

特低渗透油藏考虑变启动压力梯度的产量计算模型

董 郝¹, 李承龙^{2,3}

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司第六采油厂, 黑龙江 大庆 163114; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712;
3. 黑龙江省油层物理与渗流力学重点实验室, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:特低渗透油藏流体呈非线性流动, 受压敏效应作用, 渗透率发生变化, 从而导致启动压力梯度变化。目前已有的产量计算方法未同时考虑变启动压力梯度和压敏效应的问题, 计算结果与实际情况偏差较大, 适用性较差。针对这些问题, 基于特低渗透油藏渗流理论, 利用压敏效应公式等, 建立了变启动压力梯度的产量计算模型, 并以朝阳沟油田C区块为例, 分析了压敏效应和变启动压力梯度对产量的影响。结果表明, 利用所建模型计算C区块累计产量, 计算精度提高了4.17%, 其中27口采油井产量计算误差小于5%, 模型计算结果更符合矿场实际情况。研究成果完善了特低渗透油藏渗流理论, 可为特低渗透油藏的有效动用提供理论基础。

关键词:特低渗透油藏; 变启动压力梯度; 压敏效应; 朝阳沟油田

中图分类号:TE348 **文献标志码:**A

Production calculation model of ultra-low permeability reservoir considering variable start-up pressure gradient

DONG Hao¹, LI Chenglong^{2,3}

(1. No. 6 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Daqing 163114, China;
2. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Daqing 163712 China;
3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Reservoir Physics & Fluid Mechanics, Daqing 163712, China)

Abstract: The fluid flow in ultra-low permeability reservoir is nonlinear, and the permeability changes due to the pressure-sensitive effect, which causes the start-up pressure gradient to change. At present, the existing production calculation methods do not take into account the problems of variable starting pressure gradient and pressure-sensitive effect at the same time, so the calculation results deviate greatly from the actual situation, and the applicability is poor. In terms of these problems, based on the percolation theory of ultra-low permeability reservoirs, a production calculation model with variable starting pressure gradient was established by using the pressure-sensitive effect formula. Taken Block C of Chaoyanggou Oilfield as an example, the influence of pressure-sensitive effect and variable starting pressure gradient on production was analyzed. The results show that the accuracy of the model has increased by 4.17%, and the calculation error of the production of 27 oil wells is less than 5%. And the calculation result of the model is more in line with the actual situation. The research results have perfected the percolation theory of ultra-low permeability reservoirs and can provide a theoretical basis for the effective production of ultra-low permeability reservoirs.

Key words: ultra-low permeability reservoir; variable starting pressure gradient; pressure sensitive effect; Chaoyanggou Oilfield

特低渗透油藏储层物性差, 存在高启动压力梯度, 流体满足低速非达西渗流^[1-3], 油层难以建立有效驱替。同时, 特低渗透油藏受压敏效应影响较大^[4-6], 渗透率损失严重, 导致启动压力梯度增大, 加大了建立有效驱替的难度, 提高了开发难度, 产量进一步下降, 严重制约油田开发效果和效益^[7-12]。为保障油田高效开发, 需要深化特低渗透油藏渗流理论^[13-15]。经调研, 关于特低渗透油藏启动压力梯度和压敏效应等方面研究存在一定的不足^[16-17], 已

有研究成果未考虑启动压力梯度发生动态变化的问题。为此, 通过推导考虑变启动压力梯度的产量计算模型, 完善特低渗透油藏渗流理论, 为开发调

收稿日期: 2020-12-19; 改回日期: 2021-01-14。

第一作者简介: 董郝(1988—), 女, 现从事油田油藏动态分析研究工作。E-mail: lcl716@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“外围油田改善开发效果及提高采收率技术研究与应用”(2016E-0209)。

整方案编制提供理论支持。

1 启动压力梯度与压敏效应研究

1.1 启动压力梯度研究

计秉玉等^[8]曾利用大庆长垣外围油田扶余油层56个区块的实际物性数据,得到了长垣外围扶余油层的渗透率与启动压力梯度的关系曲线(见图1)。由图1可知,当渗透率小于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,启动压力梯度增幅变大。根据实际数据,绘制渗透率倒数与启动压力梯度的关系曲线(见图2)。由图2可知,回归关系曲线具有一定的线性相关性。

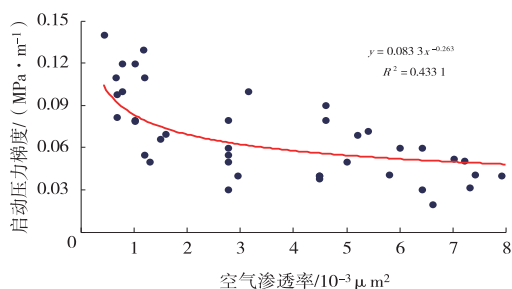


图1 渗透率与启动压力梯度的关系

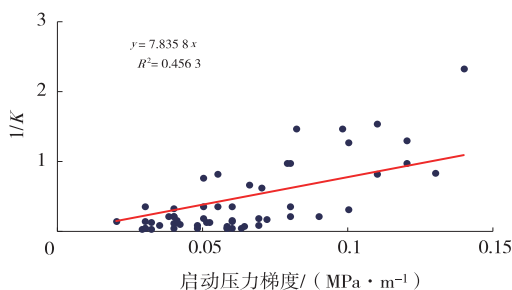


图2 渗透率倒数与启动压力梯度的关系

则渗透率与启动压力梯度可满足关系式:

$$K^{-1} = 7.835 8\lambda \quad (1)$$

整理得

$$\lambda = 0.127 6 K^{-1} \quad (2)$$

式中, K 为油相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; λ 为启动压力梯度, MPa/m 。

1.2 压敏效应研究

通过室内实验得到扶余油层不同渗透率岩心与压力敏感系数的关系曲线(见图3)。

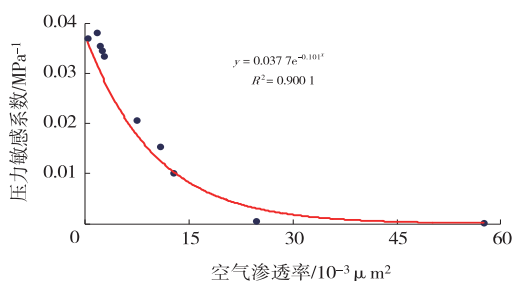


图3 压力敏感系数与渗透率的关系

由图3可知,渗透率与压力敏感系数呈指数型关系式,随着渗透率的减小,压力敏感系数也随之减小。

$$M = 0.037 7e^{-0.110 1K_0} \quad (3)$$

式中, M 为压力敏感系数, MPa^{-1} ; K_0 为油层原始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

储层渗透率与有效覆压的关系式^[13]:

$$K = K_0 e^{-M(p_i - p)} \quad (4)$$

2 考虑变启动压力梯度的产量计算模型推导

油藏开发过程中,受压敏效应影响,地层压力的变化导致油藏介质发生变化,渗透率和启动压力梯度随之变化,两者相互影响。假设当注水井注水压力高于原始地层压力时,岩石结构不发生形变,孔隙体积和渗透率不变。

则基于压敏效应的变启动压力梯度计算式可表示为:

$$\lambda = aK_0^{-b} e^{bM(p_i - p)} \quad (5)$$

当 $b=1$ 时,上式整理为:

$$\lambda = aK_0^{-1} e^{M(p_i - p)} \quad (6)$$

式中, p 为目前地层压力, MPa ; p_i 为原始地层压力, MPa ; a 、 b 为正实数。

非达西渗流产量计算模型为:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q\mu B}{2\pi rhK} + \lambda \quad (7)$$

式中, q 为日产油量, m^3/d ; r 为供给半径, m ; h 为油层厚度, m ; B 为流体体积系数; dp/dr 为压力梯度, MPa/m ; μ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

将公式(4)、(6)带入(7),得到考虑变启动压力梯度和压敏效应的产量计算模型:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q\mu B}{2\pi rhK_0} e^{M(p_i - p)} + \frac{a}{K_0} e^{M(p_i - p)} \quad (8)$$

分离变量得到

$$\int_{p_w}^{p_e} K_0 e^{-M(p_i - p)} dp = \int_{r_w}^{r_e} \left(\frac{q\mu B}{2\pi r} - a \right) dr \quad (9)$$

对式(9)积分:

$$q = \frac{2\pi h}{\mu B} \frac{K_0 \left[e^{-M(p_i - p_e)} - e^{-M(p_i - p_w)} \right] - aM(r_e - r_w)}{M \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (10)$$

当 $p_i = p_e$ 时,得到考虑变启动压力梯度和压敏效应的产量计算模型:

$$q = \frac{2\pi h K_0 \left[1 - e^{-M(p_e - p_w)} \right] - aM(r_e - r_w)}{\mu B M \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (11)$$

3 模型产能影响因素分析

以扶余油层朝阳沟油田C区块为例,利用所建立模型分析启动压力梯度、压敏效应对油井产量的影响。截至2018年底,C区块石油地质储量 147×10^4 t,采用250 m×250 m反九点法井网开采,采油井数50口,注水井数12口,区块渗透率 4.5×10^{-3} μm²,孔隙度17%,有效厚度9.6 m,地下原油黏度14 mPa·s,原油体积系数1.076 MPa⁻¹,原始地层压力8.4 MPa,注水井注水压力12.5 MPa,油井流压2.6 MPa,采出程度6.26%,采油速度0.22%,井筒半径0.127 m,启动压力梯度0.032 MPa·m⁻¹,压敏系数0.024 MPa⁻¹。

3.1 压敏效应和变启动压力梯度严重制约特低渗透油藏开发效果

由不同条件下注采压差与产量关系曲线(见图4)可以看出:考虑变启动压力梯度条件下,随着注采压差的增大,模型计算产量呈非线性增加;当注采压差过小,油藏难以建立驱动体系;受压敏效应影响,开采过程中当地层压力低于原始地层压力时,油层渗透率下降,导致启动压力梯度增大,流体渗流需消耗更多的能量克服启动压力,加剧了能量损失,产量下降。考虑变启动压力梯度条件下的产量最低,这可以解释特低渗透油藏产量低的原因。

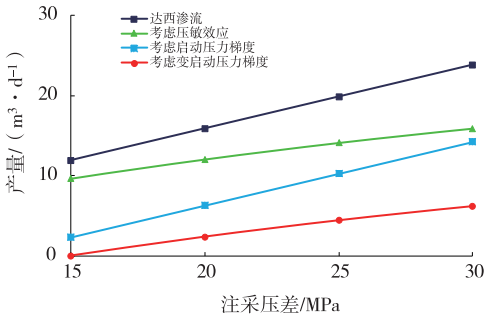


图4 不同条件下注采压差与产量的关系曲线

3.2 启动压力梯度影响程度越严重,产能降幅越大

由不同启动压力梯度条件下注采压差与产量关系曲线(见图5)可知,启动压力梯度越大,模型计算产量降幅越大;模型计算产量随注采压差的变大而增大;由于启动压力梯度增大,油井渗流阻力增大,导致模型计算产量下降。

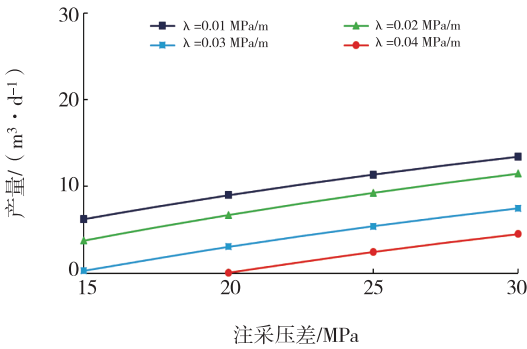


图5 不同启动压力梯度条件下注采压差与产量的关系曲线

3.3 压敏效应影响程度越严重,开发效果越差

由不同压敏系数条件下注采压差与产量关系曲线(见图6)可知,压敏系数越大,油井产量越低。随着注采压差的增大,模型计算产量逐渐升高;当注采压差较小(≤15 MPa)时,不同压敏系数条件下模型计算产量变化幅度较小,说明注采压差过小,压敏效应影响较弱;当注采压差较大(>15 MPa)时,模型计算产量随压敏系数的增大而逐渐降低,此时压敏效应影响较大。

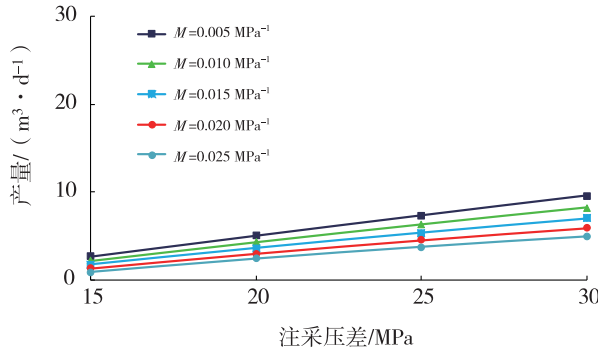


图6 不同压敏系数条件下注采压差与产量的关系曲线

4 实例计算

根据扶余油层朝阳沟油田C区块实际生产数据对所建立模型进行验证。计算结果(见图7)表明:50口采油井实际累计产油量为 9.21×10^4 t;利用考虑压敏效应的产量计算模型计算的累计产油量为 12.54×10^4 t,误差为36.12%,误差较大;利用考虑启动压力梯度的产量模型计算的累计产油量为 10.07×10^4 t,误差为9.34%;利用本文所建立模型计算的累计产油量为 8.73×10^4 t,误差为5.17%。与非达西产量计算模型计算的结果相比,所建立的模型计算精度提高4.17%,且与实际指标变化规律基本相符。

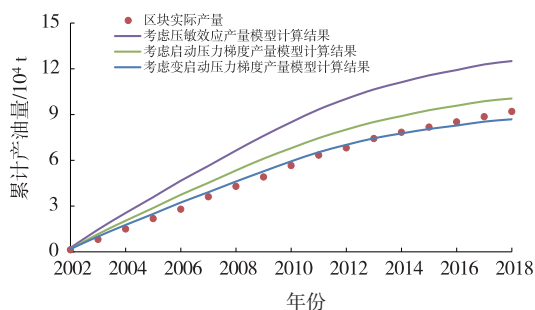


图7 C区块实际累计产油量与计算累计产油量
随时间变化曲线

利用变启动压力梯度产量模型的计算结果精度较高,单井产量计算误差在5%以内的共27口井,占总井数的54%;单井产量计算误差在5%~10%之间的共14口井,占总井数的28%,由于油井端流压调整井次较多,注采压差发生变化,单井产量呈波动性下降,模型计算误差较大;单井产量计算误差大于10%的共9口井,占总井数的18%,分析其原因,一是C区块于2016年8月选取3个井组(包含6口采油井)采取了调剖堵水措施,井组控水增油效果显著,二是C区块选取3口采油井采取了侧钻措施,提高了单井产量。综上所述,验证了所建立的模型具有较高的计算精度,更符合矿场实际情况。

针对模型及计算数据,需要进行以下几方面的完善:一是提高室内实验启动压力梯度及压敏系数测定结果精度。模型基于启动压力梯度及压敏效应测定实验结果,如果实验误差较大,则会导致计算结果与实际数据存在较大偏差;二是考虑分阶段计算,在矿场实际生产过程中,采取控流压开采,不同阶段井底流压不同,因此在计算过程中,可以考虑分阶段赋流压运算。

5 结论

(1)基于特低渗透油藏渗流理论,利用压敏效应计算公式等,推导了变启动压力梯度的计算公式;针对大庆长垣外围扶余油层低渗透油藏,考虑压敏效应对启动压力梯度和渗透率的影响,推导了考虑变启动压力梯度的长垣外围扶余油层低渗透油藏产能模型,弥补了现有特低渗透油藏产能模型的不足。

(2)特低渗透油藏受压敏效应和变启动压力梯度影响,产量大幅度下降;启动压力梯度越大、压敏效应影响程度越严重,油井产量越低;当注采压差较小时,压敏效应影响较弱。

(3)实例计算结果验证了所建立的模型计算精

度更高,更符合矿场实际,可用于评价特低渗透油藏开发效果,适用于同类油藏的开发方案编制。

参考文献:

- [1] 胡文瑞,魏漪,鲍敬伟.中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J].石油勘探与开发,2018,45(4):646-656.
- [2] 崔悦,石京平.大庆油田表外储层渗流特征实验[J].大庆石油地质与开发,2017,36(2):69-72.
- [3] 杨仁峰,蒋瑞忠,刘世华,等.特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J].石油学报,2011,32(2):299-306.
- [4] 周新茂,郝明强,鲍敬伟.特低渗透压敏油藏压力分布特征[J].大庆石油地质与开发,2009,28(6):171-174.
- [5] 张楠,王晓琴,徐锋,等.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J].特种油气藏,2012,19(1):74-77.
- [6] 祝明谦,王怒涛,张辉启.启动压力梯度和应力敏感效应对油藏产能的影响[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):59-63.
- [7] 陈映赫.低渗透油层非达西渗流单井产能计算[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):78-81.
- [8] 计秉玉,李莉,王春艳.低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J].石油学报,2008,29(2):256-261.
- [9] 周芸,周福建,冯连勇.一种新型油气产量预测模型[J].大庆石油地质与开发,2018,37(5):76-80.
- [10] 李元生,李相方,藤赛男,等.考虑变启动压降和高速非达西渗流的产能计算新方法[J].石油钻探技术,2012,40(2):70-75.
- [11] 郑宪宝.基于渗透率压力敏感性的面积井网产量计算[J].大庆石油地质与开发,2013,32(6):71-75.
- [12] 尹芝林,赵国忠,张乐.基于非达西、压敏效应及裂缝的数模技术[J].大庆石油地质与开发,2015,34(3):57-60.
- [13] 赵国忠,杨清彦,唐文锋,等.大庆长垣外围低渗透油田开发机理[J].大庆石油地质与开发,2009,28(5):126-133.
- [14] 窦宏恩,杨旸.低渗透油藏流体渗流再认识[J].石油勘探与开发,2012,39(5):633-640.
- [15] 李传亮,朱苏阳.再谈启动压力梯度[J].岩性油气藏,2013,25(4):1-5.
- [16] 何岩峰,赵虹宇,窦祥骥,等.考虑应力敏感的页岩储层纳米孔隙渗透率计算模型[J].大庆石油地质与开发,2018,37(6):151-157.
- [17] 李荣强,高莹,杨永飞,等.基于CT扫描的岩心压敏效应实验研究[J].石油钻探技术,2015,43(5):37-43.

(编辑 谢 葵)