

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.01.014

煤层原始含水率对煤与瓦斯突出危险程度的影响

蒋长宝,尹光志,许江,彭守建,李文璞

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;
b. 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室,重庆 400044)

摘要:运用自主研发的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置”,进行了恒定瓦斯压力和围压条件下,不同原始含水率含瓦斯煤样全应力-应变瓦斯渗流试验,结合现场实测煤层注水前后瓦斯涌出量的变化规律。研究表明:随着煤样原始含水率的增加,煤样的三轴抗压强度减小,弹性模量减小,三轴抗压强度处轴向应变增大、横向应变和体积应变的绝对值增大;在全应力-应变整个过程中,煤样的甲烷有效渗透率都减小。从煤的力学特性和瓦斯在煤层中流动两个方面分析了煤层注水的防突作用。煤层原始含水率越高,发生煤与瓦斯突出的危险性越小。可将煤层的原始含水率作为判断煤与瓦斯突出危险程度的一个重要指标。

关键词:煤与瓦斯突出;含水率;全应力-应变;渗透率;固-液-气耦合;采矿工程

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)01-091-05

The effect of original moisture content in coal beds on coal and gas outburst risk level

JIANG Changbao, YIN Guangzhi, XU Jiang, PENG Shoujian, LI Wenpu

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;
b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: By using self-made “Coal Containing Gas Thermal-Hydrological-Mechanical (THM) Coupling Experimental Equipment”, an experimental study is carried out to investigate the gas seepage law of containing-gas coal during the complete stress-strain process with different original water contents. Under the conditions of constant gas pressure and confining pressure, and the experimental results are compared with the field test of the gas emission variation of coal seams before and after being infused. The research results show that the triaxial compressive strength and the elastic ratio of coal decrease with the increase of original water content in coal, but the axial strain of coal increases and the absolute value of transverse strain and volume strain of coal increases at the triaxial compressive strength; the methane effective permeability of coal decreases throughout the complete stress-strain process. Outburst prevention by coal seam infusion attributed is analyzed from two aspects: the mechanics of coal and the gas flow in the coal

收稿日期:2013-08-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201203);国家自然科学基金资助项目(51204217, 51374256);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-004, 2011ZX05040-001-005);煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究课题(2011DA105287-MS201212);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR12240054);

作者简介:蒋长宝(1982-),男,博士,重庆大学副教授,硕士生导师,主要从事采矿工程与安全工程方面的研究,(E-mail) jcb@cqu.edu.cn。

seams. The higher original water content in coal seams is, the smaller the risk of coal and gas outburst becomes. So the original water content in coal seam can be treated as a significant criterion for the judgments of coal and gas outburst criticality.

Key words: coal and gas outburst; water content; complete stress-strain; permeability; solid-liquid-gas coupling; mining engineering

煤与瓦斯突出是煤矿井下一种破坏性巨大的动力灾害,国内外业界人士从煤与瓦斯突出机理^[1-6]、煤与瓦斯突出预测^[7-13]、煤与瓦斯突出矿井的管理^[14]、煤与瓦斯突出治理^[15-18]等方面进行了广泛的研究。在治理煤与瓦斯突出方面:Díaz Aguado 和 González Nicieza^[15] 研究指出可以通过煤层注水和开采保护层降低突出煤层的危险性。在煤层注水治理煤与瓦斯突出的机理方面:蒋承林^[16] 通过不同含水率煤样力学试验和理论分析,认为其是煤层强度降低,塑性增强,并不是由于水对煤体内的瓦斯的封堵作用;刘建新等^[17] 通过数值模拟的方法研究认为其是煤层强度降低,塑性增强,瓦斯涌出量降低;刘明举等^[18] 通过现场试验认为煤层注水改变了工作面前方应力分布,并使煤层瓦斯含量降低。文献^[16] 做不同含水率煤样全应力-应变试验时,煤样是在无瓦斯条件下进行的,没有研究瓦斯在全应力-应变过程中的运移规律。采煤现场的煤层都是含瓦斯状态的,因此有必要进行不同含水率含瓦斯煤样全应力-应变瓦斯渗流试验,研究不同含水率含瓦斯煤样的力学特性与瓦斯渗流规律。这更符合现场实际情况,可为进一步认识煤层注水的防突机理提供理论依据。但目前可做全应力-应变过程中气体渗流试验的实验设备不多,笔者利用自主研发的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置”,开展了不同含水率含瓦斯煤样全应力-应变瓦斯渗流试验,探讨了煤层原始含水率对煤与瓦斯突出危险程度的影响。并结合现场实测煤层注水前后瓦斯涌出量的变化,探讨了煤层注水治理煤与瓦斯突出的机理。

1 试验概况

1.1 煤样制备

本试验煤样取自晋城煤业集团的赵庄矿 3[#] 煤层,该煤层为煤与瓦斯突出煤层。煤样严格按照煤与岩石物理力学性质测定方法^[19] 要求制作,将所取煤块粉碎,选取粒径大小为 0.250~0.425 mm 的煤粉颗粒,在 200 t 刚性试验机上以 100 MPa 的压力压制而成。成型煤样的规格为:φ50 mm×100 mm。将制备好的成型煤样放入干燥箱烤干,称重后放入设置好温度和湿度的标准恒温恒湿养护箱(如图 1

所示),将成型煤样调到试验所需含水率。

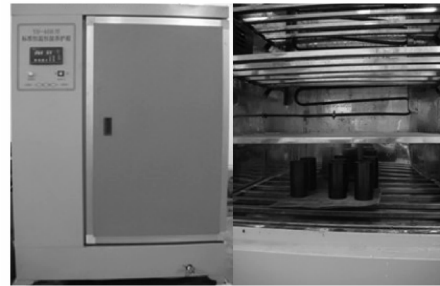


图 1 标准恒温恒湿养护箱及煤样

1.2 试验装置

本试验采用自行研制的“含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置”进行,如图 2 所示。



图 2 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流实验装置

1.3 试验方案

因为瓦斯的主要成分为甲烷,因此本试验采用纯度为 99.99% 的甲烷代替瓦斯,试验中控制瓦斯压力(p_1) < 围压($\sigma_2 = \sigma_3$),否则会使热缩管密封失效而使试验失败。本试验轴压加载速度为 0.1 mm/min,围压加载速度为 0.1 MPa/s。试验全过程由计算机及控制程序控制,包括数据采集记录。具体试验步骤:将已调节好含水率的煤样侧壁均匀涂抹硅橡胶,以防止气体从煤样侧壁泄漏;设置水域温度(本试验温度恒定为 30 ℃);将煤样放入三轴压力室压头上,安装好试验装置的其余部分;对煤样施加预定的围压和轴压(静水压力条件)后,将甲烷压力 p_1 加到预定压力(1 MPa),保持甲烷压力 p_1 不变,本试验围压均为 2 MPa。将三轴压力室放入恒温水域,开启循环泵以保证水域里各处温度一致。待煤样充分吸附后,打开试件出气管阀门,待流量计读数稳定后,连续加载轴压进

行全应-应变瓦斯渗流试验,待煤样破坏后结束该次试验。更换煤样,重复上述步骤,进行新的全应力-应变瓦斯渗流试验。本试验共做了 5 组,15 个试件,具体情况见表 1。

表 1 试验煤样物理参数

煤样	含水率/ %	煤样尺寸/mm		干密度/ (g·cm ⁻³)
		直径	高	
12043DR-1	0.00	50.9	100.7	1.257
12043DR-2	2.46	51.1	100.7	1.242
12043DR-3	4.36	51.1	100.7	1.232
12043ZR-1	0.00	51.1	100.3	1.259
12043ZR-2	2.30	51.0	99.5	1.261
12043ZR-3	4.40	51.1	99.6	1.256
12043SL-1	0.00	51.1	100.9	1.190
12043SL-2	2.46	51.1	100.4	1.186
12043SL-3	4.92	51.1	101.4	1.183
13061ZR-1	0.00	51.1	100.9	1.251
13061ZR-2	2.79	51.0	100.5	1.257
13061ZR-3	4.84	51.1	101.7	1.248
13061SL-1	0.00	51.1	101.4	1.169
13061SL-2	2.73	51.1	103.8	1.171
13061SL-3	3.68	51.1	100.9	1.168

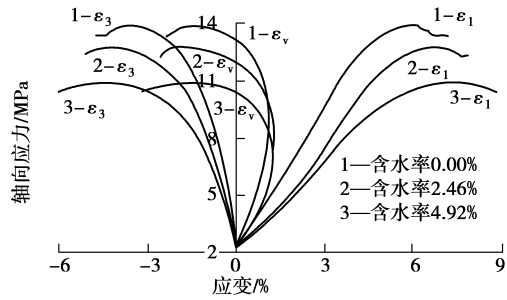


图 3 不同含水率含瓦斯煤样全应力-应变曲线

从图 3 可以看出,在恒定瓦斯压力和围压条件下,随着煤样含水率的增加,煤样的三轴抗压强度减小,三轴抗压强度处轴向应变增大、横向应变和体积应变的绝对值增大。从表 2 可以得到煤样含水率从 0.00% 增加到 4.92%,三轴抗压强度减小了 21.55%、三轴抗压强度处轴向应变增大了 23.00%、横向应变的绝对值增大了 21.87%、体积应变的绝对值增大了 17.78%、弹性模量减小了 37.44%。表明随着煤样含水率的增大,煤样的强度减小,塑性增强,承受变形的极限增大。在突出准备阶段,破坏煤体的基本动力是弹性势能释放转化的动能。其能量大小与煤体的弹性有关,煤体弹性越大,工作面附近的弹性势能越大,工作面突出的危险性越大。随着煤样含水率的增加,煤样的塑性增强。煤样的弹性势能更多的消耗于煤体缓慢的塑性变形,使煤体内部能量及时消耗、减少能量聚积,避免突然释放。另外,在煤巷掘进的条件,工作面前方总存在着一个破裂带,破裂带中应力较低,瓦斯易于泄漏,靠近工作面处的部分煤体已经失去突出危险,并且阻碍着后续煤体的突出,这部分失去突出危险的煤体所处的范围就是卸压带。随着瓦斯的泄漏,卸压带的长度是逐渐增加的。一般来说,煤层内破裂带的长度与煤岩的厚度及强度有关^[16]。煤岩的强度越低,破裂带的长度也越大,相应地,卸压带的长度也越大,即工作面前方阻挡有突出危险煤体的卸压带越长,突出就越不易发生。因此,从来力学特性方面来看,煤层原始含水率越高,发生煤与瓦斯突出的危险性越小。

2 试验结果及分析

由于 5 组煤样所得煤样力学特性和瓦斯渗流规律与煤样含水率之间的关系一致,因此仅对 1 组煤样的试验结果做详细分析。

2.1 不同含水率含瓦斯煤样力学特性分析

根据试验结果,可以得到恒定瓦斯压力和围压条件下,3 种含水率含瓦斯煤样的全应力-应变关系,如图 3 所示(图中 ϵ_1 表示轴向应变, ϵ_3 表示横向应变, ϵ_v 表示体积应变,其他类似)。

表 2 12043SL 煤样试验结果

煤样	含水率/ %	三轴抗压 强度/MPa	三轴抗压强度时			弹性模量/ GPa	甲烷有效渗透率/mD		三轴抗压 强度时
			轴向应变/ %	横向应变/ %	体积应变/ %		初始值	最小值	
12043SL-1	0.00	13.924	6.160	-3.937	-1.715	2.719	2.692	1.516	2.019
12043SL-2	2.46	12.778	6.822	-4.378	-1.934	1.894	2.495	1.305	1.675
12043SL-3	4.92	10.924	7.577	-4.798	-2.020	1.701	1.822	0.860	1.378

说明:表 2 中“含水率为 0.00%”时的煤样的甲烷有效渗透率即煤样的绝对渗透率,这里看作煤样的甲烷有效渗透率的一种特殊情况。

本试验中给煤样加水的过程没有改变煤样的原始结构,而在采煤现场给煤层高压注水会改变煤的原始结构。煤层中的裂隙在高压水的作用下进一步张开,煤层的强度降低更多,塑性增强更多。因此,从来力学特性方面来看,经过高压注水后的煤层在开采中更加不易发生煤与瓦斯突出。

2.2 不同含水率含瓦斯煤样瓦斯渗流分析

根据试验结果,可以得到恒定瓦斯压力、恒定围压时,3种含水率含瓦斯煤样的全应力-应变瓦斯渗流关系,如图4所示。

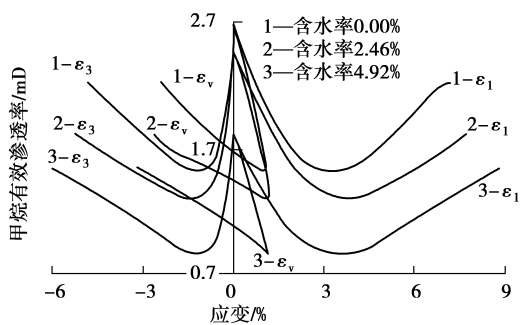


图4 不同含水率含瓦斯煤样全应力-应变瓦斯渗流曲线

从图4可以看出,在恒定瓦斯压力和围压条件下,随着煤样含水率的增大,在全应力-应变整个过程中,煤样的甲烷有效渗透率都减小。从表2可以得到煤样含水率从0.00%增加到4.92%,煤样的甲烷有效渗透率初始值减小了32.32%,最小值减小了43.27%,三轴抗压强度时减小了31.75%。表明随着煤样含水率的增大,煤样的甲烷有效渗透率减小。这表明无论采煤现场的煤层处于何种应力-应变阶段,随着煤层含水率的增加,煤层的瓦斯有效渗透率都是减小的。从瓦斯对煤与瓦斯突出的影响来说,促使发生煤与瓦斯突出的瓦斯能减小了,发生煤与瓦斯突出危险性也随之降低。煤体是否煤与瓦斯突出决定于煤体在暴露时释放出来的初始释放瓦斯膨胀能,初始释放瓦斯膨胀能越大,煤与瓦斯突出越可能发生^[16]。一方面,根据Ф. И. 切尔诺夫^[17]提出的假说,煤层里的水通过裂隙、大孔、中孔渐进入过渡孔、微孔中,煤体内吸附瓦斯应该被大部分封存煤体内,这样会使煤体在暴露时释放出来的初始释放瓦斯膨胀能比较小,不易引起煤与瓦斯突出。另一方面,当煤体被开挖后,工作面前方煤层里的游离瓦斯与工作面游离瓦斯存在压力梯度,游离瓦斯会有向工作面流动的趋势,但由于水进入煤体后,部分孔隙和裂隙被水封堵,这将减小可供游离瓦斯流动的通道,也将会使煤体在暴露时释放出来的初始释放瓦斯膨胀能比较小,不易引起煤与瓦斯突出。因此,

从瓦斯在煤层中流动方面来看,煤层原始含水率越高,发生煤与瓦斯突出的危险性越小。

本试验给煤样加水过程没有破坏煤样的原始结构,与采煤现场煤层高压注水不一样。在采煤现场煤层高压注水的过程中煤体遭到破裂,裂隙增加,在给煤层高压注水初期,煤层释放的瓦斯反而增加,但在煤层注水后期煤层瓦斯涌出量又会降低^[17-18]。这是因为给煤层高压注水有两方面的作用,一方面,水对工作面附近的煤层裂隙和孔隙的封堵作用,另一方面,高压注水使煤体裂隙进一步张开,并产生新的裂隙。在给煤层注水初期,高压注水使煤体裂隙进一步张开,并产生新的裂隙的作用占主导地位,引起瓦斯涌出量增大。随着水慢慢进入煤层的孔隙和裂隙后,水对工作面附近的煤层裂隙和孔隙的封堵作用慢慢增大,又使瓦斯涌出量减小。因此,从瓦斯在煤层中流动方面来看,给煤层高压注水不一定会降低决定煤层是否发生煤与瓦斯突出的初始释放瓦斯膨胀能,要具体看高压注水对瓦斯在煤层中流动两方面的影响,孰强孰弱。

综上所述可知,煤层的原始含水率对煤层是否会发生煤与瓦斯突出有重大影响,煤层原始含水率越高,发生煤与瓦斯突出的危险性越小。煤层所处井田的地质构造、顶底板岩石的情况和水文地质情况的不同,必将使赋存其中的煤层的含水率不同。因此,笔者认为可将煤层的原始含水率作为判断煤与瓦斯突出危险程度的一个重要指标。

3 结 论

1) 在恒定瓦斯压力和围压条件下,随着煤样含水率的增加,煤样的三轴抗压强度减小,弹性模量减小,三轴抗压强度处轴向应变增大、横向应变和体积应变的绝对值增大。

2) 在恒定瓦斯压力和围压条件下,随着煤样含水率的增大,在全应力-应变整个过程中,煤样的甲烷有效渗透率都减小。

3) 煤层注水的防突作用:从力学特性方面来看,使煤层强度降低,塑性增加,承受变形的极限增大。从而使煤样的弹性潜能更多的消耗于煤体缓慢的塑性变形,使煤体内部能量及时消耗、减少能量聚积,避免突然释放。同时使工作面前方阻挡有突出危险煤体的卸压带增长。从瓦斯在煤层中流动方面来看,给煤层高压注水不一定会降低决定煤层是否发生煤与瓦斯突出的初始释放瓦斯膨胀能,要具体看高压注水对瓦斯在煤层中流动两方面的影响,孰强孰弱。

4)煤层的原始含水率对煤层是否会发生煤与瓦斯突出有重大影响。煤层原始含水率越高,发生煤与瓦斯突出的危险性越小。可将煤层的原始含水率作为判断煤与瓦斯突出危险程度的一个重要指标。

参考文献:

- [1] Litwiniszyn J. A model for the initiation of coal-gas outbursts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1985, 22(1):39-46.
- [2] Beamish B B, Crosdale P J. Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1/2/3/4): 27-55.
- [3] Valliappan S, Zhang W H. Role of gas energy during coal outburst[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 44(7): 875-895.
- [4] Cao Y X, He D D, Glick D C. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001,48(1/2): 47- 63.
- [5] Cao Y X, Davis A, Liu R X. The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals: a possible indicator of outburst potential [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 53(2): 69-79.
- [6] Li H Y. Major and minor structural features of a bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 47(2): 101-113.
- [7] Wold M B, Connell L D, Choi S K. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 75(1): 1-14.
- [8] Alexeev A D, Revva V N, Alyshev N A. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 58(4): 245-250.
- [9] Xu T, Tang C A, Yang T H, et al. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43(6): 905-919.
- [10] Frid V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1997, 38(2): 97-104.
- [11] Sun P D, Wan H G. A coupled model for solid deformation and gas leak flow[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(11): 1083-1104.
- [12] Zhang X X, Sun B Y, Wang R J. Application of GA based rough set theory in forecast of gas outbursts[C] // *Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design*, October 17-18, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE, 2008, 1: 103-107.
- [13] Ma X P, Miao Y Z, Zhao Z X, et al. A novel approach to coal and gas outburst prediction based on multi-sensor information fusion [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, September 1-3, 2008, Qingdao, China. [S. l.]: IEEE, 2008: 1613-1618.
- [14] Lama R D, Bodziony J. Management of outburst in underground coal mine [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1/2/3/4): 83-115.
- [15] Díaz Aguado M B, González Nicieza C. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa-Olloniego coalfield, Spain[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(4): 253-266.
- [16] 蒋承林. 煤层注水的防突机理分析[J]. *湘潭工学院学报*, 1999, 14(3): 1-4.
JIANG Chenglin. Analysis on the mechanism of outburst prevention in seam infusion[J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 1999, 14(3): 1-4.
- [17] 刘建新, 李志强, 李三好. 煤巷掘进工作面水力挤出措施防突机理[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(2): 183-186.
LIU Jianxin, LI Zhiqiang, LI Sanhao. Protection against outburst mechanism of hydraulic extrusion measure in the front of coal road heading face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(2):183-186.
- [18] 刘明举, 潘辉, 李拥军, 等. 煤巷水力挤出防突措施的研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(2): 168-171.
LIU Mingju, PAN Hui, LI Yongjun, et al. Research and application of coal and gas outburst control measure based on hydraulic extrusion in roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(2): 168-171.
- [19] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤与岩石物理力学性质测定方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 32-33.