

超临界 CO₂ 气爆致裂规律实验研究*

孙可明 辛利伟 张树翠 李天舒 吴迪

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对我国低渗透性煤层增透困难的现状,研发了可控超临界二氧化碳气爆发生装置,对不同强度的模拟煤体进行了不同温压条件下的超临界 CO₂ 气爆实验。结合孔内窥镜观测和外观测量手段,对爆后宏观裂隙数目和长度等爆破响应信息进行统计分析。结果表明:气爆裂纹起裂所需的最小爆破压力与介质的抗拉强度呈指数式增长的关系,主要是固体材料在动力载荷作用下强度增大引起的;超临界二氧化碳气爆后产生宏观裂隙的数目和累计长度与爆破压力满足 Logistic 函数关系,是裂隙面积超线性增加所消耗能量也超线性增加的结果;超临界 CO₂ 对温压条件敏感,爆破有降温作用,是良好的物理爆破原料,使用超临界二氧化碳作为爆破原料的爆破效果优于空气爆破效果。

关键词: 超临界 CO₂; 气爆技术; 渗透率; 动力特性; 物理模拟

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **doi:** 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.07.005

Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide

SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui, LI Tianshu, WU Di

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

Abstract: To change the current situation that it is difficult to increase the permeability of low permeability coal seam in China, a generating device on controllable gas burst of supercritical carbon dioxide was developed, and the gas burst experiments of supercritical carbon dioxide under different pressure and temperature conditions were conducted on simulated coal mass with different intensity. Combined the hole endoscope observation with appearance measurement means, the statistical analysis was carried out on the burst response information, such as macroscopic crack number and length after the burst. The results showed that the required minimum burst pressure for gas burst crack initiation presents an exponential growth with the tensile strength of media, which is mainly caused by the strength increase of solid material under the action of dynamic load. The number and cumulative length of macroscopic crack after gas burst of supercritical carbon dioxide meet the Logistic functional relationship with burst pressure, which is caused by the ultra-linear increase of energy consumption with the ultra-linear increase of crack area. Supercritical carbon dioxide is sensitive to temperature and pressure and the burst has a cooling effect, so it is a good physical burst material, and the effects of burst using supercritical carbon dioxide as burst material is better than that of air.

Key words: supercritical carbon dioxide; gas burst technology; permeability; dynamic characteristic; physical simulation

0 引言

我国是煤炭资源大国,拥有丰富的煤层气(煤层瓦斯)资源,开发和利用潜力巨大。由于我国煤层普遍透气性较低,渗透率一般在 $(0.001 \sim 1.8) \times 10^{-4}$ D 范

围^[1],瓦斯抽采困难^[2],商业开采面临挑战。我国的煤炭工作者对低透气性高瓦斯煤层进行了长期探索和实践^[3-10]。目前提高煤层渗透性的方法主要有开采保护层、水力压裂、水力割缝、深孔爆破等增透技术。目前常采用的开采保护层多适用于多煤层(组)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的效果不是很理想,对煤层造成二次污染,并且耗水量巨大^[11];深孔爆破等方法虽对煤层增透有一定的效果,但实施过程易发生事故。随着采深的增加,地质情况趋于复杂,加之低渗透、强吸附储层的特点,寻求一种安全、高效的增透技术至关重要。高压气体爆破是一种物理爆破,美国等一些发达国家 20 世纪 60 年代就开始研

收稿日期: 2016-01-06

数字出版日期: 2016-07-07

作者简介: 孙可明,教授。

通讯作者: 辛利伟,博士研究生。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51574137); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51504122)

究,并应用于地面和井下煤仓堵塞的爆破处理^[12],高寒地区储藏物因冻结而发生结块的爆破处理,下水道堵塞的处理等。

我国煤矿应用高压气体爆破煤岩的试验很少,1992年煤炭科学研究总院在平顶山进行气爆的地面试验^[13],效果良好,但尚未进行井下试验。徐颖等利用相似材料进行了高压气体爆破煤机理试验研究^[14],得出气爆破煤主要是由高压气体的膨胀推力作用造成的。曾范永^[15]通过实验方法研究了轴压对煤体气爆效果的影响。史宁^[16]、李守国^[17]研究了爆后的渗透率和抽采流量增大一倍左右。孙可明等^[18]采用理论和数值模拟相结合的方法,对低渗透煤层进行单孔和双孔预裂爆破数值模拟得到裂纹扩展范围和破坏区域的演化规律。一些学者^[19-20]通过数值模拟方法定性的得到高压空气冲击情况下,随着高压空气压力值的不断增加,煤体的破坏和松动范围会增大,靠近爆破孔的部分煤体受到的冲击较大,远离爆破孔的煤体深部影响相对较小。然而相对于低密度空气,超临界CO₂具有似液非液似气非气不同于气液状态流体的性质,拥有近似液体的密度、气体的粘度和100倍的液体扩散系数,且爆破降温作用效果明显,所以超临界CO₂是一种优质气爆介质,具有广泛的应用前景。但目前相关研究较少,且不能把空气爆破和炸药爆破的理论全部直接应用于超临界流体爆破,因此,对超临界CO₂气爆的研究至关重要。

1 超临界CO₂气爆实验

1.1 实验系统及实验模型制作

自主研发可控超临界CO₂气爆发生系统,主要包括:超临界压力釜和液态CO₂瓶构成的储液系统;空气压缩机和CO₂增压泵等构成的增压系统;计算机和传感器等部件构成的数字采集控制系统。超临界CO₂爆破发生系统示意图如图1所示,气爆头有4个直径3mm的气体出口,与气爆头轴线方向相互垂直。

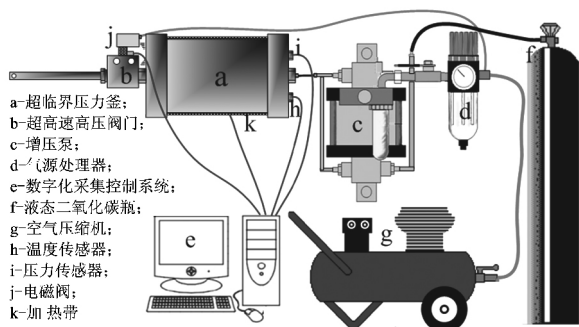


图1 超临界CO₂气爆发生系统

Fig.1 explosion system with supercritical CO₂

为便于多试件、重复性实验的比较,消除煤体非均质性对爆破实验的影响,实验采用粒径在0.5mm以下级配良好的石英砂为骨料配制的素混凝土作为模拟煤体,由于不同煤体的物理力学参数不同,所以实验按照10:3 6:1 5:1不同体积比,掺适量水搅拌均匀,制成φ85mm×150mm的圆柱试件,养护3~28天后钻取φ16mm爆破孔,制成强度不同的试件,部分试件如图2所示。模型制作过程中以相同材料制作φ50mm×100mm的标准试件,以测试混凝土的强度、弹性模量等物理力学参数。



图2 爆破试件

Fig.2 Blasting specimen

1.2 超临界CO₂气爆实验过程

1) 将爆破试件密封装入三轴仪中并施加很小轴压和围压以固定试件,封装后的试件如图3所示。



图3 封装后的试件

Fig.3 Specimen packaged

2) 气爆头送入爆破孔中,并固定三轴仪和超临界CO₂爆破发生器。

3) 启动注气系统,将液态CO₂注入超临界压力釜中并控制温度在预定值。

4) 到达预定温压参数后启动超高速爆破阀门,完成爆破,如图4所示。全部过程有采集系统记录并显示各项参数。

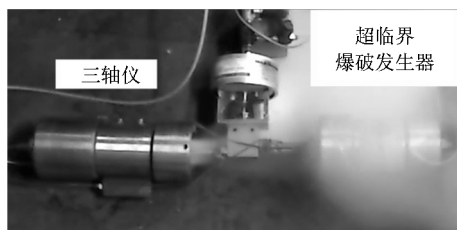
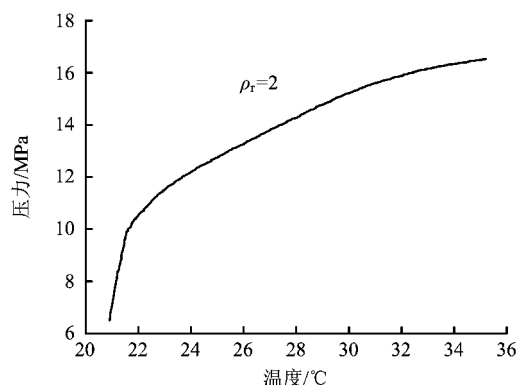


图4 爆破瞬间

Fig. 4 The explosion moment

2 结果分析

将液态 CO_2 注入超临界 CO_2 爆破发生器后, 控制温控装置, 进行升温, 得到压力釜内 CO_2 的压力随温度的变化曲线, 如图 5 所示。图中 ρ_r 为对比密度, 由流体实际密度 ρ 和临界密度 ρ_c 确定, 其关系式为: $\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c}$ 。

图5 CO_2 压力与温度关系曲线Fig. 5 pressure and temperature curve of CO_2

由图 5 可知超临界 CO_2 在临界压力 (7.38 MPa) 附近压力对温度变化敏感; CO_2 达到超临界 (临界温度 31.1 °C) 后压力随温度变化斜率降低, 说明超临界 CO_2 变化单位压力吸收或释放的能量比非超临界的高, 并且温度升高后, 高压 CO_2 的能量密度增加, 在超临界 CO_2 气爆与空气气爆效果对比试验中, 超临界 CO_2 气爆明显优于高压空气爆破; 加之 CO_2 安全易得, 爆破过程降温效果更加显著, 是理想的物理爆破材料。

爆破后通过表面宏观裂纹 (如图 6) 观察和爆破孔内窥镜观测 (如图 7 所示) 对裂纹长度、条数、方向等具体破坏形貌特征进行统计, 结合爆破压力进行分析得到超临界 CO_2 气爆致裂规律。

对爆破后的试件进行表面和爆孔内裂隙特征统计, 得到裂隙条数和裂隙累计长度随爆破压力的关系曲线如图 8 所示 (超临界压力釜温度 35 °C, 试件抗拉强度 0.2 MPa)。

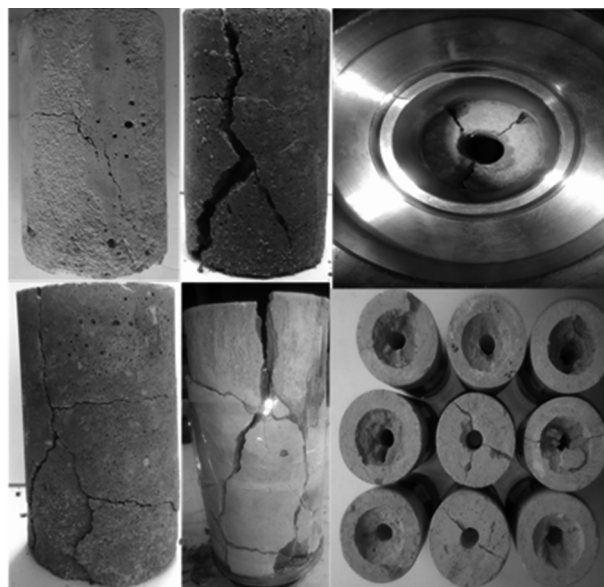


图6 表面裂隙

Fig. 6 Crack figures of surfaces

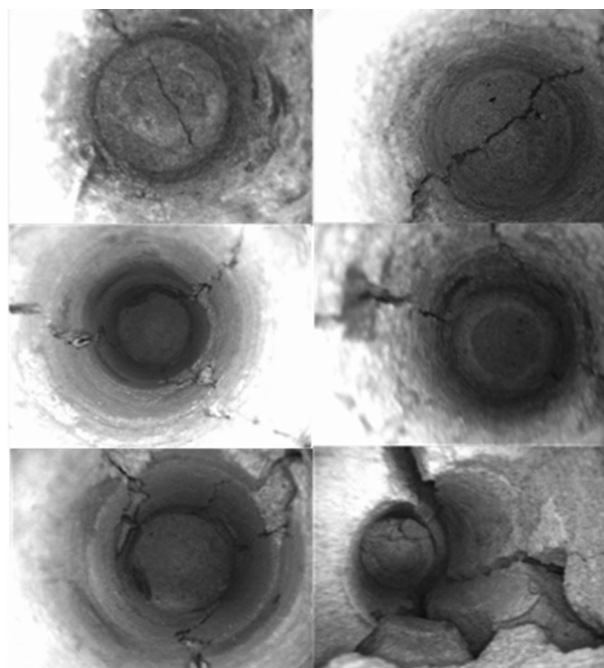


图7 爆破孔内窥镜观测

Fig. 7 Endoscope image of blasthole

其中宏观裂纹条数 N (条)、裂纹累计长度 D (m) 都与爆破压力 P (MPa) 符合 Logistic 型函数, 表达式为:

$$Y = A_1 + A_2 / (1 + \exp(P - P_0)) \quad (1)$$

式中: Y 表示裂隙特征 N 或 D ; P_0 (MPa) 为起裂爆破压力; A_1 、 A_2 是与爆破试件材料参数、爆破气体量和温度等有关的参数。

试件开裂是因为高压 CO_2 冲击爆破孔壁, 冲击压力大于材料的强度, 则试件发生破坏。若冲击压力大于材

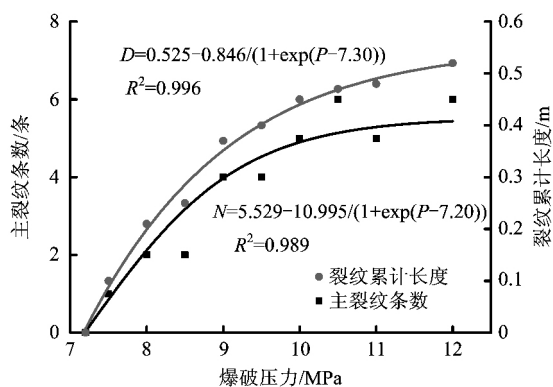


图8 裂隙特征与爆破压力关系曲线

Fig.8 Fracture characteristics and burst pressure curve

料的抗压强度则形成压碎区,消耗部分能量,随着冲击波的传播,能量急剧衰减,作用于试件单位面积上的能量密度下降,不能直接引起压破坏,但仍然可以引起质点足够的径向变形和拉应力,产生径向裂隙;当拉应力衰减到低于材料抗拉强度后,裂隙停止扩展。爆破压力较低时,高压 CO_2 形成的冲击压力过小,形成的拉伸应力小于材料抗拉强度,材料不破坏;随着爆破压力的增大,冲击压力逐步增大,直至恰好有裂纹出现,此时的爆破压力为开裂压力 P_0 ,爆破压力继续增加,冲击压力足以使试件多处发生破坏,则出现多条裂隙,并且裂隙累计长度逐步增加。裂隙数目和长度的增加使得开裂面积超线性增加,消耗能量也超线性增加,使得裂隙数目和累计长度增大的斜率减缓,最终呈现图8所示规律。

通过恒定爆破温度 35°C ,对不同抗拉强度试件的试爆,得到起裂爆破压力与试件的抗拉强度的曲线,如图9所示。

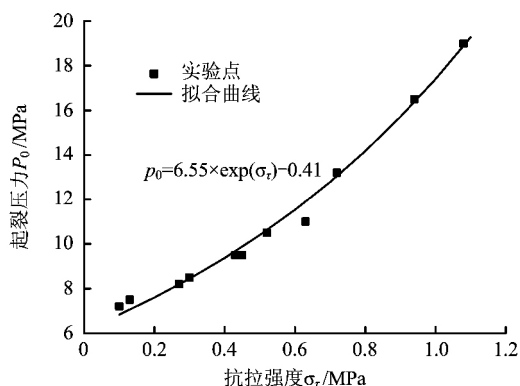


图9 起裂压力与材料抗拉强度关系曲线

Fig.9 Initiation pressure and tensile strength curve

由图9可得试件开裂所需要的最小爆破压力与试件材料抗拉强度成指数式增长的关系。原因是起裂爆破压力作用下产生的冲击压力刚好使试件发生开裂,试

件抗拉强度越大,所需要的开裂压力也就越大;然而固体材料具有强度在快速加载条件下有明显提高的动力特性,在爆破冲击压力的作用过程中,材料的抗拉强度比静态抗拉强度大,所需的爆破压力就进一步增加,呈现为图9所示的曲线斜率随抗拉强度的增大而增大。

3 结论

1) 在相同条件下,起裂爆破压力随材料抗拉强度增加呈指数式增长的关系,主要是固体材料在冲击载荷作用下强度增大的动力特性导致的。

2) 超临界 CO_2 爆破后,裂隙数目和裂隙累计长度都满足形如 $Y = A_1 + A_2 / (1 + \exp(P - P_0))$ 的 Logistic 函数关系,是裂隙条数和长度的增加使裂隙面积超线性增加,开裂消耗的能量也超线性增加的结果。

3) CO_2 的生产和运输安全,非危险管制品,且达到超临界后能量密度增大,粘度降低,是较理想的物理爆破材料。

4) 使用超临界 CO_2 作为气爆材料的爆破效果优于常规气爆,爆破过程无明火并且降温效果明显,不受瓦斯和粉尘限制,所以超临界 CO_2 气爆技术是很好的爆煤增透技术。

参考文献

- [1] 胡千庭,蒋时才,苏文叔.我国煤矿瓦斯灾害防治对策[J].矿业安全与环保,2000,27(1):1-4.
HU Qianting,JIANG Shicai,SU Wenshu. Countermeasures for prevention and control of coal and gas outburst hazard in China's coal mines[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000,27(1):1-4.
- [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] 周军民.水力压裂增透技术在突出煤层中的试验[J].中国煤层气,2009,6(3):34-39.
ZHOU Junmin. Trials on hydrofracturing technology for enhancement of outburst coal seam[J]. China Coalbed Methane, 2009,6(3):34-39.
- [4] 艾灿标,贾献宗,吕涛,等.新义煤矿水力压裂试验与效果分析[J].煤矿开采,2010,15(4):109-117.
AI Canbiao,JIA Xianzong,LYU Tao,et al. Test of hydraulic fracture and its effect analysis in Xinyi colliery[J]. Coalmining Technology, 2010,15(4):109-117.
- [5] 王念红,任培良.单一低透气性煤层水力压裂技术增透效果考察分析[J].煤矿安全,2011,42(2):109-112.
WANG Nianhong,REN Peiliang. A single low permeability coal seam hydraulic fracturing technology antireflection effect investigation and analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2011,42(2):109-112.

- [6] 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.
- [7] 唐巨鹏, 杨森林, 李利萍. 多重水力割缝下煤层气储层卸压数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 33–36.
TANG Jupeng, YANG Senlin, LI Li-ping. Numerical simulation for methane store pressure release in coalbed under mult-hydraulic cutting seam[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(2): 33–36.
- [8] 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.
- [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 CO₂ 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 CO₂ parameter design of deep-hole controlling presplitting blasting in coalroad driving[J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 30–32.
- [11] 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.
- [12] 徐颖, 张笑天. 气体爆破疏通煤仓堵塞技术[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(9): 9–11.
XU Ying, ZHANG Xiaotian. Air blasting technology applied to solve coal bunker jam[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(9): 9–11.
- [13] 徐颖. 高压气体爆破采煤技术的发展及其在我国的应用[J]. 爆破, 1998, 15(1): 67–82.
XU Ying. Development of high-pressure gas blasting mining technology and its application in China[J]. Blasting, 1998, 15(1): 67–82.
- [14] 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J]. 煤矿爆破, 1996(3): 1–4.
XU Ying, CHENG Yusheng. Experimental study on the mechanism model of coal blasting high-pressure gas break[J]. Coal Mine Blasting, 1996(3): 1–4.
- [15] 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.
- [16] 史宁. 高压空气冲击煤体增透技术实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- [17] 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.
LI Shouguo. Key technology and equipment research and development of improving coal seam permeability by high pressure air blasting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 92–95.
- [18] 孙可明, 李云. 低渗煤层预裂爆破裂纹扩展数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(1): 31–37.
SUN Keming, Li Yun. Numerical simulation on crack propagation law of pre-splitting explosion in lowly permeable coal seam[J]. Blasting, 2014, 31(1): 31–37.
- [19] 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.
- [20] 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.