

海上异常高压气藏应力敏感特征及产能方程

——以莺歌海盆地为例

温伟明 朱绍鹏 李 茂

中海石油(中国)有限公司湛江分公司

温伟明等.海上异常高压气藏应力敏感特征及产能方程——以莺歌海盆地为例.天然气工业,2014,34(9):59-63.

摘 要 目前国内外推导的异常高压气藏考虑应力敏感效应的产能方程中混淆了有效应力与生产压差的概念。为此,在前人研究的基础上,通过对实验和产能测试资料的分析,探讨了应力敏感对储层物性和气井产量的影响问题,并基于修正的应力敏感方程,结合气藏渗流特征,重新建立了符合油气藏地质特征的新的二项式气井产能方程,从理论上阐述了莺歌海盆地异常高压气藏产能特征,并用实际测试资料检验了该方程的实效性。结果表明,莺歌海盆地异常高压气藏开发中不应忽视应力敏感效应,在同一储层特征条件下,应力敏感效应特征越显著,开发过程中表现出的应力敏感效应越严重,气井产能损失就越大。因此,在异常高压气藏生产管理中,应采取合理的开发技术手段和工作制度,防止井筒附近地层压力迅速下降导致储层渗透能力及气井产能的下降。所取得的成果、认识可推广应用于其他类似探区。

关键词 异常高压气藏 应力敏感 产能方程 上覆压力 二项式 推导 莺歌海盆地

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.09.009

Stress sensitivity features and productivity equations of offshore abnormal high-pressure gas reservoirs: A case study from the Yinggehai Basin

Wen Weiming, Zhu Shaopeng, Li Mao

(CNOOC Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 9, pp.59-63, 9/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: At present scholars often mix up the concepts of effective stress and drawdown pressure, especially when the stress-sensitive productivity equations for those overpressure gas reservoirs are applied. Based on the previous studies and data analysis on the stress-sensitive experiments and production tests, the effects of stress sensitivity on reservoir physical properties and gas well production are discussed. Furthermore, a new binomial equation of gas-well productivity suitable for the geological features of a hydrocarbon reservoir is reformulated on the basis of the amended stress sensitivity equation and the percolation characteristics of a gas reservoir. The new binomial equation theoretically indicates the productivity features of abnormal high-pressure gas reservoirs in the Yinggehai Basin, and its effectiveness is validated through actual test data. The results show that the stress sensitivity effect should never be ignored in the development of abnormal high-pressure gas reservoirs in the Yinggehai Basin; the more obvious the stress sensitivity on the same gas reservoir, the greater the stress sensitivity effect during the development and the greater loss in gas well productivity. Therefore, a reasonable working system and development technology means should be implemented to manage the production of abnormal high-pressure gas reservoirs and to avoid rapid dropping of formation pressure around the wellbore which contributes to the reduction of reservoir permeability and gas well productivity. This study is practical and helpful in other similar reservoir development projects.

Keywords: abnormal high pressure gas reservoir, stress sensitivity, productivity equation, overburden pressure, binomial equation, derivation, Yinggehai Basin

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科研项目“海上大型砂岩气藏开发中后期综合治理及开发策略研究”(编号:CNOOC-KJ125ZDXM06LTD04ZJ12)。

作者简介:温伟明,1966年生,高级工程师;主要从事油气田勘探研究工作。地址:(524057)广东省湛江市坡头区22号信箱。电话:(0759)3900289。E-mail:wenwm@cnooc.com.cn

南海西部海域莺歌海盆地中深层为异常高压(地层压力系数大于 1.8)天然气气藏,该类气藏在衰竭式开采过程中往往表现出强应力敏感效应^[1-5]特征,国内外^[1-8]对该类气藏的应力敏感和产能的研究已有很多,但产能方程的建立中,混淆了有效应力与生产压差的概念。笔者在前人研究的基础上,通过对实验和产能测试资料分析,探讨了应力敏感对储层物性和气井产量的影响,并基于修正的压敏方程^[9-11],结合气藏渗流特征^[12-13],推导了考虑应力敏感效应的新的二项式气井产能方程,并对其产能特征进行了分析。

1 应力敏感特征

1.1 应力敏感实验研究

油气藏储层应力敏感性是指储层物性随有效应力的变化而发生变化的现象,有效应力通常定义为上覆地层压力与地层孔隙压力之差。因此在实验中常采用压敏实验(定围压变内压)和覆压实验(定内压变围压)来模拟实际油气藏储层应力敏感性。郭平等^[14-18]通过对两种实验对比分析,得出两种实验所获得的岩心渗透率的变化规律是一致的。笔者依此选用莺歌海某气田 D1 井黄流组的岩心开展覆压实验研究。

实验结果如图 1 所示,可见中新统黄流组储层岩心对应力具有强敏感性,当有效应力小于 10 MPa 时,随着有效应力的增加储层渗透率出现快速下降,即储层应力敏感性强,渗透率伤害指数大;但随着有效应力的进一步增加,储层渗透率下降幅度出现降低,尤其当有效应力增大到 15 MPa 后,储层渗透率随有效应力增加下降幅度将进一步减小,储层应力敏感性较弱。

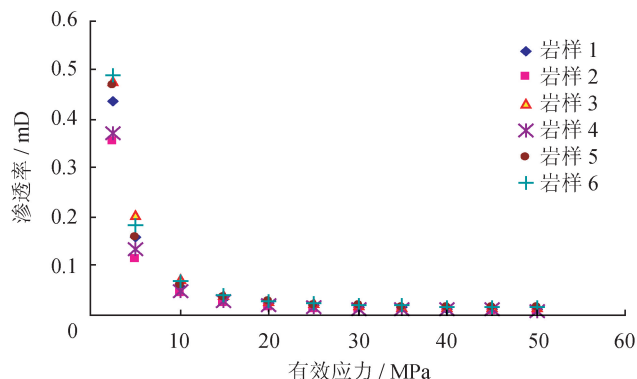


图 1 渗透率变化与有效应力实验关系图

实验研究表明,储层渗透率与有效应力具有幂指数关系,为了统一应力敏感效应评价标准。朱绍鹏^[9]引入相对有效应力概念($\sigma_f/\sigma_{f\min}$),将实验条件下的应力敏感相关式修正为:

$$K = K_0 \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{f\min}} \right)^{-m} \quad (1)$$

其中

$$\sigma_f = p_{\text{围}} - p_{\text{内}}$$

式中 K_0 为实验条件下最小有效应力时的渗透率, mD; σ_f 为实验条件下有效应力, MPa; $\sigma_{f\min}$ 为实验条件下最小的有效应力, MPa; $p_{\text{围}}$ 为实验条件下围压, MPa; $p_{\text{内}}$ 为实验条件下内压, 即流体压力, MPa; m 为应力敏感指数, 简称压敏指数, 无量纲。

由图 1 获得莺歌海盆地黄流组储层渗透率与相对有效应力实验关系为:

$$K = 0.34 \left(\frac{\sigma_f}{2.5} \right)^{-1.1783} \quad (2)$$

1.2 应力敏感影响产能实例

莺歌海盆地某气田黄流组主要为临滨砂坝、临滨滩砂沉积。砂体的规模较大,在气田范围内连片分布,纵向上相互叠置,砂体整体上垂物源方向呈西北向东南方向展布。整体看目的层储层表现为中孔低渗的特征。测试资料表明,该地区在开发生产进程中随着地层压力的下降,地层渗透性将下降,无阻流量将降低。因此该地区不能忽视储层应力敏感对开发生产的影响。

2 新的二项式产能方程的推导

在平面径向流情况下,气体高速非达西渗流的速度方程^[11-13]为:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} \nu + \beta \rho \nu^2 \quad (3)$$

其中

$$\nu = \frac{q_{sc}}{2\pi hr} \frac{p_{sc} T Z}{p T_{sc}}$$

$$\rho = \rho_{sc} \frac{p T_{sc}}{p_{sc} T Z}$$

根据相关经验公式^[8]得:

$$\beta = \frac{1.437 \times 10^{10}}{K^{1.0527}} \quad (4)$$

刻画实际油气田开发过程中渗透率随地层压力变化的应力敏感方程^[9-10](简称压敏方程)为:

$$K = K_i \left(\frac{p_{ob} - p}{p_{ob} - p_i} \right)^{-m} \quad (5)$$

把式(5)代入式(4)得:

$$\beta = \frac{1.437 \times 10^{10}}{K_i^{1.0527} \left(\frac{p_{ob} - p}{p_{ob} - p_i} \right)^{-1.0527m}} \quad (6)$$

考虑到 $1 \leq \left(\frac{p_{ob} - p}{p_{ob} - p_i} \right) \leq 4$, 因此有:

$$\left(\frac{p_{ob} - p}{p_{ob} - p_i} \right)^{-1.0527m} \approx \left(\frac{p_{ob} - p}{p_{ob} - p_i} \right)^{-m} \quad (7)$$

以上各式代入式(3)后得:

$$\left(\frac{p_{ob}-p}{p_{ob}-p_i}\right)^{-m} p dp = \left[\frac{\mu q_{sc}}{2\pi K_i h} \frac{p_{sc} T Z}{T_{sc}} \frac{1}{r} + \rho_{sc} \frac{1.437 \times 10^{10}}{K_i^{1.0527}} \frac{T_{sc}}{p_{sc} T Z} \left(\frac{q_{sc}}{2\pi h} \frac{p_{sc} T Z}{T_{sc}} \right)^2 \frac{1}{r^2} \right] dr \quad (8)$$

对式(6)积分得:

$$\left[-\frac{p_{ob}}{-m+1} (p_{ob}-p)^{-m+1} + \frac{1}{-m+2} (p_{ob}-p)^{-m+2} \right] \times \left(\frac{1}{p_{ob}-p_i} \right)^{-m} + c_1 = \frac{\mu q_{sc}}{2\pi h K_i} \frac{p_{sc} T Z}{T_{sc}} \ln r - \rho_{sc} \times \frac{1.437 \times 10^{10}}{K_i^{1.0527}} \frac{T_{sc}}{p_{sc} T Z} \left(\frac{q_{sc}}{2\pi h} \frac{p_{sc} T Z}{T_{sc}} \right)^2 \frac{1}{r} + c_2 \quad (9)$$

已知井底压力和边界压力为:

$$p(r_w) = p_{wf} \quad (10)$$

$$p(r_e) = p_e \quad (11)$$

把式(10)、(11)代入式(9)后整理得:

$$m(p_e) - m(p_{wf}) = A q_{sc} + B q_{sc}^2 \quad (12)$$

$$\text{其中 } m(p_e) = -\frac{p_{ob}}{-m+1} (p_{ob}-p_e)^{-m+1} + \frac{1}{-m+2} (p_{ob}-p_e)^{-m+2}$$

$$m(p_{wf}) = -\frac{p_{ob}}{-m+1} (p_{ob}-p_{wf})^{-m+1} + \frac{1}{-m+2} (p_{ob}-p_{wf})^{-m+2}$$

$$A = \frac{(p_{ob}-p_i)^{-m} \bar{\mu}}{2\pi h K_i} \frac{p_{sc} T Z}{T_{sc}} \ln \frac{r_e}{r_w}$$

$$B = \frac{1.437 \times 10^{10} (p_{ob}-p_i)^{-m} \rho_{sc}}{K_i^{1.0527}} \frac{p_{sc} T Z}{4\pi^2 h^2 T_{sc}} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right)$$

式中 q_{sc} 为标准状况下气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; h 为气层射开有效厚度, m ; $\bar{\mu}$ 为平均地层压力及温度下气体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; $\bar{Z}$ 为平均地层压力及温度下气体的偏差系数; ρ_{sc} 为标准状况下气体密度, g/cm^3 ; T 为地层温度, $^\circ\text{C}$; T_{sc} 为标准状况下温度, $^\circ\text{C}$; p_{sc} 为标准状况下压力, MPa ; p_{ob} 为储层上覆压力, MPa ; p_i 为储层原始地层压力, MPa ; p 为储层目前地层压力, MPa ; p_e 为泄油半径处地层压力, MPa ; p_{wf} 为井底流压, MPa ; r 为径向半径, m ; r_e 为泄油半径, m ; r_w 为井筒半径, m 。

当 $m=0$ 时, 式(12)与常规二项式产能方程^[11-13]相一致。

3 异常高压气藏产能特征分析

据莺歌海盆地黄流组储层特征, 结合新推导考虑应力敏感的二项式产能方程, 对海上异常高压气藏产能特征进行分析, 探讨了单个参数对气井产能的影响。

3.1 应力敏感指数对气井无阻流量的影响

应力敏感指数对气井无阻流量的影响如图2所示, 可见气井无阻流量随应力敏感指数的增大损失将越大。即说明实际应力敏感气藏开发生产过程中, 越具有强应力敏感效应的气藏, 应力敏感效应越严重, 气井产能相对损失就越大。

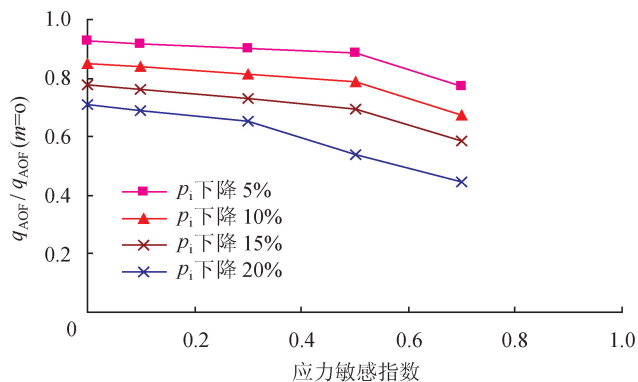


图2 应力敏感指数对气井产能的影响图

3.2 地层压力系数对产能的影响

在油气藏开发过程中, 储层有效应力可表述为上覆地层压力与孔隙压力之差, 在一定的上覆地层压力情况下, 储层有效应力只与地层压力有关, 储层有效应力将会随着地层压力系数变化而变化。如图3所示, 在同样的生产条件下, 地层压力系数越大的气藏(即越具有高异常压力显著特征的气藏), 开发过程中应力敏感效应将越严重, 单井产能损失越大。

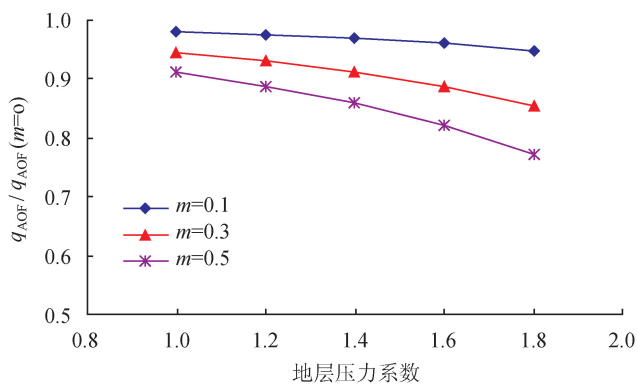


图3 不同应力敏感效应下地层压力系数对气井产能的影响图

3.3 上覆地层压力对产能的影响

随着上覆地层压力的不断增加, 孔隙中流体排出, 孔隙体积不断减小。在同一沉积环境下, 压实强弱, 即上覆地层压力的改变, 将影响储层物性变化, 从而影响产能。

根据上覆压力的经验公式: $p_{ob} = 0.01[h_{\text{水深}} + 2.3(h_{\text{中深}} - h_{\text{水深}})]$, 计算出不同储层埋深下的上覆压力, 再结合式(12)探讨上覆压力对产能的影响(图 4)。从图 4 中可以看出: 随着沉积物埋藏深度增加, 上覆压力增大, 应力敏感效应越严重, 气井产能损失越大。

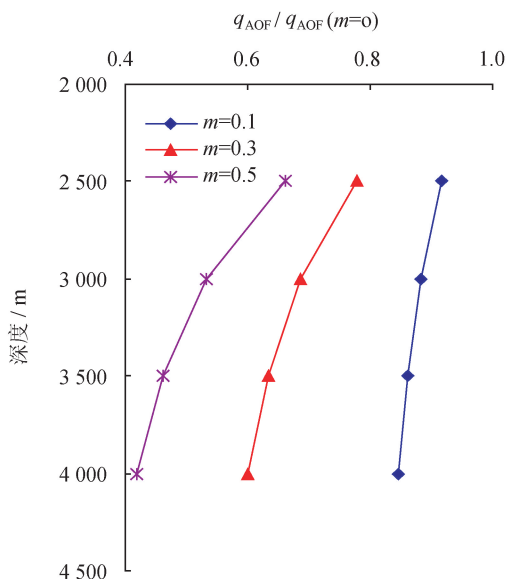


图 4 沉积物埋藏深度变化对气井产能的影响图

4 实例分析

莺歌海盆地某井对黄流组进行产能测试, 气藏中部海拔 -2 179.3 m, 海域水深 119 m, 地层压力系数为 2.18, 试井解释渗透率为 0.54 mD, 油层有效厚度为 7.5 m, 地层气黏度为 0.06 mPa · s, 气藏温度 136 °C, 偏差系数 1.206。根据覆压实验测试结果分析有效储层压敏指数平均为 0.15。

根据气藏实际资料, 计算得上覆地层压力为 61.0 MPa, 油藏压力为 58.2 MPa, 结合笔者推导的公式对产能进行分析, 其结果如图 5 所示。从图 5 中可看出,

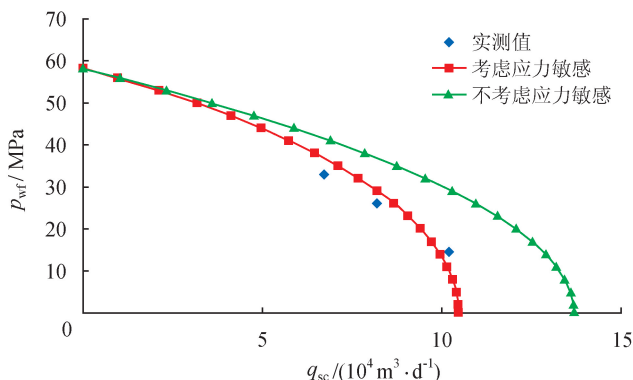


图 5 莺歌海盆地某井黄流组 IPR 曲线图

该气藏应力敏感效应严重, 应力敏感效应引起的气井无阻流量损失在 23% 左右。从产能测试数据分析, 考虑应力敏感效应的产能方程更符合实际产能测试。因此对莺歌海盆地异常高压气藏在产能评价时应考虑应力敏感效应, 综合分析确定该气藏单井合理工作制度, 尽量减少应力敏感效应对单井产量造成的损失。

5 结论及认识

1) 笔者从室内实验及生产动态两方面, 论证了海上异常高压气藏随着有效应力的变化将影响储层渗透能力及单井产能。并在前人研究的基础上, 基于修正应力敏感公式, 重新推导了反映应力敏感效应的二项式产能方程, 经实际测试资料检验具有实效性, 为类似气藏的产能求取提供了参考。

2) 莺歌海盆地异常高压气藏具有应力敏感效应, 应力敏感指数越大, 应力敏感效应越严重, 单井产能损失相对越大; 开发过程中越具有高异常压力显著特征的气藏, 应力敏感效应越严重, 单井产能损失相对越大。

3) 储层压实作用对气井产能具有一定的影响, 随着沉积物压实作用增强, 应力敏感效应越严重, 气井产能损失越大。

4) 海上异常高压气藏生产管理中要重视应力敏感效应, 要采取合理的开发技术手段和工作制度, 防止井筒附近地层压力迅速下降导致储层渗透能力及气井产能的下降。

参 考 文 献

- [1] 郭晶晶, 张烈辉, 涂中. 异常高压气藏应力敏感性及其对产能的影响[J]. 特种油气藏, 2010, 17(2): 79-81.
GUO Jingjing, ZHANG Liehui, TU Zhong. Stress sensitivity and its influence on productivity in gas reservoirs with abnormally high pressure[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(2): 79-81.
- [2] 向祖平, 谢峰, 张箭, 等. 异常高压低渗透气藏储层应力敏感对气井产能的影响[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 83-85.
XIANG Zuping, XIE Feng, ZHANG Jian, et al. The influence of stress sensitivity of abnormal high pressure and low permeability gas reservoir on the deliverability of a gas well [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(6): 83-85.
- [3] 郭春华, 周文, 冯文光, 等. 四川河坝异常高压气藏的产能方程及其计算[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 86-88.
GUO Chunhua, ZHOU Wen, FENG Wenguang, et al. Building up and calculation of a deliverability equation for Heba gas reservoir with abnormal high pressure in Sichuan

- Basin[J].Natural Gas Industry,2009,29(6):86-88.
- [4] 董平川,江同文,唐明龙.异常高压气藏应力敏感性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2087-2093.
DONG Pingchuan, JIANG Tongwen, TANG Minglong. Research on stress-sensitivity in abnormal high pressure gas reservoir[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(10):2087-2093.
- [5] 杨胜来,肖香娇,王小强,等.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.
YANG Shenglai, XIAO Xiangjiao, WANG Xiaoqiang, et al. Stress sensitivity of rock and its influence on productivity for gas reservoirs with abnormal high pressure[J].Natural Gas Industry,2005,25(5):94-95.
- [6] 熊健,马强,肖峰,等.低渗气藏酸压井产能评价研究[J].科学技术与工程,2013,13(6):1418-1422.
XIONG Jian, MA Qiang, XIAO Feng, et al. Well production evaluation of acid fracturing well in the low-permeability gas reservoirs[J].Science Technology and Engineering, 2013,13(6):1418-1422.
- [7] 任俊杰,郭平,王绍平,等.考虑变渗透率模量的异常高压气藏产能计算新方法[J].天然气工业,2013,33(7):52-56.
REN Junjie, GUO Ping, WANG Shaoping, et al. A new method for calculating the productivity of abnormally high-pressure gas reservoirs considering variable permeability modulus[J].Natural Gas Industry,2013,33(7):52-56.
- [8] 戴强,焦成,段永刚,等.应力敏感性对低渗透气藏渗流的影响[J].特种油气藏,2008,15(3):65-68.
DAI Qiang, JIAO Cheng, DUAN Yonggang, et al. Effect of stress sensitivity on percolation in low permeability gas reservoir[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2008,15(3):65-68.
- [9] 朱绍鹏,劳业春,杨志兴,等.一种新的压敏油藏产能方程[J].中国海上油气,2012,24(1):29-32.
ZHU Shaopeng, LAO Yechun, YANG Zhixing, et al. A new deliverability equation for pressure-sensitive oil reservoirs[J].China Offshore Oil and Gas,2012,24(1):29-32.
- [10] 朱绍鹏,李茂,劳业春,等.一种新的低渗压敏油藏产能方程推导及特征分析[J].中国海上油气,2012,24(5):29-33.
ZHU Shaopeng, LI Mao, LAO Yechun, et al. A new deliverability equation for oil reservoirs with low permeability and pressure-sensitivity and its characteristics[J].China Offshore Oil and Gas,2012,24(5):29-33.
- [11] 冯文光.油气渗流力学基础[M].北京:科学出版社,2007:74-80.
- FENG Wenguang. Oil and gas reservoir seepage mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2007: 74-80.
- [12] 葛家理,宁正福,刘月田,等.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001:65-70.
GE Jiali, NING Zhengfu, LIU Yuetian, et al. Modern reservoir seepage mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 65-70.
- [13] 黄炳光,冉新权,李晓平.气藏工程分析方法[M].北京:石油工业出版社,2004:87-90.
HUANG Bingguang, RAN Xinquan, LI Xiaoping. Analysis method of gas reservoir engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 87-90.
- [14] 郭平,张俊,杜建芬,等.采用两种实验方法进行气藏岩芯应力敏感研究[J].西南石油大学学报,2007,29(2):7-9.
GUO Ping, ZHANG Jun, DU Jianfen, et al. Study on core stress sensitivity for gas reservoir with two experiment method[J].Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(2): 7-9.
- [15] 李乐忠,李相方.储层应力敏感实验评价方法的误差分析[J].天然气工业,2013,33(2):48-51.
LI Lezhong, LI Xiangfang. Error analysis of experimental evaluation methods for stress sensitivity of reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 48-51.
- [16] 王峰,李崇喜.低渗透气藏应力敏感性及其变形机制研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(2):131-136.
WANG Feng, LI Chongxi. Study on stress sensitivity and transformation mechanism of low permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(2): 131-136.
- [17] 戴勇,吴大奎,李跃纲,等.川西地区九龙山构造碎屑岩储层气水预测实践[J].天然气工业,2012,32(9):37-39.
DAI Yong, WU Dakui, LI Yuegang, et al. Prediction of gas and water distribution in clastic reservoirs of the Jiulongshan structure in West Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 37-39.
- [18] 邓勇,彭光明.应力敏感储层相对渗透率计算方法研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):95-98.
DENG Yong, PENG Guangming. A calculation method for relative permeability curve of stress sensitive[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(2): 95-98.

(收稿日期 2014-04-04 编辑 韩晓渝)