

文章编号: 1000-582X(2013)03-141-06

油藏近井地带油水两相径向渗流特征

姚同玉¹, 李继山², 黄延章³

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利油田有限责任公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015; 3. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要: 实际油藏中近井地带渗流为平面径向流, 首先建立了二维两相径向渗流方程, 得到了相对渗透率比值与流体饱和度关系解析解, 然后设计了平面径向渗流实验, 并用该解析解对渗流特征进行了分析, 并与常规 JBN 处理结果进行了比照, 得到近井地带油水径向渗流新特征。研究结果表明, 建立的解析模型, 能表征近井地带油水相渗关系, 并且平面径向流模型试验结果说明, 在近井地带, 相对渗透率比值与流体饱和度呈直线关系对应的饱和度区间变小, 油水在渗流中呈现出更为复杂的渗流关系, 以非线性作用为主。

关键词: 油藏; 两相流; 近井地带渗流; 径向流; 相对渗透率; 解析解

中图分类号: TE312

文献标志码: A

Water/oil radial flow behavior near well bore zones in oil reservoir

YAO Tongyu¹, LI Jishan², HUANG Yanzhang³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Company Ltd., Dongying, Shandong 257015, China;
3. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: The flow behavior of water and oil near well bore zones in oil reservoir is radial flow. Based on the fluid displacement experiments in radial systems, the equation describing radial flow is investigated and analytical solution about the relationship between relative permeability ratio and saturation is obtained. The analytical solution is used to treat the experiment results and the two phase flow behavior of water and oil is characterized. The results show that the analytical solution can characterize the actual flow of water and oil near well bore zone. According to the radial experiments, the saturation scope in which the relative permeability ratio and saturation is linear is smaller. The flow behavior of water and oil near well bore zones is complex and nonlinear.

Key words: reservoir; two phase flow; flow near well bore zone; radial flow; relative permeability; analytical solution

目前, 水驱开发是油气藏主要开发方式, 对水驱油藏来说, 油井生产历史准确拟合和产量准确预测都有赖于油藏油水相对渗透率关系和 Leverett 分流函数^[1-2]。目前, 人们广泛应用相对渗透率比值和流

体饱和度函数分析油气藏生产动态和产水规律, 揭示油气藏中油水渗流关系^[3-7]。并且, 主要靠实验室一维油水驱替实验, 结合 Darcy 方程, 根据 JBN 方法或其改进方法, 得到相对渗透率与流体饱和度函

收稿日期: 2012-10-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2005CB221304)

作者简介: 姚同玉(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事渗流力学和多孔介质渗流物理等方面的教学与科研工作, (E-mail) yaotongyu@126.com。

数关系^[8-14]。然而,实际油藏存在较强非均质性,实验室一维岩心与油藏存在较大差距,并不能代表油藏非均质情况;同时,水压驱动下,油水井近井地带为径向流,油藏深处为单向渗流。因此,实验室一维单向渗流并不能真实地反映近井地带油水渗流关系。计秉玉运用油水相对渗透率曲线和径向 Buckley-Leverett 方程确定油水总流量径向变化的方法,建立了油水两相径向稳定渗流条件下压力分布和产量计算公式^[15],但是他应用的相对渗透率曲线仍然是一维油水驱替实验得到的。秦积舜等利用平面物理模型研究了油水两相平面渗流的拟相渗特征^[16],但是计算方法仍然是常规 JBN 方法。为此,基于平面径向流动模型,笔者建立了平面径向流渗流方程,求得了油水相对渗透率比值与含水饱和度解析解,并用上述思路分析了平面径向流实验结果,用相对渗透率比值描述两相径向流中油相和水相渗流关系。与一维渗流模型相比,平面径向流相对渗透率比值与流体饱和度呈直线关系的饱和度区间变小。渗流中,油相和水相之间的相互作用以非线性作用为主,这无疑对认识油气藏近井地带油水两相径向渗流特征,准确模拟和预测油水井动态,提供了新观点和新证据。

1 油水径向流渗流理论

1.1 平面径向渗流方程建立

砂岩模型如图 1 所示。砂岩模型均质,孔隙度 ϕ 、水相渗透率 k_w 、模型厚度 h ,中心井井径 r_w 、模型半径 r_e ,模拟油水等流体向中心井渗流的过程。

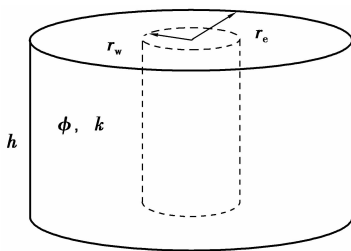


图 1 径向流均质砂岩模型

假设油水不可压缩,非混相;并且忽略毛管力对渗流过程影响,即 $p_c=0$,水注入速度为 q_i ,边缘流体压力为 p_e ,井底流压 p_w ,流动压差则为 $\Delta p=p_e-p_w$ 。

水驱油过程,注水速度与产液速度相等。

根据 Darcy 方程,中心井产油和产水速度为

$$q_w = -\frac{2\pi hr k k_{rw}}{\mu_w} \frac{dp}{dr}, \quad (1)$$

$$q_o = -\frac{2\pi hr k k_{ro}}{\mu_o} \frac{dp}{dr}. \quad (2)$$

流体流量为

$$q_i = -2\pi hr k \left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right) \frac{dp}{dr}. \quad (3)$$

定义总相对流度 λ_r ,

$$\lambda_r = \frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} = \lambda_{rw} + \lambda_{ro}. \quad (4)$$

那么

$$-dp = \frac{q_i}{2\pi h k \lambda_r} \frac{dr}{r}. \quad (5)$$

积分,得到压差与时间的关系:

$$\Delta p = p_e - p_w = -\frac{q_i}{2\pi h k} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r \lambda_r}. \quad (6)$$

方程边界条件为

$$p|_{r=r_e} = p_e, p|_{r=r_w} = p_w. \quad (7)$$

方程(6)、(7)即为两相径向渗流数学模型。

1.2 两相径向流方程求解

总相对流度 λ_{ro} 为饱和度 S_w 的函数,将式(6)做积分变换,成为 S_w 函数,边界条件变为

$$f_w|_{r=r_e} = 1, f'_w|_{r=r_e} = 0, df'_w|_{r=r_e} = 0,$$

$$f_w|_{r=r_w} = f_{w2}, f'_w|_{r=r_w} =$$

$$f'_{w2}|_{r=r_w} = -\frac{2\pi h \phi r_w^2}{V_i(t)}, df'_w|_{r=r_w} =$$

$$df'_{w2}|_{r=r_w} = \frac{2\pi h \phi r_w^2}{V_i^2(t)} q_i dt. \quad (8)$$

径向渗流情形下, Buckley-Leverett 驱替方程的通解为

$$r^2(S_w) = -\frac{V_i(t)}{2\pi h \phi} f'(S_w), \quad (9)$$

其中, $f'(S_w) = \frac{df_w}{dS_w}$; $V_i(t) = \int_0^t q_i dt$ 。

将式(9)微分,得到

$$\frac{dr}{r} = \frac{1}{2} \frac{df'_w}{f'_w}. \quad (10)$$

将式(10)代入到式(6),并根据边界条件(8),变换积分限,得 $\Delta p = -\frac{q_i}{4\pi k h} \int_{f_{w2}}^0 \frac{df'_w}{f'_w \lambda_r}$ 。

将上述方程引入流函数 G , 即

$$\Delta p = -\frac{q_i}{4\pi k h} \int_{f_{w2}}^0 \frac{df'_w}{f'_w \lambda_r} =$$

$$\frac{q_i}{4\pi k h} \int_0^{f_{w2}} \frac{df'_w}{f'_w \lambda_r} = \frac{q_i}{4\pi k h} G. \quad (11)$$

根据式(11),可以得到 $G = \frac{4\pi h k \Delta p}{q_i} =$

$\int_0^{f_{w2}} \frac{df'_w}{f'_w \lambda_r}$ 。这里,流函数 G 是 r 、 f'_w 的函数,与 Buckley-Leverett 线性驱替中流函数不同,不仅依赖

于含水率变化,还受径向渗流面积的影响,该参数揭示了径向流和 Buckley-Leverett 流之间的差异,线性驱替中,该函数与 r 无关。

将式(11)对时间微分

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{1}{4\pi kh} \left[q_i \frac{dG}{dt} + G \frac{dq_i}{dt} \right], \quad (12)$$

$$\text{式中: } q_i = \frac{dV_i(t)}{dt}, \frac{dq_i}{dt} = \frac{d^2 V_i(t)}{dt^2}.$$

所以

$$G \frac{dq_i}{dt} = \frac{4\pi kh \Delta p}{q_i} \frac{d^2 V_i(t)}{dt^2}. \quad (13)$$

根据边界条件,得到

$$f' s_{w2} = \frac{q_i^2}{\lambda_r(S_{w2}) V_i(t)}. \quad (14)$$

那么流动压差随时间变化特征为

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta p}{dt} &= \frac{1}{4\pi kh} \left[\frac{4\pi kh \Delta p}{q_i} \frac{d^2 V_i(t)}{dt} - \frac{q_i^2}{\lambda_r(S_{w2}) V_i(t)} \right] \\ &= \frac{\Delta p}{q_i} \frac{d^2 V_i(t)}{dt} - \frac{q_i^2}{4\pi kh \lambda_r(S_{w2}) V_i(t)}. \end{aligned} \quad (15)$$

根据物理模拟实验条件,将恒压和恒速两种边界条件应用于流动方程。

a) 恒压条件下, Δp 为常数, $V_i(t)$ 为变量,那么式(15)左边为 0,总相对流量 λ_r 则为

$$\lambda_r(S_{w2}) = \frac{q_i^3}{4\pi kh V_i(t) \Delta p} \frac{d^2 V_i(t)}{dt^2}. \quad (16a)$$

b) 恒速条件下, q_i 为常数, Δp 为变量,此时,

$$\frac{d^2 V_i(t)}{dt^2} = 0, \lambda_r(S_{w2}) = \frac{q_i}{4\pi kh V_i(t)} \frac{d\Delta p}{dt}. \quad (16b)$$

1.3 相对渗透率计算

根据分流量方程, $f_w = \frac{q_w}{q_i} = \frac{k_{rw}}{\mu_w \lambda_r}$, $f_o = \frac{q_o}{q_i} =$

$\frac{k_{ro}}{\mu_o \lambda_r}$, 得

$$\frac{k_{rw}}{k_{ro}} = \frac{f_w \mu_w}{f_o \mu_o}. \quad (17)$$

因此,根据式(17)和式(16a)或(16b)即可得到相对渗透率。

1.4 饱和度方程计算

实验中, S_{wi} 为束缚水饱和度,当注水量为 $V_i(t)$ 时,产油量为 $V_o(t)$,产水量 $V_w(t)$,因此

$$V_i(t) = V_w(t) + V_o(t). \quad (18)$$

并且,产量递减模型^[4]

$$\frac{V_i}{V_o} = a + b \frac{V_i}{V_p}. \quad (19)$$

水相在径向岩心介质中平均饱和度为

$$\bar{S}_w = S_{wi} + \frac{V_o}{V_p}. \quad (20)$$

根据 Toth 等研究^[8],水相在界面上饱和度为

$$S_{w2} = S_{wi} + b \left[\frac{\frac{V_i}{V_p}}{a + b \frac{V_i}{V_p}} \right]^2. \quad (21)$$

含油率、含水率和径向流水驱效率为

$$f_o = \frac{a}{\left[a + b \frac{V_i}{V_p} \right]^2}, f_w = 1 - f_o, \quad (22)$$

$$E_D = \frac{V_o}{V_p(1 - S_{wi})} = \frac{\frac{V_i}{V_p}}{\left(a + b \frac{V_i}{V_p} \right) (1 - S_{wi})}. \quad (23)$$

2 室内平面径向渗流实验及分析

2.1 岩心物性参数及实验方法

实验用径向砂岩模型如图 1 所示,岩心参数和流体参数见表 1。

表 1 实验岩心和实验流体物性参数

模型半径	井半径	模型厚度	孔隙体积
r_e/cm	r_w/cm	h/cm	V_p/mL
4.49	2.6	8.06	8.36
孔隙度/ ϕ	水相渗透率	油相粘度	水相粘度
	$k_w/\mu\text{m}^2$	$\mu_o/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\mu_w/(\text{mPa}\cdot\text{s})$
0.164	0.0105	2.25	1.0

实验过程如下:首先将岩心抽真空,饱和地层水。然后将岩心装入驱替流程,如图 2 所示。岩心顶面和底面密封,侧面与空气相通。注入流体从岩心顶部的中心孔注入,被驱出的流体从岩心外侧面流出,然后通过装置底部的管线流入量筒计量。压差通过压力传感器测定。首先从中间的入口注入油相进行油驱水,直至出口端不再含水,模拟油藏形成过程,建立束缚水或初始含水饱和度;然后从中间的入口注入水相,模拟油藏水驱开发过程。此时,径向模型中油水渗流特征则反映油藏近井地带油水渗流特点。

实验中,采用恒压驱替,水驱油径向压差为 0.33 MPa,水沿边缘注入,实验中记录注水量、中心井产油量、产水量。图 3 为根据方程(19)得到实验结果。

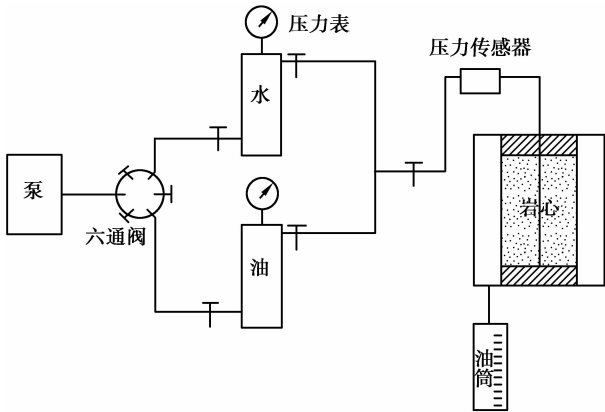


图 2 平面径向流渗流实验流程

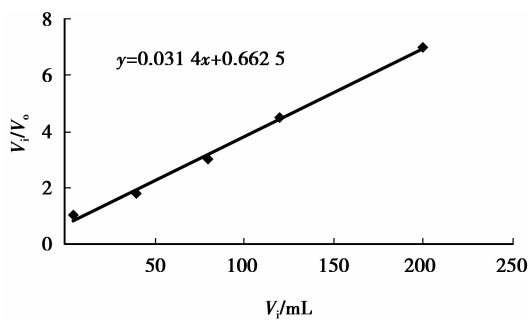


图 3 径向流实验中水驱油过程

计算参数 a, b , 根据式 (21) 计算水相饱和度, 并结合式 (22), 得到 $f_w - S_w$ 关系, 同时, 根据 Buckley-Leverett 一维渗流模型, 计算相应的 $f_w - S_w$ 关系曲线, 计算结果与实验结果对比见图 4。图 4 表明, 与 Buckley-Leverett 一维渗流模型相比, 笔者得到的径向流渗流模型与实际实验中的油水渗流过程更为接近, 更能反映径向渗流过程中油水渗流关系。

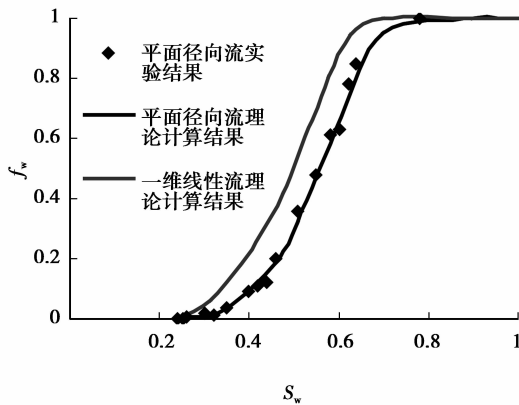


图 4 水驱油过程中含水率与含水饱和度关系

根据式 (23) 可以计算径向渗流水驱油效率, 它与基于 Buckley-Leverett 一维渗流模型得到的驱油

效率、实验结果对比见图 5。

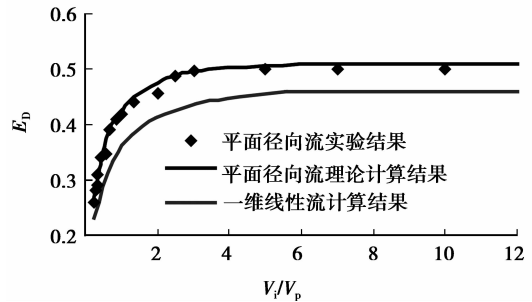


图 5 采出程度与注入孔隙体积倍数的关系

图 5 表明, 与 Buckley-Leverett 一维渗流模型相比, 这里得到的径向流渗流模型与实际径向流驱油结果更为接近。

2.2 径向流模型与一维线性流模型计算结果对比分析

根据式 (17)、(21) 和 (22) 计算径向渗流过程中油相和水相相对渗透率比值, 为了对比, 还利用传统的 JBN 方法对数据进行了计算, 结果如图 6 所示。

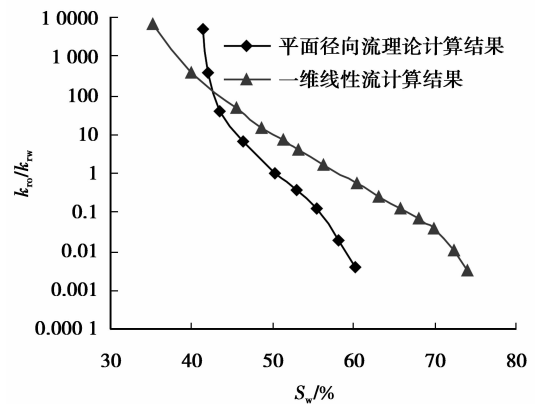


图 6 相对渗透率比值与含水饱和度的关系

在水驱油藏中, 油相和水相在各自的流动通道系统中渗流, 相对渗透率比值主要是含水饱和度线性函数(在单对数坐标上), 对应着两相流范围。

描述方程为:

$$\frac{k_{ro}}{k_{rw}} = \frac{k_o}{k_w} = Ae^{-BS_w} \quad (24)$$

式中, 系数 A, B 为相对渗透率比值曲线上直线段特征参数, 反映了岩石渗透率、参与渗流过程孔隙大小分布、流体粘度、界面张力和润湿性等参数。

这里, 将平面径向流相对渗透率模型与一维线性流相对渗透率模型进行了对比, 分析了相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线上直线段特征参数与

饱和度区间,见表2、图6。

表2 近井地带和油层深处渗流特征参数对比

	饱和度范围/%	A	B
一维线性渗流	45.41~69.90	2E+06	-0.287 1
平面径向渗流	50.31~55.39	1E+09	-0.416 0

对比结果表明,水驱过程中,与油藏深处线性渗流不同,油藏近井地带油水两相径向渗流中,线性饱和度区间小。在油藏深处,相对渗透率比值与含水饱和度存在一种“直线关系”,呈线性渗流特征;而在油藏近井地带,这种油水相这种线性渗流持续时间短,油井生产过程中主要以非线性渗流关系为主。

表2还表明,近井地带渗流特征参数A、B与油藏深处也不相同。油藏深处油水流动可以近似为线性流动,而近井地带为径向流动,越靠近井筒,流动速度越快,油水相互作用,相互干扰越强,因此,渗流特征参数不同。

此外,含水饱和度在60%以上时,在注水井附近,径向流相对渗透率比值比线性流低,这说明,该地带水相有着非常强的驱油能力,将更多的剩余油驱赶到油层深处;当含水饱和度低于40%,即在油井周围,径向流相对渗透率比值比线性流高,说明在该地带,油相流动能力更强,更容易在油井中汇集。

分析表明,上述方法是一种行之有效的径向流分析方法,能准确描述两相径向流渗流过程,根据油藏生产动态确定油藏近井地带油水相对渗流关系。

3 结 语

依据水驱油实验建立了近井地带油水径向渗流的力学模型,得到了相应的解析解,得到了油藏近井地带油水相对渗透率比值与含水饱和度函数关系,并对近井地带油水径向渗流特点进行了分析。

与Buckley-Leverett一维渗流模型相比,笔者所建立的径向流渗流模型对油藏近井地带实际发生的径向驱油过程和驱油结果更为贴切。

近井地带油水两相径向流与油藏深处线性渗流特征差异显著,近井地带径向流中,油相渗流与水相渗流存在十分复杂的非线性关系。

径向流渗流模型是一种行之有效的分析方法,为准确描述油水井生产动态,分析油水两相在油藏中渗流特征提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 科林斯 R E. 流体通过多孔材料的流动[M]. 陈钟祥, 吴望一译. 北京: 石油工业出版社, 1984: 10-20.
- [2] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [3] Mohanty K K, Miller A E. Factors influencing unsteady relative permeability of a mixed-wet reservoir rock[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 349-358.
- [4] Toth J, Bodi T, Szucs P. et al. Practical method for analysis of immiscible displacement in laboratory core tests[J]. Transport in Porous Media, 1998, 31(2): 347-363.
- [5] 张大为, 闫宝珍, 曾照英. 注水开发油藏油水相对渗透率变化规律[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(增刊): 77-79.
ZHANG Dawei, YAN Baozhen, ZENG Zhaoying. Variety law of oil-water relative permeability in water-flooding reservoir [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(Suppl): 77-79.
- [6] 王曙光, 赵国忠, 余碧君. 大庆油田油水相对渗透率统计规律及其应用[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 78-85.
WANG Shuguang, ZHAO Guozhong, YU Bijun. Statistical regularity of oil-water relative permeability in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 78-81.
- [7] 张继成, 宋考平. 相对渗透率特征曲线及其应用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 104-107.
ZHANG Jicheng, SONG Kaoping. Eigen curve of relative permeability and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 104-107.
- [8] Toth J, Bodi T, Szucs P, et al. Direct determination of relative permeability from non-steady-state constant pressure and rate displacements[C]// SPE Production and Operations Symposium, March 24-27, 2001, Oklahoma City, Oklahoma. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2001: 1-17.
- [9] Li H, Yang D Y, Arhuoma M. Relative permeability estimation from displacement experiments using EnKF method[C]// International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, June 8-10, Beijing, China. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-10.
- [10] Mejia G M, Mohanty K K, Watson A T. Use of in situ saturation data in estimation of two-phase flow function in porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995, 12(3): 233-245.
- [11] Schembre J M, Kovscek A R. Estimation of dynamic relative permeability and capillary pressure from

- countercurrent imbibition experiment[J]. *Transport in porous media*, 2006, 65(1): 31-51.
- [12] 王金勋, 刘庆杰, 杨普华, 等. 应用逾渗理论计算非稳态法油水相渗曲线[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 79-81.
- WANG Jinxun, LIU Qqingjie, YANG Puhua, et al. Calculating the relative Permeability from displacement experiments based on Percolation theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 79-81.
- [13] 侯晓春, 王雅茹, 杨清彦. 一种新的非稳态油水相对渗透率曲线计算方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2008, 27(4): 54-56.
- HOU Xiaochun, WANG Yaru, YANG Qingyan. A new calculation method for unstable state oil/water relative permeability curve[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2008, 27(4): 54-56.
- [14] 计秉玉. 油水两相径向稳定渗流条件下压力分布及产量变化特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 1995, 14(3): 44-46.
- JI Bingyu. Characteristics of pressure distribution and production variation under condition of radial stable seepage flow with two phases of oil and water[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1995, 14(3): 44-46.
- [15] 秦积舜, 李久娣, 孟红霞. 平面物理模型的拟相渗规律研究[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2000, 23(增刊): 111-124.
- QIN Jishun, LI Jiudi, MENG Hongxia. The discipling of quasi-relative permeability of two dimensions model[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2000, 23(Suppl): 111-124.
- [16] SY/T 5345-2007. 岩石中两相相对渗透率测定方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2007.

(编辑 郑洁)