

文章编号: 1673-193X(2017)-01-0039-07

# 高瓦斯低透气性煤层 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术研究\*

洪紫杰<sup>1</sup>, 王 成<sup>1,2</sup>, 熊祖强<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003)

**摘要:**针对高瓦斯低透气性煤层瓦斯抽采效果差,且炸药爆破增透存在危险性大等问题,采用理论分析与计算、数值模拟及现场实验等方法,分析了液态 CO<sub>2</sub> 致裂增透煤层原理及煤层损伤,计算了液态 CO<sub>2</sub> 致裂当量,模拟优化了关键部件释放管几何类型及参数,研究了相变致裂点数对致裂效果的影响。结果表明:CO<sub>2</sub> 相变致裂利用高压气体冲击破碎煤岩体,增强了煤岩层的裂隙发育及透气性;1 kg 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆炸的当量相当于 398 g TNT 炸药;关键部件释放管最优结构为空心圆柱结构,最优长度 18 mm,最优直径 24 mm,最优压力 276 MPa;瓦斯抽放影响半径与致裂管数满足三次函数关系,单孔一点致裂方案能够实现增透促抽;致裂后增透促抽瓦斯效果显著,为安全高效抽采瓦斯提供了有效的技术支撑。

**关键词:**低透气煤层;增透促抽;相变致裂;致裂能量;释放管参数

中图分类号:TD713

文献标志码:A

doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.01.007

## Research on CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing technology for permeability improvement in high gas and low permeability coal seam

HONG Zijie<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1,2</sup>, XIONG Zuqiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety of Henan Province, Jiaozuo Henan 454003, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor gas drainage effect and high risk in permeability improvement by explosives blasting in high gas and low permeability coal seam, through the combined methods of theoretical analysis and calculation, numerical simulation and field test, the principles and coal seam damage of liquid CO<sub>2</sub> fracturing for permeability improvement in coal seam were studied, and the fracturing equivalent of liquid CO<sub>2</sub> was calculated, then the geometric types and parameters of the key part, release tube, were simulated and optimized, finally, the influence of phase-transition fracturing points on the fracturing effect was studied. The results showed that CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing enhances the fractures development and permeability of coal and rock seams through impacting and breaking the coal and rock by high pressure gas. The equivalent of 1 kg liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing blasting is equal to 398 kg TNT explosive. The optimal structure of the release tube is a hollow cylinder structure, of which the optimal length, diameter and pressure is 18 mm, 24 mm and 276 MPa respectively. The influence radius of gas drainage presents a cubic function relationship with the amount of fracturing pipes. The single hole and one point fracturing scheme can achieve the permeability improvement and drainage promoting. The effect of permeability improvement and drainage promoting after fracturing is obvious, which provides effective technical support for safe and efficient gas drainage.

**Key words:** low permeability coal seam; permeability improvement and drainage promoting; phase-transition fracturing; fracturing energy; parameters of release tube

## 0 引言

我国 90% 以上的矿井属于高瓦斯低透气性矿井,瓦斯治理问题日益突出。面对瓦斯抽采浓度低、衰减速率快等难题,国内外学者提出多种抽采治理瓦斯的措施,

其中增透技术受到煤炭行业普遍青睐<sup>[1-3]</sup>。为致力于提高瓦斯抽采效果,我国煤炭行业研究者提出了开采保护层、水力掏槽<sup>[4-5]</sup>、深孔预裂爆破、水力冲孔、水力压裂、水力割缝等<sup>[6-7]</sup>多种增透措施,虽然上述技术措施取得了一定效果,但由于工艺及技术措施不完善,没有取得预期的理想效果<sup>[8]</sup>。上世纪伴随着 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术的迅速发展,在煤炭企业中取得了显著成绩,CO<sub>2</sub> 相变致裂技术克服了炸药爆破增透方法的高危险性及破坏性<sup>[9-11]</sup>,为煤层增透、工作面放顶及巷道开挖提供了新思路。但是 CO<sub>2</sub> 相变致裂机理、致裂能量分析及关

收稿日期: 2016-10-20

作者简介: 洪紫杰,硕士研究生。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51304065, 51274088, 50908076)

键部件释放管几何参数的研究仍停留在发展的初期阶段<sup>[12-15]</sup>,尤其对释放管几何参数研究更是缺少系统的理论与实践,以上原因使 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术处于不成熟阶段。

为了更加科学合理有效的利用 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术增透促抽瓦斯,通过理论分析计算,Fluent 数值模拟<sup>[16]</sup>等技术措施,详细分析了 CO<sub>2</sub> 致裂原理,验算了 CO<sub>2</sub> 致裂能量,选取了释放管几何最优参数<sup>[17-18]</sup>,为进一步推广致裂技术和提高瓦斯抽采效果提供依据。

## 1 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术原理及煤层损伤分析

### 1.1 CO<sub>2</sub> 相变致裂原理

CO<sub>2</sub> 致裂技术原理是预先在瓦斯抽放孔内装入 CO<sub>2</sub> 储液管,通过接通装置电流启动储液管发热片,致使管内 CO<sub>2</sub> 在 20 ms 内受热体积瞬间膨胀 600 倍以上;储液管内 CO<sub>2</sub> 也集聚吸热发生汽化反应,由液态转化为气态,此时储液管气态 CO<sub>2</sub> 压力达到 120 ~ 276 MPa;气态 CO<sub>2</sub> 在如此高压下直接冲破储液管中的定压剪切片装置,由释放管排放孔瞬间喷发。这种充分利用气体高压冲击、破碎煤岩体的相变致裂技术,进一步实现了煤岩体的致裂效果,增加了煤岩层的透气性。

### 1.2 致裂后煤体损伤方程模型分析

CO<sub>2</sub> 致裂是高压气体瞬间冲击、破碎煤体,应力 - 应变值达到损伤阈值时,煤体微观单元即会发生破坏损伤,煤体由于受到高压气体作用破碎变形,同时伴随大量裂隙的产生,煤层透气性也明显增大,损伤单元弹性模量<sup>[19]</sup>如下式所示:

$$E = (1 - D)E_0 \quad (1)$$

式中:  $E$  为损伤单元弹性模量, MPa;  $E_0$  为无损伤单元弹性模量 MPa;  $D$  为损伤系数。

煤体微观单元透气系数损伤耦合方程遵循 2 种破坏规律,若煤岩体微观单元拉伸应力超过抗拉强度  $\sigma_b$ , 损伤阈值,拉应力损伤系数  $D$  表示如下:

$$\sigma_t < \sigma_b \quad (2)$$

$$D = \begin{cases} 1, \varepsilon \geq \varepsilon_{11} \\ \frac{1 - \sigma_{br}}{\varepsilon E_0}, \varepsilon_{10} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{11} \\ 0, \varepsilon \leq \varepsilon_{10} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_{11}$  为抗拉极限应变;  $\varepsilon_{10}$  为弹性拉伸极限应变;  $\sigma_{br}$  为抗拉残余强度, MPa。

对应的单元透气性系数为:

$$\lambda = \begin{cases} \xi_0 \lambda_0 \exp(-\beta(\sigma_t - \theta p_0)), (D = 1) \\ \xi \lambda_0 \exp(-\beta(\sigma_t - \theta p_0)), (0 < D < 1) \\ \lambda_0 \exp(-\beta(\sigma_t - \theta p_0)), (D = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为瓦斯压力系数;  $\beta$  为应力影响系数;  $\xi$  为透气系数的增大系数;  $\xi_0$  为单元损伤后透气系数的增大系数;  $\lambda_0$  为初始透气系数;  $p_0$  为瓦斯压力, MPa;

若煤岩体微观单元压应力超过损伤阈值,损伤系数  $D$  按下式表示:

$$D = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma_{cr}}{\varepsilon E_0}, (\varepsilon c_0 < \varepsilon_r) \\ 0, (\varepsilon < \varepsilon_r) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{cr}$  为抗压残余强度;  $\varepsilon_r$  为残余应变;  $\sigma_{c_0}$  为最大压应变;

对应的单元透气系数:

$$\lambda = \begin{cases} \xi \lambda_0 \exp(-\beta(\sigma_c - \theta p_0)), D > 0 \\ \lambda_0 \exp(-\beta(\sigma_c - \theta p_0)), D = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_c$  为压应力, MPa。

煤体损伤后裂纹的扩张可用有效应力强度因子衡量,表达式如下:

$$\delta_1 = \frac{\delta_0}{1 - D} \quad (7)$$

式中:  $\delta_0$  为应力强度因子;  $\delta_1$  为有效应力强度因子;  $D$  为损伤系数。

由(7)可知,致裂作用时,煤体损伤系数越大,有效应力强度因子也越大,增透致裂效果越好。

## 2 CO<sub>2</sub> 致裂当量计算分析

选用了常用的 SD390 型定压泄能片、储液管及相应的配套设置为例<sup>[20]</sup>,进行计算 CO<sub>2</sub> 相变致裂的 TNT 当量。参考与 CO<sub>2</sub> 储罐爆炸相应的研究文献,CO<sub>2</sub> 储罐爆炸当量计算方法选用压缩气体与饱和水蒸气容器爆破模型的能量计算方法。公式如下:

$$E_g = \frac{pv}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right] \quad (8)$$

式中:  $E_g$  为气体爆炸能量, kJ;  $v$  为容器容积, 2.16 m<sup>3</sup>;  $p$  为容器内气体绝对压力, 276 MPa;  $k$  为气体的绝热指数,取 1.29;  $p_1$  为大气压。

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂装置的近似 TNT 当量  $W_{TNT}$  参考下式计算:

$$W_{TNT} = \frac{E_g}{E_{TNT}} \quad (9)$$

式中:  $E_{TNT}$  为 1 kgTNT 爆炸能量, 4 250 kJ/kg。

由式(8)和式(9)可得,高压 CO<sub>2</sub> 气体爆炸能量约为 1 688 kJ,当量  $W_{TNT}$  约为 398 g,因此,1 kg 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂时,其爆炸的当量相当于 398 gTNT 炸药,其致裂能量足以满足现场对煤层致裂效果的要求。

## 3 CO<sub>2</sub> 释放管几何参数优化研究

由 CO<sub>2</sub> 相变致裂的基本原理可知,释放管是整个相

变致裂装置的终端元件,同时也是形成高压 CO<sub>2</sub> 气体最关键部分,因此释放管整个结构及对应的几何参数将会从根本上影响煤层的致裂效果。在整个致裂设备工作过程中,CO<sub>2</sub> 集聚吸热发生汽化反应后,通过释放管直接作用于煤岩体。鉴于此,优化研究 CO<sub>2</sub> 释放管的几何参数,对于增强其致裂效果有着至关重要的意义。论文选用 Fluent 数值模拟方法优化释放管的几何参数。

### 3.1 释放管喷嘴的形式及几何参数

针对目前释放管喷嘴的研究情况,释放管喷嘴主要分为以下 4 种结构形式,见图 1。

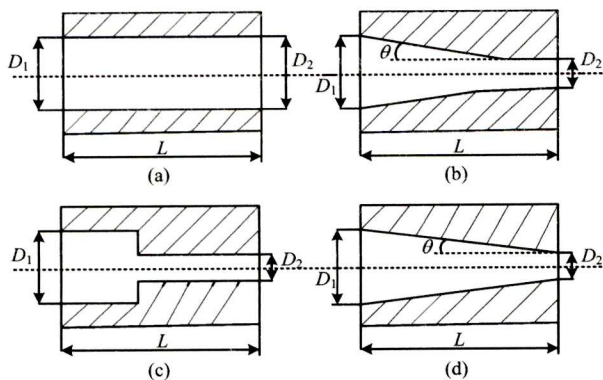


图 1 FLUENT 释放管喷嘴类型

Fig. 1 Fluent software release pipe nozzle type

释放管喷嘴的几何参数<sup>[6]</sup>主要包括:入口直径  $D_1$ , 出口直径  $D_2$ , 喷嘴长度  $L$ , 锥形喷嘴和锥直型喷嘴收缩

角  $\theta$ 。

### 3.2 释放管喷嘴模拟结果及分析

#### 3.2.1 喷嘴几何类型模拟研究与分析

根据理论分析,CO<sub>2</sub> 气体在高压条件下喷出时,其对煤岩体致裂效果相对较好,因此首先选择现有的最高压力 276 MPa 进行数值模拟分析,最后再进行验证不同压力的致裂效果。

由图 2 对 4 种结构的压力云图分析可知,通过模拟 CO<sub>2</sub> 气体在高压 276 MPa 条件下喷出的内、外部流场得知,不同的喷嘴结构,CO<sub>2</sub> 气体由喷嘴喷出后的动压力分布差别很大。综合比较,(b),(c),(d) 3 种结构在喷嘴处所产生的喷射流场比较细,(a) 结构在喷嘴处所产生的喷射流场相对较大,相当于后 3 种结构的 2~4 倍;(a) 结构射流段致裂长度明显长于后 3 种结构,但最大动压力量纲并无很大差异;另外,由(a) 结构喷出的 CO<sub>2</sub> 气体扩散范围也比较大,而且处于较高动压力状态下,有利于煤层内裂隙的扩展,能进一步增透煤层的透气性。鉴于此,(a) 结构空心圆柱结构喷嘴性能效果显著,有利于提高瓦斯抽放效果。

#### 3.2.2 喷嘴直径模拟研究与分析

通过模拟喷嘴长度对致裂效果的影响,得出在其他条件相同的条件下,长度在 18 mm,20 mm,24 mm 时喷嘴长度对射流段致裂长度及煤层内裂隙的扩展影响不大,综合考虑装置的便捷性及经济性,确定 18 mm 为喷嘴最优长度。在喷嘴长度一定的情况下,模拟喷嘴直径

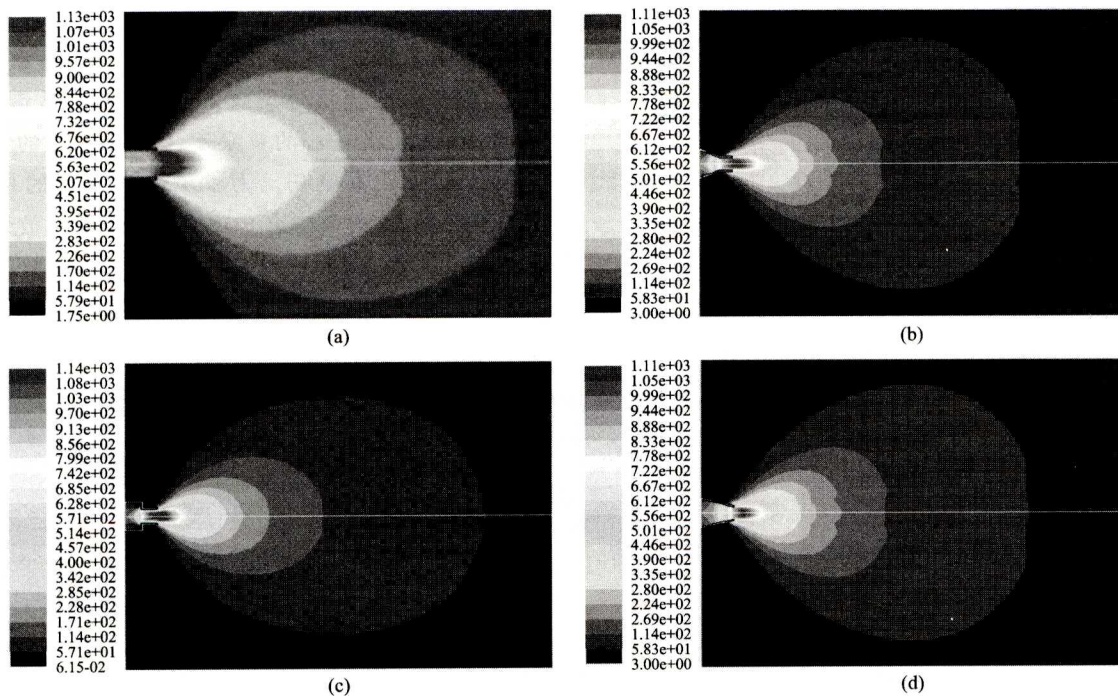


图 2 4 种结构喷嘴动压力

Fig. 2 Four nozzle structure dynamic stress nephogram

分别为 18 mm, 20 mm, 24 mm 而其他条件均相同的空心圆柱结构喷嘴在 276 MPa 条件下内、外部流场变化。

由图 3 对 3 种不同直径的压力云图分析可知, 喷嘴

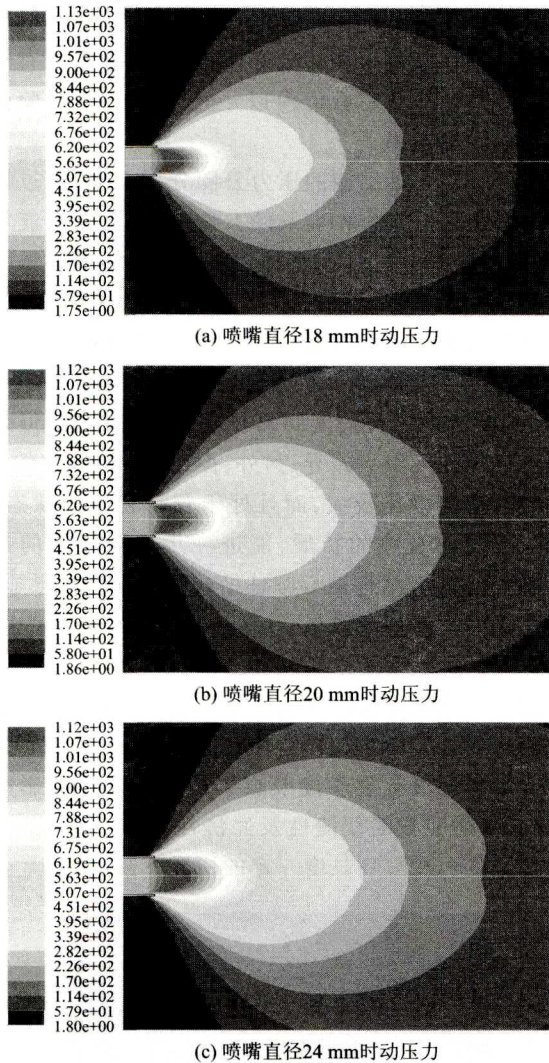


图 3 不同直径 (a) 空心圆柱结构喷嘴动压力

Fig. 3 Different diameter of a hollow cylindrical nozzle structure dynamic pressure nephogram

直径在 18 mm 和 20 mm 时, 喷嘴处的喷射流畅及致裂长度相差不大; 当喷嘴直径达到 24 mm 时, 喷嘴处的喷射流畅及致裂长度都明显增大, 且 CO<sub>2</sub> 气体扩散范围也比较大。总之, 随喷嘴直径的增大, 喷嘴口处的喷射流场也随之变粗, 且致裂段长度也增加。综合分析得出, 确定 24 mm 为释放管喷嘴直径的最优尺寸。

通过上述模拟分析, 确定了释放管喷嘴的最优结构和几何参数, 即最优结构 (a) 空心圆柱结构, 喷嘴最优长度 18 mm, 最优直径 24 mm。为进一步研究不同压力对致裂效果的影响, 分别模拟最优喷嘴在 126 MPa, 190 MPa, 236 MPa 及 276 MPa 时不同压力下内外部流场变化, 通过结果分析比较可知, 随压力增大喷嘴处喷射段的长度和粗细程度都无明显变化, 但流场最大动压力增大, 因此确定最优压力为 276 MPa。

在上述最优模拟计算条件下, 对最优释放管的流场进行模拟, 其动压力云图如图 4 所示。

从释放管动压力云图得出: 各释放管由于释放孔数目的不同, 所产生的压力等值线均不相同。由图中可以看出单组释放孔型释放管产生的流场比较连续均匀, 影响范围较大, 更有利于致裂煤层。而其他几种释放管由于释放孔间产生流场的交互影响, 流场分布不均, 且影响范围也较小。

### 4 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术现场应用

#### 4.1 相变致裂增透技术方案的确定

相变致裂点数即在钻孔内布置 1 根或数根储液管对煤层致裂, 采用不同数量的液态 CO<sub>2</sub> 储液管, 由于 CO<sub>2</sub> 用量不同, 煤层致裂效果各异。CO<sub>2</sub> 致裂启动后, 将形成以钻孔为中心的裂隙区, 且裂隙区域的大小与液态 CO<sub>2</sub> 用量关系密切。为了更科学合理的指导液态 CO<sub>2</sub> 致裂技术, 研究确定 CO<sub>2</sub> 用量与瓦斯抽放影响半径的关系 (图 5), 至关重要, 通过对现场实测数据记录分析, 采用数值拟合的研究方法, 初步获得了致裂管数与

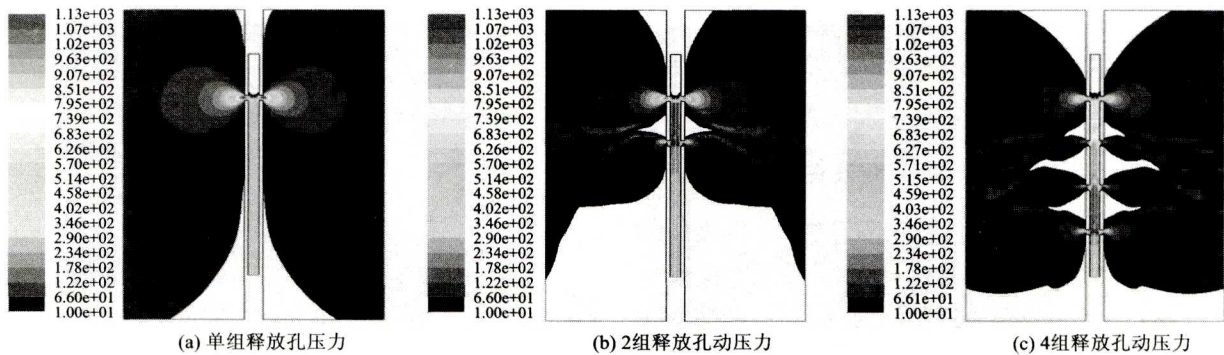


图 4 释放管动压力

Fig. 4 Dynamic pressure of the pipe

钻孔瓦斯抽放影响半径的函数关系:

$$R = 0.19N^3 - 1.46N^2 + 3.72N + 25.3$$

式中:  $R$  为瓦斯抽放影响半径,  $m$ ;  $N$  为液态  $CO_2$  储液管数, 个。

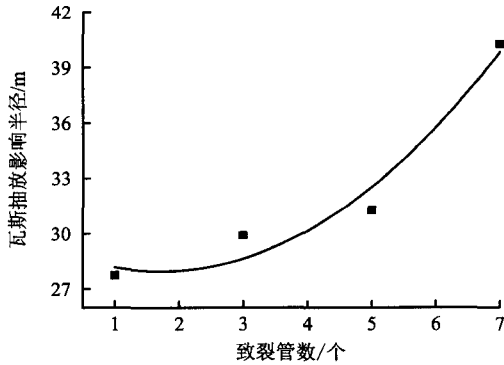


图 5 储液管数量与瓦斯抽放影响半径关系

Fig. 5 Liquid storage tube quantity relationship with gas drainage radius

由函数关系及图 5 可知, 钻孔瓦斯抽放影响半径与致裂管数呈三次函数关系, 即随着储液管数量增多, 瓦斯抽放孔影响半径呈现回归式抛物线趋势增加, 但增长率不大, 同时考虑到施工程序及致裂成本, 本次现场试验储液管数量定为 1 个, 即单孔一点致裂。

#### 4.2 试验地点概括

试验地点选在永锦能源云盖山二矿 23302 工作面, 该煤层位于山西组下部的二 1 煤层, 煤层厚度 0.2 ~ 9.7 m, 平均厚度 5.0 m。23302 工作面地面标高 +416 m, 工作面开采上限 +83 m, 工作面开采下限 +66.5 m, 平均埋深 342 m, 煤层倾角 8° ~ 17°, 23302 工作面走向长度 730 m, 倾向长度 165 m。煤层为 III 类不易自燃煤层, 煤尘爆炸指数 17.99%, 煤尘具有爆炸危险性, 煤层节理比较发育, 煤层顶底板均为砂质泥岩, 透气性较差。瓦斯含量 19.35 m<sup>3</sup>/t, 实测瓦斯压力 4.1 MPa。

#### 4.3 相变致裂煤层透气性分析

$CO_2$  相变致裂技术针对低透气性高瓦斯煤层的增透瓦斯预抽效果明显, 在试验区掘进巷 180 m 处沿巷道走向设置钻孔, 每组施工 12 个钻孔, 且分两列布置, 间距 3 m, 在钻孔中间设置 3 个致裂孔, 钻孔布置见图 6。

$CO_2$  相变致裂后, 煤层松动钻孔内裂隙扩展发育, 煤层透气性显著增加; 然而随着煤体致裂后, 要发生收缩变形, 致裂后的裂隙自动闭合, 煤层透气性又逐渐降低, 40 d 后又趋于稳定。为直观形象观测煤层透气性变化, 论文采用径向流量法测量煤层透气性系数, 通过对比得知, 趋于稳定后透气性系数提高 19.83 ~ 24.45 倍, 增透效果显著, 见图 7。

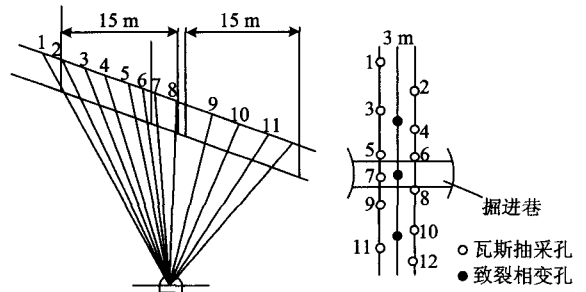


图 6 钻孔现场布置

Fig. 6 Drill site layout

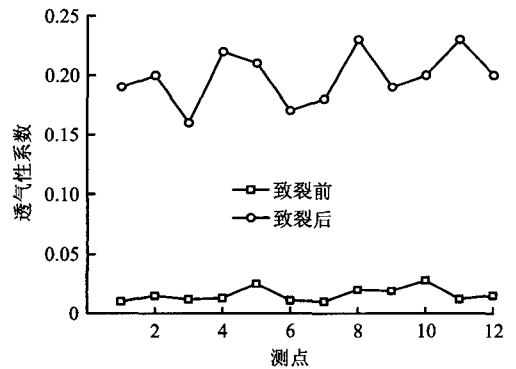


图 7 煤层透气性系数

Fig. 7 Permeability coefficient of coal seam

#### 4.4 瓦斯抽采效果分析

本次现场试验以  $CO_2$  致裂后钻孔的瓦斯平均浓度及抽采纯量为评价指标, 致裂前后其随抽采时间的变化关系图 8 所示。由图 8 得出, 致裂前 10 d 瓦斯平均浓度偏低, 平均浓度为 15.3%, 在瓦斯抽采 10 d 以后, 瓦斯平均浓度基本维持在 10% 以下, 且瓦斯浓度衰减率也较快, 抽采周期较短; 而致裂后瓦斯平均浓度明显提高, 致裂后前 30 d 内, 瓦斯平均浓度在 53.6% 左右, 在致裂 50 d 后, 瓦斯平均浓度仍维持在 45% 以上, 相对于致裂前提高了 4 倍左右, 同时瓦斯衰减周期明显增长, 比致裂

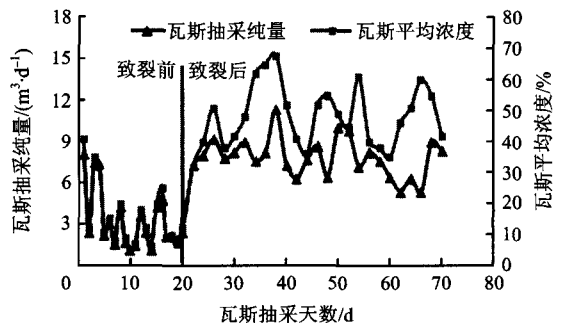


图 8 致裂前后瓦斯抽采效果

Fig. 8 Effect of gas drainage before and after fracturing

前至少提高 2.5 倍,且目前判断,瓦斯抽采浓度依然没出现衰减趋势。由图 8 得出,瓦斯抽采纯量由致裂前平均  $1.8 \text{ m}^3/\text{d}$  提高到致裂后平均  $6 \text{ m}^3/\text{d}$ ,提升幅度将接近 3.33 倍,明显提高了瓦斯抽采量。

综上所述可知,低透气性煤层采用  $\text{CO}_2$  致裂技术,能够明显提高瓦斯的抽采浓度及抽采纯量,并延长了衰减周期,取得了比较理想的增透促抽效果。

## 5 结论

1)  $\text{CO}_2$  相变致裂技术利用高压气体冲击破碎煤岩体,实现了煤岩体的裂隙发育,增大了煤岩层的透气性, $\text{CO}_2$  致裂作用时,煤体损伤系数越大,有效应力强度因子也越大,增透致裂效果越显著。

2) 得到了 1 kg 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂爆炸当量,其爆炸的当量相当于 398 gTNT 炸药。

3) 确定了释放管喷嘴的最优结构和几何参数,即最优结构为 ( $\alpha$ ) 空心圆柱结构,喷嘴最优长度 18 mm,最优直径 24 mm,最优压力 276 MPa;单组释放孔型释放管产生的流场比较连续均匀,影响范围较大,更有利于致裂煤层。

4) 得到了钻孔瓦斯抽放影响半径与致裂管数呈三次函数关系,提出了单孔一点致裂技术方案,现场应用取得了显著的增透促抽效果。

## 参考文献

- [1] 王兆丰,李豪君,陈喜恩. 液态  $\text{CO}_2$  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, 34(11): 12-15.  
WANG Zhaofeng, LI Haojun, CHEN Xi'en. Study on hole layout of liquid  $\text{CO}_2$  phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 34(11): 12-15.
- [2] 魏国营,郭中海,谢伦荣,等. 煤巷掘进水力掏槽防治煤与瓦斯突出技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 172-176.  
WEI Guoying, GUO Zhonghai, XIE Lunrong, et al. Hydraulic slotting technology to prevent coal and gas outburst during heading excavation[J]. Journal Of China Coal Society. 2007, 32(2): 172-176.
- [3] 周声才,李栋,张凤舞. 煤层瓦斯抽采爆破卸压的钻孔布置优化分析及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 807-808.  
ZHOU Shengcai, LI Dong, ZHANG Fengwu. Optimization analysis of drilling layout based on blasting releasing pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 807-808.
- [4] 王兆丰,孙小明,陆庭侃. 液态  $\text{CO}_2$  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): 2-5.  
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkai. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid  $\text{CO}_2$  phase transition[J]. Journal of HeNan Polytechnic University(Natural Science), 2015, 34(1): 2-5.
- [5] 龚敏,黄毅华,王德胜,等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1674-1681.  
GONG Min, HUANG Yihua, WANG Desheng, et al. Numerical simulation on mechanical characteristics of deep-hole presplitting blasting in soft coal bed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1674-1681.
- [6] 徐幼平,林柏泉,翟成,等. 定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 104-110.  
XU Youping, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, et al. Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(7): 104-110.
- [7] 胡国忠,许家林,王宏图,等. 低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 1-6.  
HU Guozhong, XU Jialin, WANG Hongtu, et al. Research on a dynamically coupled deformation and gas flow model applied to low-permeability coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 1-6.
- [8] 唐书恒,马彩霞,叶建平,等. 注二氧化碳提高煤层甲烷采收率的实验模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 606-611.  
TANG Shuheng, MA Caixia, YE Jianping, et al. A modeling experiment of enhancing coalbed methane recovery by carbon dioxide injection[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 606-611.
- [9] 张春会,赵全胜,于永江. 非均匀煤岩双重介质渗流-应力耦合模型[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 481-485.  
ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng, YU Yongsheng. Double media seepage-stress coupling model for heterogeneous coal and rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 481-485.
- [10] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等. 低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 455-458.  
ZHAO Yangsheng, YANG Dong, HU Yaoqing, et al. Research on effective technical way of coal bed methane extraction in low permeability coal seam[J]. Journal Of China Coal Society, 2001, 26(5): 455-458.
- [11] 董庆祥,王兆丰,韩亚北. 液态  $\text{CO}_2$  相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 85-87.  
DONG Qingxiang, WANG Zhangfeng, HAN Yabei. Research on TNT equivalent of liquid  $\text{CO}_2$  phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(1): 85-87.
- [12] 韩亚北. 液态二氧化碳相变致裂增透机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014: 7.
- [13] 赵万春,艾池,李玉伟,等. 基于损伤理论双重介质水力压裂岩体劣化与孔渗特性变化理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(28): 3490-3496.  
ZHAO Wanchun, AI Chi, LI Yuwei, et al. Study on rockmass deterioration and porosity and permeability in double-porosity medium under hydraulic fracture based on damage theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(28): 3490-3496.
- [14] 张建英,王兆丰,辛新平. 高压射流割缝卸压增透技术在单一低渗透煤层瓦斯抽采中的应用[J]. 中州煤炭, 2015(1): 57-60.

- ZHANG Jianying, WANG Zhaofeng, XIN Xinping. Application of high pressure water jet cutting technology in single low permeability coal seam gas extraction[J]. Zhong Zhou Coal, 2015(1):57-60.
- [15] 王海东. 突出煤层掘进工作面 CO<sub>2</sub> 可控相变致裂防突技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3):70-73.
- WANG Haidong. CO<sub>2</sub> controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3):70-73.
- [16] 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.
- ZHANG Yue, ZHANG Minbo, ZHU Tianling, et al. Low permeability coal seam CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting technology application[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(23):36-39.
- [17] 范迎春. 二氧化碳爆破增透技术在低透气性煤层中的应用研究[J]. 中州煤炭, 2015(5):1-3.
- FAN Yingchun. Application research on low permeability seam of carbon dioxide blasting fracturing technology[J]. Zhongzhou Coal, 2015(5):1-3.
- [18] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2):80-83.
- HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracture applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):80-83.
- [19] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛. 岩石破裂过程渗流特性-理论模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004:69-70.
- YANG Tianhong, TANG Chunan, XU Tao. Seepage characteristics of rock failure process: a theoretical model and its application[M]; Beijing: Science Press, 2004, 69-70.
- [20] 李文炜, 狄刚, 王瑞欣. 船运液态 CO<sub>2</sub> 储罐爆炸事故的原因分析[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1):95-98.
- LI Wenwei, DI Gang, WANG Runxin. Analysis of a liquid CO<sub>2</sub> tank explosion on a ship[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(1):95-98.

(责任编辑:郭利)

## 国家安全监管总局印发安全生产信息化总体建设方案及相关技术文件

为加快推进全国安全生产信息化,提高信息化建设和应用水平,加强信息系统互联互通,促进跨地区、跨部门的信息共享和业务协同,国家安全监管总局组织编制了《全国安全生产信息化总体建设方案》等8项安全生产信息化技术文件。2016年12月27日,国家安全监管总局印发了《关于印发安全生产信息化总体建设方案及相关技术文件的通知》(安监总科技[2016]143号)。

通知要求,要加强组织领导,细化实施方案,提高应用效能,严格项目管理。各级安全监管监察机构要充分认识加强安全生产信息化工作的重要意义,紧密围绕安全生产中心工作,建立健全安全生产信息化领导机构和工作机构,明确职责分工,确保责任到具体部门和人员。建立安全生产信息化工作制度,大力开展信息化应用知识和技能培训,提高安全监管监察人员的信息化能力和水平。各地要按照总体建设方案,结合本地区实际,抓紧制定本地区安全生产信息化实施方案,落实各项建设任务,确保全国安全生产信息化一盘棋建设。充分利用国家安全监管总局的通用信息基础设施开展信息化建设,强化互联互通和信息共享,避免重复建设。各级安全监管监察机构要加快整合分散的应用系统,推动平台化和一站式服务,消除信息孤岛。信息系统设计要注重与其它部门的衔接,为系统集成和信息交换预留接口。加强安全生产和职业健康监管执法业务系统建设,开展安全生产规律性、关联性特征分析,提高信息化应用水平。国家安全监管总局将进一步加强信息化工作的统筹协调和评价考核,组织开展督导检查,提升安全生产信息化应用成效。严格执行国家有关基本建设项目管理规定,建立健全项目管理制度,完善档案管理,加强项目管理各环节的风险评估和管控,规范政府采购招投标行为,严格财经纪律,加强资金监管,确保工程建设质量和廉政建设。

通知具体内容参见国家安全监管总局政府网站:

[http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel\\_5911/2017/0113/282330/content\\_282330.htm](http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_5911/2017/0113/282330/content_282330.htm)。