

文章编号: 1671-251X(2023)10-0110-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023040076

# 煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测研究

王长禄<sup>1,2,3</sup>, 彭然<sup>1,2,3</sup>, 郑义<sup>1,2,3</sup>, 李伟<sup>1,2,3</sup>, 姚海飞<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. 煤炭科学技术研究院有限公司 矿山智能通风事业部, 北京 100013;
2. 煤科通安(北京)智控科技有限公司, 北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013;
4. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 预测致裂半径是确定液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透瓦斯抽采技术布孔间距的前提, 直接影响瓦斯抽采效果。现有预测方法大多基于单因素。为掌握多因素对液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径的影响规律, 有效预测布孔间距, 采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件, 结合正交试验, 开展了煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测研究。数值模拟结果表明: 影响液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径的因素主次顺序为地应力>瓦斯压力>煤体坚固性系数; 致裂半径随地应力增大而减小, 随瓦斯压力和煤体坚固性系数增大而增大, 且呈线性关系。对数值模拟结果进行多元回归分析, 建立了基于地应力、瓦斯压力及煤体坚固性系数 3 组不同因素耦合条件下的液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测模型。在煤矿现场进行工业性试验, 基于预测模型计算结果设置抽采钻孔, 采用压力指标法对瓦斯抽采效果进行测试分析, 结果表明: 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔两侧观测孔的瓦斯压力随时间增加呈递减趋势, 且抽采初期距致裂孔越远, 则压力越大, 与理论分析及数值模拟结果一致; 液态 CO<sub>2</sub> 相变有效致裂范围与预测结果基本相符; 观测孔瓦斯抽采体积分数较自然抽采孔提高 73.4%, 瓦斯抽采效率显著提高。

**关键词:** 瓦斯抽采; 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透; 致裂半径预测; 多因素耦合分析; 正交设计; 多元回归分析  
中图分类号: TD712 文献标志码: A

## Research on the prediction of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking radius in coal seams

WANG Changlu<sup>1,2,3</sup>, PENG Ran<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Yi<sup>1,2,3</sup>, LI Wei<sup>1,2,3</sup>, YAO Haifei<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. Mine Intelligent Ventilation Division, CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. CCRI Tong'an(Beijing) Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China; 4. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Predicting cracking radius is a prerequisite for determining the holes spacing of gas extraction technology by liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking and permeability improvement, which directly affects the gas extraction effect. Most existing prediction methods are based on single factor analysis. In order to grasp the influence of multiple factors on the radius of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking and effectively predict the spacing between holes, ANSYS/LS-DYNA numerical simulation software is used to carry out the research on predicting the radius of coal seam liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking combing with orthogonal experiments. The numerical simulation results indicate that the order of factors affecting the radius of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking is ground stress>gas pressure>coal solidity coefficient. The cracking radius decreases with the increase of stress, and increases with the increase of gas pressure and coal solidity coefficient with a linear relationship. A

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-10-14; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52130409); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2021-2-TD-MS001)。

作者简介: 王长禄(1993—), 男, 辽宁丹东人, 硕士, 主要研究方向为安全评价及瓦斯灾害防治, E-mail: changlu202303@163.com。

引用格式: 王长禄, 彭然, 郑义, 等. 煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(10): 110-117.

WANG Changlu, PENG Ran, ZHENG Yi, et al. Research on the prediction of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking radius in coal seams[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(10): 110-117.



扫码移动阅读

multiple regression analysis is conducted on the numerical simulation results. A prediction model for the radius of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking is established based on three different coupling conditions of ground stress, gas pressure, and coal solidity coefficient. Industrial experiments are conducted on the coal mine site. Extraction boreholes are set up based on the predicted model calculation results. The pressure index method is used to test and analyze the gas extraction effect. The results show the following points. The gas pressure in the observation holes on both sides of the liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking hole shows a decreasing trend with time. The farther away from the cracking hole in the initial stage of extraction, the greater the gas pressure. It is consistent with theoretical analysis and numerical simulation results. The effective cracking range of liquid CO<sub>2</sub> phase transition is basically consistent with the predicted results. The gas volume fraction in the observation hole is 73.4% higher than that in the natural extraction hole, and the gas extraction efficiency is significantly improved.

**Key words:** gas extraction; liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking and permeability improvement; prediction of cracking radius; multi factors coupling analysis; orthogonal design; multiple regression analysis

## 0 引言

煤炭作为我国主体能源为社会经济发展提供了强有力的支撑,在将来很长一段时期内仍将持续发挥其维护经济平稳运行的“压舱石”作用。在新时代的能源体系下,国家对煤炭领域发展提出了安全高效、精准绿色、低排放、低损害的要求,同时,科学用煤也是实现“双碳”的关键<sup>[1]</sup>。液态CO<sub>2</sub>相变致裂增透技术是目前提高瓦斯抽采效率最为安全可靠的技术手段之一,其特性完全符合国家对煤炭行业的发展要求。

预测液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径是确定瓦斯抽采布孔间距的前提,直接影响瓦斯抽采效果。探明影响液态CO<sub>2</sub>相变致裂因素,提高预测精度,一直是行业内科研人员研究的重点。R. H. Nilson等<sup>[2]</sup>建立了流体-气体共同作用下的岩体裂纹扩展积分方程,直观分析了爆生气体的准静态作用与煤体裂纹扩展关系。黄荣樽<sup>[3]</sup>从水平和垂直裂隙的起裂方面分析了影响裂隙扩展的各种因素,首次得到了裂缝形成压力和发育方向的预测模型。文虎等<sup>[4]</sup>进行了液态CO<sub>2</sub>相变致裂现场试验,发现致裂过程中应力在煤体内部孔隙结构损伤的综合作用是提高瓦斯抽采的主要因素,同时提出了影响致裂半径的判定依据。张东明等<sup>[5]</sup>建立了地应力条件下液态CO<sub>2</sub>相变致裂扩展机理模型,提出了相变发生后拉伸损伤区的理论方程,揭示了液态CO<sub>2</sub>相变致裂裂纹扩展的力学机理。董庆祥等<sup>[6]</sup>为了更准确地计算液态CO<sub>2</sub>相变膨胀开裂所用的能量,首次利用TNT当量法引入能量利用率,为建立气爆致裂数值模型提供理论支撑。周西华等<sup>[7]</sup>考虑地应力对液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径的影响,结合数值模拟计算得到地应力影响因素下的单孔爆破半径。赵宝友等<sup>[8]</sup>将数值模拟与实验

结果进行对比分析,研究了瓦斯压力和煤体坚固性系数对爆破效果的影响,发现2组单因素对致裂半径呈正效应的影响。现有研究大多局限于单因素对液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径的影响,且计算方法各异。由于井下环境复杂,导致影响液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径的因素较多,爆破后产生的裂纹扩展规律相对复杂,需应用合理方法进行多因素的耦合分析,并针对液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径的计算方法进行优化设计,以提高预测精度和爆破后裂纹扩展的可控性。

鉴于此,笔者在考虑地应力、瓦斯压力、煤体坚固性系数3组影响因素耦合条件下,应用ANSYS/LS-DYNA软件进行液态CO<sub>2</sub>相变致裂数值模拟分析,采用正交设计法结合多元回归分析处理模拟数据,建立了液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径预测模型,并进行现场工业性试验,以指导液态CO<sub>2</sub>相变爆破现场布孔方式,提高瓦斯抽采效率。

## 1 理论分析

### 1.1 液态CO<sub>2</sub>相变爆破裂纹扩展机理

液态CO<sub>2</sub>相变爆破起爆后,热药卷会在电流的激发下瞬间释放热能,热量升高使液态CO<sub>2</sub>立即进入超临界状态。该状态下的液态CO<sub>2</sub>急剧气化,体积瞬间增大700多倍,同时导致致裂器管内气体压力迅速增大。当致裂器内气体压力达到预定值后,泄爆端头处预设的剪切片破裂,气态CO<sub>2</sub>通过导向孔向致裂器周围煤体喷发,瞬间产生强大冲击压力。

进行液态CO<sub>2</sub>相变爆破时产生的冲击波、应力波及爆生气体对煤体的破坏过程相当复杂<sup>[9]</sup>。爆炸瞬时产生的气体会瞬间作用到爆破孔的孔壁上,同时在煤体壁面形成高强度的冲击能,从而形成大面积的粉碎区。之后产生的爆生气体开始迅速发育,使径向裂纹继续扩展。这一径向、环向裂隙互相交错形成的区域称为爆破中区。应力波继续传导并逐

渐衰减,形成裂隙扩展区。当应力波衰减到不再对煤体造成破坏,只能以地震波形式传播,该区域称为震动区<sup>[10-11]</sup>,如图 1 所示。

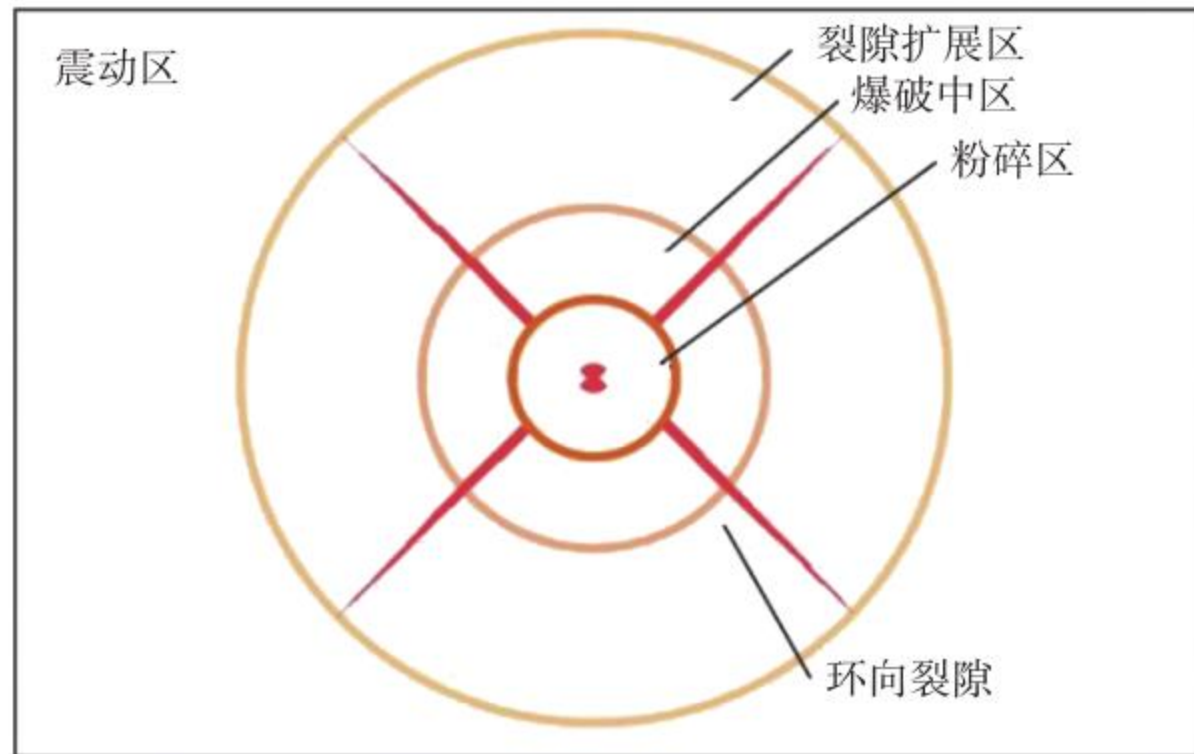


图 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破裂隙发育分布

Fig. 1 Fracture development distribution by liquid CO<sub>2</sub> phase transition blasting

应力在煤体中的传播过程可以采用胡克定律来描述<sup>[12]</sup>:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为煤体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u, v, w$  为煤体质点位移分量, m;  $t$  为时间, s;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为煤体质点在  $x$ (横向)、 $y$ (纵向)、 $z$ (垂向)方向的应力分量, MPa;  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  分别为煤体质点在  $xy, xz, yz$  平面的应力分量, MPa。

在煤体介质中,通常认为平面应力波的传播方向与  $x$  方向平行,则

$$\begin{cases} u = u(x, t), v = w = 0 \\ \varepsilon_x \neq 0, \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0, \theta = \varepsilon_x \\ \sigma_x \neq 0, \sigma_y = \sigma_z = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  分别为  $x, y, z$  方向的正应变分量;  $\theta$  为相对体积变形量。

式(4)可转换为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (5)$$

式中  $c_p$  为纵波传播速度, m/s,  $c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}}$ ,  $\lambda, G$  为拉梅常数。

由胡克定律和平面波可知:

$$\begin{cases} \sigma_x = (2G + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \\ \sigma_y = \sigma_z = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

质点传播过程主要受纵波传播速度  $c_p$  和横波传

播速度  $c_s$  的影响,将初始和边界条件代入式(6),得

$$c_p = \sqrt{\frac{1+2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (7)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad (8)$$

式中:  $E$  为煤体弹性模量, MPa;  $\mu$  为煤体泊松比。

随着作用时间的延长,爆破后产生的应力波能量逐渐减弱,对传导后期煤体的作用越来越小。应力峰值在均质煤体中的衰减规律为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_r = F_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \quad (9)$$

式中:  $r$  为煤体质点与爆炸中心距离, m;  $\sigma_r$  为  $r$  处应力波峰值, MPa;  $F_0$  为孔壁压力, MPa;  $r_0$  为装药半径, m;  $\alpha$  为应力衰减系数。

应力波的冲击作用会导致破碎煤体冲击至裂隙圈,使煤体密度增加,对应力传播起阻截作用,阻碍高压气体的应力波传导。当应力波传至一定距离后,衰减为压缩应力波与拉伸应力波,当能量衰减到一定程度,粉碎区的产生为压缩应力波的作用,裂隙扩展区的产生为拉伸应力波的作用,最终以弱能量地震波的形式传播,直到能量耗尽。

## 1.2 液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破 TNT 当量计算

从性质上说,液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破属于物理爆炸的范畴,是短时间内液相变气相的物理变化,其原理与 TNT 爆炸瞬间产生数倍于炸药体积的高温高压气体虽不完全相同,但二者过程基本一致<sup>[14-15]</sup>。因此,可以应用 TNT 当量计算法转换液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的爆破能。TNT 当量计算公式为

$$e_g = \frac{P_1 V}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (10)$$

式中:  $e_g$  为气体爆炸能量, kJ;  $P_1$  为爆炸气体压力,取 275 MPa;  $V$  为致裂器体积, m<sup>3</sup>;  $K$  为介质的绝热指数,取 1.295;  $P_2$  为标准大气压力,取 0.101 08 MPa。

液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破释放能量的 TNT 当量为

$$W = \frac{e_g}{Q} \quad (11)$$

式中  $Q$  为 1 kg TNT 爆炸能量,取 4 250 kJ。

经 TNT 当量计算可知,液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂时,每 1 kg 爆破能量与 397 g 的 TNT 相同。本文液态 CO<sub>2</sub> 致裂器装液量为 1.48 kg,爆破当量等于 588 g TNT。

## 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模拟设计

### 2.1 数值模型建立

选用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟。设

置液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模型尺寸为 6 m×6 m, 致裂孔孔径为 94 mm。模型由炸药、空气和煤体 3 个部分组成, 采用流固耦合方式。在模型顶部均匀施加 12 MPa 载荷, 侧压系数取 1.5, 模拟 18 MPa 水平应力, 模型边界为非反射界面边界。根据现场实测数据设置煤体材料参数, 见表 1。

表 1 煤体材料参数

Table 1 Coal material parameters

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模 量/MPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	抗压强 度/MPa	黏聚力/ MPa
1.54	1.74	0.3	0.84	2.2	2.5

添加\**MAT\_ADD\_EROSION* 来控制煤体单元的失效, 当单元体超过原有荷载时会发生失效而被删除, 以便直观表示液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破后裂隙的发展规律。同时进行参量简化, 将煤体近似看作均质, 煤体处于等温状态, 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模型如图 2 所示。

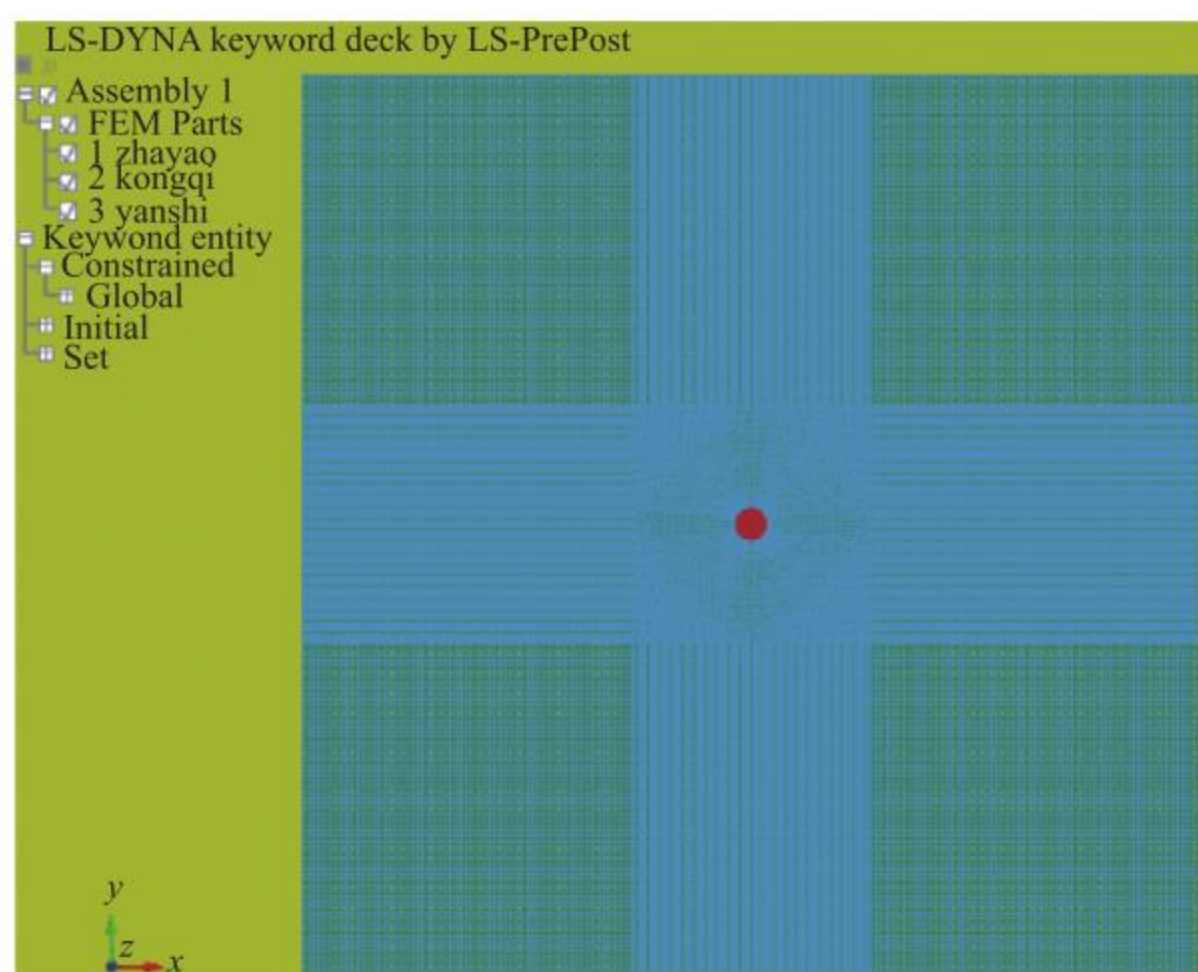


图 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模型

Fig. 2 Numerical model of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking

### 2.2 模拟方案正交设计

煤体外部因素的可变性较大, 且不同的内部因素对于煤体形变和破坏的影响程度不同。本文选取

对煤体形变影响较大的地应力、瓦斯压力及煤体坚固性系数这 3 组因素, 应用正交设计法<sup>[16]</sup>对液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破作用下的 3 组影响因素进行综合分析, 以确定不同因素对液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径的影响程度, 建立液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测模型<sup>[17]</sup>。为了降低模拟工作量, 提高预测模型的精准度, 采用正交设计及多元线性回归分析法<sup>[18-19]</sup>, 结合 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件进行计算。

正交设计设置 3 个水平因素, 为地应力、瓦斯压力和煤体坚固性系数。将这 3 个因素输入正交设计软件进行 3 因素 4 水平运算, 其中留有 1 列水平因素用于误差分析<sup>[20]</sup>, 得到正交设计方案 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>), 共 9 组对比方案, 见表 2。

表 2 模拟方案正交设计

Table 2 Orthogonal design of simulation scheme

组号	地应力/MPa	瓦斯压力/MPa	煤体坚固性系数	空白列
1	6	0.2	0.5	0
2	6	0.3	0.7	0
3	6	0.4	0.8	0
4	8	0.2	0.7	0
5	8	0.3	0.8	0
6	8	0.4	0.5	0
7	10	0.2	0.8	0
8	10	0.3	0.5	0
9	10	0.4	0.7	0

### 3 数值模拟结果与分析

由于煤体在爆破作用下所受的应力应变十分复杂, 为了表现液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破过程中爆炸应力场的传播与分布情况, 采用 LS-PREPOST 后处理软件动态描绘模型在不同时刻的损伤云图, 如图 3 所示。

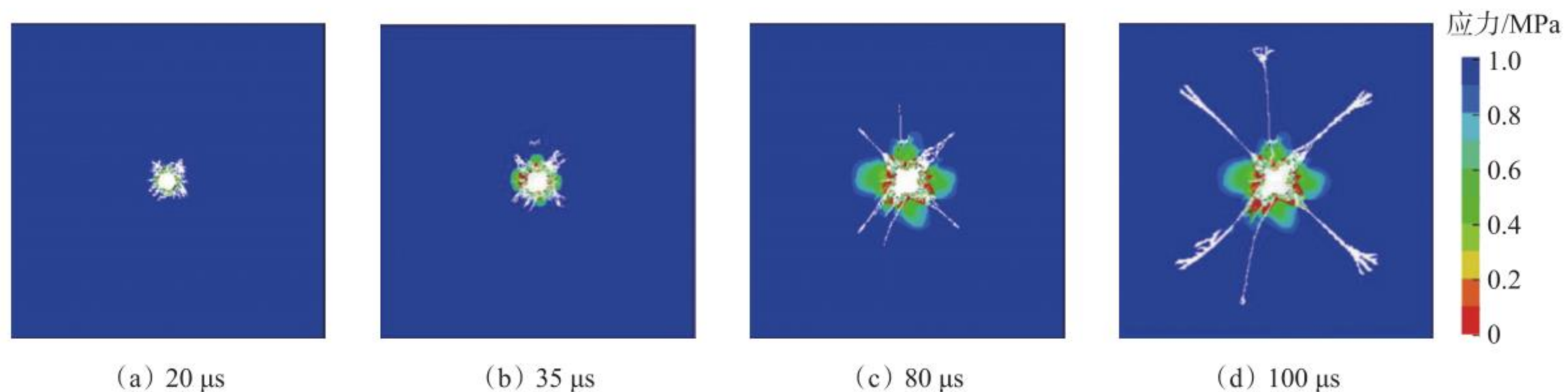


图 3 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂模拟演化过程

Fig. 3 Simulated evolution process of liquid CO<sub>2</sub> phase transition cracking

煤体进行液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂后, 应力波传导规律和裂纹扩展规律如下:  $t=0\sim 20\ \mu\text{s}$  时, 钻孔内部在起爆后瞬间产生强大的应力波, 由于爆破孔附近的

煤壁吸收了大量应力波能量, 导致钻孔周围的煤壁被大面积压碎, 形成粉碎区,  $t=20\ \mu\text{s}$  时, 主裂纹萌生;  $t=20\sim 35\ \mu\text{s}$  时钻孔中心高压区面积逐渐增大, 逐步

形成新的裂缝, 应力波从煤层的粉碎区继续向外扩展延伸, 逐步形成煤体裂缝, 为爆破中区,  $t=35 \mu\text{s}$  时开始初现分支裂纹;  $35 \sim 80 \mu\text{s}$  时裂纹继续扩展, 为裂隙扩展区,  $t=80 \mu\text{s}$  时裂隙圈的损伤区达到最大, 气爆产生的应力波由塑性应力波变为弹性应力波; 随着高压气体压力不断衰减, 裂纹向远处延伸的驱动力越来越小,  $t=100 \mu\text{s}$  时, 延伸裂纹的尖端最大轴向应力小于其自身动态极限抗拉强度, 裂纹停止扩

展, 为爆破外围的震动区。可看出爆破产生气体作用下的煤体损伤破坏是一个复杂的动力学演化过程。

根据液态  $\text{CO}_2$  相变致裂数值模拟的正交设计方案, 控制方程及边界条件等保持不变, 只改变正交设计中的 2 组因素值, 利用 LS-PREPOST 进行后处理, 观察 3 组因素值改变对致裂半径的影响, 模拟结果如图 4 所示。

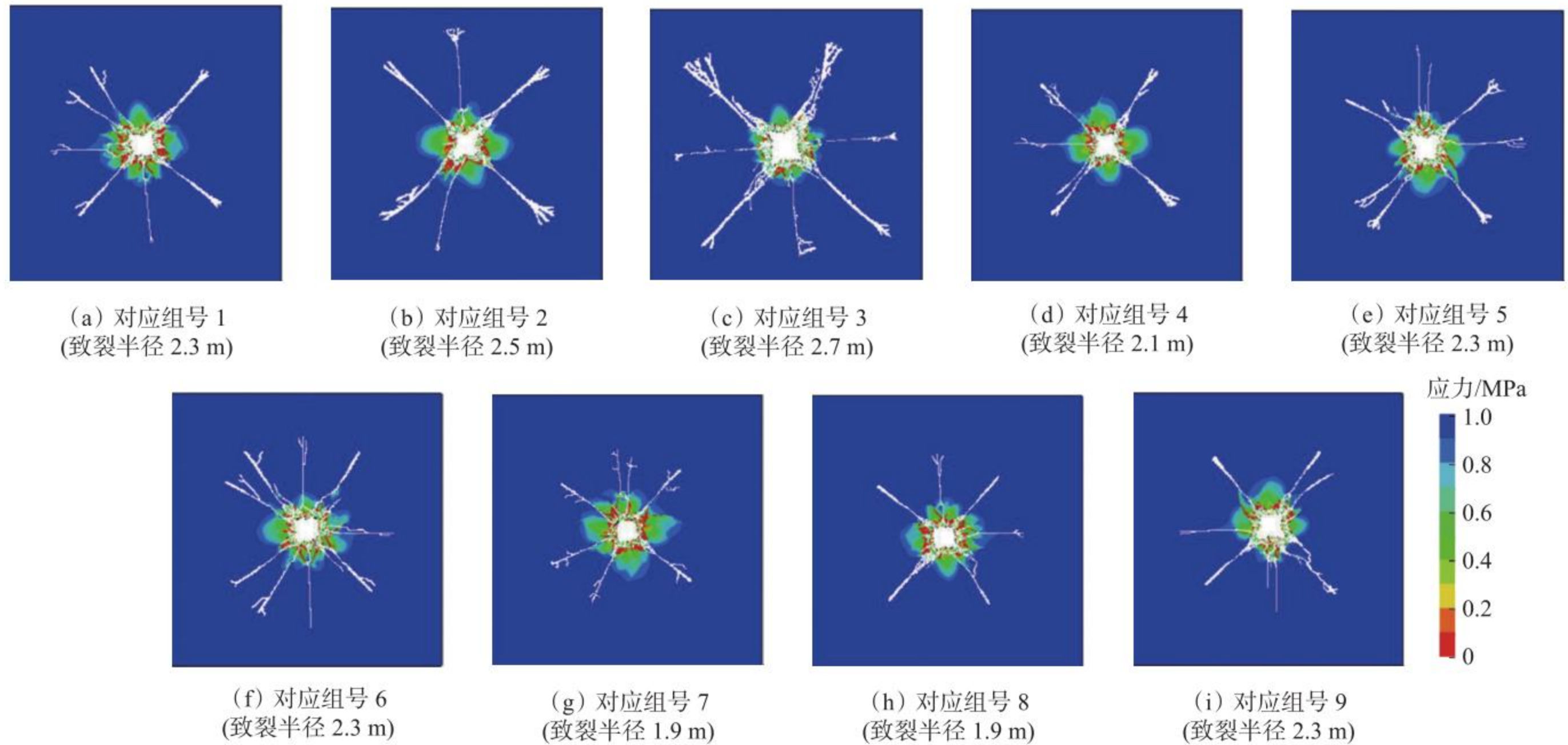


图 4 三因素耦合作用下的致裂效果

Fig. 4 Cracking effect under three factors coupling

为分析各因素对液态  $\text{CO}_2$  相变致裂半径的影响程度, 将数值模拟正交设计的结果进行均值计算并进行极差分析, 结果见表 3。

表 3 致裂半径极差分析

Table 3 Range analysis of cracking radius

指标	地应力	瓦斯压力	煤体坚固性系数	空白列
均值1	2.518	2.117	2.182	2.234
均值2	2.234	2.234	2.244	2.234
均值3	1.950	2.350	2.275	2.234
极差	0.568	0.233	0.093	0

根据表 3 中的极差可知, 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂半径的影响因素主次顺序为地应力 > 瓦斯压力 > 煤体坚固性系数。对表 3 中的均值点进行数据拟合, 结果如图 5 所示。

从图 5 可直观看出各因素对液态  $\text{CO}_2$  相变致裂半径的影响规律:

1) 致裂半径随地应力增大而减小, 原因是随着煤层地应力增大, 煤层原有裂隙的闭合程度增大, 导致煤层渗透率降低, 抑制相变致裂后裂隙的发育。

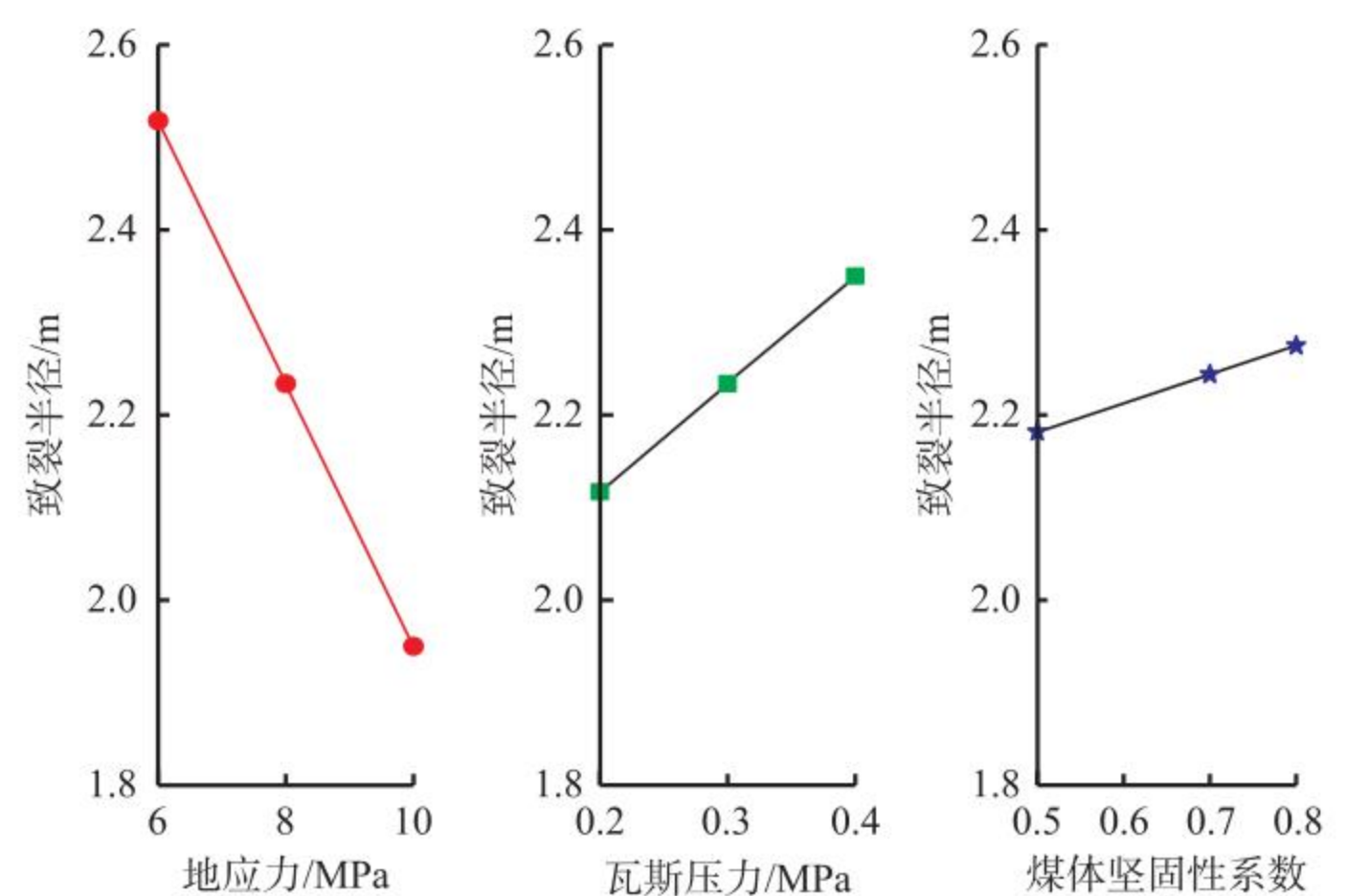


图 5 各因素对液态  $\text{CO}_2$  相变致裂半径的影响

Fig. 5 Influence of various factors on liquid  $\text{CO}_2$  phase transition cracking radius

2) 致裂半径随瓦斯压力增大而增大, 原因是煤体中赋存的瓦斯压力会导致煤体有效强度降低, 有利于尖端裂隙的发育。

3) 致裂半径随煤体坚固性系数增大而增大, 原因是坚固性系数较小的煤体脆性较大, 爆破应力作用下的煤体坚固性系数越小, 则越易破碎形成粉碎区, 不利于应力波的传导, 对裂隙发育起一定的阻碍

作用。

对液态CO<sub>2</sub>相变致裂数值模拟正交设计的结果进行方差分析,置信度分别取90%,95%,99%,结果见表4。

表4 正交设计方差分析

Table 4 Variance analysis of orthogonal design

指标	地应力	瓦斯压力	煤体坚固性系数
偏差平方和	0.484	0.082	0.013
自由度	2	2	2
F比值	3.344	0.566	0.090
置信度90%	*	*	*
显著度 置信度95%	*	*	*
置信度99%	*	*	*

注: \*表示具有较高显著度。

根据表4中的F比值可以得出,各因素对液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径的影响强度主次顺序为地应力>瓦斯压力>煤体坚固性系数,这与极差分析的结果一致。对于致裂半径来说,地应力、瓦斯压力和煤体坚固性系数在置信度取90%,95%,99%时,显著度均达到较高水平,表示这3组因素对致裂半径的影响较明显,验证了正交试验结果的正确性。

根据数值模拟结果可知,各影响因素与致裂半径之间可用线性关系描述。设致裂半径为 $b$ ,地应力为 $a_1$ ,瓦斯压力为 $a_2$ ,煤体坚固性系数为 $a_3$ 。对表2中9组正交试验数据进行多元回归分析,得到致裂半径与各影响因素之间的预测模型:

$$b = 2.813 - 0.142a_1 + 1.167a_2 + 0.30a_3 \quad (12)$$

式(12)的拟合优度 $R^2$ 为0.982,表明拟合效果较好。

## 4 现场工业性试验

### 4.1 现场布孔参数设计

为进一步验证液态CO<sub>2</sub>相变致裂数值模拟的准确性及预测模型的合理性,在山西省东部某矿进行工业性试验<sup>[21]</sup>。现场测得地应力为8.2 MPa,瓦斯压力为0.40 MPa,煤体坚固性系数为0.61,经预测模型计算得液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径为2.35 m。致裂孔孔径设置为89 mm,左右两侧分别布置3个观测孔,A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>,A<sub>3</sub>观测孔距致裂孔距离分别为1,2,3 m,A<sub>4</sub>,A<sub>5</sub>,A<sub>6</sub>观测孔距致裂孔距离分别为1.5,2.5,3.5 m,如图6所示。为避免爆炸冲击波影响,在观测孔右方30 m处布置1个自然抽采孔。连续进行30 d瓦斯抽采,对比钻孔瓦斯压力及浓度变化,从而对液态CO<sub>2</sub>相变致裂后瓦斯抽采效果进行分析。

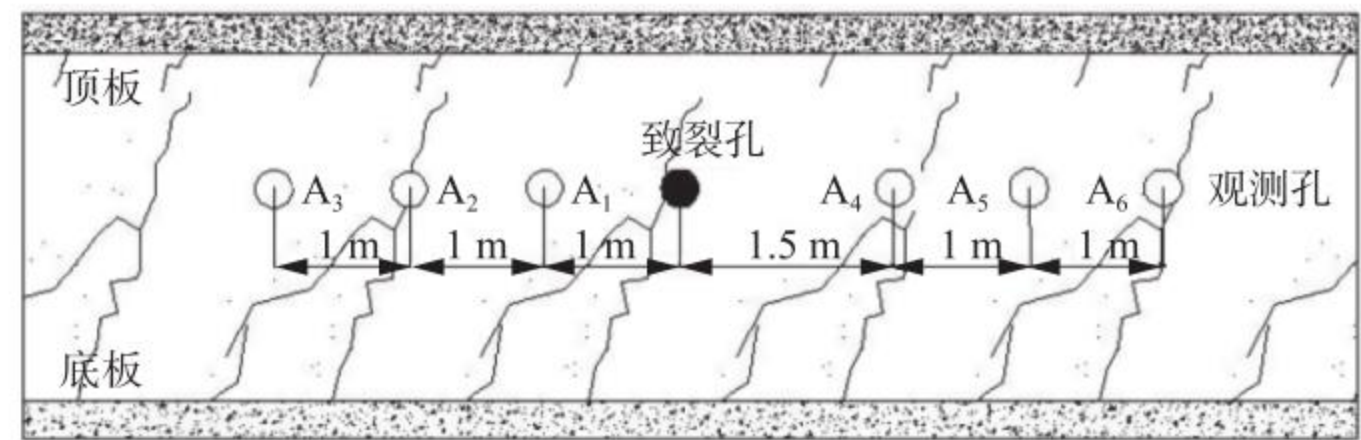


图6 现场工业性试验布孔方式

Fig. 6 Borehole arrangement in industrial field test

### 4.2 试验结果分析

采用压力指标法测定液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径范围。该方法通过煤体残留瓦斯量设定瓦斯预抽采指标,并与瓦斯抽采后压力进行对比分析。液态CO<sub>2</sub>相变有效致裂半径的考察于致裂孔封孔后,待封孔砂浆全部凝固后安装瓦斯压力表,测量记录时间共计30 d,测量结果如图7所示。煤层原始瓦斯压力为0.40 MPa,煤层残余瓦斯压力为0.23 MPa,煤层瓦斯压力下降了43%,设置43%有效线来衡量爆破致裂影响范围。

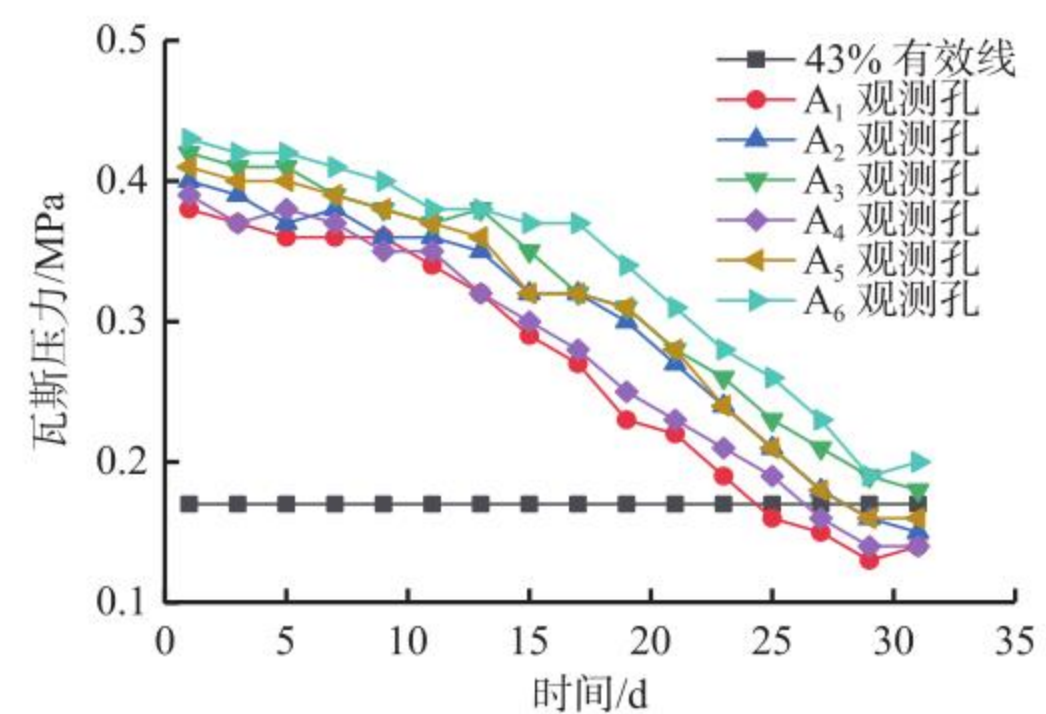


图7 观测孔瓦斯压力变化

Fig. 7 Gas pressure change of observation borehole

由图7可看出,液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,致裂孔两侧观测孔测得的瓦斯压力随时间增加呈递减趋势,且抽采初期距致裂孔越远,则压力越大,主要原因是爆破后应力波衰减,导致不同区域裂隙发育效果不同,与理论分析及数值模拟结果一致。A<sub>1</sub>观测孔距液态CO<sub>2</sub>相变致裂后煤体损伤的粉碎区较近,煤体在爆生气体作用下形成较大的裂纹,使瓦斯气体能够迅速传导;A<sub>4</sub>观测孔处于爆破中区,所受爆破应力的影响减小,该区域的裂隙发育效果较好,有助于瓦斯气体传导;A<sub>2</sub>和A<sub>5</sub>观测孔处于裂隙扩展区,是受液态CO<sub>2</sub>相变致裂影响的末端区域,为爆破应力波能量衰减区,煤体裂纹扩展程度较小,瓦斯气体传导速度较慢且浓度较低;A<sub>3</sub>和A<sub>6</sub>观测孔处于震动区,该区域内应力波衰减到不能再对煤体造成破坏,但由于距爆破影响范围较近,也会使瓦斯气体沿煤体裂隙传导至观测孔。距致裂孔2 m的A<sub>2</sub>观测孔瓦斯压力大于A<sub>1</sub>观测孔,且距致裂孔2.5 m的A<sub>5</sub>观测孔瓦斯压力大于A<sub>4</sub>观测孔,说明当致裂器轴向间

距为 2~2.5 m 时,裂隙分布更均匀,裂隙发育更好,使得瓦斯抽采更顺畅。随着瓦斯抽采时间增大,瓦斯压力逐渐降低,观测孔与致裂孔之间的距离越大,下降至 43% 有效线所需的时间越长。抽采 30 d 后, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>4</sub>, A<sub>5</sub> 这 4 个观测孔的瓦斯压力均下降至 43% 有效线以下,而 A<sub>3</sub>, A<sub>6</sub> 观测孔的瓦斯压力均下降但未低于 43% 有效线,由此可知,经 30 d 钻孔压力实测,液态 CO<sub>2</sub> 相变有效致裂范围为 2~2.5 m,最大误差为 17.5%,误差较小,进一步验证了预测模型的合理性。

对距致裂孔 2.5 m 的 A<sub>5</sub> 观测孔和自然抽采孔 30 d 测得的瓦斯体积分数进行对比,结果如图 8 所示。可看出液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂后单孔瓦斯抽采体积分数均值为 43.84%,较自然抽采孔瓦斯抽采体积分数均值(25.28%)提高 73.4%,说明液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂可有效提高瓦斯抽采体积分数。

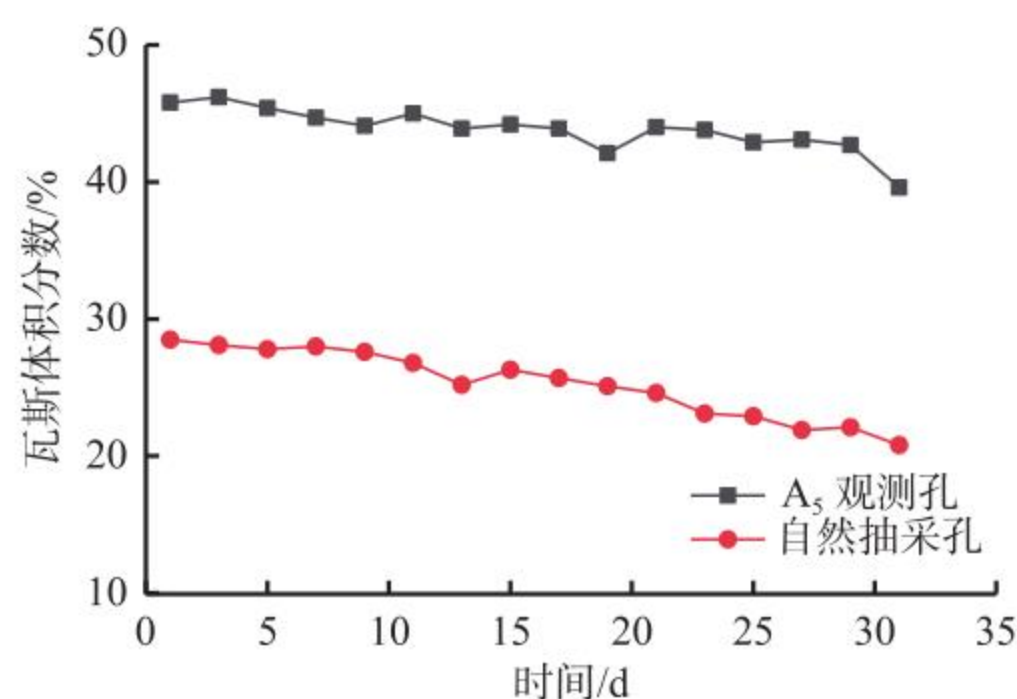


图 8 钻孔瓦斯体积分数对比

Fig. 8 Gas concentration comparison of different borehole

### 5 结论

1) 揭示了液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破应力波传导机理和裂纹扩展机理,并利用 TNT 当量转换法得到液态 CO<sub>2</sub> 致裂器的能量释放当量约为 588 g TNT。

2) 采用数值模拟方式得到液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径的影响因素主次顺序为地应力>瓦斯压力>煤体坚固性系数,致裂半径随地应力的增大而减小,随瓦斯压力和煤体坚固性系数增大而增大,且呈线性关系。对数值模拟结果进行多元回归分析,建立了基于地应力、瓦斯压力和煤体坚固性系数 3 组不同因素耦合条件下液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测模型。

3) 在山西省某矿进行工业性试验,采用液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂半径预测模型计算结果设置抽采钻孔,并应用压力指标法对瓦斯抽采效果进行测试分析,可知:液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔两侧观测孔的瓦斯压力随时间增加呈递减趋势,且抽采初期距致裂孔越远,则压力越大,与理论分析及数值模拟结果一致;液态 CO<sub>2</sub> 相变有效致裂范围为 2~2.5 m,与预测结果 2.35 m 的最大误差为 17.5%,误差较小;距致裂孔

2.5 m 的观测孔瓦斯抽采体积分数均值较自然抽采孔提高 73.4%。因此,通过预测模型优化布孔方式,可显著提高瓦斯抽采效率。

### 参考文献(References):

[1] 陈浮,于昊辰,卞正富,等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1808-1820.  
CHEN Fu, YU Haochen, BIAN Zhengfu, et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1808-1820.

[2] NILSON R H, PROFFER W J, DUFF R E. Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(1): 3-19.

[3] 黄荣樽. 水力压裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1981, 46(5): 62-74.  
HUANG Rongzun. Cracking and propagation of hydraulic fracturing fractures[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 46(5): 62-74.

[4] 文虎,李珍宝,王振平,等. 煤层注液态 CO<sub>2</sub> 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2793-2799.  
WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO<sub>2</sub> fracturing process for increasing permeability and the characteristics of crack propagation in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2793-2799.

[5] 张东明,白鑫,尹光志,等. 低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3154-3168.  
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Mechanism of breaking and fracture expansion of liquid CO<sub>2</sub> phase change jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154-3168.

[6] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.  
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.

[7] 周西华,门金龙,宋东平,等. 煤层液态 CO<sub>2</sub> 爆破增透促抽瓦斯技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 60-65.  
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 60-65.

- [8] 赵宝友, 王海东. 煤体坚固性系数和瓦斯压力对煤层深孔爆破增透的影响[J]. 爆破, 2014, 31(1): 25-31.  
ZHAO Baoyou, WANG Haidong. Impact of coal strength coefficient and methane gas pressure on permeability enhancement of coal seam induced by long-hole blasting technology[J]. Blasting, 2014, 31(1): 25-31.
- [9] 孙可明, 辛利伟, 吴迪. 超临界CO<sub>2</sub>气爆煤体致裂机理实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 302-308.  
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 302-308.
- [10] 贾进章, 李斌, 王东明. 煤层液态CO<sub>2</sub>相变致裂半径范围的影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 57-63.  
JIA Jinzhang, LI Bin, WANG Dongming. Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid CO<sub>2</sub> phase transition in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 57-63.
- [11] 袁海梁, 刘孝义, 陈少波, 等. 基于SPH算法的CO<sub>2</sub>相变破岩数值模拟[J]. 工程爆破, 2023, 29(1): 62-68.  
YUAN Hailiang, LIU Xiaoyi, CHEN Shaobo, et al. Numerical simulation of CO<sub>2</sub> phase change rock breaking based on SPH algorithm[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1): 62-68.
- [12] 李连崇, 赵瑜. 基于双应变胡克模型的岩石非线性弹性行为分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2119-2126.  
LI Lianchong, ZHAO Yu. Investigation on nonlinear elastic behaviour of rocks based on a two-part Hooke's model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2119-2126.
- [13] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3234-3238.  
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [14] HAO Yan, ZHANG Jixiong, ZHOU Nan, et al. Staged numerical simulations of supercritical CO<sub>2</sub> fracturing of coal seams based on the extended finite element method[J]. Journal of Engineering, 2019, 21(3): 275-283.
- [15] 高金明, 曾丹, 孙磊, 等. 新型发射药爆炸TNT当量系数的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 45-53.  
GAO Jinming, ZENG Dan, SUN Lei, et al. Experimental study on TNT equivalent coefficients for two new kinds of propellants[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 45-53.
- [16] YIN Siyu, WU Shaopeng, LIU Mingbo, et al. Study on influencing factors of unconfined penetration test based on orthogonal design[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(2): 2-12.
- [17] 安朝峰, 李树刚, 林海飞, 等. 煤吸附甲烷的影响因素敏感性正交试验[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 1-4.  
AN Zhaofeng, LI Shugang, LIN Haifei, et al. Orthogonal experiment on sensitivity of impact factors in coal adsorbing methane[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(2): 1-4.
- [18] 刘立忠, 郭娜, 马程程, 等. 基于正交试验法的低温SCR锰基催化剂制备参数优化[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 72-76.  
LIU Lizhong, GUO Na, MA Chengcheng, et al. Approach to optimizing the preparation parameters of SCR low temperature catalyst based on manganese through orthogonal experiment[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(5): 72-76.
- [19] 郭军, 金彦, 王帆, 等. 基于Logistic回归分析的煤自燃多级预警方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 88-93.  
GUO Jun, JIN Yan, WANG Fan, et al. Research on multi-level warning method of coal spontaneous combustion based on Logistic regression analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 88-93.
- [20] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.  
NING Yibing, TANG Huiming, ZHANG Bocheng, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [21] 邹永沼. 基于示踪气体法的覆岩“竖三带”测定[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 7-10.  
ZOU Yongming. "Vertical three zones" determination of overburden based on tracer gas method[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 7-10.