

文章编号:1673-5005(2009)06-0082-05

特低渗油藏渗流阻力梯度的非线性特征

刘 辉¹, 冯明生¹, 何顺利², 杨 双¹, 杨明慧³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要:根据边界层理论,运用三次函数形式对特低渗岩心试验曲线进行拟合分析,在此基础上,运用微分线性描述方法,建立考虑边界层及启动压力梯度影响的特低渗储层渗流阻力梯度的数学模型,得到渗流阻力梯度与驱替压力梯度及渗透率的关系图版。结果表明,渗流阻力梯度随驱替压力梯度增加而降低,随渗透率减小而增大,且渗透率越小,渗流阻力梯度增幅越大,其非线性变化特征越明显。

关键词:特低渗油藏; 渗流阻力梯度; 非线性特征; 边界层; 启动压力梯度

中图分类号:TE 341

文献标识码:A

Nonlinear feature of flow resistance gradient in ultra-low permeability reservoir

LIU Hui¹, FENG Ming-sheng¹, HE Shun-li², YANG Shuang¹, YANG Ming-hui³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Basin & Reservoir Research Center in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: According to the boundary layer theory, the experimental curves of ultra-low permeability cores were analyzed by applying cubic function. Considering the influence of the boundary layer and starting pressure gradient, a mathematical model of flow resistance gradient of ultra-low permeability reservoir was established by differential and linear description method. And the relationship charts between flow resistance gradient and driving pressure gradient, permeability were obtained. The results show that the flow resistance gradient decreases with the driving pressure gradient increasing. The flow resistance gradient increases with the permeability decreasing, and the increasing amplitude of flow resistance gradient enhances and its nonlinear feature is more obvious with the permeability decreasing.

Key words: ultra-low permeability reservoir; flow resistance gradient; nonlinear feature; boundary layer; starting pressure gradient

特低渗储层由于孔喉细小,渗透率低,在渗流过程中由边界层及启动压力所引起的附加阻力不能忽略。李忠兴等^[1-4]对启动压力梯度的影响进行了探讨,徐绍良等^[5-8]研究了边界层对渗流的影响,但目前关于边界层及启动压力共同作用所引起的附加阻力变化规律的研究则较少,且模型求解繁琐^[9-10],不利于运用。笔者根据边界层理论及启动压力梯度特征,结合特低渗储层岩心试验数据,运用微分线性处理方法,建立渗流阻力梯度非线性数学模型,对渗流

中的附加阻力变化特征进行研究。

1 试 验

1.1 边界层

根据边界层理论,在特低渗储层中渗流驱动力梯度和有效边界层厚度的关系^[11]为

$$h_s \approx \text{rexp}(-c_1 \nabla p). \quad (1)$$

式中, h_s 为边界层厚度; r 为孔喉半径; ∇p 为驱替压力梯度; c_1 为常数,由试验确定。

收稿日期:2009-08-28

基金项目:国家“973”重点基础研究规划项目(2003CB214602)

作者简介:刘辉(1979-),男(汉族),四川荣县人,工程师,博士,主要从事油藏工程和数值模拟研究。

由于边界层的影响,实际参与渗流的有效孔喉半径为: $r_e = r - h_s$,将其展开成麦克劳林级数,近似取前两项,代入 Poiseuille 定律,可得渗透率与孔喉半径的关系为

$$k = \frac{\varphi r^2 c_1^2}{8} (\nabla p)^2. \quad (2)$$

式中, k 为气测渗透率; φ 为孔隙度。

将式(2)代入具有启动压力梯度的非达西渗流方程,可得

$$v = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - G) = -\frac{\varphi r^2 c_1^2}{8\mu} (\nabla p)^2 (\nabla p - G) = c[(\nabla p)^3 - G(\nabla p)^2]. \quad (3)$$

其中

$$c = \varphi r^2 c_1^2 / (8\mu).$$

式中, v 为渗流流速; G 为启动压力梯度; c 为与岩心物性及流体性质相关的系数。

式(3)表明,在特低渗储层中,由于边界层的影响,使孔喉有效渗流半径发生变化,进而影响了流速的变化规律,使其与压力梯度具有三次函数关系。

1.2 试验数据处理

通过室内恒速驱替法,采用 ISCO 驱替泵控制流量,利用计算机记录驱替压力,对长庆西峰油田特低渗岩心进行驱替试验,并利用三次函数形式对流速-压力梯度试验数据^[12]进行拟合,得

$$v = a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^3 + b \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 + c \frac{\nabla p}{L} + d. \quad (4)$$

系数 a, b, c, d 为影响因子,与岩心物性有关,拟合结果见表 1。

表 1 不同岩心的影响因子

Table 1 Influence factors of different cores

岩样	$a/10^{-9}$	$b/10^{-5}$	$c/10^{-4}$	d	R^2
30#	-40.0	2.0	7.0	0.0015	0.9993
37#	-400.0	6.0	16.0	0.0022	0.9999
2#	-0.001	0.4	0.7	0.0015	0.9995
12#	-5.0	0.7	0.08	0.0094	0.9989
41#	-30.0	2.0	2.0	0.0032	0.9995
31#	-50.0	2.0	17.0	0.0091	0.9997
40#	-70.0	2.0	9.0	0.0013	0.9997
51#	-9.0	0.7	0.4	0.0095	0.9985
5#	-2000.0	30.0	64.0	0.0002	0.9996
4#	-30.0	3.0	30.0	0.0014	0.9992
52#	-400.0	10.0	25.0	0.0060	0.9998
49#	-2.0	0.2	13.0	0.0025	0.9997
8#	-1.0	0.1	2.0	0.0007	0.9998
24#	-0.6	0.07	0.2	0.0031	0.9987
26#	-500.0	8.0	4.0	0.0036	0.9995

从表 1 中可以看出,试验数据拟合精度很高,其相关系数基本都在 0.999 以上。同时式(4)中三次项和二次项均表征边界层对渗流的影响,一次项和常数项分别表征黏滞阻力及启动压力梯度的影响。

根据表 1 试验结果,建立不同岩样的渗透率与影响因子的拟合关系式,即

$$\begin{cases} a = -7 \times 10^{-8} k^{3.5382}, \\ b = 3 \times 10^{-5} k^{1.8958}, \\ c = 0.0013 k^{2.3537}, \\ d = -0.0018 k + 0.0035. \end{cases} \quad (5)$$

2 非线性渗流特征微分线性化

2.1 微分线性分析

可利用微分线性法描述试验曲线的非线性特征。根据微分原理,试验曲线中的非线性渗流段可细分成若干条微分线性渗流段,同时根据特低渗油藏启动压力梯度的物理意义^[13],在任意一个微分线性渗流段上的渗流方程可表示为

$$v = \alpha \frac{\nabla p}{L} - \beta. \quad (6)$$

式中, α 和 β 分别为每个微分直线段的斜率和截距,与储层孔喉结构相关,其中 β 表征启动压力梯度的影响; L 为非线性段中的微量。

在整个非线性渗流段中,由于边界层影响,视渗透率随驱替压力梯度而变化,因此可将 α 定义为: $\alpha = k_i / \mu$,其中 k_i 为视渗透率。结合式(6),描述微分线性段渗流特征的数学方程为

$$v = \frac{k_i}{\mu} \frac{\nabla p}{L} - \beta = \frac{k_i}{\mu} \left(\frac{\nabla p}{L} - \beta / \left(\frac{k_i}{\mu} \right) \right). \quad (7)$$

$\beta / \left(\frac{k_i}{\mu} \right)$ 表征由边界层及启动压力梯度共同作用造成的综合压降损失,令 $\lambda_i = \beta / \left(\frac{k_i}{\mu} \right)$,将 λ_i 定义为非线性渗流阻力梯度。由定义可知, λ_i 是驱替压力梯度的函数,其值与储层物性及流体性质有关,综合反映了非线性渗流过程中由边界层及启动压力梯度所引起的附加阻力对渗流的影响。式(7)可写为

$$v = \frac{k_i}{\mu} \left(\frac{\nabla p}{L} - \lambda_i \right). \quad (8)$$

2.2 渗流阻力梯度数学模型

根据试验曲线特征,在非线性渗流段上,任意点切线的渗流速度 v' 可表示为

$$\begin{aligned} v' &= \left[3a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 + 2b \frac{\nabla p}{L} + c \right] \frac{\nabla p}{L} + \left[d - 2a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^3 - \right. \\ &\quad \left. b \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 \right] = \left[3a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 + 2b \frac{\nabla p}{L} + c \right] \times \\ &\quad \left[\frac{\nabla p}{L} + \frac{d - 2a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^3 - b \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2}{3a \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 + 2b \frac{\nabla p}{L} + c} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

由于微分线性段的渗流速度与试验曲线非线性渗流段切线上的渗流速度相等,即 $v=v'$,整理可得非线性渗流阻力梯度 λ_i 及视渗透率的数学模型为

$$\lambda_i = \frac{d - 2a\left(\frac{\nabla p}{L}\right)^3 - b\left(\frac{\nabla p}{L}\right)^2}{3a\left(\frac{\nabla p}{L}\right)^2 + 2b\frac{\nabla p}{L} + c}, \quad (10)$$

$$\frac{k_i}{\mu} = 3a\left(\frac{\nabla p}{L}\right)^2 + 2b\frac{\nabla p}{L} + c. \quad (11)$$

将式(5)代入式(10),可得非线性渗流阻力梯度与驱替压力梯度及气测渗透率的关系式,即

$$\lambda_i = \left[0.0035 - 0.0018k + 1.4 \times 10^{-7} k^{3.5382} \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^3 - 3 \times 10^{-5} k^{1.8958} \left(\frac{\nabla p}{L} \right)^2 \right] / \left[-2.1 \times 10^{-7} k^{3.5382} \left(\frac{\Delta p}{L} \right)^2 + 6 \times 10^{-5} k^{1.8958} \frac{\Delta p}{L} + 0.0013 k^{2.3537} \right]. \quad (12)$$

同时,可得视渗透率与驱替压力梯度及气测渗透率的关系式为

$$\frac{k_i}{\mu} = 0.0013 k^{2.3537} - 2.1 \times 10^{-7} k^{3.5382} \left(\frac{\Delta p}{L} \right)^2 + 6 \times 10^{-5} k^{1.8958} \frac{\Delta p}{L}. \quad (13)$$

由式(12)可知,非线性渗流阻力梯度不仅是驱替压力梯度的函数,还与储层物性有关,它在非线性渗流过程中随驱替压力梯度变化而变化。式(13)反映了边界层对非线性渗流的影响。

2.3 模型适应性评价

根据非线性渗流规律,视渗透率不仅与孔喉结构有关,同时受边界层的影响,它随压力梯度增大而增大。当流体黏度一定时,视渗透率是压力梯度的函数,其计算值与试验所得结果对比见图1。

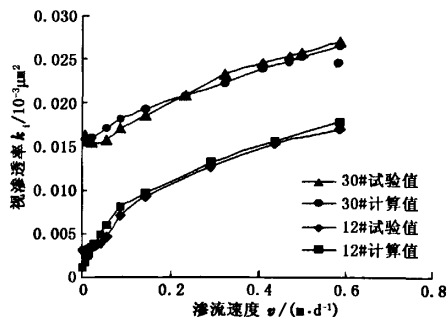


图1 视渗透率理论计算与试验结果对比

Fig.1 Contrast of apparent permeability between calculated value and experimental result

从图1可以看出,理论计算结果与试验结果基本吻合,视渗透率随流速的增加而增大,验证了理论

模型推导的合理性。

2.4 渗流阻力梯度非线性特征分析

根据式(12),将不同渗透率岩心的非线性渗流阻力梯度和驱替压力梯度作对比,结果如图2所示。

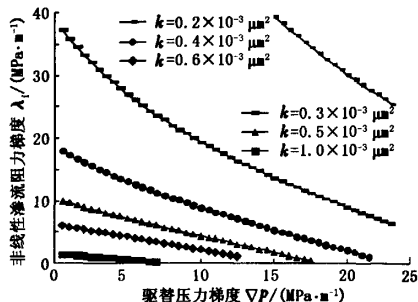


图2 渗流阻力梯度和驱替压力梯度关系

Fig.2 Relationship of flow resistance gradient and driving pressure gradient

由图2可知,渗透率一定时,非线性渗流阻力梯度随着驱替压力的增加而下降,根据式(1),喉道边界层随压力梯度的增加而变薄,因此体相流体的有效孔喉半径相应增大,其视渗透率 k_i 也随之增加,根据渗流阻力梯度的定义,其值也相应减小。这与试验曲线结果是一致的。从图2还可以看出,渗透率越小,阻力梯度非线性变化特征越明显,随驱替压力增加而降低的幅度越大。

建立不同驱替压力梯度下岩心渗透率和非线性渗流阻力梯度的关系,结果见图3。

由图3可知,驱替压力梯度一定时,渗流阻力梯度随渗透率的增加而降低,表明渗透率越大,启动压力梯度越小,渗流阻力越小;渗流阻力梯度与渗透率呈幂律关系,随着渗透率的减小,渗流阻力梯度增加的幅度增大,渗透率越小,边界层及启动压力梯度对渗流的影响越明显。

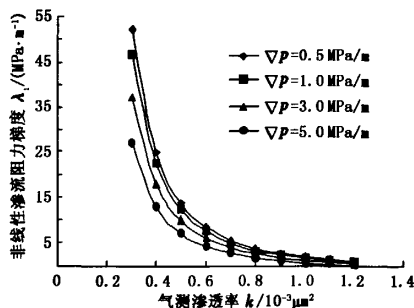


图3 渗透率和驱替压力梯度的关系

Fig.3 Relationship of permeability and driving pressure gradient

3 应用实例

在油田可动用储量评价中,关于可动用储层渗透率下限值的评价尤为重要。当储层渗透率小于下限值后,驱替压力梯度将小于渗流阻力梯度,储层不能建立有效驱替压力系统,就不具备开发潜能^[14]。可通过储层渗流阻力梯度非线性关系研究,对区块开发动用潜能进行有效评价。

根据长庆油田某区块实际情况,油井近井地层最大可建立 3 MPa/m 的压力梯度。结合该区块渗流阻力梯度非线性理论图版(图 2 和图 3)可知,渗透率在 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的储层,其近井地层压力梯度大于阻力梯度,能建立有效驱替压力系统,即 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的储层储量可视为目前开发潜力,其储量占总地质储量的 28%,而通过部分低产油井的压裂改造,理论上油井能建立 5 MPa/m 的压力梯度,在阻力梯度理论图版上,其对应的渗透率为 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。这表明经压裂后,可开发储层的渗透率下限值能降到 $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。同时,结合本区块的渗透率分布区间分析可得,在目前开发基础上约提高了 5% 的可动用储量。所建立的渗流阻力梯度非线性关系图版为下一步区块挖潜工作提供了理论依据。

4 结 论

(1) 运用三次函数形式对特低渗储层试验曲线进行拟合分析,相关系数高,符合特低渗油藏渗流特征。

(2) 渗流阻力梯度随驱替压力增加而下降;渗透率越小,阻力梯度越大,两者呈幂律关系,渗透率越小,阻力梯度增幅越大,其非线性变化特征越明显。

参考文献:

- [1] 李忠兴,韩洪宝,程林松,等. 特低渗透油藏启动压力梯度新的求解方法及应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 107-108.
LI Zhong-xing, HAN Hong-bao, CHENG Lin-song, et al. A new solution and application of starting pressure gradient in ultra-low permeability reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 107-108.
- [2] 韩洪宝,程林松,张明禄,等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(6): 49-53.
HAN Hong-bao, CHENG Lin-song, ZHANG Ming-lu, et al. Physical simulation and numerical simulation of ultra-low permeability reservoir in consideration of starting pressure gradient[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 49-53.
- [3] 李爱芬,张少辉,刘敏,等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(1): 68-70.
LI Ai-fen, ZHANG Shao-hui, LIU Min, et al. A new method of measuring starting pressure for low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(1): 68-70.
- [4] 谷建伟,郭志华,赵燕. 特低渗油藏生产井初始含水率高的微观机理[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007, 31(5): 66-67.
GU Jian-wei, GUO Zhi-hua, ZHAO Yan. Microscopic seepage mechanism of initial high water cut of production wells in ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(5): 66-67.
- [5] 徐绍良,岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007, 31(5): 60-63.
XU Shao-liang, YUE Xiang-an. Experiment research on nonlinear flow characteristics at low velocity[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(5): 60-63.
- [6] ALEXANDER Pertsin, MICHAEL Grunze. Water-graphite interaction and behavior of water near the graphite surface[J]. The Journal of Physics Chemistry (B), 2004, 108: 1357-1364.
- [7] 李中锋,何顺利. 低渗透储层原油边界层对渗流规律的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(2): 57-59.
LI Zhong-feng, HE Shun-li. Influence of boundary layers upon filtration law in low-permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(2): 57-59.
- [8] 邓英尔,阎庆来,马宝岐. 界面分子力作用与渗透率的关系及其对渗流的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(2): 46-48.
DENG Ying-er, YAN Qing-lai, MA Bao-qi. Relationship between interfacial molecular interaction and permeability and its influence on fluid flow[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(2): 46-48.
- [9] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [10] 邓英尔,刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 72-74.
DENG Ying-er, LIU Ci-qun. Mathematical model of nonlinear flow law in low permeability porous media and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 72-74.
- [11] 葛家理,宁正福,刘月田. 现代油藏渗流力学原理

- [M]. 北京:石油工业出版社,2001
- [12] 徐运亨,徐启,郭永贵,等. 低渗透油藏渗流机理研究及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [13] 李松泉,程林松,李秀生,等. 特低渗透油藏非线性渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008,35(5):706-806.
LI Song-quan, CHENG Lin-song, LI Xiu-sheng, et al. Non-linear seepage flow models of ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(5):706-806.
- [14] 刘辉,何顺利,李俊键,等. 特低渗油藏水驱开发效果评价方法研究[J]. 西南石油大学学报, 2009, 31(1):28-29.
LIU Hui, HE Shun-li, LI Jun-jian, et al. Study of methods evaluating water-drive development in ultra-low permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2009,31(1):28-29.

(编辑 李志芬)

(上接第65页)

- [8] KABIR C S, HASAN A R, KOUBA G E, et al. Determining circulating fluid temperature in drilling, work-over, and well-control operations[R]. SPE 24581, 1996.
- [9] HASAN A R, KABIR C S. Heat transfer during two phase flow in wellbores, part II wellbore fluid temperatures[R]. SPE 22948, 1991.
- [10] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等. 高温井地层温度变化对井壁稳定性影响规律研究[J]. 钻井液与完井液, 2004,21(6):15-18.
WEI Bao-hua, LU Xiao-feng, WANG Bing-yin, et al. Stability of well wall influenced by formation temperature change in high temperature well[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2004,21(6):15-18.
- [11] 朱平,马永乾,李昊. 附加流速法压井的模拟计算[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(3):68-70.
ZHU Ping, MA Yong-qian, LI Hao. Simulated calculation of well killing by additional flow rate method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(3):68-70.

(编辑 李志芬)

(上接第70页)

- [8] 高海红,程林松,赵梅,等. 稠油油藏蒸汽驱筛选的模糊综合评判[J]. 西南石油大学学报,2007,29(3):53-56.
GAO Hai-hong, CHENG Lin-song, ZHAO Mei, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of steam flooding sorting heavy oil reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007,29(3):53-56.
- [9] 石启新,方开璞. 注蒸汽开发经济极限油汽比及经济可采储量的计算方法及应用[J]. 石油勘探与开发, 2001,28(4):97-98.
SHI Qi-xin, FANG Kai-pu. The calculating method and application of economic limiting steam/oil ratio for steam flood and steam soak[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(4):97-98.

(编辑 李志芬)

(上接第76页)

- [2] ALHUTHALI A H, ARAMCO S, DATTA-GUPTA A, et al. Optimal rate control under geologic uncertainty[R]. SPE 113628, 2008.
- [3] SAPUTELLI L, NIKOLAOU M, ECONOMIDES M J. Real-time reservoir management: a multi-scale adaptive optimization and control approach[J]. Computational Geosciences, 2005,10(1):61-96.
- [4] LIEN M, BROUWER D R, MANSETH T, et al. Multi-scale regularization of flooding optimization for smart field management[R]. SPE 99728, 2006.
- [5] NAUS Mmjj, DOLLE N, JANSEN J D. Optimization of commingled production using infinitely variable inflow control valves [R]. SPE 90959, 2006.
- [6] AZIZ K, SETTARI A. Fundamentals of reservoir simulation[M]. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1986: 102-103.
- [7] 方涵先,王廷芳,黄思训. 变分伴随方法应用于大气化学初值和参数反演研究[J]. 南京气象学院学报, 2007,2(30):216-223.
FANG Han-xian, WANG Ting-fang, HUANG Si-xun. Retrieval of the initial values and parameters in atmospheric chemistry by the variational adjoint method[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007,2(30):216-223.
- [8] BROUWER D R, JANSEN J D, VAN D. Recovery increase throughh water flooding with smart well technology [R]. SPE 68979,2004.
- [9] SARMA P, DURLOFSKY L J, AZIZ K. Efficient closed-loop production optimization under uncertainty[R]. SPE 94241, 2005.
- [10] 刘慧卿. 油藏数值模拟方法专题[M]. 东营:石油大学出版社, 2001: 90-102.
- [11] WANG Chunhong, LI Gaoming, REYNOLDS A C. Production optimization in closed-loop reservoir management [R]. SPE 109805, 2007.

(编辑 李志芬)