

Permeability of Establishment and Application of Gas Well Deliverability Test Fitting Plate under the Influence of the Stress Sensitivity

Zhonghua Liu¹, Junwu Qi², Yanmin Cui³

¹Chongqing Key Laboratory of Complicated Oil & Gas Exploration and Development, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

²Changqing Oilfield Downhole Operation Company, Xi'an

³Chongqing University of Science and Technology, The Organization and Personnel Department, Chongqing
Email: 75640299@qq.com

Received: Apr. 23rd, 2014; revised: Apr. 29th, 2014; accepted: May 5th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the research of the deformable porous media, pressure sensitivity feature of the permeability exists in the deformable porous media. In this paper, the initial stage of permeability change in the deformation of the medium was a linear variation. Continuity equation, equations of motion and the permeability pressure sensitive equation of state were used, and then productivity equation was derived when the permeability changed linearly, finally dimensionless productivity formula was derived. Dimensionless productivity well test plates were drawn. On this basis, the impact of permeability stress sensitivity of gas well productivity was further analyzed. The research shows: 1) The permeability stress sensitivity on gas well productivity cannot be ignored; 2) Fitting instance of the use of the plates was accurate, convenient and fast; 3) The permeability stress sensitivity on gas well open flow capacity is much larger than that without considering the permeability stress sensitivity under the influence of the open flow.

Keywords

The Permeability Linear Change, Productivity Well Test, Fitting Plates, Deformable Porous Media

渗透率应力敏感影响下气井产能试井拟合图版的建立与应用

刘忠华¹, 祁俊武², 崔艳敏³

¹重庆科技学院复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆

²长庆油田井下技术作业公司, 西安

³重庆科技学院组织人事部, 重庆

Email: 75640299@qq.com

收稿日期: 2014年4月23日; 修回日期: 2014年4月29日; 录用日期: 2014年5月5日

摘要

总结前人对变形介质的研究成果, 认为变形介质中的渗流存在渗透率应力敏感性特征。针对变形介质中地层渗透率变化的初始阶段可以近似认为是线性变化的特点, 从其渗流的连续性方程、运动方程和渗透率应力敏感状态方程出发, 推导了渗透率线性变化条件下产能方程, 进一步得到了气井无因次产能公式。在此基础上绘制了气井无因次产能试井图版, 进一步分析了渗透率应力敏感性气井产能的影响。研究表明: 渗透率应力敏感性对气井产能的影响不可忽略; 图版的使用具有准确、方便、快捷的特点; 渗透率应力敏感影响下气井无阻流量要远大于未考虑渗透率应力敏感影响下的无阻流量。

关键词

渗透率线性变化, 产能试井, 拟合图版, 变形介质

1. 引言

油藏岩石通常受外应力(外压, σ)和内应力(内压, p)的共同作用[1] [2]。当内、外应力发生变化时, 岩石将产生变形, 进而导致岩石物性参数的变化, 岩石的这种性质称作应力敏感性[3]。

随着我国低渗透油气藏储量的全面动用与开发, 愈来愈多的低渗透岩石中的渗流规律实验结果表明, 低渗透多孔介质中的渗流规律根本不同于中高渗透介质中的渗流规律, 作为变形介质主要表现在低渗透多孔介质具有渗透率的应力敏感特性。低渗透多孔介质的毛细管较细, 介质的渗透率随应力变化较为敏感, 应力变化对渗透率的影响已不可忽略, 特别是对于异常高压的低渗透油气藏[4]-[13]。

在低渗透地层中, 由于低渗多孔介质的孔喉细小, 导致介质的渗流能力对应力具有明显的敏感性[14] [15]。应力敏感性对单井产量的影响, 国内很多学者进行了研究, 李传亮[16]、涂兴万[17]等人认为在油气藏开发过程中应力敏感可以忽略或者有利于提高产能; 蒋艳芳[18]、樊怀才[19]和史英[20]等认为应力敏感性会降低单井产能。

针对以上问题, 本文详细推导了考虑应力敏感影响下气井平面径向拟稳定渗流的无因次产能公式, 并绘制了产能试井拟合图版, 通过实例分析证明了求取部分参数时具有准确、快捷的特点。

2. 理论推导

2.1. 变形介质平面稳定渗流数学模型的建立

变形介质平面稳定渗流的连续性方程为:

$$\frac{\partial v_{\rho x}}{\partial x} + \frac{\partial v_{\rho y}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中: $v_{\rho x}$ —— x 方向质量渗流速度; $v_{\rho y}$ —— y 方向质量渗流速度。

变形介质稳定渗流的线性运动方程:

$$v = -\frac{k(p)}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (2)$$

式中: $k(p)$ ——渗透率应力敏感状态方程; μ ——流体粘度。

当地层中压力变化较小时, 渗透率应力敏感状态方程:

$$k(p) = k_0 [1 - \alpha_k (p_0 - p)] \quad (3)$$

式中: k_0 ——地层压力为 p_0 时的渗透率; α_k ——岩石的渗透率变化系数, $\alpha_k = \frac{1}{k_0} \frac{dk}{dp}$ 。

将运动方程(2)和状态方程(3)代入连续性方程(1)中, 得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{k_0}{\mu} [1 - \alpha_k (p_0 - p)] \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{k_0}{\mu} [1 - \alpha_k (p_0 - p)] \frac{\partial p}{\partial y} \right\} = 0 \quad (4)$$

2.2. 无因次产能方程的建立

令 $P = \frac{1}{2\alpha_k} [1 - \alpha_k (p_0 - p)]^2$, 则(4)式可以写为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

对于平面径向流则为:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

对(6)式可得平面径向流稳定渗流的产量公式为:

$$Q = \frac{2\pi k_0 h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} \left[(p_e - p_{wf}) - \frac{\alpha_k}{2} (p_e - p_{wf})^2 \right] \quad (7)$$

令 $\frac{2\pi k_0 h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} = A$, $-\frac{\alpha_k \pi k_0 h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} = B$, $B = -\frac{1}{2} \alpha_k A$ 。则(7)式可写成

$$Q = A(p_e - p_{wf}) + B(p_e - p_{wf})^2 \quad (8)$$

根据绝对无阻流量的概念, 当井底流压为一个大气压 ($p_{wf} = 0.01325$ MPa) 时, $p_e - p_{wf} = p_e - 0.01325 \approx p_e$, 则无阻流量的计算式为:

$$Q_{AOF} = Ap_e + Bp_e^2 \quad (9)$$

(8)式除以(9)式, 变形简化为

$$\frac{Q}{Q_{AOF}} = \frac{A}{A + Bp_e} \left(1 - \frac{p_{wf}}{p_e} \right) + \frac{Bp_e}{A + Bp_e} \left(1 - \frac{p_{wf}}{p_e} \right)^2 \quad (10)$$

令 $\frac{Q}{Q_{AOF}} = Q_D$, $\frac{A}{A+Bp_e} = C$, $1 - \frac{p_{wf}}{p_e} = P_D$, 则(10)式可以写成

$$Q_D = C \cdot P_D + (1-C) \cdot P_D^2 \quad (11)$$

或: 令 $\frac{Q}{Q_{AOF}} = Q_D$, $\frac{A}{A+Bp_e} = C$, $\frac{p_{wf}}{p_e} = P_D$, 则(10)式可以写成

$$Q_D = C \cdot (1-P_D) + (1-C) \cdot (1-P_D)^2 \quad (12)$$

式中 C 称为特征参数。

3. 图版的生成

3.1. 已知地层压力 p_e 时的图版

地层压力 p_e 已知的情况下, 根据(11)式分别以 $P_D = 1 - \frac{p_{wf}}{p_e}$ 和 $Q_D = \frac{Q}{Q_{AOF}}$ 为纵横坐标在双对数坐标系中生成图版(如图 1)。利用该图版可求得特征参数 C 、无因次产量 Q_D 、无阻流量 Q_{AOF} 。使用该图版时, 先在双对数坐标中将实测数据以 $P_{D\Box\Box} = 1 - \frac{p_{wf}}{p_e}$ 为横坐标, 产量 Q 为纵坐标, 绘制 $Q - P_{D\Box\Box}$ 曲线, 同时要求横纵坐标相应的对数周期长度与图版相等, 匹配时将 $Q - P_{D\Box\Box}$ 曲线与图版横坐标对齐, 平移到最佳位置, 选取一点, 分别读出 C 、 Q_D 、 Q , 然后根据无阻流量定义式: $Q_{AOF} = \frac{Q}{Q_D}$ 则可得到无阻流量。

3.2. 未知地层压力 p_e 时的图版

地层压力 p_e 未知或者没有可靠的地层压力 p_e 值的情况下, 可根据(12)式分别以 $P_D = \frac{p_{wf}}{p_e}$ 和 $Q_D = \frac{Q}{Q_{AOF}}$ 为纵横坐标在双对数坐标系中生成图版(如图 2)。利用该图版可求得特征参数 C 、地层压力 p_e 、无因次产量 Q_D 、无阻流量 Q_{AOF} 。使用该图版时, 先在双对数坐标系中以实测数据 p_{wf} 为横坐标, Q 为纵坐标, 绘制 $Q - p_{wf}$ 曲线, 同时要求横纵坐标相应的周期长度与图版相等, 匹配时将 $Q - p_{wf}$ 曲线沿横纵

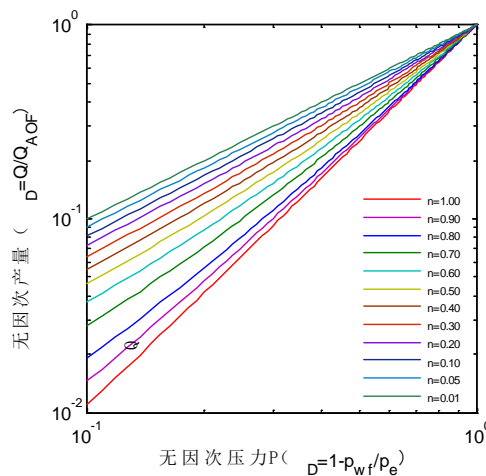


Figure 1. Known formation pressure deliverability testing fitting chart

图 1. 已知地层压力下的产能试井拟合图版

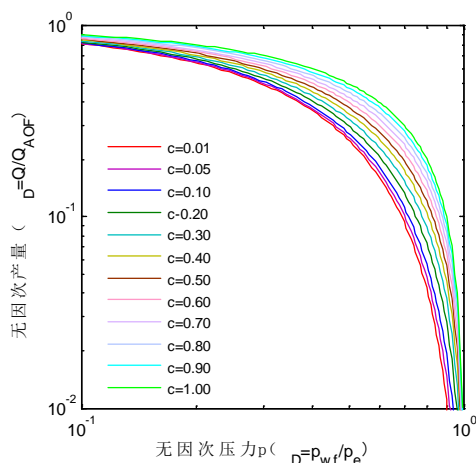


Figure 2. Unknown formation pressure deliverability testing fitting chart
图 2. 未知地层压力下的产能试井拟合图版

方向移动到最佳位置, 选取一点, 读出 C 、 Q_D 、 P_D 、 p_{wf} 、 Q_D , 则由式 $p_e = \frac{P_{wf}}{P_D}$, 可求的地层压力 p_e ,

由式 $Q_{AOF} = \frac{Q}{Q_D}$, 可得无阻流量 Q_{AOF} 。

3.3. 多解性分析

在已知地层压力 p_e 的情况下, 利用图版 1 进行匹配所求无阻流量 Q_{AOF} 唯一, 所得的 C 也可以直接用于一点法求无阻流量的计算之中; 在未知地层压力 p_e 的情况下, 利用图版 2 进行匹配求特征参数 C 与地层压力 p_e 时, 由于所测数据点数有限, 匹配时 C 与 p_e 具有一定的依赖性, 致使所求的绝对无阻流量 Q_{AOF} 产生多解性。为了准确利用图版 2, 就必须加密测试数据, 尤其是较低与较高井底流压下的测试数据, 以确保准确求得特征参数 C 与地层压力 p_e 和无阻流量 Q_{AOF} 。

3.4. 特征参数 C 的应用

通过拟合可以求得某一地区具有代表性的 C 值, 利用式(11)或(12)实现一点法计算无阻流量, 进一步制定正确的生产制度。

4. 实例应用

陕 17 井多点回压试井数据如表 1 所示。分别绘制曲线 $Q-P_{D\Box}$ 和 $Q-p_{wf}$ 与图 1、图 2 分别拟合(如图 3、图 4)所示。

从图 3 可读出 $C = 0.7$, 计算得到无阻流量为 $95.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 从图 4 可读出 $C = 0.7$, 计算得到无阻流量为 $99.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 地层压力为 31.60 MPa, 与测试地层压力很接近。

文献[11]中陕 17 井一点法计算得到的无阻流量为 $40.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 多点法计算得到的无阻流量为 $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。可以看出在考虑地层压力变化引起渗透率线性变化的情况下计算求得无阻流量要远大于未考虑渗透率变化情况下的无阻流量。

5. 结论

- 1) 绘制了介质变形引起地层渗透率线性变化条件下的产能试井拟合图版, 可以方便、准确地求出特

Table 1. S17 Well system test data [21]

表 1. S17 井的系统试井数据 [21]

地层压力(MPa)	井底流压(MPa)	测试产量($\times 10^4$ m ³ /d)
31.088	28.788	9.814
	27.708	13.315
	26.368	17.014
	24.898	20.404

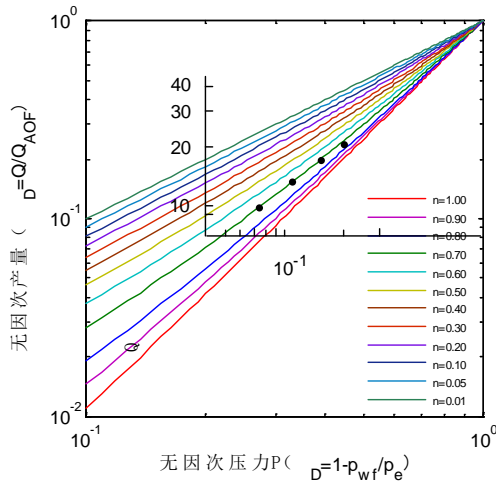


Figure 3. Known formation pressure deliverability testing fitting results

图 3. 已知地层压力的拟合结果

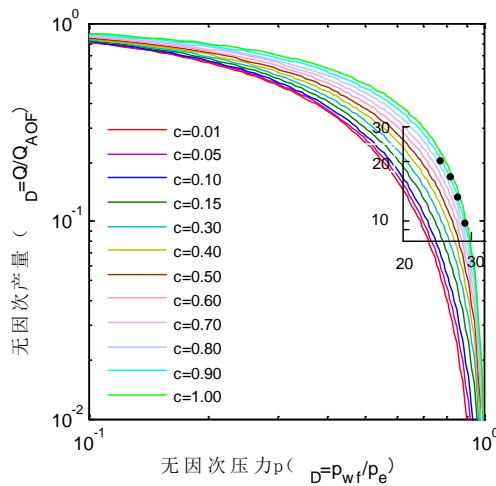


Figure 4. Unknown formation pressure deliverability testing fitting results

图 4. 未知地层压力的拟合结果

征参数 C 、地层压力、绝对无阻流量、无因次产量。

- 2) 分析拟合过程的多解性，提出了解决方法。
- 3) 渗透率应力敏感影响下气井无阻流量要远大于未考虑渗透率应力敏感影响下的无阻流量。

基金项目

重庆市基础与前沿研究项目(编号: cstc2013jcyjA90017)资助。

参考文献 (References)

- [1] 李传亮 (1998) 多孔介质应力关系方程. *应用基础与工程科学学报*, **2**, 145-148.
- [2] 李传亮, 孔祥言, 徐献芝, 等 (1999) 多孔介质的双重有效应力. *自然杂志*, **5**, 288-292.
- [3] 李传亮 (2005) 油藏工程原理. 石油工业出版社, 北京, 83-93.
- [4] Charles, W. (1989) Renew of characteristics of low permeability. *AAPG*, **5**, 73-78.
- [5] Zhang, M.Y. and Ambastha, A.K. (1994) New insights in pressure transient analysis for stress sensitive reservoirs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 25-28 September 1994, New Orleans, 617-627.
- [6] Farquhar, R.A., Smar, B.G.D. (1993) Stress sensitivity of low Permeability sandstones from the mtliegende sandstone. SPE 26501.
- [7] 阮敏, 王连刚 (2002) 低渗透油田开发与压敏效应. *石油学报*, **3**, 74-79.
- [8] 刘建军, 刘先贵 (2003) 低渗透岩石非线性渗流规律研究. *岩石力学与工程学报*, **3**, 556-561.
- [9] 吕成远, 王建 (2002) 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究. *石油勘探与开发*, **2**, 86-88.
- [10] 刘日武, 丁振华 (2002) 确定低渗透油藏启动压力梯度的三种方法. *油气井测试*, **4**, 1-4.
- [11] 刘建军, 刘先贵 (2001) 有效压力变化对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响. *地质力学学报*, **1**, 41-44.
- [12] 王学武, 黄延章, 杨正明 (2010) 致密储层应力敏感性研究. *岩土力学*, **1**.
- [13] 肖文联, 李闯, 赵金洲, 等 (2010) 低渗透致密砂岩渗透率应力敏感性试验研究. *岩土力学*, **3**, 775-779.
- [14] 阮敏, 王连刚 (2002) 低渗透油田开发与压敏效应. *石油学报*, **5**, 73-76.
- [15] 邓江明, 张茂林, 梅海燕, 等 (2007) 低渗气藏压敏性对合理产能影响研究. *西南石油大学学报*, **4**, 107-109.
- [16] 李传亮 (2008) 储层岩石的 2 种应力敏感机制. *岩性油气藏*, **1**, 111-113
- [17] 李传亮 (2007) 岩石应力敏感指数与压缩系数之间的关系式. *岩性油气藏*, **4**, 95-98.
- [18] 蒋艳芳, 张烈辉, 刘启国, 等 (2011) 应力敏感影响下低渗透气藏水平井产能分析. *天然气工业*, **10**, 54-56
- [19] 樊怀才, 李晓平, 窦天财, 等 (2010) 应力敏感效应的气井流量动态特征研究. *岩性油气藏*, **4**, 130-133.
- [20] 史英, 颜菲, 李小波 (2009) 考虑应力敏感疏松砂岩气藏试井分析. *岩性油气藏*, **3**, 114-117.
- [21] 杨洪志, 冯文光, 陈友莲 (2000) 二项式产能试井拟合图版. *矿物岩土*, **2**, 79-81.