

水驱油电阻率与含水饱和度关系的理论推导和数值模拟研究

张超谟*, 张占松, 郭海敏, 李军, 唐小梅

长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州 434023

* E-mail: zhang7801@263.net

收稿日期: 2007-12-05; 接受日期: 2008-04-03

国家高新技术发展计划项目(编号: 2006AA06Z220)和中石油集团公司应用基础研究项目(编号: 06A30102)资助

摘要 水淹过程中电阻率与含水饱和度关系是用测井资料定量研究水淹级别及确定剩余油饱和度的基础, 油田开发积累了大量的岩心分析数据及生产数据, 为认识水淹过程中电阻率与含水饱和度关系及变化规律提供了依据. 从阿尔奇公式及物质平衡关系出发, 导出两种方法求 R_z-S_w , R_f-S_w 的定量关系, 两种方法建立的关系与实测样品的关系相似. 研究结果可用于分析各种影响因素及定量确定饱和度.

关键词

水淹层
测井
电阻率
含水饱和度
数值模拟

水驱油电阻率与含水饱和度关系研究是油田开发过程中用电阻率研究剩余油饱和度的基础, 油田开发实测数据^[1,2]及岩心实验^[3,4]均表明水淹过程中储层电阻率随含水饱和度的增加可以呈现出下降的L型、下降-上升-下降的S型及下降-上升的U型 3 种类型, 这些结果对理论分析与实际定性解释具有借鉴作用. 然而, 由于油田开发与岩心分析的定性规律具有特殊性, 而且样品数量有限, 不能定量地得出普遍规律^[5,6], 因此, 采用理论推导或数值模拟方法寻找一般性规律具有重要意义. 本文采用两种方法来寻找这种规律, 所建立的水驱油电阻率与含水饱和度关系和岩心分析的趋势基本一致.

1 水驱油电阻率与含水饱和度关系实验结果

魏斌等^[3]对高含水期井的密闭取心岩样按不同流动单元分别模拟地层条件下的水驱油实验, 实验条件为: (i) 温度 70℃, 压力 20 MPa; (ii) 原始地层水矿化度 3000 mg/L, 电阻率 0.831 $\Omega \cdot m$, 黏度 0.57 mPa·s; (iii) 注入水矿化度 1000 mg/L, 电阻率 2.452

$\Omega \cdot m$, 黏度 0.57 mPa·s; (iv) 实验用油的黏度 1.65 mPa·s.

实验共有 35 块岩样, 其中 20 块为 I 类流动单元, 代表性的样品为 93 号岩样; 10 块为 II 类流动单元, 代表性的样品为 73 号岩样; 5 块为 III 类流动单元, 代表性的样品为 34 号岩样. 3 种岩样的特征见表 1, 3 类流动单元的实验结果分别见表 2、表 3 和表 4, 并分别绘制于图 1(a), 2(a), 3(a). 这些实验结果具有典型 L, S 及 U 形态的代表性, 一方面给出了电阻率与含水饱和度关系的感性认识, 另一方面为验证后面的数值模拟结果提供了依据.

2 基于阿尔奇公式的水驱油电阻率与含水饱和度关系

众所周知的 Archie 公式^[7]已在地层评价中使用了将近 70 年, 公式如(1)式:

$$R_t = \frac{abR_w}{S_w^n \phi^m}, \quad (1)$$

式中, R_t 为地层电阻率, 单位 $\Omega \cdot m$; S_w 为地层含水饱

表 1 3 种流动单元的岩样特征

性质	93 号(I 类)	73 号(II 类)	34 号(III 类)
岩性	中砂岩	细砂岩	粉砂岩
孔隙度/%	22.5	22.2	21.4
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	285.01	74.28	21.7
地层全含水时的电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	27.28	29.46	26.78
束缚水饱和度/%	39.6	50.6	63.7
剩余油饱和度/%	27.6	15.9	16.3

表 2 I 类流动单元实验结果

S_w	0.391	0.464	0.517	0.568	0.638	0.675	0.691	0.727
R_t	130.666	103.313	46.157	39.625	35.134	33.909	29.826	26.560

表 3 II 类流动单元实验结果

S_w	0.312	0.341	0.406	0.436	0.469	0.503	0.536
R_t	83.240	70.439	61.372	53.905	48.749	44.660	39.326
S_w	0.312	0.565	0.587	0.669	0.684	0.720	0.753
R_t	83.240	37.192	38.437	41.282	40.393	39.681	35.948

表 4 III 类流动单元实验结果

S_w	0.637	0.690	0.709	0.761	0.815	0.836
R_t	20.835	15.077	13.185	13.323	13.706	14.035

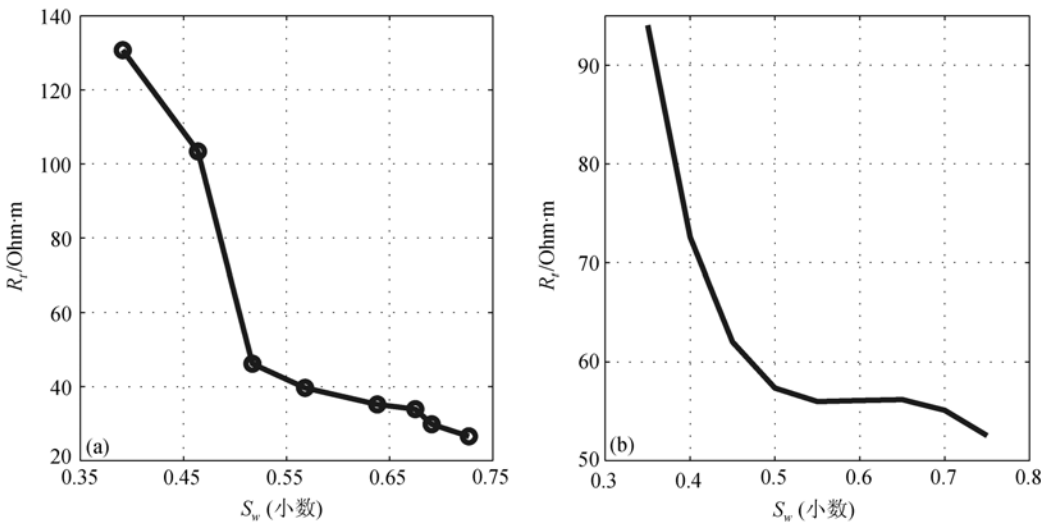


图 1 辽河油田 I 类流动单元实验结果与数值模拟结果

(a) 实验结果: 水驱过程中, R_t - S_w 呈 L 型: 电阻率急剧下降-下降缓慢-快速下降(辽河样品); (b) 数值模拟结果: 总体趋势与实验结果的趋势几乎一致, 饱和度的值对应很好, 但电阻率数值的绝对值有些差异

和度, 小数; R_w 为地层水电阻率, 单位: $\Omega\cdot\text{m}$; ϕ 为地层孔隙度, 小数; a, b, m, n 为阿尔奇公式的参数.

在不考虑 a, b, m, n 及 ϕ 随 S_w 变化的理想情况下, 对(1)式两边求 S_w 的偏导数^[8].

$$\frac{1}{R_t} \frac{\partial R_t}{\partial S_w} = \frac{1}{R_w} \frac{\partial R_w}{\partial S_w} - \frac{n}{S_w},$$
$$\frac{\partial R_t}{\partial S_w} = \left(\frac{1}{R_w} \frac{\partial R_w}{\partial S_w} - \frac{n}{S_w} \right) \cdot R_t \Big|_{S_w=S_{wc}} = 0,$$

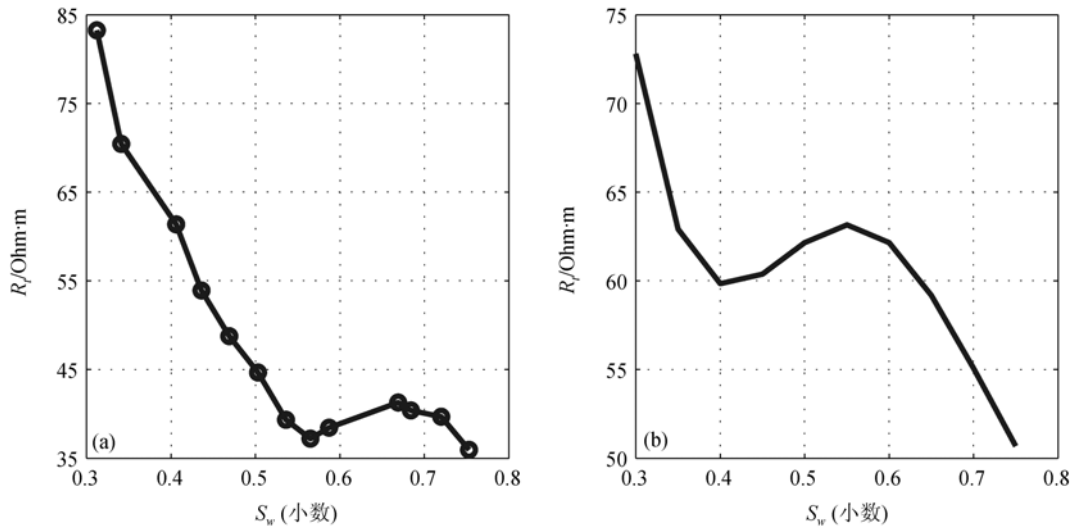


图 2 辽河油田 II 类流动单元实验结果与数值模拟结果

(a) 实验结果: 水驱过程中, R_f-S_w 呈 S 型: 电阻率急剧下降-逐渐上升-下降(辽河样品); (b) 数值模拟结果: 总体趋势与实验结果的趋势几乎一致, 饱和度的值及电阻率数值的绝对值有些系统的差异

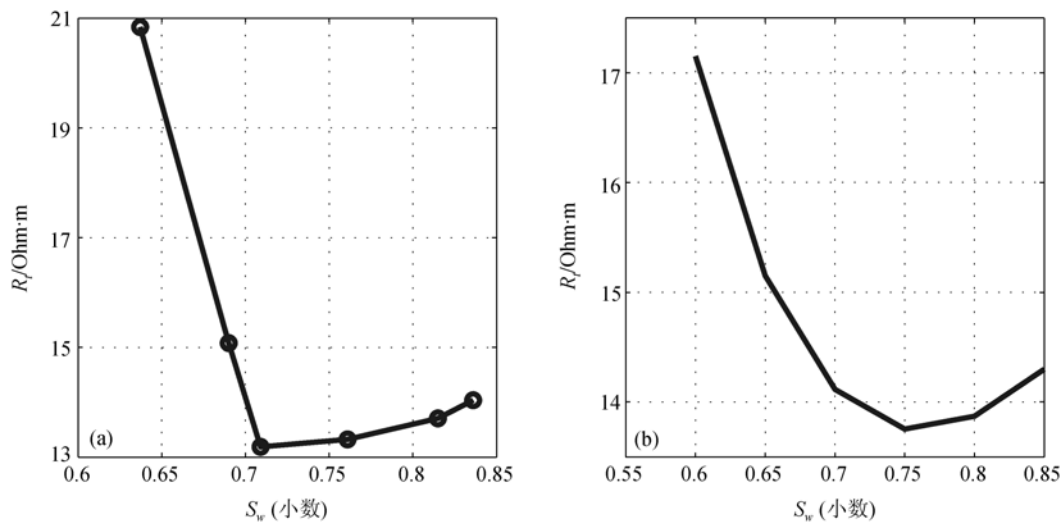


图 3 辽河油田 III 类流动单元实验结果与数值模拟结果

(a) 实验结果: 水驱过程中, R_f-S_w 呈 U 型: 电阻率快速下降-上升(辽河样品); (b) 数值模拟结果: 总体趋势与实验结果的趋势几乎一致, 饱和度与电阻率数值的绝对值也对应得好

求得:

$$\ln R_w = \frac{n}{S_{wc}} S_w + C_1,$$

式中, S_{wc} 为电阻率由下降变为上升的临界含水饱和度点.

当 $S_w = S_{wi}$ 时, $R_w = R_{wi}$, 有

$$C_1 = \ln R_{wi} - \frac{n}{S_{wc}} S_{wi},$$

$$\ln \left(\frac{R_w}{R_{wi}} \right) = \frac{n}{S_{wc}} (S_w - S_{wi}),$$

式中, S_{wi} 为束缚水饱和度, 小数; R_{wi} 为束缚水电阻率, $\Omega \cdot m$.

当 $S_w = 1 - S_{or}$ 时, $R_w = R_{wj}$.

$$S_{wc} = \frac{n(1 - S_{or} - S_{wi})}{\ln \frac{R_{wj}}{R_{wi}}}, \quad (2)$$

式中, S_{or} 为剩余油饱和度, 小数; R_{wj} 为注入水电阻率, $\Omega \cdot m$.

(2) 式表明 U 形曲线的上升点的含水饱和度与 n 值有关, 与注入水相对原生水矿化度的倍数有关, 还与束缚水饱和度及最终残余油饱和度有关. 对于给定的储层, 注入倍数一定, 则 S_{wc} 一定. 这样混合流体的电阻率(R_z)为

$$R_z = R_{wi} e^{\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \ln \frac{R_{wj}}{R_{wi}}} \quad (3)$$

混合液电阻率与原生水电阻率、注入水电阻率、束缚水饱和度、残余油饱和度有关, 与当前含水饱和度有关, 与 m, n 无关. 当 $R_{wi}=0.37 \Omega \cdot m$; $S_{wi}=0.35$; $\phi=0.135$; $a=1.0147$; $b=0.9249$; $n=1.8878$; $m=1.6816$ 时, 图 4 为这种理论推导方法建立的 R_z-S_w 及 R_t-S_w 关系曲线.

3 基于离子交换与物质平衡方程的水驱油电阻率与含水饱和度关系

该方法以地层水的离子交换为依据, 按物质平

衡方程模拟水驱油过程中的地层水电阻率及地层电阻率随含水饱和度变化的规律.

按矿化度混合的观点, 束缚水中的离子要与注入水中的离子进行交换, 当时间足够长时, 可以达到动态平衡. 设开始的地层水矿化度为 $P_i(\text{mg/L})$, 注入水矿化度为 $P_j(\text{mg/L})$, 则初始含盐量(SALT)为(mg/L): $P_i \phi S_{wi}$.

当含水饱和度从 S_{wi} 变到 S_w 时, 增加了 $\phi(S_w - S_{wi})$ 的水, 注入水的含盐量为

$$P_j \phi (S_w - S_{wi}).$$

这时的含盐量为

$$SALT = P_i \cdot \phi \cdot S_{wi} + P_j \cdot \phi \cdot (S_w - S_{wi}).$$

总矿化度为

$$\begin{aligned} PPT &= \frac{P_i \cdot \phi \cdot S_{wi} + P_j \cdot \phi \cdot (S_w - S_{wi})}{\phi \cdot S_w} \\ &= \frac{P_i \cdot S_{wi} + P_j \cdot (S_w - S_{wi})}{S_w}. \end{aligned} \quad (4)$$

对应的混合液电阻率^[9] R_z :

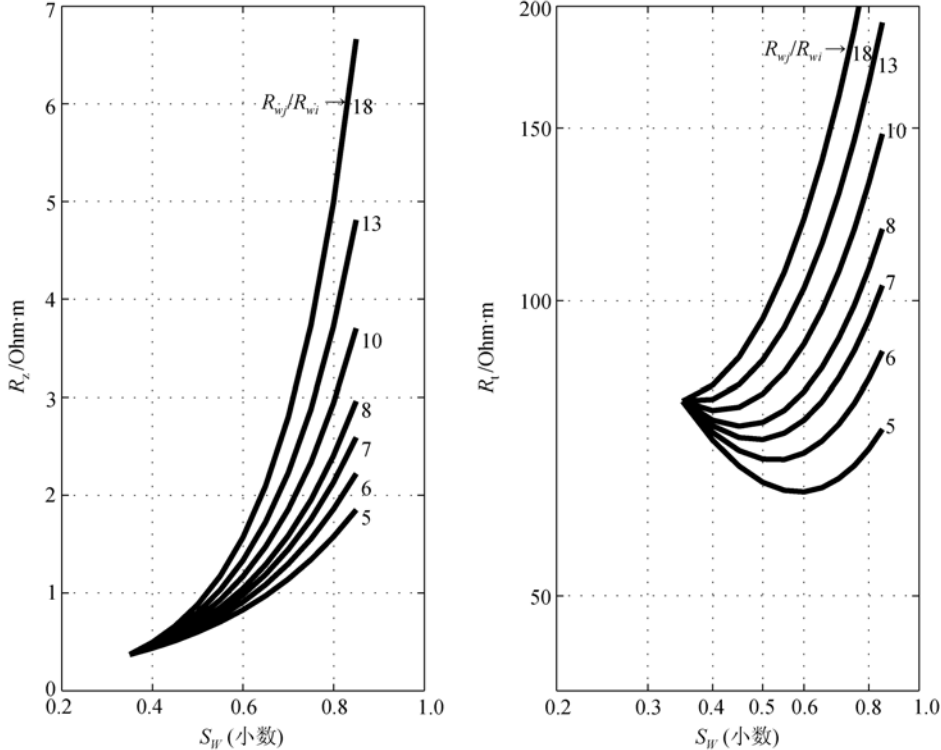


图 4 基于 Archie 公式导出的 R_z-S_w , R_t-S_w 关系

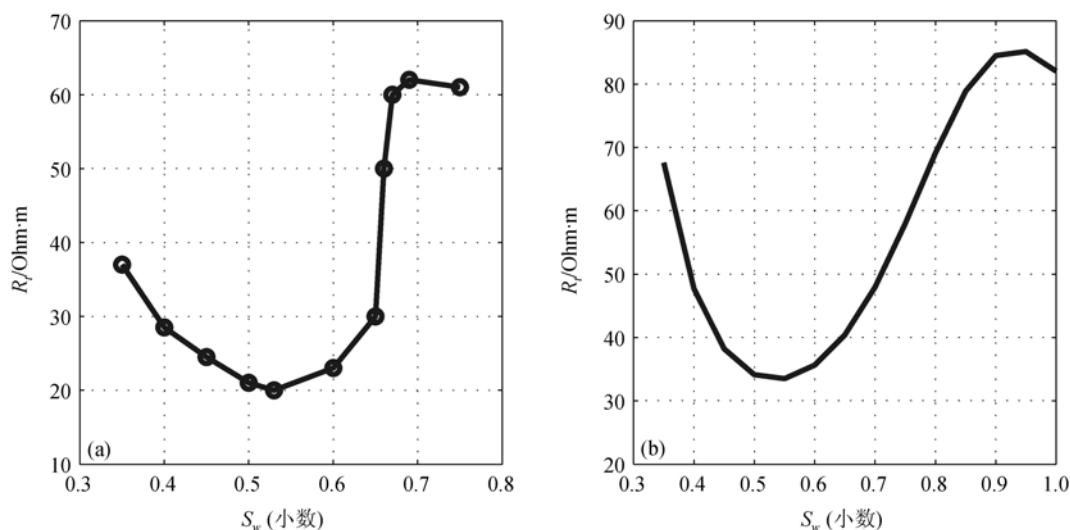


图 5 吐哈实验结果与数值模拟结果

(a) 实验结果: 水驱过程中, R_t - S_w 呈大 U 型: 电阻率下降-急剧上升(吐哈样品); (b) 数值模拟结果: 总体趋势与实验结果相似, 下降段对应很好, 但上升段有差异

$$R_z = \left(\frac{400000}{T \times PPT} \right)^{0.88} \quad (5)$$

式中, T 为地层温度(华氏单位)。

在这一微分体积内, 只要时间足够长, 孔隙内的离子交换就会达到平衡, 然而, 这是一种动态平衡, 是暂时的, 下一时刻, 注入水还在继续进行, 因此, 这一动态平衡的过程就继续进行, 直到 S_w 接近 S_{or} . 模拟程序在 MATLAB 下完成^[10,11].

图 1、图 2 及图 3 分别为辽河油田 I 类、II 类、III 类流动单元实验结果与数值模拟结果, 图 5 为吐哈实验结果与数值模拟结果。

上述实验结果反映了电阻率随注入水饱和度变化的动态特征, 理论模拟结果总体趋势与实验结果变化趋势相似, 而细节上有差异. 差异的主要原因是实际岩心是一个复杂的孔隙介质, 对于两个岩样, 即使对外表现出孔隙度、电阻率等宏观特性相同, 它们

的微观渗流特性仍然会有差异, 这样数值模拟结果就会出现与实际不一致的情况. 以后的理论研究还要增加适当的微观特性控制参数, 以便使模拟结果更接近实际情况。

4 结论

(1) 理想条件下, 理论推导与数值模拟两种方法建立的水驱油电阻率与含水饱和度关系和岩心实验结果总体趋势相似, 但由于实际情况与理想条件有差异, 所以其结果在数值上有一定的差异。

(2) 理论推导及数值模拟研究表明, R_t - S_w 关系在不同的物性与流体性质条件下, 可呈现下降的 L 型、下降-上升-下降的 S 型及下降-上升的 U 型 3 种类型. U 形曲线的上升点的含水饱和度与 n 值有关, 与注入水相对原生水矿化度的倍数有关, 还与束缚水饱和度及最终残余油饱和度有关. 对于给定的储层, 注入倍数一定, 则 S_{wc} 一定。

参考文献

- 1 柯诺伯列夫. 楚泽涵, 郝志兴, 译. 油田开发中的地球物理检测方法. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 2 奥尔洛夫, 卡尔波夫, 塔波尔科夫. 见: 郝志兴, 楚泽涵, 译. 油气储集岩的岩石物理研究. 北京: 石油工业出版社, 1992
- 3 魏斌, 郑浚茂. 高含水油田剩余油分布研究. 北京: 地质出版社, 2002

- 4 Dabbouk C, Ali L, Williams G, et al. Waterflood in vuggy layer of middle east reservoir-displacement physics understood, Paper SPE 78530 presented at the 10th Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, 13-16 Oct. 2002
- 5 Khisamutdinov A I, Phedorin M A. Numerical Method of Evaluating Elemental Content of Oil-Water Saturated Formations Based on Pulsed Neutron-Gamma Inelastic Log Data, SPE 104342 presented at the 2006 SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 3-6 October 2006
- 6 Adisoemarta P S, Anderson G A, Frailey S M, et al. Historical Use of m and a in Well Log Interpretation: Is Conventional Wisdom Backwards? SPE 59699, 2000
- 7 Archie G E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Trans, AIME, 1942. 146
- 8 樊映川. 高等数学讲义. 北京: 人民教育出版社, 1977
- 9 车吾卓. 测井资料分析手册. 北京: 石油工业出版社, 1995
- 10 Duane Hanselman, Bruce Littlefield. Mastering MATLAB 7. Pearson/Prentice Hall, 2005
- 11 蒲俊, 吉家锋, 伊良忠. Matlab6.0 数学手册. 上海: 浦东电子出版社, 2002