

致密砂岩气藏拟稳态流动阶段气井产能分析

雷刚,董平川,杨书,王彬,李振

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:为研究致密砂岩气藏应力敏感对拟稳态流动阶段气井产量及无阻流量的影响,基于气体非达西渗流特性,考虑渗透率幂函数式应力敏感,推导了致密砂岩气藏在拟稳态流动阶段的气井产能方程,并得到了气井无阻流量计算公式。实例计算结果表明:渗透率幂函数式应力敏感使拟稳态流动阶段气井产量及无阻流量减少;受到渗透率幂函数式应力敏感影响,生产井产能曲线向压力轴弯曲,在相同的生产压差下,气井产量比不考虑渗透率幂函数式应力敏感的产量低;渗透率幂函数式应力敏感系数越大,产能方程曲线弯曲越早、弯曲度越大,气井产量越低,产量下降率越大;地层压力下降后,生产井受渗透率幂函数式应力敏感影响减弱,在平均地层压力较低时,可适当放大生产压差进行生产。

关键词:致密砂岩 拟稳态 非达西渗流 渗透率幂函数式应力敏感 无阻流量

中图分类号:TE312

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)05-0094-04

气田大多以衰竭方式进行开发,在生产过程中,地层压力下降,有效应力增加。研究表明,随着有效应力的增加,岩石中微小孔隙及微裂缝闭合,地层渗透率下降,特别是在低渗透致密气藏中,这种现象更加明显^[1-3]。渗透率的下降必然会导致地下渗流能力的变化,进而影响气井的产能^[4-8]。因此,致密砂岩气藏开发时必须考虑应力敏感的影响。

中国学者对致密气藏应力敏感及其对气井产能的影响开展了深入研究,并取得了丰硕的成果。杨正明等推导了考虑应力敏感时的低渗透气藏产能公式,并研究了不同幂函数式应力敏感系数下气井产量随生产压差变化的规律^[9-11],但这些研究均基于气藏定压外边界假设条件,且没有考虑气体非达西渗流特性。李允等在渗流力学基础上建立考虑应力敏感性的气体渗流数学模型,并通过数值模拟方法研究了应力敏感性对气井产能的影响^[12-14],但也未考虑气体非达西渗流特性,且数值算法本身存在数值弥散等局限性。刘启国等考虑了气体非达西渗流特性,对变形介质气藏的开发特征进行了研究^[15-17],但其假设气藏外边界为定压条件,并不适用于气藏中的拟稳态流动。

笔者基于气体非达西渗流特性,建立了考虑渗透率幂函数式应力敏感的致密砂岩气藏拟稳态流

动渗流模型,通过求解得到了拟稳态流动阶段气井产能方程;并分析了渗透率幂函数式应力敏感系数对气井产能曲线形态、无阻流量以及产量下降率的影响。

1 产能计算模型

模型假设条件包括:在圆形等厚水平均质地层中心,有1口定产量生产的气井;地层存在强应力敏感性,且岩石渗透率与有效应力满足幂函数关系。

气田都是依靠泄气范围内气体本身的弹性膨胀能量进行采气。根据气体的等温压缩系数的定义式,对于某1口气井,井控区内总弹性量为

$$V(t) = c_g V_i [p_e - \bar{p}(t)] \quad (1)$$

其中

$$V_i = \pi(r_e^2 - r_w^2)h \quad (2)$$

式中: V 为井控区内总弹性量, m^3 ; t 为生产时间, d ; c_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; V_i 为井控区总体积, m^3 ; p_e 为边界压力, MPa ; p 为地层压力, MPa ; r_e 为泄气半径, m ; r_w 为井筒半径, m ; h 为地层有效厚度, m 。

由式(1)得气井产量为

$$q_{sc}(t)B_g = \frac{dV(t)}{dt} = -c_g \pi(r_e^2 - r_w^2)h \frac{d\bar{p}(t)}{dt} \quad (3)$$

收稿日期:2014-06-26。

作者简介:雷刚,男,在读博士研究生,从事油气田开发工程研究。联系电话:15011314843, E-mail:leigang5000@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“裂缝性油气藏流固耦合渗流基础研究”(50004002)。

式中: q_{sc} 为标准状态下的气井产量, m^3/d ; B_g 为气体体积系数。

井控区内任意一渗流断面的流量为

$$q_{sc}(r,t)B_g = -c_g \pi (r_e^2 - r^2) h \frac{d\bar{p}(t)}{dt} \quad (4)$$

式中: r 为径向距离, m 。

由式(3)和式(4)得

$$q_{sc}(r,t) = \frac{r_e^2 - r^2}{r_e^2 - r_w^2} q_{sc}(t) \approx \left(1 - \frac{r^2}{r_e^2}\right) q_{sc}(t) \quad (5)$$

将气井地面流量 $q_{sc}(r,t)$ 转换为地下气体流量, 可得

$$q_g = \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \times \frac{zT}{p} \left(1 - \frac{r^2}{r_e^2}\right) q_{sc}(t) \quad (6)$$

式中: q_g 为地下气体流量, m^3/d ; p_{sc} 为标准状态下的压力, MPa ; T_{sc} 为标准状态下的温度, K ; z 为气体压缩因子; T 为温度, K 。

由式(6)可得断面处的渗流速度为

$$v(r,t) = \frac{q_g}{2\pi rh} = \frac{q_{sc}}{2\pi r_e h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \times \frac{zT}{p} \left(\frac{r_e}{r} - \frac{r}{r_e}\right) \quad (7)$$

式中: v 为渗流速度, m/d 。

考虑渗透率幂函数式应力敏感及气体非线性渗流特性^[18-20], 则

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu}{K_0(p_0 - p)^{-m}} v + \beta \rho v^2 \quad (8)$$

式中: μ 为气体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K_0 为原始地层渗透率, μm^2 ; p_0 为原始地层压力, MPa ; m 为渗透率幂函数式应力敏感系数; β 为速度系数, m^{-1} ; ρ 为气体密度, kg/m^3 。

引入拟压力变量

$$U(p) = \int_{p_0}^p \frac{p(p_0 - p)^{-m}}{\mu z} dp \quad (9)$$

式中: U 为拟压力变量, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

将式(7)代入式(8), 结合式(9)可以得到

$$dU = \frac{q_{sc} T}{2\pi K_0 r_e h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \left(\frac{r_e}{r} - \frac{r}{r_e}\right) + \frac{\beta p_{sc} p_{sc} T}{\mu T_{sc} (p_0 - p)^m} \left(\frac{q_{sc}}{2\pi r_e h}\right)^2 \left(\frac{r_e}{r} - \frac{r}{r_e}\right)^2 dr \quad (10)$$

式中: ρ_{sc} 为标准状态下的气体密度, kg/m^3 。

在井控边界处, 地层压力为 p_e , 由式(9)可得井控边界处拟压力计算式为

$$U_e = U|_{r=r_e} = \int_{p_0}^{p_e} \frac{p(p_0 - p)^{-m}}{\mu z} dp \quad (11)$$

式中: U_e 为井控边界处拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

求解式(10)可以得到径向距离处的拟压力

$$U(r) = U_e - \left\{ \frac{q_{sc} T}{2\pi K_0 r_e h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \left(r_e \ln \frac{r_e}{r} - \frac{r_e^2 - r^2}{2r_e} \right) + \left(\frac{q_{sc}}{\pi r_e h} \right)^2 \frac{p_{sc} T \beta \rho_{sc}}{4 \mu T_{sc} (p_0 - p)^m} \left[\frac{r_e^2}{r} - r_e - 2(r_e - r) + \frac{r_e^3 - r^3}{3r_e^2} \right] \right\} \quad (12)$$

供气区内的平均拟压力函数为

$$\bar{U} = \frac{\int_{r_w}^{r_e} 2\pi r U(r) dr}{\pi (r_e^2 - r_w^2)} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 并整理可得

$$\bar{U} = U_e - \left[\frac{q_{sc} T}{8\pi K_0 h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} + \frac{2r_e}{15} \left(\frac{q_{sc}}{\pi r_e h} \right)^2 \frac{p_{sc} T \beta \rho_{sc}}{\mu T_{sc} (p_0 - p)^m} \right] \quad (14)$$

由式(12)得到 $r=r_w$ 处的拟压力, 结合式(14)整理可得

$$\bar{U} - U_w = A q_{sc} + B q_{sc}^2 \quad (15)$$

其中

$$A = \frac{T}{2\pi K_0 h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right) - \frac{T}{8\pi K_0 h} \times \frac{p_{sc}}{T_{sc}} \quad (16)$$

$$B = \frac{p_{sc} T \beta \rho_{sc}}{4 \mu T_{sc} (\pi r_e h)^2 (p_0 - p)^m} \left(\frac{r_e^2}{r_w} - 3r_e + \frac{r_e}{3} \right) - \frac{2r_e}{15} \times \frac{p_{sc} T \beta \rho_{sc}}{\mu T_{sc} (\pi r_e h)^2 (p_0 - p)^m} \quad (17)$$

式中: U_w 为 $r=r_w$ 处的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

由式(15)求得考虑渗透率幂函数式应力敏感的气井产量及无阻流量分别为

$$q_{sc} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(\bar{U} - U_w)}}{2B} \quad (18)$$

$$q_{AOF} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\bar{U}}}{2B} \quad (19)$$

式中: q_{AOF} 为无阻流量, m^3/d 。

2 实例计算

中国某致密砂岩气藏原始地层压力为 33.05 MPa, 平均地层压力为 32.05 MPa, 速度系数为 $5.334 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, 地层有效厚度为 19.5 m, 初始渗透率为 $0.059 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 气藏温度为 395.6 K, 平均气体粘度为 0.027 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 平均气体压缩因子为 0.89, 井筒半径为 0.101 5 m, 泄气半径为 160 m。采用这些参

数编制程序,对所建立的模型进行计算,并对计算结果进行分析。

2.1 模型计算结果对比

由根据气藏参数绘制的气井产量与井底压力的关系(图1)可以看出,对于致密砂岩气藏,渗透率幂函数式应力敏感对气井产量的影响很大,在生产过程中不能忽略;考虑渗透率幂函数式应力敏感时,产能方程曲线逐渐向压力轴弯曲,产能比常规方程(不考虑渗透率幂函数式应力敏感)的计算结果小。

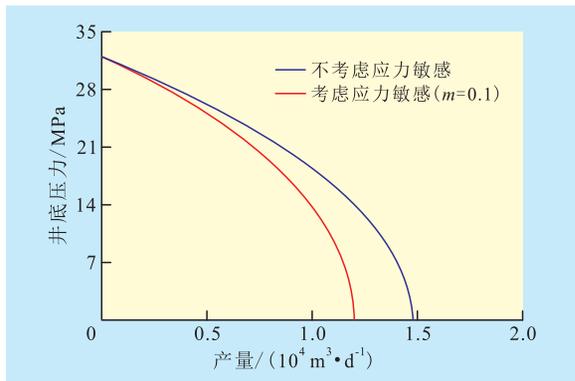


图1 产能方程曲线

2.2 渗透率幂函数式应力敏感对气井产能的影响

由不同渗透率幂函数式应力敏感系数下气井产能方程曲线(图2)可以看出,随渗透率幂函数式应力敏感系数增大,气井产量逐渐降低,产能方程曲线向压力轴弯曲程度逐渐增强;由不同渗透率幂函数式应力敏感系数下气井无阻流量(图3)可以看出,随渗透率幂函数式应力敏感系数增大,气井无阻流量逐渐降低,表明渗透率幂函数式应力敏感使气井无阻流量减少。

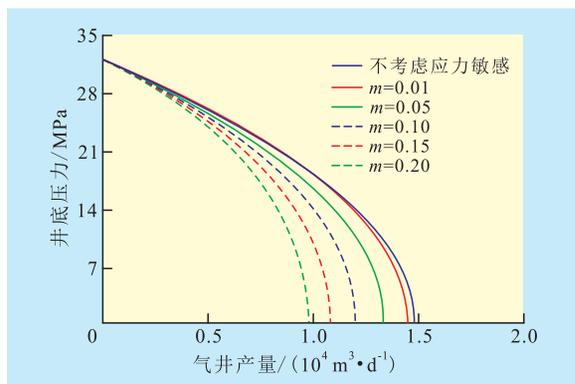


图2 不同渗透率幂函数式应力敏感系数下气井产能方程曲线

根据产量下降率定义^[7],可得到致密砂岩气藏不同渗透率幂函数式应力敏感系数下的产量下降率。渗透率幂函数式应力敏感系数越大,气井产量

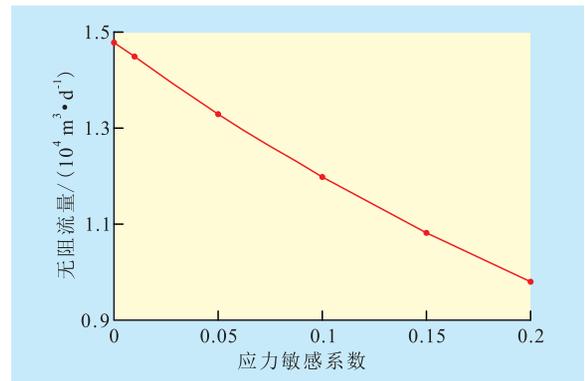


图3 渗透率幂函数式应力敏感系数与气井无阻流量曲线

下降率越大(图4)。表明渗透率幂函数式应力敏感越强,气井产量下降率越大。井底压力为0时所对应的气井产量下降率,为不同渗透率幂函数式应力敏感系数下的气井无阻流量下降率,随着渗透率幂函数式应力敏感系数增大,气井无阻流量下降率也增大。

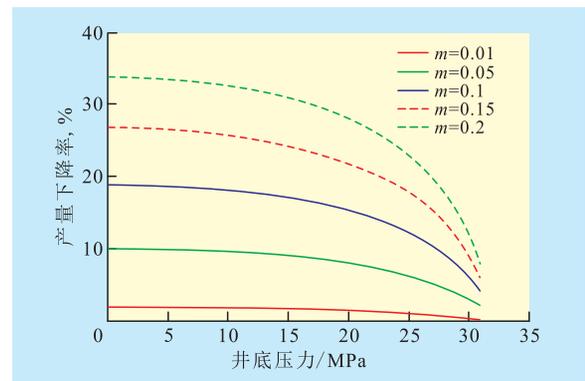


图4 不同渗透率幂函数式应力敏感系数产能方程曲线

2.3 平均地层压力下降对气井产能的影响

当渗透率幂函数式应力敏感系数为0.1时,由不同平均地层压力产能方程曲线(图5)可以看出,在平均地层压力下降后,气井产能减小。产能方程曲线弯曲度下降,表明平均地层压力下降后渗透率

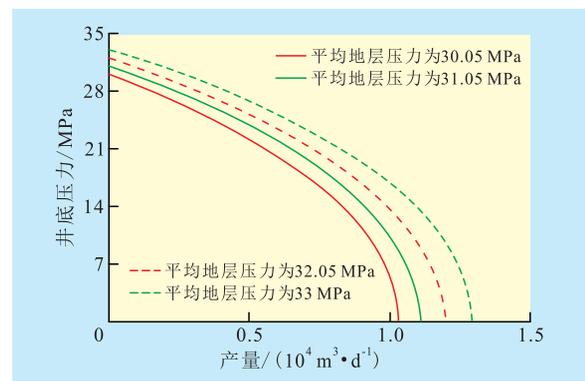


图5 不同平均地层压力产能方程曲线

幂函数式应力敏感对产量的影响逐步降低。因此,在平均地层压力较低时,可适当放大生产压差。由气井无阻流量随平均地层压力的变化(图6)可见,平均地层压力下降后气井无阻流量减小。

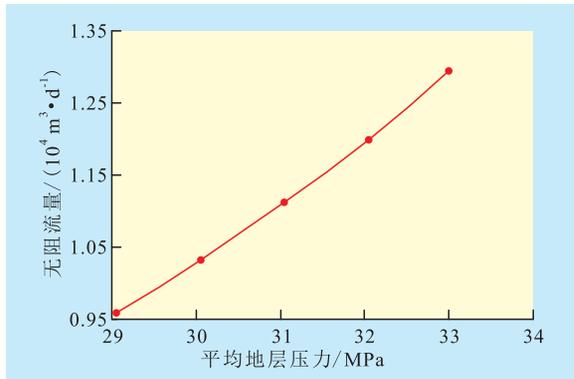


图6 不同平均地层压力气井的无阻流量

3 结论

渗透率幂函数式应力敏感对气井产能的影响较大,不能忽略。渗透率幂函数式应力敏感系数越大,渗透率幂函数式应力敏感越强,气井产量及无阻流量越小、产量下降率越大,气井产能方程曲线向压力轴弯曲越早,弯曲度越大。因此对于致密砂岩气藏,必须考虑渗透率幂函数式应力敏感的影响。

平均地层压力下降后渗透率幂函数式应力敏感对气井产能的影响逐步减小。致密气藏气井井底压力相同的情况下,平均地层压力越低,气井产量及无阻流量越低,因此在平均地层压力较低时,可适当放大生产压差。

参考文献:

- [1] McKee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations [J]. Journal of SPE Formation Evaluation, 1988, 3(1): 81-91.
- [2] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, 7(1): 41-44.

- [3] 窦宏恩, 白喜俊. 低渗储层和高渗储层都存在应力敏感[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 121-123.
- [4] 孙来喜, 李成勇. 低渗气藏应力敏感与气井产量分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 74-76.
- [5] 杨滨, 姜汉桥, 陈民锋. 应力敏感气藏产能方程研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(5): 158-160.
- [6] 罗兰, 朱华银. 岩石应力敏感对苏里格气井的影响[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 19-21.
- [7] 熊健, 邱桃, 郭平, 等. 非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 92-96.
- [8] 向祖平, 陈中华, 邱蜀峰. 裂缝应力敏感性对异常高压低渗气藏气井产能的影响[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 95-97.
- [9] 杨正明, 姜汉桥, 祁晨琛, 等. 低渗气藏介质变形评价参数研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 74-76.
- [10] 杨胜来. 异常高压气藏岩石应力敏感性及其对产能的影响[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 94-95.
- [11] 宋传真, 郑荣臣. 致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 47-49.
- [12] 李允, 陈军, 张烈辉. 一个新的低渗气藏开发数值模拟模型[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 65-68.
- [13] 杨二龙, 张建国, 陈彩云, 等. 考虑介质变形的低渗气藏数值模拟研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 94-96.
- [14] 徐家年, 张振军, 李润松, 等. 低渗异常高压气藏数值模拟研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 80-84.
- [15] 刘启国, 江晓敏, 程晓旭, 等. 异常高压气井流入动态特征及产能试井分析方法研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(4): 5-7.
- [16] 郑丽坤. 考虑渗透率应力敏感的气井无阻流量预测方法研究[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(2): 101-103.
- [17] 苏云河, 杜志敏, 喻高明, 等. 考虑渗透率应力敏感效应影响的气井修正产能方程[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 335-337.
- [18] 刘启国, 王瑞, 李邗, 等. 考虑启动压力梯度和高速非达西效应的低渗气藏水平井产能[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 53-56.
- [19] 马新仿, Valko Peter. 裂缝非达西渗流对气井水力压裂设计的影响[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 83-85.
- [20] 蔡振华, 廖新维. 非常规气藏压裂井产能评价方法[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 96-98.

编辑 刘北羿

欢迎订阅《油气地质与采收率》