

原创技术策源地

# CO<sub>2</sub>相变爆破致裂增透裂纹扩展数值模拟研究

Numerical Simulation Study of Crack Propagation Caused by CO<sub>2</sub> Phase Change Blasting and Antireflection

王晓东(华阳新材料科技集团有限公司技术中心,山西 阳泉 045000)

**摘要:**为探究CO<sub>2</sub>相变爆破致裂在不同孔间距中的扩展趋势以及在煤层气开采中的应用价值,在贵州省安顺宏发煤矿开展CO<sub>2</sub>相变爆破致裂试验,对比LS-DYNA裂纹扩展数值模拟结果。研究表明:现场试验中相同条件下,钻孔间距10 m CO<sub>2</sub>相变爆破致裂效果最佳,且经过CO<sub>2</sub>相变爆破增透致裂后,煤层的透气性系数可以达到原煤层的3倍左右。软件模拟中设置10 m的钻孔间距煤层的裂纹拓展发育最优。

**关键词:**CO<sub>2</sub>致裂;裂纹扩展;LS-DYNA

**中图分类号:**TD235

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-609X(2022)01-0007-05

**Abstract:**To explore the expansion trend of CO<sub>2</sub> phase change blasting cracking in different drillhole spacings and its application value in coal seam methane mining, CO<sub>2</sub> phase change blasting cracking experiments were carried out in Anshun Hongfa Coal Mine, Guizhou Province, for comparison with the result of numerical simulation of crack growth by LS-DYNA. The research shows that under the same conditions in the field test, the carbon dioxide phase change blasting has the best cracking effect with a drillhole spacing of 10 m, and the permeability coefficient of the coal seam can reach about 3 times that of the original coal seam after CO<sub>2</sub> phase change blasting and fracturing. In the software simulation, the crack propagation of the coal seam with a drilling spacing of 10m is optimal.

**Key words:**CO<sub>2</sub>-induced cracking; crack propagation; LS-DYNA

## 1 前言

煤层气作为近年来不断崛起的优质能源逐渐走进人们的视野。煤层气又称“瓦斯”,是一种储存在煤层内以甲烷为主要气体、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体。我国煤层气资源储量极其丰富,其总储量可排世界前三位。煤层气作为一种“绿色能源”“可持续发展型能源”,既是煤矿井下灾害事故的致因因素之一,又是造成温室效应的一种有害气体源<sup>[1]</sup>。因此,对于煤层气资源的开发利用可有效增加新能源在能源结构中的占比、改善保障煤矿生产安全、减少环境污染。受地质条件以及煤炭沉降条件的影响,我国大部分煤层的透气性较低,实施瓦斯抽采相对困难。对于单一煤层而言,现有的瓦斯抽采解决办法有设置密集钻孔或者对单

一煤层进行长时间抽采,目前所采取的这些方法不仅提高了抽采成本,而且降低了抽采效率。因此,增加煤层的透气性,提高煤层瓦斯抽采效率以及降低瓦斯抽采的成本是目前急需解决的问题。

液态CO<sub>2</sub>相变爆破煤层致裂增透技术作为一种新型提高瓦斯抽采效率的技术,实施方便简单,成本低廉,整体安全性高,受到了众多学者以及煤炭行业从业者的青睐。张健<sup>[2]</sup>利用二氧化碳相变爆破技术在煤矿开展现场爆破试验,极大地提高了煤层的瓦斯抽采效率,并且也有效地解决压力集中导致的煤和瓦斯突出和掘进工作面应力集中的问题。洪林<sup>[3]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>与Comsol模拟软件模拟了二氧化碳相变爆破,研究认为液态二氧化碳多孔连续爆破能够达到最理想的爆破增透效果,且控制孔的半径越大,增透效果越明显,瓦斯抽采效率越高。黄晓实<sup>[4]</sup>将二氧化碳爆破致裂器应用在岩石深孔预裂爆破中,分析了致裂器喷嘴形状对于爆破致裂效果的影响。

前人对于二氧化碳相变爆破煤层致裂的研究多

[作者简介] 王晓东(1984-),男,山西省阳泉人,高级工程师,从事煤矿通风与安全、矿井瓦斯治理方面的研究。

[引用格式] 王晓东. CO<sub>2</sub>相变爆破致裂增透裂纹扩展数值模拟研究

[J]. 中国矿山工程,2022,51(1):7-11+16.

侧重于现场试验中<sup>[5-10]</sup>,较少利用实验室数值模拟研究其致裂的效果。因此,将二氧化碳相变爆破煤层致裂现场试验与LS-DYNA数值模拟中煤层爆破裂纹扩展表征致裂效果相结合,对于提高二氧化碳相变爆破致裂效果,提高爆破致裂效率有着良好的指导意义。

## 2 CO<sub>2</sub>相变爆破致裂煤层增透技术及原理分析

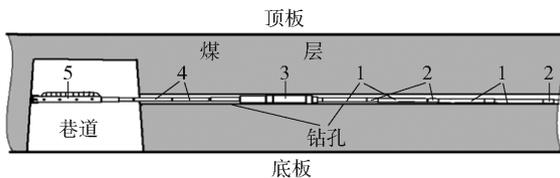
CO<sub>2</sub>相变爆破致裂煤层增透技术主要是通过液态CO<sub>2</sub>瞬间受热由液态转化为气态,体积迅速增大膨胀产生的巨大压力,压力产生的应力波和高压气体共同作用于周围煤体域,促使原煤层裂隙扩展的同时产生新的裂隙,增大煤层透气性的同时提高煤层内瓦斯抽采效率<sup>[11]</sup>。

现场试验中所用CO<sub>2</sub>致裂器如图1所示。其操作过程分为4个步骤:CO<sub>2</sub>致裂器的拼装、向致裂器内冲入适当的液态CO<sub>2</sub>、将制备好的致裂器安装在井下和致裂起爆。液态CO<sub>2</sub>充装设备由液态CO<sub>2</sub>钢瓶、压力泵、空气压缩机等设备组成,利用压力泵将液态CO<sub>2</sub>充入特制的储液管内,并将压力保持在固定范围。组装其他部件,将制备好的致裂器安装在井下准备起爆,将封孔器用封孔高压管路与致裂器连接,并将发爆母线固定于顶杆之上。将顶杆推进到符合设计要求的深度。检查孔内设备的连接情况,确认可靠后,连接压力泵及测压表。用压力泵向封孔器内注水至一定压力后,调节顶杆,固定致裂器。安装工艺如图2所示。



1—主管;2—充气阀;3—泄能阀;4—发热装置;5—电极引出体

图1 CO<sub>2</sub>致裂器基本结构图



1—CO<sub>2</sub>致裂器;2—连接件;3—封孔器;4—封孔引出杆;5—固定器

图2 安装工艺示意图

## 3 CO<sub>2</sub>相变爆破致裂增透裂纹数值模拟及结果分析

### 3.1 有限元模型的建立

有限元模型的建立以现场试验相关数据为基

础。建立40 m×20 m的二维模型,钻孔直径0.094 m。根据文献[12]中的致裂半径公式,代入表1中的具体参数进行计算可得致裂半径约为8.4 m。因现场试验钻孔布置数量为16个,为简化模型及减少计算量,有限元模型中爆破钻孔数量布置为3个,通过LS-PrePost软件设置点火时间一致控制三个钻孔同时起裂,分别建立钻孔相距10 m、5 m、3 m三个数值模拟计算模型。在所建立的有限元模型中,炸药采用\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN。空气模型采用\* MAT\_NULL,煤体采用\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC<sup>[13-16]</sup>。以钻孔间距10 m的数值模型为例,建立的有限元模型如图3所示,模型中主要参数具体数值见表1。

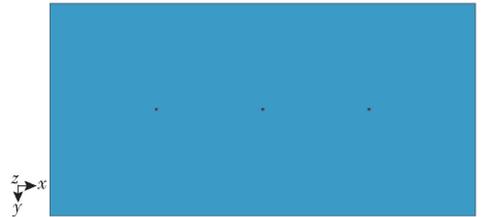


图3 有限元模型(钻孔间距10 m)

表1 有限元模型参数值设置

参数名称	数值
煤体密度/kg·m <sup>-3</sup>	2 600
弹性模量/MPa	5 500
泊松比	0.27
硬化参数	0.35
切线模量/MPa	0.89
屈服应力/MPa	20
抗拉强度/MPa	0.5
炸药密度/kg·m <sup>-3</sup>	1 150
压力/GPa	3.43
爆速/m·s <sup>-1</sup>	4 300
A/GPa	214
B/GPa	1.8
R <sub>1</sub>	4.5
R <sub>2</sub>	1
w	0.15
E <sub>0</sub> /GPa	3.5
空气密度/kg·m <sup>-3</sup>	1.29
C <sub>4</sub>	0.4
C <sub>5</sub>	0.4

根据上表建立有限元模型,由于该模型模拟的是煤体爆炸区域的一部分,为保证模拟的准确性及提高计算效率,在煤体域边界添加无反射边界条件,计算时长设置为0.002 s。

### 3.2 数值模拟结果分析

本次数值模拟设置了爆破钻孔相距10 m、

5 m、3 m 三种不同条件下二氧化碳相变爆破致裂模型,通过数值模拟结果裂纹发展对比分析致裂效果。

1) 钻孔相距 10 m 煤体爆破裂纹效果  
图 4 所示为钻孔间距为 10 m 二氧化碳相变爆破致裂裂纹扩展随时间变化的压力云图。

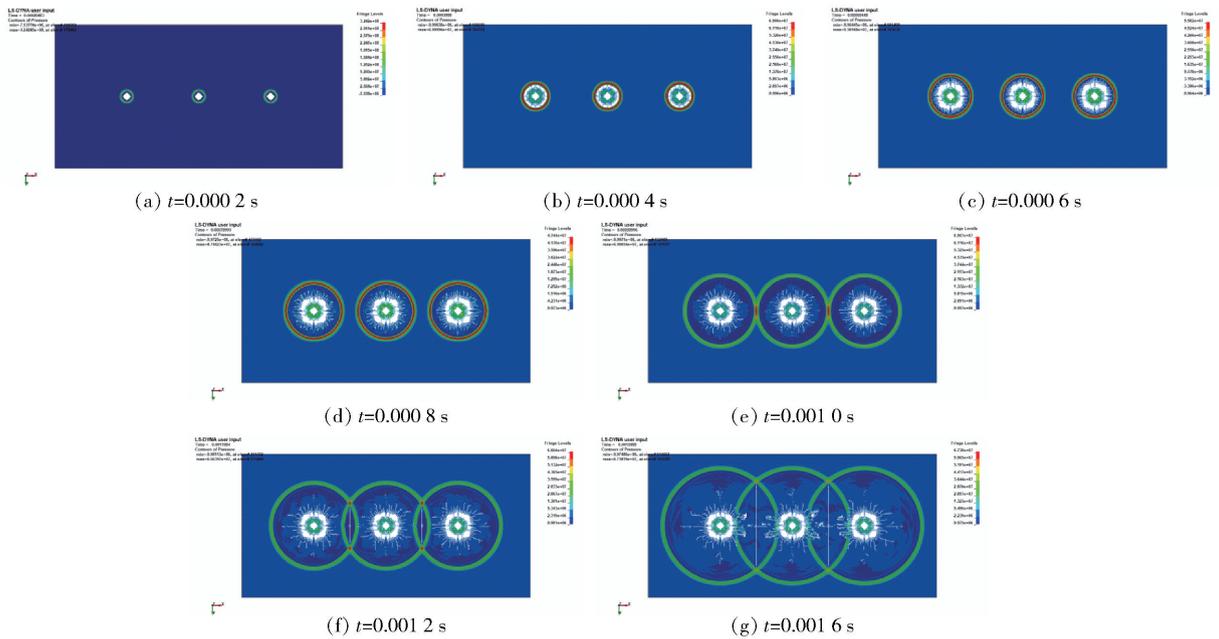


图 4 钻孔间距 10 m 爆破致裂裂纹扩展及压力云图

根据图 4 可以看出,在  $t=0.0002\text{ s}$  时刻,二氧化碳相变爆破冲击波传播至煤体域并逐渐在煤体域内形成爆破致裂空腔区。在  $t=0.0004\text{ s}$  时,冲击波继续向四周传播,逐渐形成煤体域的压碎区。 $t=0.0016\text{ s}$  时,爆破致裂裂纹扩展发育情况逐渐稳定,煤层二氧化碳相变爆破致裂区域明显,通过裂纹拓展区域可判断煤层致裂范围。

图 5 所示为钻孔间距为 5 m 二氧化碳相变爆破致裂裂纹扩展随时间变化的压力云图。

根据图 5 爆破钻孔间距 5 m 条件下不同时刻爆破致裂煤体域压力云图变化,可以看出在  $t=0.0002\text{ s}$  时刻,二氧化碳相变爆破冲击波传播至煤体域并逐渐在煤体域内形成爆破致裂空腔区,该阶段致裂耗时与钻孔间距 10 m 模拟数值模拟结果一致。根据上图可知,未到  $t=0.0004\text{ s}$  时刻,即已形成爆破

2) 钻孔相距 5 m 煤体爆破裂纹效果

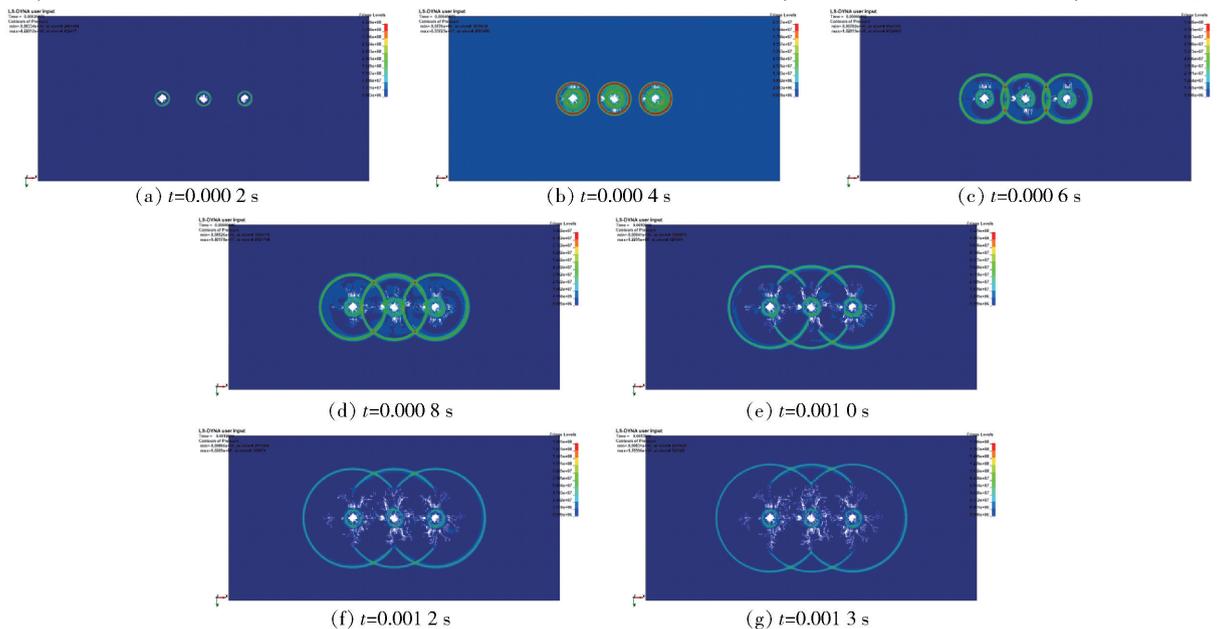


图 5 钻孔间距 5 m 爆破致裂裂纹扩展及压力云图

致裂压碎区,该阶段耗时较短。 $t = 0.0013\text{ s}$ 时,煤体域裂纹区发育扩展趋于稳定,通过裂纹可判断爆破致裂半径范围。

### 3) 钻孔相距 3 m 煤体爆破裂纹效果

图 6 所示为钻孔间距为 3 m 二氧化碳相变爆破致裂裂纹扩展随时间变化的压力云图。

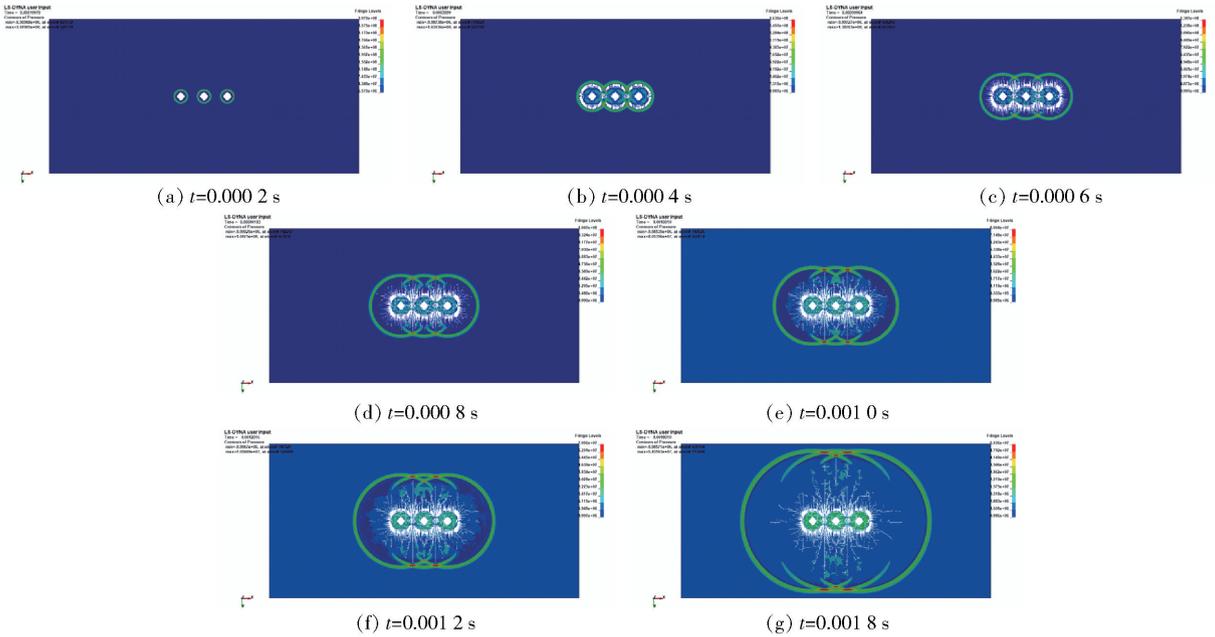


图 6 钻孔间距 3 m 爆破致裂裂纹扩展及压力云图

根据图 6 可知,在钻孔间距为 3 m 条件下  $t = 0.0002\text{ s}$  时爆破冲击波传播至煤体域,冲击波逐渐向煤体四周传播并逐渐形成裂纹。 $t = 0.0018\text{ s}$  时裂隙区发育完成。

由图 4、5、6 爆破裂纹裂隙拓展及压力云图变化情况可知,钻孔间距设置对于同等装药量条件下爆破致裂效果有着显著影响,随着钻孔间距设置的增大,二氧化碳爆破致裂效果更佳。结合二氧化碳相变爆破致裂现场试验结果与数值模拟计算结果可知,在二氧化碳相变爆破实际煤体增透过程中,爆破钻孔间距设置为 10 m 情况下可获得理想的最佳爆破致裂效果。

## 4 CO<sub>2</sub>相变爆破致裂增透现场试验分析

### 4.1 试验设计

根据以往抽采情况,在贵州省安顺市宏发煤矿 1903 工作面回风巷进行普通抽采钻孔抽采瓦斯效果不太理想,而 CO<sub>2</sub> 致裂是提高瓦斯抽采效率的有效手段,且现场试验中的煤体的煤层坚固性系数  $f$  值为 0.54(煤层坚固性系数大于突出临界值 0.5,表明煤层煤质较硬),符合 CO<sub>2</sub> 致裂的应用条件。在贵州省安顺市宏发煤矿 1903 工作面回风巷开展 CO<sub>2</sub> 相变爆破致裂增透现场试验,根据 1903 工作面回风巷具体施工特点,实际在 1903 工作面回风巷下帮布

置 14 个致裂孔,上帮布置 2 个致裂孔,致裂孔布置示意图如图 7 所示。

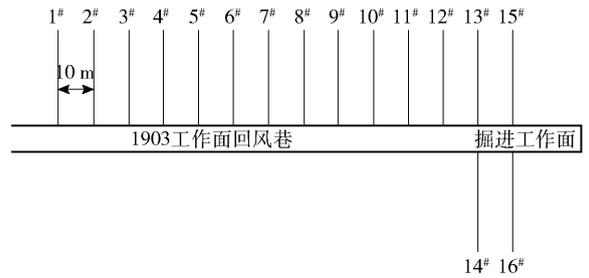


图 7 钻孔布置示意图

根据钻孔的具体施工深度确定致裂器的数量,致裂前检查测量作业地点附近的瓦斯、CO<sub>2</sub> 浓度,待瓦斯浓度低于 0.8%、CO<sub>2</sub> 浓度低于 0.5% 时进行致裂工作。

### 4.2 致裂试验数据分析

透气性系数对比考察采用刘明举、何学秋提出的煤层透气性系数方法测定<sup>[17]</sup>。向煤层打钻孔,封孔的同时安置瓦斯压力表,待表示数稳定后将其拆除,并安装煤气表采用日测 1 次的方法测定钻孔瓦斯自然流量,直至涌出量稳定。根据煤层径向不稳定流动理论结合测得的煤层瓦斯压力、瓦斯含量及钻孔基本参数综合计算,最终确定煤层的透气性系数。所涉及到的计算公式为

$$A = q \cdot r_1 / (p^2 - p_0^2) \quad (1)$$

$$B = 4 \cdot p^{1.5} \cdot T / (\alpha \cdot r_1^2) \quad (2)$$

式中:  $A$ ——参数;

$B$ ——参数;

$p$ ——煤层瓦斯压力, MPa;

$p_0$ ——绝对瓦斯压力, 通常取 0.1 MPa;

$r_1$ ——钻孔半径, m;

$\lambda$ ——煤层透气性系数;

$\alpha$ ——瓦斯含量系数,  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{1/2}$ 。

由式(1)~(2)可知  $A$ 、 $B$  的数值, 然后任选  $F$  值根据式(3)~(8)反推  $\lambda$ , 再根据式(9)求出  $F$  值, 判断是否符合范围。以此方法反复推演最终计算出煤层的透气性系数, 具体范围下的选用公式如式(4)~(9)所示。

$$\lambda = A^{1.61} \cdot B^{1/1.64} \quad (F = 10^{-2} \sim 1) \quad (3)$$

$$\lambda = A^{1.39} \cdot B^{1/2.56} \quad (F = 1 \sim 10) \quad (4)$$

$$\lambda = 1.10 \cdot A^{1.25} \cdot B^{1/4} \quad (F = 10 \sim 10^2) \quad (5)$$

$$\lambda = 1.83 \cdot A^{1.14} \cdot B^{1/7.3} \quad (F = 10^2 \sim 10^3) \quad (6)$$

$$\lambda = 2.1 \cdot A^{1.11} \cdot B^{1/9} \quad (F = 10^3 \sim 10^5) \quad (7)$$

$$\lambda = 3.14 \cdot A^{1.07} \cdot B^{1/14.4} \quad (F = 10^5 \sim 10^7) \quad (8)$$

$$F = B \cdot \lambda \quad (9)$$

式中:  $T$ ——从排放瓦斯开始到测到瓦斯流量  $q$  时的时间间隔, d;

$q$ ——煤层单位暴露面积上的瓦斯流量,  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ,  $q = Q/(2\pi r_1 L)$ ;

$Q$ —— $T$  时刻的瓦斯流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$L$ ——钻孔见煤长度, m, 可取煤层厚度;

$\alpha$ ——瓦斯含量系数,  $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{1/2}$ ;

$\lambda$ ——煤层的透气性系数,  $\text{m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$ 。

未 1、未 3 孔为未致裂增透区域的煤层透气性系数测定孔, 作为原始对照组; 6#、7#、8#致裂孔为致裂增透后煤层透气性系数的测定孔, 作为实验对照组。对各对照组的瓦斯自然流量进行测量, 结果见表 2, 钻孔瓦斯自然流量测试变化曲线如图 8 所示。

结合测量数据及计算公式计算可得各钻孔的煤层透气性系数数值见表 3。

液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破致裂增透前该煤层的透气性系数  $\lambda$  为 0.126~0.135  $\text{m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$ 。进行爆破致裂增透后, 煤层的透气性系数  $\lambda$  上升为 0.363~0.441  $\text{m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$ 。表明液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破煤层致裂后, 煤层的透气性显著提高其数值增大为原始煤层的 3 倍, 说明液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破致裂增透技术对于煤层的增透和提高低透气性煤层瓦斯抽采效率均有较好的意义及效果。

表 2 煤层钻孔瓦斯自然流量测试结果

测试时间/d	未 1/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	未 3/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	6#/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	7#/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	8#/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
1	0.031	0.033	0.051	0.047	0.05
2	0.027	0.030	0.049	0.045	0.049
3	0.026	0.026	0.048	0.043	0.049
4	0.023	0.023	0.045	0.041	0.048
5	0.021	0.021	0.043	0.040	0.047
6	0.018	0.019	0.041	0.039	0.046
7	0.015	0.016	0.041	0.038	0.045

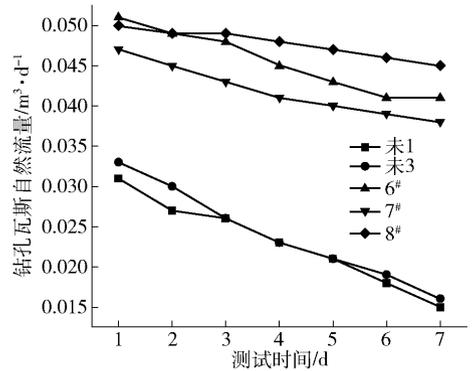


图 8 钻孔瓦斯自然流量测试变化曲线图

表 3 煤体致裂后煤层的透气性系数

孔号	未 1	未 3	6#	7#	8#
透气性系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	0.126	0.135	0.388	0.363	0.441

## 5 结论

(1) 利用 LS-DYNA 数值模拟二氧化碳相变爆破钻孔间距设置为 10 m、5 m、3 m 三个数值模拟计算模型, 分析其裂纹扩展致裂效果及压力云图变化情况可知, 在爆破钻孔间距设置为 10 m 情况下, 爆破致裂裂纹扩展发育情况最佳, 可获得良好的破碎致裂效果。

(2) 开展现场爆破致裂增透裂纹扩展试验后, 煤层的透气性系数  $\lambda$  上升为 0.363~0.441  $\text{m}^2/\text{MPa}^2 \cdot \text{d}$ , 增大为原始煤层的 3 倍左右, 煤层的透气性显著提高。表明该项技术能有效的提高煤层气开采的效率对于开采灾害的降低以及煤矿井下安全事故的预防均有一定意义。

### [参考文献]

[1] 秦勇, 袁亮, 胡天庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 1-6.  
 [2] 张健. 二氧化碳致裂技术在煤矿安全生产中的应用[J]. 安全, 2019, 40(6): 46-48.