



移动扫码阅读

马小敏. 液态 CO₂ 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. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.02.015
MA Xiaomin. Effect of liquid CO₂ phase change fracturing on effective gas extraction radius - an experimental study [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 88-93. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.02.015

液态 CO₂ 相变致裂影响有效抽采半径试验研究

马小敏^{1,2}

(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:为掌握液态 CO₂ 相变致裂对有效抽采半径的影响规律, 在确定有效抽采半径评价指标的基础上, 采用分组试验方法对 CO₂ 相变致裂前后的有效抽采半径进行了测定, 得出了液态 CO₂ 相变致裂对有效抽采半径的影响参数。研究表明: 采用液态 CO₂ 相变致裂技术对煤层进行爆破致裂后, 瓦斯运移速率提高, 使煤层瓦斯压力加速下降, 在相同的抽采时间下, CO₂ 致裂后煤层的有效抽采半径较未致裂的煤层扩大约 1 m。达到相同有效抽采半径 1、2、3 m, CO₂ 致裂后的煤层所需预抽时间较未致裂的煤层分别缩短了 15、29、47 d, 瓦斯抽采效率平均提高 43%。CO₂ 致裂前期对瓦斯抽采效率的提高作用明显, 随着抽采时间的延长, 致裂增透作用不断减弱直至消失, 即 CO₂ 相变致裂对提高煤层透气性存在一个极限影响范围。

关键词: 瓦斯抽采; CO₂ 相变致裂; 有效抽采半径; 降压法; 煤层增透

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2019)02-0088-06

Effect of liquid CO₂ phase change fracturing on effective gas extraction radius - an experimental study

MA Xiaomin^{1,2}

(1. Shenyang Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Shenyang 110016, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: This paper presents the results of an experimental study of effect of liquid CO₂ phase change fracturing on effective gas extraction radius. The effective gas extraction radius before and after CO₂ phase change fracturing was measured during the experiment to evaluate its effect. The results show that the gas migration rate increases, resulting in an accelerating reducing of gas pressure in the coal seam, after the application of liquid CO₂ phase transition fracturing. The effective gas extraction radius after CO₂ phase change fracturing increases by about 1 m under the same extraction time. The estimated extraction time after CO₂ phase change fracturing is reduced by 15, 29 and 47 days when the effective extraction radius is 1, 2 and 3 m respectively, and the average gas extraction rate increases by 43%. The results also show that the gas extraction rate increases dramatically at the beginning of CO₂ phase change fracturing, following by a decelerating increase, and then remaining stable eventually as the coal permeability increase caused by CO₂ phase change fracturing reaches the maximum value.

Key words: gas extraction; CO₂ phase change fracturing; effective gas extraction radius; pressure drop method; coal seam permeability

0 引 言

加强瓦斯抽采、实现“先抽后采”是煤矿瓦斯治理的治本之策^[1], 通过抽采降低煤层瓦斯含量、瓦

斯压力及瓦斯涌出量可以有效防止瓦斯爆炸及煤与瓦斯突出事故的发生。煤层瓦斯抽采的钻孔间距是影响瓦斯抽采效果的重要因素; 钻孔间距过大, 在抽采范围内容易形成抽采盲区; 钻孔间距过小, 容易造

收稿日期: 2018-10-28; 责任编辑: 王晓珍

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067-004-003, 2016ZX05045-004-004); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新基金资助项目(2014QN006)

作者简介: 马小敏(1985—), 男, 山西晋中人, 助理研究员, 硕士。Tel: 13504072250, E-mail: mxmwy1248@163.com

成人力和物力的浪费。因此,煤层瓦斯抽采钻孔的设计应以钻孔的有效抽采半径为依据^[2-3]。

评价瓦斯抽采效果的好坏主要取决于单位时间内的瓦斯抽采效率。在低透气性、高瓦斯煤层条件下往往存在钻孔施工工程量高和瓦斯抽采效率低的问题,如何提高单位时间内的瓦斯抽采率和抽采量一直是煤矿瓦斯防治领域的研究重点。液态 CO₂相变致裂技术是近年来兴起的一种煤层增透技术,其主要通过爆生气体驱替煤层瓦斯促使裂隙不断扩展导通煤体裂隙来提高煤层透气性,许多学者^[4-10]在该技术领域开展了大量的理论分析和试验研究,梁卫国等^[4]研究了同一温度不同体积应力条件下的超临界 CO₂的渗透性及其驱替 CH₄效果;文献^[5-7]研究了液态 CO₂相变致裂技术的增透原理并通过现场试验考察了增透促抽及消突效果;周西华等^[8]通过建立煤层液态 CO₂爆破有限差分本构模型对单孔爆破和多孔连续爆破下的增透效果进行了模拟研究^[8];DU Yukun 等^[9]通过试验确定了影响高压超临界 CO₂破岩性能的主要因素;董庆祥等^[10]模拟分析了 TNT 在混凝土试块中的爆炸及应力分布情况,并将所得结果与液态 CO₂相变致裂试验结果进行了对比研究,得出了液态 CO₂相变致裂的 TNT 当量。

前人虽然取得了丰富的成果,但在应用 CO₂相变致裂技术时对瓦斯抽采有效半径影响规律方面的研究甚少,且致裂后对煤层抽采有效半径影响程度的具体数值尚不明确,生产实践中如何根据 CO₂相变致裂影响规律来设计布孔参数没有明确的理论依据。基于上述问题,笔者通过理论分析和现场试验相结合的技术手段,在分析 CO₂相变致裂煤层增透机理的基础上,研究了 CO₂致裂前后煤层有效抽采半径变化规律,在进一步完善液态 CO₂相变致裂煤层增透机理的同时,为煤矿瓦斯治理中应用 CO₂致裂技术,优化抽采钻孔布置参数、提高瓦斯抽采效率提供理论参考和指导意义。

1 液态 CO₂相变致裂设备与增透机理

1.1 液态 CO₂相变致裂器

液态 CO₂相变致裂器是一种新型应用于低透气煤层增透的设备,与传统的火药爆破器材不同,CO₂爆破过程为液态到气态的物理变化过程,爆破过程中不会产生火花和有害气体。液态 CO₂相变致裂器是由一个高强度的可以重复使用的充装液态 CO₂金属主管、加热器(发热装置)、定压泄能片、密封垫、泄爆头等部分组成,其各部分构成如图 1 所示。

液态 CO₂相变致裂器的爆破过程为:在待预裂

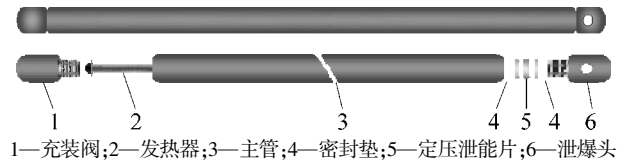


图 1 液态 CO₂相变致裂器结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of liquid CO₂ phase transition fracturing equipment

的煤体中施工钻孔,将预先充装好液态 CO₂的爆破管放置到钻孔内,封孔后连接爆破管和起爆器,使用起爆器启动爆破管内加热器,使 CO₂温度不断升高且压力持续增大,当突破 CO₂的气液两态变化临界点(31 °C、7.4 MPa)^[5],管内的 CO₂迅速从液态转化为气态,压力急剧升高,达到定压泄能片的极限强度(可设定)时冲破定压泄能片从泄爆头喷出,产生体积膨胀 600 倍的高压 CO₂冲击煤体,致使煤体破裂。

1.2 液态 CO₂相变致裂增透机理

液态 CO₂相变爆破致裂后,在泄爆口形成一股强有力的以应力波和爆生气体为主要动力的破煤能量,聚能压力可达 270 MPa,在致裂冲击作用下,钻孔周围煤体产生径向压缩和切向拉伸,当环向的张拉应力超过极限抗拉强度后,煤体将被破坏产生裂隙,当冲击波衰减到低于煤体抗拉强度时,裂隙将不再产生^[5-6]。冲击波作用的同时,CO₂紧随其后迅速膨胀,沿着初始导向裂隙进入煤体,由于气楔作用,冲击波产生的径向裂隙或煤体内部的原生裂隙继续扩展,直至 CO₂压力降低到不能使裂隙扩展停止^[7-9],最终在煤体内形成了以钻孔为中心的大量导通的裂隙,从而达到煤层增透的目的。液态 CO₂相变爆破致裂后钻孔周围煤体裂隙分布情况如图 2 所示。

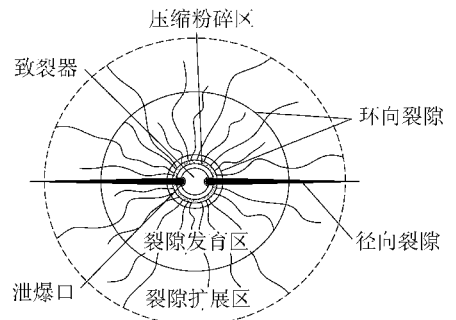


图 2 液态 CO₂相变爆破致裂后钻孔周围煤体裂隙分布示意

Fig.2 Cracks distribution of coal-body around drilling after fracturing caused by liquid CO₂ phase transition

2 有效抽采半径测定原理及依据

钻孔抽采瓦斯时,煤体某处的瓦斯压力与抽采负压的压差大于该处瓦斯渗流启动压力时,瓦斯便

向钻孔发生流动,抽采钻孔周围煤体的瓦斯压力随即发生变化,在抽采钻孔周边不同距离处布置孔口密封的测试钻孔,通过测定测试钻孔内瓦斯压力的变化,即可确定钻孔的抽采半径^[11-12]。而抽采半径又分为瓦斯抽采影响半径和瓦斯抽采有效半径。瓦斯抽采影响半径是指在规定时间内,经过抽采煤层瓦斯压力或含量开始下降的点到抽采钻孔中心的最大距离。瓦斯抽采有效半径是指在规定时间内,经过抽采煤层瓦斯压力或含量下降到安全允许值的点到抽采钻孔中心的最大距离。在工程实践中瓦斯抽采有效半径更具有实际指导意义,因此往往需要测定煤层的有效抽采半径。

测定有效抽采半径的方法有很多,主要分为现场测定和理论计算2种,现场实测有效抽采半径的方法包括:文献[12]提出分组测压法,基于瓦斯含量的相对压力测定方法^[3]及基于临界残余瓦斯压力^[13]3种压力测定法;余陶运用瓦斯抽采流量和压力相结合的方法^[14];还有陈金玉采用的SF₆气体示踪法^[15]等。理论计算测定有效抽采半径的主要有:王兆丰提出了利用变系数非线性瓦斯渗流方程快速精确测定瓦斯抽采半径的数值计算方法^[16];文献[17-18]通过建立多物理场耦合模型,运用数值模拟方法来确定煤层的有效抽采半径;文献[19-20]基于瓦斯渗流理论来计算有效抽采半径。

各种方法各有其优缺点,综合前人研究成果,本次研究采用压降法来测定有效抽采半径,确定钻孔有效抽采半径的评价指标如下:当煤层瓦斯压力 $P < 1.51$ MPa时,抽采后煤层残余瓦斯压力 P_c 下降量大于原始瓦斯压力的51%为有效抽采半径确定指标^[3,12];当煤层瓦斯压力 $P \geq 1.51$ MPa时,抽采后煤层残余瓦斯压力 P_c 下降到0.74 MPa以下为有效抽采半径确定指标^[13-14]。

3 现场试验研究

3.1 试验地点概况

现场试验选择在3113运输巷3号煤层中进行,煤层厚度6.2 m,倾角 $3^\circ \sim 15^\circ$,顶底板均为泥岩,煤层中含夹矸1层,平均厚度0.2 m。煤层瓦斯压力0.36~0.62 MPa,煤层瓦斯含量 $10 \sim 13$ m³/t,煤层普氏系数0.44~0.68,瓦斯放散初速度10.7~16.5,煤层赋存稳定,结构简单。

3.2 试验方法

根据现场实际情况,在3113运输巷布置2组钻孔,分别为A组(未致裂抽采)和B组(CO₂致裂后抽采),其间距为50 m。A组钻孔由1个抽采孔和4

个测压孔组成,B组钻孔由2个CO₂致裂孔、1个抽采孔和4个测压孔组成。2组钻孔布置方式如图3所示,钻孔参数见表1。

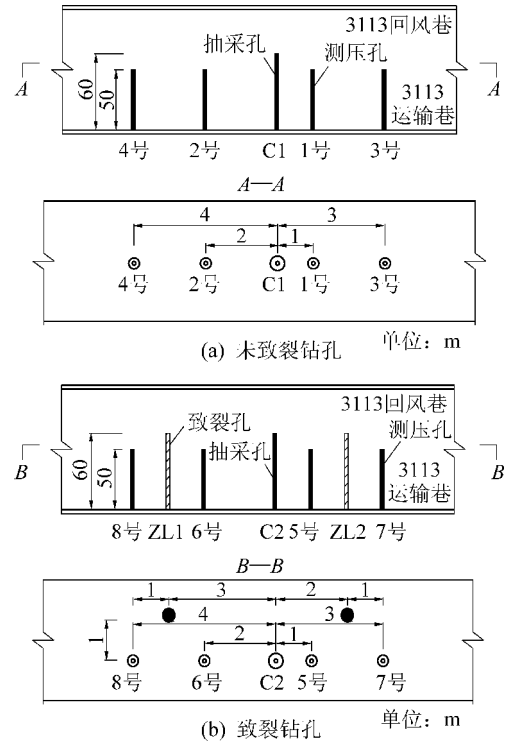


图3 钻孔布置

Fig.3 Drilling arrangement diagram

表1 抽采钻孔参数

Table 1 Extraction drilling parameters

分组	钻孔编号	类型	孔径/ mm	终孔长度/ m	封孔长度/ m	与抽采孔 距离/m
A组	C1	抽采孔	113	60	20	0
	1号	测压孔	75	50	30	1.0
	2号	测压孔	75	50	30	2.0
	3号	测压孔	75	50	30	3.0
B组	4号	测压孔	75	50	30	4.0
	C2	抽采孔	113	60	20	0
	5号	测压孔	75	50	30	1.0
	6号	测压孔	75	50	30	2.0
B组	7号	测压孔	75	50	30	3.0
	8号	测压孔	75	50	30	4.0
	ZL1	致裂孔	94	60	15	3.0
	ZL2	致裂孔	94	60	15	2.0

注: 钻孔与巷道夹角为 90° , 倾角为 15° 。

在观测过程中,当测压孔瓦斯压力值下降51%时为有效压力值,将此测压孔称为抽采有效距离钻孔,各抽采有效距离钻孔与抽采钻孔之间距离即为该煤层在相应抽采时间下的有效抽采半径。

3.3 试验结果

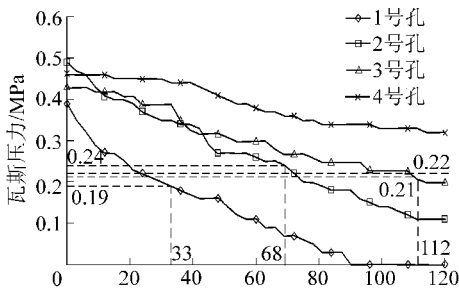
按照上述方法对未致裂抽采和 CO₂致裂后抽采 2 种条件下直径 113 mm 钻孔的有效抽采半径进行了试验,经过 120 d 的观测,得到 2 组测压孔在不同抽采时间内的压力变化规律。1—8 号测压孔瓦斯压力随抽采变化规律如图 4 所示。

从图 4 可以看出:

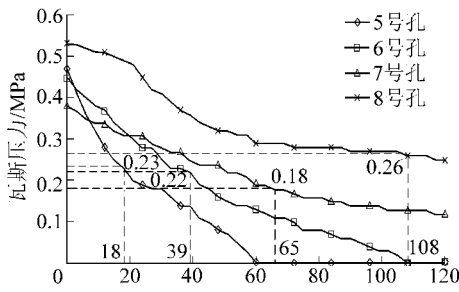
1) 1 号测压孔压力下降趋势最明显,在抽采后的前 12 d 基本呈线性下降,由初始稳定压力 0.39 MPa 骤降至 0.27 MPa,此后下降速率有所减缓,至 33 d 时降至有效压力 0.19 MPa,随后抽采至 90 d 时压力降为 0。

2) 2 号测压孔压力下降趋势与 1 号孔接近,抽采前 30 d 压力下降较快,由 0.49 MPa 降至 0.35 MPa,之后下降趋势较 1 号孔幅度有所降低,抽采到第 68 d 时降至有效压力 0.24 MPa,之后缓慢下降至 0.11 MPa。

3) 3 号测压孔的压力在抽采孔联网抽采后也表现出下降的趋势,但并不像 1、2 号孔那么明显,下降的幅度也不是很大,在抽采 112 d 后才从 0.43 MPa 降至有效压力 0.21 MPa,之后下降趋缓,120 d 时降至 0.2 MPa。



(a) 未致裂钻孔



(b) 致裂钻孔

图 4 瓦斯压力随抽采时间变化规律

Fig.4 Variation discipline of gas pressure according to extract time

4) 4 号测压孔压力在抽采后 42 d 才开始有所下降,虽然整体也呈现下降的趋势,但幅度已经很小,在抽采至 120 d 时压力由 0.46 MPa 降低到 0.32

MPa,仅为初始稳定压力的 30%,未达到有效压力 0.22 MPa,说明抽采 120 d 时 4 号测压孔只在抽采的影响范围而非有效半径范围。

5) 5 号测压孔在 CO₂致裂并进行抽采后压力急速下降,仅用 18 d 就从 0.47 MPa 降到有效压力 0.23 MPa,有效抽采半径达到 1 m 时较未致裂钻孔用时缩短 15 d,之后下降趋势虽有所减缓,但仍较为迅速,仅在第 60 d 压力就降为 0,较未进行致裂钻孔缩短 30 d。

6) 6 号测压孔压力也呈明显下降趋势,且下降幅度较大,抽采后 39 d 压力由 0.45 MPa 降到有效压力 0.22 MPa,有效抽采半径达到 2 m 时较未致裂钻孔用时缩短 29 d,之后平稳下降,至 108 d 时降为 0。

7) 7 号测压孔压力整体一直平稳下降,较未致裂钻孔下降速率有所提高,在抽采第 65 d 时,压力从 0.38 MPa 降至有效压力 0.18 MPa,有效抽采半径达到 3 m 时,较未致裂钻孔用时缩短 47 d,随后抽采至 120 d 时缓慢下降至 0.12 MPa。

8) 8 号测压孔压力与未致裂钻孔相比有明显加速下降段,即从 21 d 开始至 48 d 下降明显,之后下降趋势减缓,抽采至 108 d 时从初始稳定压力 0.53 MPa 降到有效压力 0.26 MPa,有效半径达到 4 m,抽采 120 d 压力最终降至 0.25 MPa。

4 液态 CO₂相变致裂对有效抽采半径影响分析

试验结果表明,试验煤层在设计钻孔直径 113 mm 的情况下:在未进行 CO₂致裂进行瓦斯抽采时,抽采 33 d 有效半径可达到 1 m,抽采 68 d 有效半径可达到 2 m,抽采 112 d 有效半径可达到 3 m,抽采 120 d 可影响到 4 m;在进行 CO₂爆破致裂后进行瓦斯抽采时,抽采 18 d 有效半径可达到 1 m,抽采 39 d 有效半径可达到 2 m,抽采 65 d 有效半径可达到 3 m,抽采 108 d 有效半径可达到 4 m。

通过对比分析 CO₂致裂对有效抽采半径的影响发现:①进行 CO₂致裂后的测压孔压力在抽采后较未致裂测压孔的压力下降速率加快,表明 CO₂爆破致裂后产生的应力波及高压气体,使周围煤体产生大量裂隙,形成以爆破钻孔为中心的裂隙发育区,煤层透气性大幅增加,使得瓦斯运移加速,提高了瓦斯抽采效率,进而提高了煤层的有效抽采半径。②在相同的抽采时间下,CO₂致裂后煤层的有效抽采半径较未致裂的煤层扩大约 1 m。③实现相同有效抽采半径 1、2、3 m,CO₂致裂后的煤层所需预抽时间较

未致裂的煤层分别缩短了15、29、47 d,抽采效率平均提高43%。④CO₂致裂前期对瓦斯抽采效率的提高作用明显,随着抽采时间的延长,致裂增透作用不断减弱直至消失,即CO₂相变致裂对提高煤层透气性存在一个极限影响范围。

5 结 论

1)通过分组试验对液态CO₂相变致裂前后的有效抽采半径进行了测定,试验煤层在设计钻孔直径113 mm条件下,在未采取CO₂致裂进行瓦斯抽采时,有效抽采半径达到1、2、3 m的抽采时间分别为33、68、112 d,抽采120 d可影响到4 m;CO₂致裂后进行瓦斯抽采时,有效抽采半径达到1、2、3、4 m的抽采时间分别为18、39、65、108 d。

2)测压孔在CO₂致裂前后的压力变化规律表明,采用液态CO₂相变致裂技术对煤层进行爆破致裂后,瓦斯运移速率提高,使煤层瓦斯压力加速下降,在相同的抽采时间下,CO₂致裂后煤层的有效抽采半径较未致裂的煤层扩大约1 m。达到相同有效抽采半径1、2、3 m,CO₂致裂后的煤层所需预抽时间较未致裂的煤层分别缩短了15、29、47 d,抽采效率平均提高43%。

3)CO₂致裂前期对瓦斯抽采效率的提高作用明显,随着抽采时间的延长,致裂增透作用不断减弱直至消失,即CO₂相变致裂对提高煤层透气性存在一个极限影响范围。确定这个极限影响临界值可以作为下一步的研究方向。

参考文献(References):

[1] 申宝宏,刘建中,张泓.我国煤矿瓦斯治理的技术对策[J].煤炭学报,2007,32(7):673-679.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, ZHANG Hong. The technical measures of gas control in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 673-679.

[2] 杜泽生,罗海珠.煤矿瓦斯有效抽放半径的测定计算方法[J].煤炭科学技术,2009,37(2):59-62.
DU Zesheng, LUO Haizhu. Measuring and calculation method of borehole effective gas drainage radius[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2): 59-62.

[3] 刘三钧,马耕,卢杰,等.基于瓦斯含量的相对压力测定有效半径技术[J].煤炭学报,2011,36(10):1715-1719.
LIU Sanjun, MA Geng, LU Jie, et al. Relative pressure determination technology for effective radius found on gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1715-1719.

[4] 梁卫国,张倍宁,韩俊杰,等.超临界CO₂驱替煤层CH₄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.

[5] 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.

[6] 王海东.突出煤层掘进工作面CO₂可控相变致裂防突技术[J].煤炭科学技术,2016,44(3):70-74.
WANG Haidong. CO₂ controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 70-74.

[7] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态CO₂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 CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2015, 34(1): 1-5.

[8] 周西华,门金龙,宋东平,等.煤层液态CO₂爆破增透促抽瓦斯技术研究[J].中国安全科学学报,2015,25(2):60-65.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO₂ blasting[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 60-65.

[9] DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical Carbon dioxide jet[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(4): 554-560.

[10] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等.液态CO₂相变致裂的TNT当量研究[J].中国安全科学学报,2014,24(11):84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.

[11] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1997.

[12] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉,等.分组测压确定瓦斯有效抽采半径试验研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):132-135.
LANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji, et al. Grouped pressure test to determine effective gas drainage radius[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 132-135.

[13] 舒龙勇,樊少武,张浪,等.基于临界残余瓦斯压力的有效抽采半径确定方法[J].煤炭科学技术,2015,43(10):81-85.
SHU Longyong, FAN Shaowu, ZHANG Lang, et al. Method to determine effective gas drainage radius based on critical residual gas pressure[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 81-85.

[14] 余陶,卢平,孙金华,等.基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):596-600.
YU Tao, LU Ping, SUN Jinhua, et al. Measurement of effective drainage radius based on gas flow and pressure of boreholes[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 596-600.

- [15] 陈金玉,马丕梁,孔一凡,等.SF₆气体示踪法测定钻孔瓦斯抽放有效半径[J].煤矿安全,2008,40(9):23-25.
CHEN Jinyu, MA Piliang, KONG Yifan, *et al.* SF₆ gas tracer method for the determination of effective gas drainage radius[J]. Safety in Coal Mines, 2008, 40(9): 23-25.
- [16] 王兆丰,周少华,李志强.瓦斯抽采钻孔有效抽采半径的数值计算方法[J].煤炭工程,2011(6):82-84.
WANG Zhaofeng, ZHOU Shaohua, LI Zhiqiang. Numerical calculation method of effective drainage radius for gas drainage borehole[J]. Coal Engineering, 2011(6): 82-84.
- [17] 郝富昌,刘明举,孙丽娟.基于多物理场耦合的瓦斯抽放半径确定方法[J].煤炭学报,2013,38(S1):106-111.
HAO Fuchang, LIU Mingju, SUN Lijuan. Determination method of gas drainage radius based on multi-physics coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 106-111.
- [18] 鲁义,申宏敏,秦波涛,等.顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):156-162.
LU Yi, SHEN Hongmin, QIN Botao, *et al.* Gas drainage radius and borehole distance along seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 156-162.
- [19] 马耕,苏现波,魏庆喜.基于瓦斯流态的抽放半径确定方法[J].煤炭学报,2009,34(4):501-504.
MA Geng, SU Xianbo, WEI Qingxi. The determination method of coal gas drainage radius based on methane flow state[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 501-504.
- [20] 季淮君,李增华,杨永良,等.基于瓦斯流场的抽采半径确定方法[J].采矿与安全工程学报,2013,30(6):917-921.
JI Huaijun, LI Zenghua, YANG Yongliang, *et al.* Drainage radius measurement based on gas flow field[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 917-921.