

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.017

## 煤与瓦斯突出过程的能量分析

姜永东, 郑 权, 刘 浩, 宋 晓

(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**基于煤与瓦斯突出综合作用假说,通过理论分析与实验研究了煤与瓦斯突出过程中煤体弹性能和瓦斯膨胀能做功。利用 MTS815 岩石力学试验系统,实验研究了不同围压下煤样的三轴压缩试验,得出煤体的单位体积弹性能与体应力之间呈幂函数关系;用自制的瓦斯膨胀能装置,测试了不同含水量、气体压力、密实度条件下煤体中的气体膨胀能,得出气体膨胀能与气体压力呈线性关系,且气体在膨胀过程中对外做功时,系统温度变化在 1 °C 左右,研究表明,煤与瓦斯突出过程可以近似看作等温过程。研究结果深化了对煤与瓦斯突出机理的认识,为能量判据奠定了基础。

**关键词:**煤与瓦斯突出;突出机理;煤体弹性能;瓦斯膨胀能

**中图分类号:**X45 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2013)07-098-04

## An analysis on the energy of coal and gas outburst process

JIANG Yongdong, ZHENG Quan, LIU Hao, SONG Xiao

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based on the hypothesis of the synthetic coal and gas outburst operating, we study the work done by elastic energy of coal mass and methane expansion energy in the coal and gas outburst process through theory and experiment. By using MTS815 rock mechanics test system, the triaxial compression test of the coal sample is carried out under different confining pressures and the power function relation between coal body's elastic energy per unit volume and body stress is worked out. It shows there is a linear relation between methane expansion energy and methane pressure obtained by testing methane expansion energy under different moisture contents, different methane pressures and different compactness of coal mass, with the help of self-developed methane expansion energy testing device. The temperature change in the system is about 1 °C when methane does work in expansion. The result also shows that it could be regard as an isothermal process during coal and gas outburst. The results from experiment do great help in researching the mechanism of coal and gas outburst and establishing energy criterion.

**Key words:** coal and gas outburst; outburst mechanism; elastic energy of coal mass; methane expansion energy

煤与瓦斯突出是煤矿开采过程中一种极其复杂的地质动力现象,它能在爆破后几秒钟到几小时内发生,由煤体向巷道或采场喷出大量的碎煤并涌出大量瓦斯,造成重大的人员伤亡和财产损失。国内外

关于煤与瓦斯突出机理方面提出了许多假说<sup>[1-6]</sup>,笔者基于煤与瓦斯突出综合作用假说,认为煤与瓦斯突出的能量主要来源于煤体的弹性能、瓦斯膨胀能、煤体的重力势能等<sup>[7]</sup>,为此通过实验与理论分析研

收稿日期:2013-02-01

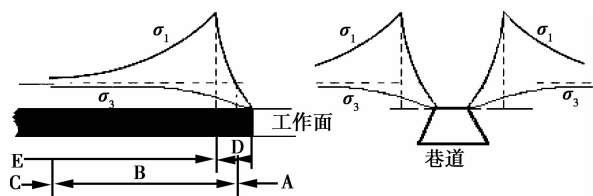
基金项目:国家自然科学基金青年基金(50904082;51204218);重庆市科委院士基金资助项目(CSTC2010BC6006);中央高校基本科研业务费(CDJZR12248801;CDJZR10248801);煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主项目(2011DA105287-MS201203)

作者简介:姜永东(1977-),男,重庆大学副研究员,博士,主要从事采矿工程方向的研究,(E-mail)jiangyd1015@163.com。

究了煤与瓦斯突出过程中煤体的弹性能和气体膨胀能,其研究成果对于深化认清煤与瓦斯突出机理提供了科学的理论依据。

## 1 煤体的弹性能

煤矿开采过程中,在石门揭煤、煤巷掘进、回采工作面易发生煤与瓦斯突出,其中石门揭煤、煤巷掘进发生突出的强度大,占的比例高。其原因为,地下的煤体受采掘活动的影响,使处于原始应力的煤体受到扰动,应力将重新分布,在工作面前方主应力方向发生偏转和产生应力集中,形成应力降低区、应力增加区、原岩应力区,以及塑性区和弹性区,如图 1 所示。因开挖卸荷,临空面处最小主应力  $\sigma_3$  为 0,最大主应力  $\sigma_1$  增大,产生高应力集中,不受构造应力影响的矿井应力集中系数一般为 2~3,受构造应力影响的区域应力集中系数高达 6~8,则围岩塑性区增大,阻力减小,体应力增大,使工作面前方十几米的范围内煤体的弹性能聚增,为煤与瓦斯突出储备了能量。



A—应力降低区;B—应力增加区;C—原岩应力区;

D—塑性区;E—弹性区

图 1 掘进工作面周边应力分布

处于三向应力状态的地下的煤体,其单位体积弹性能<sup>[8]</sup>为:

$$W_m = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]. \quad (1)$$

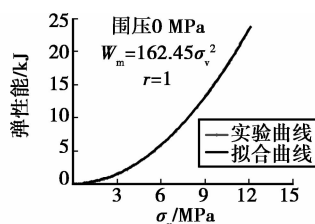
式中:  $E$  为煤的弹性模量;  $\mu$  为煤的泊松比;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为煤体承受的 3 个主应力。

从式(1)中可以看出:煤体的弹性能与煤的力学参数和 3 个主应力密切相关,据此,利用美国 MTS 公司生产的 MTS815 岩石力学测试系统,对原煤试件在不同围压作用下进行了三轴压缩试验,试件尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  圆柱体,围压分别为 0、10、20、30 MPa。实验中自动采集煤样的轴向应力、围压、轴向应变、横向应变等,实验得到了煤体的应力-应变全过程曲线,计算了煤体力学参数,代入式(1)中得到了煤样的单位体积弹性能与体应力的关系曲

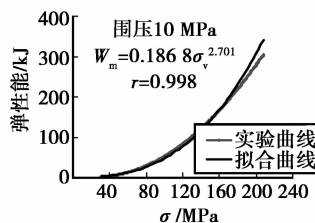
线如图 2 所示。从图 2 中可以看出:煤的单位体积弹性能随体应力的增大而增大,且与体应力呈相关性很的幂函数关系,如式(2)所示。

$$W_m = A\sigma_v^B, \quad (2)$$

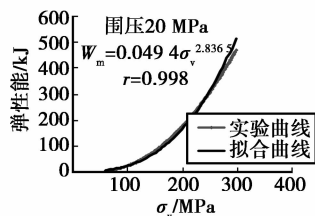
式中:  $\sigma_v$  为体应力,  $\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ;  $A$ 、 $B$  为实验参数。



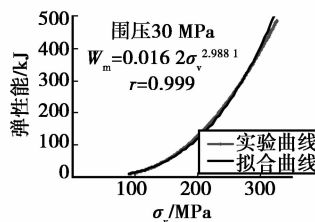
(a) 原煤 (1-1)



(b) 原煤 (1-2)



(c) 原煤 (1-3)



(d) 原煤 (1-4)

图 2 煤体的弹性能与体应力曲线

## 2 瓦斯膨胀能

瓦斯膨胀能是煤体中的高压瓦斯在突出瞬间变为低压瓦斯,发生体积膨胀而对外做功。瓦斯膨胀能是煤与瓦斯突出的主要能量来源之一,随着开采深度增加,煤层瓦斯压力、含量增大,瓦斯膨胀能威胁越来越严重。国内外一些学者将瓦斯从煤体中释放出来的过程看作绝热过程或等温过程。如俞启香<sup>[2]</sup>、何学秋<sup>[3]</sup>、谭学术等<sup>[9]</sup>、Valliappan S 等<sup>[10]</sup>、景国勋等<sup>[11]</sup>及吴俊<sup>[12]</sup>等就把瓦斯从煤岩层中释放的过程看作绝热过程,其理由有两方面,一是整个突出

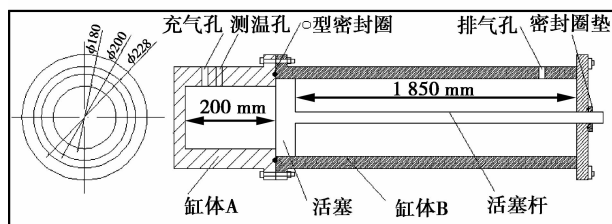
过程的时间非常短,一般在 40 s 以内的时间完成。二是参与突出的 2 种介质,瓦斯和煤的导热系数都非常低。前苏联学者 B. B Ходот<sup>[13]</sup>和鲜学福等<sup>[14]</sup>则把突出过程看作等温过程,因为从实验室现场模拟突出过程来看,系统温度变化在 1 °C 左右,可以近似看作等温过程。还有学者认为煤与瓦斯突出是一个偏向于等温过程的多变过程<sup>[15]</sup>。

### 2.1 瓦斯膨胀能实验装置

实验采用自制的瓦斯膨胀能装置,如图 3 所示。装置由缸体 A 与缸体 B 用高强度螺栓连接而成,缸体 A 用于装煤样颗粒,且配有温度传感器,缸体 A 与高压瓦斯气瓶相连,可以向缸体 A 中注气。缸体 B 中有一活塞,当缸体 A 中的游离瓦斯和吸附瓦斯解吸时,瓦斯产生膨胀使活塞伸出,通过测量活塞的伸出长度,计算可得瓦斯膨胀对外做功。装置可以测定不同瓦斯压力、煤体密实度、煤体粒径、煤体含水量等条件下瓦斯膨胀能做功。



(a) 实物图



(b) 示意图

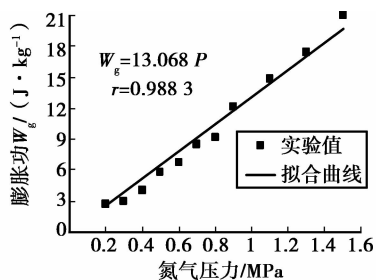
图 3 瓦斯膨胀做功装置

### 2.2 瓦斯膨胀能实验与结果

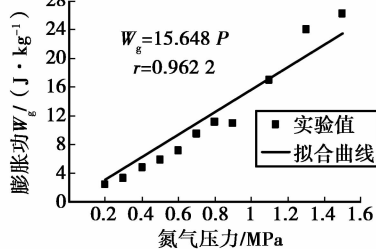
实验前首先检查装置的气密性,若不漏气,将煤样粉装入缸体 A 中,用人工夯实或试验机压实,然后与缸体 B 用高强度螺栓连接,开启真空泵对缸体 A 中的煤样抽真空 6 h,然后对缸体 A、B 中充入气体,缸体 B 的气压比缸体 A 大 0.2 MPa 以上,当缸体 A 的煤样吸附 8 h 瓦斯达到平衡时,瞬间打开缸体 B 的放气阀,让缸体 B 的气压很快降到一个大气压,由于缸体 A 中的游离和吸附瓦斯解吸,缸体 B 的活塞将伸出,测量达到解吸平衡时活塞最终伸出长度,然后计算膨胀功,整个实验过程中需记录缸体

A 和室内温度随时间的变化规律。本次实验用的气体为纯 N<sub>2</sub>,浓度为 99.9%,实验缸体 A 中的气压最大 1.5 MPa,远大于《煤与瓦斯突出规定》中的突出临界瓦斯压力 0.74 MPa。实验结果如图 4 所示,从图 4 可以看出:相同条件下,随气体压力的增加,膨胀能增大,呈线性关系;相同条件下,煤体密实度增加,使煤体中吸附的气体量增大,膨胀能增大;相同条件下,煤体含水量增大,使煤体中吸附的气体量减小,膨胀能降低。

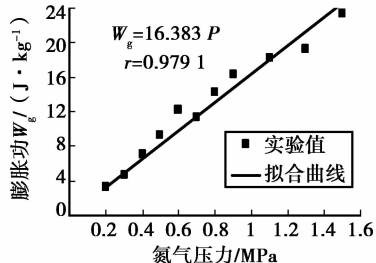
从图 5 可以看出:煤体吸附氮气初期温度升高,当煤样吸附达到平衡后,打开缸体 B 的放气阀,气压很快降到一个大气压时,缸体 A 中的温度变化在 1 °C 左右,表明煤与瓦斯突出过程可以近似看作等温过程。



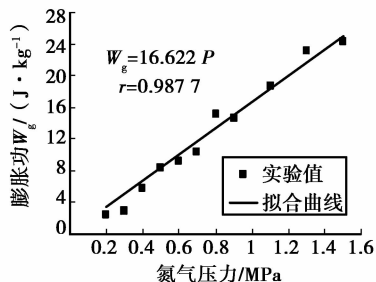
(a) 煤样人工夯实,含水量 12.7%



(b) 煤样人工夯实,含水量 8.7%



(c) 煤样 60 kN 压实,含水量 8.7%



(d) 煤样 90 kN 压实,含水量 8.7%

图 4 膨胀功与气体压力曲线

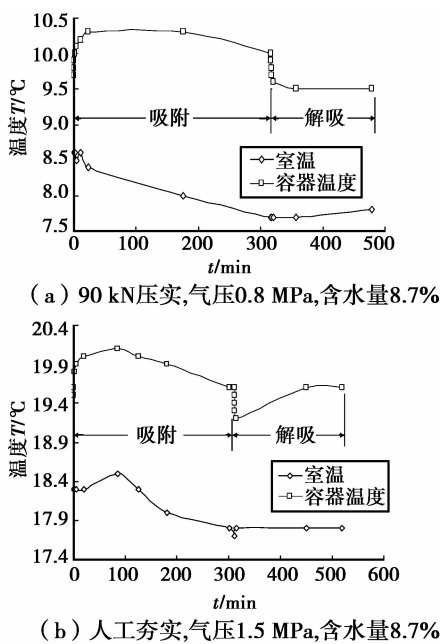


图 5 气体膨胀做功瞬间煤体的温度变化

### 2.3 瓦斯膨胀能理论计算

煤与瓦斯突出前,煤中处于吸附态的瓦斯还没有解吸成游离态,所以不做功,只有处于游离态的瓦斯做功。发生突出的瞬间,瓦斯压力急剧降低,处于吸附态的瓦斯开始解吸,然后参与做功,因此煤与瓦斯突出时涌出大量瓦斯。根据现场煤与瓦斯突出实例和实验室模拟表明,突出过程中系统温度变化很小,可以把突出近似看作等温过程,根据热力学第一定律,瓦斯膨胀能做功  $W_g$  为

$$W_g = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (3)$$

式中: $P_1$  为突出前的瓦斯压力; $P_2$  为突出后环境空间的瓦斯压力; $V_1$  为突出前瓦斯体积,包括游离态瓦斯和吸附态瓦斯。

式(3)中  $V_1$  可表达为

$$V_1 = V'_1 + V''_1 = \frac{m}{\rho} \varphi + (Q_{P_1} - Q_{P_2}) m, \quad (4)$$

式中: $V'_1$  为突出前游离态瓦斯体积; $V''_1$  为突出后吸附态瓦斯解吸为游离态的体积; $m$  为突出孔洞的煤量; $\rho$  为煤的密度; $\varphi$  为煤的孔隙度; $Q_{P_1}$  为气压为  $P_1$  时,煤中吸附的瓦斯量; $Q_{P_2}$  为气压为  $P_2$  时,煤中吸附的瓦斯量; $Q_{P_1}$ 、 $Q_{P_2}$  可能通过 Langmuir 吸附模型计算得到。

则式(3)可表示为

$$W_g = P_1 \left[ \frac{m}{\rho} \varphi + (Q_{P_1} - Q_{P_2}) m \right] \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (5)$$

式(5)中的参数可以通过实验确定,从理论上可计算瓦斯膨胀能,但较为复杂。通过此次氮气膨胀

能实验表明,气体膨胀能与气体压力呈线性关系,可以采用以下经验公式直接计算气体膨胀能,其表达式为

$$W_g = C P_1, \quad (6)$$

式中, $C$  为实验参数,其大小与煤体的变质程度、密度、含水量相关。

### 3 结 论

通过实验与理论分析方法,研究了煤与瓦斯突出过程中煤体弹性能和气体膨胀能做功,得出如下结论:

- 1) 煤体的单位体积弹性能与体应力呈幂函数关系,气体膨胀能与气体压力呈线性关系。
- 2) 吸附态与游离态的气体都参与了做功,气体膨胀功的大小与煤体微观裂隙、孔隙结构,煤体含水量、气体压力、温度密切相关。
- 3) 煤与瓦斯突出的过程可以近似看作等温过程。

### 参考文献:

- [1] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1985.
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [3] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [4] 尹光志,王登科,张东明,等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 410-417.  
YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 410-417.
- [5] 胡千庭,周世宁,周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1368-1372.  
HU Qianting, ZHOU Shining, ZHOU Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1368-1372.
- [6] 王永祥,杜卫新. 煤与瓦斯突出机理研究进展[J]. 煤炭技术, 2008, 27(8): 89-91.  
WANG Yongxiang, DU Weixin. Progress in study on mechanism of coal and gas outburst[J]. Coal Technology, 2008, 27(8): 89-91.
- [7] 谢雄刚,冯涛,王永,等. 煤与瓦斯突出过程中能量动态平衡[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1120-1124.

- Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2086-2089.
- [13] 赵会明, 罗固源, 季铁军. 几种聚硅酸铝铁絮凝剂的性能比较[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(6): 694-697.
- ZHAO Huiming, LUO Guyuan, JI Tiejun. Analysis on function of several types polysilicate aluminum ferric[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(6): 694-697.
- [14] 潘留明, 季民, 王秀朵, 等.  $\text{TiO}_2$  纳米管/UV/ $\text{O}_3$  对腐殖酸的降解及应用基础[J]. 天津大学学报, 2010, 43(4): 333-338.
- PAN Liuming, JI Min, WANG Xiuduo. Degradation and applied basis of humic acid treated by  $\text{TiO}_2$  nanotubes/UV/ $\text{O}_3$  [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(4): 333-338.
- [15] Zhang Y, Guo S Y, Zhou J T, et al. Flue gas desulfurization by  $\text{FeSO}_4$  solutions and coagulation performance of the polymeric ferric sulfate by-product[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(8): 859-865.
- [16] Zheng H L, Zhu G C, Jiang S J, et al. Investigations of coagulation-flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs[J]. Desalination, 2011, 269(1/2/3): 148-156.
- [17] Hamid N A A, Ismail A F, Matsuura T, et al. Morphological and separation performance study of polysulfone /titanium dioxide( $\text{PSF}/\text{TiO}_2$ ) ultrafiltration membranes for humic acid removal[J]. Desalination, 2011, 273(1): 85-92.

(编辑 郑洁)

(上接第101页)

- XIE Xionggang, FENG Tao, WANG Yong, et al. The energy dynamic balance in coal and gas outburst [J]. Journal Of China Coal Society, 2010, 35(7):1120-1124.
- [8] 吴财芳, 秦勇, 傅雪海, 等. 煤基块弹性能及其与地质控制因素之间的关系[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 636-639.
- WU Caifang, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Coal matrix flexibility energy and the relation with geological controlling factors[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 636-639.
- [9] 谭学术, 鲜学福, 肖勤学. 矿井煤与瓦斯突出中瓦斯膨胀能探讨[J]. 山东矿业学院学报, 1986, 8(1): 37-41.
- TAN Xueshu, XIAN Xuefu, XIAO Qinxue. Investigation of the gas expansion energy for coal: gas outburst in mines[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1986, 8(1): 37-41.
- [10] Valliappan S, Zhang W L. Role of gas energy during coal outbursts[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 44(7):875-895.
- [11] 景国勋, 张强. 煤与瓦斯突出过程中瓦斯作用的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 169-171.
- JING Guoxun, ZHANG Qiang. Study on the role of gas in the coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2):169-171.
- [12] 吴俊. 关于煤层气体热力学理论和若干参数计算的研究[J]. 煤炭学报, 1989, 26(2): 99-112.
- WU Jun. Thermo-dynamical theory and calculation of parameters of coal seam gases[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 26(2): 99-112.
- [13] В В Ходот. Внезапные вопросы угля и газа [М]. Госторгсхиздат Ленинград, 1961:3-16.
- [14] 鲜学福, 辜敏, 李晓红, 等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 577-581.
- XIAN Xuefu, GU Min, LI Xiaohong, et al. Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 577-581.
- [15] 刘明举, 颜爱华, 丁伟, 等. 煤与瓦斯突出热动力过程的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 50-54.
- LIU Mingju, YAN Aihua, DING Wei, et al. Research of thermodynamic process of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1):50-54.

(编辑 郑洁)