

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2018.09.051

# 基于 COMSOL 数值模拟的液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂布孔参数优化

张柏林<sup>1,2</sup>, 李豪君<sup>1,2</sup>, 张兴华<sup>1,2</sup>

(1.煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2.煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:**为了能将液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术高效地应用到低透气煤层强化增透领域, 基于 COMSOL 软件对液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术布孔参数进行数值模拟优化, 并在平煤十三矿进行了穿层强化预抽煤层瓦斯试验, 对优化结果进行了验证。不同布孔方式、孔排间距参数下模拟试验和现场试验研究结果表明: 同孔距下“隔二爆一”布孔方式其致裂后抽采效果优于“隔一爆一”布孔方式, 最终确定平煤十三矿最佳布孔方式为孔距为 6 m 的“隔二爆一”式。

**关键词:**液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂; 低透煤层; 布孔方式; 数值模拟; 瓦斯抽采; 卸压增透

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2018)09-0207-04

## Parameters Optimization for Hole Layout of Liquid CO<sub>2</sub> Phase-change Fracturing Technology Based on COMSOL Numerical Simulation

ZHANG Bailin<sup>1,2</sup>, LI Haojun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinghua<sup>1,2</sup>

(1.China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

**Abstract:** In order to effectively apply the liquid CO<sub>2</sub> phase-change fracturing to the field of low permeability coal seam reinforcement and permeability improvement, this paper simulated and optimized the parameters of hole layout of the liquid CO<sub>2</sub> phase-change fracturing technology based on COMSOL, and the result is validated through the test of pre-pumping coal seam gas by cross-strata borehole in Pingdingshan No.13 Mine. The results of simulation test and field test under different hole layout and hole spacing parameters show that, with the same hole spacing, the method of “blasting one hole in every three holes” is superior to that of “blasting one hole in every two holes”. Finally, it is determined that the best hole arrangement for Pingdingshan No.13 Mine is “blasting one hole in every three holes” with a hole spacing of 6 m.

**Key words:** liquid CO<sub>2</sub> phase-change fracturing; low permeability coal seam; hole arrangement; numerical simulation; gas drainage; unloading permeability improvement

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术是一种基于物理爆破的新型深孔预裂技术, 爆破后产生的裂隙能有效地增加低透气煤层透气性<sup>[1]</sup>。目前该技术在多家煤矿的增透领域得到了应用, 并取得了良好的抽采效果。深孔预裂爆破的目的是为了使煤体产生新的裂隙, 并使裂隙相互发育贯通, 以此来提高煤层透气性, 减少抽采的阻力, 进而提高瓦斯抽采效率<sup>[2]</sup>。目前, 国内学者<sup>[3-6]</sup>对液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂在强化预抽煤层瓦斯效果方面的研究, 大多是单孔致裂后的效果的

试探性试验, 对于其布孔方式、孔排距参数方面很少有研究。同时, 研究发现炸药布孔方式直接影响着爆破能量分布<sup>[7-10]</sup>。因此, 对于该新型的深孔预裂爆破增透技术, 对其布孔参数进行优化研究, 使相邻孔间形成贯通的裂隙, 并在各个方向尽可能多滴产生裂隙, 使爆破孔周围煤体形成相互连通的裂隙网, 确定其合理的布孔参数显得尤为重要。

### 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂力学模型

#### 1.1 致裂机理

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程是将液态气体在短时间内转化为气体, 并冲破爆破筒顶端的定压泄能片经

**基金项目:**新疆维吾尔自治区引进高层次人才及“天山学者”启动基金资助项目; 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(201710755105); 中国地质调查局资助项目(2017D01C067)

过释放筒作用到致裂孔周边煤体上,同时产出致裂冲击波<sup>[11-12]</sup>。煤体在气体的冲击下将产生径向的位移,同时钻孔周围煤体产生径向压缩和切向拉伸。

在致裂冲击波的剪切作用下煤体开始破坏,产生裂隙,同时产生大量气体进入裂隙,使是裂隙进一步发育贯通,进而达到预裂增透的目的。

### 1.2 致裂力学方程

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程属于高压气体冲击爆破过程,根据爆破动力学和气体断裂力学理论爆破气体对岩石的拉伸破坏作用研究,致裂区可分为 CO<sub>2</sub> 气体直接作用区、应力波作用区和准静力场区<sup>[13-15]</sup>。其中直接作用区范围为致裂孔径的 4~9 倍,其余 2 区范围可根据以下公式计算。

应力波区即初始裂隙半径可根据的霍克-布朗准则<sup>[16]</sup>计算,公式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m\sigma_3/\sigma_c + s)^{0.5} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  为峰值压力下煤体最大、最小主应力; $\sigma_c$  为单轴抗压强度; $s$  为岩石的霍克-布朗参数,与岩石材料相关,当  $s=1$  时,表示未被破坏, $s<1$ ,表示岩石不同程度的破坏; $m$  为动、静载荷抗压强度系数,取值为 10。

同时根据爆破受力公式<sup>[13]</sup>,在  $r$  处煤体所受应力大小  $\sigma_r$  为:

$$\sigma_r = p_0 \left( \frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $r$  为距离炮孔距离, m;  $r_c$  为初始裂隙长度, m;  $p_0$  为初始裂隙区内气体压力, MPa;  $\alpha$  为衰减指数,取值 1.5。

当煤体所受应力  $\sigma_r$  大于  $\sigma_3$  时煤体即会产生裂隙,结合式(1)、式(2)可计算出初始裂隙长度  $r_c$  为:

$$r_c = r_h \left( \frac{p_{\max}}{K_1 S_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

式中: $r_h$  为致裂孔孔径,取 94 mm;  $K_1$  为动载下抗拉强度提高系数,致裂加载速率下取值约为 10;  $S_1$  为岩石静载下的抗拉强度, MPa;  $p_{\max}$  为爆破气体压力最大值。

距离炮孔  $r$  处的气体作用的准静应力场为:

$$\begin{cases} \left( \frac{p_{\max}}{2p_0} \right)^{1/K} = 1 + \left[ \left( \frac{r_c}{r_h} \right)^2 - 1 \right] \frac{p_0}{K_b} \\ \sigma_r = p_0 \left( \frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K$  为玻尔兹曼常数, K;  $K_b$  为煤的体积模量,  $K_b = \frac{E}{3(1-2\mu)}$ , MPa;  $E$  为煤体弹性模量,取值 2 GPa;  $\mu$  为煤体泊松比, 0.3。

### 1.3 煤体失稳破坏准则

对于煤体的破坏准则,由于模拟的是动态载荷下作用过程,采用非线性的霍克-布朗准则比较适合工程实际,因此模拟采用霍克-布朗强度准则对煤体破坏程度 Fail 进行判定,改进后霍克-布朗强度准则<sup>[16]</sup>为:

$$Fail = ((\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c - p)^2 - m(\sigma_3 / \sigma_c - p) \quad (5)$$

式中: $p$  为原煤瓦斯压力, MPa。

本次模拟认为:当  $Fail \geq 1$  时,表示煤体处于完整状态;  $Fail < 1$  时,表示煤体破坏,且值越小表示破坏程度越剧烈。

## 2 致裂孔布置方案设计

平煤十三矿原有钻孔设计为每组布置 13 个钻孔,孔排间距 5 m,但由于每组布孔个数较多,现场施工开孔困难,现场将每组孔分 2 列布置即:列内孔间距 5 m,列间距 2.5 m。致裂试验采用实际抽采孔的布孔方式,致裂孔位置按照组内的“隔一爆一”和“隔二爆一”方式进行布置,现场布孔示意图如图 1。

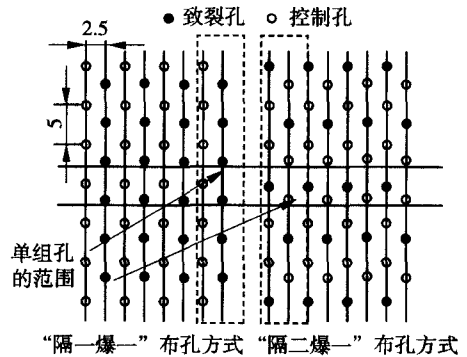


图 1 现场布孔示意图

## 3 不同布孔方式致裂模型的建立及解算

为了确定液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术合理布孔参数,采用数值模拟软件 COMSOL Metaphysics 的 solid Mechanics 模块,该模块包含了弹性力学方程、能量守恒方程、质量守恒方程、致裂力学方程,并利用软件对模型进行了单元划分,将整体划分为不同大小的受力微元,进行非线性力学方程的迭代计算。

### 3.1 模型建立及初值

模型采用高压气体爆破冲击波作用原理<sup>[13-14]</sup>进行数值计算,模型根据钻孔实际控制宽度,选择平面大小为 40 m×40 m,厚度为 5 m 进行建模。对于致裂孔边界加载致裂函数,抽采的边界设置为自由边界,模型四周固定约束边界。

致裂过程是一个随时间变化的过程,因此模拟选择了瞬态模型进行求解。对致裂孔的边界加载致裂函数,该函数是根据高压气体冲击波随时间的衰减规律<sup>[15-16]</sup>,并结合冲击波传播距离与时间的函数关系与实际的致裂过程拟合而成,函数表达式为:

$$p_1(t) = p_1 e^{-\gamma t/t_0} \sin(4\pi t/(t+t_0)) \quad (6)$$

式中: $p_1$  为致裂的峰值压力,MPa; $t$  为时间,s; $t_0$  为致裂过程时间,取 20 ms; $\gamma$  为衰减率,根据致裂衰减速度取值 0.28。

### 3.2 不同布孔方式的模拟

按照现场实际布孔思路,进行了孔距 5、6、7 m 不同布孔方式和孔距的模拟,考虑模型为瞬态过程,模拟得到应力应变云图也是不同时刻下的,同时失稳判据函数选择沿模型  $y$  轴线位置的剖面图进行破坏程度的分析,模拟结果如图 2。

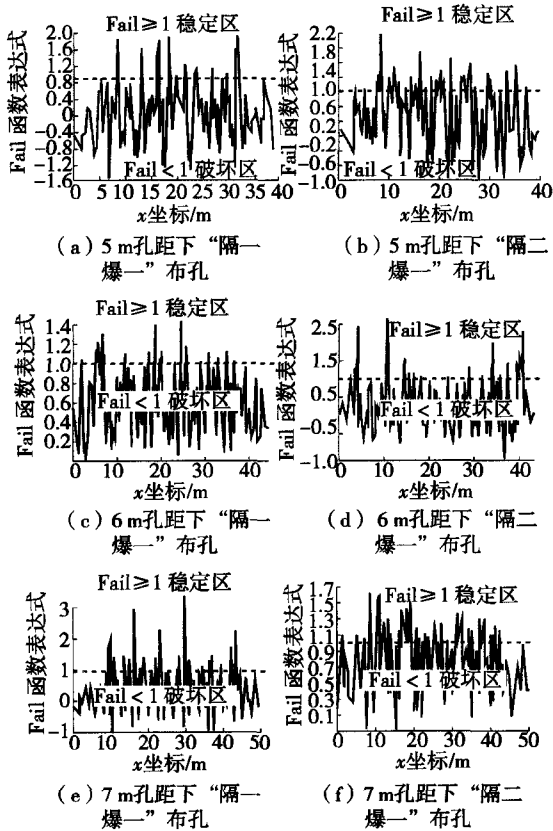


图 2 不同布孔方式模拟结果图(Fail 函数表达式曲线)

根据失效判据函数 Fail 对破坏区的划分,同孔距下“隔二爆一”破坏区的区域面积明显大于“隔一爆一”面积,即“隔二爆一”布孔致裂效果优于“隔一爆一”。可以看出“隔二爆一”由于致裂孔交错布置,其致裂后煤体变形较为均匀,破坏范围也较大。

同时对比孔距 5、6、7 m 致裂效果。根据模拟得到破坏区大小范围可以看出,随着孔距的增大,致裂由于应力集中现象减弱,致裂能量相对地分布均匀,致裂产生的破坏区范围增加;“隔二爆一”布孔方式在孔距 6 m 时致裂效果最好;孔距达到 7 m 时,根据其 Fail 表达式可以看出,将出现部分致裂影响不到的稳定区域。

为了验证模拟的准确性,根据布孔方式,现场选择平煤股份十三矿己-1 采区 11111 底板岩巷 850~950 m 范围段作为试验区进行验证孔距 5 m 和 6 m 的 2 种布孔方式致裂试验。

### 3.3 现场试验效果

试验区划分了 2 个单元,即单元一(孔距 5 m)和单元二(孔距 6 m),经过现场测压、取样发现该 100 m 范围内煤层原煤瓦斯含量为 8.7~11.7 m<sup>3</sup>/t,原煤瓦斯压力为 0.8~0.88 MPa,原始煤层透气性系数为 0.06 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。

试验按照设计的方案进行了液态 CO<sub>2</sub> 致裂爆破,并分别对抽采的瓦斯浓度、负压、流量进行抽采效果的考察。

#### 3.3.1 单元一 2 种布孔方式下的瓦斯抽采效果

该试验单元内致裂孔在第 8 d 左右进行了致裂,单元一 2 种布孔方式下抽采效果对比如图 3。通过图 3 的平均抽采浓度曲线,可计算得到“隔一爆一”布孔方式下致裂后 10、20、30、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 28、52、90、103 m<sup>3</sup>,衰减稳定后平均单孔日抽采纯量为 0.8 m<sup>3</sup>/d 左右;“隔二爆一”布孔方式下致裂后 10、20、30、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 38、75、115、123 m<sup>3</sup>,衰减稳定后平均单孔日抽采纯量为 1.2 m<sup>3</sup>/d 左右。

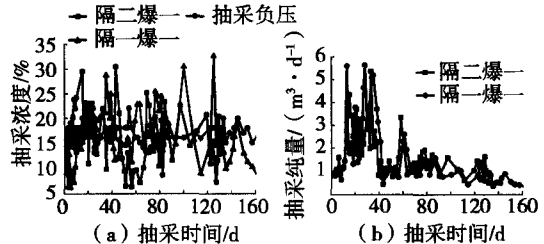


图 3 单元一 2 种布孔方式下抽采效果对比

#### 3.3.2 单元二 2 种布孔方式下的瓦斯抽采效果

该试验单元内矩形孔和梅花孔布孔方式均都在第 7 d 左右进行液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂。单元二 2 种布孔方式下抽采效果对比如图 4。根据图 4 致裂前后平均抽采浓度曲线,可计算出“隔一爆一”布孔方式下

致裂后 10、20、30、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 25、65、87、108 m<sup>3</sup>。单孔瓦斯抽采纯量在第 100 d 才衰减稳定, 但依然能稳定在 1.0 m<sup>3</sup>/d 左右; “隔二爆一”布孔方式下致裂后 10、20、30、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 46、85、112、130 m<sup>3</sup>。

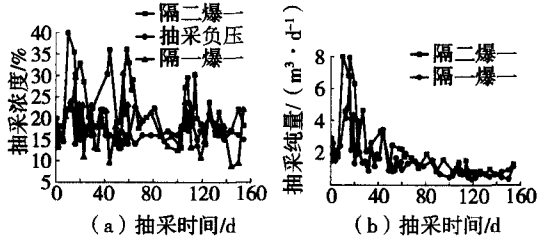


图4 单元二 2 种布孔方式下抽采效果对比

该布孔方式下, 单孔瓦斯日抽采纯量稳定后, 稳定在 1.3 m<sup>3</sup>/d, 对比发现“隔二爆一”效果同样优于“隔一爆一”。

综合现场试验与数值模拟结果, 可以看出数值模拟能够较为准确地模拟实际致裂效果, 综合数值模拟与现场可以看出平煤十三矿最佳布孔方式为孔距 6 m 的“隔二爆一”布孔方式。

#### 4 结论

1) 通过模拟结果, 结合在十三矿的液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔距为 5、6 m 下 2 种布孔方式下的试验后瓦斯抽采效果, 可以看出 2 种间距下致裂后“隔一爆一”与“隔二爆一”布孔方式均取得理想的效果, 但“隔二爆一”效果均好于“隔一爆一”。

2) 可以看出建立的致裂模型与现场实际效果是一致的, 同时加上模拟中忽略地质条件、水文等因素的影响, 因此可认为所建立的致裂模型是能够进行布孔参数的优选。

3) 通过现场试验和模拟可以看出, 致裂孔的孔排间距过小时, 在致裂后易导致煤体失去整体性支撑强度, 煤体在强大地应力作用下被重新压实; 当孔排间距过大时, 致裂区内将导致致裂区内裂隙不能充分发育贯通, 整体透气性差, 因此在孔排间距选择上需要结合致裂影响半径进行优化选择, 结合该矿地质情况致裂孔排间距布置在 6 m 左右是较为合理的。

#### 参考文献:

[1] 王兆丰, 孙小明, 陆庭侃, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学

版), 2015, 34(1): 1-5.

[2] 张兴华. 利用深孔控制预裂爆破强化瓦斯抽放消除回采工作面突出危险性[J]. 煤矿安全, 2006, 37(2): 22-24.

[3] 郭有慧, 孙锐. 寺家庄 CO<sub>2</sub> 预裂爆破强化抽采技术试验研究[J]. 科技与创新, 2014(1): 6-8.

[4] 张悦, 张民波, 朱天玲, 等. 低透气性煤层 CO<sub>2</sub> 增透预裂技术应用[J]. 科技导报, 2013, 31(23): 36-39.

[5] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.

[6] 王兆丰, 李豪君, 陈喜恩, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(9): 11-16.

[7] 查克兵. 优化爆破设计提高难爆矿岩爆破效果[J]. 有色矿山, 1999(S1): 12-14.

[8] 王新生, 崔国顺, 梁为民, 等. 大断面岩巷快速掘进爆破参数优化[J]. 煤炭工程, 2009(12): 35-37.

[9] 吴德义, 刘正保. 半无限岩体应变能随最小抵抗变化规律的探讨[J]. 煤矿爆破, 1996(3): 9-11.

[10] B.H. 库图佐夫, 宋文祥. 裂隙岩体爆破作用参数的优化[J]. 国外金属矿采矿, 1986(9): 41-43.

[11] Lu Tingkan, Wang Zhaofeng, Yang Hongming, et al. Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 300-312.

[12] N Vidanovic, S Ognjanovic, N Ilincic, et al. Application of unconventional methods of underground premises construction in coal mines[J]. TTEM—Technics Technologies Education Management, 2011, 6(4): 861.

[13] 李守巨, 费鸿禄, 何庆志, 等. 试论爆炸气体的爆破作用[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1992(3): 46-49.

[14] 陆退龄. 岩体中爆炸应力波的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 364-372.

[15] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[16] E HOEK, ET BROWN. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(15715): 1013-1035.

作者简介: 张柏林(1987—), 男, 硕士, 2013年毕业于煤炭科学研究总院, 现主要从事科研开发工作。

(收稿日期: 2017-07-14; 责任编辑: 王福厚)