

非常规天然气

考虑应力敏感性的煤层气稳定流动气井产能方程

杨满平,王 刚,许胜洋,高 超

(燕山大学石油工程系,河北 秦皇岛 066004)

摘要:国内外大量实验研究表明,煤储层应力敏感性是存在的,而且对煤层气井生产有重大影响。在前人实验研究的基础上,建立了煤层渗透率与有效压力或地层压力之间的数学关系式,二者之间满足相关性非常高的指数变化关系;建立了考虑煤储层应力敏感性的达西流动和非达西流动气井产能方程。研究表明,煤储层的应力敏感性对煤层气井的产能有很大影响,随着生产压差的增加,气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,因此需要制定合理的生产压差进行生产。

关键词:煤层气;应力敏感性;产能;稳定流动;达西流动;非达西流动

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)02-0347-05

引用格式:杨满平,王刚,许胜洋,等. 考虑应力敏感性的煤层气稳定流动气井产能方程[J]. 天然气地球科学,2011,22(2):347-351.

0 引言

油气储层压力敏感性是指由于储层的上覆岩层压力和储层孔隙压力等的变化,使储层的岩石骨架受力发生变化,发生弹性、塑性或弹塑性的变形^[1-2],并且使储层微观结构也发生变化,并影响到油气等流体在其中渗流的性质,在宏观上则表现为储层的物理参数(如孔隙度、渗透率等)随着地层压力变化而变化的现象。对于煤储层而言,在开发过程中,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^[3];另一方面,降压过程中煤储层表现出较强的应力敏感性,这主要是由于其内部存在大量的裂缝和割理,在应力的作用下,裂缝和割理的应力敏感性远高于基质孔隙^[4]。

近年来,国内外大量的学者通过实验研究了煤储层的应力敏感性,从国外看,Sommerton W J^[5]、McKee C R^[6]和 Brace W E^[7]等研究应力对煤体渗透性的影响以及渗透率变化规律等。国内在这方面的研究也较多,如胡耀青^[8]通过实验得到了三维应力作用下的煤体瓦斯渗流规律;姜德义^[9]用实验研究了有效应力对煤层气渗透率的影响;孙培德等^[10]

通过实验获得了煤储层变形与渗透率变化之间的规律;陈振宏等^[4]则通过实验研究了干燥样和湿煤样的应力敏感性;王勃等^[11]通过物理模拟实验研究了煤层气储层渗透率变化规律。从目前国内外的研究成果看,煤储层的应力敏感性是存在的而且是比较强的,在实际生产过程中更不容忽视。

1 煤储层应力敏感性

对于煤储层的应力敏感性实验,国内外都进行大量的研究,这里借用文献[8]中提供的实验结果数据进行分析。文献中对3块干燥样和3块湿煤样分别精细应力敏感性实验研究,并获得了煤样渗透率随围压之间的变化关系数据。通过数据和图1、图2可以看出,不管是干燥样还是湿煤样,随着围压的增加,渗透率的降低都是非常明显的,而且湿煤样的降低程度更大,即湿煤样的应力敏感性更强。

渗透率随围压的变化规律,可以用数学关系来进行拟合,通过拟合,二者之间满足相关性非常高的指数关系式,各样品的关系式和相关性如表1所示。根据结果,煤样渗透率与围压之间的变化关系式为:

$$K/K_i = a \exp(-bP_c) \quad (1)$$

由于在上述实验过程中,岩心的流动压力基本

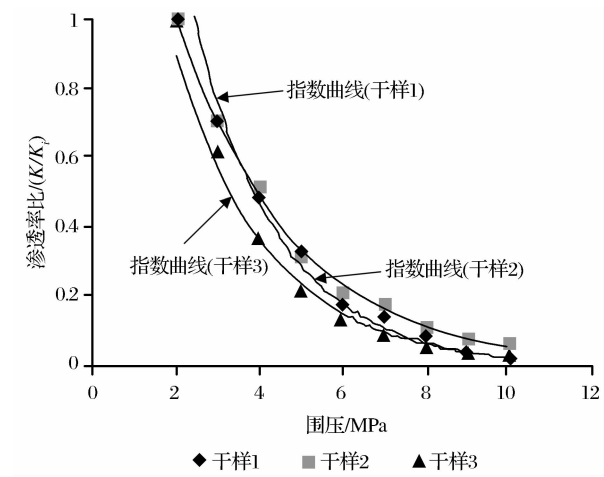


图 1 干煤样渗透率与围压的变化关系

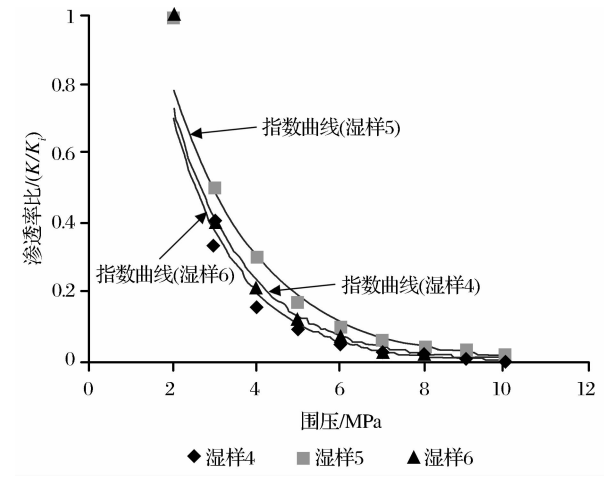


图 2 湿煤样渗透率与围压的变化关系

表 1 煤样渗透率与围压之间的关系式及相关系数

样品号	类型	孔隙度/%	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	关系式	相关系数 R^2
1	干样	3.45	0.220	$K/K_i = 3.2608 \exp(-0.4857 P_c)$	0.9709
2	干样	2.90	2.880	$K/K_i = 2.1747 \exp(-0.4441 P_c)$	0.9919
3	干样	4.50	0.060	$K/K_i = 2.0355 \exp(-0.3598 P_c)$	0.9940
4	湿样	3.20	0.041	$K/K_i = 2.4564 \exp(-0.6199 P_c)$	0.9822
5	湿样	3.10	1.100	$K/K_i = 2.0298 \exp(-0.4697 P_c)$	0.9835
6	湿样	5.05	0.099	$K/K_i = 2.2863 \exp(-0.5564 P_c)$	0.9849

不变,变化的只是围压,因而围压的变化代表了有效压力的变化,所以式(1)也可以用有效压力来表示:

$$K/K_i = a \exp(-bP_{\text{eff}}) \tag{2}$$

但在实际生产过程中,作为储层的上覆岩层压力是保持不变的,实际变化的是储层的孔隙压力,因此有效压力应该是上覆岩层压力与地层压力的差值。为了方便计算,一般采用原始地层压力与地层压力之间的差值,或者直接用地层压力来表示与渗透率之间的变化关系,即:

$$K/K_i = a \exp[-b(P_e - P)]$$

或简写为

$$K = aK_i \exp(bP) \tag{3}$$

2 达西流动煤层气井产能方程

假定水平等厚和均质的煤层、气体径向流入井底,服从达西流动的气体平面径向流,并且气体为等温渗流,同时考虑煤层的应力敏感性,有:

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dr} = \frac{aK_i \exp(bP)}{\mu} \frac{dP}{dr} \tag{4}$$

$$Q_r = 2\pi rh \cdot v = 2\pi rh \frac{aK_i \exp(bP)}{\mu} \frac{dP}{dr} \tag{5}$$

根据气体连续方程和状态方程,可将半径 r 处的流量 Q_r 折算为标准状态下的流量 Q :

$$Q_r = QB_g = Q \frac{P_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{ZT}{P} \tag{6}$$

将式(5)代入式(6),分离变量后积分得:

$$\frac{2\pi a K_i h T_{sc} Z_{sc}}{Q P_{sc} T} \int_{P_{wf}}^{P_e} \frac{P}{\mu Z} \exp(bP) dP = \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} \tag{7}$$

式(7)可代入任何一种单位制和标准状态。这里采用法定计量单位,标准状态取为 $T_{sc} = 293K$, $P_{sc} = 0.101325MPa$,同时采用目前气田上实际使用的单位。如果取平均压力 $\bar{P} = (P_e + P_{wf})/2$ 用 \bar{P} 去求 $\bar{\mu}$ 和 \bar{Z} ,并认为在积分范围内是常数,可移出积分号,则式(7)简化为:

$$\begin{aligned} &\frac{1549 \cdot 2aK_i h}{QT\bar{\mu}\bar{Z}} \int_{P_{wf}}^{P_e} P \exp(bP) dP \\ &= \ln \frac{r_e}{r_w} \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)左边积分并整理后可得:

$$\begin{aligned} &\left(P_e - \frac{1}{b}\right) \exp(bP_e) - \left(P_{wf} - \frac{1}{b}\right) \exp(bP_{wf}) \\ &= \frac{0.645 \times 10^{-3} bQT\bar{\mu}\bar{Z}}{aK_i h} \ln \frac{r_e}{r_w} \end{aligned} \tag{9}$$

根据文献[12],考虑气井的表皮系数 S ,则有:

$$Q = \frac{1\,549.2aK_{ih} \left[\left(P_e - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_e) - \left(P_{wf} - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_{wf}) \right]}{bT\bar{\mu}\bar{Z} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + \frac{a}{b}S \right)} \quad (10)$$

式(9)进一步可以写成:

$$\psi_e - \psi_{wf} = AQ \quad (11)$$

式中: $\psi_e = \left(P_e - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_e)$

$$\psi_{wf} = \left(P_{wf} - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_{wf})$$

$$A = \frac{0.645 \times 10^{-3} bT\bar{\mu}\bar{Z}}{aK_{ih}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + \frac{a}{b}S \right)$$

式(10)就是考虑煤储层应力敏感性的气体稳定流动的达西产能公式,或称为考虑煤储层应力敏感性的煤层气平面径向流方程。

3 非达西流动煤层气井产能方程

气井周围由于垂直于流动方向的过流断面愈近井轴愈变小,渗流速度急剧增加。这种高速流动相

当于紊流流动,称为非达西流动(Non-Darcy Flow)。因而在井筒周围的气体流动,上面的达西流动公式就不再适用。Forchheimer 通过实验,提出用二次方程描述非达西流动,其平面径向流的表达式为:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu v}{K} + \beta \rho v^2 \quad (12)$$

考虑煤储层应力敏感性的影响,则有:

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu v}{aK_i \exp(bP)} + \beta \rho v^2 \quad (13)$$

在式(12)和式(13)中,总的压力梯度由2部分组成,方程右端第一项代表达西流动部分,第二项代表非达西流动部分。采用文献[12]的方法对方程右边非达西流动进行定量估算,得到非达西流动的煤层气井产能方程为:

$$Q = \frac{1\,549.2aK_{ih} \left[\left(P_e - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_e) - \left(P_{wf} - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_{wf}) \right]}{bT\bar{\mu}\bar{Z} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + \frac{a}{b}S + DQ \right)} \quad (14)$$

或

$$\left(P_e - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_e) - \left(P_{wf} - \frac{1}{b} \right) \exp(bP_{wf}) = \frac{0.645 \times 10^{-3} bQT\bar{\mu}\bar{Z}}{aK_{ih}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + \frac{a}{b}S + DQ \right) \quad (15)$$

$$D = 4.384 \times 10^{-18} \frac{a\beta\gamma_g K_i}{b\mu h r_w}$$

式(15)还可以进一步写成

$$\psi_e - \psi_{wf} = AQ + BQ^2 \quad (16)$$

式中: $A = \frac{0.645 \times 10^{-3} bT\bar{\mu}\bar{Z}}{aK_{ih}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + \frac{a}{b}S \right)$

$$B = \frac{0.645 \times 10^{-3} bT\bar{\mu}\bar{Z}}{aK_{ih}} D$$

式(16)为简写的考虑煤储层应力敏感性的二项式产能方程,该方程的解表示为:

$$Q = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(\psi_e - \psi_{wf})}}{2B} \quad (17)$$

在二项产能方程中,第一项代表气体达西流动所消耗的能量,第二项代表气体非达西流动所消耗的能量。如果二项式中 B 值为零,就是气体服从达西渗流的气井产能方程形式,因此,达西渗流时的产能方程是二项产能方程的特例。

4 实例分析

由于煤层气一般采用排水采气的方式,因此选用湿岩样得到的结果进行实例计算更接近实际生产的结果,这里选用湿岩样5的实验结果参与计算,并假设其他参数分别为:原始地层压力 $P_e = 18\text{MPa}$;井控半径 $r_e = 500\text{m}$,井底半径为 $r_w = 0.1\text{m}$;地层温度 $T = 353\text{K}$;平均孔隙度 $\varphi = 5\%$;煤层气平均粘度 $\bar{\mu} = 0.014\text{ mPa} \cdot \text{s}$;煤层气平均压缩因子 $\bar{Z} = 0.92$;煤层气藏有效厚度 $h = 10\text{ m}$;气井表皮系数 $S = 2$;煤层气相对密度 $r_g = 0.6$ 。

根据上述参数,并结合湿样5的实验数据,得到该煤样的渗透率与地层压力之间的变化关系为:

$$K = 0.000\,2K_i \exp(0.469\,7P)$$

式中: $a = 0.000\,2$, $b = 0.469\,7$

将上述参数代入式(13)和式(20)中,并用文献[9]中不考虑应力敏感性的产能公式对照进行计算,得到的结果如图3、图4所示。

从图中可以看出,考虑煤储层的应力敏感性后,气井的产能具有以下特点:

(1)不管是达西渗流还是非达西渗流,考虑煤储

层应力敏感性后,气井的产量远低于不考虑应力敏感性的气井产量,而且随着生产压差的增大,二者之间的产量差距也逐渐增加,说明随着生产压差的增加,煤储层受到的有效应力逐渐增加,煤储层渗透率大大降低,影响到煤层气井的产能。

(2)随着生产压差的增加,考虑应力敏感性的气井产量上升幅度比较缓慢,并且在生产压差增大到一定程度后,产量不再有大的变化,基本保持在同一水平。说明在煤层气生产过程中,无限制放大生产压差并不能获得最大的产量。

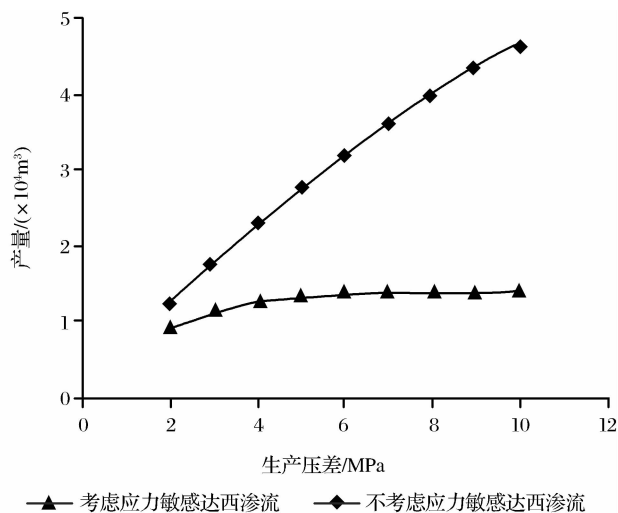


图3 达西流动气井产量变化规律

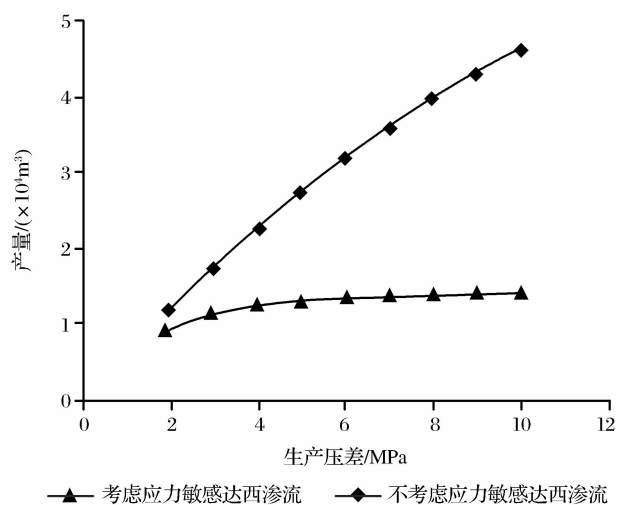


图4 非达西流动气井产量变化规律

(3)必须制定合理的生产压差,避免由于应力敏感性造成煤储层伤害但产量并没有得到有效的提高。从图3、图4中看出,实例中的气井合理生产压差应该保持在4~6MPa之间,既能获得较高的产量,也能保持较低的生产压差避免更大的储层伤害。

(4)实例给出的煤储层渗透率较低,在井筒附近

很难发生高速非达西渗流的现象,所以由非达西渗流和达西渗流的产量公式计算得到的结果基本一致。

5 结论

(1)煤层渗透率与有效压力或地层压力之间满足相关性非常高的指数变化关系。

(2)建立了考虑煤储层应力敏感性的达西和非达西的稳定流动气井产能方程。

(3)煤储层的应力敏感性对煤层气井的产能有很大的影响,随着生产压差的增加,气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,放大生产压差并不能获得最大产量。

(4)对煤层气的开发需要制定合理的生产压差进行生产,既要保证较高产量,又要避免生产压差过大,煤储层产生较强的应力敏感性,影响产能并浪费地层能量。

符号说明: K 为实测渗透率或实际渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为初始渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; P_e 为围压, MPa; a, b 为系数; P_{eff} 为有效压力, MPa; P_e 为原始地层压力, MPa; P 为地层压力, MPa; v 为 r 处的气体渗流速度; K 为气层有效渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; h 为气层有效厚度, m; r 为距井的任意半径, m; Q 为标准状态下的产气量, m^3/d ; Z 为气体压缩系数; T 为气层温度, K; r_e 为井控半径或泄流半径, m; r_w 为井底半径, m; P 为 r 处的压力, MPa; P_{wf} 为井底流压, MPa。 β 为描述孔隙介质紊流影响的系数, 称为速度系数, (Velocity Coefficient), 单位是长度的倒数 m^{-1} ; D 为惯性或紊流系数, (Inertial or Turbulent Flow Factor), $(\text{m}^3/\text{d})^{-1}$; r_g 为气体相对密度。

参考文献:

- [1] Yang Manping. The Study of Oil-gas Reservoir Porosity Medium's Deformation Theory and Applications[D]. Chengdu: Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004:102-122. [杨满平. 油气储层多孔介质的变形理论及应用研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2004:102-122.]
- [2] 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.]
- [3] Scott A R, Kaiser W R. Hydrogeologic factor affecting dynamic open-hole cavity completions in the San Juan basin, U. S. A. Proceedings of the 1995 Coalbed Methane Symposium

- [C]. Tuscaloosa: The University of Alabama, May 15-19, 1995:139-147.
- [4] Chen Zhenhong, Wang Yibing, Guo Kai, *et al.* Stress sensitivity of high-rank coalbed methane reservoir[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1390-1394. [陈振宏, 王一兵, 郭凯, 等, 高煤阶煤层气藏储层应力敏感性研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1390-1394.]
- [5] Sommerton W J, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1975, 12(21): 129-145.
- [6] McKee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[C]//Fassett J E ed. Geology and Coal-bed Methane Resources of the Northern San Juan Basin. Colorado, USA: Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, 1988: 143-153.
- [7] Brace W E. A note on permeability changes in geologic material due to stress[J]. Pageoph, 1978, 116(4/5): 627-632.
- [8] Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, Wei Jinping, *et al.* Experimental study of permeating law of coal mass gas under action three dimension stress[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1996, 6(4): 308-311. [胡耀青, 赵阳升, 魏锦平, 等. 三维应力作用下煤体瓦斯渗透规律实验研究[J]. 西安矿业学院学报, 1996, 6(4): 308-311.]
- [9] 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.]
- [10] Sun Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(supplement): 1801-1804. [孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1801-1804.]
- [11] Wang Bo, Jiang Bo, Wang Hongyan, *et al.* Coalbed methane reservoir permeability changes of the physical simulation of experimental study[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 684-686. [王勃, 姜波, 王红岩, 等. 煤层气储层渗透率变化规律的物理模拟实验研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 684-686.]
- [12] Li Yun, Li Zhiping. Gas or Condensate Gas Well Test and Productivity Evaluation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 6-12. [李允, 李治平. 气井及凝析气井产能试井与产能评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 6-12.]

Steady Flow Productivity Equation for Stress Sensitivity Coal-bed Methane Gas Well

YANG Man-ping, WANG Gang, XU Sheng-yang, GAO Chao

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A large number of experiments show that stress sensitivity exists in the coal reservoirs and has a significant effect on the gas production of coal-bed methane wells. Based on former experimental results, we set up the mathematical relationship between coal-bed permeability and effective pressure or formation pressure, both of them well fit the exponential correlation. We also build the gas well productivity equation for coal reservoir stress sensitivity under Darcy and non-Darcy steady flow conditions. The result shows that the productivity of coal-bed methane wells are greatly affected by the stress sensitivity. With drawdown pressure increases, gas production increases little, and gradually goes towards stability. So a reasonable drawdown pressure for gas production will be required.

Key words: Coal-bed methane; Stress sensitivity; Productivity; Steady flow; Darcy flow; Non-Darcy flow.