

doi:10.13301/j.cnki.ct.2021.11.028

# 基于 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术的低渗透煤层钻孔参数优化研究\*

李青松<sup>1,2,3</sup>, 付金磊<sup>1,2</sup>, 衡献伟<sup>1,2</sup>, 孙英豪<sup>1,2</sup>, 马 曙<sup>2</sup>

(1. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵阳 550025; 2. 贵州省矿山安全科学研究所, 贵阳 550025; 3. 中国矿业大学 安全学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂钻孔参数的合理选取是避免大面积致裂空白区域及提高增透效果的关键。通过 CO<sub>2</sub> 相变致裂  $p-T$  曲线, 探究了液态 CO<sub>2</sub> 致裂增透过程, 采用有限差分数值模拟软件, 建立了单孔、双孔数值模型, 分析了致裂后煤体塑性区特征, 确定了最优的钻孔参数。结果表明: (1) 随着煤层地应力增加, 液态 CO<sub>2</sub> 致裂塑性区域范围呈先增加后减小变化趋势, 随着致裂孔直径增加, 孔径在  $\phi 100$  mm 左右时致裂效果较好; (2) 采用数值模拟、理论计算 2 种方法确定最优致裂孔参数直径为  $\phi 94$  mm、钻孔间距为 3 m; (3) CO<sub>2</sub> 相变致裂井下试验后, 致裂孔抽采孔平均瓦斯抽采纯量是普通抽采孔的 4.76 倍, 瓦斯抽采浓度平均提高 2.8 倍, 抽采达标时间缩短 65% 左右。合理选择液态 CO<sub>2</sub> 致裂钻孔参数, 能够为井下达到最优致裂增透效果及成本节约提供一定参考。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 相变致裂; 增透; 钻孔参数; 数值模拟; 瓦斯抽采

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1008-8725(2021)11-118-06

## Research on Optimization of Drilling Parameters in Low Permeability Coal Seam Based on CO<sub>2</sub> Phase Change Fracturing

LI Qing-song<sup>1,2,3</sup>, FU Jin-lei<sup>1,2</sup>, HENG Xian-wei<sup>1,2</sup>, SUN Ying-hao<sup>1,2</sup>, MA Shu<sup>2</sup>

(1. Guizhou Coal Mine Design Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Mine Safety Scientific Research Institute, Guiyang 550025, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The reasonable selection of CO<sub>2</sub> phase change fracturing drilling parameters is the key to avoid large-scale fracturing blank areas, make full use of the CO<sub>2</sub> phase change fracturing energy and improve the effect of anti-reflection. Through the CO<sub>2</sub> phase change fracturing  $p-T$  curve, the mechanism of liquid CO<sub>2</sub> fracturing and permeability enhancement was studied. Using finite-difference numerical simulation software, a single-hole and double-hole numerical model was established. The characteristics of the plastic zone of the coal after fracturing were analyzed, and the most Excellent drilling parameters. The results show that: (1) As the in-situ stress of the coal seam increases, the range of liquid CO<sub>2</sub> fracturing plasticity shows a trend of first increasing and then decreasing. As the diameter of the fracturing hole increases, the fracturing effect is better when the diameter of the hole is about 100 mm; (2) Two methods of numerical simulation and theoretical calculation are used to determine the optimal fracture hole parameter diameter is 94 mm, and the drill hole spacing is 3 m; (3) After the CO<sub>2</sub> fracturing downhole test, the fracturing hole is pumped the average gas drainage scalar volume of the mining holes is 4.76 times that of the ordinary drainage holes, the gas drainage concentration is increased by an average of 2.8 times, and the drainage time to reach the standard is reduced by about 65%. Reasonable selection of liquid CO<sub>2</sub> fracturing drilling parameters provides a reference for achieving the best downhole fracturing and anti-reflection effect and saving costs.

**Key words:** CO<sub>2</sub> phase change fracturing; anti-reflection; drilling parameters; numerical simulation; gas extraction

### 0 引言

增透技术是解决我国低渗透煤层瓦斯抽采效率

的关键手段, 目前采动卸压增透技术、深孔控制爆破增透技术、水力增透技术及水力割缝等多种技术在井下都进行了一定程度的应用, 但由于煤层赋存条件复杂, 针对煤层的低渗透特性, 很多工艺及措施带

\* 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合基础[2019]1189号; 黔科合基础[2019]1426号); 黔科合平台人才[2019]5675; 黔科合支撑([2020]2Y056号; [2020]4Y049号)

来的增透效果并不理想。

随着增透技术的发展,煤炭行业工作者将油气开发的 CO<sub>2</sub> 压裂技术引入到煤矿的生产实践中,液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术是一种物理爆破方法,克服了传统炸药爆破危险性高、煤体过粉碎等缺点,能够有效增加煤体新生裂隙的产生,同时促进煤体裂隙的二次扩张及贯通,并基于“置换”作用能够有效提高低渗透煤层的透气性,进而提高瓦斯抽采效率。而致裂钻孔参数的合理选择,能够有效为增透效果及成本上提供有益的帮助,但是国内外对致裂钻孔参数优选方面未得到深入研究,盲目施工致裂孔将会带来大面积的致裂空白区域,进而影响瓦斯抽采效果。因此基于损伤力学理论,采用数值模拟与理论计算综合方法确定最优致裂钻孔参数,为 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术低成本、高效率实施提供有益的参考。

## 1 液态 CO<sub>2</sub> 致裂煤体增透技术原理

### 1.1 CO<sub>2</sub> 致裂器原理及结构

对致裂器储液管中的液态 CO<sub>2</sub> 进行加热,其状态由液态变为超临界状态或气态,体积膨胀后压力急剧升高,冲开定压泄能片,由泄能头两侧的出气孔急速冲出,产生应力波向周围传播,生成气体通过排气管的释放通道,在极短的时间内到达煤体表面,形成爆生气流作用在煤体上产生新的裂隙,同时促进原生裂隙的二次扩展、发育,以此实现增透的效果。CO<sub>2</sub> 致裂器结构示意图如图 1 所示。

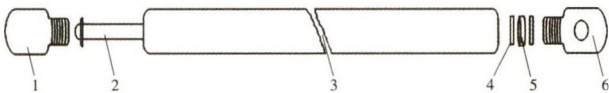


图 1 CO<sub>2</sub> 致裂器结构示意图

1. 起爆头 2. 发热管 3. 主管 4. 密封垫 5. 泄能片 6. 泄能头

### 1.2 致裂器内气体 $p-T$ 变化曲线

CO<sub>2</sub> 致裂增透装置中主管内 CO<sub>2</sub> 气体压力-时间( $p-T$ )曲线如图 2 所示,其中从开始到释放经历了 4 个阶段:

**OA 阶段** 液态 CO<sub>2</sub> 以一定的压力装入主管内的储液管,因而致裂开始前管内就存有一定压力,曲线的起点并非从 0 开始。对液态 CO<sub>2</sub> 进行加热,主管内压力急剧升高至定压泄能片极限压力  $p_1$ ,此过程持续时间约 30 ms。

**AB 阶段** 定压泄能片约 0.3 s 内破断,但还未达到 CO<sub>2</sub> 全部汽化时间,因此压力将继续升高至  $p_2$ ,直到冲破定压泄能片。

**BC 阶段** 高压气体从泄能头两侧冲出,形成的应力波对煤体进行冲击,煤体周围裂隙发生扩展、导

通,气体压力随之大幅下降。

**CD 阶段** 气体压力逐渐下降,CO<sub>2</sub> 致裂后冲击波能量也将发生衰减,裂隙扩展速度降低,但此时钻孔周围煤体已经充分粉碎,由于 CH<sub>4</sub> 吸附能力弱于 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 将占据吸附位,将 CH<sub>4</sub> 从煤体中置换出来,导致煤体内 CH<sub>4</sub> 分子发生大量解吸,从而游离的 CH<sub>4</sub> 浓度上升,实现增透的目的。

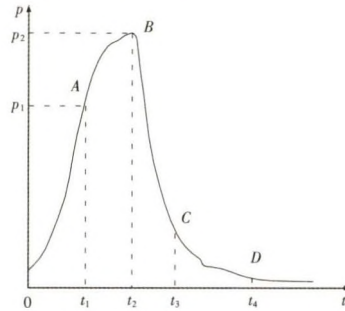


图 2 致裂过程中 CO<sub>2</sub> 气体压力与时间变化曲线

## 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模拟

CO<sub>2</sub> 致裂后以钻孔为中心,由近到远将形成裂隙发育区和裂隙压实区,示意图如图 3 所示。

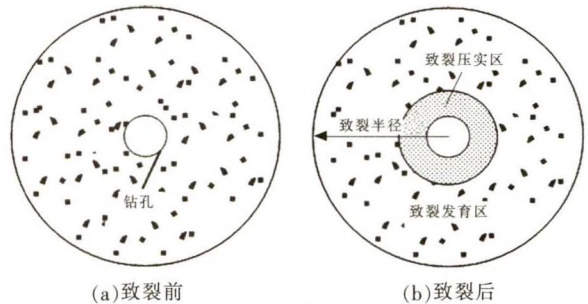


图 3 致裂示意图

### 2.1 数值模型建立

利用有限差分数值模拟软件建立煤层液态 CO<sub>2</sub> 致裂数值模型,模型尺寸为 20 m×30 m×1.6 m,致裂孔设置在模型中心,致裂孔直径  $\phi 94$  mm,孔深 10 m,根据弹塑性力学理论,边界条件设置满足大于 1.5 倍的孔口尺寸,这时孔口与边界之间不发生相互干扰,数值模型如图 4 所示。

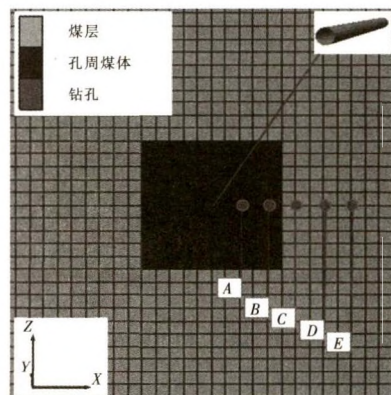


图 4 单孔模型图

在计算运行中,首先对模型施加地应力并对钻孔成孔进行静力计算直至平衡,然后通过向钻孔孔壁施加动荷载函数,开展钻孔致裂的动力计算。计算过程中约束模型底面及两侧边界,模型上覆岩层自重应力为 8 MPa,根据致裂后模型塑性区域范围分析煤体致裂程度,煤体单元的破坏准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则,煤层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 煤层物理力学参数

密度 /kg·m <sup>-3</sup>	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内摩擦角 /( <sup>o</sup> )	黏聚力 /MPa	单轴抗拉强度/MPa
1 380	1.39	0.48	21	1.1	0.58

施加动力荷载的同时在模型 X 方向设置了 5 个监测点 (靠近钻孔的距离依次为 A<B<C<D<E),观察监测点的速度时程曲线,如图 5 所示。

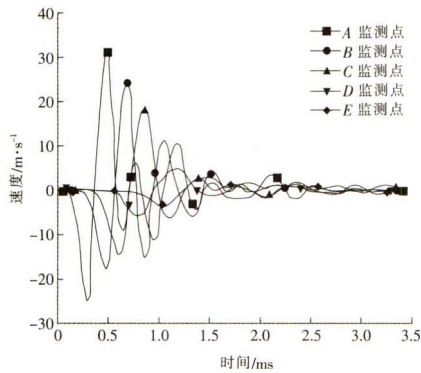


图 5 速度时程曲线

在致裂初期,靠近致裂孔且在裂隙压实区的监测点 A 速度较先响应,距离致裂孔远的监测点速度与靠近致裂孔的速度差异较大,当超过煤体的抗压强度时将发生裂纹扩展及损伤,在 CO<sub>2</sub> 气体与冲击应力波作用下,煤体受到更复杂的拉、压应力,导致各监测点速度发生交叉波动,致裂发育区的裂纹也进一步发生扩展、贯通。

2.2 不同地应力下致裂效果对比

在相同的致裂孔直径条件下(φ94 mm),煤层地应力分别为 4、6、8、10、12 MPa 时,不同地应力下液态 CO<sub>2</sub> 致裂破坏塑性区模拟如图 6 所示。

随着煤层地应力增加,液态 CO<sub>2</sub> 致裂塑性区域范围呈先增加后减小变化趋势(见图 6)。在现场实际应用中需根据煤层地应力情况合理选择钻孔孔径和致裂孔间距,才能获得较好的致裂增透效果。

2.3 不同孔径致裂效果对比

在相同的地应力条件下(8 MPa),致裂孔直径分别为 φ75、φ80、φ94、φ110、φ130 mm 时,φ94、φ110 mm 的致裂塑性区域范围较大,反映出孔径在 φ100 mm 左右时致裂效果较好,如图 7 所示。

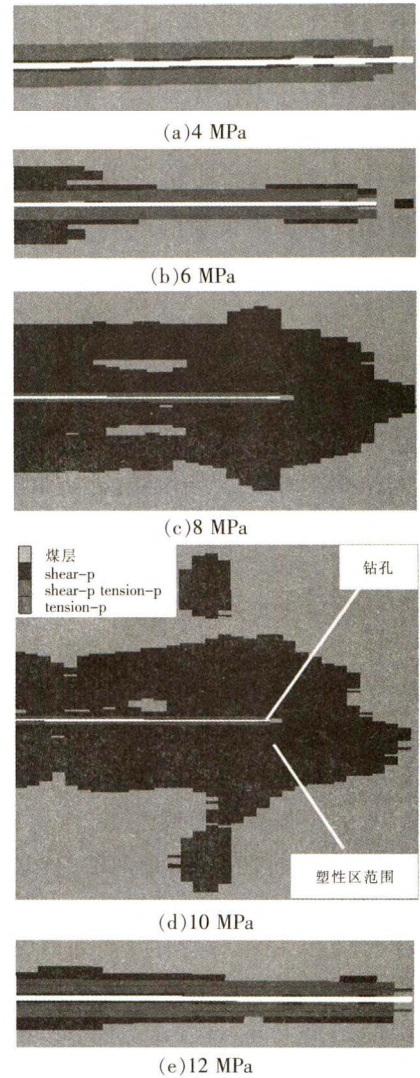


图 6 不同地应力下液态 CO<sub>2</sub> 致裂破坏塑性区形成情况

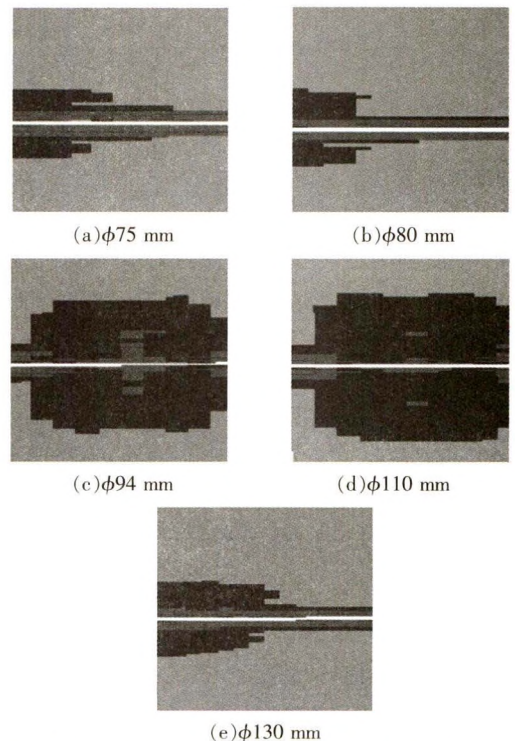


图 7 不同孔径液态 CO<sub>2</sub> 致裂破坏塑性区形成情况

但孔径越大对装备要求更高,进而提升了设备使用成本,而 φ94 mm 直径的致裂孔对周围煤体产生的塑性流动很充分,与 φ110 mm 直径钻孔相差不多,因此在现场实施钻孔时优选直径为 φ94 mm 的致裂孔。

### 3 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂参数确定

#### 3.1 致裂钻孔参数计算

最小抵抗线指致裂器中心到最近自由面的最短距离,影响致裂的破碎效果。而在 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程中,应力冲击波会迅速衰减(见图 5),减小抵抗线有助于提高冲击波的强度,从而使得煤体受到的拉压应力交替周期更长,更加充分利用相变产生的能量,促进煤体裂隙二次扩展,CO<sub>2</sub> 相变致裂叠加示意图如图 8 所示。

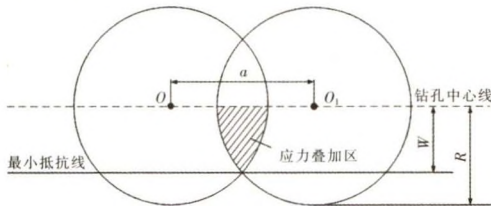


图 8 CO<sub>2</sub> 致裂应力叠加示意图

而在单孔裂隙范围一定条件下,增加孔间距可以减小抵抗线,从而提高致裂效果,为充分利用 CO<sub>2</sub> 相变致裂能量,提升煤体粉碎程度,同时为避免大面积致裂空白区域,选择适宜的钻孔间距,是提高增透效果及消除致裂空白区的关键。

当钻孔间距过大时应力叠加强度将变弱,钻孔之间煤体粉碎程度减弱,从而形成空白区域。当间距过小时应力叠加强度极大增强,煤体过于粉碎,易造成过度变形,影响成孔质量,进而影响抽采效果。因此,为减小两孔之间的大面积致裂空白区域及减弱两孔之间的应力叠加强度,则钻孔间距  $a$  的范围应为  $(R, 2R)$ ,进而最小抵抗线  $W$  的范围为  $(0, R)$ ,单孔破煤面积  $S=aW$ 。

破煤面积大小将影响致裂增透效果,获得破煤面积的最大值能够为致裂增透效果及节约钻孔工程量提供支撑,为了获得破煤面积  $S$  的最大值,根据图 8 得出

$$S=2\left\{\frac{\pi R^2}{2}-\left[R^2\arctan\frac{a}{2W}-\frac{aW}{2}+\frac{1}{2}\left(R^2\arctan\frac{a}{2W}-\frac{aW}{2}\right)\right]\right\}$$

$$=\pi R^2-3R^2\arctan\frac{a}{2W}+\frac{3aW}{2} \quad (1)$$

由图 8 可知,  $\frac{1}{4}a^2+W^2=R^2$ ,为求得  $S$  最大值令其一阶导数为 0,经计算整理得  $a=1.23R, W=0.789R$ 。

根据单孔液态 CO<sub>2</sub> 致裂模拟结果,煤层地应力为 8 MPa 时,液态 CO<sub>2</sub> 致裂有效影响半径为出气孔方向约 2.4 m,根据式(1)计算,存在多致裂孔时钻孔间距应为 3 m 左右。

#### 3.2 双孔数值模拟

利用有限差分数值模拟软件建立煤层液态 CO<sub>2</sub> 致裂数值模型,模型尺寸为 20 m×30 m×1.6 m,致裂孔设置在模型中心左边,辅助孔设置在模型右边,钻孔直径为 φ94 mm,孔深为 10 m,数值模型如图 9 所示。

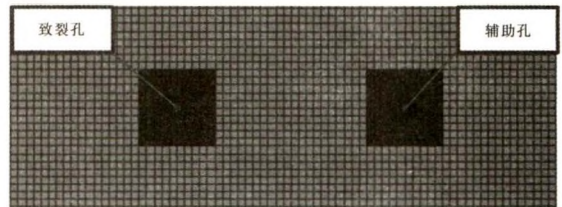


图 9 双孔数值模型

不同孔间距液态 CO<sub>2</sub> 致裂破坏塑性区形成情况如图 10 所示,在相同的参数条件下,钻孔间距分别为 1.5、3、4.5 m 时,3 m 的致裂塑性区域范围较大,在考虑现场实际成本的同时结合 3.1 节计算的钻孔间距结果,在现场施工时选择钻孔间距 2~4 m 也较为合理。

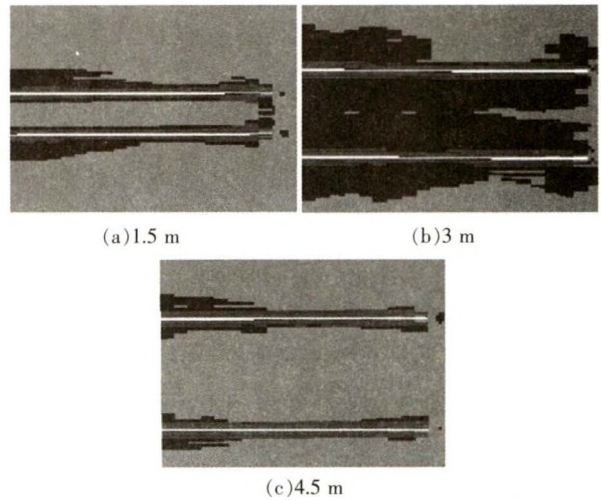


图 10 不同孔间距液态 CO<sub>2</sub> 致裂破坏塑性区形成情况

### 4 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透现场试验

#### 4.1 试验矿井的工作面概况

试验选在安顺市轿子山镇轿子山煤矿,试验地点选在平桥井二水平 9807 进风巷 200~500 m 区域,共计 300 m,巷道沿 M<sub>9</sub> 煤层煤顶板掘进, M<sub>9</sub> 煤层最大瓦斯压力 1.1 MPa,最大瓦斯含量 16.08 m<sup>3</sup>/t、钻孔瓦斯流量衰减系数 0.092~0.715 d<sup>-1</sup>,属较难抽采煤层。

#### 4.2 钻孔参数布置

在平桥井 9807 进风巷无构造和抽采钻孔影响

的原始煤层中布置钻孔,根据计算及数值模拟结果钻孔间距布置为 2~4 m,每组 7 个钻孔,钻孔倾角与煤层倾角一致,即钻孔垂直煤壁开孔,沿煤层钻进,钻孔布置如图 11 所示。

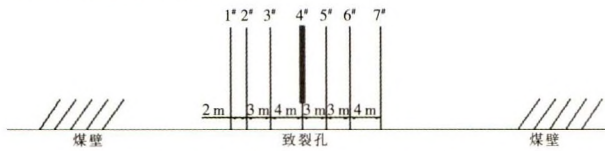


图 11 顺层致裂孔区域预抽布置图

### 4.3 钻孔自然瓦斯流量变化情况

致裂前后钻孔自然瓦斯流量变化曲线如图 12 所示。

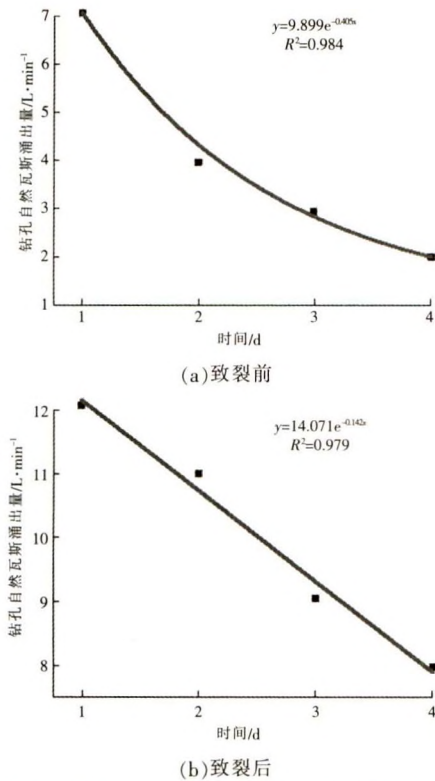


图 12 致裂前后钻孔自然瓦斯流量变化曲线

从图 12 可以看出,致裂前测定钻孔自然瓦斯流量最大值为 7 L/min,第 4 d 衰减至 2 L/min;致裂后钻孔自然流量增大至 12 L/min,第 4 d 仍达到 8 L/min。钻孔自然瓦斯流量较致裂前增加 5 倍,表明致裂后煤层瓦斯释放强度增大;同时,钻孔瓦斯涌出衰减强度降低,致裂前钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.405,致裂后钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.142,即致裂后,钻孔瓦斯涌出衰减强度减小了 64.9%,钻孔瓦斯抽采更具有可持续性。

### 4.4 瓦斯抽采效果分析

第 1 组共施工 7 个钻孔,钻孔变化依次为 1-1#、1-2#、1-3#、1-4#、1-5#、1-6#、1-7#。其中,1-4# 为致裂孔,1-4# 致裂孔瓦斯抽采纯量和浓度变化曲线如图 13 所示。

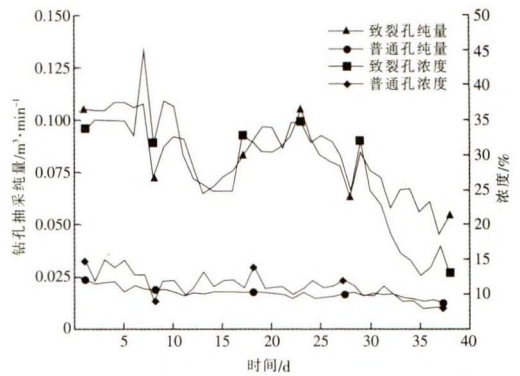


图 13 1-4# 致裂孔与普通抽采孔瓦斯抽采纯量和浓度变化曲线

从图 13 可以看出,1-4# 孔致裂最大瓦斯抽采纯量 0.108 m<sup>3</sup>/min,平均 0.081 m<sup>3</sup>/min。最大瓦斯抽采浓度 45%,平均 28.7%。致裂后 7 d 钻孔瓦斯抽采纯量和浓度均较为稳定,瓦斯抽采纯量平均达到 0.107 m<sup>3</sup>/min;第 8 d 之后进入平稳期,延续至第 30 d,期间瓦斯抽采纯量 0.063~0.105 m<sup>3</sup>/min,平均 0.081 m<sup>3</sup>/min;第 30 d 之后钻孔瓦斯抽采纯量出现下降趋势,基本稳定在 0.06 m<sup>3</sup>/min。第 38 d 后瓦斯抽采浓度仍在 13% 以上。

对比组普通抽采孔未采取任何增透措施,为避开致裂孔影响,对比孔距离致裂孔最近 30 m。瓦斯抽采纯量和浓度变化曲线(见图 13),从图 13 可以看出,普通抽采孔瓦斯抽采纯量和浓度呈明显的规律性衰减,初期瓦斯抽采纯量出现最大值 0.024 m<sup>3</sup>/min,平均瓦斯抽采纯量 0.017 m<sup>3</sup>/min。瓦斯抽采浓度至第 32 d 降至 10% 以下,致裂后钻孔抽采流量远高于未采取增透措施的普通抽采孔。

### 5 结语

(1) 提出利用塑性区作为致裂效果的评价指标。随着煤层地应力增加,液态 CO<sub>2</sub> 致裂塑性区域范围呈先增加后减小变化趋势,随着致裂孔直径增加,大孔径致裂的塑性区域范围较大。

(2) 根据 CO<sub>2</sub> 致裂应力叠加原理,探究了 CO<sub>2</sub> 致裂后裂隙二次扩展机制,综合理论计算、数值模拟结果及方案实施经济性,确定最优致裂孔参数直径 φ94 mm,钻孔间距 3 m。

(3) 开展井下 CO<sub>2</sub> 相变致裂试验后,致裂孔抽采孔平均瓦斯抽采纯量是普通抽采孔的 4.76 倍,瓦斯抽采浓度平均提高 2.8 倍,抽采达标时间缩短 65% 左右。

#### 参考文献:

[1] 王宗明, 衡献伟, 钱国辉, 等. 低渗透性煤层 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透规律及应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 48-51, 56.  
 [2] 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, 11(9): 11-16.  
 [3] 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): 1 613-1 623.
- [4]徐雪战. 低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 311-317.
- [5]林柏泉, 赵洋, 刘厅, 等. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 662-667.
- [6]王耀锋, 何学秋, 王恩元, 等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1 945-1 955.
- [7]赵宝友, 王海东. 我国低透气性本煤层增透技术现状及气爆增透防突新技术[J]. 爆破, 2014, 31(3): 32-41.
- [8]李守国, 姜文忠, 贾宝山, 等. 低透气性煤层致裂增透技术应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 35-42.
- [9]张柏林, 李豪君, 张兴华. 基于COMSOL数值模拟的液态CO<sub>2</sub>相变致裂布孔参数优化[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 207-210.
- [10]李珍宝. 液态CO<sub>2</sub>低温致裂及相变驱替促抽煤层CH<sub>4</sub>机制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [11]侯宗斌. 低透气性突出煤层顺层钻孔CO<sub>2</sub>致裂强化预抽瓦斯技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [12]王伟, 程远平, 袁亮, 等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138-148.
- [13]王明宇. 液态二氧化碳相变爆破裂纹扩展规律研究及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [14]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.
- [15]白鑫. 液态二氧化碳相变射孔致裂煤岩体增透机理及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [16]Bo Ke, Keping Zhou, Chaoshui Xu, et al. Thermodynamic properties and explosion energy analysis of carbon dioxide blasting systems[J]. Mining Technology, 2019, 128(1): 39-50.
- [17]孙小明, 黄园月, 倪昊. CO<sub>2</sub>致裂器泄能过程分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(4): 263-265.
- [18]黄达, 岑夺丰. 单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1 926-1 936.
- [19]李豪君, 王兆丰, 陈喜恩, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术在布孔参数优化中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 31-37, 43.
- [20]刘智权. 大间距无底柱分段崩落法回采爆破参数的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2005.
- 
- 作者简介: 李青松(1981-), 安徽怀宁人, 研究员, 硕士, 主要从事煤矿瓦斯治理、智能预警等方面研究, 电子信箱: 13608615@qq.com; 通信作者: 付金磊, 电子信箱: 1225118190@qq.com; 马曙, 电子信箱: 2601925458@qq.com.
- 
- 责任编辑: 李富文 收稿日期: 2021-05-10