

高煤阶煤层气藏储层应力敏感性研究

陈振宏¹⁾, 王一兵¹⁾, 郭凯²⁾, 孙钦平¹⁾, 张亚蒲¹⁾

1) 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊, 065007;

2) 中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083

内容提要:水相存在使煤储层应力敏感性更加复杂,是煤层气开发需要特别关注的问题。通过开展煤储层干样与湿样的应力敏感性实验,分析了煤储层应力敏感性特征。应用数值模拟方法,研究了煤储层应力敏感性对煤层气井产能的影响。研究结果显示,煤储层具有强应力敏感性并且明显不可逆性。有效压力从 2 MPa 增加到 10 MPa,气相渗透率降低 90%;初始渗透率越低,应力敏感性越强,有效应力降低以后,煤岩渗透率不能恢复到原始水平。水相存在使得煤层气藏应力敏感性更强,有效压力从 2 MPa 增大到 3 MPa,3 块煤岩湿样渗透率分别降低了 66.0%、50.4% 和 58.5%,而干岩芯渗透率降低幅度均低于 50%。同时随含水饱和度增高,表现出应力敏感性愈强的趋势。煤储层应力敏感性极大地影响煤层气井产能,储集层原始渗透性越差,应力敏感对产量的影响越大。因此,煤层气生产过程中,特别是煤层气排采初期,地层压力较高,一味地增大生产压差可能不会增加煤层气井产量。

关键词:煤储层;应力敏感性;含水饱和度;数值模拟;产能

在煤层气开发过程中,随着水、气介质的排出,煤岩体与流体发生一系列地质效应。一方面,煤层气的解吸产出造成煤基质收缩,孔、裂隙空间被扩大,渗透率增大(Scott et al., 1995; George et al., 2001);另一方面,排水降压过程中煤储层表现出较强的应力敏感性(Somerton, 1974; McKee, 1986; 林柏泉等, 1987; 杨胜来等, 2006)。应力敏感性是指当有效压力增大时,岩石的孔隙度、渗透率等物性参数值降低的现象。这种正、负效应影响着煤层气解吸—扩散—渗流—产出的全过程,是煤层气持续开发和经济评价所需考虑的重要因素。

煤储层是一种双孔隙介质,其渗透率受应力敏感性、基质收缩及克林肯伯格效应的综合影响(Harpalani et al., 1990; Mavor et al., 1990; 傅雪海等, 2004)。尤其是排采初期,应力敏感性起主导作用(Harpalani, 1984)。前人对煤储层应力敏感性开展了较多研究(Sun, 1990; 胡耀青等, 1996; 姜德义等, 1997; 曾联波等, 2007; 谢然红等, 2007),但忽视了水相存在对煤样应力敏感性的影响。由于煤层气藏开发过程中通常具有较高的含水饱和度,排采过程中,煤层中流体不断产出,流体压力下降,引起煤

层应力的持续变化必然对煤层结构产生影响,导致煤储层物性发生改变,更重要的是,煤层中流体饱和度的变化极大地影响煤层渗透性和气/水流动。因此有必要开展综合研究,并深入研究水相对煤样压敏的影响。

1 煤储层原地受力分析

为了尽可能接近煤层气储层的真实环境,首先对煤储层进行原地受力分析(图 1)。煤层在水平方向上受水平压力,该压力是由于煤层在水平方向上受压而产生的,一般小于垂向压力,由于构造应力的影响,水平压力在各方向上的大小会有所差异。在煤层中任意选择一个水平面,该平面垂向上,煤层受 3 个力:向下的上覆底层压力 p_z 、向上的煤基质承受的力 p_s 、向上的裂隙系统内水的压力 p_w 。

上覆地层压力主要由地层自身重力引起,其大小可以通过计算上覆地层重力的加权平均而得,具体计算用公式: $p_z = \sum \gamma_i h_i$ (γ_i 为单位厚度地层的自重压力, MPa/m, 数值上等于单位体积地层重量除以受力面积, h_i 为单位地层垂向高度, m)。因为受力分析所选择的平面是静止的,所以在垂向上的 3

注:本文为国家“973”项目“煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(编号 2002CB211705)资助成果。

收稿日期:2008-05-07;改回日期:2008-08-19;责任编辑:周健。

作者简介:陈振宏,男,1979 年生。博士,主要从事石油天然气地质及煤层气地质方面的研究。通讯地址:065007,河北省廊坊市万庄,中国石油勘探开发研究院廊坊分院煤层气经理部;电话:010-69213542;Email:cbmjimcoco@126.com。

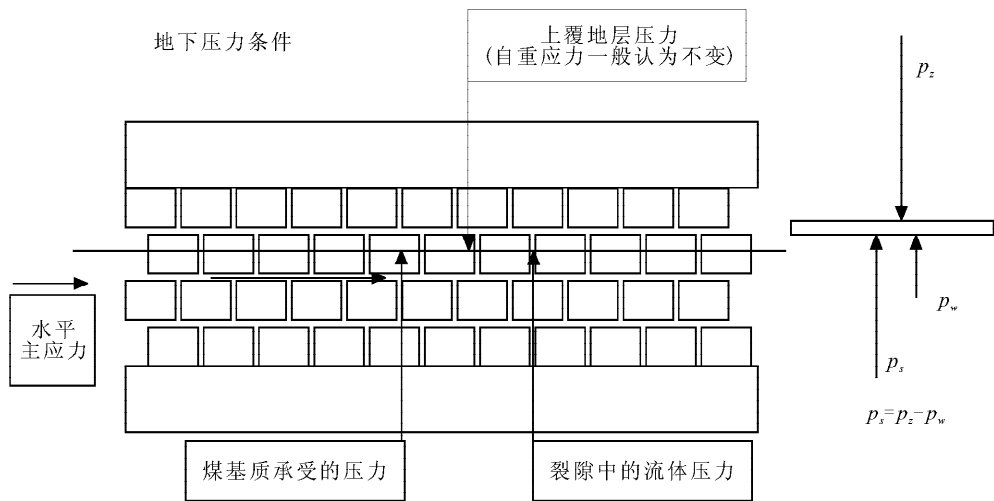


图 1 煤储层原地受力分析示意图(据陈振宏,2007)

Fig. 1 Sketch map of mechanical analysis in place about coal reservoir (after Chen Zhenhong,2007)

个力受力平衡,即:

$$p_z = p_s + p_w \tag{1}$$

因此,根据公式(1)解得此时煤基质承受的力 p_s :

$$p_s = p_z - p_w \tag{2}$$

排水降压, p_w 急剧降低, p_z 基本维持恒定,导致 p_s 增加,即作用在煤层基质上的有效压力增大。因此,采用增加有效压力的方式模拟煤层气开发的过程。

2 煤储层应力敏感性实验

2.1 实验方法

样品取自煤层气开发的地区沁水盆地南部郑庄区块及樊庄区块,6 块样品孔隙度 2.90%~5.05%,煤岩原始渗透率 $0.015 \times 10^{-3} \sim 2.880 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1)。3 块郑庄区块样品置于烘干机中 48 h,制成干煤样,另外 3 块樊庄区块样品置于采集的地层水中 48 h,作为含水煤样。

表 1 实验岩芯基础数据表

Table 1 Sample parameters of stress sensitivity experiment from Qinshui basin						
样品号	地区	类型	直径 (cm)	长度 (cm)	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1	郑庄	干样	2.50	3.91	3.45	0.220
2	郑庄	干样	2.49	3.52	2.90	2.880
3	郑庄	干样	2.50	3.98	4.50	0.060
4	樊庄	湿样	2.50	4.20	3.20	0.041
5	樊庄	湿样	2.49	4.71	3.10	1.100
6	樊庄	湿样	2.49	3.21	5.05	0.099

实际操作中,保持进口气体压力 3 MPa 不变,首先利用平流泵,逐步加大围压值(图 2),每个围压增加过程控制在 30 min 以上,并测定每个围压下岩

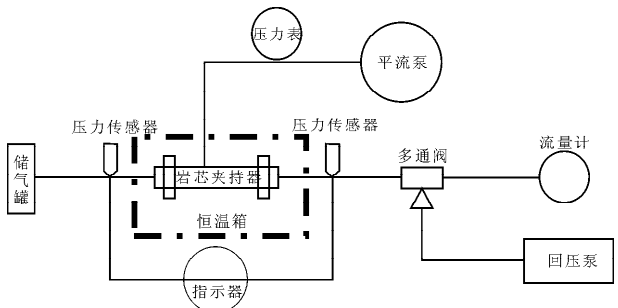


图 2 应力敏感性实验流程示意图

Fig. 2 Flow diagram of stress sensitivity experiment about coal reservoir

样的渗透率。然后逐步减小岩样所受围压值,围压减小过程控制在 1 h 以上,以保证岩样变形达到一定的平衡状态,同样测量每个围压下岩样的渗透率。煤样的最大围压值为 10 MPa,实验气体采用氮气。

煤芯的受力分析表明,围压 p 可以直接表征煤基质的有效压力 p_s ,因此,增加煤样的净围压 p 能够模拟地层有效压力 p_s 的增加。实验中,测量渗透率 K 随围压 p 变化的情况,分析储层应力敏感的程度。

2.2 实验结果及讨论

为了更为直观的描述煤储层应力敏感性对气体渗透率的影响,定义无因次渗透率 K/K_i 为气体渗透率 K 与煤岩初始渗透率 K_i 的比值。

实验结果如表 2。从实验结果可以发现,随着围压的增加煤样渗透率逐渐降低,并且其应力敏感性很强(图 3)。所测试的 3 块煤岩样品,当围压增加到 10 MPa 时,其无因次渗透率均低于 10%,如 2 号岩芯,当有效压力增加到 10 MPa 时岩样渗透率

仅为初始渗透率的1.6%，即渗透率减少了92.5%；当煤层气岩样有效压力小于5 MPa时，渗透率随有效压力增加快速下降，表现出强力应力敏感性；而当岩样受有效压力大于5 MPa后，渗透率随有效压力的增加下降速度减缓，应力敏感性减弱；有效压力大于8 MPa后渗透率基本上就不再减小。

表 2 煤层气藏干岩芯压敏实验结果

Table 2 Data of dry coal-core stress sensitivity experiment

实验阶段	围压(MPa)	无因次渗透率 K/K_i 实验结果		
		样品 1	样品 2	样品 3
围压增大	2.0	1.000	1.000	1.000
	3.0	0.704	0.706	0.616
	4.0	0.486	0.523	0.367
	5.0	0.331	0.319	0.219
	6.0	0.178	0.208	0.133
	7.0	0.145	0.175	0.086
	8.0	0.085	0.109	0.058
	9.0	0.038	0.075	0.041
	10.0	0.018	0.062	0.031
围压降低	9.0	0.018	0.059	0.031
	8.0	0.020	0.086	0.036
	7.0	0.028	0.092	0.043
	6.0	0.052	0.105	0.059
	5.0	0.105	0.128	0.083
	4.0	0.164	0.142	0.125
	3.0	0.279	0.174	0.221
	2.0	0.437	0.251	0.433

对比3块煤芯的初始渗透率，可以发现初始渗透率越低的样品，渗透率的降低幅度相对也越大。这说明渗透率越差的储层，应力敏感性越强，渗透率受到的伤害也越严重。

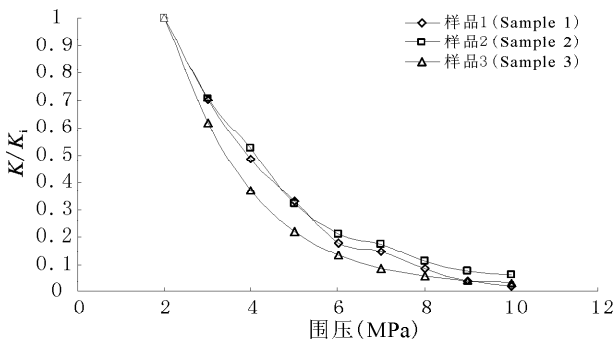


图 3 围压增加过程中干样渗透率变化特征

Fig. 3 Permeability change of dry coal-core with confinement pressure increasing

同时，实验结果证明煤层气藏的应力敏感性具有较明显的不可逆性。当有效压力降低以后，煤岩

样品的渗透率有所恢复，但是全都不能恢复到原始水平，渗透率降低幅度都高于50%，有的甚至下降了85%（图4）。这种现象的原因是由于裂隙闭合后在卸压过程中不易恢复张开（Ates et al.，1998；叶建平等，1999；陈振宏等，2008）。

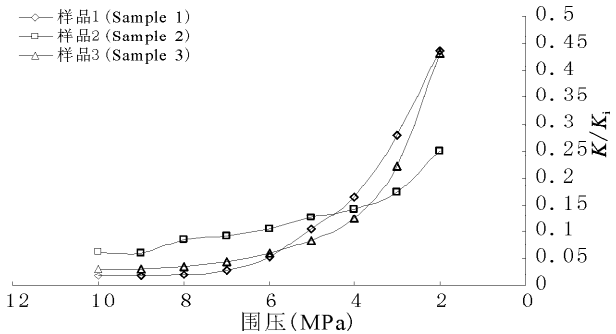


图 4 围压恢复(降低)过程中干样渗透率变化特征

Fig. 4 Permeability change of dry coal-core with confinement pressure decreasing

由此表明对于煤层气藏，开发过程中的压力变化会造成岩石、孔隙变形，对储层的渗透性能造成伤害，而且孔隙的变形具有塑性变形的特征（Gayer et al.，1996；Qin et al.，2005）。在实验条件下，煤层渗透率产生不可逆下降，不可逆程度高于50%。

以上的实验结果说明，在煤层气藏的开发过程中，单纯增大生产压差，可能会导致地层渗透率的急剧降低，影响煤层气井产量的提高。因此，煤层气藏开发不能一味地快速降低井底压力。

3 含水饱和度对应力敏感性的影响

煤层气藏在开发过程中储层始终有较高的含水饱和度，为了探讨煤层气藏含水岩芯的压敏性，选用3块樊庄区块的岩芯采取与前面相似的办法，测量岩样的渗透率随有效压力的变化。样品4、样品5与样品6的含水饱和度(S_w)分别为37.5%、45.2%及50.5%。

实验结果如表3。试验结果表明，含水岩芯的应力敏感性更明显（图5）。与前面干岩芯的实验结果对比表明含水岩芯的渗透率随有效压力的增加下降更快，应力敏感性更明显，即应力造成的渗透率降低幅度更大，伤害程度更大。围压从2 MPa增大到3 MPa时，3块煤岩样品的渗透率分别降低了66.0%、50.4%和58.5%。前面干岩芯的实验结果，渗透率降低幅度均低于50%。

表 3 煤层气藏湿岩芯压敏实验结果

Table 3 Data of wet coal-core stress sensitivity experiment

实验阶段	围压 (MPa)	无因次渗透率 K/K_i 实验结果		
		样品 4 ($S_w=37.5\%$)	样品 5 ($S_w=45.2\%$)	样品 6 ($S_w=50.5\%$)
围压增大	2.0	1.000	1.000	1.000
	3.0	0.340	0.496	0.415
	4.0	0.164	0.307	0.218
	5.0	0.097	0.180	0.119
	6.0	0.055	0.102	0.066
	7.0	0.029	0.064	0.035
	8.0	0.021	0.042	0.025
	9.0	0.013	0.030	0.013
	10.0	0.004	0.025	0.011
围压降低	9.0	0.008	0.028	0.011
	8.0	0.013	0.036	0.012
	7.0	0.018	0.053	0.018
	6.0	0.023	0.080	0.024
	5.0	0.040	0.097	0.037
	4.0	0.071	0.130	0.056
	3.0	0.130	0.197	0.092
	2.0	0.214	0.335	0.187

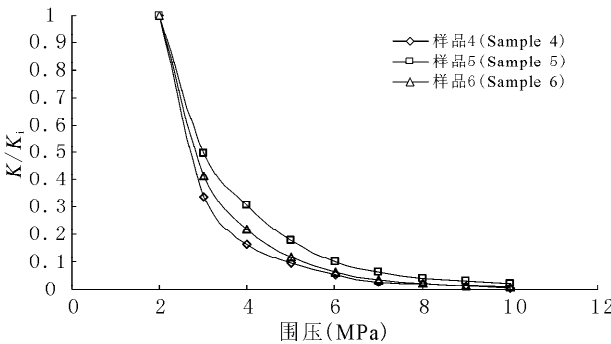


图 5 围压增加过程中湿样渗透率变化特征
Fig. 5 Permeability change of wet coal-core with
confinement pressure increasing

同时,实验结果表现出含水饱和度越高应力敏感性愈强的趋势(图 6)。对比样品 5 与样品 6,由于样品 6 的含水饱和度高于样品 5,导致样品 6 受伤害程度更大。

4 煤层气储层应力敏感性对产能影响

煤层中的应力敏感引起渗透率的降低,必然会导致煤层气渗流规律及渗流量的变化,进而影响气井的生产能力。应用数值模拟方法,以樊庄区块储层的数据为基础,建立单井的理想模型,利用应力敏感性实验数据,分析不同渗透率的储层应力敏感性以及相同渗透率不同储层应力敏感性对产能的影响,研究应力敏感性对煤层气井产能影响的程度。

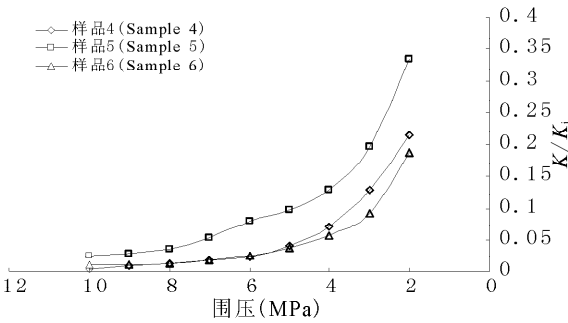


图 6 围压恢复(降低)过程中湿样渗透率变化特征
Fig. 6 Permeability change of wet coal-core with
confinement pressure decreasing

4.1 模拟方法

选用 ECLIPSE 数值模拟软件中的煤层气双重介质模块,选用网格大小为 20 m×20 m,描述渗透率随地层压力降低的变化规律,再与主模型 ECLIPSE100 耦合进行模拟计算。煤储层参数、厚度、吸附时间、Langmuir 等温吸附曲线、压缩系数等均按樊庄区块实测数据给出初值(表 4),相对渗透率和收缩系数的初值按以往模拟计算的经验数值给出初值,建立理想地质模型。

4.2 数值模拟结果及讨论

模拟结果可以明显看出,在相同的生产压差下,如果考虑应力敏感性的影响,产气量明显减少(图 7)。在生产压差达到 5 MPa 时,气井累计产量减少 20% 以上。常规天然气生产过程中,通常随着生产压差的增大,气井的产气量逐渐增加。模拟结果显示,由于煤储层应力敏感性影响,渗透率变异系数数值增大,产量的递增幅度越小,说明煤岩变形对产气量产生了重要影响。由此可以推断储层的应力敏感越显著,气体的产量也越小,不利于气体的产出。

同时,模拟结果证实,对于相同渗透率的储层来说,井底流压越低,压力衰竭程度越高,生产压差大,相应的应力敏感性越严重,产量下降程度越高。渗透率分别为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,理想无伤害的井和应力敏感伤害井的产量之比与井底流压的数值模拟计算结果显示(图 8),储集层原始渗透性越差,由压力下降引起的渗透率下降程度就越严重,表现出应力敏感对产量的影响越大。

5 结论与建议

(1)煤层气藏具有强应力敏感性。有效压力从 2 MPa 增加到 10 MPa,其气相渗透率降低到不足原

表 4 沁水盆地樊庄区块煤储层参数表

Table 4 Parameter list of coal reservoir in Fanzhuang brock, Qinshui Baisn

储层参数		高压物性参数		煤岩物性参数		气水相渗曲线			解吸附曲线 测试数据	
						气饱和度 (%)	气相相对 渗透率(%)	水相相对 渗透率(%)	压力 (MPa)	含气量 (m ³ /t)
初始气藏压力	5.5 MPa	气体比重	0.564	吨煤含气量	20 m ³ /t	0.12	0	0.25	0.078	1.367
气藏深度	550 m	地面水密度	1.0 g/cm ³	气体扩散系数	2.5×10 ⁻⁷ cm ² /s (0.00186m ² /d)	0.2	0.05	0.1	0.61	10.305
煤岩孔隙度	2%~4%	水的地层 体积系数	1.05	裂缝渗透率 (×10 ⁻³ μm ²)	0.3、0.6、0.9	0.3	0.1	0.04	1.12	17.787
基质与裂缝 孔隙体积比	99:1	水的粘度	0.5 mPa·s	临界解吸压力	4.4 MPa	0.37	0.18	0.028	1.81	25.284
气层有效厚度	5.5 m	水的压缩 系数	4.4×10 ⁻⁴ MPa ⁻¹	废弃压力	2 MPa	0.4	0.23	0.025	2.24	28.959
		压缩系数	4.35×10 ⁻⁴ MPa ⁻¹			0.45	0.35	0.02	3.05	34.839
		气藏温度	40℃			0.5	0.45	0.018	4.08	40.719

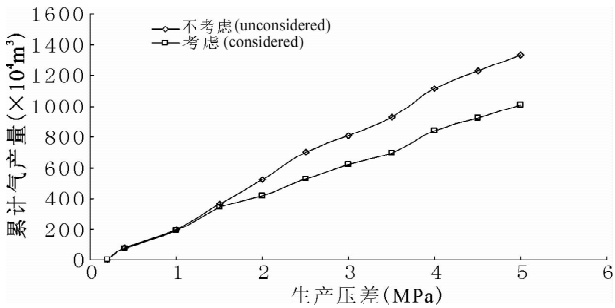


图 7 应力敏感性对煤层气产能影响的数值模拟结果
Fig. 7 Numerical simulation of CBM production
affected by stress sensitivity

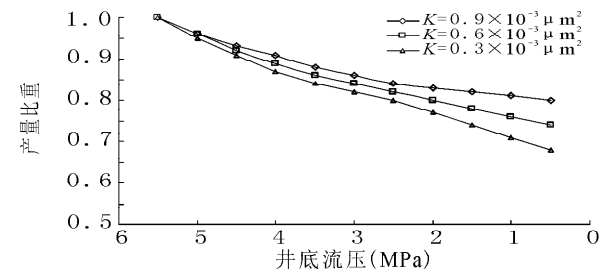


图 8 不同渗透率下应力敏感性对
产能影响的数值模拟结果

Fig. 8 Production simulation comparison of different
permeability CBM reservoir affected by stress sensitivity

始渗透率 10%；初始渗透率越低，渗透率的降低幅
度相对也越大，应力敏感性越强；应力敏感性具有明

显的不可逆性，当有效应力降低以后，煤岩渗透率有
所恢复，但是全都不能恢复到原始水平。

(2)水相存在使得煤层气藏应力敏感性更强。
含水岩芯较干岩芯的渗透率随有效压力的增加下降
更快，应力敏感性更明显，有效压力从 2 MPa 增大
到 3 MPa，3 块煤岩湿样品的渗透率分别降低了 66.
0%、50.4%和 58.5%，而干岩芯渗透率降低幅度均
低于 50%；随含水饱和度增高，表现出应力敏感性
愈强的趋势。

(3)煤储层应力敏感性极大的影响煤层气井产
能，并且储集层原始渗透性越差，表现出应力敏感对
产量的影响越大。

(4)煤层气生产过程中，特别是煤层气排采初
期，地层压力较高，由于煤储层强应力敏感性，切忌
一味地快速降低井底压力。

致谢：感谢中国石油勘探开发研究院廊坊分院
孙平高级工程师的亲切指导，感谢中国矿业大学秦
勇教授的评阅和积极建议。

参 考 文 献

陈振宏,贾承造,宋岩,等. 2007. 构造抬升对高、低煤阶煤层气藏储
集层物性的影响. 石油勘探与开发, 34(4): 461~464.
陈振宏,贾承造,宋岩,等. 2008. 高、低煤阶煤层气藏物性差异及其
成因. 石油学报, 29(2): 179~184.
傅雪海,秦勇,姜波,等. 2004. 高煤级煤储层煤层气产能“瓶颈”问题
研究. 地质论评, 50(5): 507~513.
胡耀青,赵阳升,魏锦平,等. 1996. 三维应力作用下煤体瓦斯渗透规
律实验研究. 西安矿业学院学报, 16(4): 308~311.
姜德义,张广洋,胡耀华,等. 1997. 有效应力对煤层气渗透率影响的

研究. 重庆大学学报, 20(5):22~25.

林柏泉,周世宁. 1987. 煤样瓦斯渗透率的实验研究. 中国矿业大学学报, (1):21~28.

谢然红,肖立志. 2007. 储层流体及其在岩石孔隙中的核磁共振弛豫温度特性. 地质学报, 81(2):280~284.

杨胜来,杨思松,高旺来. 2006. 应力敏感性及液锁对煤层气储层伤害程度实验研究. 天然气工业, 26(3):90~92.

叶建平,史保生,张春才. 1999. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素. 煤炭学报, 24(2):118~122.

曾联波,李忠兴,史成恩,等. 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因. 地质学报, 81(2):174~180.

Ates Y, Barron Y. 1998. Effect of gas absorption on the strength of coal. Min. Sci. Tech., 6(3):11~12.

Gayer R, Harris I. 1996. Coalbed Methane and Coal Geology. London: The Geological Society, 1~338.

George J D, Barakat M A. 2001. The change in effective stress associated with shrinkage from gas deportation in coal. International Journal of Coal Geology, 45 (2~3):105~113.

Harpalani S. 1984. The effect of gas evacuation on coal permeability test specimens. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech., 21(3):361~364.

Harpalani S, Schraufnagel R A. 1990. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal. Fuel, 69 (5): 551~556.

Mavor M J, Owen L B, Pratt T J. 1990. Measurement and evaluation of coal sorption isotherm data. SPE 20728, SPE 65th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, September 23~26, 1~14.

McKee C R. 1986. Using permeability vs depth correlations to assess the potential for producing gas from coal seams. Quarterly Review of Methane from Coal Seams Technology, 4(1):15~26.

Qin Yong, Fu Xuehai, Wu Caifang, et al. 2005. Self-adjusted elastic action and its CBM pool-forming effect of the high rank coal reservoir. Chinese Science Bulletin, 50 (Supp.): 99~103.

Scott A R, Kaiser W R. 1995. Hydrogeologic factor affecting dynamic open-hole cavity completions in the San Juan Basin, U. S. A. Proceedings of the 1995 Coalbed Methane Symposium, the University of Alabama/Tuscaloosa, May 15~19, 139~147.

Somerton W H. 1974. Effect of stress on permeability of coal. Int. J. Rock Mech. Sci., (12):129~145.

Sun Peide. 1990. A new method for calculating the gas permeability of a coal seam. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 27 (4):325~327.

Stress Sensitivity of High-rank Coalbed Methane Reservoir

CHEN Zhenhong¹⁾, WANG Yibing¹⁾, GUO Kai²⁾, SUN Qinpings¹⁾, ZHANG Yapu¹⁾

1) Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Langfang, Hebei, 065007;

2) Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing, 100083

Abstract

Water facies in coal beds has been a critical problem in coal development and has been received a wide attention because it makes more complicated stress sensitivity of coal reservoir. This study analyses characteristic of stress sensitivity of coal beds by an experiment on dry and wet samples from coad beds, and its influence on productivity of gas well using digital modeling. The research shows distinctly irreversible, intensive stress sensitivity of coal reservoir. It was proved that the gas permeability decreased about 90% with efficient pressure increasing from 2 MPa to 10 MPa; the lower the initial pressure, the more intensive stress sensitivity. The permeability of coal rock could not be restored completely even if efficient pressure was lowered. Existence of water facies makes stress sensitivity much intensive. The experiment shows that the permeability of the wet samples decreased 66.0%, 50.4% and 58.5% with efficient pressure increasing from 2 MPa to 3 MPa, while the permeability of a couple of the dry samples decreased averagely by less than 50%. Meanwhile, stress sensitivity was continuously intensive with increasing of water saturation. The sensitivity of coal beds greatly affects output of oil well: the worse the permeability of original reservoir is, the greater the sensitivity influences over output of coalbed gas. Therefore, during the production of coal beds, especially at the beginning of discharge and mining, increasing pressure difference doesn't advance the output of coalbed gas.

Key words: coalbed reservoir; stress sensitivity; water saturation; numerical simulation; production