

煤层气藏应力敏感性实验研究

张亚蒲¹,何应付²,杨正明¹,刘学伟¹
(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北 廊坊 065007;
2. 大庆油田有限责任公司,黑龙江 大庆 163712)

摘 要:针对煤层气藏储层应力敏感性强的特点,通过改变围压和孔隙压力,进行了煤层气藏干岩心和含水岩心的应力敏感性实验研究。系统地研究了煤层气藏的岩石变形特征,并将应力敏感性的实验数据拟合得到渗透率随有效压力变化的数学方程。研究结果表明:水相的存在使得岩心的应力敏感性更强,并且这一规律可以用指数函数关系来描述。为煤层气有效合理地开发提供了理论依据。

关键词:煤层气;渗透率;应力敏感性;有效压力

中图分类号:TE132.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1926(2010)03-0518-04

0 引言

众所周知,地应力是影响储层物性参数的重要因素,特别是对地应力敏感的储层。在油气田开发过程中,由于孔隙压力不断降低,使地层有效压力增加,导致地应力分布不均、岩石变形,引起储层的孔隙度和渗透率等物性发生变化。储集层的应力敏感性就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^[1]。对于煤层气藏,由于其渗透率本身很低,当排水降压时地层压力下降而引起岩石变形,会对渗透率产生很大影响,从而导致气井产能下降,最终影响整个煤层气田的开发效果。因此,研究煤层气藏的应力敏感性对正确认识和评价煤层气藏以及指导煤层气藏的开发都有着非常重

要的现实意义^[2]。

煤层气藏的应力敏感性主要是有效压力的改变导致裂隙的开启和闭合,进而导致渗透率的改变,而且这些裂隙在闭合后再卸压过程中不易张开,宏观上表现为随着有效压力的增加渗透率滞后的现象。因此,本次实验采用增加煤样品的净围压模拟地层有效压力的变化,并测量渗透率随净围压变化的情况,来分析储层应力敏感的程度。

1 实验准备及实验方法

本次研究实验样品取自沁水盆地郑庄区块,共 4 块干煤样品和 3 块含水煤样品,有关岩心的基本物性参数见表 1。

表 1 岩心应力敏感性评价

岩心编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度/%	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	渗透率损失/%	敏感性评价
JS5-1	2.50	3.91	3.45	0.220	98.2	极强
JS14-2	2.49	3.52	2.90	2.880	93.8	极强
JS17-1	2.49	5.65	3.45	0.015	99.9	极强
G24-1	2.50	3.98	4.50	0.060	96.9	极强
JS12-1(含水)	2.49	4.71	3.10	1.100	97.5	极强
JS3-1(含水)	2.49	3.21	5.05	0.099	98.9	极强
JS4-1(含水)	2.50	4.20	3.20	0.041	99.6	极强

实际操作中,保持进口压力不变,首先逐步加大围压值,每个围压增加过程控制在 30 min,并测定每个围压下岩样的渗透率。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。岩样的最大围压值为 10MPa。

2 实验结果分析

2.1 有效压力变化对岩心渗透率的影响

首先选取 4 块干煤样品进行实验研究,实验结果见图 1。为了更为直观地描述岩心应力敏感性对气体渗透率的影响,定义无因次渗透率为气体渗透率与初始渗透率的比值。

从实验结果看,随着有效压力的增加煤样品渗透率逐渐降低,并且其应力敏感性增强。所测试的 4 块煤层气岩样,当有效压力增加到 10MPa 时,其无因次渗透率均低于 10%,如 JS14-2 岩样,当有效压力增加到 10MPa 时,岩样渗透率仅为初始渗透率的 6.2%,即渗透率降低了 93.8%。

另外,从实验结果可以发现,当煤层气岩样有效压力小于 5MPa 时,渗透率随有效压力增加快速下降,应力敏感性较强;而当岩样所受有效压力大于 5MPa 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。比如 G24-1 岩样,当有效压力增加到 5MPa 时,渗透率仅为初始渗透率的 21.9%,下降了 78.1%,其他 3 块样品也有相同的规律。

由低渗透气藏应力敏感性的研究结果表明含水岩心的应力敏感性更明显^[3],并且含水饱和度越高,应力敏感性越强。煤层气藏在开发过程中储层始终含有较高的含水饱和度,为了探讨煤层气藏含水岩心的压敏性,本文选用 3 块沁水盆地樊庄区块的岩心,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情况。测试结果见图 1。

从实验结果可以看出煤层气藏含水岩心具有较强的应力敏感性,其渗透率随着有效压力的增加而减少,并且渗透率的降低幅度是逐渐减弱的。对比 3 块含水煤层气岩心基础物性可以发现,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就越严重。

与干岩心的实验结果对比表明含水岩心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。比如围压从 2MPa 增大到 3MPa 时,3 块含水煤岩

样品的渗透率分别降低了 50.4%、58.5% 和 66.0%。而干岩心的实验结果,除 JS17-1 岩心样品外,其他岩心的渗透率降低幅度均低于 50%。

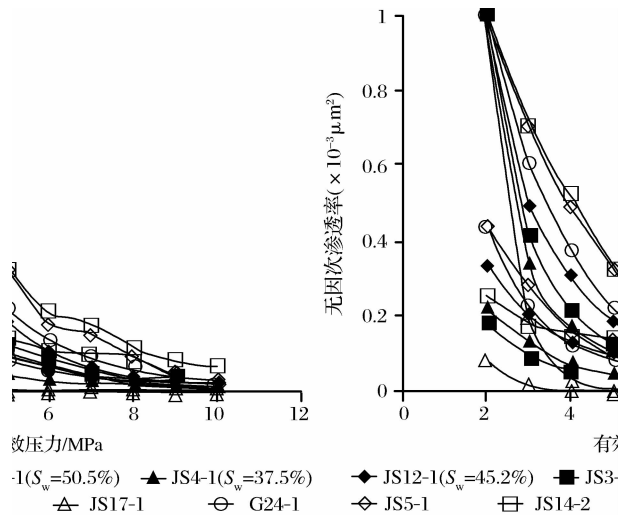


图 1 岩心渗透率与有效压力关系

根据国家标准 SY/T 5358-2002 中应力敏感性评价指标可知,煤层气藏储层都属于极强应力敏感性储层(表 1)。

2.2 岩心压敏效应指数拟合^[4]

对实验结果用 2 种常用函数(指数函数和幂函数)进行回归可以求出岩样无因次渗透率随有效压力变化的关系式。比如对 JS5-1 岩心进行回归,结果如图 2 所示。所有岩心的拟合公式系数见表 2,其中表达式如下:

$$\frac{K}{K_i} = be^{-ax}; \frac{K}{K_i} = b'x^{-a'}$$

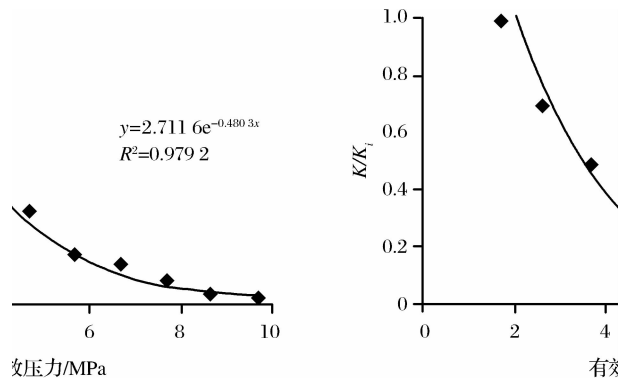


图 2 JS5-1 岩心应力敏感性实验数据拟合结果

从以上的拟合结果看,采用 2 种函数回归相关系数都较高,表明这 2 种拟合关系式都是有效的。对比 2 个关系式的拟合结果可以看出指数函数的相关系数更高。并且如果采用指数函数关系式,当有效压力为 0 时,储层的渗透率即为初始渗透率,这与实际情况相符,但是采用幂函数关系就会导致储层

渗透率为无限大,这与实际不符,因此,煤层气藏岩心的渗透率压敏关系可以采用指数函数关系式描述。另外对比指数函数的拟合结果也可以发现,含水条件下指数系数 a 平均值为 0.550 0,也大于干岩心的拟合结果值 0.501 1。

表 2 煤样应力敏感性实验数据拟合结果

岩心编号	指数函数关系		
	a	b	R
JS5-1	0.480 3	2.711 6	0.979 2
G24-1	0.443 0	1.625 2	0.992 1
JS17-1	0.895 4	1.116 5	0.839 4
JS14-2	0.355 3	1.831 9	0.992 8
平均	0.501 1	1.790 8	0.965 8
JS12-1(含水)	0.470 6	1.810 7	0.983 7
JS3-1(含水)	0.563 8	1.656 9	0.985 3
JS4-1(含水)	0.615 5	1.711 3	0.983 9
平均	0.550 0	1.726 3	0.984 3

在煤层气田开发过程中,常有多次开井和关井的情况,对应力敏感性较强的气井,每次开井和关井都会对渗透率产生一定的影响,这种影响有些是暂时的,有些是永久的。在进行应力敏感性实验的同时也进行了降压实验,以评价压力恢复对煤层气藏渗透率的影响。从实验结果可以看出,当有效应力降低以后,煤岩样品的渗透率有所恢复,但是不能全都恢复到原始水平,渗透率降低幅度都高于 50%,有的甚至下降了 75%。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,渗透率产生不可逆下降,不可逆程度高于 50%。对比气藏岩心的实验结果发现,气藏岩心渗透率的恢复程度高于煤层气藏岩心。

以上的实验结果说明了在煤层气藏的开发过程中,通过增大生产压差以获得较高产量的做法,可能由于地层渗透率的急剧降低而起到相反的效果。

2.3 模拟开采过程渗透率的变化

将图 1 有效压力区间 5~10MPa 扩大到图 3,即表示地层压力与无因次渗透率的关系,假设煤层气藏的废弃压力为原始地层压力的 15%,则废弃压力为 0.75MPa。所对应的储层渗透率变化程度如表 3。当地层压力达到废弃压力时,渗透率为初始值的 20%左右。需要重点指出的是,此时要考虑到煤层气吸附解吸的特性,煤层气只有达到解吸压力以下才有可能大量解吸产出^[5-6]。因此,原始压力变

化到解吸压力过程造成的渗透率的变化是不可避免的,也就是说这个过程可以适当地加快排水速度,使地层压力尽快下降。当煤层气大量解吸后,要控制压力下降的速度,尽可能减少由于压力下降而引起的渗透率大幅度下降。

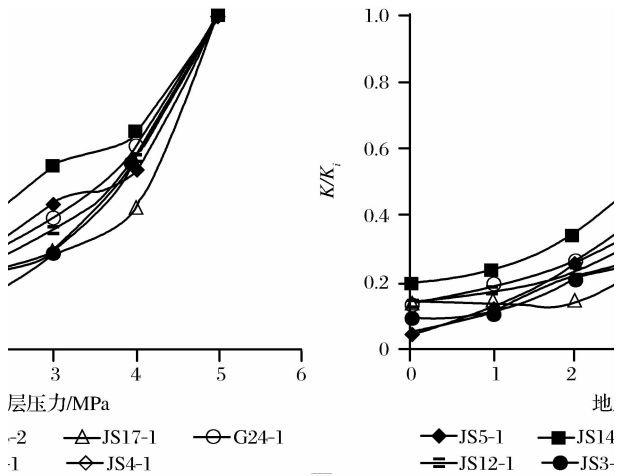


图 3 模拟开采渗透率变化

表 3 渗透率随地层压力的变化

岩心编号	孔隙度/%	渗透率 /($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	至废弃压力 渗透率损失/%
JS5-1	3.45	0.220	98.2
JS14-2	2.90	2.880	93.8
JS17-1	3.45	0.015	99.9
G24-1	4.50	0.060	96.9
JS12-1(含水)	3.10	1.100	97.5
JS3-1(含水)	5.05	0.099	98.9
JS4-1(含水)	3.20	0.041	99.6

3 结论

- (1)煤层气藏属于极强应力敏感性储层,并且含水岩心应力敏感性要强于干岩心应力敏感性。
- (2)岩心应力敏感性可用指数函数表达。
- (3)在煤层气藏的开发过程中,地层压力下降到解吸压力之前可以适当加快压力下降速度。达到解吸压力以下,通过增大生产压差以获得较高产量的做法,可能由于地层渗透率的急剧降低而起到相反的效果。

参考文献:

[1] Jiang Deyi,Zhang Guangyang,Hu Yaohua,et al. Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress [J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition, 1997,20(5):22-25.[姜德义,张广洋,胡耀华,等.有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J].重庆大学学报:自然科学版, 1997,20(5):22-25.]

[2] Lin Boquan,Zhou Shining. An experimental study on permeability of coalbed methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology ,1987,15(1):21-28. [林柏泉,周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业大学学报,1987,15(1):21-28.]

[3] Yang Manping,Li Yun,Li Zhiping. An experimental study on stress sensitivity of gas reservoir rock with irreducible water [J]. Natural Gas Geoscience,2004,15(3):227-229. [杨满平,李允,李治平. 气藏含束缚水储层岩石应力敏感性实验研究 [J]. 天然气地球科学,2004,15(3):227-229.]

[4] Cui Sihua, Zhu Huayin, Zhong Shimin. Reservoir properties variation characteristics stress sensitivity of Sebei gas field and its influence on gas field development[J]. Natural gas Geosci-

ence,2008,19(1):141-144 . [崔思华,朱华银,钟世敏. 涩北气田储层应力敏感性及其对开发产能的影响 [J]. 天然气地球科学,2008,19(1):141-144.]

[5] Ma Dongmin. Analysis of gas production mechanism in CBM wells[J]. Xi'an University of Science and Techunology Journal,2003,23(2):156-159. [马东民. 煤层气井采气机理分析 [J]. 西安科技学院学报,2003,23(2):156-159.]

[6] Li Qiangui,Kang Yili,Luo Pingya. Analysis of the factors affecting processes of CBM desorption,diffusion and percolation [J]. Coal Geology & Exploration,2003,31(4):26-29. [李前贵,康毅力,罗平亚. 煤层甲烷解吸-扩散-渗流过程的影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探,2003,31(4):26-29.]

Experimental Research on Stress Sensitivity of Coalbed Reservoir

ZHANG Ya-pu¹, HE Ying-fu², YANG Zheng-ming¹, LIU Xue-wei¹

(1. Langfang Branch , Research Institute of Petroleum Exploration and Development , PetroChina ,
Langfang 065007 ,China;2. Daqing Oilfield Company Ltd. ,Daqing 163712,China)

Abstract: In view of stress sensitiveness to coalbed methane reservoir, we made the stress sensitiveness experiments of dry and moisture drill cores collected from the coalbed methane reservoir by means of change of peripheral pressure and pore pressure. The experimental data of stree sensitiveness were fitted to obtain the deduced equation of permeability with active pressure after the rock deformation of coalbed methane reservoir was measured. The results indicated that the existence of water would make the stress sensitive-ness of the drill core become stronger. The pattern described by exponential function would offere the ex-perimental reference to the effective and rational development of the coalbed methane.

Key words: Coalbed methane; Permeability; Stress sensitiveness; Active pressure.



2010 全国气体能源勘探开发与利用技术
研讨交流会将在甘肃兰州举行

由中国能源环境科技协会主办的“2010 全国气体能源勘探开发与利用技术研讨交流会”将于 2010 年 7 月 20 日—22 日在甘肃省兰州市举行。会议将以“交流目前我国气体能源勘探开发技术现状与前景,提高以天然气、煤层气、天然气水合物为代表的气体能源勘探开发和利用技术水平,促进我国气体能源工业科学发展”为目标。主要从 3 个方面 16 个主题展开交流:

(一)天然气开发技术:①含硫气藏安全与快速钻井技术;②含硫气藏开发与开采技术;③火山岩气藏钻井技术;④火山岩气藏开发与开采技术;⑤低渗气藏增产技术;⑥天然气藏水平井钻井与开采技术;⑦凝析气藏开发与开采技术;⑧天然气储存与输送技术。

(二)煤层气开发技术:①煤层气储层评价技术;②煤层气渗流机理及数值模拟;③煤层气钻井工艺技术;④煤层气储层保护技术;⑤煤层气增产技术;⑥煤层气排采技术;⑦煤层气储存与输送技术⑧煤层气勘探、开发及利用新装备新技术。

(三)天然气水合物资源评价与开发利用技术。

会议详细情况请咨询会议承办单位(电话:010-63874168,传真:010-63874168,E-mail:qtny2006@126.com)。

(据会议通知)