

文章编号: 1673-3363-(2014)03-0494-05

# 瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程中的作用机理研究

褚怀保<sup>1</sup>, 王金星<sup>1</sup>, 杨小林<sup>1,2</sup>, 余永强<sup>1</sup>, 梁为民<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 洛阳理工学院土木工程系, 河南 洛阳 471023)

**摘要** 利用试验结果、数值计算结果和理论分析结果综合分析了瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程中的作用机理。煤体爆破损伤断裂过程包括爆炸应力波作用的初始阶段和爆生气体与瓦斯气体共同作用的后期阶段, 瓦斯气体在整个过程中具有积极作用, 它能增大爆破损伤程度和爆破裂纹扩展速度。在爆炸应力波作用阶段, 瓦斯气体的存在能增大应力波峰值和作用时间, 降低拉伸相内应力波衰减速度; 在爆生气体作用阶段, 瓦斯气体参与爆生气体驱动裂纹扩展, 随后瓦斯压力场与爆生气体准静态应力场叠加促进爆生气体驱动裂纹的进一步扩展。

**关键词** 瓦斯气体; 煤体爆破; 损伤断裂; 作用机理

**中图分类号** TD 235

**文献标志码** A

## Action mechanism of methane gas in the process of coal blasting damage and fracture

CHU Huaibao<sup>1</sup>, WANG Jinxing<sup>1</sup>, YANG Xiaolin<sup>1,2</sup>, YU Yongqiang<sup>1</sup>, LIANG Weimin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

**Abstract** In this paper, the action mechanism of methane gas in the process of coal blasting damage and fracture were analyzed comprehensively based on the experiment, numerical simulation, and theoretical analysis results. The process of coal blasting damage and fracture includes the initial stage acted by blasting wave and the later stage acted by detonation gas and methane gas. The methane gas has positive role in the whole process, which can increase the blasting damage degree and the crack propagation velocity. In the initial stage, the methane gas can increase the stress wave peak, extend the action time and reduce the decay rate of stress in the tensile phrase. In the later stage, the methane gas takes part in the crack propagation process driven by detonation gas, and the crack propagation will further promote under the superposition action of methane gas pressure field and detonation gas quasi-static stress field.

**Key words** methane gas; coal blasting; damage and fracture; action mechanism

含瓦斯煤体是一种复杂的力学介质, 由具有不规则、复杂的原生孔隙和新生裂隙的煤体骨架与瓦

斯等固-气两相组成, 瓦斯以游离态和物理吸附状态赋存于煤体中的孔隙和裂隙中, 并在其中运移。瓦

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874039); 河南理工大学博士基金项目

作者简介: 褚怀保(1978-), 男, 河南省南阳市人, 博士, 副教授, 从事爆炸理论及应用和矿井建设方面的研究。

E-mail: chuhuaibao@hpu.edu.cn

Tel: 0391-3987658

斯压力的存在会对煤体产生力学作用和非力学作用<sup>[1-2]</sup>,煤体的实际强度和弹性模量随着瓦斯压力的增加而降低,煤体的脆性度随瓦斯压力的增加而明显增加,且煤体吸附瓦斯气体后发生体积膨胀变形。煤体中的爆破是在煤与瓦斯固流耦合介质中进行的,瓦斯压力在裂隙产生与扩展的整个过程中都起着重要作用<sup>[3-6]</sup>,这一观点已得到业界的普遍认可。但是到目前为止,针对煤体爆破瓦斯气体的作用研究都停留在简单的理论分析上<sup>[7-8]</sup>,并未见有深入系统的研究工作。本文拟从理论、试验和数值计算 3 个方面对瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程中的作用机理进行综合分析。

1 模拟煤体爆破试验

设计模拟煤体爆破试验,试验中对模拟煤体中爆炸应力波、超声波波速和裂纹扩展速度进行测试,利用试验结果分析瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程中的作用。

1.1 试验方法

根据文献[9]的试验结果,本次试验配置了其中的 2 组模拟试块进行模拟煤体内部爆破作用试验,

I 组为 500 mm×500 mm×400 mm 立方块 5 块,II 组为  $\Phi 500$  mm×L400 mm 圆柱体试块 5 块,其中 I 组试块在配比材料中不添加发泡剂,II 组试块中添加发泡剂模拟含瓦斯气体的煤体,以综合对比分析瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程中的作用,试块如图 1 所示。在试块中间预留  $\Phi 16$  mm,孔深 150 mm 的炮孔,装 3.0 g 加入 10%颗粒状石蜡钝化处理的黑索金炸药,以尽量保证试验炸药与工程使用中的炸药接近,提高研究成果的实用性,并采用便于试验参数测试的集中装药方式。

制作 20 mm×20 mm×20 mm 的应变砖预埋于试块中,用 USB8516 采集仪采集爆炸应变波数据, DasView2.0 软件分析;用 NM-4A 型非金属超声波检测仪对试块进行爆破前后超声波波速测试计算损伤值,各测点的比例距离  $\bar{r}$  分别为 5.0, 11.25, 17.5 和 26.25,其中  $\bar{r}=r/r_0$ ,  $r$  为测点距药包中心的距离,  $r_0$  为药包半径;在圆柱形试块药包中心高度处间隔 2 cm 预埋设  $\Phi 0.14$  mm 的漆包铜线作为传感器,用 BSW-3A 型智能五段爆速仪对裂纹扩展速度进行测试,如图 2 所示。



图 1 试块图片 (mm)  
Fig.1 Test block pictures



图 2 测试仪器  
Fig.2 Experimental test instruments

1.2 试验结果

对采集到的有效波形,读取每个测点的径向和切向应变峰值,对于同一组模拟煤体的同一位置测到的应变峰值,取其平均值作为最终的试验数据,各测点爆炸应变波峰值如表 1 所示。

超声波波速测试时,以过炮孔中心的水平线为基准,对各测点进行爆破前后超声波波速测试,取 5 个试块波速测试结果的有效平均值作为最终计算

表 1 爆炸应变峰值				
Table 1 Peak strain of explosion stress wave				
组号	应变值			
	1	2	3	4
I	-8 946	-4 691	-2 554	-875
II	-8 985	-4 714	-2 606	-908
改变量/%	+0.44	+0.49	+2.0	+3.77

损伤值的波速, 根据公式  $D=1-(v/v_0)^2$  ( $v_0$  和  $v$  分别为试块爆破前后的超声波速度) 计算损伤值, 计算结果如表 2 所示。在试块爆破裂纹扩展速度测试中, 考虑到漆包铜线在爆破裂纹扩展时可能存在的滞后性, 在测试结果中舍弃离散性较大的数据(平均差 5%), 最后以同一组试块中测点有效平均值作为试验结果, 如表 3 所示。

表 2 损伤测试结果  
Table 2 Blast damage results

组号	损伤值				
	1	2	3	4	5
I	0.802	0.398	0.285	0.226	0.187
II	0.895	0.409	0.309	0.259	0.223
改变量/%	+11.6	+5.14	+8.42	+14.6	+19.3

表 3 裂纹扩展速度  
Table 3 Crack propagation velocity

组号	裂纹扩展速度/(m·s <sup>-1</sup> )				
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
I	559.5	364.8	296.4	217.6	192.5
II	561.2	373.5	314.4	256.2	233.2
改变量/%	+0.3	+2.4	+6.1	+17.7	+21.1

2 瓦斯气体在煤体爆破损伤断裂过程的作用机理分析

2.1 含瓦斯煤体爆破损伤断裂过程

为便于分析煤体爆破损伤断裂过程和瓦斯气体在此过程中的作用, 利用试验结果作出 2 组试块的应变峰值与损伤变化曲线对比图和应变峰值与裂纹扩展速度变化曲线对比图, 同时, 为了使试块损伤值与裂纹扩展速度和应变峰值在一个数量级上而清晰分析, 在作图时将损伤值扩大 1 000 倍, 裂纹扩展速度扩大 10 倍, 如图 3, 4 所示。

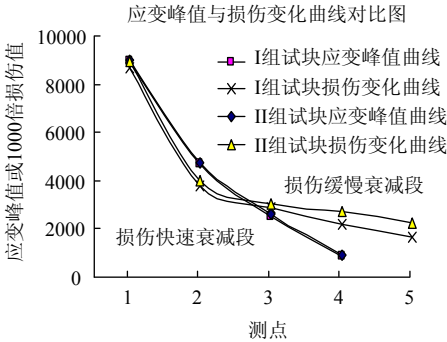


图 3 应变峰值与损伤变化曲线

Fig.3 Blasting stress peak strain and blasting damage curve

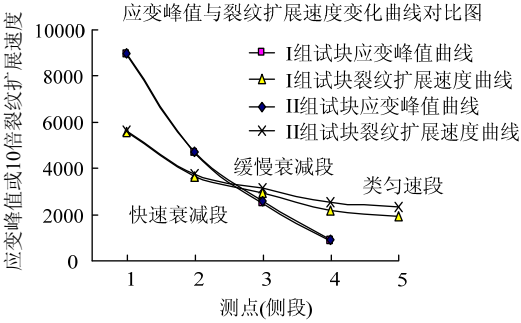


图 4 应变峰值与裂纹扩展速度变化曲线

Fig.4 Blasting stress peak strain and crack propagation velocity curve

从图 3, 4 可看出, 煤体爆破损伤断裂过程基本可以分为 2 个阶段, 即爆炸应力波作用的初始损伤断裂阶段和爆生气体与瓦斯气体共同作用的后期损伤断裂阶段。在爆炸应力波作用的初始阶段, 煤体中的损伤值和裂纹扩展速度迅速衰减; 爆生气体与瓦斯气体共同作用的后期阶段又可细分为爆生气体以驱动的形式促使初始裂纹扩展的阶段和爆生气体准静态应力场与瓦斯气体压力场叠加促使裂纹进一步扩展阶段, 后期阶段煤体中损伤的裂纹扩展速度衰减速度变缓, 尤其是后期阶段损伤和裂纹的扩展速度处于类匀速发展状态。

2.2 瓦斯气体在爆炸应力波作用过程中的作用机理

1) 瓦斯气体对煤体中爆炸应力波的作用试验分析

从表 1 及图 3, 4 可看出, 瓦斯气体的存在可以在一定程度上增大应变峰值, 在爆破近区( $\bar{r}$  为 5.0)应力波峰值增大 0.44%, 在爆破远区( $\bar{r}$  为 26.25)应力波峰值增大 3.77%。总体上来看瓦斯气体的存在对煤体中爆炸应力波峰值的改变量是比较小的, 这主要是由于瓦斯气体荷载与爆炸应力波荷载特性和量值上的较大差异所致。爆炸产生应力波在传播过程中对煤体爆破破坏有 2 种主要作用: 一是激发煤体中原生裂隙扩展或产生少量新生裂隙; 二是打破煤体中瓦斯压力场的平衡状态, 为爆生气体作用创造条件。

2) 瓦斯气体对煤体中爆炸应力波作用数值计算分析

为了直观分析瓦斯气体在煤体中爆炸应力波作用过程中的作用, 根据损伤断裂力学的基本原理建立与试验试块相同的单孔耦合装药计算模型, 用软件 LS-DYNA 进行计算, 采用 ALE 算法。在进行

数值计算时,将瓦斯压力看做面力施加在每个计算单元的6个面上,在模型上显示如图5所示。

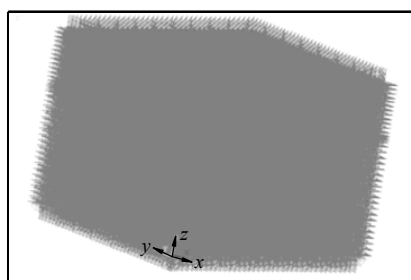
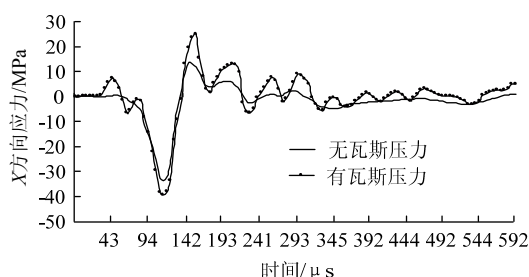


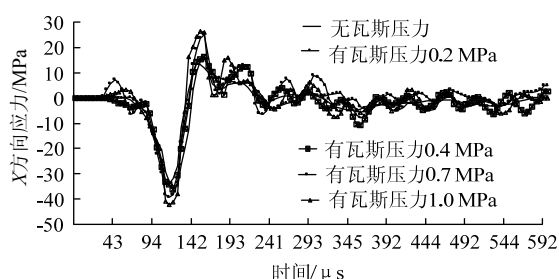
图5 施加瓦斯压力后的计算模型图

Fig.5 Computation model with gas pressure

为便于对比分析,在模型上取一单元测点,绘制出测点在无瓦斯压力 and 不同瓦斯压力条件下的应力时程曲线,如图6所示。



(a) 有无瓦斯压力A点X方向应力比较



(b) 不同瓦斯压力大小测点A处X方向应力曲线

图6 测点爆炸应力时程曲线

Fig.6 Time history curves of blasting stress

从图6可看出,瓦斯压力的存在可以增大应力波峰值和应力波的作用时间(拉伸相维持在较高应力值的时间段增长),且随着瓦斯压力的增大应力波峰及其作用时间也随之增加,瓦斯压力从0增加到1.0 MPa时,炮孔近区应力峰值与无瓦斯压力相比从0增加到5.4%,应力峰值增加幅度明显;炮孔远区应力峰值与无瓦斯压力相比从0增加到9.1%。

由于数值模拟所用软件的材料模型中没有专门的煤体材料模型,故采用均匀单一的脆性材料模型进行计算,所以导致数值计算结果与实验室实测结果存在较小的偏差,但从总体上看增加量是在同

一个量级范围内的,试验结果与数值模拟计算结果基本相符。

## 2.3 瓦斯气体在爆生气体作用过程中的作用机理

### 1) 瓦斯气体对煤体中爆生气体作用试验分析

从表2、3数据及图3、4可看出,由于瓦斯气体的存在,煤体中爆破损伤值和裂纹扩展速度均有不同程度的增大,且随着测点距爆源距离的增大瓦斯气体的影响随之增大。在爆破近区测点( $\bar{r}$ 为5.0)爆破损伤值和裂纹扩展速度分别增大5.14%和0.3%,在爆破远区测点( $\bar{r}$ 为26.25)爆破损伤值和裂纹扩展速度分别增大19.3%和21.1%。在爆生气体劈入应力波作用下形成的初始裂纹中以驱动的形式促使裂纹继续扩展过程中,由于瓦斯气体的压力比爆生气体压力低3~4个数量级<sup>[7]</sup>,因此此阶段瓦斯气体的作用非常有限。但随着爆生气体能量的降低,已不能继续驱动裂纹扩展,此时在爆生气体膨胀挤压作用在煤体中产生的准静态应力场与瓦斯压力场共同作用下促使裂纹二次扩展,进而加剧和促进煤体中的损伤断裂过程。

### 2) 含瓦斯煤体裂纹尖端应力

煤体作为一种含有瓦斯气体且抗拉强度很低的脆性材料,爆炸应力波作用激活或形成的初始裂纹后期扩展主要是爆生气体压力作用、瓦斯气体压力作用和远场应力作用的结果,所以裂纹尖端承受多组应力场的作用,且爆炸波形成的宏观裂纹属于I张开型裂纹和II滑开型裂纹组成的复合型裂纹,这些都导致煤体内的裂纹基本为复合型裂纹,且主要是I-II型的复合裂纹,复合型裂纹尖端的应力强度因子分别为<sup>[6,10-11]</sup>:

$$K_I = -\frac{1}{2}\sqrt{\pi \cdot a}[(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta] + \frac{2}{1-D}\sqrt{\frac{a}{\pi}}\int_0^a \frac{p(x)}{\sqrt{a^2-x^2}}dx = 2p_0\left(\frac{\pi}{2}-1\right)\sqrt{\frac{a}{\pi}} + p_g\sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

$$K_{II} = -\frac{1}{2}\sqrt{\pi \cdot a}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  为远场主应力, MPa;  $p_0$  为爆生气体对孔壁的初始压力, MPa, 可由爆生气体的状态方程  $p = A\rho^\gamma$  计算;  $p(x)$  为裂隙内任一位置爆生气体压力, MPa, 由于爆生裂隙的形成过程时间很短, 所以假设爆生气体压力沿裂隙长度方向按线性分布,  $p(x) = p_0 \frac{a-x}{a}$ ;  $D$  为损伤变量;  $p_g$  为孔隙内瓦斯压力, MPa。

从式(1), (2)可明显看出, 有瓦斯压力可以增大裂纹尖端的应力强度因子, 有利于煤体的爆破损伤断裂。煤体爆破是在煤与瓦斯固流耦合介质中进行的, 瓦斯压力在裂隙产生与扩展的整个过程中都具有积极作用。在爆生气体作用阶段, 瓦斯参与爆生气体驱动裂隙扩展, 但其作用较小; 随后爆生气体准静态应力明显降低, 爆生气体准静态应力场与瓦斯压力场叠加后促使驱动裂纹发生二次扩展。

### 3 结 论

综合以上试验结果、数值计算结果和理论分析结果可得出以下主要结论:

1) 煤体爆破损伤断裂过程可分为爆炸应力波作用的初始阶段和爆生气体与瓦斯气体共同作用的后期损伤断裂阶段, 瓦斯气体在煤体整个爆破损伤断裂过程中都具有重要作用, 能增大煤体爆破损伤程度和爆破裂纹的扩展速度, 且主要体现在煤体爆破损伤断裂的后期阶段。

2) 在爆炸应力波作用的损伤断裂阶段瓦斯气体的作用是增大应力波峰值和应力波的作用时间, 使应力波在拉伸相范围内的应力维持一较高值, 增大拉伸相的能量传递。

3) 在爆生气体作用的损伤断裂后期阶段瓦斯气体的作用是参与爆生气体驱动初始裂纹扩展和瓦斯压力场与爆生气体准静态应力场的叠加促使以驱动形式扩展的裂纹发生二次扩展。

### 参考文献:

- [1] 林柏泉, 周世宁. 含瓦斯煤体变形规律的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1986(3): 9-16.  
LIN Baiquan, ZHOU Shining. Experimental investigation on the deformation law of coal body containing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986(3): 9-16.
- [2] JOHN W L. The effects of dissolved CO<sub>2</sub> on coal structure and properties[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 57: 63-70.
- [3] 尹光志, 王登科. 含瓦斯煤岩耦合弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 993-999.  
YIN Guangzhi, WANG Dengke. A coupled elastoplastic damage model for gas-saturated coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 993-999.
- [4] 褚怀保, 杨小林, 梁为民, 等. 煤体爆破作用机理模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1451-1456.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, LIANG Weimin, et al. Simulation experimental study on the coal blast mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1451-1456.
- [5] 褚怀保, 杨小林, 梁为民, 等. 煤体爆破损伤规律模拟试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 488-492.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, LIANG Weimin, et al. Experimental study on the blast damage law in simulation coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 488-492.
- [6] 褚怀保, 杨小林, 侯爱军, 等. 含瓦斯煤体爆破作用机理数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 644-648.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, HOU Aijun, et al. Numerical simulation study on blasting mechanism of coal body containing gas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 644-648.
- [7] 郑福良. 含瓦斯煤体爆破裂隙发展规律的探讨[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(2): 23-26.  
ZHENG Fuliang. The law of development of explosion fracture in gas coal[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(2): 23-26.
- [8] 朱曦光, 罗宏宇, 曾德光. 含瓦斯煤体爆破探析[J]. 西部探矿工程, 2000(5): 97-98.  
ZHU Xiguang, LUO Hongyu, ZENG Deguang. Analysis of the coal containing gas's blasting mechanism[J]. West-China Exploration Engineering, 2000(5): 97-98.
- [9] 褚怀保, 杨小林, 余永强, 等. 煤体爆破模拟材料选择试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 31-33.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, YU Yongqiang, et al. Experimental research of the choice for coal blasting simulation material[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 31-33.
- [10] 张行. 断裂与损伤力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 8-16.
- [11] 邢书仁, 肖力, 张锦鹏. 煤层预裂爆破复合型宏观裂纹扩展的断裂理论分析[J]. 中国煤炭, 2010, 36(10): 107-111.  
XING Shuren, XIAO Li, ZHANG Jinpeng. An analysis of fracture theory on the expansion of complex macroscopic cracks caused by pre-fracturing of coal seams[J]. China Coal, 2010, 36(10): 107-111.