

石油技术

中低渗透油层层间非均质性对提高采收率的影响

陈涛平 宋文玲 高 明 刘金山 俞宏伟

(大庆石油学院 提高油气采收率教育部重点实验室, 大庆 163318)

摘要 用三支不同渗透率人造岩心并联的方法模拟非均质地层, 根据经典非活塞驱替理论(Buckley-Leverett方程)对其水驱采收率进行了理论预测并在室内进行了驱油实验研究。预测结果表明: 水驱采收率随层间非均质性的增强, 其总体呈下降趋势, 但在不同的非均质性范围内水驱采收率的变化规律不同, 单独用渗透率变异系数或级差来表征层间非均质性对水驱采收率的影响有其局限性。实验结果表明: 水驱采收率随着层间非均质性的增强而不断降低, 与理论预测结果一致; 当二元复合驱油体系对非均质中低渗透油层具有较好的适应性时, 其采收率可达8%~10%, 非均质性对其影响不大; 低渗透率层二元复合驱采收率随层间非均质性的增强而增加, 当渗透率变异系数达到0.75以上时, 提高低渗透率层的采收率对于提高总体采收率具有重要的作用。

关键词 层间非均质性 中低渗透油层 二元复合驱 提高采收率

中图法分类号 TE348; **文献标志码** A

储层的非均质性是影响油气藏油、气、水渗流及油气采收率的主要原因^[1,2], 非均质性主要可分微观非均质性和宏观非均质性两类, 宏观非均质性又分为层内非均质性、层间非均质性和平面非均质性。本文着重讨论层间非均质性对水驱原油采收率以及二元复合驱提高采收率的影响程度。

人造物理模型是进行油田开发室内实验的重要手段之一^[3-5], 笔者使用三支不同气测渗透率单管人造岩心并联(下称三管并联)的方法模拟非均质地层, 使用经典非活塞驱替理论和水电相似等相关渗流理论对该情况下的水驱采收率进行理论预测, 并在室内进行了人造岩心三管并联水驱及二元复合驱提高采收率实验研究, 探索了层间非均质性对提高原油采收率的影响。

1 理论研究

1.1 理论依据

对 Buckley-Leverett 方程两边求积分可得:

2010年5月10日收到

黑龙江省教育厅科学技术研究项目

(11521009)资助

第一作者简介: 陈涛平(1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 提高油气采收率及采油工程。

$$x_f = \frac{f'_w(S_w)}{\varphi A} \int_0^t q_t dt \quad (1)$$

单向渗流非活塞式水驱油渗流阻力为^[6]:

$$R = \frac{\mu_o}{AK} (L - x_f) + \frac{q\mu_o}{AK} \frac{x_f}{f_w(S_{wf})} \int_0^{f_w(S_w)} \frac{f_w(S_w)}{K_{ro}} d f_w(S_w) \quad (2)$$

式(2)中, R —单向渗流非活塞式水驱油渗流阻力; L —岩心长度, cm; K —岩心绝对渗透率, μm^2 ; A —岩心横截面积, cm^2 ; μ_o —油的黏度, $mPa \cdot s$; x_f —供给边缘至油水前缘的距离, cm; q —总注水流量, cm^3/s ; μ_w —水的黏度, $mPa \cdot s$; K_{ro} —油相相对渗透率; K_{rw} —水相相对渗透率; $f'_w(S_w)$ —含水率对含水饱和度的导数; $f'_w(S_{wf})$ —初始含水饱和度时含水率对含水饱和度的导数; $f_w(S_w)$ —某一饱和度下的含水率。

三支不同渗透率人造岩心并联时, 在总注水流量一定的情况下, 单管岩心内流体的流量随渗流阻力的变化而变化, 由水电相似原理可以推知, 两者之间存在如下关系:

$$q_1 = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_3 R_2 + R_1 R_3} q; \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{R_1 R_3}{R_1 R_2 + R_3 R_2 + R_1 R_3} q; \quad (4)$$

$$q_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_3 R_2 + R_1 R_3} q \quad (3)$$

式(3)中, R_1 , R_2 , R_3 —分别为三支单管人造岩心非活塞式水驱油时的渗流阻力; q_1 , q_2 , q_3 —分别为三支单管人造岩心非活塞式水驱油时的流体流量。

1.2 计算方法

首先根据实验所用岩心的气测渗透率及实测油水相对渗透率作出所预测岩心的归一化相对渗透率曲线(见图1),然后以最高渗透率岩心含水饱和度的微小变化(计算过程中采用值为0.01)为基准,假设在这一微小变化过程中各个岩心的渗流均为稳定渗流,即该过程中的渗流速度不变,按照式(1)、式(2)和式(3)逐次计算在渗流过程中三支并联管内的各自的含水饱和度,直至综合含水率达到98%为止。本文共计算了75组平均渗透率 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的三管并联而成的非均质性岩心水驱采收率,结果如图2和图3所示。

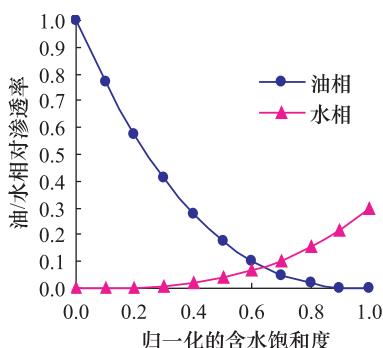


图1 归一化的油水相对渗透率曲线

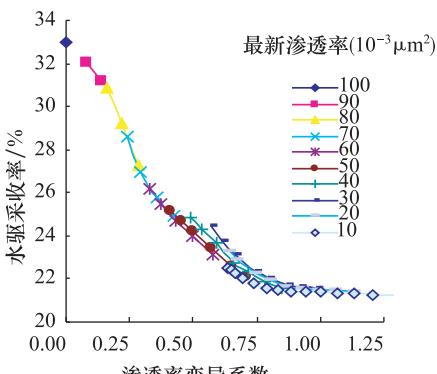


图2 水驱采收率与渗透率变异系数的关系曲线

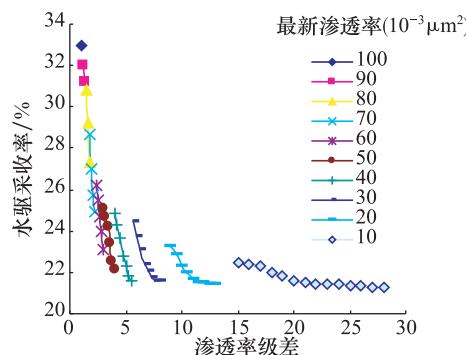


图3 水驱采收率与渗透率级差的关系曲线

1.3 结果分析

由图2和图3可以看出,水驱采收率随层间非均质性的增强,其总体呈下降趋势,但在不同的非均质性范围内水驱采收率的变化规律不同。当渗透率变异系数 $0 < V_k < 0.4$ 或渗透率级差 $0 < J_k < 3$ 时,水驱采收率随层间非均质性的增强而呈快速递减;当渗透率变异系数 $0.4 < V_k < 0.85$ 或渗透率级差 $3 < J_k < 15$ 时,对最低渗透率一定的三管组合,水驱采收率也随层间非均质性的增强而递减,但总体上呈不规则变化,这是由于渗透率变异系数或级差均非表征非均质性的唯一指标,它们同时对水驱采收率造成影响,故单独用变异系数或级差来表征层间非均质性对水驱采收率的影响有其局限性,只有当渗透率变异系数与级差的变化趋势一致时,水驱采收率才随层间非均质性的增强而递减,但递减幅度较小;当渗透率变异系数 $V_k > 0.85$ 或渗透率级差 $J_k > 15$ 时,随层间非均质性的增强,水驱采收率递减已不明显,基本趋于一致。

2 实验研究

2.1 实验材料

实验所用岩心为大庆石油学院研制的人造圆柱岩心,其规格为 $\Phi 25 \text{ mm} \times (97.8 \sim 102.6) \text{ mm}$;孔隙度范围 $15.21\% \sim 25.31\%$;气测渗透率范围 $(25 \sim 210) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,三管平均渗透率 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;原始含油饱和度范围 $36.05\% \sim 75.68\%$;原油为大庆油田采油一厂井口油经脱水脱气后与航

空煤油配制的模拟油(45℃时黏度10 mPa·s);驱替用水为大庆油田采油三厂注入水(45℃时黏度0.616 mPa·s);饱和岩心所用盐水矿化度为6778 mg/L;驱替所用二元复合体系由质量浓度为0.3%的BS13甜菜碱型表面活性剂和浓度为400 mg/L相对分子质量为 480×10^4 的聚丙烯酰胺复配。

2.2 实验方法

在45℃条件下,把岩心抽真空后饱和盐水,并将其饱和油后静置1~2 d;先水驱至岩心采出液含水率达98%以上,然后注入0.3倍孔隙体积二元复合驱油体系,最后进行后续水驱。在整个实验过程中,实时记录采出的油水量及驱替压差,计算各阶段各岩心及综合采收率。

2.3 结果分析

15组平均渗透率为 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的不同非均质三管并联人造岩心的水驱及二元复合驱提高采收率实验结果见表1。

表1 人造岩心三管并联驱油实验结果

组号	渗透率		综合采收率(%)			累计注入 PV ^① 数
	变异系数	级差	水驱	二元	最终	
1	0	1.000	34.87	9.21	44.08	3.34
2	0.156	1.458	32.67	8.92	41.59	2.36
3	0.156	1.476	32.56	8.84	41.40	3.62
4	0.226	1.767	31.92	8.51	40.43	2.84
5	0.242	1.819	31.75	9.52	41.27	2.92
6	0.428	3.415	30.53	8.95	39.48	2.88
7	0.438	3.590	30.65	8.54	39.19	2.89
8	0.469	3.805	31.12	8.67	39.79	2.85
9	0.491	3.829	31.73	8.66	40.39	3.31
10	0.644	4.750	29.02	8.29	37.31	3.46
11	0.624	4.500	29.89	8.15	38.04	3.25
12	0.743	8.077	24.85	8.94	33.79	3.23
13	0.762	8.360	23.46	9.06	32.52	3.24
14	0.059	1.050	36.36	9.10	45.46	2.75
15	0.325	1.744	30.98	8.61	39.59	2.87

注:①PV为Pore Volume的缩写,意指岩心孔隙体积

表1中综合水驱采收率与渗透率变异系数、渗透率级差的实验值与前面理论计算值的结果对比如图4、图5所示。

由图4、图5可以看出,随着三管并联岩心非均质性的增强(即渗透率变异系数或渗透率级差的增大),水驱采收率不断降低;且不同非均质条件下驱油实验实测的水驱采收率值与按前述理论计算的曲线相一致,说明了理论分析的正确性。

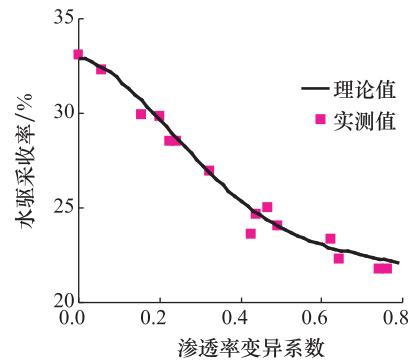


图4 不同渗透率变异系数时水驱采收率理论值与实测值的对比

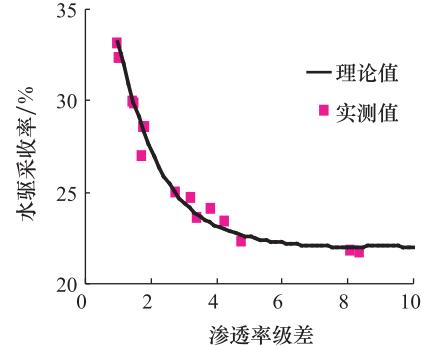


图5 不同渗透率级差时水驱采收率理论值与实测值的对比

根据表1中的实验数据所作的二元复合驱采收率随渗透率变异系数和渗透率级差变化的关系曲线如图6、图7所示。

综合对比图4至图7可知,尽管三并联管岩心的水驱采收率随着非均质性的增强急速降低,但其二元复合驱采收率变化不大,基本维持在8%~10%,说明在本实验条件下,非均质性对二元复合驱提高采收率的幅度影响不大。

本实验所用的二元复合驱油体系属超低界面张力(10^{-3} mN/m数量级)驱油体系^[7],且其中的聚丙烯酰胺分子量与岩心渗透率相匹配^[8],上述实验

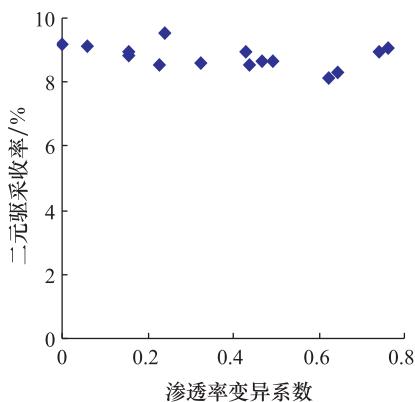


图 6 二元复合驱采收率与渗透率变异系数的关系

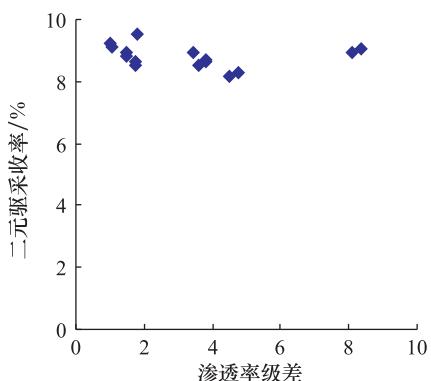


图 7 二元驱采收率与渗透率级差的关系

结果表明,该二元复合体系对中低渗透层间非均质油层具有较好的适应性。

对实验结果的进一步分析表明,随着层间非均质性的增强,高渗透率层二元复合驱提高原油采收率幅度逐渐减小,而低渗透率层二元复合驱提高原油采收率幅度逐渐增加。特别是当渗透率变异系数达到0.75以上时,低渗透率层的水驱采收率不到3%,而其二元复合驱提高原油采收率幅度可达20%(如图8所示)。由此可见,水驱后剩余油大部分集中在低渗透率层,因此低渗透率层是提高采收率的主要潜力层,提高低渗透率层的采收率对于提高总体采收率具有重要的作用。

3 结 论

(1) 理论计算表明,水驱采收率随层间非均质性的增强,其总体呈下降趋势,但在不同的非均质性范围内水驱采收率的变化规律不同,单独用变异

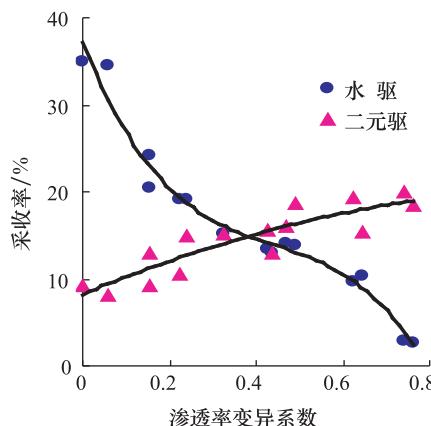


图 8 低渗透层采收率与渗透率变异系数的关系

系数或级差来表征层间非均质性对水驱采收率的影响有其局限性。

(2) 在本实验条件下,水驱采收率随着层间非均质性的增强而不断降低,且不同非均质条件下实测的水驱采收率值与理论曲线相一致。

(3) 本实验条件下,非均质性对二元复合驱采收率的影响不大,二元复合驱采收率基本维持在8%~10%,表明该二元复合驱动油体系对非均质中低渗透油层具有较好的适应性。

(4) 低渗透率层二元复合驱采收率随层间非均质性的增强而增加。当渗透率变异系数达到0.75以上时,提高低渗透率层的采收率对于提高总体采收率具有重要的作用。

参 考 文 献

- 尹志军,鲁国者,邹翔,等.陆相储层非均质性及其对油藏采收率的影响—以冀东高尚堡和胜利永安镇油藏为例.石油与天然气地质,2006;27(1):106—110
- 邓瑞健.储层平面非均质性对水驱油效果影响的实验研究.大庆石油地质与开发,2002;21(4):16—19
- 尤源,岳湘安,赵仁宝,等.非均质油藏水驱后化学体系提高采收率效果研究.钻采工艺,2009;32(5):30—33
- 沈平平.油层物理实验技术.北京:石油工业出版社,1995
- 李宜强,隋新光,李洁,等.纵向非均质大型平面模型聚合物驱油波及系数室内实验研究.石油学报,2005;26(2):77—79
- 葛家里.现代油藏渗流力学(上册).北京:石油工业出版社,2003:175—199

(下转第 5167 页)

- 2 Ghoudane N, Essaïdi M. A novel compact multiband planar antenna for wireless and mobile handsets. *Microwave Symposium (MMS)*, 2009 Mediterranean, 2009; 1—4
- 3 Yıldırım B S. Low-profile and planar antenna suitable for WLAN/Bluetooth and UWB applications. *Antennas and Wireless Propagation Letters IEEE*, 2006; 5(1): 438—441
- 4 Yıldırım B S, Cetiner B A, Roqueta G. Integrated Bluetooth and UWB Antenna, 2009; 8: 149—152
- 5 Lu L, Coetzee J C. Reduced-size microstrip patch antenna for Blue-tooth applications. *Electronics Letters*, 2005; 41(17): 944—945
- 6 Nguyen V A, Bhatti R A, Park S O. A simple PIFA-based tunable internal antenna for personal communication handsets. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008; 7: 130—133
- 7 Sim D U, Moon J I, Park S O. A wideband monopole antenna for PCS/IMT-2000/Bluetooth applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004; 3: 45—47
- 8 乔 辉. 蓝牙天线技术分析与产品应用. *无线电工程*, 2004; 34(10): 38—40

The Design of a Miniaturized Bluetooth Printed Antenna

QIU Jing-hui, LI Gao-fei*, SUN Bo, WANG Nan-nan, HAN Xue

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China)

[Abstract] Based on the meandering technology, a miniaturized printed Bluetooth antenna covering the whole ISM band (2.4—2.484 GHz) is designed. The impedance and radiation characteristics of the antenna is analyzed by the software CST Microwave Studio®, its volume is only 15 mm × 6 mm × 1 mm, thus the optimized parameters of the structure of the antenna is concluded. The proposed antenna with small size, light weight and omni-directional radiation is realized and tested, it can meet the require of all kinds of Bluetooth system.

[Key words] Bluetooth printed antenna meandering

(上接第 5154 页)

7 陈涛平, 张志琦. 非均质低渗透油层超低界面张力体系驱油方式. *大庆石油学院学报*, 2009; 33(5): 55—59

8 陈 鹏, 邵振波, 刘英杰. 中低渗透油层聚合物相对分子量的确定方法. *大庆石油地质与开发*, 2005; 24(3): 95—96

The Effect of Interlayer Heterogeneity on EOR in Mid-low Permeability Reservoir

CHEN Tao-ping, SONG Wen-ling, GAO Ming, LIU Jin-shan, YU Hong-wei

(The Key Laboratory of Enhance Oil and Gas Recovery of Educational Ministry, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China)

[Abstract] Three single man-made cores were connected parallelly to simulate heterogeneous reservoir, their water flooding recoveries were predicted by the classical theory of non-piston-like displacement (Buckley-Leverett equation) and doing the oil displacement research in the lab. The prediction results showed that: along with the increase of interlayer heterogeneity, the trend of the water flooding recovery totally decreased; but the variation of water flooding recoveries were different in the different range of heterogeneity, so characterizing the interlayer heterogeneous effect on water flooding recovery only with permeability variation coefficient and permeability contrast was limited. The experiment results show that water flooding recovery decreased as the the increase of interlayer heterogeneity, which is identical with theoretical prediction results. When the binary flooding system had good adaptability to heterogeneous mid-low permeability reservoir, its recovery can reach 8% ~ 10%, heterogeneity had little effect to recovery, the recovery of binary flooding system in low permeability layer increased along with the strengthenment of interlayer heterogeneity, when the permeability variation coefficient reached above 0.75. Improving the recovery of low permeability layer plays an important role on improving the overall recovery.

[Key words] interlayer heterogeneity mid-low permeability reservoir binary flooding EOR