



CSTAM 2012-B03-0082

特低渗透油藏物理模拟渗流场测量技术研究

滕起

中国科学院渗流流体力学研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

特低渗透油藏物理模拟渗流场测量技术

滕起

(中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要 随着储层渗透率的越来越低, 渗流的非线性程度越来越强, 流体在其中的渗流规律亟待通过实验的方法来研究。通过小岩心实验标定了岩心中溶液浓度和电阻率比值之间的函数关系。采用特低渗透天然砂岩平板模型进行了单相流体驱替实验, 通过记录测量点间的电阻率变化反算平板模型中的流体的波及情况, 并绘制了流场图。验证了应用电阻率法测量渗流场的可行性。

关键词 特低渗透油藏, 天然砂岩平板模型, 单相驱替实验, 电阻率法, 渗流场测量

引言

目前关于油藏中流体渗流规律的基础实验研究多是针对低渗透和中、高渗透储层。对于中、高渗透储层多采用填砂模型, 根据相似理论进行实验模拟; 对于低渗透和特低渗透储层的实验多为一维岩心驱替实验^{[1]-[11]}。由于特低渗透储层孔喉细小, 用填砂模型无法达到其渗透率尺度, 阻碍了通过实验的方法进行渗流规律的研究。本文采用的实验模型为天然露头砂岩平板模型, 其孔隙结构与真实油藏一致, 在其中进行流体驱替实验能够最大程度反映实际油藏中流体渗流的情况。通过电阻率法, 测量了单相流体驱替过程中的流场变化。该方法为特低渗透油藏物理模拟研究奠定了基础。

1 饱和度测量技术概述

测量饱和度的方法有电阻率法、声波法、微波法、CT 成像法和核磁成像法等; 其中 CT 成像法和核磁成像是较为先进的方法, 可以获得直观的饱和度分布状况。CT 成像法能将密度差的物质分辨出来; 核磁成像法依靠测量氢原子的数量而计算出含水程度^[12]。对于 CT 成像是利用 X 射线穿透物体断面进行扫描, 将透过物体的 X 射线强度进行放大和数模转换, 得出与 X 射线吸收系数直接关联的 CT 值。物质的密度越大, CT 值越大, 由其测量原理可知, 对于水驱油实验, 应用 CT 成像技术可以显示较好的效果。将其应用于单相流体驱替实验中的流场测量, 不会有理想的效果。对于核磁成像法, 由于特低渗透砂岩孔隙微小, 其中饱和和流体量少, 现有核磁设备信号强度较弱, 无法得到清晰的饱和度图像。这两种方法具有实验费用高、利用辐射物质测量的特点, 使得它们不适合在实验室内频繁使用。声波法和微波法受到发射和接收设备的影响, 测量面积较大, 应用于实验室内平板物理模型时, 难于精细测量。而电阻率方法是最为简单易行的常规测井方法, 通过电阻率的数值及电位曲线的变化可以分辨出测试层含水、含油变化。对于特低渗透平板模型, 笔者通过实验论证了电阻率法测量单相流体驱替是流场测量的可行性。并进行了驱替实验, 得到了驱替不同阶段的流场图。

2 电阻率法渗流场测量技术实验研究

通常油气储集层的基质不导电, 而岩石中地层水由于含有矿物离子而具有导电性。通常地层水的矿物离子浓度越大, 电阻值越小, 所以油藏电性最能反映地层水矿物离子浓度的大小。

在实验之前首先测定不同浓度溶液的电阻率, 并以 2 万 PPM 浓度溶液的电阻率作为分母得到不同浓度溶液所对应的电阻率比值 I 。

1) 基金资助项目: 国家油气重大专项“特低渗透油藏有效补充能量开发技术”(2008ZX05013-02) 资助

2) Email: tengqi09@163.com

分别配置浓度为 2 万 PPM、3 万 PPM 到 10 万 PPM 的溶液，选用测量精度为 0.05% 的 LRC 测量仪分别测量其电阻率。实验结果如下：

表 1 溶液浓度、电阻率比值实验数据

溶液浓度 /万 PPM	电阻值 /欧姆	电阻率比值 I
2.0	92.200	1.000
3.0	63.500	0.689
4.0	49.400	0.536
5.0	38.400	0.416
6.0	35.400	0.384
7.0	31.250	0.339
8.0	27.100	0.294
9.0	25.700	0.279
10.0	24.400	0.265

以电阻率比值作为横坐标，溶液浓度作为纵坐标，在直角坐标系中作图如下：

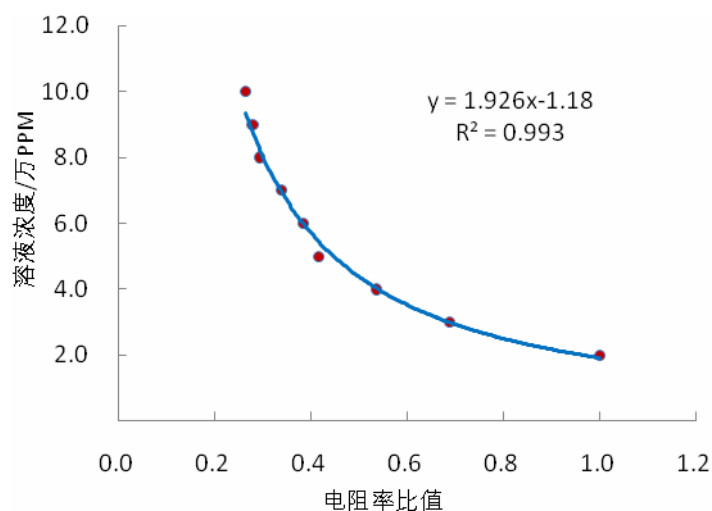


图 1 溶液浓度与电阻率比值关系

由图 1 可知溶液的离子浓度和电阻率比值存在很好的幂函数关系，相关系数达到了 0.99 以上。

当砂岩模型饱和了不同浓度的矿化水后，上述离子浓度与电阻率比值之间幂函数关系依然成立。然而对于天然砂岩受成岩环境的影响，不同类型的岩石在电性上存在差别。岩石电阻率的影响因素主要是岩石的孔隙结构、密度和岩石孔隙内流体类型。同一类型的岩石也因孔隙结构和压实程度的影响，而存在电阻率差异。

因此为了研究岩石孔隙结构对上述幂函数关系的影响，进行了如下实验。实验采用取自同一地区的天然露头岩心。从砂岩露头中选取两块砂岩平板进行实验。

选取两块砂岩露头平板 S1,S2，并从平板 S1, S2 上各钻取直径 2.5cm，长度 5cm 的标准小岩心样各 5 块。岩心烘干抽真空后分别饱和预先配置好的不同矿化度地层水，测量小岩心的电阻值，并求出不同矿化度下小岩心电阻率的比值。结果如下：

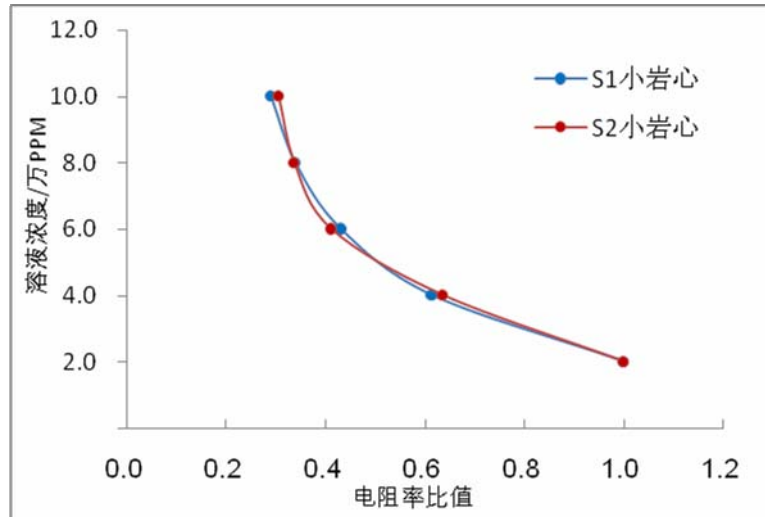


图2 不同平板模型中溶液浓度与电阻率比值关系

由图2可知，砂岩露头在饱和不同矿化度的地层水后，其电阻率的比值和矿化度之间依然存在较好的幂函数关系，相关系数也达到0.99以上。且来自同一地区的砂岩露头，由于孔隙结构的不同，对电阻率的影响很小。因此，以上实验表明，通过测量电阻率的方法计算平板模型中矿化水的离子浓度是可行的。

3 平板模型单相渗流场测量实验

3.1 实验装置

实验装置由模型、驱动系统、采出测量系统、饱和度测量系统四部分组成。（如图3）

模型：模型采用天然低渗透砂岩平板封装而成，几何尺寸为40cm×40cm×3cm，模型内布置了25个测量点用来进行流场测量。

驱动系统：采用氮气作为压力源，通过压力稳定装置精确控制驱替压力。

采出测量系统：通过微流量计精确测量流速，通过电子天平精确测量采出井产量。

饱和度测量系统：通过LCR测量仪精确测量测量点之间的电阻值。

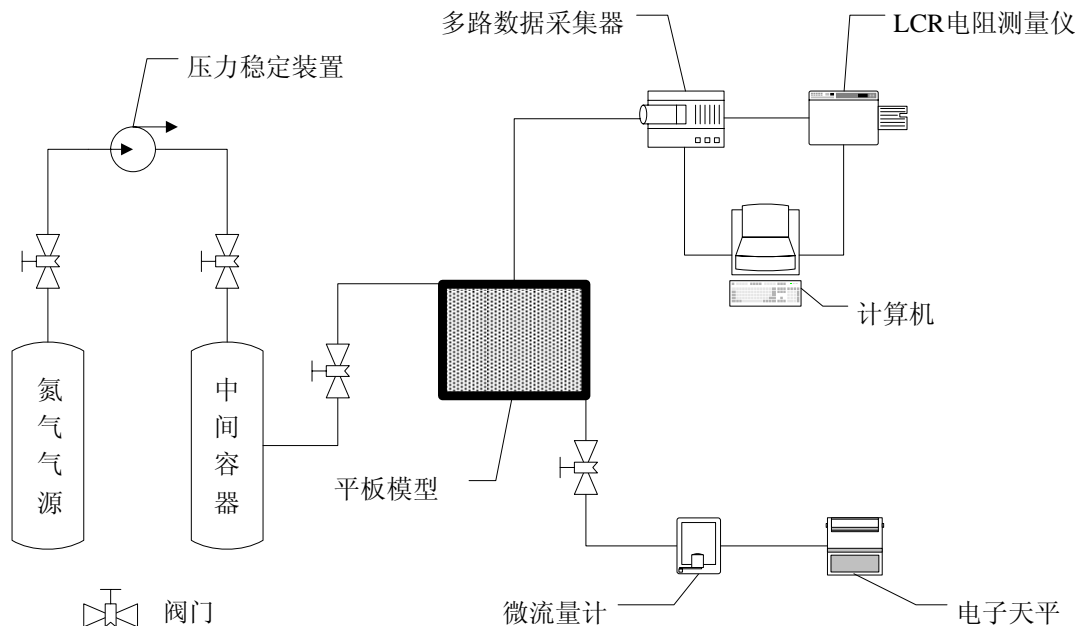


图3 实验装置图

3.2 平板模型制作

钻孔及布点：平板模型模拟五点法井网的 1/4 单元，沿对角线在模型两角钻取深孔模拟注采井，在注采井连线上及其两侧钻取表层浅孔布置测量点。

浇铸：烘干平板模型，将连接测量点的接头安装于钻孔内并用胶固定，用环氧树脂进行整体浇铸。

抽真空：待封胶固结后，将模型抽真空。抽真空过程中在模型上连接压力表，保证抽真空过程充分进行。

饱和地层水：应用外界大气压进行地层水初步饱和，最后用泵向模型中注入地层水，憋压 24 小时，然后将模型静止放置 48 小时，以使模型充分均匀地饱和地层水。

3.3 实验流程

首先将平板模型抽真空并饱和 2 万 PPM 地层水。在注入井定压注入 10 万 PPM 地层水。测量驱替过程中测量点间电阻值变化。根据电阻值反算地层水的混合程度（饱和度）。最后作出饱和度分布图。

3.4 地层水混合程度（饱和度）的计算

3.4.1 离子浓度的计算

通过实验拟合得到矿化水离子浓度 C （万 PPM）和电阻率比值之间满足如下关系式：

$$C = 1.926 \times I^{-1.18} \quad (1)$$

3.4.2 饱和度的计算

实验中模型初始饱和地层水矿化度为 2 万 PPM，实验采用的驱替流体矿化度为 10 万 PPM。随着驱替的进行，10 万 PPM 矿化水逐渐混合，替代 2 万 PPM 矿化水。不考虑扩散影响，若测得矿化水离子浓度为 C_t ，则岩心中驱替流体，即 10 万 PPM 矿化水的饱和度可表示为：

$$C_t = S_{10} \times 10 + S_2 \times 2 \quad (2)$$

式中， C_t 为测得矿化水离子浓度； S_{10} 为 10 万 PPM 矿化水饱和度（体积分数）， S_2 为 2 万 PPM 矿化水饱和度（体积分数）。

将

$$S_{10} + S_2 = 1 \quad (3)$$

代入（2）式，则 10 万 PPM 矿化水饱和度为：

$$S_{10} = \frac{C_t - 2}{8} \quad (4)$$

4 实验结果与分析

模型采用 0.1MPa 驱替压差进行驱替，在注入不同孔隙体积（PV）驱替流体时的流场图如下：

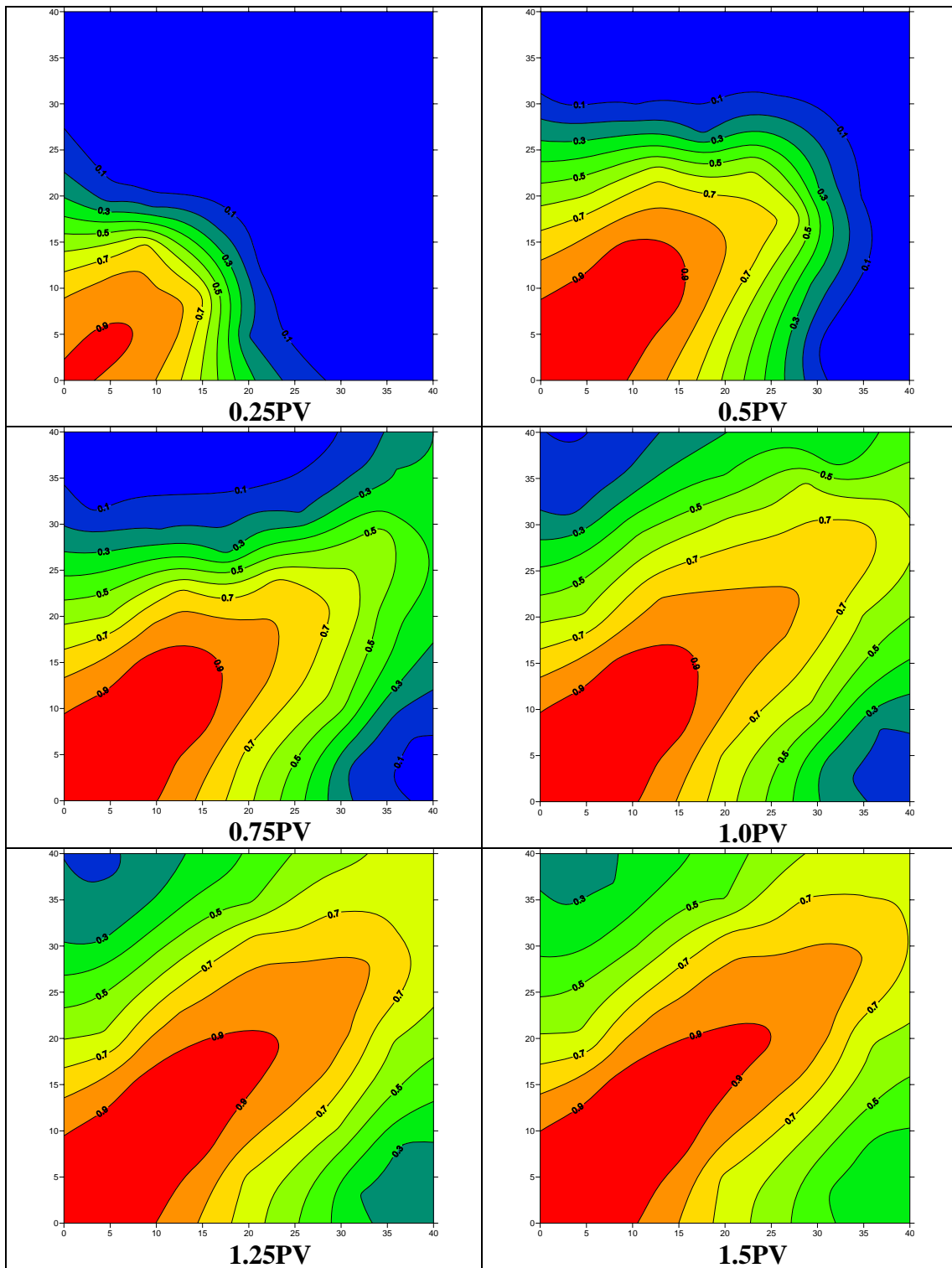


图4 驱替不同阶段渗流场

由图4可以看出：注采井连线是流体发生流动的主流线方向，流体沿主流线方向突进明显，尤其是在驱替后期，采出井先被波及，两侧角点最后才被波及。随着注入井注入流体的增加，发生流动的范围逐渐扩大，且波及范围逐渐趋于稳定。在远离主流线的两侧角点，在注入流体体积达到1个孔隙体积（PV）的时候仍然没有被波及到，表明角点流体流动缓慢，存在一个明显的波及滞后区域。随着流体继续注入，该区域逐渐被波及，然而最终的波及效果较差，是一个欠波及区域。

5 结论:

(1)实验采用天然露头砂岩模型,其孔隙结构与真实油藏一致,在其中进行驱替实验能够最大程度反映实际油藏中流体渗流的情况。

(2)对于特低渗透砂岩平板模型中单相流体渗流规律的研究,通过实验的方法验证了应用电阻率法测量流场的可行性。

(3)通过电阻率法测量了驱替实验中平板模型的二维流场,反映了流体的波及过程,为特低渗透油藏平面渗流规律的研究提供了一种有效的手段。

参考文献

- 1 王家禄,沈平平,李振泉,等. 交联聚合物封堵平面非均质油藏物理模拟. 石油学报 2002, 23(3): 60-64
- 2 王家禄,沈平平,陈永忠,等. 三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究. 石油学报 2005, 26(5): 61-66
- 3 刘春林,杨清彦,李斌会,兰玉波. 三元复合驱波及系数和驱油效率的实验研究. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 108-111.
- 4 兰玉波 杨清彦 李斌会. 聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究. 石油学报 2006. 27(1): 64-68
- 5 徐晖 秦积舜 王家禄,等. 聚合物驱宏观渗流机理的三维油藏物理模拟研究. 石油勘探与开发 2007, 34(3): 369-373
- 6 李宜强,隋新光,李斌会. 聚合物驱后提高采收率方法室内实验研究. 石油学报 2008, 29(3): 405-408
- 7 吕成远 王建 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究. 石油勘探与开发 2002, 29(2): 86-89
- 8 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征. 特种油气藏 1997, 4(1): 9-14.
- 9 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. 石油学报 2001, 22(4): 72-77
- 10 阮敏 何秋轩. 低渗透非达西渗流临界点及临界参数判别法. 西安石油学院学报(自然科学版) 1999, 14(3) : 9-10
- 11 李建路,曹铁,鹿守亮,李洋,高峰. 三元复合驱室内物理模拟实验研究——天然岩心与人工岩心的差异. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(4): 64-66+78.
- 12 何骏平 秦积舜 陈兴隆. 电阻率法在平板模型实验中的应用. 测井技术 2008, 32(3): 207-210

STUDY ON SEEPAGE FIELD MEASUREMENT TECHNOLOGY IN PHYSICAL SIMULATION OF ULTRA-LOW PERMEABILITY RESERVOIR

Teng Qi

(Research Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China)

Abstract With the permeability of reservoirs becoming lower, the nonlinear degree of porous flow is becoming stronger, the rule of porous flow need to be researcher through experimental method. Through the core experiments we get the function relation between ratio of resistivity and the concentration of solution. Through the single-phase fluid displacement experiment in ultra-low permeability natural sandstone plate model ,by recording of the resistivity change between points to calculate the spreading condition in the model. The application of resistivity method is verified the feasibility of measuring seepage flow field.

Key words ultra-low permeability reservoir; natural sandstone plate model; single-phase displacement experiment; resistivity method; seepage flow filed measurement