

## 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理实验研究<sup>\*</sup>

孙可明, 辛利伟, 吴 迪

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为提高超临界 CO<sub>2</sub> 气爆低渗透煤层增透技术的应用水平, 进一步研究超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理, 利用自主研发的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆装置, 在多通道电液伺服相似材料试验台上, 对原煤和混凝土大试件 (1 m×1 m×0.5 m) 进行了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验, 用动态应变仪采集试件内部监测点处的变形和破坏信息, 并用工业窥镜对爆破孔内裂隙分布进行了观测。分析气爆应力波的变化规律和气爆后试件的破坏形貌特征可知, 距离气爆孔由近及远依次分为粉碎区、裂隙区和震动区, 其形成机理为: 超临界 CO<sub>2</sub> 冲击气爆孔周围介质并形成远超介质抗压强度的球面纵波, 介质在径向压应力作用下发生粉碎性破坏, 形成粉碎区; 应力波传播能量逐步衰减, 不足以使介质产生压缩破坏, 然而脆性材料抗压不抗拉, 其产生的环向应力仍然使介质产生径向裂隙, 应力波之后具有准静态加载作用的高压 CO<sub>2</sub> 气体进入裂隙形成气楔, 促使裂隙进一步发育和扩展, 形成裂隙区; 裂隙区以外的介质在低能量应力波的作用下只发生震动, 未发生明显破坏, 即震动区。裂隙的扩展速度与其到气爆孔距离符合“S”形曲线衰减, 裂隙的高速扩展发生在粉碎区, 低速扩展发生在裂隙区; 距离气爆孔越远, 测点的峰值应变越小, 相同距离内节理裂隙等结构面越复杂, 峰值应变减小的幅度越大且应变波形差别越大。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub>; 气爆; 致裂机理; 冲击波

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

为解决煤层渗透率普遍偏低的问题, 已对提高煤层渗透性进行了长期探索和实践<sup>[1-4]</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, 但低渗透煤层的瓦斯抽采率仍偏低。发展安全、高效、环保的低渗透煤层增透技术迫在眉睫, 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆技术是一种安全高效的致裂增透技术。利用 CO<sub>2</sub> 爆破致裂技术提高煤层注水率解决煤矿安全问题的研究已取得显著成效<sup>[5]</sup>, Anon<sup>[6]</sup>介绍了 CO<sub>2</sub> 爆破筒的构成和工作原理等, 并应用于土耳其部分煤矿以提高块煤率。目前中国煤矿应用高压气体爆破煤岩的实验和理论研究较少, 主要集中在爆破增透煤层渗透性、爆破落煤、处理巷道三角区悬顶等方面的实验分析, 煤炭科学研究总院在平顶山进行了 CO<sub>2</sub> 爆破筒地面实验。邵鹏等<sup>[7]</sup>、徐颖<sup>[8]</sup>分析了高压空气爆破采煤原理, 并进行了实验验证。吴锦旗等<sup>[9]</sup>、周西华等<sup>[10]</sup>、赵立朋<sup>[11]</sup>进行了液态 CO<sub>2</sub> 预裂增透的工业性试验, 取得了良好的效果。曾范永<sup>[12]</sup>、高坤<sup>[13]</sup>、陈静<sup>[14]</sup>、李守国<sup>[15]</sup>对高压气体爆破进行了实验和模拟研究, 研究了高压气体冲击煤体前后煤层渗透率的变化规律, 并得到气体压力分布规律。但煤岩在气爆冲击压力作用下的破坏机理依然不清, 超临界 CO<sub>2</sub> 具有近似液体的密度、近似气体的黏度和 100 倍液体的扩散系数等固有属性, 不能把炸药预裂爆破等化学爆破理论直接应用于超临界 CO<sub>2</sub> 气爆这种物理爆破, CO<sub>2</sub> 气爆致裂技术的机理研究落后于实践。孙可明等<sup>[16]</sup>进行了大量超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂煤体实验, 并对超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律进行研究, 增透效果显著, 爆破过程降温明显且不受瓦斯和粉尘影响, 具有广泛的工业应用价值。

研究超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理对控制气爆范围、致裂效果和增透效果等提升超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂技术应用水平有重要应用价值。本文中, 利用自主研发的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆装置, 在多通道电液伺服相似材料试验台上, 对原煤和混凝土大试件 (1 m×1 m×0.5 m) 进行超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验, 用动

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51574137, 51504122)

第一作者: 孙可明 (1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: sskkmm11@163.com。

态应变仪采集试件内部监测点处的变形和破坏信息,并用工业窥镜对爆破孔内裂隙分布进行观测,分析气爆应力波的变化规律和气爆后试件的破坏形貌特征。

## 1 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验

### 1.1 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统

使用 DGS-8-1000KN 多通道微机控制电液伺服多功能相似材料模拟试验系统作为爆破模型的制作和加载平台,自主研发了超临界 CO<sub>2</sub> 爆破发生装置,主要包括:储液系统、增压系统、数字采集控制系统。超临界 CO<sub>2</sub> 爆破发生装置如图 1 所示。使用动态应变仪实时采集预埋应变传感器信号以监测气爆过程中监测点的应变变化信息,反映爆破过程中介质状态改变和受载规律,超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验现场如图 2 所示。

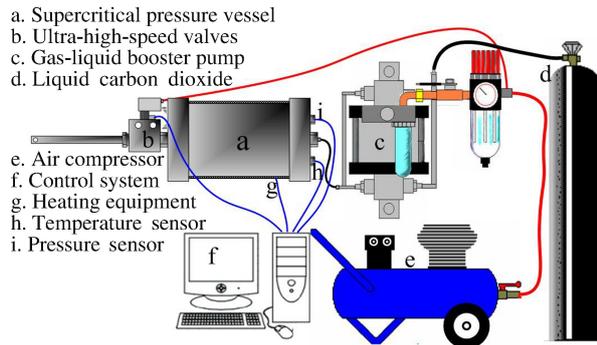


图 1 超临界二氧化碳爆破发生装置

Fig. 1 The blasting generator of supercritical-CO<sub>2</sub>



图 2 爆破实验现场图

Fig. 2 Photo of blasting experiment site

### 1.2 气爆模型的制作

考虑到超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂范围,选用大块原煤制作试件,实验煤样取自阜新海州矿,测得物理力学参数如表 1 所示,其中: $E$  为弹性模量, $\sigma_t$  为抗拉强度, $\sigma_c$  为抗压强度, $\rho$  为密度, $\mu$  为泊松比。由于原煤形状不规则,为便于固定和加载,使用混凝土将煤样浇筑成尺寸为 1 m×1 m×0.5 m 的试件,如图 3 所示。煤体中含有大量节理、裂隙等,其非均质性会导致动态数据的离散,为便于多试件、重复性实验的比较,增加超临界 CO<sub>2</sub> 气爆混凝土大试件的实验。混凝土采用粒径小于 0.5 mm 的石英砂为骨料,按照 6 : 1 的体积比,掺适量水搅拌均匀,在多功能相似模拟试验台上浇筑试件。制作  $\varnothing 50$  mm×100 mm 的物理力学参数测试试件,相同条件下养护 15 天,所得试件的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 试件物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameters of samples

试件	$E/\text{GPa}$	$\sigma_t/\text{MPa}$	$\sigma_c/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu$
原煤	3.2	0.52	4.57	1200	0.25
混凝土	5.2	0.45	4.32	2200	0.27

为监测气爆过程中试件内部材料的受载过程,在模型浇筑过程中预埋多组应变传感器,传感器可测爆孔的环向和径向 2 个正交方向的应变,其响应频率大于 200 kHz,传感器分布和爆破模型尺寸如图 4 所示。原煤试件是在预定位置钻取监测孔,用水泥将传感器封装在孔底以监测煤体内部应变变化,模型周边用槽钢施加固定约束。

### 1.3 实验过程

- (1) 启动微机控制电液伺服系统,锁定多功能相似材料模拟试验台的可动边框。
- (2) 将气爆头插入爆孔预定深度并固定,打开采集控制系统,用 CO<sub>2</sub> 冲洗出气路中的空气。



图 3 混凝土固定的原煤试件

Fig. 3 Coal sample fixed by concrete

(3) 注入液态 CO<sub>2</sub> 并升温至预定温压条件, 调试试动态应变仪并开始采集, 启动爆破。

(4) 爆破后使用高清工业窥镜观察和测量爆孔内部情况, 统计并记录裂隙特征等信息。

为得到气爆时试件受到的冲击压力, 将高频压力传感器固定于  $\varnothing 16$  mm 的钢管, 安装在爆破喷嘴处并启动爆破。考虑到试件的强度和尺寸, 为更好的体现致裂效果, 选用 22 MPa、35 °C 的超临界 CO<sub>2</sub>, 并测得该状态下气爆冲击压力时程曲线, 如图 5 所示。在该爆破条件下超临界 CO<sub>2</sub> 从压力釜到爆破喷嘴的压力损失很小, 试件受到的冲击压力峰值达 19.8 MPa, 远超试件的抗压强度, 且超过试件抗压强度的压力持续时间较长。

## 2 实验结果分析

实验得到了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆后不同试件的裂隙形貌分布, 如图 6 所示。原煤和混凝土试件爆破前后爆破孔内的对比, 如图 7 所示。

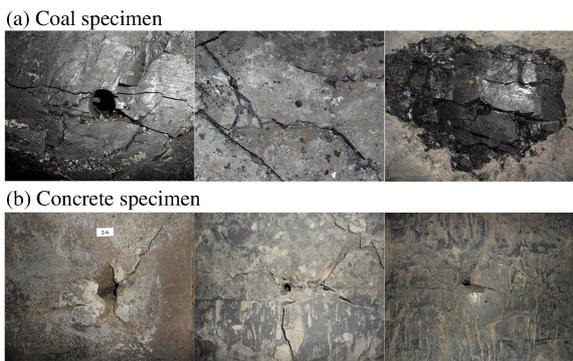


图 6 裂隙形貌分布

Fig. 6 Fracture morphology distribution map

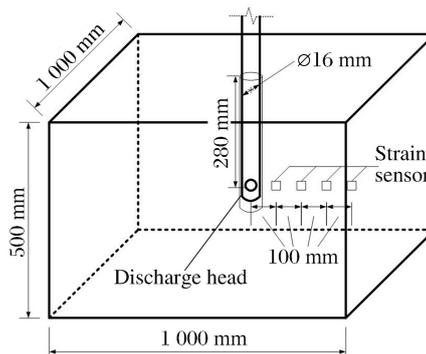


图 4 爆破模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of blasting model

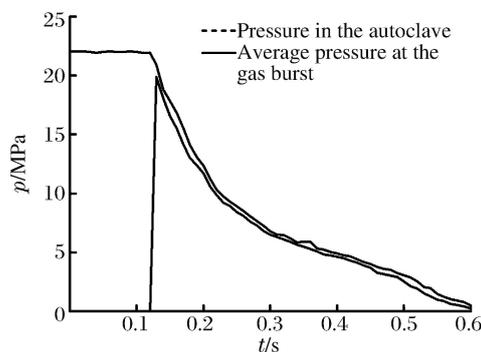


图 5 气爆冲击压力时程曲线

Fig. 5 Pressure history curve of gas explosion

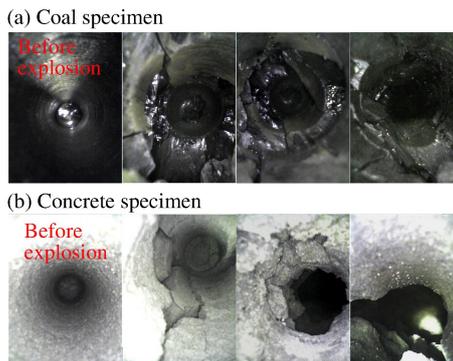


图 7 爆孔内裂隙分布

Fig. 7 Distribution of cracks in blasting holes

由图 6~7 可以看出, 气爆孔及附近的材料发生了严重的破坏, 形成错综复杂的裂隙群, 气爆喷嘴附近的爆破孔直径明显增加, 形成爆破空腔, 由于煤体内存在大量弱面结构, 气爆形成的裂隙群更加密集, 混凝土试件因对 CO<sub>2</sub> 滤失小而泄压缓慢, 相同气爆条件下形成的爆破空腔更大。粉碎区外的介质在气

爆作用下发生开裂破坏,裂隙以爆破点为中心呈放射状分布,即气爆裂隙区,距离气爆孔更远区域的介质没有明显的破坏。

通过处理动态应变信号,得到了气爆过程中试件内监测点的应变变化,部分结果如图 8 所示。对比图 8(a)~(d)发现原煤试件应变波形更为复杂,在同一方向距离爆孔位置不同的监测点应变波形重合度低(如图 8(a)~(b)所示),而混凝土试件中相应监测点的应变变化规律相对一致(如图 8(c)~(d)所示),原因是煤体内存有大量节理裂隙等非连续结构,气爆过程中应力波反射、叠加等作用致使监测点的应变变化复杂,混凝土试件材料相对均质,所以不同位置监测点的波形基本一致。

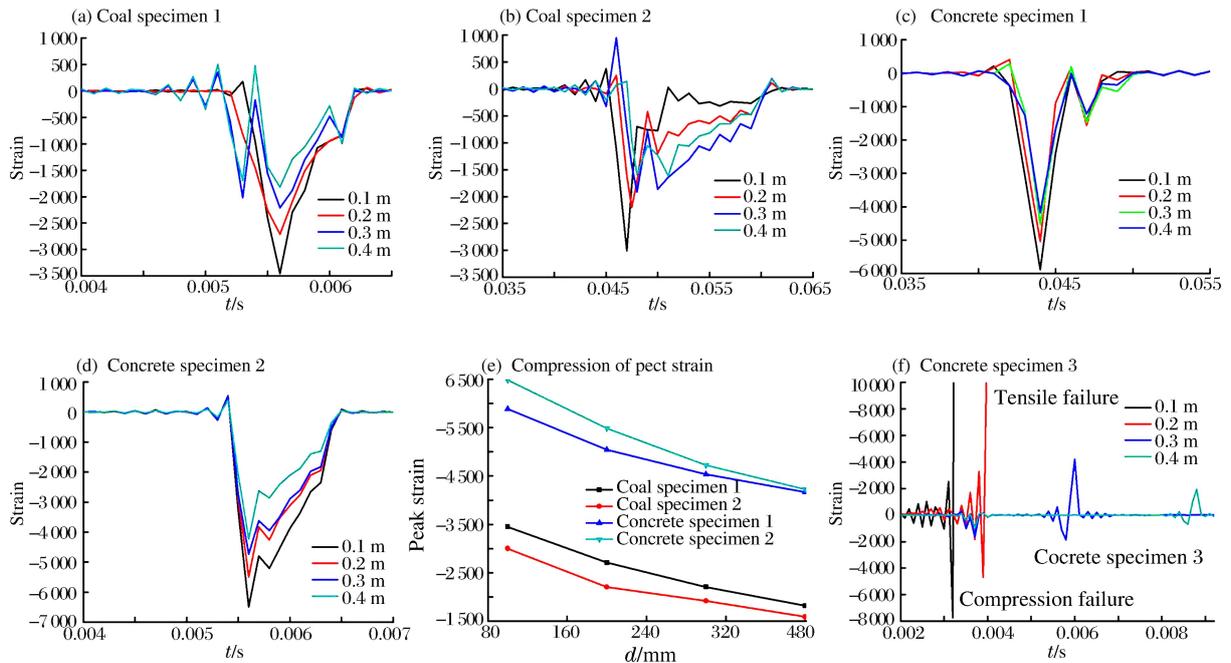


图 8 监测点处的应变变化曲线

Fig. 8 Strain curves of monitored points

提取不同监测点的应变峰值得到应变峰值与距离气爆孔距离的关系曲线(如图 8(e)所示),应变峰值随测点到气爆孔距离的增加而降低,且降低的幅度逐渐减小,这是应力波的能量随传播距离的增加而衰减的结果。混凝土试件相同位置测点的应变峰值高于原煤试件,原因是煤体中存在大量节理裂隙等结构面,气爆时爆孔周围大量裂隙面开裂消耗较多能量,应力波遇到结构面时会发生反射使得能量进一步降低,产生的应变相应减小。

图 8(a)~(d)是裂隙没有穿过监测点时各监测点应变变化时程曲线,可以得出气爆产生的应力波是压缩波,波阵面上的介质是受压的,取波阵面上的微元体,如图 9 所示, $\sigma_r$  为压应力,波阵面上的质点向外振动使得波阵面半径增大,在环向方向产生拉应力,即  $\sigma_\theta$  为拉应力。图 8(f)是气爆混凝土试件产生的裂隙穿过应变监测点时,监测点处的应变时程曲线,可以看出在距离爆孔 0.1 和 0.2 m 处的传感器应变值已经超过  $10^{-2}$ ,实际数据已经到达监测系统断线值并且不再变化,即随着试件的开裂应变传感器已经断开,距离气爆孔 0.1 m 处的传感器数值从  $2.511 \times 10^{-3}$  降到  $-6.718 \times 10^{-3}$  后直接跳跃到  $7.608 \times 10^{-2}$  的断裂值,即气爆时爆孔周围介质在远超其抗压强度的冲击压力(如图 5 所示)作用下,产生应力波并对外传播,波前应力  $\sigma_r$  超过材料抗压强度,使得该测点发生压缩破坏,并形成粉碎区;由图 8(a)~(d)可知,随着应力波的传播其能量迅速衰减,直至波前应力不足以将介质压碎,但煤和混凝土材料的抗拉强度都远小于抗压强度,所以裂隙在  $\sigma_\theta$  的作用下得以继续扩展,直到拉应力小于材料抗拉强度;距离气爆孔 0.3 和 0.4 m 的传感器始终没有断开,都在 0.0037 s 左右出现较大的压应变,对比

图 8(a)~(d)可以得出应力波在 0.002 s 内完全穿过监测区,即 0.0037 s 出现的较大应变是球形波阵面到达产生的;之后分别在 0.006 和 0.009 s 附近出现峰值应变,这时拉应变峰值出现在压应变峰值之后且拉应变峰值大于压应变峰值,该过程是由高压  $\text{CO}_2$  气体进入裂隙作用于裂隙面形成气楔,在裂隙尖端产生垂直于裂隙面的拉应力,促使裂隙的扩展,进而形成裂隙区。

图 8(f)中随着与气爆孔距离的增加,相邻 2 个测点应变峰值的时间差依次增大,说明试件开裂的速度在径向方向随着开裂距离的增加而降低。统计相同爆破条件下(如图 5 所示)不同混凝土试件(如表 1 所示)相同距离处裂隙扩展的速度,得到裂隙扩展的平均速度与到气爆孔距离的关系曲线,如图 10 所示。从图中可以看出,裂纹扩展速度随到气爆孔距离的增加逐步降低,降低的速率先增大后减小,符合 S 曲线变化规律,其形式为:

$$V = V_1 + \frac{V_h - V_l}{1 + e^{(D-D_b)/K}} \quad (1)$$

式中: $V$  为裂纹的扩展速度, $V_h$  为裂纹的最高开裂速度, $V_l$  为裂纹的最低开裂速度, $D$  为裂纹距离气爆孔的距离, $D_b$  为粉碎区和裂隙区交界到气爆孔的距离, $K$  为与材料性质等有关的系数。

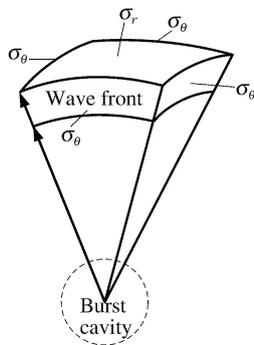


图 9 波阵面上的微元体

Fig. 9 Infinitesimal element of wave front

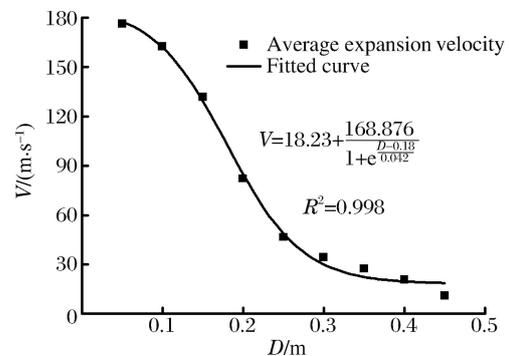


图 10 裂纹扩展速度与到气爆孔距离关系

Fig. 10 Curve of crack propagation velocity and distance to gas explosion hole

气爆孔附近的煤岩是在冲击压力作用下发生的破坏,应力波传播速度快且作用时间短,致使介质开裂的速度大(图 10 中 0.15 m 之前);应力波之后的高压  $\text{CO}_2$  气体作用相对缓慢,使得裂隙的开裂速度大幅降低(图 10 中 0.25 m 之后);距离爆孔 0.15~0.25 m 的区域为介质因受压形成的粉碎区和因受拉形成裂隙区的交界,即冲击波作用为主和气楔劈裂作用为主的过渡区,由于致裂原因的改变致使开裂速度发生突变。由开裂速度与致裂机理和破坏区域的对应关系,根据开裂速度可以判定介质的破坏形式和所属破坏区域,分界速度即  $D = D_b$  时裂纹扩展速度,本文实验测得破坏区域分界速度为 102.63 m/s。

### 3 结论

(1) 通过超临界  $\text{CO}_2$  气爆煤体致裂实验,得到了煤体及其混凝土材料试件气爆后的破坏形貌,由内而外分为粉碎区、裂隙区和未产生明显破坏的震动区。

(2) 气爆孔周围介质在超临界  $\text{CO}_2$  冲击产生远超材料抗压强度的球面纵波作用下发生压缩性破坏,形成空腔或裂隙网,同时消耗大量能量,形成粉碎区;应力波在衰减后不足以产生压缩破坏,但由于脆性材料抗压不抗拉的特性,应力波产生的环向拉应力仍可以使介质产生径向裂隙,应力波过后高压  $\text{CO}_2$  气体进入裂隙形成气楔,促使裂隙在拉应力的作用下进一步发育和扩展,随着能量的消耗扩展速度逐渐下降直至停止,形成裂隙区。

(3) 由于煤体内存在大量节理、裂隙等结构面,气爆冲击产生的应力波在结构面处发生反射和叠加,使得应力波变化复杂;相对于均质材料,应力波在煤体中传播消耗能量更多,对应距离的峰值更小;测点的峰值应变随距离气爆孔距离的增加而减小,煤体结构越复杂,应变峰值随距离增大而降低的速度越快。

(4) 裂隙在径向方向的扩展速度与其到气爆孔距离符合“S”型曲线衰减规律,气爆致裂速度与致裂机理和破坏区域有对应关系,即粉碎区裂隙扩展速度快且破坏形式是压破坏,裂隙区裂隙扩展速度慢且破坏形式是拉破坏,因此根据裂隙的开裂速度可以判定介质的破坏形式和所属破坏区域。

超临界CO<sub>2</sub>气爆压降小、作用时间长、无明火,并且有降温效果,用于煤岩的致裂增透有良好效果,应用前景较大,但煤岩赋存的地质环境一般较为复杂,超临界CO<sub>2</sub>气爆致裂煤体应用于实际工程还需要考虑载荷、煤岩性质等多种影响因素,需要更加全面深入的研究才能实现工业应用。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 付江伟.井下水力压裂煤层应力场与瓦斯流场模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [3] 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.
- [4] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.  
ZHAO Yangsheng, YANG Dong, HU Yaoqing, et al. Study on the effect technology way for mining methane in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2001,26(5):455-458.
- [5] REIMER G M. Reconnaissance techniques for determining soilgas radon concentrations: an example from prince georges country, Maryland[J]. Geophysical Research Letter, 1990,17(6):809-812.
- [6] ANON. Cardox system brings benefits in the mining of large coal[J]. Coal International, 1995,243(1):27-28.
- [7] 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.
- [8] 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 airshoting[J]. Journal of Xi'An Mining Intsttute, 1997,17(7):322-325.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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):1-5.  
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):1-5.

## Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion

SUN Keming, XIN Liwei, WU Di

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

**Abstract:** In this study we carried out a series of experiments on large specimens (1 m×1 m×0.5 m) of coal and concrete using an explosive device and similar material test bench with multi-channel electro hydraulic servo to improve the application of the supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion in the low permeability coal seam and study the fracture mechanism of gas explosion. The internal deformation and failure information were recorded using a dynamic strain gauge, and fractures distribution in the blasting hole were observed using an industrial speculum. The gas explosion stress waves and the damage morphology after blasting show that damage areas from near to far are divided into a crushing zone, a cracking zone and a seismic zone. It is the corresponding formation mechanism that the supercritical CO<sub>2</sub> impacts on the medium surrounding explosion hole, thereby forming the spherical wave, whose compressive strength is higher than that of the medium. Under the action of the radial compressive stress, the medium undergoes crushing destruction, and the crushing zone is thus formed. With the stress wave propagating, progressive attenuation of energy is not strong enough to cause the medium's compression failure. Brittle material is only good at resisting compression, but fails under tension. Circumferential stress generated by the stress waves still cause radial cracks. The high pressure CO<sub>2</sub> gas with quasi-static loading action enters into fracture and forms a gas wedge that leads to the fracture's further development, called the forming of the cracking zone. Outside the cracking zone, the medium only vibrates under the low energy stress wave and no obvious damage occurs, and thus it is called the vibration area. The curve of the crack expansion velocity and distance from the gas explosion hole are in accordance with the "S" curve. High speed crack expansion occurs in the crushing zone, while the low velocity expansion occurs in the cracking zone. The farther away from the explosion hole, the smaller the peak strain of the measuring points, and the more complex the jointed fissure in the structure within the same distance; the greater the magnitude of the peak strain that decreases, the more different the strain waves.

**Keywords:** Supercritical-CO<sub>2</sub>; gas explosion; fracture mechanism; shock wave

(责任编辑 王小飞)