

裂缝性高饱和压力油藏产能计算新方法

朱 婵¹, 沈开元², 童玉宝³, 江 武², 钱乔雅², 李文苗¹(1. 中国石油 辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124000; 2. 中国石油 西部钻探工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中国石油 新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:针对裂缝性碳酸盐岩高饱和压力油藏应力敏感性强、不适用常规产能预测方法的问题,从流动系数随压力的变化关系研究入手,以达西定理为基础,结合油田实际,提出了高应力敏感、高饱和压力油藏产能预测方法。用盐下油田3口井实测的向井流动态关系曲线进行对比的结果表明,经产能预测方法获得的计算值与实际测试值吻合得非常好,平均误差为4.1%。对于当井底流压低于某值,产量将随之降低,并且采用常规产能预测方法难以预测的难题,该方法为此提供了科学的解决办法,对裂缝性高饱和压力油藏开发具有指导意义。

关键词:压力下降;向井流动态关系曲线;产能预测;高饱和压力油藏;裂缝性油藏

中图分类号:TE19 **文献标识码:**A

A new productivity calculation method for fractured reservoirs with high saturation pressure

Zhu Chan¹, Shen Kaiyuan², Tong Yubao³, Jiang Wu², Qian Qiaoya², Li Wenmiao¹(1. Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124000, China;
2. Western Drilling Engineering Co. Ltd., PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
3. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: As fractured carbonate reservoirs with high saturation pressure are strongly sensitive to stress, the conventional productivity prediction methods are not applicable. Beginning with the study on the variation of flow coefficient with pressure, this paper presents a new productivity prediction method for reservoirs with high stress sensitivity and high saturation pressure based on the theory of darcy flow and in combination with the production practices. Comparison with the measured inflow performance relationship (IPR) curves from three wells shows that the calculated and measured values are in good agreement with an average error of only 4.1%. When bottom hole flowing pressure is lower than a given value output may decrease correspondingly, causing difficulty in productivity prediction with conventional method. The new method can be used to solve this problem, thus is of great significance for the development of the fractured reservoir with high saturation pressure.

Key words: pressure decrease, inflow performance relationship (IPR) curve, productivity prediction, high saturation pressure reservoir, fractured reservoir

裂缝性碳酸盐岩高饱和压力油藏随着地层压力的下降,渗透率会发生明显的下降,即表现出强的应力敏感性^[1-8],随着气体从原油中脱出,原油的体积系数和粘度都会发生变化。因此不能用常规的方法去预测计算这类油藏的油井产能。

由于主要是流动系数与常规油藏有差异,因此我们首先研究流动系数的变化规律,再以达西公式为基础导出产能预测方法。

1 流动系数与油藏压力的变化关系

对于高压异常压力敏感性油藏,当油藏压力下降时,油藏孔隙压力(内压)减小,油藏渗透率降低,采液指数也随之降低。渗透率随压力变化模型^[9-10]应用负指数衰减方程,即:

$$K_{oi} = K_o e^{-\alpha_K(p_i - p)} \quad (1)$$

式中: p_i 为原始油藏压力, MPa; p 为油藏压力, MPa; K_{oi} 为原始油藏压力 p_i 下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_o 为油藏压力 p 下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; α_K 为渗透率变异系数, MPa^{-1} , 可由测试资料求得。

同时, 在饱和压力和饱和压力以上时, 溶解有天然气的地层原油体积系数^[11]可表示为:

$$B_o = B_{oi} e^{-\alpha_B(p_i - p)} \quad (2)$$

式中: B_o 为地层原油体积系数; B_{oi} 为原始压力下地层原油体积系数; α_B 为原油体积系数变形系数。

在饱和压力和饱和压力以上时, 溶解有天然气的地层原油粘度^[12]可表示为:

$$\mu_o = \mu_{oi} e^{-\alpha_\mu(p_i - p)} \quad (3)$$

式中: μ_o 为地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_{oi} 为原始压力下地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; α_μ 为原油粘度变形系数。

令 $\alpha = \alpha_K - \alpha_\mu - \alpha_B$, 则可得出在不低于饱和压力的条件下, 溶解有天然气的地层原油流动系数与压力变化的关系可表示为:

$$\frac{K_o}{\mu_o B_o} = \frac{K_{oi}}{\mu_{oi} B_{oi}} e^{-\alpha(p_i - p)} \quad (4)$$

式中: K_{oi} 为原始压力下地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 油井产能方程的导出

结合达西定律以及流动系数随压力变化关系式, 可推导出应力敏感油藏中一口井拟稳定流下的产量公式为:

$$Q_o = \frac{2\pi K_{oi} h \alpha^{-1} C}{\mu_{oi} B_{oi} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + s \right)} \left| e^{-\alpha(p_i - p_r)} - e^{-\alpha(p_i - p_{wf})} \right| \quad (5)$$

式(5)可以简化为:

$$Q_o = J_{oi} \alpha^{-1} \left| e^{-\alpha \Delta p_e} - e^{-\alpha \Delta p_{wf}} \right| \quad (6)$$

式中: $\Delta p_e = p_i - p_r$; $\Delta p_{wf} = p_i - p_{wf}$ 。

则在井底压力大于饱和压力时, 含气原油采油指数为:

$$J_{oi} = \frac{2\pi K_{oi} h C}{\mu_{oi} B_{oi} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - 0.75 + s \right)} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: J_{oi} 为原始采油指数, $\text{m}^3 / (\text{MPa} \cdot \text{d})$; p_r 为平均油藏压力, MPa; Q_o 为油井产量, m^3 / d ; p_{wf} 为井底流动压力, MPa; r_e 为泄油半径, m; r_w 为井眼半径, m; h 为油层有效厚度, m; s 为表皮系数, 无量纲; C 为单位换算系数, $C = 86.4$ 。

注意到式(7)是基于达西公式推导出的, 没有考虑气体的影响, 可以应用于井底压力大于饱和压力的情况。当井底压力小于饱和压力时, 地层中将会有自由气体, 式(7)将不再适用。

对于井底流压小于饱和压力的情况下, 原油中有天然气分离出, 前面所讨论的粘度、体积系数与压力的关系将不再适用, 流动系数表示为:

$$\frac{K_o}{\mu_o B_o} = \frac{K K_{ro}}{\mu_o B_o} = \frac{K_{ro} K_i \exp[-a_K(p_i - p_{wf})]}{\mu_o B_o} \quad (8)$$

$$\text{则} \quad \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} = \frac{K_o}{\mu_o B_o} \frac{\exp[a_K(p_i - p_{wf})]}{K_i} \quad (9)$$

$$\text{由于} \quad J = \frac{2\pi K_o h C}{\mu_o B_o (\ln X - 0.75 + s)} \quad (10)$$

设

$$A = \frac{2\pi h C}{\ln X - 0.75 + s}, \quad B = \frac{1}{A K_i}, \quad X = \frac{r_e}{r_w} \quad (11)$$

$$J = A \frac{K_o}{\mu_o B_o} = \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{1}{B} \exp(-\alpha_K(p_i - p_{wf})) \quad (12)$$

$$Q_o = J \Delta p = \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{1}{B} \exp[-a_K(p_i - p_{wf})] \Delta p \quad (13)$$

$$\frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} = \frac{Q_o}{\Delta p} B \exp[a_K(p_i - p_{wf})] \quad (14)$$

$$\text{由于} \quad J_{oi} = \frac{2\pi h a K_{oi}}{\mu_{oi} B_{oi} (\ln X - 0.75 + s)} \quad (15)$$

式中: K_{ro} 为油藏压力 p 下的相对渗透率; J 为采油指数, $\text{m}^3 / (\text{MPa} \cdot \text{d})$ 。

李发印等人^[13]研究认为, 在流压比较低的情况下, 流动系数和压力的关系可以表示为:

$$p_{wf} = b \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} \right)^2 \quad (16)$$

将式(14)代入式(16)可得

$$\begin{aligned} p_{wf} &= b \left\{ \frac{Q_o}{\Delta p} \exp[a_K(p_i - p_{wf})] B \right\}^2 \\ &= b \left\{ \frac{Q_o}{\Delta p} \exp[\alpha_K(p_i - p_{wf})] \frac{K_{ro}}{J_{oi} \mu_{oi} B_{oi}} \right\}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$Q_o = \frac{\mu_{oi} B_{oi} J_{oi}}{\sqrt{b}} \sqrt{p_{wf}(p_r - p_{wf})} \exp[-a_K(p_i - p_{wf})] \quad (18)$$

式中: K_{ro} 为原始油藏压力 p_i 下的相对渗透率; 式(18)即为高应力敏感、高饱和压力油藏在井底流压小于饱和压力的条件下, 伴随溶解气分离时的产能预测方法。

3 产能预测方法的验证

结合哈萨克斯坦的肯基亚克盐下石炭系碳酸盐岩油藏为裂缝性高饱和、强压力应力敏感性油藏, 其饱和压力高达 25 MPa, 利用测试资料进行对比计算, 验证所导出方法的准确性与适用性。

由覆压渗透率试验数据可得石炭系渗透率变异系数为 0.010 MPa^{-1} 。

根据渗透率、体积系数、粘度等随压力变化的实验

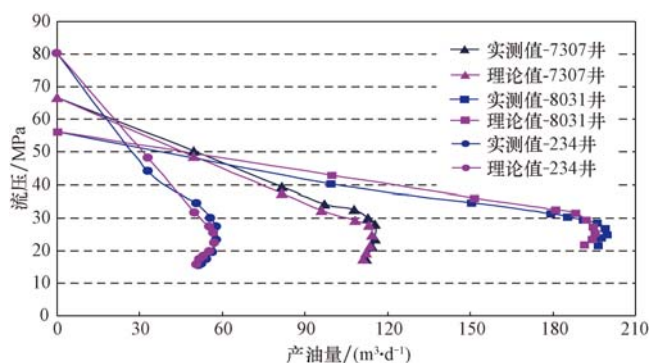


图1 7307井、8031井、234井向井流动态关系

Fig. 1 IPR curves of the Well 7307, Well 8031 and Well 234

测试数据,可得 α 为0.002 5,则由式(6)得石炭系油井的产能计算公式为:

$$Q_o = J_{oi} 0.0025^{-1} | e^{-0.0025(p_i - p_r)} - e^{-0.0025(p_r - p_{wf})} | \quad (19)$$

当井底流压小于饱和压力时,将测试数据代入式(18),并经油井试井资料校正可得如下公式:

$$Q_o = 0.277 J_{oi} \sqrt{p_{wf}(p_r - p_{wf})} \exp(0.010 1 p_{wf} - 0.010 1 p_i) \quad (20)$$

由方程(19)和方程(20),即可算出石炭系油藏油井的向井流动态关系。图1中三组曲线是7307井、8031井、234井用上述方法计算的理论值与实测值的对比。从图中可以看出,计算值与实际测试值吻合非常好,根据计算平均误差为4.1%。

4 结论

1) 推导出的产能预测方法的计算值与实际测试值吻合的非常好,对裂缝性碳酸盐岩高饱和压力油藏开发具有指导意义。

2) 对于高应力敏感、高饱和压力油藏,根据该公式预测,当流压低于某值时,产量将随之降低,解决了其不适用常规产能预测方法的问题。

3) 新公式预测的某些结论还需用现场大量数据的进一步验证。另外,文中考虑的因素也不一定全面,如含水对油相流动系数的影响,这是该公式今后改进的一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] 李传亮. 裂缝性油藏的应力敏感性及其产能特征[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 72-75.
Li Chuanliang. Stress sensitivity and productivity of fractured reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 72-75.
- [2] 徐东锋, 赵红佳, 刘见宝. 济阳坳陷沾化凹陷异常高压与油气成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 601-605, 624.
Xu Dongfeng, Zhao Hongjia, Liu Jianbao. Abnormal pressure and hydrocarbon reservoiring pattern of the Zhanhua sag in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 601-605, 624.
- [3] 孙伟, 李玉凤, 何巍巍, 等. P波各向异性裂缝预测技术在ZY区碳酸盐岩储层中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 137-144.
Sun Wei, Li Yufeng, He Weiwei, et al. Using P-wave azimuthal anisotropy to predict fractures in carbonate reservoirs of the ZY block[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 137-144.
- [4] 黄保纲, 汪利兵, 赵春明, 等. JZS油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 710-717.
Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, et al. Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 710-717.
- [5] 陈冬, 魏修成. 塔河地区碳酸盐岩裂缝型储层的测井评价技术[J]. 石油物探, 2010, 49(2): 147-152.
Chen Dong, Wei Xiucheng. Well-logging evaluate technology for fractured carbonate reservoirs in Tahearea[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(2): 147-152.
- [6] 陈冬, 陈力群, 魏修成, 等. 火成岩裂缝性储层测井评价——以准噶尔盆地石炭系火成岩油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 83-90.
Chen Dong, Chen Liqun, Wei Xiucheng, et al. Log evaluation of fractured igneous reservoirs: a case study of the Carboniferous igneous reservoirs in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 83-90.
- [7] 张津海, 姜洪福, 张迪楠, 等. 海拉尔盆地布达特潜山裂缝性油藏油水层识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 593-600.
Zhang Jinhai, Jiang Hongfu, Zhang Dinan, et al. Identification of oil and water layers in Budate fractured buried hill reservoir, the Hailar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 593-600.
- [8] 苑闻京, 魏伟, 符力耘, 等. 地层孔隙压力的地球物理响应特征分析——以澳大利亚西北大陆架卡拉汶盆地超压地层为例[J]. 石油物探, 2010, 49(1): 72-78.
Yuan Wenjing, Wei Wei, Fu Liyun, et al. Geophysical response characteristics analysis of formation pore pressure: case study on overpressure formation in Kalawen Basin of Australia Northwest continental shelf[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(1): 72-78.
- [9] 赖枫鹏, 李治平, 郭艳东. 川东北碳酸盐岩气藏岩石渗透率变化实验[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 932-937.
Lai Fengpeng, Li Zhiping, Guo Yandong. Experiments on permeability change of carbonate gas reservoirs in northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 932-937.
- [10] 郭彤楼. 川东北地区碳酸盐岩层系孔隙型与裂缝型气藏成藏差异性[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 311-317, 326.
Guo Tonglou. Differences in reservoir forming between porous and fractured gas pools in carbonates, the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 311-317, 326.
- [11] Vazquez M, Beggs H D. Correlation for fluid physical property[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 6: 968-970.
- [12] Beggs H D, Robinson J F. Estimating the viscosity of crude oil system[J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 9: 1140-1141.
- [13] 李发印. 低流压下油井产能预测方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1991, 10(3): 39-44.
Li Fayin. Prediction method of oil well productivity under flowing pressure[J]. Petroleum Geology Oilfield Development in Daqing, 1991, 10(3): 39-44.