文章编号:1000-1964(2005)05-0636-04

煤基块弹性能及其与地质控制因素之间的关系

吴财芳¹,秦 勇²,傅雪海²,林伯泉¹

(1. 中国矿业大学能源与安全工程学院,江苏徐州 221008;

2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:煤储层弹性能是联系成藏动力学条件与煤层气藏之间的桥梁和纽带,煤基块弹性能是储 层能量的主要组成部分,是煤层气成藏的关键.本文通过煤基块弹性能物理模拟实验,对影响煤 基块弹性能的参数进行了研究,分析了其与地质控制因素之间的关系.研究表明:煤基块弹性能 受控于煤体自身的岩石力学性质,与地质历史时期的煤储层埋藏深度、煤级演化程度密切相关. 煤基块弹性能随着煤储层埋深的增加而降低,随着煤级的升高而增大.

Coal Matrix Flexibility Energy and the Relation With Geological Controlling Factors

WU Cai-fang¹, QIN Yong², FU Xue-hai², LIN Bo-quan¹

(1. School of Mineral and Safety Engineering,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. School of Resource and Earth Science,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: It is the bridge and link for the flexibility energy of coal reservoir to connect pool-forming dynamic condition with coalbed gas accumulation. Coal matrix flexibility energy is the important part of coal reservoir energy and the key of coalbed gas accumulation. On the basis of physical simulation experiments of coal matrix flexibility energy, the parameters influencing coal matrix flexibility energy were studied, the relation between coal matrix flexibility energy and geological controlling factors was analyzed. The results show that coal matrix flexibility energy was controlled by rock mechanical properties of coal, and was correlative nearly with the buried deepness of coal reservoir and the evolvement degree of coal rank in different geological phases. Coal matrix flexibility energy decreased with the increasing of buried deepness of coal reservoir, and increased with the rising of coal rank.

Key words: coal matrix flexibility energy; coal rank; buried deepness; coalbed gas accumulation

煤层气依靠能量系统平衡压力和煤储层本身 吸附能力赋存于煤层中,使得煤层气藏对外界干扰 的响应比常规天然气藏更为敏感和脆弱,而我国多 期地质作用过程使系统变的异常复杂^[1].煤层气成 藏维系于其能量平衡系统,受控于地热场、地应力场、流体化学场和流体动力场的"四场互动"过程, 其核心是能量的有效传递及其地质选择过程^[1-2]. 进一步来说,煤储层能量系统的动态平衡变化特

收稿日期: 2004-12-02

E-mail: caifangwu@sina.com

基金项目:国家 973 项目(2002CB211704); 江苏省博士后基金项目(50134040-03)

作者简介:吴财芳(1976-),男,山东省烟台市人,博士(博士后),从事煤层气地质、瓦斯地质方面的研究.

征,体现为固、液、气三相物质弹性能综合而成的煤 储层弹性能,并制衡着煤层气的成藏效应^[2-4].

煤储层弹性能的具体表现特征是煤基块的收 缩膨胀^[4-5],直接受控于煤级变化、地层压力变化和 煤储层的含气性变化,这些变化又受控于热应力、 构造应力、地下水动力等成藏动力学因素^[6-10].煤 储层的地层弹性能包括煤基块弹性能、煤储层中的 甲烷气体弹性能以及水体弹性能^[4].其中,煤基块 弹性能是煤储层能量的主要组成部分,是解译煤层 气成藏动力学条件耦合特征的关键所在.

1 煤基块弹性能数学模型

一般来说,各种动力学因素作用于煤储层,其 作用效果是以弹性能形式显现的.文献[10]研究表 明,在原始应力状态下,煤储层处于弹性状态,煤基 块储存的弹性能量可以表示为

$$E_{\mathfrak{R}} = \frac{1}{2E} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3) \right], (1)$$

式中:E为煤岩体受载变形时的初始弹性模量;µ 为煤岩体受载变形时的泊松比;σ₁,σ₂,σ₃分别为煤 岩体受载变形时的3个有效主应力分量.

在具体计算中,可以认为 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ (围压),所以式(1)可以简化为

$$E_{k} = 3P_{c}^{2}(1-2\mu)/2E.$$
 (2)

2 煤基块弹性能物理模拟实验

根据公式(2)知道,煤基块弹性能可用其弹性

变形特征来衡量,因此可采用煤样品的三轴力学实验来获得求算弹性能的基本参数.

煤基块弹性变形综合物理模拟实验是在石油 勘探开发研究院廊坊分院压裂中心实验室进行^[5], 实验设备为美国 Terra Tek 公司制造的岩石力学 实验系统(Rock Mechanics Testing System)(图1). 该系统主要用于模拟油藏温度、地应力和油藏压力 条件下岩石的力学行为,由一套完整的岩样制备和 常规岩心分析设备支持.实验条件的模拟范围为: 垂直应力 0~800 MPa,水平应力 0~140 MPa,孔 隙流体压力 0~100 MPa,地层温度 0~200 C.



图 1 物理模拟实验所采用的岩石力学实验系统 Fig. 1 The test system of rock mechanics for physical simulation experiments

模拟样品共 8 件,涵盖了从气煤至超无烟煤的 煤级范围.根据实验要求,利用取样钻沿煤层层理 面方向在每件大煤样上钻取直径为 50 cm、高为 100 cm 的 4 个圆柱状子样.将煤样端面切削平整, 圆柱子样端部的碎煤样用于样品基本性质的分析, 样品的加工精度按国际岩石力学学会(ISRM, 1981)推荐的标准进行.实验结果见表 1^[4].

	表] 实验样品及实验结果							
Table 1	The test	ing samples	and th	e testing	results			

煤样	采样位置	$R_{ m o,max}/=$ $\frac{\%}{6}$	三轴压缩($P_c=8$)									
			自然状态		水饱和		气、水饱和			1		
			P_0	E	μ	M_s	${P}_0$	E	μ	${P}_0$	E	μ
1#	晋城成庄矿,3煤	3.83	40	3 168	0.17	1.94	40	3 104	0.31	24	1 829	0.26
2 #	高平望云矿,3煤	2.17	78	4 200	0.17	1.16		3 049	0.25	54	3 648	0.29
3#	潞安常村矿,3煤	2.10	52	3 650	0.16	1.23	42	3 351	0.20	59	4 536	0.28
4 #	潞安五阳矿,3煤	1.89	39	3 529	0.17	0.97	41	3 360	0.19	22	2 380	0.43
5 #	霍州李家村矿,3煤	0.89				0.82	44	4 296	0.11	54	4 471	0.12
6 #	阳泉一矿,3煤	2.24	52	4 840	0.23		23.8	2 810	0.38	18.5	1 960	0.12
7 #	左权石港矿,15煤	2.30	56	3 7 3 0	0.45		34.8	2 630	0.29			
8 #	阳城卧庄矿,3煤	4.29	70	4 230	0.28		62	4 550	0.36	52	4 250	0.42

注: P_0 一抗压强度,MPa; P_c 一围压,MPa;E一弹性模量,MPa; μ 一泊松比; M_s 一煤样水饱和含量,%.

3 煤基块弹性能与地质控制因素之间的关系

3.1 煤基块弹性能与有效应力之间的关系

作用于煤储层中的地应力,一部分由储层孔 隙、裂隙中的流体承受,称为孔隙压力;一部分由煤 基块承受,称为有效应力^[5].有效应力与煤储层的 埋藏深度之间关系紧密,一般来说,随着煤层埋藏 深度的增加,上覆地层的垂向应力增大^[5-9],在孔隙 压力达到饱和的情况下,多余应力将全部转化为有 效应力,由煤基块承担.因此,随着埋藏深度的增 加,有效应力相应增大,二者呈正相关关系.

从图 2 中可以看出,无论煤储层埋藏深度如何

增加,总体来说,不同煤级的煤基块弹性能都随着 有效应力的增加而增大,即在不同的深度点上,煤 基块弹性能与有效应力二者呈正相关关系,这一点 从公式(2)中也可以看出来.而且,不同煤级演化程 度其基块弹性能的大小变化规律有很强的趋势性. 一般来看,无烟煤的基块弹性能要低于瘦煤一贫 煤,而大于焦煤,三者的排列规律表现为:瘦煤一贫 煤的基块弹性能最大,无烟煤次之,焦煤最小.

实验过程中还发现,无论是瘦煤一贫煤还是无 烟煤,随着煤储层埋藏深度的增加,基块弹性能都 越来越小.例如,无烟煤煤级的煤体,其基块弹性能 在不同深度(<500 m,500~800 m,800~1 000 m, 1 000~1 500 m 有所不同,随着深度增加而逐渐减 少,即煤基块弹性能与储层埋藏深度二者之间呈显 著的负相关关系.中低煤级煤也存在相同的规律 性.研究认为,这种现象是因为,随着围压增大或埋 藏深度增加,煤体弹性模量逐渐增加,而且变化幅 度很大,其泊松比却变化不大(表 1),从而使基块 弹性能降低.



Fig. 2 The influence of the effective stress on coal matrix flexibility energy

3.2 煤基块弹性能与煤级之间的关系

不同煤化程度的自然煤样、水饱和煤样、气水 饱和煤样的基块弹性能与有效应力的相关关系如 图 3 所示.在无烟煤系列中(图 3a),气水饱和煤样 的煤基块弹性能最大,自然煤样次之,水饱和煤样 最低;在瘦煤-贫煤系列中(图 3b,3c),气水饱和煤 样的煤基块弹性能最小,自然煤样与水饱和煤样二 者相差不大;而在肥煤系列中(图 3d),虽然气水饱 和煤样的煤基块弹性能仍然最小,但与水饱和煤样 的煤基块弹性能大小却相当接近,这种情况说明在 低煤级煤中,气、水的存在对煤基块弹性能的影响 不大.





Fig. 3 The contrast of coal matrix flexibility energy of different coal samples

总而言之,煤基块弹性能与煤级之间的关系表 现为:随着煤级的增高,气水饱和煤样的基块弹性 能显著增大.这是由于无烟煤的高变质程度使其弹 性模量显著降低,在泊松比变化不大的情况下,使 得其基块弹性能远高于其它煤种.如果将煤化作用 程度转化为相应的受热温度来看,很明显,煤基块 弹性能随着温度的增高而显著增大.

3.4 地下流体对煤基块弹性能的"蚀损"作用

实验表明,煤体吸附气、水介质后,发生膨胀 (图 4),当这种膨胀受到外部空间的限制时,就会 产生膨胀应力,形成膨胀能^[4-5].膨胀能随流体压力 的增加而增大,但增加的速度随压力的增大而变 缓,并且煤体裂隙中气、水介质极化率增大,膨胀能 也将增加.地下流体之所以对煤基块弹性能产生





"蚀损"作用,主要是因为煤储层孔裂隙中吸附或游 离的气、水介质,一方面减少了煤基块间相互吸引 力、煤内表面的黏结力和表面能,同时产生膨胀能; 另一方面,孔裂隙中的流体压力减少了孔隙和裂隙 闭合的正应力^[11],降低了孔隙、裂隙面的摩擦系 数,使断裂面的滑移摩擦阻力下降,有助于变形发 展,使煤体强度和弹性模量降低.

4 结 论

煤层气成藏与地质历史时期的地层能量场演 化息息相关,它随着能量系统的动态平衡、聚集散 失而变化,既可以形成新的气藏,也可能破坏原有 气藏.煤储层物性是储层弹性能的具体表现形式, 包括煤基块弹性能、气体弹性能和水体弹性能,它 们一起共同制约着煤层气的逸失和聚集,控制着煤 层气成藏的可能性和可采性.

煤基块是煤层气藏与成藏动力学因素的共同 物质基础,这就使得煤基块弹性能在储层能量中占 据了主导地位,从而成为研究煤层气成藏的关键. 通过煤基块弹性能物理模拟实验,结合煤基块弹性 能的量化公式,进一步的研究结果表明:煤基块弹 性能受到地应力、煤岩体弹性模量、泊松比的影响, 与不同地质历史时期的储层埋藏深度和煤级演化 程度密切相关,受控于地层构造应力能和热应力 能.

参考文献:

1

- [1] 秦 勇.中国煤层气地质研究中的若干基础问题 [A].赵庆波,张建博.中国煤层气研究与勘探进展 (一)[C].徐州:中国矿业大学出版社,2001.34-36.
- [2] 秦 勇.中国煤层气勘探开发所面临的若干科学问题 [A].赵庆波,张建博.中国煤层气研究与勘探进展 (二)[C].徐州:中国矿业大学出版社,2003.11-16.
- [3] 吴财芳,曾 勇,秦 勇.煤与瓦斯共采技术的研究现 状及其应用发展[J].中国矿业大学学报,2004,33 (2):137-140.

Wu C F, Zeng Y, Qin Y. Present situation, application, and development of simultaneous extraction of coal and gas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33 (2): 137-140.

- [4] 吴财芳.煤层气成藏能量动态平衡及其地质选择过程 [D].徐州:中国矿业大学资源与地球科学学院, 2004.
- [5] 傅雪海.多相介质煤岩体物性的物理模拟与数值模拟

[D]. 徐州:中国矿业大学资源与地球科学学院, 2001.

[6] 姜 波,秦 勇,范炳恒,等.淮北地区煤储层物性及煤层气勘探前景[J].中国矿业大学学报,2003,30
 (5):433-437.

Jiang B, Qin Y, Fan B H, et al. Physical property of coal reservoir and exploration prospects for coalbed methane in huaibei area [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 30(5): 433-437.

[7] 韦重韬,桑树勋.河东煤田乡宁地区主煤层储层物性 特征及意义[J].中国矿业大学学报,1997,26(4):45-48.

Wei C T, Sang S X. Characteristics and their interpretation of main CBM reservoirs in the southern hedong coal field, Xiangning, Shanxi[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26 (4):45-48.

[8] 李贵中,秦 勇,戴西超,等.沁水盆地山西组煤储层 含气性及控制因素分析[J].中国矿业大学学报, 1999,28(4):350-352.

Li G Z, Qin Y, Dai X C, et al. Gas-Bearing characteristics and geological factors of the coal seam No. 3 in the northern qinshui basin, Shanxi [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999,28(4):350-352.

[9] 陈金刚,秦 勇,宋全友,等.割理方向与煤层气抽放 效果的关系及预测模型[J].中国矿业大学学报, 2003,32(3):223-226.

Chen J G, Qin Y, Song Q Y, et al. Coupling relationship between direction of coalbed cleat and methane drainage effect and its prediction model[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003,32(3):223-226.

- [10] 鲜学福,许 江,王宏图.煤与瓦斯突出潜在危险区 (带)预测[J].中国工程科学,2001,3(2):39-46.
 Xian X F, Xu J, Wang H T. Predication of potential danger region (zone) of coal and gas outburst[J].
 Engineering Science, 2001,3(2):39-46.
- [11] 叶建平,郭海林,武 强,等.铁法盆地煤层气成藏模 式及产能预测[J].中国矿业大学学报,2002,31(2): 204-207.

Ye J P, Guo H L, Wu Q, et al. Research on reservoir-forming pattern of coalbed methane and productivity prediction in tiefa basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002,31 (2):204-207.