

# 宏发煤矿低渗透性煤层 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术试验研究

张海清<sup>1</sup>, 江泽标<sup>1</sup>, 田世祥<sup>1</sup>, 郑昌盛<sup>2</sup>, 罗朝义<sup>1</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州致裂科技有限公司, 贵州 贵阳 550025)

**摘 要:** 为了研究 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术对贵州低渗透煤层瓦斯抽采的影响,以贵州宏发煤矿 1903 工作面回风巷为研究对象,进行 CO<sub>2</sub> 致裂增透试验研究。研究表明:煤层致裂后,其透气性系数平均为原始煤层的 3.05 倍,煤层的透气性显著提高;煤层瓦斯平均抽采浓度增大了 4.19 倍,平均抽采纯量为原始煤层的 3.99 倍;在钻孔瓦斯抽采率方面,单孔的瓦斯抽采效果提高了 2.58~3.92 倍;钻孔工作量降低了 4 倍,抽采达标时间缩短了 55 d,瓦斯涌出量降低了 40%,煤层瓦斯抽采效益显著。CO<sub>2</sub> 致裂增透技术为解决贵州矿区低透煤层的瓦斯抽采技术难题提供了参考和借鉴。

**关键词:** 低渗透煤层; CO<sub>2</sub> 致裂; 增透技术; 瓦斯抽采

**中图分类号:** TD712.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2018)02-0112-05

## Experimental study on low permeability coal seams with CO<sub>2</sub> fracturing anti-reflection technology of Hongfa coal mine

ZHANG Haiqing<sup>1</sup>, JIANG Zebiao<sup>1</sup>, TIAN Shixiang<sup>1</sup>, ZHENG Changsheng<sup>2</sup>, LUO Chaoyi<sup>1</sup>

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Crack Technology Limited Company, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to study the effect of CO<sub>2</sub> fracturing anti-reflection technology on Guizhou low permeability coal seams, this paper took Guizhou Hongfa coal mine 1903 tailentry as study object, the CO<sub>2</sub> cracker fracturing experiment was studied. The results show: after fracturing anti-reflection, the average permeability coefficient is 3.05 times of that of original coal seams, the permeability of coal seam has been improved remarkably; the average concentration of coal seam gas extraction is 4.19 times and the average pumping capacity is 3.99 times of the area of no fracturing; in the borehole gas drainage rate, the single hole gas extraction effect in CO<sub>2</sub> fracture enhanced permeability area has been increased by 2.58~3.92 times than the area borehole gas extraction without fracturing. The amount of drilling work in the fracturing enhanced permeability zone is 4 times lower than that without fracturing. The extraction time of the mining face is shortened by 55 days, the gas emission rate of the working face is reduced by 40%, and the gas extraction efficiency of the coal seam has been improved remarkably. The CO<sub>2</sub> fracturing and permeability enhancement technology provides a reference for solving the problem of gas extraction in low permeable seams in GuiZhou mining area.

**Keywords:** low permeability coal seam; CO<sub>2</sub> fracturing; anti-reflection technology; gas extraction

自 20 世纪 60 年代起,为了提高低渗透性煤层的瓦斯抽采效果,广大科技工作者开始了煤层增透方面的探索研究,一大批科技成果也进行了应

用推广<sup>[1-2]</sup>。由于一些传统致裂方法存在着局限性,比如密集钻孔法工程大、效果差;水力压裂的水锁水敏效应<sup>[3]</sup>、污染地下资源等问题,这些都制

收稿日期: 2017-04-12 责任编辑: 宋菲

基金项目: 贵州大学引进人才科研项目资助(编号:贵大人基合字[2016]59 号);贵州省科技计划项目资助(编号:黔科合支撑[2017]2815);贵州省科学技术基金项目资助(编号:黔科合 J 字[2015]2049 号);贵州大学研究生创新基金资助(编号:研理工 2017087)

第一作者简介: 张海清(1989-),男,汉族,河南永城人,硕士研究生,研究方向为安全技术,E-mail:623711360@qq.com。

通信作者简介: 江泽标(1972-),男,汉族,贵州贵阳人,硕士研究生导师,贵州大学矿业学院安全教研室主任,E-mail:327552007@qq.com。

引用格式: 张海清,江泽标,田世祥,等.宏发煤矿低渗透性煤层 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术试验研究[J].中国矿业,2018,27(2):112-116.

约其方法的进一步发展<sup>[4]</sup>,所以近年来又发展了一种高压气体爆破致裂增透方法。高压气体爆破是一种无炸药爆破,20世纪60年代初,西方发达国家开始了这种物理爆破法的研究<sup>[5-6]</sup>,利用压缩机等机械设备或通过物理变化来产生高压气体破碎周围煤岩。

目前有两类高压气体致裂增透的技术装备。一是采用液化CO<sub>2</sub>加热汽化膨胀产生高压气体致裂增透<sup>[7]</sup>;二是利用加压装置直接生成高压空气进行致裂增透<sup>[8]</sup>。本文所用到的致裂装备属于第一类,其原理是将液态CO<sub>2</sub>充装入二氧化碳致裂器,液态受热汽化成为气体后体积膨胀600倍和CO<sub>2</sub>对煤层吸附性比瓦斯高8倍的亲煤特性<sup>[9-11]</sup>,对煤层进行致裂增透解吸技术,使煤层透气性和瓦斯游离度双重提高,达到安全快速抽采和消突的目标。二氧化碳致裂增透技术目前在油田气藏领域的应用较为广泛,而在煤层气开采方面的应用尚在起步阶段,王兆丰等<sup>[12-14]</sup>学者在CO<sub>2</sub>相变致裂煤层抽采瓦斯方面都提供了宝贵的成果。但是在贵州复杂条件下煤矿区的推广,只有极少部分学者有一定的成

果,霍中刚<sup>[15]</sup>在贵州省纳雍县贝勒煤矿进行现场试验,在瓦斯流量衰减系数和钻孔半径都得到相应的改善。本文通过现场试验设计,对现场实验跟踪观察致裂增透前后的透气性系数、钻孔抽采浓度和纯量、瓦斯含量进行效果考察并进行了效益分析,以期CO<sub>2</sub>致裂增透技术在贵州地区的推广提供可靠的基础理论支撑。

## 1 CO<sub>2</sub>致裂增透机理分析

### 1.1 CO<sub>2</sub>致裂增透机理

CO<sub>2</sub>在31℃以下、7.2 MPa压力时以液态形式存在,当温度超过31℃时,1 kg液态CO<sub>2</sub>吸收60 kJ热量会在40 ms内汽化。将液态CO<sub>2</sub>充装入二氧化碳致裂器,利用液态CO<sub>2</sub>受热成为气体后体积膨胀600倍,当CO<sub>2</sub>致裂器爆破瞬间,致裂钻孔内会产生约120 MPa的压力,随着时间的推移,应力波不断扩散,对钻孔周围煤体的产生致裂作用。

文献[16]中,建立了致裂影响有效半径 $R_p$ 与初始冲击压力峰值 $P_{MAX}$ 和孔径 $R_B$ 主要参数的耦合关系。通过耦合关系可得到影响有效半径为4.5 m。1903工作面致裂钻孔参数见表1。

表1 1903工作面回风巷钻孔参数

参数	钻孔间距/m	开孔高度/m	孔径/mm	孔深/m	倾角/(°)	初始冲击压力峰值 $P_{MAX}$ /MPa
数值	10	1.2	94	≥70	5	120

### 1.2 CO<sub>2</sub>致裂工艺

CO<sub>2</sub>致裂器由主管、充气阀、泄能阀发热装置及电极引出体五部分构成;组装完成后通过增压泵加压向储液管充入液态CO<sub>2</sub>气体,保持储液管内液态CO<sub>2</sub>压力为8~10 MPa;用电子导通器测量电路导通后,用矿用低压(9V)起爆器启动致裂装置,起爆致裂后随时观测孔内瓦斯压力,保压时间一般为15 min。CO<sub>2</sub>致裂工艺流程示意图见图1。

## 2 试验方法

### 2.1 试验对象选取

CO<sub>2</sub>致裂试验地点选取原则为松软、低渗透、高瓦斯、高应力的特点的煤岩。贵州省宏发煤矿贵州省宏发煤矿1903回风巷煤层赋存稳定,平均厚度为1.4 m,瓦斯含量为14.78 m<sup>3</sup>/t,开采埋深在258.38~260.25 m之间,瓦斯压力为1.12 MPa,透气性在0.126~0.135 m<sup>2</sup>/MPa<sup>2</sup>·d之间,瓦斯放散初速度为29 mmHg,煤层坚固性系数为0.54,巷道四周无采动影响,符合试验地点选取原则。1903回风巷布置示意图见图2。

### 2.2 试验方案

设计在1903工作面回风巷下帮布置16个CO<sub>2</sub>

致裂孔(致裂后兼作瓦斯抽采孔),各孔间距为10 m,孔径94 mm,孔深不得低于70 m。在1903工作面回风巷上帮布置5个未致裂孔,作为对比试验,如图3所示。

1) 测定未1孔和未3孔的煤层原始透气性系数,测定采用CO<sub>2</sub>增透后的6#、7#和8#致裂孔的透气性系数。

2) 采用ZKC-6型瓦斯抽放参数测定仪测定致裂和未致裂钻孔瓦斯抽采浓度及抽采纯量,接连抽采不低于30 d。

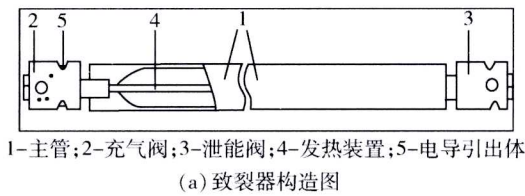
3) 致裂孔施工时,选取7个钻孔(1#、5#、9#、13#、16#、未1、未3)取样测定煤层的原始瓦斯含量(取样深度不少于30 m),抽采30 d后,计算钻孔瓦斯抽采率及残余瓦斯含量。

## 3 CO<sub>2</sub>致裂增透技术效果及分析

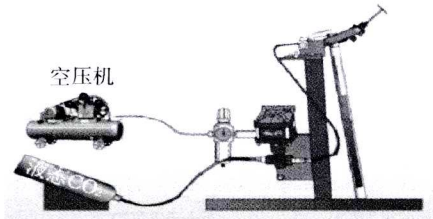
在致裂试验结束后,开始对致裂区域和未致裂区域的透气性系数、钻孔抽采浓度及纯量、瓦斯含量进行考察并对比。

### 3.1 致裂前后透气性系数变化

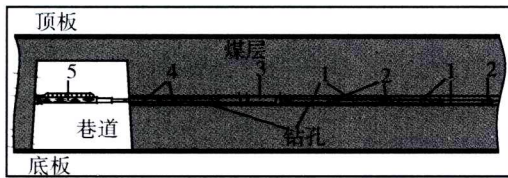
采用中国矿业大学所提出的方法测定煤层透气性系数。钻孔施工后封孔并安设瓦斯压力表待表压



(a) 致裂器构造图



(b) 气体充装系统示意图



1-致裂器;2-连接件;3-封孔装置;4-封孔引出杆;5-推取固定器

(c) 致裂器安装工艺示意图

图 1 CO<sub>2</sub> 致裂工艺流程示意图

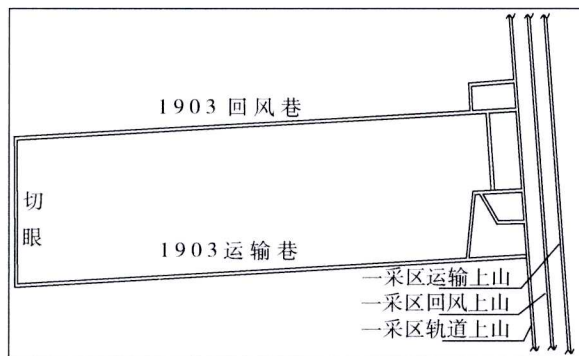


图 2 1903 回风巷布置示意图

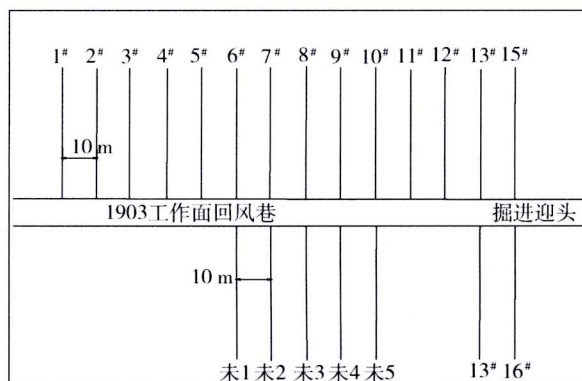


图 3 致裂孔布置示意图

稳定后,拆除压力表,并采用煤气表测定钻孔瓦斯自然流量,以后每天测定 1 次,直至瓦斯涌出量基本稳定为止。

据煤层径向不稳定流动理论结合瓦斯压力、煤层瓦斯含量及钻孔参数确定其透气性系数。计算公式见表 2。

先计算 A、B,然后任选一个 F 值,根据其相应的公式计算 λ,最后根据 λ、B 计算 F,若 F 值在原定范围内,则 λ 即为煤层的透气性系数,否则重新进行计算。

未 1、未 3 孔作为未致裂区域的煤层透气性系数测定孔,致裂后,6#、7#、8# 致裂孔作为致裂增透后煤层透气性系数的测定孔。各测定孔封孔后,对钻孔瓦斯自然流量进行数据测量,测量结果如表 3 所示。

根据透气性系数计算公式计算可得各孔测得煤层透气性系数如表 4 所示。

表 2 透气性系数计算公式表

$F (F = B \cdot \lambda)$	$\lambda (\lambda = A/Y)$
$10^{-2} \sim 1$	$A^{1.61} \cdot B^{1/1.64}$
$1 \sim 10$	$A^{1.39} \cdot B^{1/2.56}$
$10 \sim 10^2$	$1.11 \cdot A^{1.25} \cdot B^{1/4}$
$10^2 \sim 10^3$	$1.83 \cdot A^{1.14} \cdot B^{1/7.3}$
$10^3 \sim 10^5$	$2.1 \cdot A^{1.11} \cdot B^{1/9}$
$10^5 \sim 10^7$	$3.14 \cdot A^{1.07} \cdot B^{1/14.4}$

注:  $A = q \cdot r / (P^2 - P_0^2)$ ,  $B = 4 \cdot P^{1.5} \cdot T / (\alpha r_1^2)$ ; P 为瓦斯压力, MPa;  $P_0$  为测量时钻孔内绝对瓦斯压力, 通常取 0.1 MPa; q 为在排放时间 T 内, 钻孔煤层单位暴露面积上的瓦斯流量,  $m^3/m^2 \cdot d$ ;  $r_1$  为钻孔半径, m; T 为从开始排放瓦斯到测瓦斯流量 q 时的时间间隔, d;  $\alpha$  为瓦斯含量系数,  $m^3/m^3 \cdot MPa^{1/2}$ ;  $\lambda$  为透气性系数,  $m^2/MPa^2 \cdot d$ 。

表 3 煤体瓦斯自然流量测试结果

时间/ d	未 1/ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	未 3/ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	6#/ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	7#/ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )	8#/ ( $m^3/m^2 \cdot d$ )
1	0.031	0.033	0.051	0.047	0.050
2	0.027	0.030	0.049	0.045	0.049
3	0.026	0.026	0.048	0.043	0.049
4	0.023	0.023	0.045	0.041	0.048
5	0.021	0.021	0.043	0.040	0.047
6	0.018	0.019	0.041	0.039	0.046
7	0.015	0.016	0.041	0.038	0.045

表 4 煤体瓦斯透气性系数

孔号	未 1	未 3	6#	7#	8#
透气性系数 ( $m^2/MPa \cdot d$ )	0.126	0.135	0.388	0.363	0.441

如表 4 所示,煤体致裂增透前煤层瓦斯透气性系数 λ 为 0.126~0.135  $m^2/MPa^2 \cdot d$  之间,致裂增

透后,煤层瓦斯透气性系数 $\lambda$ 为0.363~0.441 m<sup>2</sup>/MPa<sup>2</sup>·d,煤层致裂后,其透气性系数平均为原始煤层的3.05倍,煤层的透气性显著提高。

### 3.2 钻孔瓦斯抽采浓度及抽采纯量对比考察

每个钻孔封孔接抽后记录开始抽采时间,并每天采用ZKC-6型瓦斯抽放参数测定仪测定钻孔瓦斯抽采浓度及抽采纯量,所有钻孔考察时间不低于30 d,致裂钻孔和未致裂钻孔瓦斯平均抽采浓度及平均抽采纯量变化曲线如图4和图5所示。

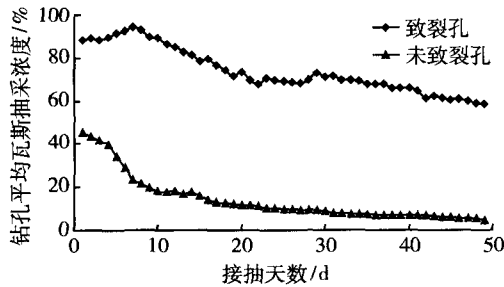


图4 钻孔平均瓦斯抽采浓度

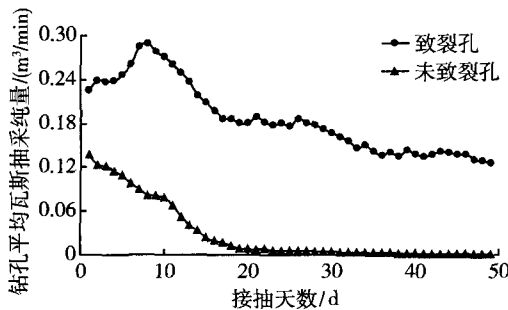


图5 钻孔平均瓦斯抽采纯量

由图4分析可知,接抽30 d内,未致裂增透区域煤层瓦斯抽采平均浓度为18.65%,且前期瓦斯浓度呈持续衰减趋势,20 d后浓度仅维持在10%左右;致裂区域的煤层瓦斯抽采平均浓度为78.23%,是未致裂区域的4.19倍,且瓦斯抽采浓度衰减较缓慢,抽采30 d后依旧稳定在70%上下,确保瓦斯的稳定持续抽采。

由图5分析可知,未致裂区域钻孔瓦斯抽采纯量呈持续衰减的趋势,最大值仅为0.13 m<sup>3</sup>/min,至17 d左右达到抽采平稳期,且抽采纯量仅为0.01 m<sup>3</sup>/min上下;通过CO<sub>2</sub>致裂增透后,钻孔抽采纯量显著增加,致裂完成后,钻孔抽采纯量逐渐增大,至第7 d达到最大值0.259 m<sup>3</sup>/min,然后开始下降,到第15 d左右达到平稳期,平稳后瓦斯抽采纯量维持在0.1 m<sup>3</sup>/min左右。

综上,接抽30 d内,致裂增透区域煤层瓦斯抽采平均浓度是未致裂增透区域的4.19倍,同时,致

裂增透区域瓦斯抽采平均纯量较未致裂增透区域平均提高了3.99倍。

### 3.3 瓦斯含量对比考察

在致裂孔及未致裂孔施工钻孔时,分别在1#、5#、9#、13#、16#、未1及未3孔取样测定煤层的瓦斯含量,根据取样结果,测定的抽采前煤层瓦斯含量如表5所示。

表5 抽采前钻孔瓦斯含量

孔号	1#	5#	9#	13#	16#	未1	未3
瓦斯含量/ (m <sup>3</sup> /t)	14.69	12.46	11.80	13.62	11.31	10.40	9.79

表6 各钻孔瓦斯抽采情况

孔号	累计抽采纯量/m <sup>3</sup>	抽采率/%	残余瓦斯含量/(m <sup>3</sup> /t)
1#	8 890.56	60.04	5.87
5#	6 398.33	51.66	6.02
9#	6 708.39	54.88	5.32
13#	7 154.64	49.37	6.90
16#	7 155.98	61.07	4.40
未1	2 006.59	19.14	8.41
未3	1 749.37	15.57	8.27

由于项目实施区域1903工作面回风巷本煤层所处M煤层赋存稳定,且各钻孔均匀分布,因此,根据各钻孔的施工孔深、有效抽采长度及瓦斯抽采纯量,计算出各钻孔抽采30 d内瓦斯累计抽采纯量,从而计算出各钻孔瓦斯抽采率及煤层残余瓦斯含量。

采率计算见式(1)。

$$\eta = \frac{Q_c}{Q} = \frac{Q_c}{W \cdot L \cdot M \cdot 2N \cdot \Gamma} \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为抽采率,%; $Q$ 、 $Q_c$ 分别为钻孔控制区域煤层瓦斯含量和钻孔累计瓦斯抽采量,m<sup>3</sup>;W为抽采前钻孔瓦斯含量,m<sup>3</sup>/t;L、M分别为钻孔深度和煤层厚度,m;N为钻孔控制半径,5 m; $\Gamma$ 为煤层容重,t/m<sup>3</sup>。

抽采后煤层残余瓦斯含量计算见式(2)。

$$W_{\infty} = W \cdot (1 - \eta) \quad (2)$$

式中: $W_{\infty}$ 为残余瓦斯含量,m<sup>3</sup>/t。

各钻孔抽采率及残余瓦斯含量计算结果见表6。由表6分析可知,在钻孔瓦斯抽采率方面,CO<sub>2</sub>致裂增透区域单孔的瓦斯抽采效果比未进行致裂的钻孔瓦斯抽采效果提高了2.58~3.92倍。接抽30 d后,致裂钻孔控制区域煤层残余瓦斯含量均在8 m<sup>3</sup>/t以下,未致裂区域钻孔控制区域煤层残余瓦斯含量均在8 m<sup>3</sup>/t以上。

### 3.4 效益分析

宏发煤矿 1903 回采工作面设计斜长 120 m, 走向长度 900 m。若不采用 CO<sub>2</sub> 增透技术, 本煤层瓦斯抽采钻孔设计间距 2.5 m, 孔深为 70 m; 若采用 CO<sub>2</sub> 增透技术, 本煤层瓦斯抽采钻孔设计间距为 10 m, 孔深为 70 m。

由表 7 可看出, 1903 回采工作面瓦斯治理, 采

用增透 CO<sub>2</sub> 增透比未采用 CO<sub>2</sub> 增透, 钻孔工作量降低了 4 倍, 总成本增加了 73.3%。采用 CO<sub>2</sub> 增透技术后, 回采工作面抽采达标时间缩短了 55 d; 工作面瓦斯涌出量降低了 40%。总体而言, 虽然采用 CO<sub>2</sub> 增透技术进行回采工作面预抽钻孔总成本增加了 73.3% (同时也得到省专项补助资金 100 万元), 但抽采达标时间仅用了 20 d, 比未增透时缩短了约 55 d。

表 7 效益分析对比表

类别	瓦斯抽采成本/(元/孔)	钻孔数量	回采工作面预抽钻孔总成本/万元	抽采达标天数/d	工作面瓦斯涌出量/(m <sup>3</sup> /min)
不增透	2 800	720	202	75	3.58
增透	19 500	180	350	20	2.16

通过效益分析, 可总结出 CO<sub>2</sub> 致裂技术适用于煤质松软、煤层透气性差、瓦斯抽采浓度和纯量低、抽采达标时间长、钻孔工作量大、工作面瓦斯涌出量大、抽采钻孔易塌孔、水敏性强等问题的煤层。同时在压裂施工过程中还需要注意致裂区域安全问题, 需要安排专人在警戒线处站岗, 在致裂完成 15 min 后由专职瓦检员及时对致裂孔附近 20 m 范围内瓦斯 CO<sub>2</sub> 浓度进行检查, 当瓦斯浓度低于 0.8% 时, CO<sub>2</sub> 浓度低于 0.5% 时, 相关人员才能进入致裂地点进行拆除工作; 致裂孔会出现穿层现象, 这样会严重影响致裂效果; 在致裂过程中尽量避免塌孔现象, 所以需要研制更合适的松软煤层钻进和成孔技术及装备。

总之, 该技术工艺简单、可靠易行、安全、综合成本较低, 可大幅度提高瓦斯抽采率和抽采速度, 降低煤层瓦斯含量和瓦斯压力, 有效消除煤与瓦斯突出危险性, 确保矿井的安全高效回采和利用。

### 4 结论

1) 液态 CO<sub>2</sub> 受热汽化成为气体后体积膨胀产生高压气体破碎煤体产生大量孔隙, 在钻孔周围形成了透气性好的瓦斯抽采区域, 并为 CO<sub>2</sub> 吸附煤体和驱替煤层瓦斯提供了良好的环境。

2) 采用 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术后, 煤层透气性系数提高了 3.05 倍; 钻孔抽采平均浓度提高了 4.19 倍, 同时, 瓦斯抽采平均纯量提高了 3.99 倍; 单孔的瓦斯抽采效果比未进行致裂的钻孔瓦斯抽采率提高了 2.58~3.92 倍。

3) 通过效益分析, 采用 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术后, 虽然工程成本稍有提高, 但是钻孔工作量降低了 4 倍, 回采工作面抽采达标时间缩短了 55 d, 工作面瓦斯涌出量降低了 40%, 煤层开采效益显著提高, 极大的缓解了矿井采掘接替紧张问题, 确保矿井的安全高效回采和利用。

### 参考文献

- [1] 郭明涛, 唐跃刚, 苏雪峰, 等. 高压注水对煤孔隙结构影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 133-140.
- [2] 范军, 窦林名, 贺虎. 定向割缝水力致裂顶板关键参数研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(4): 79-83, 89.
- [3] 杨宏民, 郭怀广, 仇海生. 水分对煤体物性参数影响试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9): 67-72.
- [4] 黄炳香, 陈树亮, 程庆迎. 煤层压裂开采与治理区域瓦斯的基本问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 128-137.
- [5] Sato M, Hoshina Y, Hanai M, et al. Dielectric properties in high pressure CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> gas using coaxial cylindrical electrode and on the surface of spacer, Piscataway, NJ, USA, 2002[C]. IEEE, 2002.
- [6] Franke H, Thiel H G. Theoretical and diagnostic investigation of gas-blast, turbulence-controlled arcs in circuit-breakers[J]. Elektrotechnische-Zeitschrift ETZ A, 1971, 92(5): 298-302.
- [7] 文虎, 李珍宝, 王振平, 等. 煤层注液态 CO<sub>2</sub> 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2793-2799.
- [8] 李守国. 高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 92-95.
- [9] 汪开旺. 高压空气爆破技术装备研发及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 136-140.
- [10] KHLEBNIKOV V N, MISHIN A S, ANTONOV S V, et al. 一常见气体及 CO<sub>2</sub> 在岩心模型和细长管模型上的驱油对比[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 151-158.
- [11] 吴迪, 刘雪莹, 孙可明, 等. 热力作用下煤层注 CO<sub>2</sub> 驱替 CH<sub>4</sub> 试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 162-166.
- [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.
- [13] 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.
- [14] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 75-79.
- [15] 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.
- [16] 雷云, 刘建军, 张哨楠. 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.