

## 煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术试验研究\*

沈玉旭<sup>1,2</sup>, 张文阳<sup>3</sup>, 崔凯<sup>4</sup>, 郭俊庆<sup>2</sup>, 柴肇云<sup>2</sup>

(1.山西能源学院 矿业工程系, 山西 晋中市 030600;

2.太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

3.晋能控股山西科学技术研究院有限公司, 山西 大同市 037003;

4.山西三元煤业股份有限公司下霍煤矿, 山西 长治市 046600)

**摘要:**液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层增透技术可以有效解决煤层渗透性差、瓦斯抽采率低等难题。以长治矿区 3 号煤层为工程背景,通过理论分析导向裂隙、初始裂隙和裂隙扩展 3 个阶段的裂隙区半径,利用数值模拟研究单孔、多孔以及不同钻孔间距下的液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂低透气煤层裂隙扩展规律,并进行了现场工业性试验。研究结果表明:单孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破煤层的最大破坏范围为 6 m,爆破孔中间设置空孔可以扩大相变爆破致裂的破坏范围;实施液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术后,3 号煤层平均瓦斯抽采率由 0.57% 增加到 0.92%,单孔瓦斯抽采率提高了 1.25~2.91 倍,瓦斯抽采率明显提升。该研究为液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层增透技术提供了理论依据和现场指导。

**关键词:**液态 CO<sub>2</sub>;相变致裂;煤层增透;瓦斯抽采;裂隙扩展  
**中图分类号:**TD712.6 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2022)01-0133-06

### 0 引言

煤层中赋存有大量瓦斯<sup>[1]</sup>,对煤矿安全造成很大威胁,瓦斯抽采可有效解决该问题,而且瓦斯还是一种清洁能源<sup>[2]</sup>。但我国大多数煤层具有赋存条件差、裂隙不发育、透气性低的特点,从而导致抽采效率不高、抽采效果差<sup>[3]</sup>。

传统的煤层增透技术有深孔预裂爆破<sup>[4]</sup>和水力压裂、水力冲孔、水力割缝等水力化技术<sup>[5]</sup>,但应用都有一定的局限性。液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂是一种较新的煤层增透技术<sup>[6]</sup>,可以有效降低煤层瓦斯含量。研究表明,它有两个方面的优势:一是 CO<sub>2</sub> 对煤层吸附能力强于 CH<sub>4</sub>,二是 CO<sub>2</sub> 致裂产生的冲击波对煤层裂隙发育有很好的效果<sup>[7]</sup>。

张东明等<sup>[8]</sup>研究了液态 CO<sub>2</sub> 相变定向射孔优势致裂方向,并现场试验网格瓦斯抽采方法。马小敏<sup>[9]</sup>通过分组试验测定了液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂前后的有效抽采半径,证实致裂后瓦斯运移速率提高但瓦斯压力下降。苗青等<sup>[10]</sup>现场校验了 CO<sub>2</sub> 致裂驱替煤层 CH<sub>4</sub> 的抽采效益。白鑫等<sup>[11]</sup>研发了 CO<sub>2</sub> 相变射流试验装置,得出 CO<sub>2</sub> 相变射流压力随时间呈指数关系衰减的结论。秦江涛等<sup>[12]</sup>研究了超高压水力割缝和 CO<sub>2</sub> 相变致裂联合增透技术下瓦斯压力的二次释放,结果表明,二次致裂后煤层暴露表面积和瓦斯微通道增加。李磊等<sup>[13]</sup>研究发现煤体经过液氮处理后孔裂隙增生、扩展并连通在一起。衡献伟等<sup>[14]</sup>研究得出先施工辅助孔后 CO<sub>2</sub> 相变致裂可以增大瓦斯的抽采半径,并且随着致裂器装液量的增多抽采半径增大。贾进章等<sup>[15]</sup>利用模拟分析得出 CO<sub>2</sub> 致裂半径与地应力呈递减关系,与钻孔孔径和瓦斯压力呈递增关系。江泽标等<sup>[16]</sup>通过高压压汞试验和低温氮吸附试验,发现 CO<sub>2</sub> 致裂后孔体积和平均孔直径均大于原煤,开放型孔隙明显增多。

上述学者的研究多是理论上的,对液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在实践中的有效影响半径和钻孔布局的研究较少,增透后瓦斯抽采浓度增幅也少有研究。本文通过理论分析和数值模拟计算导向裂隙、初始裂隙和裂隙扩展三个阶段的裂隙区半径,对比不同钻孔间距下液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的效果,并进行了现场试验,对比致裂前后瓦斯抽采率的变化,为液

\* 收稿日期:2021-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974193);山西省重点研发计划项目(201903D321080);山西省应用基础研究计划(青年)项目(201801D221356)。

作者简介:沈玉旭(1986—),男,山西万荣人,讲师,博士研究生,主要从事矿山围岩控制方面的教学和研究工作,E-mail:shenyx@sxie.edu.cn。

态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层增透技术提高瓦斯抽采率提供了工程借鉴范例。

## 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破裂缝扩展理论

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破与普通爆破不同,它的目的不单单是为了增加钻孔间的贯通裂缝,而是要在煤层中形成联通的裂缝网,从而提高煤层透气性和瓦斯抽采效率。

煤岩破坏是由冲击波、应力波和高压气体共同作用的结果,是一个非常复杂的动力学过程。液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂器的工作原理是:液态 CO<sub>2</sub> 受热由液态迅速变成气态,致裂器内压力突然升高,冲破泄能片,高压气体从出气孔冲出形成冲击波,破碎煤体形成粉碎区和初始裂隙;随着时间的增长,冲击波逐渐衰减为应力波,并压缩煤壁产生切向拉伸变形,当超过煤体动态抗拉强度时,产生拉伸裂缝,同时形成径向裂缝和切向裂缝,并随着应力波的传播而向前扩展,直到应力波低于煤体的动态抗压强度,形成初始裂隙网,之后高压气体进入各个裂隙,进一步扩展裂缝,最终形成径向裂隙、切向裂隙和环向裂隙,这些裂隙构成了煤体的破碎区或是裂隙区;随着应力波的进一步衰减,它已经不能使煤体产生任何变形和裂隙,只能使煤体产生震动,这部分区域称为震动区。

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破冲击煤体产生粉碎区和初始导向裂隙,然后应力波和高压 CO<sub>2</sub> 气体对裂隙进行大范围扩展。建立的煤岩体动态断裂力学模型如图 1 所示,图 1 中  $P$  为孔壁压力,  $r_b$  为炮孔半径,  $a_0$  为裂隙扩展瞬时长度,  $\sigma$  为冲击产生的切向应力。

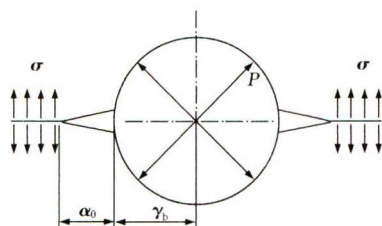


图 1 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破断裂力学模型

### 1.1 导向裂隙阶段

液态 CO<sub>2</sub> 加热产生高压气体后,冲破泄能片形成冲击波,冲击波冲击煤体在出气孔方向形成了两个导向型空腔,应力波在钻孔和爆破器之间反复叠加作用,最终形成粉碎区,即导向裂隙区,如图 2

所示。

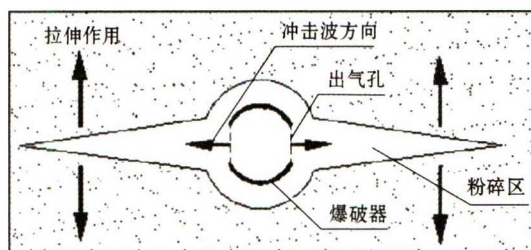


图 2 导向裂隙发育阶段

粉碎区半径为:

$$r_s = \left( \frac{bn\rho_0 D^2 r^6}{8\rho_m C_p (C_p - \alpha)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b^{\frac{\alpha-6}{\alpha}} \quad (1)$$

式中,  $r_s$  为爆破粉碎区半径, mm;  $r_b$  为炮孔半径, mm;  $b$  为常数;  $\rho_m$  为煤体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$  为弹性纵波波速, m/s;  $n$  为高压气体与炮孔壁碰撞时的压力增大系数, 一般取 8~10;  $\rho_0$  为爆炸体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $D$  为爆轰速度, m/s;  $r$  为装药半径, mm;  $\alpha$  为应力衰减系数,  $\alpha = 2 \pm \mu / (1 - \mu)$ ,  $\mu$  为泊松比, 对于冲击波取“+”, 应力波取“-”。

由式(1)计算可得,粉碎区半径为 835 mm。

### 1.2 初始裂隙阶段

粉碎区形成后,应力波对粉碎区煤壁形成压缩变形,从而形成径向裂隙,煤体的抗压强度一般要大于抗拉强度,因此应力波衰减到一定程度就无法使煤体发生压缩变形或破坏,此时煤体当中的弹性变形能释放,反向回弹形成拉伸破坏,产生环向裂隙,径向裂隙和环向裂隙交错形成了初始裂隙区,如图 3 所示。

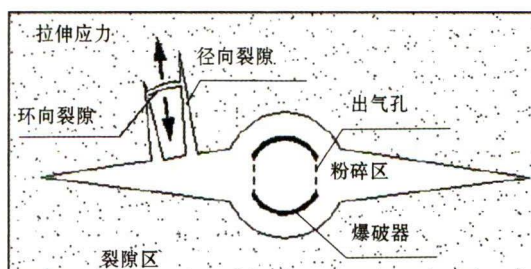


图 3 初始裂隙发育阶段

裂隙区半径为:

$$r_2 = \frac{\left( \frac{\mu n \rho_0 D^2 r^6 + 8 P_g (1 - \mu) r_b^6}{8 \mu P_r} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b^{\frac{\alpha-6}{\alpha}}}{1 - d} \quad (2)$$

式中,  $r_2$  为爆破裂隙区半径, mm;  $P_g$  为瓦斯压力,

MPa;  $d$  为煤体损伤因子;  $P_r$  为爆破峰值压力, MPa。

由式(2)计算可得, 裂隙区半径为 2056 mm。

### 1.3 裂隙扩展阶段

初始裂隙形成后, 应力波进一步衰减, 高压气体开始作用, 其作用时间较长。高压气体涌入裂隙区形成的各种裂隙中, 进一步扩展裂隙, 直到与煤层瓦斯压力形成压力平衡, 裂隙停止扩展, 形成最终的裂隙扩展区, 如图 4 所示。

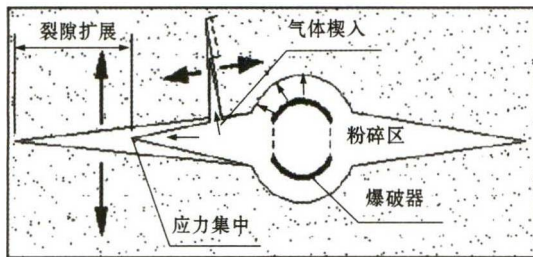


图 4 裂隙扩展发育阶段

裂隙扩展区半径为:

$$r_3 = \frac{1}{4 r_b^2 (1-d)} \sqrt{\frac{16 P_g r_b^6 + 2n \rho_0 D^2 r^6}{P_d r_b^2 / r_i^2}} \quad (3)$$

式中,  $r_3$  为爆破裂隙扩展区半径, mm;  $P_d$  为管壁静压, 约等于冲击波初始压力, MPa;  $r_i$  为质点距爆破孔中心距离, mm。

由式(3)计算可得, 裂隙扩展区半径为 2923 mm, 因此, 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破裂隙破坏范围为 5846 mm。

## 2 液态 CO<sub>2</sub> 相变爆破数值模拟研究

FLAC<sup>3D</sup> 软件是一种有限差分数值模拟软件, 利用其进行液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破模拟。采用莫尔库伦准则建立模型, 煤层物理力学特征见表 1。模型左右两侧和下部施加固定边界, 爆破裂纹扩展阶段变成自由边界。

表 1 煤层物理力学特性

厚度/ m	容重/ (kN/m <sup>3</sup> )	单轴抗 拉/MPa	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
7.19	14.1	0.65	1.42	0.57	1.2	39

### 2.1 单孔爆破数值模拟

建立单孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤层的数值模型, 模型长宽高为 40 m × 30 m × 5 m, 爆破钻孔位于模型中心, 钻孔直径为 94 mm, 孔深为 15 m。模型上方施加自重应力均布载荷 10 MPa。图 5 是单孔液

态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破数值模拟结果, 根据塑性区分布, 由图 5 可知单孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破最大破坏范围为 6 m。

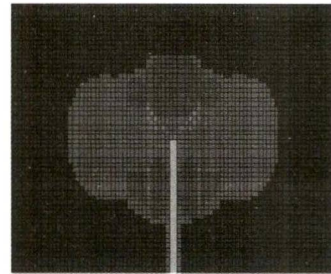
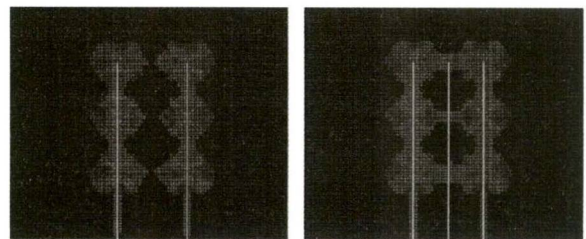


图 5 单孔爆破数值模拟

### 2.2 空孔对多孔爆破影响效果数值模拟

以爆破孔间距 12 m 为例进行数值计算, 空孔位于两爆破孔中心位置, 图 6 是有无空孔时多孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破的数值模拟结果。由图 6 可知, 有空孔的裂隙发展塑性区明显大于无空孔的裂隙发展塑性区, 因此, 空孔可以增大液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破裂隙破坏范围。这是由于爆破产生的冲击波和应力波到达空孔边界时发生反射, 冲击波和应力波在空孔周围反复叠加的效果, 从而增大裂隙区破坏范围。



(a) 无空孔

(b) 有空孔

图 6 空孔对多孔爆破效果的影响

### 2.3 不同钻孔间距爆破数值模拟

由图 6(b) 可以看出, 两个爆破孔中间存在大量的未破坏的塑性区, 没有形成完整的裂隙区域, 增透效果有限。适当缩小钻孔间距可以增加两钻孔间的裂隙, 但钻孔间距也不宜过小, 否则造成钻孔煤体过于破碎而影响回采, 成本也过大。所以, 合理的钻孔间距才是液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破增透技术的关键。选取钻孔间距为 10 m、8 m、7 m 进行数值模拟, 模拟结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着钻孔间距的不断减小, 两钻孔间破坏区域逐渐增大。当钻孔间距缩小到 7 m 时, 两钻孔间破坏区域全部连成一片, 达到了较好的裂隙破坏目的。

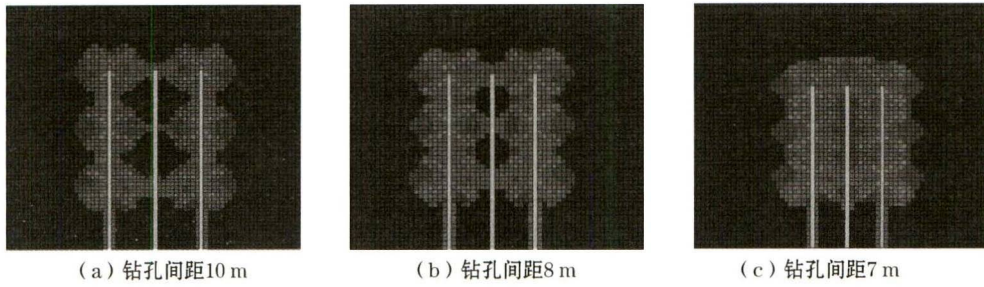


图7 不同钻孔间距多孔爆破数值模拟

在煤层水平层理上监测爆破后距离钻孔中心不同距离节点的应力、位移变化,由图8可知,爆破后距离钻孔中心越远,节点的应力越小,而且距离钻孔中心越近的节点初始应力越大,衰减得越快;距离钻孔中心5 m或6 m时,节点的初始应力较小,这说明此处节点受爆破的影响很小。由图9可知,爆破后距离钻孔中心越近的节点位移变化也越大,距离越远的节点位移变化越小,尤其是距离钻孔中心4 m以外的节点,位移已经趋向于0。结合图7综合分析可知,本次液态CO<sub>2</sub>相变致裂爆破的钻孔间距为7 m较合适。

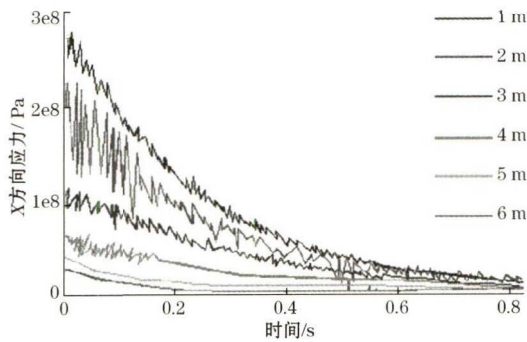


图8 距钻孔中心不同距离节点应力变化

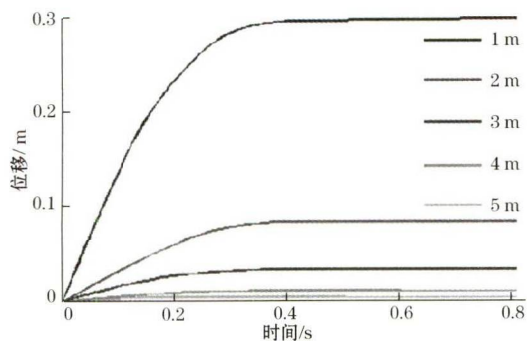


图9 距钻孔中心不同距离节点位移变化

### 3 现场应用

山西省某矿位于长治市郊区,年生产能力为

2.40 Mt/a,主采3号煤层。矿井绝对瓦斯涌出量为16.38 m<sup>3</sup>/min,相对瓦斯涌出量为3.74 m<sup>3</sup>/t,批复等级为高瓦斯矿井。煤尘有爆炸性,煤尘爆炸指数为16.7%。煤层自燃等级为Ⅲ级,属不易自燃煤层。1312工作面位于一采区,东为采空区,南为实体煤,西为保护煤柱,北为一采区皮带巷。3号煤层顶底板见表2。

表2 3号煤层顶底板情况

顶板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
基本顶	泥岩、粉砂岩、细砂岩	12.41	灰色、深灰色。
直接顶	砂质泥岩	2.50	深灰色,薄层状,平坦状断口,含植物化石碎片。
直接底	砂质泥岩、粉砂岩	2.70	深灰色,含少量薄云母片及植物根化石。灰色,薄层状,植物根碎片,含白云母片。
基本底	泥岩	5.10	深灰色,中厚层状,似贝状断口致密,偶见平滑面。

### 3.1 液态CO<sub>2</sub>相变爆破设计

(1) 钻孔布置。本次3号煤层1312工作面液态CO<sub>2</sub>相变致裂爆破试验共设置爆破钻孔10个,均为斜向钻孔,钻孔间距为7 m,钻孔直径为94 mm,孔深为80 m,爆破深度为80 m;观测孔共11个,均为垂直钻孔,钻孔间距为7 m,钻孔直径为94 mm,孔深为120 m。爆破钻孔及观测钻孔布置如图10所示。

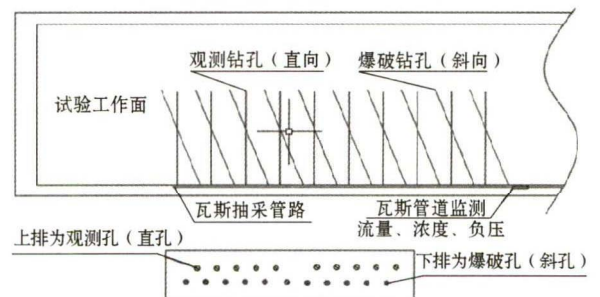


图10 液态CO<sub>2</sub>相变致裂煤层增透试验工作面布置

(2) CO<sub>2</sub> 爆破致裂器。CO<sub>2</sub> 爆破致裂器为重复使用设备,每根致裂器长 1.5 m,主要由充填阀、发热器、金属主管、定压泄能片和泄爆头组成,其中泄能片、液态 CO<sub>2</sub> 和密封配件为消耗品,每爆破一次使用一次。本次爆破采用液压钻机把致裂器和连接器一根一根送到钻孔内,钻孔封孔使用聚氨酯封孔,封孔长度为 1~2 m。

### 3.2 瓦斯抽采效果

分别记录 11 个观测孔爆破前后单孔瓦斯抽采量,连续观测 15 d 以上,观测孔瓦斯参数汇总结果见表 3。

表 3 观测孔爆破前后瓦斯抽采参数

观测孔编号	观测孔爆破前单孔平均瓦斯抽采率/%	观测孔爆破后单孔平均瓦斯抽采率/%	爆破后瓦斯抽采率比值
627 <sup>#</sup>	1.21	1.61	1.33
631 <sup>#</sup>	1.44	2.39	1.66
635 <sup>#</sup>	0.31	0.43	1.39
639 <sup>#</sup>	0.15	0.22	1.47
643 <sup>#</sup>	0.90	1.31	1.46
641 <sup>#</sup>	0.20	0.37	1.85
647 <sup>#</sup>	0.65	0.93	1.43
651 <sup>#</sup>	0.39	1.11	2.85
655 <sup>#</sup>	0.22	0.39	1.77
659 <sup>#</sup>	0.23	0.67	2.91
663 <sup>#</sup>	0.57	0.71	1.25
平均	0.57	0.92	1.61

现场试验表明,实施液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破后,单孔平均瓦斯抽采率由 0.15%~1.44% 增加到 0.22%~2.39%,平均瓦斯抽采率由 0.57% 增加到 0.92%,单孔瓦斯抽采率提高了 0.25~1.91 倍,瓦斯抽采率明显提升。

## 4 结论

本文以长治地区 3 号煤层为研究背景,通过液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术增加煤层透气性,得到如下结论。

(1) 理论分析和数值模拟表明,单孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破煤层的最大破坏范围为 6 m,爆破孔中间设置空孔可以扩大相变爆破致裂的破坏范围,

可以使多孔液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破煤层的爆破孔间距增大到 7 m,达到最优的爆破裂缝扩展效果。

(2) 现场试验表明,实施液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆破后,单孔平均瓦斯抽采率由 0.15%~1.44% 增加到 0.22%~2.39%,平均瓦斯抽采率由 0.57% 增加到 0.92%,单孔瓦斯抽采率提高了 0.25~1.91 倍,瓦斯抽采率明显提升。

### 参考文献(References):

- [1] 傅雪海,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [2] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论与技术与工程[J].煤炭学报,2014,39(8):1391-1397.
- [3] 俞启香,程远平.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2012.
- [4] 李元林,刘勇,王沉,等.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透技术研究及应用[J].中国安全生产科学技术,2020,16(9):71-76.
- [5] 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):1945-1955.
- [6] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等.二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J].工程科学学报,2021,43(7):883-893.
- [7] 彭鑫,江泽标,谢雄刚,等.CO<sub>2</sub> 致裂对煤孔裂隙特性与分形特征影响研究[J].中国安全科学学报,2019,29(7):110-116.
- [8] 张东明,白鑫,尹光志,等.低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J].煤炭学报,2018,43(7):1938-1950.
- [9] 马小敏.液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂影响有效抽采半径试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):88-93.
- [10] 苗青,韦善阳.基于 CO<sub>2</sub> 致裂驱替 CH<sub>4</sub> 的瓦斯抽采试验研究[J].采矿技术,2020,20(2):31-33.
- [11] 白鑫,张东明,王艳,等.液态 CO<sub>2</sub> 相变射流压力变化及其煤岩致裂规律[J].中国矿业大学学报,2020,49(4):661-670.
- [12] 秦江涛,陈婧,谢文波,等.超高压水力割缝和 CO<sub>2</sub> 相变致裂联合增透技术研究与应用[J].煤炭工程,2021,53(9):61-65.
- [13] 李磊,李晓伟,王杰,等.液氮作用下煤体孔隙演变对吸附解吸特性的影响[J].矿业研究与开发,2021,41(8):94-100.
- [14] 衡献伟,付金磊,李青松,等.液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂对抽采有效半径影响的试验研究[J].煤炭工程,2021,53(10):126-130.
- [15] 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.
- [16] 江泽标,彭鑫,韦善阳,等.基于氮吸附、压汞联合试验的 CO<sub>2</sub> 致裂对煤岩孔隙的影响[J].安全与环境学报,2021,21(1):101-108.

**Experimental Study on Permeability Enhancement Technology by Liquid CO<sub>2</sub> Phase Change Fracturing in Coal Seam***SHEN Yuxu<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenyang<sup>3</sup>, CUI Kai<sup>4</sup>, GUO Junqing<sup>2</sup>, CHAI Zhaoyun<sup>2</sup>*

(1. Mining Engineering Department, Shanxi Institute of Energy, Jinzhong, Shanxi 030600, China;

2. Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining of Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

3. Shanxi Institute of Science and Technology Co., Ltd., Jinneng Holding, Datong, Shanxi 037003, China;

4. Xiahuo Coal Mine, Shanxi Sanyuan Coal Industry Co., Ltd., Changzhi, Shanxi 046605, China)

**Abstract:** The permeability enhancement technology by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing in coal seam can effectively solve the problems of poor permeability and low gas extraction rate of coal seam. Taking the No.3 coal seam in Changzhi area as the engineering background, the radius of fracture zones in the three stages of guided fracture, initial fracture and fracture expansion were analyzed through theoretical analysis. Numerical simulation was used to study the crack propagation law of low permeability coal seam caused by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing under single hole, multi holes and different drilling spacing, and the field industrial tests were carried out. The results show that the maximum damage range of blasting coal seam caused by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing under single hole is 6 m, and setting empty holes among blasting holes can expand the damage range of phase change blasting fracturing. After the implementation of liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing, the average gas extraction rate of No.3 coal seam increases from 0.57% to 0.92%, and the gas extraction rate of single hole increases by 1.25~2.91 times, which is significantly improved. This study provides a theoretical basis and field guidance for the permeability enhancement technology by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing.

**Key words:** Liquid CO<sub>2</sub>, Phase change fracturing, Coal seam permeability enhancement, Gas drainage, Fracture propagation