向射孔对水力压裂裂纹扩展影响的研究

Numerical study on the effect of directional perforation in coal on crack propagation in hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 129–134 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52dd2b90-46ca-4c2f-85d0-f6663d46a2da>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 安全科学与工程



张 鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 89–100.

ZHANG Xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 89–100.

移动扫码阅读

# 深部高瓦斯煤层爆破致裂增透裂纹扩展规律研究

张 鑫<sup>1</sup>, 刘泽功<sup>1,2</sup>, 张健玉<sup>1</sup>, 傅师贵<sup>1</sup>, 乔国栋<sup>1</sup>, 杨 帅<sup>1</sup>, 常 帅<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 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:** 针对深部高瓦斯煤层在地应力作用下爆破增透时裂纹扩展规律尚不明确的问题, 首先根据爆破应力波的传播和叠加, 从理论上分析了地应力和爆破荷载耦合作用下炮孔周围的应力分布规律; 然后通过室内试验研究了不同地应力条件下单孔爆破裂纹扩展特征, 在此基础上, 对不同侧压系数下双孔爆破裂纹扩展机理以及贯通过程进行数值模拟研究, 并结合 ImageJ 图像识别软件和 LS-PrePost 软件, 以裂纹密度和扩展长度为量化指标表征地应力对裂纹发育程度的影响; 最后根据室内试验和数值模拟研究结果, 给出考虑地应力影响下的煤层爆破致裂增透爆破孔布置方案建议。单孔爆破室内试验结果表明: 地应力可以减小爆破荷载引起的拉应力, 从而抑制裂纹扩展; 在非静水地应力条件下, 与较大主应力方向正交的拉应力受到削弱, 导致该方向的裂纹扩展受到抑制, 使裂纹优先向高应力方向扩展; 双孔爆破数值模拟研究结果表明: 侧压系数不为 1 时, 爆生裂纹扩展呈现出方向性, 主裂纹倾向于向较高地应力方向扩展, 造成爆破裂纹区域呈椭圆形, 长轴和较大地应力方向一致。根据室内试验和数值计算结果, 在深部煤层进行爆破致裂增透时, 宜沿较大地应力方向钻孔, 有利于提高爆破致裂增透效果。研究成果对深部高瓦斯煤层爆破增透时了解裂纹扩展机理以及优化炮孔布置方案具有指导意义。

**关键词:** 高瓦斯煤层; 地应力; 裂纹扩展; 裂隙区范围; 爆破增透

**中图分类号:** TD712    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-2336(2024)07-0089-12

## Study on propagation law of cracking and permeability enhancement caused by blasting in deep high-gas coal seams

ZHANG Xin<sup>1</sup>, LIU Zegong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianyu<sup>1</sup>, FU Shigui<sup>1</sup>, QIAO Guodong<sup>1</sup>, YANG Shuai<sup>1</sup>, CHANG Shuai<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Aiming at the problem that the crack extension law of deep high-gas coal seams is not clear during blasting and permeability enhancement under the action of ground stress, firstly, according to the propagation and superposition of blasting stress wave, the stress distribution law around the blast hole under the coupling effect of ground stress and blasting was theoretically analyzed. Then, the crack extension characteristics of single-hole blasting under different ground stress conditions were investigated through laboratory tests, on the basis, the numerical simulation was carried out to investigate the crack extension mechanism and the penetration process of double-hole blasting under different lateral stress coefficients, and combined with the ImageJ image recognition software and LS-PrePost software, the effect of ground stress on the degree of crack development was characterized using crack density and extension length as a quantitative index. Finally, based on the results of laboratory test and numerical simulation, the layout scheme of coal seam blasting holes for cracking

收稿日期: 2023-11-06    责任编辑: 宫在芹    DOI: 10.12438/cst.2023-1622

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074013); 安徽理工大学 2023 年研究生创新基金资助项目(2023CX1004)

作者简介: 张 鑫(1997—), 男, 云南镇雄人, 博士研究生。E-mail: 885729904@qq.com

通讯作者: 刘泽功(1960—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士。E-mail: zgliu@aust.edu.cn

and permeability enhancement considering the influence of ground stress was proposed. The results of single-hole blasting laboratory test shown that, the ground stress can reduce the tensile stress induced by the blasting load and thus inhibit crack extension. Under the condition of non-hydrostatic ground stress, the tensile stresses orthogonal to the direction of the larger principal stresses were weakened, resulting in the inhibition of crack extension in this direction, causing the cracks to preferentially extend in the direction of higher stresses. The numerical simulation results of double-hole blasting shown that, when the lateral stress coefficient was not 1, the blasting crack expansion was directionality, and the main crack tended to expand in the direction of higher ground stress, resulting in an elliptical shape of the blast crack area, and the direction of the long axis and the larger in-situ stress were consistent. According to the results of laboratory tests and numerical calculations, it was advisable to drill holes along the direction of large ground stress to improve the effect of fracturing and permeability when blasting in deep coal seams. The research results are of great significance for understanding the crack expansion mechanism and optimizing the blast hole layout scheme when blasting for permeability enhancement in deep high-gas coal seams.

**Key words:** high gassy coal seam; in-situ stress; crack propagation; crack propagation scope; blasting increasing permeability

## 0 引言

随着社会经济的不断发展,对矿产资源的需求持续增加。目前,越来越多的矿山资源开采项目正进入深部开采阶段。全球已经有200多座矿山深度超过1000 m,分布在中国、南非、加拿大、德国、俄罗斯、澳大利亚等国家,其中以南非居多,我国已经超过澳大利亚,位列全球第三<sup>[1]</sup>。与浅部矿产资源相比,深部资源处在高地应力赋存的复杂环境中,导致瓦斯抽采变得更加困难,同时增加了煤与瓦斯突出的风险<sup>[2]</sup>。为了应对高瓦斯突出煤层的挑战,降低瓦斯抽采的阻力,深孔爆破致裂技术成为瓦斯治理工程中主要方法之一<sup>[3]</sup>。深孔爆破致裂技术利用炸药爆炸产生应力波和爆炸气体的作用,从而在煤层周围形成复杂密集的裂隙网络。这些裂隙网络改变了局部煤层的应力状态,增加了游离瓦斯的含量,从而提高瓦斯抽采的效率,同时降低了煤与瓦斯突出的风险<sup>[4]</sup>。近年来,随着资源开采越来越深,地应力对爆破致裂增透的影响越来越受到重视,对于地应力和爆破荷载耦合作用下岩石破裂和损伤机理,国内外学者进行了大量的试验与数值模拟研究,YANG等<sup>[5]</sup>通过焦散线试验研究发现初始静应力和爆破载荷的组合作用使得最长岩石裂纹优先向较大主应力方向扩展;XIE等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法研究了初始应力条件下切孔爆破的裂纹扩展和损伤演化过程,结果表明,初始应力对爆破产生的径向压应力和拉应力分别起到增强和削弱作用;LI等<sup>[7]</sup>对高地应力下爆破裂缝扩展进行了数值研究,发现由于拉应力受到削弱,垂直于裂缝扩展方向的静应力抑制了径向裂缝扩展,因此裂缝长度随着静应力的增加而减小,爆破产生的裂纹主要在较大主应力方向发育;杨建华等<sup>[8-9]</sup>利用SPH-FEM耦合方法通过数值模拟研究得到随围岩地应力的增大,裂隙扩展范围缩小,并且

裂隙朝着较大主应力方向扩展;李新平等<sup>[10]</sup>利用LS-DYNA软件对不同地应力水平下的掏槽爆破进行了数值模拟研究,结果表明初始应力对掏槽爆破起制约作用;赵建平等<sup>[11]</sup>基于HJC本构建立数值模型研究了不同埋深情况下岩石爆破损伤演化规律,结果表明,地应力能够抑制损伤裂纹的扩展,裂纹更偏向于较大地应力方向扩展;GE等<sup>[12]</sup>研究了初始应力下岩石爆破裂纹的发育情况,随着静载压力的增加,裂缝的长度和数量减少,对材料的损伤也相应减少。梁瑞等<sup>[13]</sup>采用数值模拟方法研究了不同地应力及不同侧压系数条件下岩体爆破损伤机理,结果表明,地应力制约了岩体的损伤范围和裂纹扩展,且损伤范围和裂纹扩展随着地应力的增大而逐渐减小;丁晨曦等<sup>[14]</sup>基于二维平面应变模型通过数值模拟研究了地应力对掏槽爆破破裂损伤特征的影响,结果表明,地应力削弱了孔间应力波相互作用,抑制了径向裂纹的扩展。

上述研究主要集中于地应力作用下岩石和有机玻璃爆破裂纹扩展规律,但煤体相对于岩石及有机玻璃等介质,内部结构及其力学性质更为繁杂。与浅部煤层相比,深部煤体处在高地应力赋存的复杂环境中,力学性质方面也存在差异,相关爆破煤体损伤及裂纹演化特征方面研究较多,而关于地应力和不同侧压系数对煤体爆破致裂影响方面研究较少。同时,在以上研究中,大部分研究结果是仅通过数值模拟得到,没有结合室内试验验证或进一步拓展研究。因此,有必要对地应力和爆破荷载耦合作用下爆破孔周围径向裂纹的扩展行为、特征和机理进行深入系统的研究。

综上所述,研究通过理论分析、室内试验和数值模拟相结合的方法,进一步研究了地应力和爆破荷载共同作用下爆破孔周围径向裂纹开裂行为及其机理。首先通过单孔爆破试验研究了地应力对裂纹扩

展影响。然后利用 LS-DYNA 软件对不同侧压系数下双孔爆破裂纹演化过程进行了模拟。最后根据以上分析结果, 提出了提高地应力作用下深部煤层爆破致裂效果的优化措施。

## 1 地应力对煤岩体单孔爆破致裂影响

爆破荷载与地应力耦合作用下煤体单元应力分布如图 1 所示。

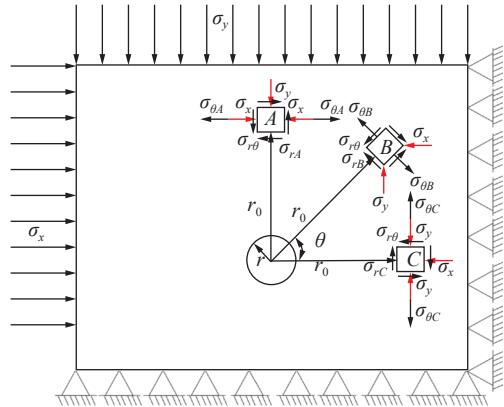


图 1 钻孔周围单元应力分布

Fig.1 Stress distribution of units outside stress concentration area around borehole

钻孔受垂直应力  $\sigma_y$  以及水平应力  $\sigma_x$  作用, 并假设  $\sigma_y$  和  $\sigma_x$  存在以下关系:

$$\begin{cases} \sigma_x = \lambda H \\ \sigma_y = H \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为侧压系数;  $\sigma_y$  为垂直应力, MPa;  $\sigma_x$  为水平应力, MPa。

假设作用于煤岩体中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  点的爆破荷载为  $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ , 对应径向压应力为  $\sigma_{rA}$ 、 $\sigma_{rB}$ 、 $\sigma_{rC}$ , 衍生出来的切向拉应力为  $\sigma_{\theta A}$ 、 $\sigma_{\theta B}$ 、 $\sigma_{\theta C}$ 。在爆破荷载作用下, 冲击波在煤岩体中不断衰减为应力波。煤岩体中任意一点的径向和切向应力在柱状耦合装药形式下<sup>[15]</sup>可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rB} = \frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho_0 D} \frac{1}{1 + \gamma} \rho_0 D^2 \bar{r}^{-\alpha} \\ \sigma_{\theta B} = -\frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho_0 D} \frac{1}{1 + \gamma} \rho_0 D^2 \bar{r}^{-\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{rB}$  为爆炸引起的径向应力, MPa;  $\sigma_{\theta B}$  为爆炸引起的切向应力, MPa;  $\rho$  为煤岩密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_0$  炸药密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为煤岩中的声速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D$  为炸药的爆速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\gamma$  为爆轰产物的膨胀绝热指数, 一般取 3;  $\mu_d$  为煤岩的动态泊松比;  $\bar{r}$  为煤体中任意点到爆破孔中心距离与爆破孔半径的比值。

在地应力作用下  $B$  点煤体单元形成的径向和切向应力<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_q = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_y) \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right) + (\sigma_x - \sigma_y) \times \right. \\ \left. \left( 1 - 4 \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 + 3 \left( \frac{r}{r_0} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_p = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_y) \left( 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right) - (\sigma_x - \sigma_y) \times \right. \\ \left. \left( 1 + 3 \left( \frac{r}{r_0} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right] \end{cases} \quad (3)$$

对于水平方向地应力和垂直方向地应力相等情况下( $\lambda=1$ ), 距钻孔中心  $r_0$  处的径向和切向应力为

$$\begin{cases} \sigma_q = \sigma_x \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \\ \sigma_p = \sigma_x \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (4)$$

煤岩体在地应力与爆破载荷耦合作用下任意点处的应力, 其耦合径向和切向应力表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \sigma_{rB} + \sigma_q \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta B} - \sigma_p \end{cases} \quad (5)$$

联合式(2)—式(5)可得:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho_0 D} \frac{1}{1 + \gamma} \rho_0 D^2 \bar{r}^{-\alpha} + \sigma_x \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \\ \sigma_{\theta\theta} = -\frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \frac{2\rho c_p}{\rho c_p + \rho_0 D} \frac{1}{1 + \gamma} \rho_0 D^2 \bar{r}^{-\alpha} - \\ \sigma_x \left( 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{rr}$  为地应力与爆破载荷耦合作用下的径向应力, MPa;  $\sigma_{\theta\theta}$  为地应力与爆破载荷耦合作用下的切向应力, MPa。

煤作为典型脆性岩石, 具有抗压不抗拉的特征, 因此可以认为在爆破中远区煤遭受破坏主要受拉应力作用。当环向拉应力超过煤岩体抗拉强度时, 就会产生径向裂纹。由式(6)可知, 地应力的存在会削弱由爆破荷载衍生出来的拉应力。在爆破中远区地应力产生的压应力与爆破荷载衍生出来的切向拉应力叠加后, 导致其减小, 有可能叠加后的切向拉应力小于煤体的抗拉强度, 从而抑制爆生裂隙扩展的长度, 使得爆破有效致裂范围减小。

## 2 爆破相似模拟试验

### 2.1 试验平台搭建

本次试验装置为课题组自主研制, 如图 2 所示。

采用Q345的槽钢焊接成外部尺寸为110 cm×35 cm×80 cm试验箱体,在钢板和箱体间布置有高强度的硅胶垫片,有效保障箱体密封性。在箱体水平方向和垂直方向分别布置了水平加载系统和垂直加载系统。在左边界和下边界分别利用钢板和内部腔体的下侧施加对试块的位移约束。

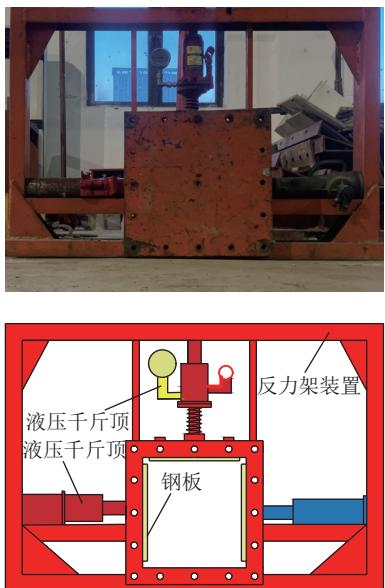


图2 爆破试验箱体示意

Fig.2 Schematic diagram of blasting test chamber

## 2.2 试验模型的建立

试验原始背景为淮南矿区的C13-1煤层,该煤层主要存在透气性较低、瓦斯赋存含量大的问题,平均埋深为1000 m。选取C13-1煤层和岩层作为研究对象进行相似模拟,具体见表1。

表1 原岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of raw rock

岩性	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
中砂岩	2.52	24.30	0.24	5.419
煤层	1.42	5.32	0.32	0.450

相似模拟试验以相似原理为理论基础,其中几何等各物理量之间需要对应的成一定比例关系<sup>[17]</sup>。其中,几何相似比例系数 $\alpha_l=l_p/l_m$ , $l_p$ 为原始现场的尺寸, $l_m$ 为相似模型的尺寸,考虑到原岩煤层厚度、实验室装置的尺寸和试验最终效果等因素,本次试验 $\alpha_l$ 的取值为20;容重系数 $\alpha_r=\gamma_p/\gamma_m$ , $\gamma_p$ 为原型岩层的容重,平均为2.5 N/cm<sup>3</sup>, $\gamma_m$ 为模型的平均密度,一般 $\gamma_m$ 在1.5~1.8 N/cm<sup>3</sup>较合适,密度如果过大,试验时很难把模型夯实,过小养护困难而且容易分裂不成型。本试验中, $\gamma_m$ 为1.6 N/cm<sup>3</sup>,因此计算可得 $\alpha_r=$

1.5;动力相似系数 $\alpha_e=\alpha_r\alpha_l$ ,计算可得 $\alpha_e=30$ 。

此次试验地应力加载方案通过对全国实际测得地应力进行统计研究后进行确定,我国地应力大小随不同埋深变化见表2<sup>[18]</sup>。

表2 不同埋深下我国实测地应力平均值

Table 2 Average measured in-situ stress in China at different buried depths

埋深/m	100	350	850	1 500	2 500
$\sigma_h/\text{MPa}$	8.0	12.9	29	47.1	66.4
$\sigma_v/\text{MPa}$	3.8	7.8	13.7	28.6	44.7
$\sigma_b/\text{MPa}$	2.5	9.4	21.4	36.7	60.6

利用计算机软件对表2中最大水平主应力 $\sigma_h$ 、垂直主应力 $\sigma_v$ 、最小水平主应力 $\sigma_b$ 进行线性拟合后可得到以下规律:①地应力随深度的增加而增大;②水平地应力随深度的增加占据主导作用;③ $\sigma_h$ 与 $\sigma_v$ 的比值范围主要在1~3; $\sigma_b$ 与 $\sigma_v$ 的比值范围主要在0.5~2.0;平均水平主应力与垂直主应力比值大多介于1.0~2.5。

因此,在此次试验中侧向应力系数 $\lambda$ 取1.5进行计算,模型自重应力为

$$\sigma_z = \gamma h \quad (7)$$

式中: $\gamma$ 为模型容重,N/cm<sup>3</sup>, $h$ 为深度,m。

工程背景煤层的平均埋深为1000 m,则原型所受载荷为24.7 MPa,试验上方垂直地应力需要补偿的载荷为 $\sigma_m=\sigma_z/\alpha_e=0.823$  MPa,则水平地应力需要补偿的载荷为1.23 MPa。

基于量纲分析理论,爆炸相似需保证模型与原型的以下3个无量纲量相等<sup>[19]</sup>,爆炸荷载相似关系及装药量由式(8)计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{e}{\rho g H^3} \\ \pi_2 = \frac{e}{\sigma H^2} \\ \pi_3 = \frac{\sigma}{\rho_B D^2} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: $e$ 为炸药单位长度能量,J/m; $\rho$ 为介质密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_B$ 为炸药的装药密度,kg/m<sup>3</sup>; $D$ 为炸药爆速,m/s; $\sigma$ 为介质的强度,MPa; $H$ 为特征尺寸,m。

模型使用的炸药为矿用三级水胶炸药,根据爆炸相似性分析由实际现场爆破使用的装药量可得水胶炸药量为3.2 g,使用8号雷管引爆。

模型的材料配比通过多组材料配比试验而确定,见表3。

本次单孔爆破室内试验共有3组试验试块,具

体尺寸如图3所示。加载地应力工况具体见表4。

爆破孔布置在试块中心位置处,爆破孔孔深和孔径分别为15、2 cm,如图3所示。

表3 爆破模拟试验材料配比参数

Table 3 Material ratio parameters of blasting

simulation test

岩性	砂子	水泥	石膏	水	煤粉	g
岩层	6.10	1.15	0.62	0.77	0	
煤层	1.85	0.22	0.79	1.69	1.98	

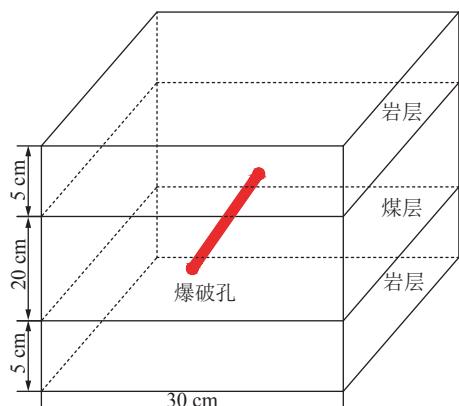


图3 方案试块模型

Fig.3 Model diagram of test block

表4 室内试验地应力加载情况

Table 4 In-situ stresses in different conditions

工况	$\sigma_x$ /MPa	$\sigma_y$ / MPa	$\lambda$
1	0	0	—
2	0.823	0.823	1.0
3	1.230	0.823	1.5

### 2.3 试验模型制作和数据测试系统

在煤岩体试块中爆破孔水平和垂直方向分别布置1个应变砖,记录此应力测点受爆炸荷载作用的应力状态。应变砖距离爆破孔的水平距离均为4 cm。利用钢板制作成内部腔体尺寸为30 cm×30 cm×30 cm的可拆卸钢板浇筑试验模型,将水泥等材料搅拌均匀后开始浇筑,浇筑煤层时在预定位置预留好爆破孔,具体制作流程如图4所示。

制作好的试块在室温下养护28 d后从钢板中取出,并移入试验箱体。试验时,按照各试块工况操作液压千斤顶使垂直和水平方向地应力载荷达到预定大小,随后装入制作好的药管,用炮泥封好孔后,连接起爆线与起爆器,进而检查超动态应变仪上的激发电压是否稳定后,便进行试验。试验现场如图5所示。

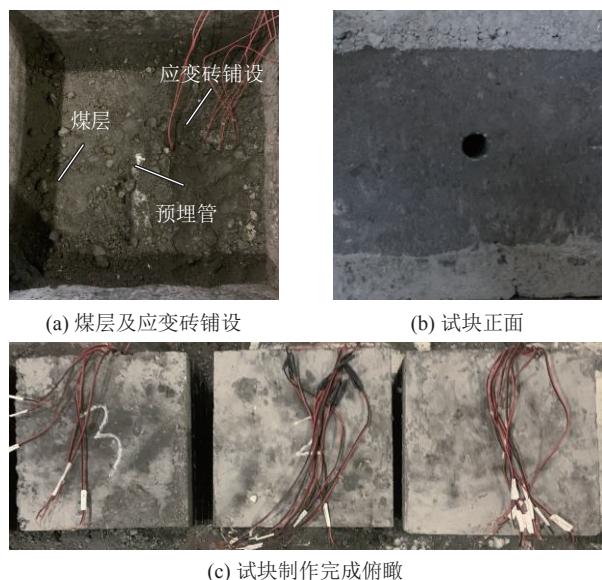


图4 试块制作过程

Fig.4 Strain gauge brick laying and test block making



图5 爆破试验系统和数据检测系统

Fig.5 Blasting test system and data detection system

## 3 地应力作用下单孔爆破试验

### 3.1 地应力作用下炮孔孔壁及周围应力分布

炮孔孔壁及周围的应力分布变化可通过MATLAB软件自编程序计算地应力作用下形成的径向和切向应力获得。图6和图7是在不同地应力状态下,炮孔壁处和炮孔周围的环向应力分布图。其中正值代表压应力,负值代表拉应力。

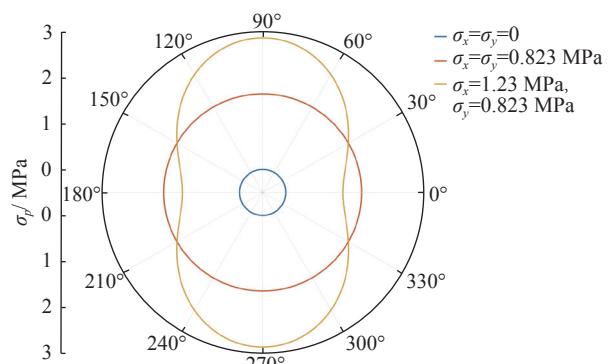


图6 不同地应力状态下孔壁环向应力分布

Fig.6 Hoop stress distribution at blast hole wall under different pressure conditions

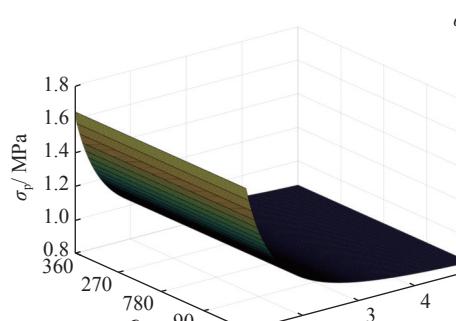
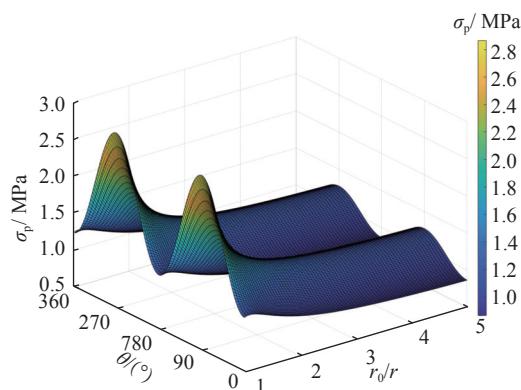
(a)  $\sigma_x = 0.823$  MPa,  $\sigma_y = 0.823$  MPa,  $\lambda = 1$ (b)  $\sigma_x = 1.23$  MPa,  $\sigma_y = 0.823$  MPa,  $\lambda = 1.5$ 

图7 不同侧压系数下炮孔周围环向应力分布

Fig.7 Hoop stress around blast hole under pressure coefficients on different sides

图6为不同地应力状态下炮孔壁切向应力分布。加载地应力后,炮孔附近应力将重新分布,进而产生应力集中现象。在静水地应力作用下,从图中可知其分布呈各向同性,此时切向应力为压应力,阻碍了裂纹的萌生。因此,地应力对径向拉伸裂纹扩展有阻碍效应。非静水压力下,最小主应力( $\theta=90^\circ/270^\circ$ )方向的环向应力较大,径向裂纹沿该方向的扩展受到阻碍作用比水平方向大。

从图7中得出随着侧压系数的变化,在水平和垂直方向环向应力的值也随之发生改变,表明水平和垂直方向上的主导应力随着侧压系数的变化而变化。另外环向应力随着距爆破孔距离的增加而不断发生变化,最终稳定在原地应力。在图7b所示的条件下,  $X$ 轴( $\theta=0^\circ/180^\circ$ )和  $Y$ 轴( $\theta=90^\circ/270^\circ$ )分别是最大和最小主应力的方向,靠近孔壁处环向应力在  $Y$ 轴方向远高于  $X$ 轴方向;此外,从7b可以得出,随着距炮孔距离的增加,环向应力在  $X$ 轴方向和  $Y$ 轴方向受到压应力的约束是不同的。因此,在侧压系数不等于1情况下,  $X$ 轴和  $Y$ 轴方向会形成不同范围的裂纹区。

## 3.2 室内试验结果与分析

### 3.2.1 裂纹扩展特征

由图8可以看出,地应力对裂纹扩展的影响较为明显。在浅部煤层爆破致裂增透中,地应力较小可以不用考虑,因此图8a中在无地应力条件下爆破可视为模拟浅部煤层。从图8a中可以看出,爆破后爆破孔周围形成了粉碎区和压碎区,大部分爆破能量损耗在爆破孔附近形成粉碎区,同时各爆破裂纹沿爆破孔呈现辐射状向四周扩散,爆破致裂效果较好;图8b在地应力环境下爆破,裂纹扩展受到了较大的抑制作用,爆生裂纹扩展范围较小。图8c中由于水平方向加载的地应力大于竖直方向加载的地应力,在竖直较小主应力方向上煤岩体受到的切向约束力较大,抑制了该方向上的裂纹扩展,因此在此方向上较难形成径向拉伸裂纹。通过对比图8a—8c可以发现,爆破后无地应力的裂缝长度最大,加载地应力之后裂缝长度明显减小。由于深部煤层处在高地应力赋存的复杂环境当中,从文中试验可以得出地应力对裂纹扩展具有阻碍效应,导致裂纹扩展范围较小,爆破致裂效果较差。因此在深部煤层爆破致裂增透工程应用中地应力是必须考虑的关键因素。

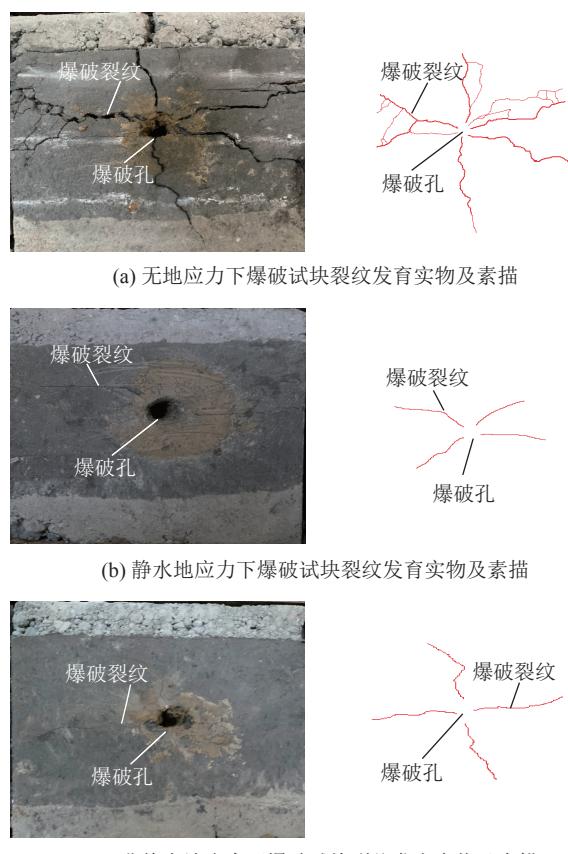


图8 试验模型裂纹扩展

Fig.8 Crack growth diagram of test model

### 3.2.2 应力发展规律

利用超动态应变仪,根据预埋应变砖监测到的电压信号,利用计算机软件反演得出测点的应力变化曲线,如图9所示。在图中负值代表压应力,正值代表拉应力。

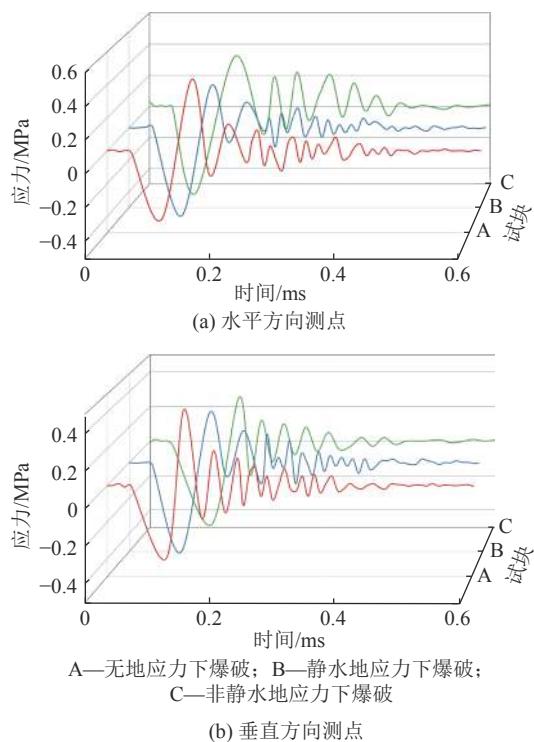


图9 爆破试验测点应力变化曲线

Fig.9 Stress change curve of measurement point of burst test

由图9可以看出,无地应力、静水地应力和非静水地应力水平方向测点压应力峰值分别为0.419、0.552、0.566 MPa,静水地应力和非静水地应力相对于无地应力提高了31.7%、35%;无地应力、静水地应力和非静水地应力水平方向测点拉应力峰值分别为0.432、0.260、0.320 MPa,静水地应力和非静水地应力相对于无地应力减小了39.8%、25.9%。从以上数据可知在地应力与爆破载荷耦合作用下,压应力峰值随着地应力的增大而增大,而拉应力峰值随着地应力的增大而减小。因此,地应力对裂纹扩展具有抑制作用。

由图9可知,在静水地应力和非静水地应力情况下,地应力对水平方向和垂直方向应力的影响是不同的。地应力与爆破荷载叠加后,水平方向压应力峰值而增大,垂直方向拉应力峰值随水平地应力的增大而减小。由以上分析可知,与较大主应力方向正交的拉应力受到阻碍,导致该方向的裂纹扩展受到抑制,使裂纹优先向高应力方向扩展。

### 4 不同侧压系数下双孔爆破数值模拟

#### 4.1 数值模型参数

在第3节对试块进行了不同地应力条件下单孔爆破室内试验,得出了地应力能够制约裂纹扩展和非静水地应力下水平和垂直方向裂纹扩展受到阻碍作用存在区别的结论。为进一步研究不同侧压系数对煤岩体双孔爆破致裂影响,利用ANSYS LS-DYNA软件建立数值模型进行模拟。根据文献[20-22]研究结果关于双孔爆破间距对裂隙扩展以及增透有效范围的影响,为提高效率,模型采用准三维模型,采用模型尺寸为1200 cm×1200 cm×1 cm,爆破孔为水平方向布置,间距为3 m,直径为8 cm。爆破计算模型如图10所示。

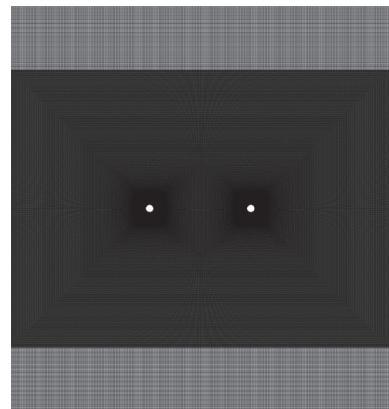


图10 爆破数值计算模型

Fig.10 Numerical calculation model

煤岩体原岩物理力学参数见表1,本构关系采用HJC进行模拟,并添加\*MAT\_ADD\_EROSION关键字以描述材料的拉伸破坏<sup>[23]</sup>。HJC模型能很好地描述脆性材料在动载荷作用下的破碎行为,考虑了应变速率和损伤累积的影响<sup>[24]</sup>。炸药材料采用Jones-Wilkins-Lee (JWL)<sup>[25]</sup>状态方程表示:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) + \frac{\omega E_0}{V} \quad (9)$$

式中:  $P$  为爆轰压力, GPa;  $A, B$  为炸药参数, GPa;  $R_1, R_2, \omega$  为炸药特性参数;  $E_0$  为爆轰产物内能, J/m<sup>3</sup>;  $V$  为初始相对体积。模拟使用由文献[26]校正后的煤矿许用乳化炸药,炸药参数为密度1000 kg/m<sup>3</sup>、爆速3600 m/s。其余参数见表5。

表5 炸药参数

Table 5 Parameters of explosives

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$w$	$E_0/\text{GPa}$
214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

5种地应力工况见表6,因工程背景煤岩层所受载荷为24.7 MPa,因此设计侧压系数为0.25、0.50、1.00、1.25、1.50。

表6 数值模拟地应力加载情况

Table 6 In-situ stresses in different conditions

工况	$\sigma_x$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa	$\lambda$
1	6.18	24.7	0.25
2	12.35	24.7	0.50
3	24.70	24.7	1.00
4	30.88	24.7	1.25
5	37.05	24.7	1.50

对数值模型采用Dynain方法进行静力加载<sup>[27]</sup>。该方法采用LS-DYNA隐式求解函数实现应力初始化,并通过两次独立分析完成整个数值模拟。通过调用\*INTERFACE\_SPRINGBACK\_LSDYNA关键字,生成Dynain动态文件,在后续的动态分析中,通过在关键字文件中添加\*INCLUDE命令和对应的动态文件名,程序自动导入Dynain动态文件。图11为侧压系数为1时地应力为24.7 MPa在X、Y方向的应力加载图。从图11可知,在周围出现了应力集

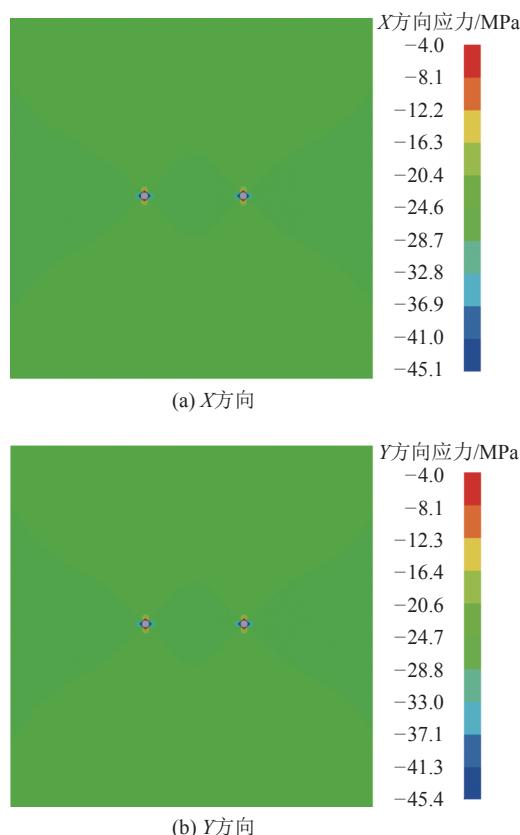


图11 24.7 MPa 应力初始化结果  
Fig.11 24.7 MPa stress initialization results

中现象,距离炮孔一定距离后,应力集中现象消失,整体模型地应力加载状态较好。

为了验证数值模拟结果的有效性,对比了无地应力加载时数值模拟与试验的结果,如图12所示。通过对比发现,图12中在50 μs时出现粉碎区,100 μs时出现裂隙区,与图8a试验结果基本一致。也证明了以下数值模拟结果的准确性。

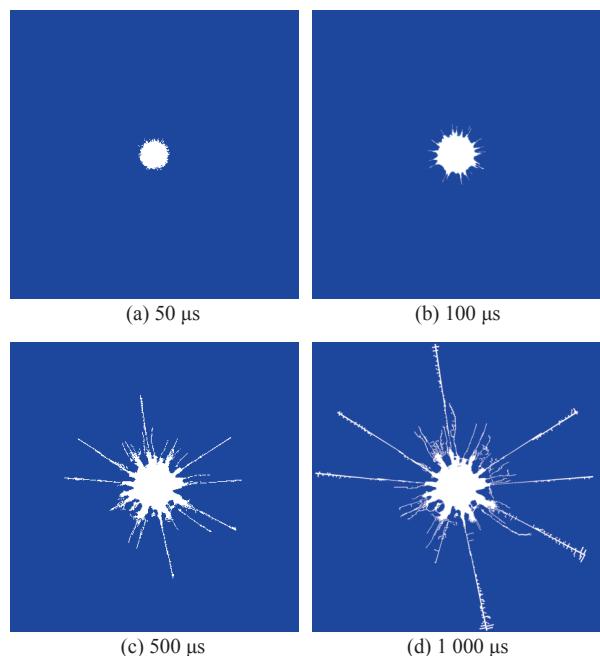


图12 无地应力下爆破裂纹扩展结果  
Fig.12 Expansion results of burst rupture lines

#### 4.2 不同侧压系数下裂纹扩展结果及分析

不同侧压系数下爆破裂纹发育情况如图13所示,选取在2 000 μs时爆破裂纹扩展情况,所选区域为800 cm×700 cm区域。

从图13中可知当侧压系数不为1时,爆生裂纹扩展呈现方向性,扩展区域呈现椭圆分布,且长轴和较大地应力方向一致。从图13a—13b中可知由于水平方向的地应力小于垂直方向的地应力,爆破孔间产生的裂纹在水平方向扩展受到抑制作用比垂直方向扩展大,因此竖直方向裂纹扩展长度远大于水平方向,爆破孔间很难形成贯通。图13c中由于地应力较大,因此裂纹扩展长度较小,裂纹扩展范围呈圆形分布。从图13d—13e中可知随着侧压系数的增大,地应力对垂直于水平方向裂纹的抑制作用增强,因此裂纹倾向于向水平方向扩展。图13d—图13e中爆破孔水平布置时,根据文献[28]研究结果相邻两爆破孔同时起爆时爆炸应力波的叠加效应致使两爆破孔中间截面上部分区域及其邻域内形成均压区,再加上由于水平和竖直方向地应力较大,因

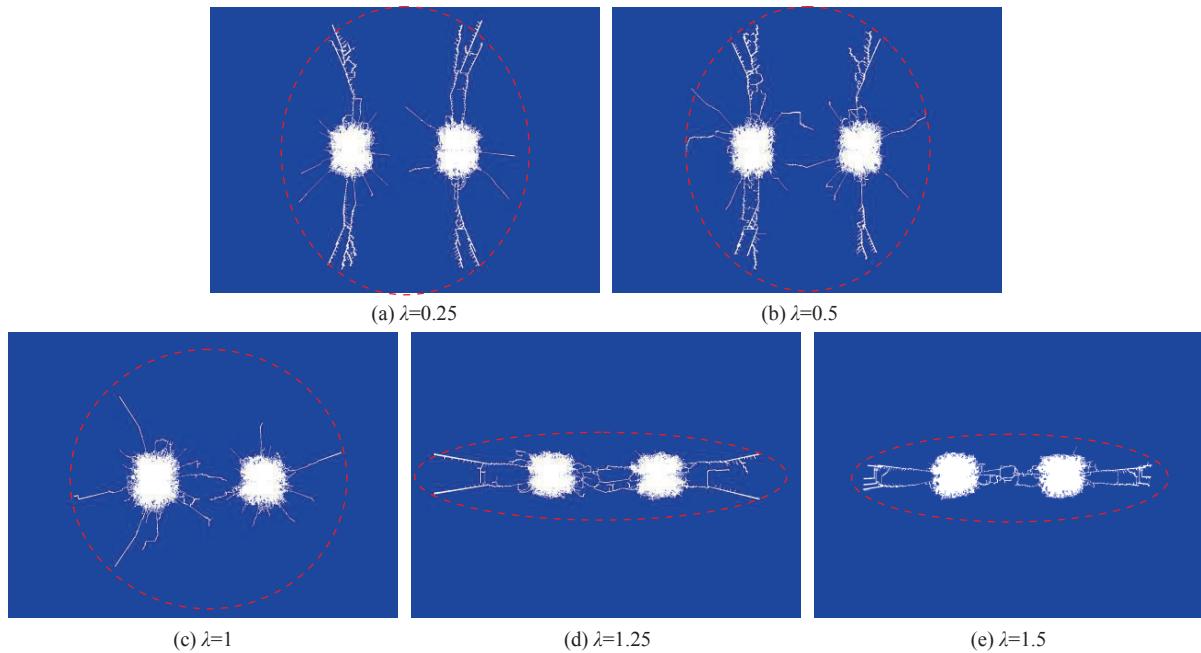


图 13 不同侧压系数下爆破裂纹扩展情况

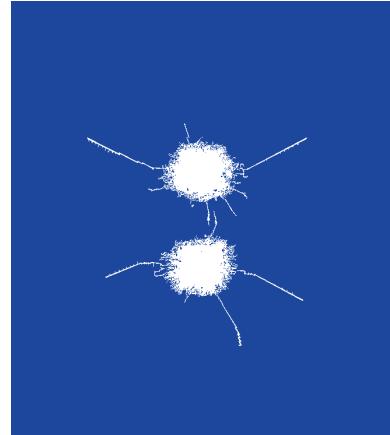
Fig.13 Development of blasting cracks under pressure coefficients on different sides

此竖直方向裂纹扩展受到的阻碍作用更大,造成裂纹扩展距离较短。

当侧压系数小于 1,也就是垂直方向地应力大于水平方向地应力,此条件下爆破孔沿水平方向布置时,爆破孔间裂纹很难形成贯通,从而影响增透效果。当侧压系数大于 1,也就是垂直方向地应力小于水平方向地应力,此条件下爆破孔沿水平方向布置时孔间较易形成相互连接的裂隙网,爆破效果较好。从以上结果可以得到结论,在非静水地应力条件下,地应力抑制了较小主应力方向裂纹的数量和扩展长度,与之相反,地应力促进了较大主应力方向裂纹的数量和扩展长度;在非静水情况下,地应力可以控制爆生裂纹扩展方向、裂纹数量及其扩展长度。

当侧压系数为 1.5(爆破孔沿较小主应力方向),2 000  $\mu$ s 时爆破裂纹扩展情况如图 14 所示。图 14 中,裂纹主要沿较大主应力方向扩展,竖直方向上爆破孔间的裂纹不能形成贯通,没有达到良好的爆破致裂效果。因此,在垂直方向地应力相同条件下,爆破孔沿水平方向布置,易形成裂隙网,从而提高爆破致裂效果。

由以上分析可知,对于深部矿井采用深孔爆破致裂技术治理瓦斯而言,需充分利用地应力对裂纹的控制导向作用,根据煤层周围实际地应力状态,爆破孔宜沿较大地应力方向布置,有利于提高爆破致裂增透效果。

图 14 爆破孔沿竖直方向布置爆破裂纹扩展情况 ( $\lambda=1.5$ )Fig.14 Blast hole layout along vertical direction of blast mark propagation ( $\lambda=1.5$ )

#### 4.3 不同侧压系数下裂纹密度和扩展长度定量分析

为了定量了解不同地应力场对爆破致裂的影响,本研究采用裂纹密度和扩展长度来表征不同应力场下裂纹发育程度。

##### 4.3.1 裂纹密度与侧压系数关系

为了定量了解裂纹密度与侧压系数之间的关系,利用 ImageJ 图像识别软件对图 13 模拟结果进行处理。假设  $L$  为单裂纹长度,  $m$  为断裂数,  $S$  为覆盖总面积, 裂纹密度可用式(10)<sup>[29]</sup> 表示:

$$\rho = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{S} \quad (10)$$

式中,  $L_i$  为所有裂纹长度之和。

裂纹密度(裂纹长度与面积的比值)和各方向分布如图15所示。从图15a中可以清楚地看出,水平应力(或侧压系数)增大,裂纹密度也逐渐下降。为了更好地表征侧压系数对裂纹密度的影响,(-90°/90°)方向裂纹分布如图15b所示,随着侧压系数的增大,沿Y轴的压力急剧增大,从而制约了Y轴方向的裂纹数量。因此,裂纹在0°方向(X轴)周围越来越聚集,从而裂纹密度增大。

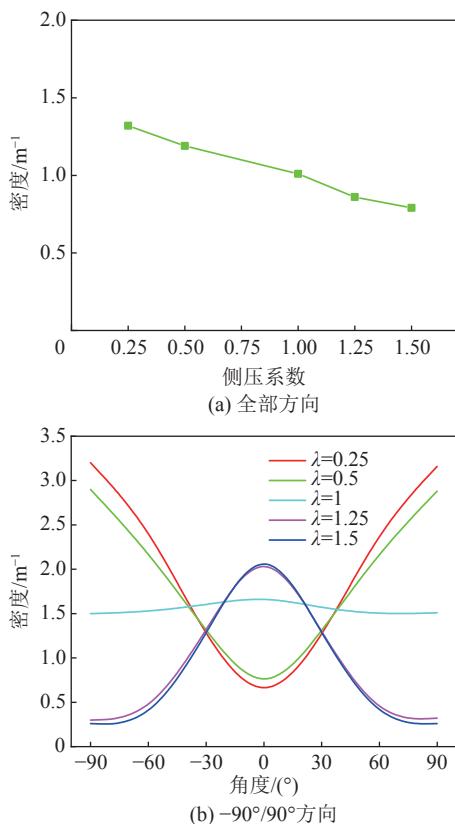


图15 不同侧压系数裂纹密度分布的变化

Fig.15 Variation of fracture orientation distribution in different pressure coefficients

#### 4.3.2 裂纹扩展长度与侧压系数关系

图13模拟结果表明径向裂纹长度和数量受到侧压系数的影响,表现为随着侧压系数的增大,较小地应力方向的径向裂纹的长度和数量逐渐减小。为进一步表征水平和垂直方向裂纹扩展长度随侧压系数变化的规律,利用后处理软件LS-PrePost统计了5种工况的裂纹长度见表7。

从表7中统计的竖直方向最大裂纹扩展长度可知,随着 $\lambda$ 的增大,裂纹倾向于向较高地应力方向扩展。以侧压系数为横坐标,最长裂纹长度和全部裂纹长度均值为纵坐标可得到图16。

对图16a拟合可得到竖直方向最大裂纹长度和侧压系数之间的关系式,模拟的拟合优度 $R^2$ 为0.9975,

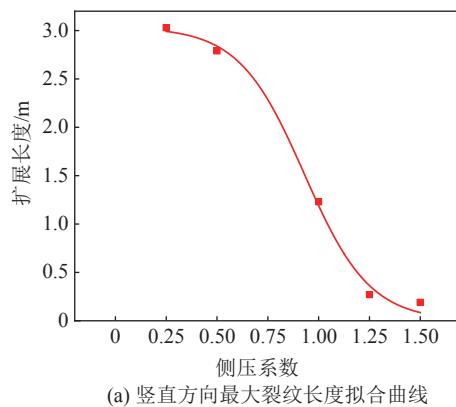
具有良好的拟合性,关系式如下:

$$L_{\max}^v = \frac{3.03}{1 + e^{6.21(\lambda-0.93)}} \quad (11)$$

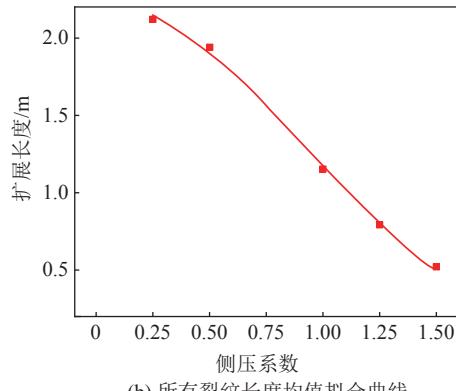
表7 不同侧压系数下裂纹长度

Table 7 Crack length in different in-situ stress conditions

工况	$\sigma_x/\text{MPa}$	$\sigma_y/\text{MPa}$	$\lambda$	竖直方向最大裂纹长度/m	全部裂纹长度均值/m
1	6.175	24.7	0.25	3.03	2.12
2	12.35	24.7	0.5	2.79	1.87
3	24.7	24.7	1	1.23	0.96
4	30.875	24.7	1.25	0.27	0.79
5	37.05	24.7	1.5	0.19	0.52



(a) 竖直方向最大裂纹长度拟合曲线



(b) 所有裂纹长度均值拟合曲线

图16 裂纹长度拟合曲线

Fig.16 Crack length fitting curve

对图16b拟合可得到所有裂纹长度均值和侧压系数之间的关系式,模拟的拟合优度 $R^2$ 为0.9983,具有良好的拟合性,关系式如下:

$$L_{\text{avg}}^a = \frac{2.50}{1 + e^{2.54(\lambda-0.95)}} \quad (12)$$

由以上分析可知,代入侧压系数,可算出竖直方向最大裂纹扩展长度或所有裂纹长度均值。由于数值模拟采用的参数为背景煤岩层物理参数,因此由上式得到的结果不能直接用于其他煤岩层爆破增透

试验,需要结合现场测试数据进行调参。

## 5 结 论

1)理论研究表明,地应力的存在会削弱爆炸应力波作用,从而限制爆破径向裂隙的发育,使煤体损伤范围受到影响,导致爆破致裂增透范围减小。

2)通过单孔爆破室内试验发现,地应力对煤岩体爆破裂纹发育有显著影响,具体表现为地应力对煤岩体爆生裂纹的扩展起抑制作用,限制爆破引起的裂纹长度,使爆破有效致裂范围减小;在非静水地应力条件下,爆破孔沿较低地应力方向的环向压应力大于沿较高地应力方向的环向压应力,导致垂直于较高地应力方向的裂纹扩展阻碍作用较大。

3)通过双孔爆破数值模拟研究发现,侧压系数不为1时,爆生裂纹扩展呈现出方向性,爆破裂纹区域呈椭圆形,长轴和较大地应力方向一致。爆破孔沿较高地应力方向布置时,孔间形成相互连接的裂隙网,爆破致裂效果较好。

4)深部高地应力赋存环境会对煤层爆破致裂增透效果产生影响。因此,对于深部矿井采用深孔爆破致裂技术治理瓦斯而言,需充分利用地应力对裂纹的控制导向作用,根据煤层周围实际地应力状态,爆破孔宜沿较大地应力方向布置,有利于提高爆破致裂增透效果。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1–16.  
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1–16.
- [2] 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(S2): 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(S2): 469–474.
- [3] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 735–742.  
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study of extension characters of cracks in coal seam under blasting load with different charging modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 735–742.
- [4] 张鑫, 刘泽功, 张健玉, 等. 高瓦斯低渗煤层控制孔与定向控制爆破复合作用增透试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 2018–2027.  
ZHANG Xin, LIU Zegong, ZHANG Jianyu, et al. Experimental study on permeability enhancement by combined action of control hole and directional control blasting in high gas and low permeability coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 2018–2027.
- [5] YANG L Y, DING C X. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 150–158.
- [6] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 19–33.
- [7] LI X, LIU K, YANG J. Study of the rock crack propagation induced by blasting with a decoupled charge under high in situ stress[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1–18.
- [8] 杨建华, 孙文彬, 姚池, 等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7): 118–127.  
YANG Jianhua, SUN Wenbin, YAO Chi, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses[J]. Journal of Vibration and Shock, Explosion and Shock Waves, 2020, 40(7): 118–127.
- [9] 杨建华, 吴泽南, 姚池, 等. 地应力对岩石爆破开裂及爆炸地震波的影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 64–70, 90.  
YANG Jianhua, WU Zenan, YAO Chi, et al. Influences of in-situ stress on blast-induced rock fracture and seismic waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 64–70, 90.
- [10] 李新平, 董千, 刘婷婷, 等. 地应力下柱面应力波在节理岩体中传播规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3121–3131.  
LI Xinping, DONG Qian, LIU Tingting, et al. Research on propagation law of cylindrical stress wave in jointed rock mass under in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3121–3131.
- [11] 赵建平, 程贝贝, 卢伟, 等. 深部高地应力下岩石双孔爆破的损伤规律[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 14–20, 41.  
ZHAO Jianping, CHENG Beibei, LU Wei, et al. Damage law of rock double holes blasting under deep high in-situ stress[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 14–20, 41.
- [12] GE J, XU Y, HUANG W, et al. Experimental study on crack propagation of rock by blasting under bidirectional equal confining pressure load[J]. Sustainability, 2021, 13(21): 12093.
- [13] 梁瑞, 李生荣, 包娟, 等. 高地应力下岩体的爆破损伤及能量特性[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 127–138.  
LIANG Rui, LI Shengrong, BAO Juan. Blasting damage and energy characteristics of rock mass under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 127–138.
- [14] 丁晨曦, 梁欣桐, 杨仁树, 等. 高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J]. 煤炭科学技术, 1–10 [2023–07–24]. DOI: 10.12438/cst.2023-0852.  
DING CHENXI, LIANG XINTONG, YANG RENSHU, et al. Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway [J]. Coal Science and Technology, 1–10 [2023–07–24]. DOI: 10.12438/cst.2023-0852.
- [15] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 99

2002.

- [16] 范勇,孙金山,贾永胜,等.高地应力硐室光面爆破孔间应力相互作用与成缝机制[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6):1352-1365.  
FAN Yong, SUN Jinshan, JIA Yongsheng, *et al.* Stress interaction and crack penetration mechanism between smooth blasting holes for tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42( 6) : 1352-1365.
- [17] 李晓红,卢矣玉,康勇.岩石力学实验模拟技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [18] 陈庆宣,王维襄,孙叶.岩石力学与构造应力场分析[M].北京:地质出版社,1998.
- [19] 刘殿中,杨仕春.工程爆破实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [20] 郭德勇,张超,李柯,等.松软低透煤层深孔微差聚能爆破致裂机理[J].煤炭学报,2021,46(8):2583-2592.  
GUO Deyong, ZHANG Chao, LI Ke, *et al.* Mechanism of millisecond-delay detonation on coal cracking under deep hole cumulative blasting in soft and low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2583-2592.
- [21] 解北京,栾铮,李晓旭,等.岩体双孔爆破损伤特征的影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(9):20-26.  
XIE Beijing, LUAN Zheng, LI Xiaoxun, *et al.* Study on influencing factors of damage characteristics in double-hole blasting of rock mass[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(9): 20-26.
- [22] 张宪堂,陈长青,刘小康,等.双孔切缝爆破裂纹扩展机理及损伤特性研究[J].爆破,1-16 [2023-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231228.1514.006.html>.  
ZHANG Xiantang, CHEN Changqing, LIU Xiaokang, *et al.* Study on influencing factors of damage characteristics in double-hole blasting of rock mass [J]. Blasting, 1-16[2023-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20231228.1514.006.html>.
- [23] WANG Z, WANG H, WANG J, *et al.* Finite element analyses of

constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 135: 104172.

- [24] 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):2496-2500.  
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): 2496-2500.
- [25] 范勇,吴凡,冷振东,等.径向不耦合装药爆压消峰作用及其对岩石破裂范围影响[J].兵工学报:1-13[2023-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221025.1043.002.html>.  
FAN Yong, WU Fan, LENG Zhendong, *et al.* Peak elimination effect of radial uncoupled charge on explosion pressure and its influence on rock fracture range[J]. Acta Armamentarii: 1-13[2023-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221025.1043.002.html>.
- [26] WANG F, TU S, YUAN Y, *et al.* Deep-hole pre-split blasting mechanism and its application for controlled roof caving in shallow depth seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 112-121.
- [27] YANG J CAI, LIU K WEI, LI X DONG, *et al.* Stress initialization methods for dynamic numerical simulation of rock mass with high in-situ stress[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(10): 3149-3162.
- [28] 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.
- [29] ZHAI C, XU J, LIU S, *et al.* Fracturing mechanism of coal-like rock specimens under the effect of non-explosive expansion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103: 145-154.