

# 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂规律模拟研究

孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 王金彧

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为研究超临界二氧化碳气爆应力波和爆生气体致裂煤体的规律, 通过实验确定了不同温压条件下气爆喷嘴压力时程曲线, 反演得到了爆生气体 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程参数, 建立了超临界二氧化碳气爆致裂煤体的冲击动力学模型, 应用光滑粒子流体动力学方法对不同压力的超临界二氧化碳气爆煤体过程进行了模拟计算, 揭示了粉碎区和裂隙区的破坏规律和形成机理, 得到了气爆过程中爆破压力的分布. 结果表明: 煤体破坏形貌与实验结果一致; 超临界二氧化碳气爆产生的冲击载荷超过爆孔周围煤体的动态抗压强度形成粉碎区, 粉碎区外的介质在应力波作用下产生径向位移, 形成环向拉应力, 连同爆生气体的气楔作用使得环向拉应力超过煤体动态抗拉强度发生开裂形成裂隙区; 裂隙扩展范围和密集程度与超临界二氧化碳气爆压力正相关.

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub>; 气爆; 光滑粒子流体动力学; 应力波; 数值模拟

**中图分类号:** TD 82      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1964(2017)03-0501-06

**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcunt.000669

## Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion

SUN Keming, XIN Liwei, WANG Tingting, WANG Jinyu

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** To investigate supercritical carbon dioxide explosion stress wave and coal fracture laws which were caused by detonation gas, pressure history curves of the nozzle were determined by the method of experiments at different temperature and pressure, and parameters of Jones-Wilkins-Lee state equation were inverted. An impact dynamics model of coal fracture was established and the simulation of supercritical carbon dioxide explosion process was carried out based on smoothed particle hydrodynamics. The distribution of explosion pressure was obtained in the process of gas explosion. The destruction rule and formation mechanism of crushing zone and fracture zone was revealed. The results show that the fracture morphologies were consistent with experimental results. Smash area was formed around the blast hole, caused by impact load exceeds dynamic compressive strength in the process of supercritical carbon dioxide explosion. The medium outside smash area have a radial displacement under the effect of stress wave which cause the circumferential tensile stress, combined with the effects of gas wedge exceeds dynamic tension strength of the coal, forming fracture zone. Fracture extent and intensity are positively correlated with supercritical carbon dioxide explosion pressure.

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>; gas explosion; smoothed particle hydrodynamics; stress wave; numerical simulation

收稿日期: 2015-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574137)

通信作者: 孙可明(1968—), 男, 黑龙江省五常市人, 教授, 博士生导师, 从事渗流理论及工程应用方面的研究.

E-mail: sskkmm11@163.com      Tel: 0418-3350954

我国煤层气(煤层瓦斯)资源丰富,开发和利用潜力巨大,但煤层渗透率普遍偏低,一般在 $(0.001\sim 1.800)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 范围内<sup>[1-2]</sup>,致使瓦斯抽采困难,不仅商业开采面临挑战,而且制约煤矿安全高效生产<sup>[3]</sup>.我国的煤炭工作者对提高煤层渗透性进行了长期探索和实践<sup>[4-11]</sup>,目前提高煤层渗透性的方法主要有开采解放层、水力压裂、水力割缝、深孔爆破等增透技术.目前常采用的开采解放层多适用于煤层组的联合抽采,本煤层抽采受到限制;水力压裂或水力割缝增透技术对煤层造成二次污染,并且耗水量大;深孔爆破等方法对煤层增透有一定的效果,但实施过程易发生事故.研究低渗透煤层增透技术迫在眉睫,超临界 $\text{CO}_2$ 气爆技术就是一种安全高效的致裂增透技术.目前我国煤矿应用高压气体爆破煤岩的实验和理论研究较少,煤炭科学研究总院在平顶山进行了二氧化碳爆破筒地面实验.文献[12]分析了高压空气爆破原理,并进行了实验验证.文献[13]介绍了高压气体爆破采煤工作原理、爆破筒结构和试验应用情况.文献[14-16]进行了液态 $\text{CO}_2$ 预裂增透的工业性试验,取得了良好的效果.文献[17-18]等分别对高压气体爆破进行了实验研究,测试了高压气体冲击煤体前后煤层渗透率的变化规律.文献[19-20]应用有限元软件对高压空气爆破煤体进行模拟,得到气体压力分布规律,但是没有对爆生裂隙和破坏范围进行研究.文献[21]进行了大量超临界 $\text{CO}_2$ 气爆致裂煤体实验,增透效果显著,爆破过程降温明显且不受瓦斯和粉尘影响,具有工业应用价值.目前实验室气爆实验大多使用高压空气,数值模拟没有考

虑爆生气体对煤体的驱动和劈裂作用,很难得到裂隙的形态和分布规律,超临界 $\text{CO}_2$ 气爆的研究更少,且不能把炸药预裂爆破等化学爆破理论直接应用于这种物理爆破法,因此利用超临界 $\text{CO}_2$ 气爆实验和数值模拟方法进一步研究超临界 $\text{CO}_2$ 气爆机理和规律,对提高超临界 $\text{CO}_2$ 气爆技术的应用水平具有重要意义.

## 1 超临界 $\text{CO}_2$ 气爆实验

利用自主研制的超临界 $\text{CO}_2$ 气爆系统进行了气爆实验.超临界 $\text{CO}_2$ 气爆发生装置包括: $\text{CO}_2$ 储气釜和液态 $\text{CO}_2$ 瓶等组成的储气系统;增压泵和动力气源构成的压力伺服系统;传感器和计算机等组成的数字采集系统.经过注气、增压、控温等步骤使 $\text{CO}_2$ 达到预定的超临界状态,控制高速爆破阀门开启实现超临界 $\text{CO}_2$ 气爆.煤体非均质性突出,随机的天然裂隙影响煤体破坏,如图1a所示,气爆后煤体沿随机的原生裂隙破坏.为便于多试件不同气爆参数重复实验的比较,消除煤体非均质性对爆破实验的影响,实验采用粒径0.5 mm以下的石英砂为骨料配制的素混凝土作为煤体材料,素混凝土与煤都为抗压强度大于抗拉强度的脆性材料,通过不同配比实验,使其拉压物理力学性质与煤体一致,制成 $\Phi 85\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的圆柱试件,养护后沿试件轴心钻取 $\Phi 16\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 爆破孔,以便将含有直径4 mm喷嘴的气爆头插入.超临界 $\text{CO}_2$ (8 MPa, 35 $^{\circ}\text{C}$ )气爆后混凝土试件外观和孔内破坏形貌如图1所示.

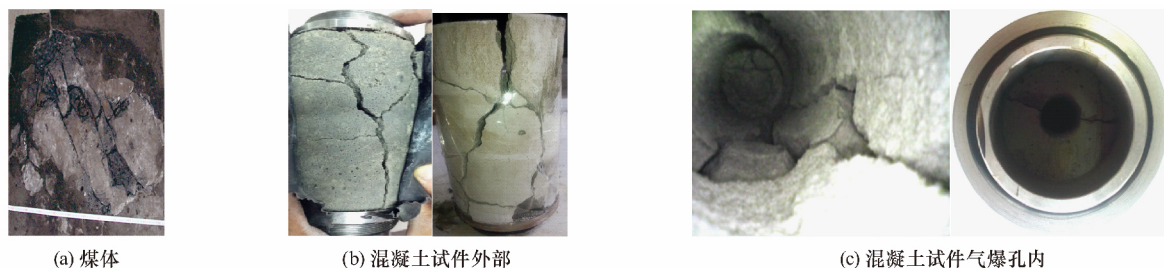


图1 爆后试件破坏形貌

Fig. 1 Specimen damage morphology after explosion

分析实验可得:压力釜中的 $\text{CO}_2$ 达到预定温压条件后,随着爆破阀门的开启, $\text{CO}_2$ 从爆破口瞬间冲出,在气体膨胀驱动作用下冲击试件内壁,致使试件破坏.气爆后的试件内部裂隙交错密集,呈现粉碎性破坏,试件表面有多条交叉裂隙,随着气爆压力的增大,裂纹数目越多,试件破

坏越严重.

为确定数值模拟中超临界 $\text{CO}_2$ 气爆参数,在气爆头的气体喷嘴方向安装压力传感器,连接数字采集系统,进行爆破压力测试实验,得到压力釜和气爆头不同喷嘴的平均压力时程曲线,如图2所示.

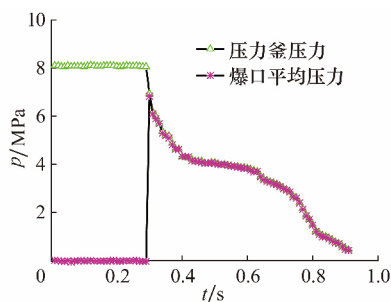


图2 气爆压力时程曲线

Fig. 2 Pressure history curves of gas explosion

由气爆压力时程曲线可得:压力釜中 CO<sub>2</sub> 在 8 MPa, 35 °C 爆破时,冲击压力可达 6.8 MPa,超过试件的抗压强度 4.2 MPa. 数值模拟中采用 JWL 状态方程确定超临界 CO<sub>2</sub> 气爆过程中爆轰产物的压力变化,其表达式为

$$p = A_1 \left( 1 - \frac{\omega \rho_1}{R_1 \rho_0} \right) e^{-R_1 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + B_1 \left( 1 - \frac{\omega \rho_1}{R_2 \rho_0} \right) e^{-R_2 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + \omega E_m \rho_1, \quad (1)$$

式中:  $p$  为爆轰产物的压力, Pa;  $\rho_0$  为气体初始密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_1$  为变化后的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_0/\rho_1$  为相对体积;  $E_m$  为初始比内能, Pa;  $A_1, B_1, R_1, R_2$  和  $\omega$  为材料常数.

通过图 2 中的爆破压力时程曲线对 JWL 状态方程的参数进行反演,得到参数  $A_1$  取 508.7 MPa,  $B_1$  取 0.527 MPa,  $R_1, R_2, \omega$  分别取 5.2, 1.3, 0.5;  $\rho_0$  取 500 kg/m<sup>3</sup>,  $E_m$  取 0.5 GPa.

## 2 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体的模型

### 2.1 爆轰波守恒方程

超临界 CO<sub>2</sub> 气爆瞬间产生的爆轰波满足质量、动量和能量守恒,方程分别为

$$\rho_m D_c = \rho_c (D_c - v_c), \quad (2)$$

$$p_c = \rho_m D_c v_c, \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} p_c \left( \frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_c} \right), \quad (4)$$

式中:  $\rho_m$  为煤的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_c$  为冲击波阵面上煤的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p_c$  为冲击波阵面的压力峰值, Pa;  $D_c$  为冲击波在煤体内的传播速度, m/s;  $v_c$  为冲击波阵面上质点速度, m/s;  $\Delta E$  为单位质量煤体内能的变化, J.

### 2.2 煤体强度模型

考虑到气爆致裂煤体是涉及大应变和高应变率的动态过程,煤体材料采用 Johnson-Cook 模型<sup>[22]</sup>,其屈服应力为

$$\sigma_{JC} = [A + B \epsilon_p^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*] [1 - T^{*m}], \quad (5)$$

式中:  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ;  $\epsilon_p$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}_p^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  为无量纲塑性应变率,  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ;  $n$  为材料硬化指数;  $T$  为材料瞬时温度, K;  $T_r$  为环境温度, K;  $T_m$  为材料融化温度, K; 由于气爆过程是小幅度降温过程,取  $T = T_r$ , 即  $T^* = 0$ ;  $A, B, C, n, m$  均为常数.

根据超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验结果,煤体的断裂损伤过程可分为 2 个阶段: 1) 应力波作用下的断裂损伤阶段,爆孔近区的煤体在冲击作用下产生强烈的压缩破坏并形成密集交叉的宏观裂隙,表现为强脆性,应采用动态抗压强度作为破坏准则和脆性损伤断裂准则; 2) 爆生气体的准静态作用阶段,在爆生气体驱动和劈裂作用下,裂隙再次发育和扩展,可以采用断裂力学中的应力强度因子  $K_I$  作为裂隙扩展准则.

$$K_I = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{p}{\sqrt{a^2 - r^2}} dr, \quad (6)$$

式中:  $a$  为裂纹的初始半径, m;  $r$  为裂隙距离爆孔中心距离, m. 裂隙稳态扩展条件为  $K_I = K_{IC}$ , 其中  $K_{IC}$  为断裂韧性, Pa · m<sup>1/2</sup>.

中远区的裂隙扩展可采用准脆性材料的微裂隙扩展条件

$$\sigma = \sigma_c = \sqrt{\frac{\pi}{4a}} K_{IC}, \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  为煤体中的应力, Pa;  $\sigma_c$  为裂纹扩展的临界应力, Pa.

### 2.3 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体计算模型

超临界 CO<sub>2</sub> 气爆是一个高度非线性的动力学过程,采用 AUTODYN 软件进行模拟计算,考虑到爆破过程中 CO<sub>2</sub> 的运移膨胀对介质的劈裂作用不可忽略,选用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体进行数值模拟, SPH 方法是一种无网格方法,是将连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述,各个物质点承载质量、速度等各种物理量,通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道,求得整个系统的力学行为,在大变形中无网格的缠绕问题,能够有效地追踪材料的历史变形行为.

实验测得海州矿煤体的物理力学参数:  $E, G, K$  分别为煤体的弹性模量、剪切模量、体积模量,取值分别为 3.20, 1.28, 2.10 GPa;  $\sigma_t, \sigma_c$  为煤体的抗拉强度与抗压强度,取值分别为 0.52, 4.57 MPa;  $\rho$  为煤体的密度,取值为 1 200 kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$  为煤体的泊松比,取值为 0.25. 超临界



CO<sub>2</sub> 用 JWL 状态方程描述,使用实验反演得到的参数以保证模拟和实验过程中气体压力变化规律的一致。

选用煤体尺寸 10 m×10 m×2 m,分别对爆孔直径 40 mm,70 mm 的单孔模型进行计算,设置无限边界条件,采用 SPH 计算方法,模型中粒子尺寸  $h=5$  mm,粒子相互接触类型为硬接触以满足质量、动量和能量守恒,材料强度按式(5)计算。为分析距爆破孔不同距离处煤体质点运动速度及所受压力大小,在煤体上同一方向距离爆孔分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m 处标记 4 个点,进行追踪。离散模型如图 3 所示。

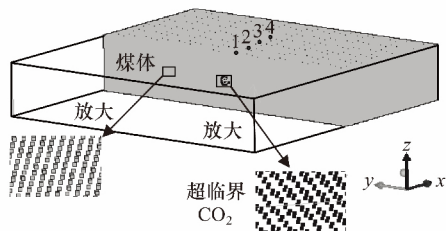


图 3 气爆离散模型

Fig. 3 Discrete model of gas blasting

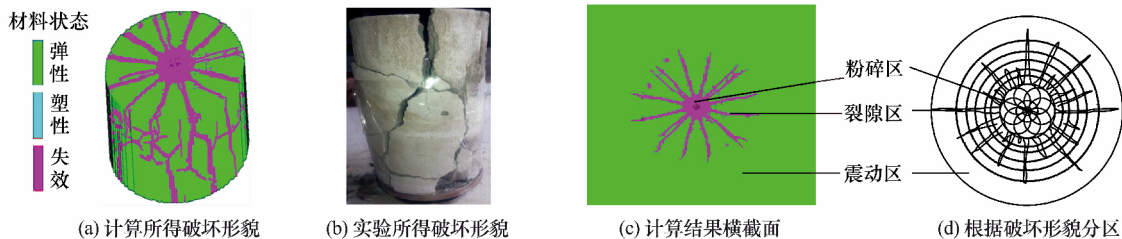


图 4 破坏形貌对比

Fig. 4 Damage morphology comparison chart

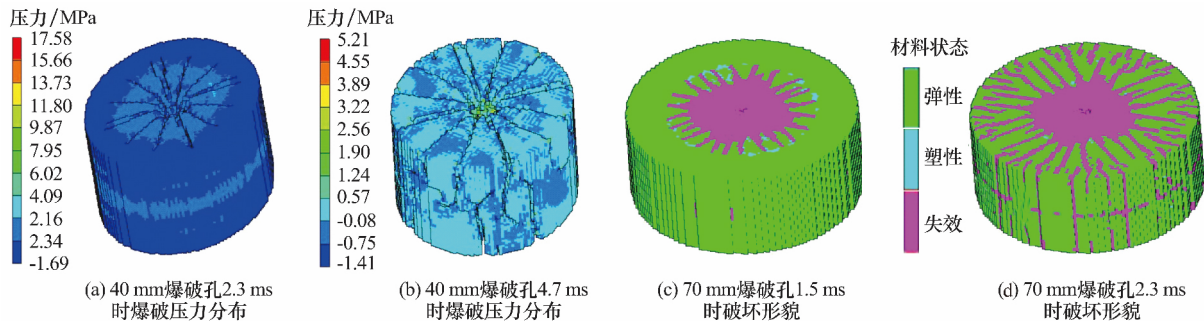


图 5 不同时刻爆破压力云图和破坏形貌

Fig. 5 Burst pressure cloud and damage morphology at different moments

分析气爆过程可得,在爆破初期,超临界 CO<sub>2</sub> 膨胀冲击爆孔周围煤体,由于冲击压力远大于煤体抗压强度,使得爆孔附近的煤体产生粉碎性破坏,随着应力波的传播和 CO<sub>2</sub> 气体运移,使得压碎区周围的裂隙发育和扩展,最终形成裂隙区。

为便于对比爆破范围,截取不同爆破条件气爆后的平面图,如图 6 所示。

### 3 结果分析

爆孔直径 40 mm 的煤体气爆后,取爆孔周围形貌图与超临界 CO<sub>2</sub> (8.0 MPa, 35 °C) 气爆实验结果对比,如图 4a, b 所示,截取爆破孔横截面的破坏形貌并划分破坏区域,如图 4c, d 所示。

对比图 4a, b 可得,模拟与实验结果的裂隙形貌一致,产生了多条交错裂隙,属于裂隙区;气爆实验的孔内窥镜图(图 1c)显示,爆孔周围裂隙密集交叉,介质呈现粉碎性破坏,与模拟结果(图 4c)一致,属于粉碎区。模拟计算和实验结果高度一致,可以相互验证正确性,说明建立的冲击动力学模型和使用反演参数的 JWL 型状态方程模拟超临界 CO<sub>2</sub> 气爆是准确可行的。

通过模拟计算得到了不同时刻的应力云图和破坏形貌,为方便对比分别截取不同直径爆孔周围 4 m 的范围,如图 5 所示。

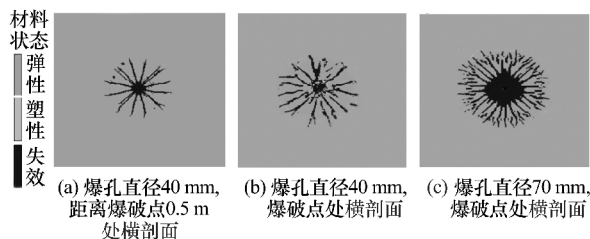


图 6 单孔气爆煤体裂纹分布

Fig. 6 Crack distribution of coal with one blasthole

由图 6 可得,爆孔直径 40 mm 时,在垂直于爆孔爆破点所在的截面内,裂隙扩展范围为直径 4.6 m 的圆,在爆孔方向距离爆破点 0.5 m 处的截面显示气爆裂纹扩展范围直径是 4.1 m,在平行于爆孔的截面内裂隙扩展范围近似椭圆,爆破孔方向是椭圆的长轴方向.爆孔直径越大,超临界 CO<sub>2</sub> 的量越大,冲击压力和作用时间都增长,爆破范围和裂纹发育程度都有所增加,如图 6c 所示,裂隙范围直径达到 5.7 m,裂纹条数明显增多.

追踪并提取煤体上不同标记点的速度,得到标记点的速度曲线,如图 7 所示.

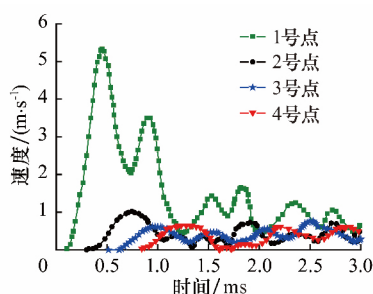


图 7 标记点的速度时程曲线

Fig. 7 Velocity-time curves of marked points

由图 7 可得,标记点的起振时间与其位置到爆孔的距离线性相关,因为标记点的振动是由应力波作用引起的,由标记点起振时间差和距离算得应力波传播速度约为 2 100 m/s;标记点第一个速度波峰为曲线的最大值,随着时间的增加,速度波峰逐步减小并趋于零;距离爆孔距离越远,速度峰值越小,原因是二氧化碳冲击煤壁形成的应力波从爆孔开始逐步向外传播,随着传播距离越远,能量越低,使得质点振动的速度峰值减小.

从图 7 中可以看出,在 1.0 ms 之前,  $v_1 > v_2 > v_3 > v_4$  ( $v_i$  为  $i$  号标记点的速度),说明在标记点之间的煤在气爆初期是径向受压的,1,2 号标记点之间的煤受压严重,超过煤体的动态抗压强度,结合图 5 可得,爆孔周围的粉碎性破坏是压缩破坏.在 1.0 ms 之后标记各点在衰减的应力波和爆生气体的气楔作用下速度大小出现交叉波动,即各点之间有拉压交替应力,结合模拟结果和煤体材料抗压不抗拉的特性分析得出:拉应力是裂隙进一步发育和扩展的原因.

#### 4 结 论

1) 建立了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体的冲击动力学模型,反演实验爆破压力曲线得到了 JWJ 状态方程参数,并用 SPH 方法模拟超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体,其结果与实验结果一致,验证了所建

冲击动力学模型和计算方法的合理性和正确性.

2) 得到了气爆过程中爆破压力和破坏形貌的变化规律,以及不同时刻煤体的主要破坏形式,根据破坏形貌不同,煤体破坏区域可以分为粉碎区和裂隙区.

3) 揭示了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体过程中粉碎区和裂隙区的形成机理.超临界 CO<sub>2</sub> 冲击煤壁将爆孔附近的介质压碎形成粉碎区,并使压碎区周围产生裂隙,随着时间的推移,二氧化碳气体运移至裂隙内形成气楔,其劈裂作用使得裂隙二次发育和扩展形成裂隙区.

4) 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆压力增大,粉碎区和裂隙区范围都扩大,裂隙发育更充分.

#### 参考文献:

- [1] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15-24.  
ZHOU Shining. Mechanism of gas flow in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15-24.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [3] 翟成, 林柏泉, 王力. 我国煤矿井下煤层气抽采利用现状及问题[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 23-26.  
ZHAI Cheng, LIN Boquan, WANG Li. Status and problems of drainage and utilization of downhole coal-bed methane in coal mines in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 23-26.
- [4] 梁冰, 袁欣鹏, 孙维吉. 本煤层顺层瓦斯抽采渗流耦合模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 208-213.  
LIANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji. Seepage coupling model of in-seam gas extraction and its applications [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 208-213.
- [5] 付江伟. 井下水力压裂煤层应力场与瓦斯流场模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013: 16-19.
- [6] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1101-1108.  
XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei, et al. On theoretical and modeling approach to mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7):

- 1101-1108.
- [7] 岳立新,孙可明,郝志勇.超临界 CO<sub>2</sub> 提高煤层渗透性的增透规律研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(2):319-324.
- YUE Lixin, SUN Keming, HAO Zhiyong. Study on increased permeability law of coal seam by supercritical CO<sub>2</sub>[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 319-324.
- [8] WANG Wenchao, LI Xianzhong, LIN Baiquan, et al. Pulsating hydraulic fracturing technology in low permeability coal seams[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(4): 681-685.
- [9] 陈 洋.深孔控制预裂爆破增透试验研究[J].矿业安全与环境,2014,41(5):29-32.
- CHEN Yang. Test study on permeability Enhancement by deep-hole controlled pre-splitting blasting [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(5): 29-32.
- [10] 周建伟,王晓蕾,李 云.深孔控制 CO<sub>2</sub> 预裂爆破在煤巷掘进消突中的应用[J].煤炭技术,2014,33(9):30-32.
- ZHOU Jianwei, WANG Xiaolei, LI Yun. Application for CO<sub>2</sub> parameter design of deep-hole controlling presplitting blasting in coalroad driving [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 30-32.
- [11] LIU Jian, LIU Zegong, XUE Junhua, et al. Application of deep borehole blasting on fully mechanized hard top-coal pre-splitting and gas extraction in the special thick seam[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(5): 755-760.
- [12] 邵 鹏,徐 莹,程玉生.高压气体爆破实验系统的研究[J].爆破器材,1997,26(5):6-8.
- SHAO Peng, XU Ying, CHENG Yusheng. Research on the test system of airshooting[J]. Explosive Materials, 1997, 26(5): 6-8.
- [13] 徐 颖.高压气体爆破破煤模型试验研究[J].西安矿业学院学报,1997,17(7):322-325.
- XU Ying. Model test on coal breakage by high pressure airshooting[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1997, 17(7): 322-325.
- [14] 吴锦旗.液态 CO<sub>2</sub> 预裂强化预抽消突技术在突出煤层揭煤过程中的应用[J].煤炭与化工,2015,38(7):105-109.
- WU Jinqi. Liquid CO<sub>2</sub> presplitting reinforcement pre-drainage outburst elimination application in outburst coal seam mining[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(7): 105-109.
- [15] 周西华,门金龙,王鹏辉,等.井下液态 CO<sub>2</sub> 爆破增透工业实验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(9):76-82.
- ZHOU Xihua, MEN Jinlong, WANG Penghui, et al. Industry experimental research on improving permeability by underground liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9): 76-82.
- [16] 赵立朋.煤层液态 CO<sub>2</sub> 深孔爆破增透技术[J].煤矿安全,2013,44(12):76-81.
- ZHAO Lipeng. Technology of liquid carbon dioxide deep hole blasting enhancing permeability in coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(12): 76-81.
- [17] 曾范永.气爆技术提高煤体渗透性规律的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011:27-33.
- [18] 高 坤.高能气体冲击煤体增透技术实验研究及应用[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012:50-60.
- [19] 陈 静.高压空气冲击煤体气体压力分布的模拟研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2009:34-59.
- [20] 李守国.高压空气爆破致裂煤体数值模拟[J].煤矿安全,2013,44(12):163-165.
- LI Shouguo. Numerical simulation of coal fracture caused by high-pressure air blasting [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(12): 163-165.
- [21] 孙可明,辛利伟,张树翠,等.超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律实验研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(7):27-31.
- SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 27-31.
- [22] GORDON R, WILLIAM H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

(责任编辑 王继红)