

文章编号:0253-9985(2012)04-0578-04

利用分形理论计算相对渗透率曲线

——以南襄盆地双河油田核桃园组六油组为例

陈田勇¹,毛鑫²,刘仕银³,袁珂⁴,彭小东⁵,吴旺林⁶

(1. 中国石油 渤海钻探工程公司 井下技术服务分公司,天津 300283; 2. 中国石化 东北油气分公司,吉林 长春 130062;
3. 中国石化 西北油田分公司 工程监督中心,新疆 轮台 841600; 4. 中国石油 长庆油田公司 苏里格气田研究中心,
陕西 西安 710018; 5. 中海石油 湛江分公司,广东 湛江 524057; 6. 中国石油 华北油田公司 二连分公司,
内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要:相对渗透率曲线是油藏工程研究的一项重要资料,一般是通过多项式拟合室内岩心实验数据得到。然而受储层非均质性、实验误差以及岩心数目局限性的影响,通过多项式拟合室内实验数据得到的相对渗透率曲线很难代表整个油藏的相渗特征。结合分形理论,根据双河油田实际生产数据,推导出一种新的计算相对渗透率曲线的方法。通过对该油田核桃园组油藏的实例计算,依据油田的生产动态数据与分形理论,得出相对渗透率曲线,并通过含水率进行验证。结果表明,计算得出的相对渗透率较实验测定的相对渗透率更具有整体性和代表性,与油田实际情况吻合较好。该计算方法能够提高岩心实验相对渗透率曲线的可靠性,可以较好地用于油藏的开发实践中。

关键词:分形维数;分形理论;相对渗透率曲线;核桃园组;双河油田

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A

Fractal theory-based calculation method of relative permeability curves

—a case study from the Hetaoyuan Formation in Shuanghe oilfield, Nanxiang Basin

Chen Tianyong¹, Mao Xin², Liu Shiyin³, Yuan Ke⁴, Peng Xiaodong⁵ and Wu Wanglin⁶

(1. Downhole Technology Service Company, PetroChina Bohai Drilling Engineering Company, Tianjin 300283, China;
2. SINOPEC Northeast Oilfield Company, Changchun, Jilin 130062, China;
3. Engineering Supervision Center, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Luntai, Xinjiang 841600, China;
4. Sulige Gasfield Research Center, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;
5. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China;
6. Erlian Branch, PetroChina Huabei Oilfield Company, Xilinhaote, Inner Mongolia 026000, China)

Abstract: Relative permeability curve is of great importance in reservoir engineering research, and traditionally obtained through polynomial curve fitting of core data. However, the relative permeability curves obtained using the traditional method cannot reflect the whole picture of oil reservoirs due to reservoir heterogeneity, experimental error and limited core numbers. Based on the Fractal theory, a new method of calculating relative oil-water permeability was derived by using the production data from Shuanghe oilfield, Nanxiang Basin. It was applied in the pay VI in the Hetaoyuan Formation of Shuanghe oilfield and the calculation results were verified with water cut. The relative permeability curves calculated using the new method are more reliable and representative than the results measured in laboratory and can reflect well the real reservoir performance. The new method can improve the reliability of relative permeability from core test and can be applied in reservoir engineering.

Key words: fractal dimension, fractal theory, relative permeability curve, Hetaoyuan Formation, Shuanghe oilfield

收稿日期:2011-12-10;修订日期:2012-05-10。

第一作者简介:陈田勇(1972—),男,工程师,石油工程。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05-014-004)。

相对渗透率曲线是油藏工程计算和油藏数值模拟计算中的一个重要参数^[1-7]。一般情况下,通过室内实验得到相对渗透率曲线^[3]。由于实验条件的误差以及岩心代表的局限性等因素,导致实验得到的相对渗透率曲线不能完全代表整个油藏或者某个区块的相对渗透率曲线^[8]。因此,如何利用油田的生产资料来修正实验得到的相对渗透率曲线,具有重要的实际意义^[9-10]。本文根据某区块的生产数据,建立了含水率和分形维数的关系,从而推导出该区块的相对渗透率曲线,并且验证了该相对渗透率曲线具有很好的代表性。

1 分形维数学模型的建立

分形几何学是19世纪70年代发展起来的一门新型几何学,主要描述自然界大量不规则的几何现象^[1],研究具有自相似性的不规则曲线和不规则图形等。其主要概念是分形维数,它能准确的描述曲线和图形的非规律性特征^[11-16]。

分形维的数学定义式为:

$$N(r) = C \left(\frac{1}{r} \right)^{D_f} \quad (1)$$

式中: C ——常数;

r ——标度,无量纲;

$N(r)$ ——该标度下所测量得到的量值,无量纲;

D_f ——分形维数。

若 $N(r)$ 与 r 满足上式,则说明研究对象具有自相似性,即满足分形结构。根据前人建立的分形维数模型,得到润湿相和非润湿相分形维数的数学公式:

$$K_{ro} = (1 - S_D)^2 (1 - S_D^{\frac{5-D_f}{3}}) \quad (2)$$

$$K_{rw} = S_D^{\frac{11-6D_f}{3-2D_f}} \quad (3)$$

$$S_D = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (4)$$

$$S_w = S_{wi} + \frac{N_p}{N} (1 - S_{wi}) \quad (5)$$

式中: K_{ro} ——油相的相对渗透率,无量纲;

K_{rw} ——水相的相对渗透率,无量纲;

N_p ——累计产油量, 10^4 t;

N ——地质储量, 10^4 t;

S_D ——有效润湿相饱和度,%;

S_w ——含水饱和度,%;

S_{wi} ——束缚水饱和度,%。

2 公式推导

首先,根据油田研究区块的生产动态数据计算出该区块含水率^[1]:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o} \quad (6)$$

式中: f_w ——含水率,%;

Q_w ——产水量,t;

Q_o ——产油量,t。

1941年莱弗里特推导出分流量方程为:

$$f_w = \frac{1 + \frac{k_o}{\mu_o} \frac{1}{v_l} \left(\frac{\partial P_c}{\partial g} - \Delta \rho \cdot g \sin \alpha \right)}{1 + \frac{k_o}{k_w} \frac{\mu_w}{\mu_o}} \quad (7)$$

式中: μ_o ——原油粘度,mPa·s;

μ_w ——水的粘度,mPa·s;

k_o ——油相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

k_w ——水相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

v_l ——液体流速,m/s;

P_c ——毛细管压力,MPa;

g ——重力加速度,m/s²;

$\Delta \rho$ ——油、水两相密度差,kg/m³;

α ——流体流动方向与水平方向的夹角,(°)。

我们忽略毛管压力和重力的影响时,分流方程可简化为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w K_{ro}}{\mu_o K_{rw}}} \quad (8)$$

将公式(2),(3)代入(8)式可得:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} (1 - S_D)^2 (S_D^{\frac{6D_f-11}{3-2D_f}} - S_D^{-2})} \quad (9)$$

对(9)式两边求导,并整理得:

$$\lg \left\{ \left[\left(\frac{1}{f_w} - 1 \right) \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{(1 - S_D)^2} \right] + S_D^{-2} \right\} = \frac{6D_f - 11}{3 - 2D_f} \lg S_D + b \quad (10)$$

$$\text{再令: } X = \frac{6D_f - 11}{3 - 2D_f} \quad (11)$$

$$Y = \lg \left\{ \left[\left(\frac{1}{f_w} - 1 \right) \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{(1 - S_D)^2} \right] + S_D^{-2} \right\} \quad (12)$$

于是(10)式可变换为:

$$Y = X \lg S_D + b \quad (13)$$

式中: b ——拟合参数。

求取相对渗透率曲线^[13]的步骤为:

- ① 根据(4),(5)式求得油相饱和度 S_D ;
- ② 根据(6)式求得含水率 f_w ;
- ③ 将数据代入(12)式求得 Y ;
- ④ 将数据代入(13)式,拟合求得 X ,再将 X 值代入(11)式求得 D_f ;
- ⑤ 将求得的 D_f 值分别代入(2)和(3)式求得 K_{ro} 和 K_{rw} ;
- ⑥ 绘制相对渗透率曲线。

3 实例分析

双河油田位于河南省桐柏县和唐河县境内,在泌阳凹陷西南部的双河鼻状构造上。含油面积 9.35 km²,地质储量 838.48 × 10⁴ t。核桃园组六油层组储层物性较好,平均孔隙度为 18.4%,平均空气渗透率为 0.668 μm²。油砂体主体部位渗透率较高,平均为 0.460 μm²;上倾边缘部位最低,平均为 0.205 μm²。油田储层非均质性主要体现在层间及平面物性差异上。

在本次研究中,我们收集了双河油田核桃园组六油组参数,地层条件下油的粘度 $\mu_o = 1.7$ mPa · s,水的粘度 $\mu_w = 0.289$ mPa · s,束缚水饱和度 $S_{wi} = 26.76\%$,本研究区块基础生产数据如表 1。

根据(13)式计算得: $X = \frac{6D_f - 11}{3 - 2D_f} = -1.9163$,

$R^2 = 0.9929$, $D_f = 2.43$ 。根据本文的理论公式,计算得出不同饱和度下的油、水两相相对渗透率值(图 1;表 2)。为了验证本文理论方法的正确性和合理性,得出不同采出程度情况下,对应的理论与实际含水规律的对比如(图 2)。由图 2 可知,在采出程度大于 15% 以后,理论含水率值围绕着实际值上下波动,说明应用本方法得到的相渗曲线计算得到的含水规律与实际资料吻合性较好,能够代表本油组的相渗特征。

4 结论

1) 根据现场生产实际数据,采用分形维方法推导出的计算相对渗透率曲线新方法,准确性较高,能够代表研究区块的整体相渗特征。

2) 由于本文技术渗透率曲线的方法应用的是油田的生产动态数据,因此得出的相对渗透率较实验测定的相对渗透率更具有整体性和代表性。

表 1 双河油田六油组基础数据

Table 1 Production data from pay VI of the Hetaoyuan Formation, Shuanghe oilfield

年份	产油量/t	产水量/t	年份	产油量/t	产水量/t
1978	31 702.39	2 229.355	1994	35 813.260	261 514.3
1979	57 071.33	9 128.649	1995	21 097.640	222 686.0
1980	55 306.76	10 552.120	1996	16 293.540	215 875.9
1981	72 951.31	21 271.690	1997	14 742.690	218 497.7
1982	84 421.03	30 634.860	1998	11 325.220	180 247.3
1983	87 977.15	35 443.020	1999	8 933.448	128 971.7
1984	65 325.27	40 295.390	2000	10 099.480	131 290.5
1985	83 567.75	68 765.750	2001	8 506.971	114 370.3
1986	86 937.31	114 564.600	2002	8 390.785	124 678.1
1987	61 127.96	148 488.100	2003	7 994.438	120 223.3
1988	65 486.98	166 838.300	2004	7 962.153	123 702.9
1989	36 815.02	191 039.200	2005	8 786.396	117 615.1
1990	26 983.32	149 708.100	2006	5 503.914	104 981.6
1991	29 081.91	172 052.000	2007	5 570.510	12 0452.6
1992	25 842.02	199 264.900	2008	5 925.635	145 261.1
1993	20 955.64	189 725.100	2009	8 417.716	186 115.5

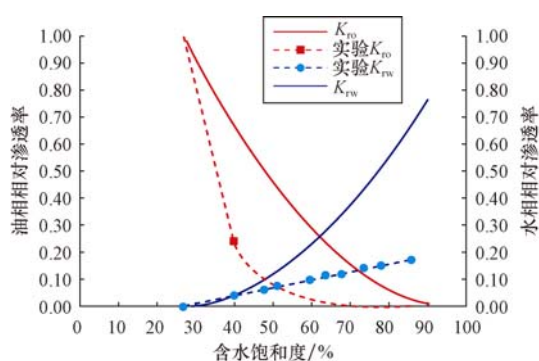


图1 理论和实际相对渗透率对比曲线

Fig. 1 Theoretically calculated vs. measured relative permeability curves

表2 不同饱和度对应的相对渗透率

Table 2 Relative permeability values under different water saturation

$S_w / \%$	K_{ro}	K_{rw}
32.2	0.860	0.006 6
41.2	0.645	0.044 0
49.9	0.465	0.109 9
58.0	0.321	0.195 6
62.5	0.252	0.252 3
64.1	0.228	0.275 0
60.1	0.152	0.364 0
70.2	0.154	0.365 0
85.0	0.027	0.644 6
95.0	0.001	0.873 0

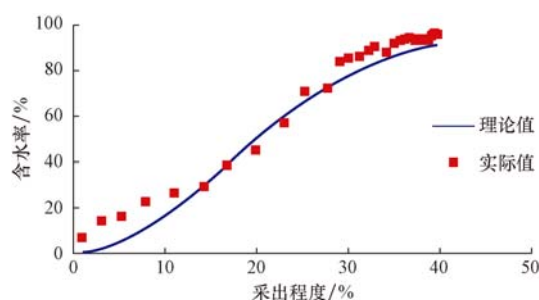


图2 理论和实际含水率对比曲线

Fig. 2 Theoretically calculated vs. measured water cut curves

参 考 文 献

- [1] 冯文光. 油气渗流力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 193-201.
Feng Wenguang. Petroleum seepage mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2007: 193-201.
- [2] 杨露, 冯文光, 李海鹏. 毛管压力曲线与相渗曲线相互转化的分形实现[J]. 断块油气田, 2008, 15(2): 64-66.

Yang Lu, Feng Wenguang, Li Haipeng. Fractal theory for transformation between capillary pressure curve and relative permeability curve [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(2): 64-66.

- [3] 罗蜚潭. 油层物理[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 22-36.
Luo Zhetan. Petroleum Physics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 22-36.
- [4] 杨宇, 周文, 邱坤泰, 等. 计算相对渗透率曲线的新方法[J]. 油气地质与提高采收率, 2010, 17(2): 105-107.
Yang Yu, Zhou Wen, Qiu Kuntai et al. A new method of calculating relative permeability curve [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(2): 105-107
- [5] 蒋明, 宋富霞, 郭发军, 等. 利用水驱曲线计算相对渗透率曲线[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(5): 418-421.
Jiang Ming, Song Fuxia, Guo Fajun, et al. Water drive curve to calculate the relative permeability curves [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(5): 418-421.
- [6] 向开理, 李允, 何国良. 分形油藏非牛顿幂律流体低速非达西不稳定渗流的组合数学模型[J]. 计算物理, 2002, 19(3): 239-244.
Xiang Kaili, Li Yun, He Guoliang. Non-Newtonian power-law fluids in fractal reservoir with low-speed non-darcy flow combination of mathematical model [J]. Computational Physics, 2002, 19(3): 239-244.
- [7] 同登科, 陈欣雷. 分形油藏中非牛顿松弛黏弹性液体广义流动分析[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(12): 1267-1274.
Tong Dengke, Chen Xinlei. Fractal reservoir Non-Newtonian relaxation of generalized viscoelastic fluid flow analysis [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1999, 20(12): 1267-1274.
- [8] 何琰, 伍友佳, 吴念胜. 相对渗透率定量预测新方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 66-68.
He Yan, Wu Youjia, Wu Nianshen. The relative permeability to quantitatively predict the new method [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 66-68.
- [9] 冯阵东, 戴俊生, 邓航, 等. 利用分形几何定量评价克拉2气田裂缝[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 928-933.
Feng Zhendong, Dai Junsheng, Deng Hang, et al. Quantitative evaluation of fractures with fractal geometry in Kela-2 gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 928-933.
- [10] 鹿洪友, 陈小宏, 黄捍东. 水平井负压钻井渗透率剖面计算模型影响参数[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 388-392.
Lu Hongyou, Chen Xiaohong, Huang Handong. An analysis on influential parameters for modeling permeability profile during underbalanced drilling in horizontal wells [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 388-392.

(下转第590页)

- 都理工大学,2009.
- Wang Jianhui. Research on play of lower paleozoic in the southern margin of Ordos Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2009.
- [14] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气 [M]. 北京:石油工业出版社, 2003:46-105.
- He Zixin. Evolution and oil and gas of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:46-105.
- [15] 罗晓容, 张刘平, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长8¹段低渗油藏成藏过程 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 770-778, 837.
- Luo Xiaorong, Zhang Liuping, Yang Hua, et al. Oil accumulation process in the low-permeability Chang-8¹ member of Longdong area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 770-778, 837.
- [16] 付金华, 罗安湘, 喻建, 等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向 [J]. 石油学报, 2004, 25(2): 25-29.
- Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, et al. Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 25-29.
- [17] 杨华. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系及含油性研究 [D]. 成都理工大学, 2004.
- Yang Hua. Deposition system and oil accumulation research of Yanchang Formation in Triassic, Ordos Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2004.
- [18] 喻建, 宋江海, 向惠. 鄂尔多斯盆地中生界隐蔽性油气藏成藏规律 [J]. 天然气工业, 2004, 24(12): 35-37.
- Yu Jian, Song Jianghai, Xiang Hui. Subtle reservoir formation law of Mesozoic in Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 35-37.
- [19] 喻建, 韩永林, 凌升阶. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油田成藏地质特征及油藏类型 [J]. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 13-19.
- Yu Jian, Han Yonglin, Ling Shengjie. Geological characteristics and reservoir types of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(4): 13-19.
- [20] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志 (卷12) [M]. 北京:石油工业出版社, 1992:62-70.
- Drafting Group of Oil Reserves in China. Oil reserves in China (Volume 12) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 62-70.
- [21] 许建红, 程林松, 鲍朋, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油藏地质特征 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 13-17.
- Xu Jianhong, Cheng Linsong, Bao Peng, et al. Reservoir characteristics of Yanchang Formation in Triassic, Ordos Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2007, 29(5): 13-17.
- [22] 丁晓琪, 张哨楠, 谢世文, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区中生界成藏系统 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 157-164.
- Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Xie Shiwen, et al. Hydrocarbon accumulation system of the Mesozoic in Zhenjing oilfield, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 157-164.
- [23] 梁宇, 任战利, 王彦龙, 等. 鄂尔多斯盆地子长地区延长组流体包裹体特征与油气成藏期次 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 182-191.
- Liang Yu, Ren Zhanli, Wang Yanlong, et al. Characteristics of fluid inclusions and reservoir phases in the Yanchang Formation of Zichang area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 182-191.

(编辑 李军)

(上接第581页)

- [11] 刘宏, 吴兴波, 谭秀成, 等. 多旋回复杂碳酸盐岩储层渗透率测井评价 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 678-684.
- Liu Hong, Wu Xingbo, Tan Xiucheng, etc. Logging evaluation of permeability of multicyclic carbonate rock reservoirs in the Middle Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 678-684.
- [12] 周克明, 张清秀, 王勤等. 利用分形模型计算气水相对渗透率 [J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 88-89.
- Zhou Keming, Zhang Qingxiu, Wang Le, et al. Use of fractal models to calculate the gas-water relative permeability [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 88-89.
- [13] 毛鑫, 冯文光, 杨骞, 等. 分形相对渗透率计算方法 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25(6): 90-91.
- Mao Xin, Feng Wenguang, Yang Qian, et al. Fractal relative permeability calculation method [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(6): 90-91.
- [14] 何又雄, 姚姚. 分形方法在模拟非均匀介质模型中的应用 [J]. 石油物探, 2005, 44(3): 199-202.
- He Youxiong, Yao Yao. Model of heterogeneous media using fractal simulation [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(3): 199-202.
- [15] 刘顺, 何衡, 张华光. 基于动态渗透率效应的低渗透油藏产能新观点 [J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 482-485.
- Liu Shun, He Heng, Zhang Huaguang. New viewpoint of productivity on low permeability reservoir based on dynamic permeability effect [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4): 482-485.
- [16] 薛永超, 程林松. 微裂缝低渗透岩石渗透率随围压变化实验研究 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 108-110.
- Xue Yongchao, Cheng Linsong. Experimental study on permeability variation with confining pressure in micro-fracture and low-permeability rock [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 108-110.

(编辑 董立)