磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟

姚军^{1*}, 黄涛¹, 黄朝琴^{2*}, 谢昊君¹, 刘均荣¹, 张建光¹

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580;

2. Department of Petroleum Engineering, Colorado School of Mines, Golden CO 80401, USA

* 联系人, E-mail: yaojun@upc.edu.cn; emc.group.upc@gmail.com

2016-10-31 收稿, 2016-12-18 修回, 2016-12-19 接受, 2017-02-17 网络版发表

国家自然科学基金(51234007, 51490654, 51404292, 41502131)、山东省自然科学基金(ZR2014EEQ010)和中央高校基本科研业务费专项(16CX06026A, 15CX05037A, 14CX05027A)资助

摘要 铁磁流体作为一种新型功能材料, 由于同时具备磁性及流体性质被广泛应用于各个技术领域. 本文从数值模拟理论上研究了利用磁场控制的铁磁流体驱油问题: 针对外磁场作用下的铁磁流体多孔介质流动物理过程, 将磁力项引入铁磁流体相运动方程从而耦合磁场-渗流场给出其流动方程, 并采用全隐式有限体积法形成相应数值离散格式; 通过二维均质填砂平板流动实验验证了模型和算法的正确性, 在此基础上, 对比了平面及纵向非均质多孔介质中注水及注铁磁流体的驱油效果, 计算结果表明通过控制铁磁流体的驱替路径可以提高驱替波及范围继而提高采收率, 为提高原油采收率提供了新的思路和方法.

关键词 铁磁流体, 多孔介质, 磁场-渗流耦合, 注铁磁流体驱油, 实验及数值模拟

注水开发是保持地层压力、提高原油采收率的最有效且应用最广的方法, 但由于长期注水冲刷形成的注采井之间的“优势通道”以及油藏复杂地质因素使得注入水并未能按照预期的驱替路径流动, 导致波及范围小、驱替效率低、原油动用程度低, 也是注水开发后期油井高含水的一个重要影响因素^[1~3]. 如何发展新型驱油技术, 进一步提高采收率已成为亟待解决的难题.

铁磁流体是由直径为纳米量级且具有磁响应能力的铁磁性固体颗粒和作为载体的非磁性液体以及分散剂三者混合而成的一种稳定的胶状液体^[4]. 作为一种新型功能材料, 铁磁流体首先表现出一般流体的特征, 它的运动遵循流体动力学规律; 其次它又是磁性物质, 在磁场中受到磁场力作用, 因而它的行为可以受到磁场的控制. 正因如此, 在实际中有着广泛

的应用, 比如磁流体密封、润滑、选矿、医疗器械、声光调节等^[5~7].

最近, 铁磁流体在石油工业上的应用研究受到广泛关注, 主要包括基于磁异常反演的储层裂缝识别、油水前缘监测^[8~11]. 本文针对磁场作用下的铁磁流体多孔介质流动物理过程, 给出了流动数学方程并建立了全隐式有限体积法数值离散格式, 最后采用Newton-Raphson迭代方法求解, 通过二维平面填砂板流动实验对模型及算法的正确性进行了验证. 在此基础上, 研究了利用磁场控制的铁磁流体驱油问题, 并与传统注水驱油效果进行了对比.

1 铁磁流体的磁场力

铁磁流体所表现出来的宏观磁化性能来源于其

引用格式: 姚军, 黄涛, 黄朝琴, 等. 磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟. 科学通报, 2017, 62: 836–846

Yao J, Huang T, Huang Z Q, et al. Numerical simulation of ferrofluid flow in porous media under coupled magnetic and seepage fields (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 836–846, doi: 10.1360/N972015-01460

内部的磁性固相颗粒,当不存在外磁场时,由于热运动的影响,磁性颗粒的磁矩(即微小的磁场)取向杂乱无章因而相互抵消;当存在外磁场时,磁矩按照外磁场方向整齐排列,从而铁磁流体在宏观上表现出磁性,如图1所示.

随着外磁场的增大,铁磁流体的磁化强度增大并达到最大值,即饱和磁化强度.本文中实验及数值模拟采用的水基铁磁流体Hinano-FFW,饱和磁化强度 $M_{\max}=1.596\times 10^4$ A/m,其磁化曲线如图2所示,并

通过一个反三角函数拟合,即

$$M=\alpha\times\arctan(\beta\times H), \quad (1)$$

其中, $\alpha=1\times 10^4$, $\beta=3.5\times 10^{-5}$,此外对于任意磁场强度,铁磁流体的磁化强度 M 与其饱和度 S_{ff} 成线性关系:

$$M(S_{\text{ff}})=M(S_{\text{ff}}=1)S_{\text{ff}}. \quad (2)$$

在本文中,外磁场由方形钕铁硼磁铁提供,磁铁具体参数见表1,其三维磁场强度 $\mathbf{H}=(H_x, H_y, H_z)$ 由McCaig^[12]推导的公式求得

$$H_d=G_d(x,y,z)-G_d(x+L,y,z), \quad d=x,y,z, \quad (3)$$

图1 (网络版彩色)铁磁流体组成及磁化过程示意图

Figure 1 (Color online) The components and magnetization of ferrofluid

其中,

$$G_x(x,y,z)=\frac{B_r}{4\pi\mu_0}\left\{\arctan\left[\frac{(y+a)(z+b)}{x[(y+a)^2+(z+b)^2+x^2]^{1/2}}\right]+\arctan\left[\frac{(y-a)(z-b)}{x[(y-a)^2+(z-b)^2+x^2]^{1/2}}\right]-\arctan\left[\frac{(y+a)(z-b)}{x[(y+a)^2+(z-b)^2+x^2]^{1/2}}\right]-\arctan\left[\frac{(y-a)(z+b)}{x[(y-a)^2+(z+b)^2+x^2]^{1/2}}\right]\right\}, \quad (4)$$

$$G_y(x,y,z)=\frac{B_r}{4\pi\mu_0}\ln\left\{\frac{(z+b)+[(z+b)^2+(y-a)^2+x^2]^{1/2}}{(z-b)+[(z-b)^2+(y-a)^2+x^2]^{1/2}}\times\frac{(z-b)+[(z-b)^2+(y+a)^2+x^2]^{1/2}}{(z+b)+[(z+b)^2+(y+a)^2+x^2]^{1/2}}\right\}, \quad (5)$$

$$G_z(x,y,z)=\frac{B_r}{4\pi\mu_0}\ln\left\{\frac{(y+a)+[(z-b)^2+(y+a)^2+x^2]^{1/2}}{(y-a)+[(z-b)^2+(y-a)^2+x^2]^{1/2}}\times\frac{(y-a)+[(z+b)^2+(y-a)^2+x^2]^{1/2}}{(y+a)+[(z+b)^2+(y+a)^2+x^2]^{1/2}}\right\}. \quad (6)$$

其中, B_r 为磁铁剩余磁化强度, $2a$, $2b$, L 分别对应3个方向长度, 如图3所示.

在外加磁场作用下, 铁磁流体内部磁性颗粒磁

图2 铁磁流体磁化强度随磁场强度变化曲线

Figure 2 Magnetization versus magnetic field strength for Hinano-FFW

表1 实验及数值模拟所用磁铁的性质

Table 1 The property of permanent magnet used for experiment and numerical simulation

磁铁型号	参数符号	参数值
PM1	剩余磁化强度 B_r	1.19 T
	长度 L	0.127 m
	宽度 $2a$	0.0508 m
	高度 $2b$	0.0508 m
PM2	剩余磁化强度 B_r	1.19 T
	长度 L	0.0254 m
	宽度 $2a$	0.0191 m
	高度 $2b$	0.0191 m

图3 方形磁铁磁场坐标方向

Figure 3 Local coordinate system for the magnetic field produced by a permanent magnet

化后形成的次级磁场与外磁场相互作用, 表现为铁磁流体受到磁场力的作用, 磁场力的大小为^[13]

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H}, \quad (7)$$

其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A 为真空磁导率, $\mathbf{M}$ 为磁化强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度. 在铁磁流体中, 通常总能实现矢量 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{H}$ 相平行, 于是 $\mathbf{F}_m$ 可以写成

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 \frac{\mathbf{M}}{H} \mathbf{H} \cdot \nabla \mathbf{H} = \mu_0 \frac{\mathbf{M}}{H} \left[\frac{1}{2} \nabla (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) - \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{H}) \right], \quad (8)$$

因为在铁磁流体中不存在传导电流, 因此 $\nabla \times \mathbf{H} = 0$, 即

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 M \nabla H. \quad (9)$$

2 磁场-渗流场耦合流动模拟

2.1 两相流动数学方程

考虑不可压缩油-铁磁流体两相渗流问题, 数学方程如下.

(1) 质量守恒方程

由质量守恒定律可知在控制体积 V 中的某一相流体应满足

$$\int_{\partial V} -(\rho_\beta \mathbf{v}_\beta) \cdot \mathbf{n} dA + \int_V q_{m\beta} dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho_\beta \phi S_\beta) dV, \quad (10)$$

其中, ρ_β 为 β -相流体密度; $\mathbf{v}_\beta$ 为 β -相流体的渗流速度; $\mathbf{n}$ 为面 ∂V 的单位外法向量; $q_{m\beta}$ 为源汇项; ϕ 为多孔介质孔隙度; S_β 为 β -相流体饱和度.

(2) 运动方程

由Darcy定律可知, 流体的渗流速度 $\mathbf{v}_\beta$ 满足

$$\mathbf{v}_\beta = -\frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \mathbf{k} \cdot (\nabla p_\beta - \rho_\beta g \nabla D), \quad (11)$$

式中, $\mathbf{k}$ 为多孔介质的渗透率张量; $k_{r\beta}$ 为 β -相流体的相对渗透率; μ_β 为 β -相流体黏度; p_β 为 β -相流体压力; D 为深度; g 为重力加速度常数. 特别地, 对于铁磁流体, 外磁场对其整体的作用, 将表现为彻体力的形式, 因此在均匀相铁磁流体的运动方程中将出现额外的磁力项, 如(9)式所示, 铁磁流体运动方程为

$$\mathbf{v}_{ff} = -\frac{k_{rff}}{\mu_{ff}} \mathbf{k} \cdot (\nabla p_{ff} - \rho_{ff} g \nabla D - \mu_0 M \nabla H), \quad (12)$$

从式(2)和(12)可以看到, 铁磁流体的分布影响磁场力的大小, 而外磁场通过磁场力的作用影响铁磁流体的流动, 因此, 磁场作用下的铁磁流体多孔介质流动过程本质上是一个磁场-渗流场耦合作用的过程.

2.2 有限体积离散格式

用单元中心点值来表征整个单元物理量的平均值, 因此式(10)可进一步写成

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\beta \phi S_\beta V_i) = - \sum_{j \in \eta_i} \mathbf{n}_{ij} \cdot (\rho_\beta \mathbf{v}_\beta) A_{ij} + q_{m\beta} V_i, \quad (13)$$

式中, η_i 为控制体积单元 i 的相邻单元 j 的集合, $\mathbf{n}_{ij}$ 为单元 i 与相邻单元 j 间的界面单位外法线向量, A_{ij} 为界面面积. 将运动方程代入式(13)可得

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\beta \phi S_\beta V_i) = \sum_{j \in \eta_i} \mathbf{n}_{ij} \cdot \left(\rho_\beta \frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \mathbf{k} \cdot \nabla \Phi_\beta \right) A_{ij} + q_{m\beta} V_i, \quad (14)$$

式中, $\Phi_\beta = p_\beta - \rho_\beta g D$ 为 β -相流体的流动势, 特别地, 对于铁磁流体来说, 由其运动方程(12)知其流动势 $\Phi_{ff} = p_{ff} - \rho_{ff} g D - \mu_0 M H$.

对式(14)中时间项采用向后一阶差分, 空间上采用中心差分格式, 可得

$$\frac{1}{\Delta t} \left[(\rho_\beta S_\beta \phi V)_i^{n+1} - (\rho_\beta S_\beta \phi V)_i^n \right] = \sum_{j \in \eta_i} (\rho_\beta \lambda_\beta)_{ij+1/2}^{n+1} \gamma_{ij} (\Phi_{\beta j}^{n+1} - \Phi_{\beta i}^{n+1}) + Q_{\beta i}^{n+1}, \quad (15)$$

式中,

$$(\rho_\beta)_{ij+1/2}^{n+1} = \frac{[(\rho_\beta)_i^{n+1} + (\rho_\beta)_j^{n+1}]}{2}$$

为单元界面密度平均; $\gamma_{ij} = A_{ij} k_{ij+1/2} / (d_i + d_j)$ 为传导率, d_i 和 d_j 分别为单元 i 和单元 j 中心到界面的垂直距离, $k_{ij+1/2}$ 为相邻单元 i 和 j 沿连接方向绝对渗透率的调和平均值; 源汇项 $Q_{\beta i}^{n+1} = (q_{m\beta})_i^{n+1} = \rho_\beta q_{\beta i}^{n+1} V_i$, q_β 定义为单位时间单位体积内流入控制体 V 中的流体体积; $\lambda_\beta = k_{r\beta} / \mu_\beta$ 为流度系数, 采用上游迎风加权

$$(\rho_\beta \lambda_\beta)_{ij+1/2}^{n+1} = \begin{cases} (\rho_\beta \lambda_\beta)_i^{n+1}, & \text{if } (\Phi_{\beta j}^{n+1} - \Phi_{\beta i}^{n+1}) \leq 0, \\ (\rho_\beta \lambda_\beta)_j^{n+1}, & \text{if } (\Phi_{\beta j}^{n+1} - \Phi_{\beta i}^{n+1}) > 0. \end{cases} \quad (16)$$

2.3 数值离散方程求解

采用Newton-Raphson迭代方法对本文中的数值离散方程进行求解. 将数值离散方程(15)写成如下残差形式:

$$R_{\beta i}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \left[(\rho_\beta S_\beta \phi V)_i^{n+1} - (\rho_\beta S_\beta \phi V)_i^n \right] - \sum_{j \in \eta_i} (\rho_\beta \lambda_\beta)_{ij+1/2}^{n+1} \gamma_{ij} (\Phi_{\beta j}^{n+1} - \Phi_{\beta i}^{n+1}) - \rho_\beta q_{\beta i}^{n+1} V_i. \quad (17)$$

利用泰勒级数法对上式展开可得

$$\sum_l \frac{\partial R_{\beta i}^{n+1}(\mathbf{x}^p)}{\partial x_l^p} (\delta x_l^{p+1}) = -R_{\beta i}^{n+1}(\mathbf{x}^p), \quad (18)$$

其中, x_l^p 表示在第 p 个迭代步的第 l 个主变量; $\delta x_l^{p+1} = x_l^{p+1} - x_l^p$ 为主变量在第 $p+1$ 个迭代步中的增量. 显然上式中右端项及左端导数矩阵通过上一迭代步求解结果可直接求取, 因此可求得下一步迭代值 x_l^{p+1} 并使得残差 $R(x_l^{p+1})$ 进一步趋于零. 重复上述迭代过程, 直至残差小于误差允许值 ε , 即 $|R(x_l^{p+1})| < \varepsilon$, 本文中取 $\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$. 求解过程如图4所示.

3 模型与算法验证

本节中给出了一个简单算例, 通过与实验结果的对比较验证方法和程序的正确性. 考虑如图5(a)所示的平板模型, 模型尺寸 $12 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$, 可视为平面流动. 模型采用玻璃砂 S1 (颗粒目数 60, 直径 0.27 mm) 结合环氧树脂胶结压实而成, 然后由有机玻璃封装, 可视为均质各向同性, 经测量其孔隙度 $\phi = 0.38$, 渗透率 $k = 13.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2$.

实验模型水平放置并初始时刻饱和油, 然后在左端注入一小部分体积的铁磁流体 Hinano-FFW (1.0 mL), 其饱和磁化强度 $M_{\max} = 1.596 \times 10^4 \text{ A/m}$, 磁化曲线如图2所示. 在右端放置磁铁 PM1, 图5(b)所示为磁场强度分布. 通过实验室测量得到油的黏度 $\mu_o = 22.1 \text{ mPa s}$, 铁磁流体的黏度 $\mu_{ff} = 5.8 \text{ mPa s}$, 油的

图4 铁磁流体流动计算流程示意图

Figure 4 Schematic of ferrofluid flow calculation

图5 (网络版彩色)物理模型示意图及磁场强度分布。(a) 填砂平板流动实验模型; (b) 磁场强度 $\log_{10}(H)$ 分布

Figure 5 (Color online) The schematic of physical model and distribution of magnetic field strength. (a) Sand-filling plate model for flow experimental; (b) distribution of magnetic field strength $\log_{10}(H)$

密度 $\rho_o=850 \text{ kg/m}^3$, 铁磁流体的密度 $\rho_{ff}=1187 \text{ kg/m}^3$. 假设模型中残余油饱和度及束缚铁磁流体饱和度均为0, 铁磁流体相相对渗透率 $k_{rff}=S_{ff}^2$, 油相相对渗透率 $k_{ro}=(1-S_{ff})^2$.

应用本文方法对上述物理实验过程进行数值模拟, 计算中流体忽略毛细力和重力的影响. 如图6所示, 在磁场力的作用下, 铁磁流体逐渐向右端磁铁位置流动, 对比0, 20, 50 min时刻实验及数值模拟的铁磁流体分布, 可以看到两者流动过程基本一致.

利用二值化图像方法对图6(a)中50 min时刻的实

验结果进行处理, 得到铁磁流体的像素分布, 通过对某点附近区域内像素统计可以近似得到该点饱和度, 其中选取的区域大小与数值模拟网格大小相等($0.25 \text{ cm} \times 0.25 \text{ cm}$). 图7(b)所示为实验及数值模拟得到沿平板模型中轴线饱和度分布对比, 两者吻合较好.

通过以上实验结果及数值计算结果的对比, 验证了本文数学模型和算法的正确性. 值得注意的是, 由于物理模型制作过程中并不能保证玻璃砂填充的完全均匀, 因此实验中铁磁流体的流动形态、饱和度分布与计算结果存在小的误差, 但基本一致.

图6 (网络版彩色)平板模型流动实验及数值模拟铁磁流体不同时刻饱和度分布对比。(a)~(a'')分别为0, 20, 50 min时刻物理实验结果; (b)~(b'')分别为0, 20, 50 min时刻数值计算结果

Figure 6 (Color online) The ferrofluid saturation distribution of flow experiment and numerical simulation at different time. (a)~(a'') respectively show the experimental results at 0, 20, 50 min; (b)~(b'') respectively show the calculational results at 0, 20, 50 min

图7 (网络版彩色)50 min时刻铁磁流体分布及沿平板模型中轴线饱和度对比。(a) 铁磁流体二值化分布;(b) 实验及数值模拟铁磁流体饱和度对比

Figure 7 (Color online) The ferrofluid distribution and the saturation comparison between experimental and calculational result along the plate model's central axis at 50 min. (a) Ferrofluid distribution based on image binarization; (b) ferrofluid saturation along the plate model's central axis of experiment and numerical simulation

4 非均质模型驱油数值模拟

如图6所示, 由于外磁场存在, 铁磁流体受到磁场力的作用, 并向磁场强度高的地方流动, 即铁磁流体的流动行为可以由施加的外磁场控制, 因此利用铁磁流体驱油具有控制驱替路径从而提高驱替波及范围的优势. 本节分别考虑平面及纵向非均质油藏模型, 对比注水及注铁磁流体驱油效果.

4.1 平面非均质模型

考虑如图8(a)所示的一注一采平面非均质模型, 模型尺寸为5 cm×5 cm($x \times y$), 注入采出速度均为

$q = 0.01 V_P / \text{min}$, V_P 为总孔隙体积; 模型中间为粗砂S1 (颗粒目数60, 直径0.27 mm)填充, 两边为细砂S2 (颗粒目数80, 直径0.177 mm)填充, 其孔隙度分别为 $\phi_1 = 0.38$, $\phi_2 = 0.27$, 渗透率为 $k_1 = 13.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $k_2 = 1.38 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. 在模型左上角及右下角各放置磁铁PM2, 磁场强度如图7(b)所示.

模型初始时刻饱和油, 残余油饱和度及束缚水或束缚铁磁流体饱和度均为零. 对该平面非均质模型分别采用水及铁磁流体进行驱替并对比驱油效果, 其中油的黏度 $\mu_o = 22.1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 铁磁流体的黏度 $\mu_{ff} = 5.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 水的黏度 $\mu_w = 1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 油的密度 $\rho_o = 850 \text{ kg/m}^3$, 铁

图8 (网络版彩色)物理模型示意图及磁场强度分布。(a) 平面非均质注采模型;(b) 磁场强度 $\log_{10}(H)$ 分布

Figure 8 (Color online) The schematic of physical model and distribution of magnetic field strength. (a) Horizontal heterogeneous injection-production model; (b) distribution of magnetic field strength $\log_{10}(H)$

磁流体的密度 $\rho_{\text{ff}}=1187 \text{ kg/m}^3$, 水的密度 $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$. 驱替相(水或铁磁流体)相对渗透率 $k_{r\alpha}=S_{\alpha}^2$ ($\alpha=w$ or ff), 油相相对渗透率 $k_{ro}=(1-S_{\alpha})^2$.

对于水驱过程, 由于油水黏度差别较大, 并且模型中间存在高渗带, 注入水基本沿中间高渗带流动, 从而导致其波及范围小、动用程度低, 因而出口端见水时间早. 对于注铁磁流体驱油过程, 在驱替前期注入的铁磁流体主要沿中间高渗带流动, 随着铁磁流体流动到磁源附近, 磁场力逐渐增大, 铁磁流体在磁场力的作用下驱向模型两边相对低渗区域, 对比于水驱驱替波及范围明显增大, 因此动用程度高、出口端见水时间较晚, 如图9所示.

定义出口端含水/含铁磁流体率

$$f_{\alpha} = \frac{q_{\alpha}}{q_{\alpha} + q_o}, \quad (19)$$

其中, $\alpha=w$ or ff 为驱替相(水或铁磁流体), o 为被驱替相油; q_{α} , q_o 分别为出口端所采出的驱替相及被驱替相的体积量. 如图10所示, 对比注水驱油及注磁流体驱油开发效果可以看到: 首先, 水驱过程无水产油

时间较短, 仅占整个驱油过程10%, 而注铁磁流体驱油可延长至22%; 其次, 在注入1.5倍孔隙体积驱替液后前者含水率高达95%, 而后者仅83%, 因此对于后者来说还具有较好的开发潜力; 再次, 由于注入的铁磁流体在磁场力作用下流向模型两边相对低渗透区域, 提高了驱替波及范围、动用程度, 采出程度达到74%, 而水驱过程中由于注入水基本沿中间高渗带流向出口端, 因此驱替波及范围小, 采出程度仅39%.

4.2 纵向非均质模型

考虑如图11(a)所示的纵向非均质油藏模型, 模型尺寸同样为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ($x \times z$), 重力方向垂直向下. 其中注入采出井位于模型两端并贯穿整个模型, 注入采出速度均为 $q=0.01 V_p/\text{min}$; 模型上半部分为粗玻璃砂S1, 下半部分为细玻璃砂S2. 在模型底部放置2个磁铁PM2, 磁场强度如图11(b)所示. 对该纵向非均质模型分别采用水及铁磁流体进行驱替, 对比驱油效果.

图9 (网络版彩色)水平非均质模型注水及注铁磁流体驱油不同注入体积时饱和度分布. (a)~(a'')分别为水注入量为0.25倍、0.75倍、1.5倍孔隙体积时水饱和度分布; (b)~(b'')分别为铁磁流体注入量为0.25倍、0.75倍、1.5倍孔隙体积时铁磁流体饱和度分布

Figure 9 (Color online) The saturation distribution at different injection volume during water-flooding and ferrofluid-flooding process on the horizontal heterogeneous injection-production model. (a)~(a'') respectively show the water saturation distribution at $0.25V_p$, $0.75V_p$, $1.5V_p$ injection volume during the water flooding process; (b)~(b'') respectively show the ferrofluid saturation distribution at $0.25V_p$, $0.75V_p$, $1.5V_p$ injection volume during the ferrofluid flooding process

图 10 (网络版彩色)注水及注铁磁流体驱油过程中生产指示曲线. (a) 含水/铁磁流体曲线; (b) 采收率曲线

Figure 10 (Color online) The production index curves of water-flooding and ferrofluid-flooding. (a) Water cut and ferrofluid cut curves; (b) recovery curves of water-flooding and ferrofluid-flooding

图 11 (网络版彩色)物理模型示意图及磁场强度分布. (a) 纵向非均质注采模型; (b) 磁场强度 $\log_{10}(H)$ 分布

Figure 11 (Color online) The schematic of physical model and distribution of magnetic field strength. (a) Vertical heterogeneous injection-production model; (b) distribution of magnetic field strength $\log_{10}(H)$

同样, 对于水驱过程, 由于油水黏度差及高渗带的影响, 注入水沿上半部分流动速度快、生产井上半段首先见水; 此外, 由于重力的作用, 模型下半部分注入水主要沿底部流动, 从而导致模型中部存在大量剩余油, 如图12(a)所示. 对于注铁磁流体驱油过程, 由于模型底部磁铁的存在, 注入的铁磁流体在磁场力作用下向模型下半部分较难驱替的低渗带流动, 相对于水驱驱替波及范围明显增大, 因此动用程度高, 如图12(b)所示.

对比注水驱油及注磁流体驱油开发效果可以看到: 首先, 水驱过程无水产油时间较短, 仅占整个驱油过程12%, 注铁磁流体驱油为19%; 其次, 由于注入的铁磁流体在磁场力作用下流向模型下半部分低

渗透区域, 提高了驱替波及范围、动用程度, 采出程度达到76%, 而水驱过程中由于模型中部存在部分原油未被动用、水驱驱替波及范围小, 采出程度仅55%, 如图13所示.

从数值算例的计算结果可以看到: 由于多孔介质非均质性的影响, 水驱过程中存在较难波及的区域, 从而导致波及范围小、原油的动用程度低; 而对于铁磁流体驱, 存在的外加磁场使得铁磁流体受到磁场力的作用, 通过布置外加磁场可以改变磁场力的大小及方向, 进而改变驱替方向, 从而控制铁磁流体朝低波及区域驱替, 此外, 由于受到的磁场力作为一种额外驱替力, 更有利于铁磁流体进入低波及区域从而置换原油. 因此, 相对于传统水驱, 外磁场控

图 12 (网络版彩色)纵向非均质模型注水及注铁磁流体驱油不同注入体积时饱和度分布. (a)~(a'')分别为水注入量为 0.25 倍, 0.75 倍, 1.5 倍孔隙体积时水饱和度分布; (b)~(b'')分别为铁磁流体注入量为 0.25 倍, 0.75 倍, 1.5 倍孔隙体积时铁磁流体饱和度分布

Figure 12 (Color online) The saturation distribution at different injection volume during water-flooding and ferrofluid-flooding process on the vertical heterogeneous injection-production model. (a)~(a'') respectively show the water saturation distribution at $0.25V_p$, $0.75V_p$, $1.5V_p$ injection volume during the water flooding process; (b)~(b'') respectively show the ferrofluid saturation distribution at $0.25V_p$, $0.75V_p$, $1.5V_p$ injection volume during the ferrofluid flooding process

图 13 (网络版彩色)注水及注铁磁流体驱油过程中生产指示曲线. (a) 含水/铁磁流体曲线; (b) 采收率曲线

Figure 13 (Color online) The production index curves of water-flooding and ferrofluid-flooding. (a) Water cut and ferrofluid cut curves; (b) recovery curves of water-flooding and ferrofluid-flooding

制下的铁磁流体驱油技术能够提高驱替波及范围, 从而提高原油采收率。

本文研究了实验室尺度下的铁磁流体驱油问题, 其磁场通过布置于模型附近的磁铁提供, 针对现场注铁磁流体驱油问题, 吴永彬等人^[14]提出了一套铁磁流体驱替开采油藏的思想和方法: 外加磁场由放

置于井下的电磁发生器提供, 通过调节磁场大小改变油层中铁磁流体的驱油方向和速度, 有效动用注采井间原油、提高注入介质波及效率。此外, 本文针对的是宏观尺度下的铁磁流体驱油问题, 其本质上还是物理法驱油提高采收率, 是否在微观孔隙尺度上有更大的影响, 以及界面张力等效应还需要从孔

隙尺度上更细致的研究,也是下一步的研究方向。

5 结论

通过实验和理论计算表明:铁磁流体驱油是一种具有较大潜力的提高采收率的方法。

(1) 外磁场作用下的注铁磁流体驱油过程本质上是一个考虑磁场-渗流场耦合的多孔介质两相流动问题,本文首先给出了相应流动数学模型,并推导了全隐式有限体积数值计算格式,通过二维填砂平板流动实验验证了模型和算法的正确性。

(2) 通过数值模拟研究了平面及纵向非均质多孔介质中注铁磁流体驱油问题,并对比了注水驱油开发效果,可以看到在相同注入体积情况下注铁磁流体驱油相对于注水驱油较大幅度提高了采收率,显示出较大的提高采收率潜力。

(3) 从计算结果可以看出,外磁场对铁磁流体的作用表现为磁彻体力形式并牵引其向磁场强度高的区域流动。因此,当存在高导流通道,例如高渗带时,通过布置外磁场可以使得磁场力起到“分流”作用,从而提高驱替波及范围继而提高采出程度。

参考文献

- 1 Han D K. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 28: 73–78 [韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究. 石油学报, 2007, 28: 73–78]
- 2 Li Y. Study on enhancing oil recovery of continental reservoir by water drive technology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2009, 30: 396–399 [李阳. 陆相高含水油藏提高水驱采收率实践. 石油学报, 2009, 30: 396–399]
- 3 Yu Q T. Oil field development three major rich areas of “large scale” unswept remaining oil in water flooded bedded sandstone reservoirs (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2000, 21: 45–50 [俞启泰. 注水油藏大尺度未波及剩余油的三大富集区. 石油学报, 2000, 21: 45–50]
- 4 Rosensweig R E. Magnetic fluids. *Sci Am*, 1982, 247: 136–145
- 5 Raj K, Moskowitz R. Commercial applications of ferrofluids. *J Magn Magn Mater*, 1990, 85: 233–245
- 6 Scherer C, Figueiredo Neto A M. Ferrofluids: Properties and applications. *Braz J Phys*, 2005, 35: 718–727
- 7 Liu H D, Xu W, Wang S G, et al. Hydrodynamic modeling of ferrofluid flow in magnetic targeting drug delivery. *Appl Math Mech*, 2008, 29: 1341–1349
- 8 Sengupta S. An innovative approach to image fracture dimensions by injecting ferrofluids. In: *Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition*. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2012
- 9 Ko S, Prigiobbe V, Huh C. Accelerated oil droplet separation from produced water using magnetic nanoparticles. In: *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2014
- 10 Rahmani A R, Bryant S L, Huh C, et al. Crosswell magnetic sensing of superparamagnetic nanoparticles for subsurface applications. *SPE J*, 2015, 20: 1067–1082
- 11 Rahmani A R, Bryant S L, Huh C. Characterizing reservoir heterogeneities using magnetic nanoparticles. In: *Proceedings of the SPE Reservoir Simulation Symposium*. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2015
- 12 MacCaig M, Clegg A G. *Permanent Magnets in Theory and Practice*. London: Pentech Press, 1987
- 13 Neuringer J L, Rosensweig R E. Ferrohydrodynamics. *Phys Fluids*, 1964, 7: 1927–1937
- 14 Wu Y B, Wang H Z. The method and well patterns for flooding oil reservoir using nano magnetic fluid (in Chinese). *PRC Patent*, CN201310217165.X, 2013-10-2 [吴永彬, 王红庄. 纳米磁流体驱替开采油藏的方法及其井网结构. 中国专利, CN201310217165, 2013-10-2]

Summary for “磁场-渗流场耦合作用下的铁磁流体多孔介质流动数值模拟”

Numerical simulation of ferrofluid flow in porous media under coupled magnetic and seepage fields

YAO Jun^{1*}, HUANG Tao¹, HUANG ZhaoQin^{2*}, XIE HaoJun¹, LIU JunRong¹ & ZHANG JianGuang¹

¹ School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

² Department of Petroleum Engineering, Colorado School of Mines, Golden CO 80401, USA

* Corresponding authors, E-mail: yaojun@upc.edu.cn; emc.group.upc@gmail.com

Water flooding is an efficient approach to maintain reservoir pressure and has been used widely to enhance oil recovery. However, preferential water pathways generated after long-term water flooding process and the strongly heterogeneous reservoirs can significantly decrease the sweep efficiency. Therefore, the utilization ratio of injected water is seriously affected. Most water-flooded reservoirs are in their late development stage, and their water cuts are more than 90%. How to develop new flooding technology to further improve the oil recovery is a pressing problem.

Ferrofluids are colloidal suspensions of magnetic particles of diameter approximately 10 nm stabilized in various carrier liquids. In the presence of an external magnetic field, a ferrofluid becomes magnetized as the particles align with the magnetic field. In the presence of a gradient in the magnetic field strength, a magnetic body force is produced on the ferrofluid so that the attractive magnetic forces allow the ferrofluid to be manipulated to flow in any desired direction through control of the external magnetic field without any direct physical contact. In consideration of this properties, the potential of using the ferrofluid as a new kind of displacing fluid for flooding in oil reservoir is been studied in this paper at the first time. Considering the physical process that the mobilization of ferrofluid through porous media by application of strong external magnetic fields, we introduced the magnetic force into the Darcy equation to coupling the magnetic field and seepage flow field. The steps involved in calculating ferrofluid flow in porous media are (1) calculation of the external magnetic field strength produced by permanent magnet, (2) calculation of the magnetization using the magnetization curve of ferrofluid and initial ferrofluid saturation, (3) calculation of the magnetic force on the fluid, (4) addition of the magnetic force to the pressure gradient and gravitational body force terms, and (5) calculation of the liquid phase pressure and saturation, (6) update the magnetization based on the calculated ferrofluid saturation for the next step calculation. Using the fully implicit finite volume method to solve the mathematical model, and the validity and accuracy of the mathematical model and numerical algorithm are demonstrated through a experiment which ferrofluid flowing from left to right with an initial circular injection through oil-saturated sand in a 2-D horizontal cell.

At last, based on the above the numerical simulation method, the water-flooding and ferrofluid-flooding in horizontal and vertical heterogeneous porous media have been studied: because there is a relatively higher permeability zone between injection well and production well, most of the injected water flow along the higher permeability zone and small amount of oil have been displaced, the utilization ratio of injected water is low; however, the ferrofluid can be manipulated to flow in desired direction through control of the external magnetic field, so that using ferrofluid for flooding can raise the scope of the whole displacement, as a consequence, the oil recovery has been improved more than 20% compared to water flooding. Thus, through the experiments and theoretical calculations show that: the ferrofluid flooding is a large potential method for enhanced oil recovery.

ferrofluid, porous media, magnetic-seepage field coupling, ferrofluid flooding, experiment and numerical simulation

doi: 10.1360/N972015-01460