

文章编号:1001-4888(2019)04-0693-07

## 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂爆生气体压力 沿破裂面变化规律实验研究<sup>\*</sup>

孙可明, 王金彧, 辛利伟

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 为了揭示超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤岩体过程中爆生气体压力沿破裂面的变化规律和不同超临界压力对爆生气体压力分布的影响, 利用自主研发的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统进行爆生气体压力分布测试实验。采用气爆孔周预制弱层的方法, 解决了气爆实验传感器难以捕捉裂纹位置的问题。得到了破裂面爆生气体压力与到气爆孔距离和时间的关系式。实验结果表明: 气爆过程中破裂面任一点处的爆生气体压力随时间衰减曲线, 与气爆孔底爆生气体压力衰减曲线的变化特征相似, 服从负指数曲线变化规律, 随时间增加, 衰减曲线斜率逐渐减小; 破裂面任一时刻爆生气体压力, 满足近气爆孔处气体压力大于远孔位置的气体压力的规律; 随着超临界压力增大, 各监测点爆生气体压力峰值增大, 相邻监测点压力峰值差增大, 监测点达到压力峰值对应时间减小, 相邻监测点达到压力峰值的时间间隔变短。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆; 破裂面; 爆生气体压力

中图分类号: TP235

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-001

### 0 引言

超临界 CO<sub>2</sub> (SC-CO<sub>2</sub>) 气爆技术<sup>[1-8]</sup> 是一种安全、高效的物理爆破技术, 主要利用 CO<sub>2</sub> 气体膨胀做功来破碎煤岩介质, 该技术爆破过程无明火、操作简便。SC-CO<sub>2</sub> 气爆介质对温压条件敏感, 具有近似液体的密度、近似气体的粘度, 能量利用率较高。区别于炸药爆破, SC-CO<sub>2</sub> 气爆过程中 CO<sub>2</sub> 会由超临界态相变为气态, 体积膨胀 500~600 倍, 气爆过程中产生大量爆生气体, 该过程为物理爆破, 除产生的气爆应力波对煤岩等介质致裂作用外, 爆生气体压力对应力波产生的裂纹有劈裂作用, 产生次级裂纹。因此实验测定 SC-CO<sub>2</sub> 气爆过程中爆生气体压力沿裂纹面的变化规律, 对认识气爆机理与提高气爆效率具有重要意义。

由于气爆过程历时极为短暂, 爆破致裂区域裂纹分布具有随机性, 给直接测定气爆过程中爆生气体压力沿破裂面分布规律造成极大的困难。目前人们对气爆过程中爆生气体压力分布了解甚少, 且研究侧重数值模拟爆生气体在煤岩体内的分布规律。徐颖<sup>[9,10]</sup> 等分析了高压气体采煤原理, 推导出高压气体爆破煤压力的理论计算公式。汪开旺<sup>[11]</sup> 通过数值模拟研究了不同高压气体对裂隙产生和扩展的影响规律。陈静<sup>[12]</sup> 应用有限元软件, 建立固-气耦合数学模型, 模拟了不同压力高压气体冲击煤层。鉴于之前研究爆生气体在煤岩体内的分布规律多侧重于数值模拟手段, 本课题组以 SC-CO<sub>2</sub> 作为气爆介质, 借助自主研发的实验装置, 分析气爆过程中爆生气体压力沿破裂面的时空变化规律以及其对岩石开

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51574137), 国家油气科技重大专项(No. 2017ZX05037-001)

通讯作者: 孙可明(1968—), 男, 博士, 教授, 博导。研究领域: 主要从事多场耦合渗流理论及应用。Email: sskmm11@163.com

裂过程的影响, 所得结论可为优化爆破方案提供理论依据。

## 1 SC-CO<sub>2</sub> 爆生气体压力测定实验

### 1.1 实验系统与实验试件

自主研发的 SC-CO<sub>2</sub> 气爆实验装置, 以 DHS-400-2000KN 型微机控制电液伺服三轴加载室作为加载平台, 如图 1 所示。使用高速采集卡实时采集预埋压力传感器数据, 测试 35℃ (大于 CO<sub>2</sub> 超临界温度) 时混凝土试件在不同 SC-CO<sub>2</sub> 压力条件下的气爆作用致裂规律, 监测气爆过程中各监测点的爆生气体压力变化。

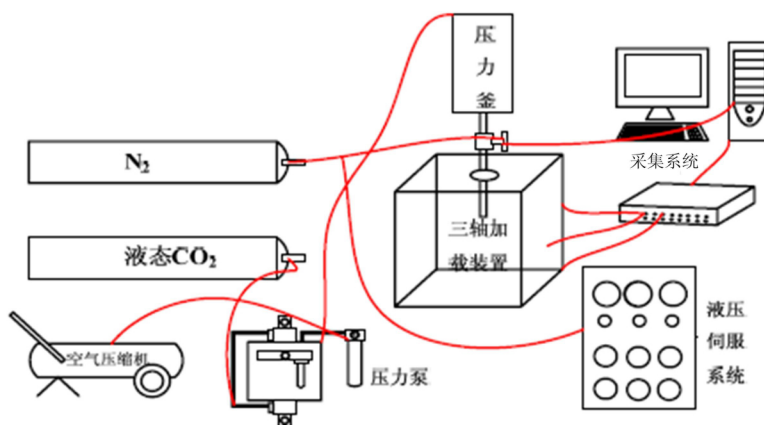


图 1 SC-CO<sub>2</sub> 气爆实验系统

Fig.1 SC-CO<sub>2</sub> gas explosion test system

实验选用粒径小于 0.5mm 的石英砂, 按照体积比为 6 : 1 的配比方式与水泥混合, 并加入适量水搅拌均匀, 浇筑于边长为 0.4m 的立方体模具中。为保证压力传感器能捕捉到爆生气体压力沿破裂面的变化信息, 浇筑过程中在距离底面 0.15m 位置处, 利用细沙预先铺设一个以爆孔中心为圆心直径为 0.1m 的弱层。由于裂纹扩展与 SC-CO<sub>2</sub> 膨胀气爆几乎同时发生, 裂纹扩展迟滞时间非常小, 实验过程中忽略膨胀过程的特征时间, 仅通过直接测得的破裂面处爆生气体压力, 得到压力时空分布规律。制作与气爆试件相同配比材料的边长为 0.1m 的立方体试件, 在相同条件下养护 21 天, 测得其强度、弹性模量等物理力学参数见表 1。当大于试件抗压强度时, 试件发生压破坏; 当小于试件抗压强度大于材料抗拉强度时, 试件发生拉破坏。为避免实验过程中的系统误差, 采用单变量法测试具有同样物理力学参数的试件, 测试其不同 SC-CO<sub>2</sub> 临界压力下沿破裂面的爆生气体压力变化规律, 且实验中将试件分为三组, 每组 4 块试件, 共 12 块试件, 避免了实验过程中的偶然误差。以三种不同超临界压力对试件进行爆破, 第一组试件控制超临界压力  $p_0=20\text{MPa}$ , 第二组试件  $p_0=25\text{MPa}$ , 第三组试件  $p_0=30\text{MPa}$ , 实验中部分试件如图 2 所示。

表 1 试件物理力学参数

Tab.1 Physical mechanics parameters of specimen

弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
5.2	0.27	4.32	0.45

### 1.2 实验步骤

(1) 使用吊车将试件放入三轴加载室, 依据图 3 所示位置钻取直径为 16mm 的钻孔, 钻孔深度均为 0.25m, 其中 1# 监测点为气爆孔, 2# 监测点距离气爆孔 0.09m, 3# 监测点距离气爆孔 0.135m, 4# 监测点距离气爆孔 0.18m。

(2) 清理钻孔以免阻塞压力传感器, 将传感器与气爆头插入钻孔到预定深度, 连接传感器与采集卡并开机检查, 设置采集卡采集频率 (本次实验采集频率为 10000Hz), 封孔。

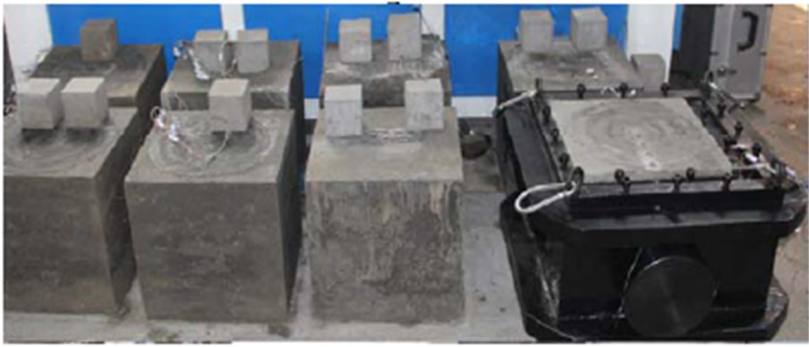


图 2 SC-CO<sub>2</sub> 气爆试件

Fig. 2 SC-CO<sub>2</sub> gas explosion specimens

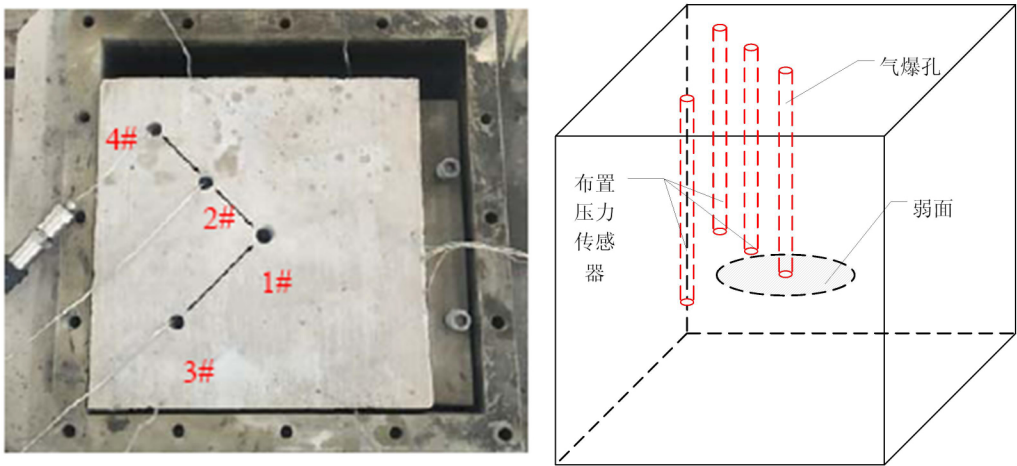


图 3 压力传感器布置图

Fig. 3 Pressure sensor layout

- (3) 利用 CO<sub>2</sub> 将气路中的空气冲出,关闭气爆阀门后向容积为 3L 的压力釜中注入液态 CO<sub>2</sub>,升温至预定超临界温压条件。
- (4) 清零后开始采集,启动爆破。
- (5) 爆破结束,停止采集并记录气爆后相关信息。

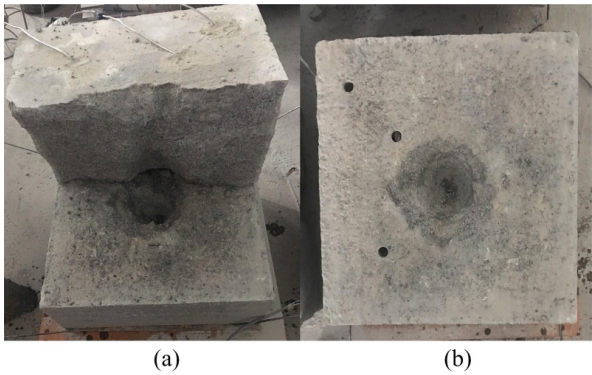


图 4  $p_0 = 20\text{MPa}$  时试件破碎形貌图

Fig. 4  $p_0 = 20\text{MPa}$ , fracture morphology of the specimen

## 2 实验结果分析

实验试件分三组,每组 4 块,经过 SC-CO<sub>2</sub> 气爆作用后,均沿弱层所在平面被劈裂,如图 4 所示。实

验测得三组试件在三种不同 SC-CO<sub>2</sub> 压力下监测点位置爆生气体压力变化数据,不同 SC-CO<sub>2</sub> 压力条件下得到的监测数据变化特征相似,下面主要以  $p_0=20\text{MPa}$  时测得的数据进行分析。

图 5 为  $p_0=20\text{MPa}$  时压力传感器测得的气爆过程中破裂面上不同监测点处爆生气体压力时程变化曲线。监测到爆生气体压力峰值分别为  $P_{1\max}=19.9\text{MPa}$ ,  $P_{2\max}=12.7\text{MPa}$ ,  $P_{3\max}=9.55\text{MPa}$ ,  $P_{4\max}=6.15\text{MPa}$ , 压力峰值逐渐降低,各监测点处气体压力达到峰值后瞬间衰减,衰减曲线斜率逐渐减小,任一时刻下的爆生气体压力满足  $P_1>P_2>P_3>P_4$ , 且  $P_1-P_2>P_2-P_4$ , 随时间增大,监测点间的爆生气体压力差逐渐减小,爆生气体压力衰减时间远大于气体压力峰值持续时间。

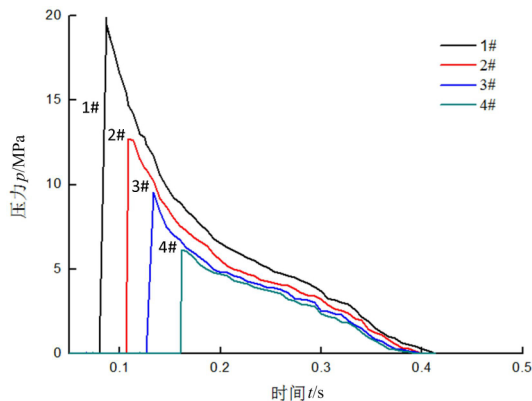


图 5  $p_0=20\text{MPa}$  时各监测点爆生气体压力变化曲线

Fig. 5  $p_0=20\text{MPa}$ , the gas pressure change curve of each monitoring point

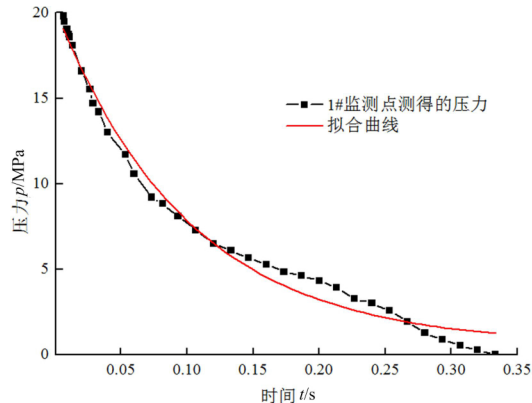


图 6  $p_0=20\text{MPa}$  时 1# 监测点爆生气体压力拟合曲线

Fig. 6  $p_0=20\text{MPa}$ , gas pressure fitting curve of 1# monitoring point

实验试件分三组,每组 4 块,共 12 块,测得所有试件各监测点爆生气体压力衰减均满足负指数形式,该现象与爆炸波在空气和水中的衰减规律相似。这是因为爆生气体气楔作用引起的裂纹扩展和以振动形式传播的爆炸波,在传播过程中均需要将内部能量(压力)转化成其他能量,且随着能量降低,转化速率减慢,能量衰减速率下降。在文中仅给出超临界压力  $p_0=20\text{MPa}$  时 1# 监测点破裂面上爆生气体压力的时程变化曲线,对该数据进行数据拟合,如图 6 所示,1# 监测点测得的压力符合负指数曲线变化规律,插值函数相关系数为 0.9893,关系式为

$$P_1 = ae^{-\hat{t}} \quad (1)$$

式中,  $P_1$  是 20MPa 时 1# 监测点爆生气体压力,MPa;  $a=19.93\text{MPa}$  为监测点处爆生气体压力峰值;  $\hat{t}=t/t_0$ , 其中  $t$  为时间, s;  $t_0=1\text{s}$ ;  $b=10.1$  为无量纲量。

对  $p_0=20\text{MPa}$  时各个监测点监测到的爆生气体压力进行数据拟合,得到爆生气体压力随时间和到气爆孔距离的曲面方程:

$$P = C \times \frac{9.2 - 15.7\hat{r} - 105\hat{r}^2 + 48\hat{t}\hat{r} - 588\hat{t}^3 513\hat{r}^3 1710\hat{t}^4 223\hat{r}^4}{20 + 19780000e^{(-95600000\hat{t}-33\hat{r})}} \quad (2)$$

式中,  $P$  是爆生气体压力,MPa;  $C=p_0=20\text{MPa}$  为超临界压力;  $\hat{t}=t/t_0$ , 其中  $t$  为时间, s;  $t_0=1\text{s}$ ;  $\hat{r}=r/r_0$ , 其中  $r$  是气爆孔与所求位置间的距离, m;  $r_0$  是爆孔直径, m。曲面形状如图 7。

结合图 5 各监测点爆生气体压力变化曲线以及图 7 实验数据拟合结果分析得到:在气爆过程中,裂隙不同位置爆生气体压力变化规律一致,气爆前期在高压爆生气体作用下裂隙扩展速度快,爆生气体压力衰减快;随着裂隙扩展气体压力逐渐降低,致使裂隙扩展速率降低,气体压力衰减速率降低,因此爆生气体压力随时间逐渐衰减,衰减速率逐渐降低。近孔处爆生气体压力高、流速快、气体压力消耗大,随着到气爆孔间距离的增大,爆生气体压力衰减,气体压力降低、流速减慢、压力消耗减小,致使等间距点间爆生气体压力梯度逐渐减小。

图 8 是由实验数据拟合得到的气爆过程中爆生气体压力峰值与到气爆孔距离之间的关系曲线,随着到孔距离的增加,压力峰值逐渐降低,且曲线斜率逐渐减小,符合负指数曲线变化规律,关系式为

$$P_{\max} = Ae^{-B\hat{r}} \quad (3)$$

式中,  $P_{\max}$  是爆生气体压力峰值, MPa;  $A=19.93$  为爆孔处压力峰值, MPa;  $\hat{r}=r/r_0$ , 其中  $r$  是到气爆孔的距离, m;  $r_0$  是爆孔直径, m;  $B=4.09$  为无量纲量。

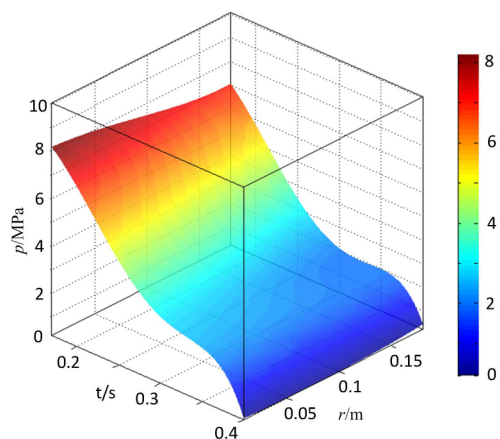


图7 爆生气体压力时空变化曲面图

Fig. 7 Gas pressure spatial-temporal variation curved surface

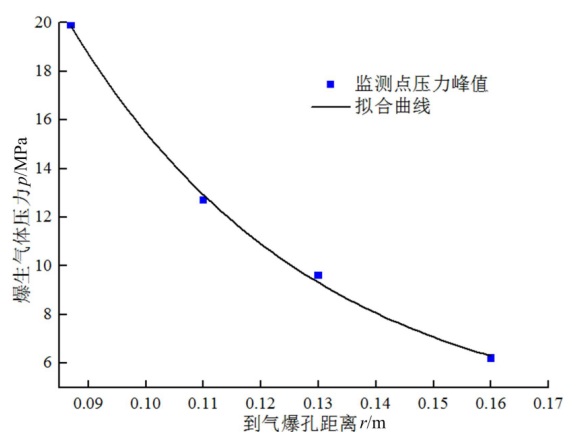


图8 爆生气体压力峰值与到气爆孔距离的关系曲线

Fig. 8 Gas pressure peak with the gas explosion hole distance curve

三种 SC-CO<sub>2</sub> 压力作用下各个监测点监测到的爆生气体压力峰值变化规律如图 9、图 10 所示。

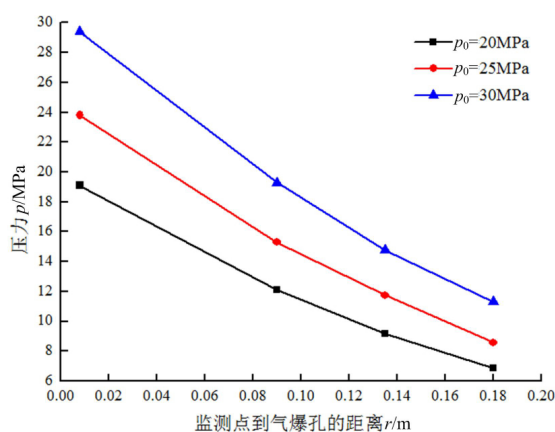


图9 监测点压力峰值变化曲线

Fig. 9 Monitoring points pressure peak curve

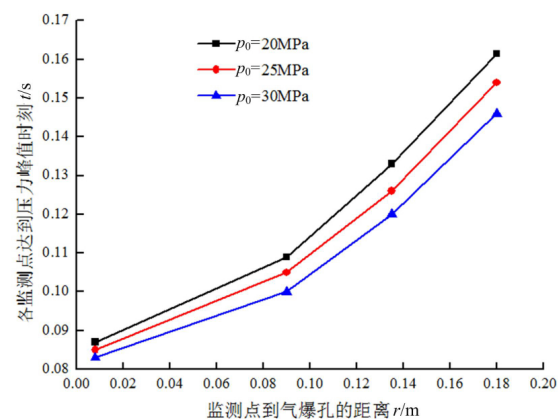


图10 监测点压力峰值对应时刻

Fig. 10 Monitoring points pressure peak corresponds to time

随着 SC-CO<sub>2</sub> 压力增大, 三组实验对应监测点爆生气体压力峰值增大, 相邻监测点压力峰值差增大, 而达到压力峰值时对应的时间变短, 间隔时间减小。就同一条曲线而言, 监测点 1# 与 2# 间的压力峰值平均差, 大于监测点 2# 与 3# 间的压力峰值平均差, 大于监测点 3# 与 4# 间的压力峰值平均差, 而时间差恰恰相反。这是由于 SC-CO<sub>2</sub> 压力增大, 直接导致爆生气体压力变大, 造成裂纹扩展变快, 使爆生气体压力衰减增大。高压力实验组爆生气体压力衰减虽大于低压力实验组, 但同位置处的爆生气体压力始终满足高压力组大于低压力实验组。随着爆生气体压力降低, 气楔作用减弱, 裂纹扩展速率降低, 相较于裂隙快速扩展的气爆前期, 此时压力衰减速度减缓。

### 3 结论

(1) 通过 SC-CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤岩体过程中爆生气体沿破裂面压力分布测试实验, 得到了气爆作用后试件内部破碎形貌, 铺设弱层解决了气爆作用下裂纹扩展的随机性的问题, 成功捕捉到了爆生气体压



力沿破裂面的分布规律。

(2) 气爆过程中, 裂隙内各处的爆生气体压力衰减曲线与气爆孔底爆生气体压力衰减曲线相似, 衰减速率随时间逐渐降低, 服从负指数曲线变化规律; 破裂面任一时刻下爆生气体压力始终满足  $P_{\text{近孔}} > P_{\text{远孔}}$ , 且  $P_1 - P_2 > P_2 - P_4$ , 随时间增大, 监测点间的爆生气体压力的差值逐渐减小。

(3) 随超临界压力增大, 对应监测点爆生气体压力峰值增大, 相邻监测点压力峰值差增大, 但达到压力峰值对应的时间变短, 监测点间的时间差减小。拟合爆生气体压力峰值与到气爆孔距离之间满足负指数曲线变化规律。

#### 参考文献:

- [1] Reimer G M. Reconnaissance techniques for determining soil-gas radon concentrations: an example from prince georges country, Maryland[J]. Geophysical Research Letter, 1990, 17(6):809-812.
- [2] Kristina P, John M S, Farrukh A, et al. Cardox system brings benefits in the mining of large coal[J]. ANON, Coal International. 1995, 243(1):27-28.
- [3] Singh S P. Non-explosive applications of the PCE concept for underground excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3):305-311.
- [4] Kristina P, John M S, Farrukh A, et al. Cardox system brings benefits in the mining of large coal[J]. Coal International, 1995, 243(1):27-28.
- [5] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994, 6(3):72-74 (GUO Zhixing. Liquid carbon dioxide cartridge and site test[J]. Blasting, 1994, 6(3):72-74 (in Chinese))
- [6] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8):26-27 (NIE Zheng. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines[J]. Coal Technology, 2007, 26(8):26-27 (in Chinese))
- [7] 赵海洋. 二氧化碳爆破技术在高速公路施工中的应用[J]. 交通世界, 2016, 390(12):46-47 (ZHAO Haiyang. Application of carbon dioxide blasting technique in expressway construction[J]. Transport World, 2016, 390(12):46-47 (in Chinese))
- [8] 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 (in Chinese))
- [9] 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 Intstitue, 1997, 17(7):322-325 (in Chinese))
- [10] 徐颖, 王家来, 程玉生. 压气爆煤压力的初步探索[J]. 山东矿业学院学报, 1997(2):133-137 (XU Ying, WANG Jialai, CHENG Yusheng. Study of pressur for coal-breaking with compressed air[J]. Journal of Shangdong Mining Intstitue(Natural Science Edition), 1997(2):133-137 (in Chinese))
- [11] 汪开旺. 高压空气爆破致裂效果影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(5):184-186 (WANG Kaiwan. Analysis of factors influencing crack effect by high pressure air blasting[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5):184-186 (in Chinese))
- [12] 陈静. 高压空气冲击煤体气体压力分布数值模拟[D]. 辽宁工程技术大学, 2009 (CHEN Jing. The simulation research on the gas pressure distribution of coal seam by shocking with high-pressure air[D]. Liaoning Technical University, 2009 (in Chinese))

## Experimental study of variation pattern of gas pressure from explosion along fracture surface in supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion

SUN Ke-ming, WANG Jin-yu, XIN Li-wei

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

**Abstract:** In order to reveal the variation pattern of gas explosion pressure along fracture surface and the influence of different supercritical pressure on the distribution of gas explosion pressure in process of supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion, experimental study of pressure distribution of gas pressure from explosion was carried out by using self-developed supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion experimental system. By using the method of prefabricating the weak layer around the gas explosion hole, the problem that the gas explosion experiment sensor is difficult to capture the crack position was solved. The relation among gas pressure on the fracture surface, the distance and time to gas explosion hole was obtained. Experimental results show that the gas pressure-time decay curve at any point of fracture surface is similar to the variation pattern of gas pressure decay curve at the bottom of gas explosion hole during the gas explosion process, and which obeys negative exponential curve; with the increase of time, the slope of decay curve decreases gradually. At any moment, the pressure from explosion on fracture surface is more close to above variation pattern for position near the explosion hole than that from farther position. With the increase of supercritical pressure, the gas pressure peak at each monitoring point increases, the differential value of pressure peak between adjacent monitoring points increases, the time while monitoring point reaches the peak pressure becomes shorter, the time interval that the adjacent monitoring point reaches the pressure peak becomes shorter.

**Keywords:** supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion; surface of fracture; pressure of gas generated after explosion