

# 超长工作面 CO<sub>2</sub> 相变致裂分区增透高效抽采技术试验研究\*

马小敏<sup>1,2</sup>

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110016; 2. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:**针对超长工作面抽采时间不均衡导致抽采达标时间长的问题,提出了工作面分区增透高效抽采技术,运用分组试验和理论分析的方法,研究了不同布孔工艺参数条件下 CO<sub>2</sub> 相变致裂对低透煤层瓦斯抽采的增透作用规律,并在试验工作面进行了工业应用。研究表明:CO<sub>2</sub>相变致裂技术对低透煤层增透促抽效果良好,与未致裂抽采相比,采用间距 20, 10, 5 m 致裂孔致裂条件下进行抽采时煤层透气性系数分别提高 1.8, 2.6, 5.8 倍,平均抽采体积分数分别提高 1.9, 3.5, 4.2 倍,平均抽采纯量分别提高 2.4, 4.2, 6.2 倍。试验工作面应用分区增透高效抽采技术后,整个工作面形成后仅需抽采 87 d 即可达标进行回采,显著缩短了抽采周期,对高瓦斯低透煤层缓解采掘接替紧张及提高瓦斯抽采效率具有重要借鉴意义。

**关键词:**瓦斯治理;分区抽采;CO<sub>2</sub>相变致裂;采掘接替紧张;抽采达标;煤层增透

中图分类号:X936;TD 712 文献标志码:A 文章编号:1673-193X(2019)-07-0057-05

## Experimental study on partitioned permeability enhancement high-efficiency extraction technology of CO<sub>2</sub> phase change fracturing in ultra-long working face

MA Xiaomin<sup>1,2</sup>

(1. CCTEG Shenyang Research Institute, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun Liaoning 113122, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the uneven extraction time of ultra-long working face leads to a long time to reach the standard of extraction, a technology of partitioned permeability enhancement high-efficiency extraction for the working face was put forward. By means of grouping experiment and theoretical analysis, the laws of permeability enhancement for the gas extraction in low permeability coal seam by CO<sub>2</sub> phase change fracturing under different hole distribution parameters were studied, and the industrial application was carried out in the experimental working face. The results showed that CO<sub>2</sub> phase change fracturing technology had good effect on permeability enhancement and extraction promotion in the low permeability coal seam. Compared with the non-fractured extraction, when the spacing of fracturing holes was 20, 10 and 5 m for the fractured extraction, the permeability coefficient of coal seam increased by 1.8, 2.6 and 5.8 times, the average extraction volume fraction increased by 1.9, 3.5 and 4.2 times, and the average extraction pure quantity increased by 2.4, 4.2 and 6.2 times respectively. After the application of partitioned permeability enhancement high-efficiency extraction technology in the experimental working face, the whole working face could reach the standard for mining with only 87 days of extraction after it was formed, which significantly shortened the extraction period. It has important reference significance for alleviating the tension of mining replacement and improving the efficiency of gas extraction in the high gas and low permeability coal seams.

**Key words:** gas control; partitioned extraction; CO<sub>2</sub> phase change fracturing; tension of mining replacement; reaching standard of extraction; coal seam permeability enhancement

## 0 引言

瓦斯是一种与煤伴生的气体产物,一方面作为井下

重大危险源威胁着矿井安全生产,另一方面作为非常规清洁能源可以满足人类能源需求<sup>[1]</sup>。无论从矿井瓦斯灾害防治的角度还是清洁能源利用的角度,瓦斯抽采都

是最有效最直接的手段。而我国大多数煤层普遍具有透气性低、裂隙不发育、解吸速度慢的特点,瓦斯抽采往往存在抽采率低、抽采效果差和抽采达标时间长等问题<sup>[2-3]</sup>,因此,对煤层进行强化增透已经是低透煤层实现安全高效抽采必不可少的技术手段。经过我国煤炭科技工作者几十年的研究和实践,形成了一系列科研成果,如深孔预裂爆破<sup>[4-6]</sup>、水力冲孔<sup>[7-8]</sup>、水力压裂<sup>[9]</sup>、水力割缝<sup>[10-11]</sup>等多种煤层增透技术。而上述技术都有自身的局限性和缺点,深孔预裂爆破存在炸药操作和管控的风险,水力冲孔在硬煤中冲孔难度大,在软煤中又容易造成塌孔和掩埋钻具,水力压裂设备复杂、封孔困难,且易在压裂范围内产生局部应力增高区以及水力割缝应用效果差等问题<sup>[12]</sup>。近年来液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术作为一种新型的煤层增透技术以其能量可控、设备简单易操作以及 CO<sub>2</sub> 对 CH<sub>4</sub> 良好的驱替作用等优势取得了良好的应用效果<sup>[13-17]</sup>。

在我国高瓦斯矿井有许多推进长度近 2 km 甚至更长的超长工作面,由于工作面形成周期长,往往存在靠近停采线的区域抽采时间达 3 a 以上,而靠近切眼的区域刚刚开始抽采的问题,工作面不同区域预抽时间严重不均衡,导致工作面抽采达标时间长,造成矿井采掘接替紧张,矿井生产能力受到严重制约。针对上述问题,本文以长治矿区某高瓦斯工作面为研究对象,通过现场试验和理论分析的方法,研究了不同布孔工艺参数条件下 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透对低透煤层瓦斯抽采的作用规律,并在试验工作面开展了分区增透高效抽采技术应用,以期高瓦斯低透煤层缓解采掘接替紧张及高效抽采提供借鉴和参考。

## 1 CO<sub>2</sub>相变致裂增透技术原理

### 1.1 CO<sub>2</sub>相变致裂增透机理

CO<sub>2</sub>相变致裂技术原理是利用充装设备预先将液态 CO<sub>2</sub> 加注到致裂装置的储液管中,通过发爆器激活储液管中内置的电加热活化器,释放热量使得储液管内温度迅速升高,管内 CO<sub>2</sub> 由液态瞬间转化为气态,体积膨胀 600 倍,此时储液管气态 CO<sub>2</sub> 压力达到 120 ~ 276 MPa<sup>[17-18]</sup>,冲破剪切片喷发而出,高能气体产生的高速射流和高压 CO<sub>2</sub> 气体的准静态压力场共同作用于煤体,从而破坏煤体产生裂隙。

高能气体作用煤体时,一方面在高速射流产生的应力冲击作用下,煤体发生径向压缩和切向拉伸,当切向拉伸应力超过煤的抗拉强度时发生劈裂作用<sup>[19]</sup>,产生大量新的裂隙;另一方面使煤体内被填充或压实的裂隙被重新开启,在持续高能气体的准静态压力场作用下,促使原生裂隙进一步扩展、发育<sup>[13]</sup>。爆破过程使煤体

形成裂隙发育区和裂隙扩展区,大大增加了瓦斯运移的通道,使得煤层透气性显著提高,实现增透促抽。

### 1.2 竞争吸附理论

煤体中瓦斯主要以吸附态和游离态 2 种形式赋存,而游离态的瓦斯是抽采的主要对象。煤体吸附规律研究表明<sup>[20-21]</sup>,煤体对 CO<sub>2</sub> 的吸附性远高于对 CH<sub>4</sub> 的吸附性,当在煤层中相变爆破产生的大量 CO<sub>2</sub> 气体,由于竞争吸附效应,滞留煤层中的 CO<sub>2</sub> 驱替置换出大量吸附态瓦斯,游离态瓦斯增加,从而有效提高瓦斯抽采体积分数和抽采量。

## 2 CO<sub>2</sub>相变致裂增透作用规律试验研究

### 2.1 试验地点概况

试验矿井位于长治矿区,为高瓦斯矿井,现开采 3 号煤层,属低灰-中高灰贫煤,位于山西组中下部,煤层平均厚度 6.25 m,倾角 3° ~ 15°。试验地点选在 3111 工作面,工作面走向长 1 780 m,倾向长 200 m,工作面底板标高为 +450 ~ +530 m;煤层顶底板均为泥岩,岩性致密,不利于瓦斯逸散,煤层坚固性系数为 0.44 ~ 0.68,瓦斯含量为 9 ~ 12 m<sup>3</sup>/t,煤层透气性系数平均为 0.426 1 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d)。试验煤层属单一低透煤层,抽采效果较差。

### 2.2 试验方法

试验选择在未受采动影响的区域进行,在 3111 工作面运输巷分别选取长为 25 m 的 4 个试验区(A, B, C, D),各试验区间距 30 m 以上,避免相互影响。每个试验区布置 11 个抽采钻孔,间距均为 2.5 m,其中, A 试验区不进行致裂增透,直接连入高负压抽采系统进行抽采, B 试验区在抽采孔中选取 2 个作为 CO<sub>2</sub> 致裂孔,致裂孔间距 20 m, C 试验区在抽采孔中选取 3 个作为 CO<sub>2</sub> 致裂孔,致裂孔间距 10 m, D 试验区在抽采孔中选取 5 个 CO<sub>2</sub> 致裂孔,致裂孔间距 5 m, B, C, D 试验区致裂孔爆破作业后与本区内其他抽采孔并网连入高负压抽采系统进行抽采。试验期为 90 d,抽采期间分别记录各钻孔抽采体积分数、负压、流量等参数。各试验区钻孔参数见表 1,钻孔布置方式见图 1。

## 3 致裂增透效果考察分析

### 3.1 煤层透气性系数考察

各试验区在 CO<sub>2</sub> 致裂增透前后分别测定煤层的透气性系数,采用径向流量法进行直接测定,即利用径向不稳定流动理论,通过测定煤层瓦斯径向不稳定流量来计算煤层透气性系数,各试验区透气性系数致裂前后测定结果见表 2。

表 1 钻孔参数

Table 1 Boreholes layout of each experimental area

钻孔编号	类型	钻孔间距/m	与巷道夹角/(°)	倾角/(°)	孔径/mm	终孔长度/m	封孔长度/m
1~11	抽采孔	2.5	90	15	113	80	12
L1~L5	致裂孔	5/10/20	90	15	113	80	15

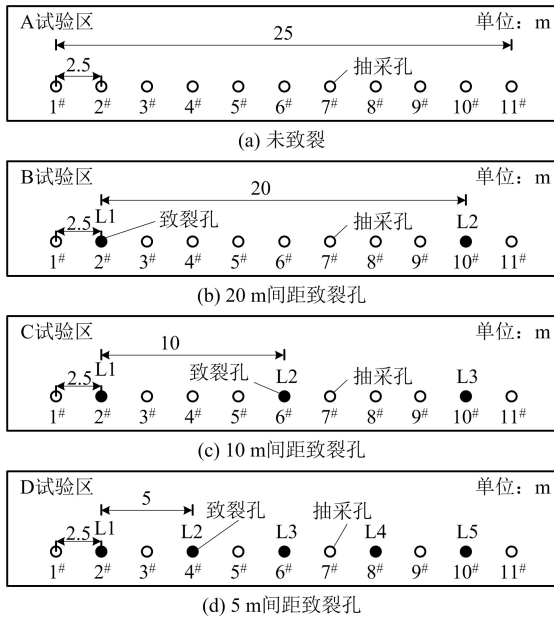


图 1 各试验区钻孔布置

Fig. 1 Borehole parameters

表 2 CO<sub>2</sub>致裂前后煤层透气性系数对比

Table 2 Comparison of permeability coefficient of coal seam before and after CO<sub>2</sub> fracturing

试验区	致裂孔 间距/m	透气性系数/(m <sup>2</sup> ·(MPa <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup> )		增幅/%
		致裂前	致裂后	
A	/	0.458	/	/
B	20	0.363	0.652	80
C	10	0.481	1.245	159
D	5	0.437	2.518	476

从表 2 可以看出, B, C, D 试验区的透气性系数均大幅增长, 这是由于 CO<sub>2</sub> 相变爆破产生的高能气体及冲击波作用于煤体, 在煤体中产生大量导通裂隙, 并在气楔作用下, 裂隙不断扩展和延伸, 瓦斯运移通道大幅增加, 进而煤层透气性得到提高。在间距 20, 10, 5 m 致裂孔的作用下, 煤层透气性分别提高了 80%, 159%, 476%, 表明致裂钻孔布置间距越小, 煤层增透作用效果越好, 透气性系数成倍增长。

### 3.2 抽采体积分数和抽采纯量考察

经过 90 d 的抽采, 考察了各试验区的抽采体积分数和抽采纯量, 其随抽采时间变化规律见图 2, 3。由试

验结果可知, 未致裂、间距 20 m、间距 10 m、间距 5 m 致裂孔致裂条件下的平均抽采体积分数分别为 14.8%, 28.4%, 50.9%, 75.8%, 平均抽采纯量分别为 0.28, 0.66, 1.18, 1.73 m<sup>3</sup>/min。可见致裂后煤层的抽采体积分数和抽采纯量较未致裂煤层大幅提高, 这是由于 CO<sub>2</sub> 的致裂驱替作用打破了原始煤体的吸附解吸平衡状态, 根据竞争吸附理论, 煤体对 CO<sub>2</sub> 的吸附性远高于对 CH<sub>4</sub> 的吸附性, 使得爆破后的 CO<sub>2</sub> 能够滞留, 且驱替置换出大量煤体吸附的 CH<sub>4</sub>, 瓦斯抽采体积分数和抽采量大幅提升。

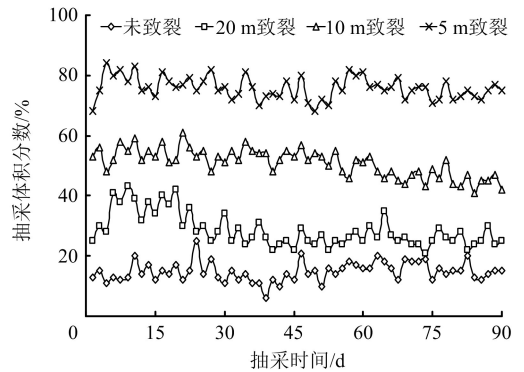


图 2 抽采体积分数随抽采时间变化规律

Fig. 2 Variation of extraction volume fraction with extraction time

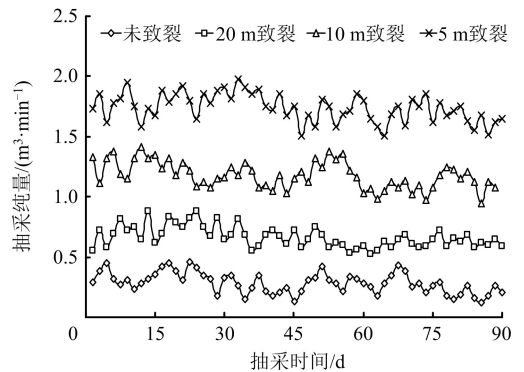


图 3 抽采纯量随抽采时间变化规律

Fig. 3 Variation of extraction pure quantity with extraction time

## 4 分区增透高效抽采技术应用

不同布孔工艺参数条件下的 CO<sub>2</sub> 致裂增透作用规

律研究表明:CO<sub>2</sub>相变致裂技术对煤层增透具有良好的应用效果,CO<sub>2</sub>相变致裂爆生气体破坏煤层生成大量裂隙,大幅提升煤层透气性,CO<sub>2</sub>对CH<sub>4</sub>的竞争吸附作用驱替置换出大量游离瓦斯,抽采体积分数和抽采纯量显著提高;致裂孔布孔间距越小,煤层增透的影响作用越强,在设计钻孔直径113 mm的情况下,与未致裂抽采相比,采用间距20,10,5 m致裂孔致裂条件下进行抽采时煤层透气性系数分别提高1.8,2.6,5.8倍,平均抽采体积分数分别提高1.9,3.5,4.2倍,平均抽采纯量分别提高

2.4,4.2,6.2倍。

利用上述作用规律,将试验工作面划分为A,B,C,D 4个预抽单元(见图4),随着工作面巷道的不断推进,对A,B,C,D 4个预抽单元逐步采取不致裂抽采、布置间距20 m、布置间距10 m和布置间距5 m致裂孔致裂后抽采的不同程度增透的强化抽采措施,在不增加钻孔工程量的基础上,实现越靠近切眼的单元抽采效率越高,有效压缩试验工作面形成后的预抽时间。

试验工作面在未致裂抽采条件下采用普通抽采方

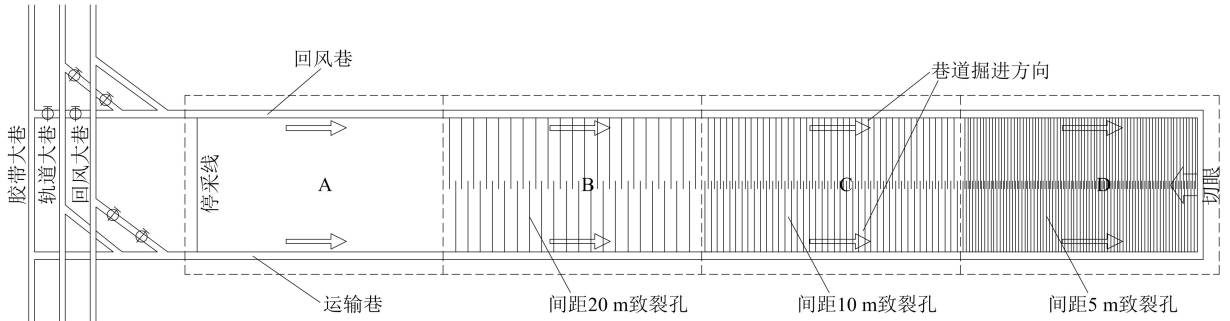


图4 工作面分区高效抽采布置示意

Fig.4 Schematic diagram of partitioned high-efficiency extraction arrangement in working face

法时抽采达标时间为540 d,采用分区增透高效抽采技术后,实现各单元抽采达标所需时间分别为225,129,87 d,整个工作面形成后仅需抽采87 d即可达标进行回采,抽采周期大幅缩短,保证试验工作面安全高效投入生产,避免因预抽时间较长而导致采掘接替紧张。

## 5 结论

1) 针对超长工作面抽采时间不均衡导致抽采达标时间长的问题,提出了基于CO<sub>2</sub>相变致裂的分区增透高效抽采技术,利用不同布孔工艺参数条件下CO<sub>2</sub>相变致裂增透对低透煤层瓦斯抽采的作用规律,针对工作面不同区域采取不同程度的强化增透措施,大幅缩短了整个工作面的抽采达标周期,实现低透工作面高效抽采。

2) 不同布孔工艺参数条件下的CO<sub>2</sub>致裂增透作用规律研究表明,CO<sub>2</sub>相变致裂技术对煤层增透具有良好的应用效果,在设计钻孔直径113 mm的情况下,与未致裂抽采相比,采用间距20,10,5 m致裂孔致裂条件下进行抽采时煤层透气性系数分别提高1.8,2.6,5.8倍,平均抽采体积分数分别提高1.9,3.5,4.2倍,平均抽采纯量分别提高2.4,4.2,6.2倍。

3) 试验工作面应用分区增透高效抽采技术后,整个工作面形成后仅需抽采87 d即可达标进行回采,表明CO<sub>2</sub>相变致裂技术对低透煤层增透促抽效果良好,显著缩短了抽采周期,对于促进矿井安全高效生产具有重要作用。

## 参考文献

- [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] 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.
- [3] 申宝宏,刘见中,雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术,2015,43(2):1-4.  
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, LEI Yi. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 1-4.
- [4] 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.
- [5] 蔡峰. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破强化增透效应研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2007.
- [6] 王兆丰,王林,陈向军. 深孔预裂爆破在高瓦斯特厚煤层回采中的应用[J]. 煤炭科学技术,2008,36(8):31-33.  
WANG Zhaofeng, WANG Lin, CHEN Xiangjun. Application of deep borehole pre-cracking blasting to coalmining in high gassy and ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(8): 31-33.
- [7] 袁亮,林柏泉,杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.  
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in

- China coal[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1):45-49.
- [8] 刘明举,任培良,刘彦伟,等.水力冲孔防突措施的破煤理论分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2009,28(2):142-245.  
LIU Mingju, REN Peiliang, LIU Yanwei, et al. Breaking coal theoretical analysis of outburst prevention by hydraulic flushing[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Nature Science), 2009, 28(2): 142-245.
- [9] 孙炳兴,王兆丰,伍厚荣.水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用[J].煤炭科学技术,2010,38(11):78-80.  
SUN Bingxing, WANG Zhaofeng, WU Hourong. Hydraulic pressurized cracking and permeability improvement technology applied to gas drainage[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 78-80.
- [10] 邹全乐,林柏泉,刘厅,等.割缝预抽后煤瓦斯吸附特性的变化特征[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2117-2124.  
ZOU Quanle, LIN Baiquan, LIU Ting, et al. Variation of gas adsorption of coal after hydraulic slotting and pre-draining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2117-2124.
- [11] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.  
WANG Yaofeng, LI Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1326-1331.
- [12] 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.  
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Nature Science), 2015, 34(1):1-5.
- [13] 孙文忠.低渗煤层CO<sub>2</sub>预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(1):100-105.  
SUN Wenzhong. High efficient gas drainage principle and application of low permeable seam with CO<sub>2</sub> pre-fracturing and permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 100-105.
- [14] 任志成,杜刚,年军.高瓦斯煤层液态CO<sub>2</sub>致裂消突巷道快速掘进技术[J].煤矿安全,2017,48(5):77-80.  
REN Zhicheng, DU Gang, NIAN Jun. Research on gateway quick driving by high pressure liquid CO<sub>2</sub> fracturing and outburst removing technology in high gas seam[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5):77-80.
- [15] 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.  
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO<sub>2</sub> phasechange directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1938-1950.
- [16] 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 fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 80-83.
- [17] 洪紫杰,王成,熊祖强.高瓦斯低透气性煤层CO<sub>2</sub>相变致裂增透技术研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):39-45.  
HONG Zijie, WANG Cheng, XIONG Zuqiang. Research on CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing technology for permeability improvement in high gas and low permeability coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(1):39-45.
- [18] 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.  
WANG Zhaofeng, LI Haojun, CHEN Xien, et al. Study on hole layout of liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9):11-16.
- [19] 罗朝义,江泽标,郑昌盛,等.CO<sub>2</sub>相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(11):138-143.  
LUO Chaoyi, JIANG Zebiao, ZHENG Changsheng, et al. Application on permeability improvement technology with CO<sub>2</sub> phase change to borehole drilling along coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11):138-143.
- [20] 雷云,刘建军,张峭楠.CO<sub>2</sub>相变致裂本煤层增透技术研究[J].工程地质学报,2017,25(1):215-221.  
LEI Yun, LIU Jianjun, ZHANG Shaonan. Permeability improvement technology by cracking coal seam with CO<sub>2</sub> phase transition[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1):215-221.
- [21] 梁卫国,张倍宁,韩俊杰,等.超临界CO<sub>2</sub>驱替煤层CH<sub>4</sub>装置及试验研究[J].煤炭学报,2014,39(8):1511-1520.  
LIANG Weiguo, ZHANG Beining, HAN Junjie, et al. Experimental study on coal bed methane displacement and recovery by super critical carbon dioxide injection[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1511-1520.

(责任编辑:郭利)