

文章编号: 0253-2697(2017)10-1183-06 DOI:10.7623/syxb201710008

驱替过程中重力舌进特征的核磁共振可视化实验

狄勤丰^{1,2} 张景楠^{1,2} 叶 峰^{1,2} 王文昌^{1,2} 陈会娟^{1,2} 华 帅^{1,2}

(1. 上海大学上海市应用数学和力学研究所 上海 200072; 2. 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室 上海 200072)

摘要:重力舌进是一种岩心驱替实验中常见的由于重力作用导致驱替剂沿岩心上缘或下缘突进的现象,其直接影响驱替剂的应用效果。由于在驱替过程中无法对岩心内部进行直接观察,因此对重力舌进现象没有直观的认识。利用油藏数值模拟方法模拟了重力对水驱油过程中流体流动形态的影响,并利用基于核磁共振成像技术的岩心驱替可视化实验方法研究了重力舌进产生的条件及影响因素,同时提出了一种获得产生重力舌进特征临界密度差的新方法。研究表明,驱替流体与被驱替流体的密度差是产生重力舌进现象最直接的原因;当实际的密度差大于临界密度差时,则产生显著的重力舌进现象;驱替介质的黏度和驱替流量对重力舌进特征的影响并不明显;在实际生产过程中,可以根据地层流体性质优选驱替液的密度,减少重力舌进对驱替效果的影响。

关键词:重力舌进;核磁共振成像;临界密度差;多孔介质;可视化驱替

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Nuclear magnetic resonance visualization experiment of gravity tongue characteristics in the displacement process

Di Qinfeng^{1,2} Zhang Jingnan^{1,2} Ye Feng^{1,2} Wang Wenchang^{1,2} Chen Huijuan^{1,2} Hua Shuai^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China)

Abstract: Gravity tonguing is a common phenomenon that the displacement agent flows forward rapidly along the upper or lower core edge due to gravity action in the core displacement experiment, which directly affects the effect of displacement agent. For a long term, it is unable to directly observe the core interior in the displacement process, so it is impossible to form an intuitive image of that phenomenon. Firstly, the influence of gravity on fluid flow morphology in the process of water flooding was simulated by means of reservoir numerical simulation. Then, the conditions and influencing factors of gravity tonguing were studied using the core displacement visualization method based on magnetic resonance imaging technique. A new method was proposed to obtain the critical density difference causing gravity tonguing. Research results show that the density difference of displacement fluid and displaced fluid is the most direct reason for gravity tonguing. When the actual density difference is greater than the critical value, significant gravity tonguing will occur. The viscosity and displacement flow of displacement medium have no obvious influence on gravity tonguing. In the actual production process, the density of displacement fluid can be selected preferentially based on formation fluid property to reduce the influence of gravity tonguing on displacement effect.

Key words: gravity tongue; nuclear magnetic resonance imaging; critical density difference; porous media; visualized displacement

引用:狄勤丰,张景楠,叶峰,王文昌,陈会娟,华帅.驱替过程中重力舌进特征的核磁共振可视化实验[J].石油学报,2017,38(10):1183-1188.

Cite:DI Qinfeng,ZHANG Jingnan,YE Feng,WANG Wenchang,CHEN Huijuan,HUA Shuai. Nuclear magnetic resonance visualization experiment of gravity tongue characteristics in the displacement process[J]. Acta Petrolei Sinica,2017,38(10):1183-1188.

二次采油和三次采油是石油开采主要的生产方式之一,室内岩心驱替实验是评价其驱油效果的主要方法之一。常用的岩心驱替实验装置无法观察到岩心内部流体的分布,驱替过程中的黏性指进或舌进等驱替前缘不稳定现象^[1-3]通常是通过制备薄片模型并借助光学显微镜进行观察研究^[4],而实际储层内流体的流动是三维流动,岩心薄片只能模拟二维流动,具有一定

的局限性。Williams等^[5]利用核磁共振成像(MRI)技术首次成功地在岩心中观察到了流体的分布,许多学者在此基础上进行了创新和发展^[6-11]。目前基于MRI的岩心驱替可视化实验方法已较为成熟^[12]。

重力舌进是岩心驱替过程中常见的一种由于重力作用导致驱替剂沿上部或下部突进的现象,直接影响驱替剂的驱替效果^[13]。对于重力舌进发生的条件与

基金项目:国家自然科学基金项目(No. U1663205, No. 50874071)、上海市重点学科建设项目(S30106)、上海市部分地方院校能力建设(12160500200)和上海市高原高峰学科建设项目资助。

第一作者:狄勤丰,男,1963年8月生,1984年获华东石油学院钻井工程专业学士学位,1997年获西南石油学院油气井工程专业博士学位,现为上海大学教授、博士生导师,主要从事石油工程技术和力学问题的研究。Email: qingfend@sina.com

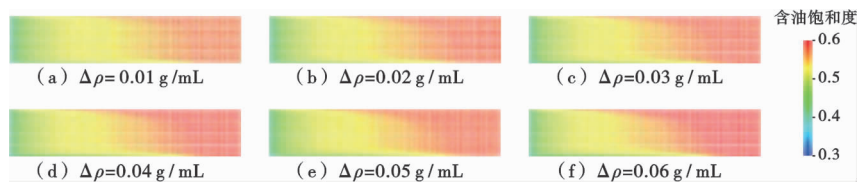
通信作者:王文昌,男,1982年5月生,2003年获兰州大学理论力学专业学士学位,2011年获上海大学工程力学专业博士学位,现为上海大学讲师,主要从事石油工程中的力学问题研究。Email: wangwenchang1982@163.com

影响因素, Morrow^[14]使用 Bond 数 N_B 描述重力对多孔介质内流体流动的影响。当 $N_B > 1$ 时,重力作用明显;当 $N_B < 1$ 时,重力作用可以被忽略。Hove 等^[15]在研究 2 种不同密度的流体在多孔介质中的重力分异作用时,通过 Bond 数计算和直观观察发现,即使在 Bond 数很小的时候,重力对多孔介质中流体的作用也较明显。Eck 等^[16]使用二维均质剖面模型进行了流动实验研究,并提出了利用黏滞力与重力之比 $R_{v/g}$ 区分混相驱替过程中的流态:当 $R_{v/g}$ 较小时,流态为单一的重力舌进;当 $R_{v/g}$ 稍大时,在某一范围内,垂向波及效率取决于特定的黏滞力与重力的比值,直到 $R_{v/g}$ 超过某一极限值时,出现过渡区,以重力舌进为主,同时还会生成次生指进;当 $R_{v/g}$ 较大时,驱替以指进为主,重力的舌进影响较小,但只是一种定性的分析。许多文献中^[17-19]得到的 $R_{v/g}$ 差异较大,在实际应用中,很难判断重力舌进发生与否。

笔者首先利用油藏数值模拟方法分析了重力对水驱油过程中流体流动形态的影响,在此基础上利用基于 MRI 岩心驱替可视化实验方法研究了重力对岩心内流体渗流特征的影响以及重力舌进产生的条件。

1 重力舌进特征的数值模拟

利用 ECLIPSE 油藏数值模拟软件模拟了重力对水驱油过程中流体流动形态的影响。ECLIPSE 软件中描述水驱油过程的数学模型为^[17]:



注:模型左侧为注入井,右侧为产出井,流动方向由左至右。

图 1 不同密度的驱替介质驱替后的含油饱和度分布

Fig. 1 The oil saturation distribution after the displacement of displacing media with different densities

从图 1 中可以看出,重力对驱替前缘具有一定的影响。随着 2 种流体密度差的增大,密度较大的流体会趋向于下侧流动,密度差越大,重力作用越明显。但实际问题比较复杂,数值模拟结果的正确性无法得到验证,需要进一步通过实验进行研究。

2 重力舌进特征的核磁共振可视化实验

2.1 实验方法

利用自主研发的核磁共振可视化驱替装置(图 2)研究岩心中重力对流体流动特征的影响,探究产生重力舌进的原因及影响因素。可视化驱替实验系统主要包括 MINI-MRI 装置、专用岩心夹持器、驱替泵、回压

$$v_o = -\frac{KK_{ro}}{\mu_o} \nabla (p_o - \rho_o gD) \quad (1)$$

$$v_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \nabla (\rho_w - \rho_w gD) \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho_o v_o) + \frac{\partial(\rho_o S_o \phi)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div}(\rho_w v_w) + \frac{\partial(\rho_w S_w \phi)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$C_t = \phi_a C_L + C_f \quad (5)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (6)$$

$$p_{cwo} = p_o - p_w \quad (7)$$

初始条件和边界条件为:

$$p(x, y, z, t)_{t=0} = p_i \quad (8)$$

$$S_w(x, y, z, t) |_{t=0} = S_{wc} \quad (9)$$

$$S_o(x, y, z, t) |_{t=0} = 1 - S_{wc} \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_r = 0 \quad (11)$$

$$Q_1(x, y, z, t) |_{x=x_w, y=y_w, z=z_w} = Q_1(t) \quad (12)$$

所用模型的几何尺寸为 $100 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$, 包含一口注入井和一口产出井,模型网格数为 $50 \times 1 \times 25$ 。为了体现重力作用的效果,其他性质不变,改变模型中水相的密度。注入一定时间后,不同密度差情况下的油水饱和度分布结果如图 1 所示。

阀、计量装置。整个驱替过程中,通过 MRI 装置可以获得流体在岩心中的分布图像。

在利用 MRI 技术研究重力对驱替流体的影响时,需要分辨驱替流体与被驱替流体的核磁共振信号,同时需要改变流体的密度,实验采用氯化锰水溶液驱水实验方案。一方面,氯化锰水溶液中, Mn^{2+} 与水分子直接接触,与 H^+ 发生自旋交换作用,同时 H^+ 的核磁运动和 Mn^{2+} 电磁运动之间产生线性偶极——偶极弛豫,这 2 种机制使得水中 H^+ 的弛豫衰减加快,氯化锰水溶液与水的信号可以根据弛豫时间的不同进行区分;另一方面,不同浓度的氯化锰水溶液对应不同相对密度,通过配制不同浓度氯化锰水溶液,可以控制氯化

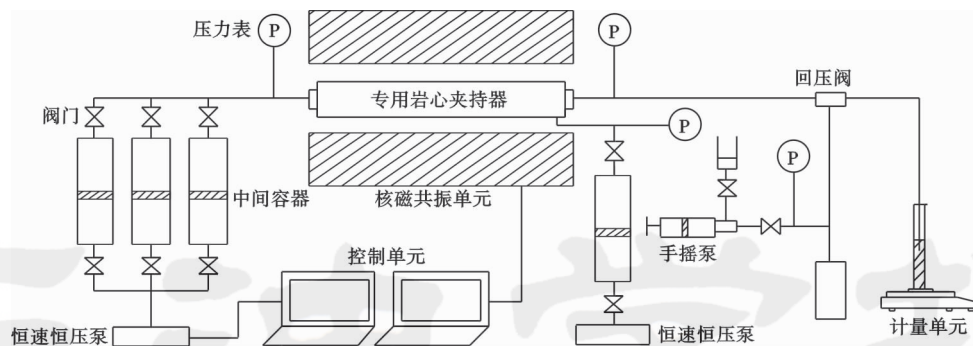


图 2 可视化驱替实验系统

Fig. 2 NMR visualized displacement experiment system

锰水溶液与水之间形成的密度差,从而研究密度差对重力舌进特征的影响。

在考虑黏度对重力舌进特征的影响时,由于氯化锰会对聚合物的性能产生影响,无法使用氯化锰水溶液配制聚合物。重水(D₂O,相对密度为 1.10)的化学性质和水相同,而且重水没有核磁共振信号,采用重水配制聚合物,可以区分其与水和油的核磁信号^[9]。具体实验目的及方法见表 1。

表 1 实验目的及方法

Table 1 Experimental purposes and methods

实验目的	实验方法
水测渗透率过程的可视化	水测渗透率过程中,向岩心内注入水时进行核磁共振成像,观察水在岩心内的流动形态及分布
驱替介质与被驱替介质的密度差对重力舌进的影响	使用不同密度的氯化锰水溶液驱水,驱替过程中使用 MRI 研究驱替介质与被驱替介质之间的密度差与驱替前缘形状的关系
驱替介质黏度对重力舌进的影响	分别使用重水驱水和重水聚合物驱水、重水驱油和重水聚合物驱油,观察不同黏度驱替介质对应的驱替前缘特征
驱替流量对重力舌进的影响	在 2 种驱替流量下(0.5 mL/min 和 2 mL/min)分别进行氯化锰水溶液驱水和驱油实验,观察不同驱替流量对应的驱替前缘特征

2.2 实验材料

为了能获得高质量的核磁共振图像,岩心中不允许含有对磁场造成干扰的铁磁性材料,实验均选用人工无磁均质岩心,岩心基本参数见表 2。实验过程中使用的驱替流体和被驱替流体的基本属性如表 3 所示。

表 2 岩心基本参数

Table 2 Basic parameters of core

岩心编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度/%	水测渗透率/mD
A-1	2.50	9.00	24.10	530
1-3	2.45	8.89	22.12	500
4-6	2.52	8.99	32.19	890
4-7	2.52	9.01	33.52	870
4-8	2.52	8.96	31.09	870
4-9	2.52	9.00	30.22	860

表 3 驱替介质与被驱替介质的基本属性

Table 3 Basic properties of displacing and displaced medium

流体	密度/(g·mL ⁻¹)	20℃黏度/(mPa·s)
聚合物重水溶液	1.10	5.0
重水	1.10	1.0
氯化锰水溶液	—	1.0
水	1.00	1.0
柴油	0.84	2.5

注:“—”表示不固定密度。

3 实验结果及讨论

3.1 水测渗透率过程的可视化

由于岩心材料不透明,传统的水测渗透率方法只能获得压差和流量的关系^[20-21],无法直观地观察到指进、舌进等驱替前缘不稳定特征以及单层突进、水窜等情况,导致在一些特殊条件下所测得的渗透率差异较大^[21-22]。利用核磁共振可视化与岩心流动实验相结合的测试方法,不但能够得到常规方法获得的压差—流量曲线,而且可以直观地观察渗流过程,分析岩心非均质性、裂缝等对渗透率的影响,确保水测渗透率的准确性。

首先基于扩展的达西定律^[23]:

$$Q = -\frac{KA_{rk}}{\mu} \frac{\Delta p}{l_{rk}} \quad (13)$$

通过回归分析可得:

$$-\Delta p = b_k Q \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)得:

$$K = \frac{\mu l_{rk}}{b_k A_{rk}} \quad (15)$$

采用多点法测试流量与压差,用回归分析法获得压差—流量曲线(图 3)。将获得的 b_k 值代入式(15),即可获得渗透率值。实验获得的岩心渗透率值如表 3 所示。

实际测试过程中,首先将待测岩心抽真空加压饱

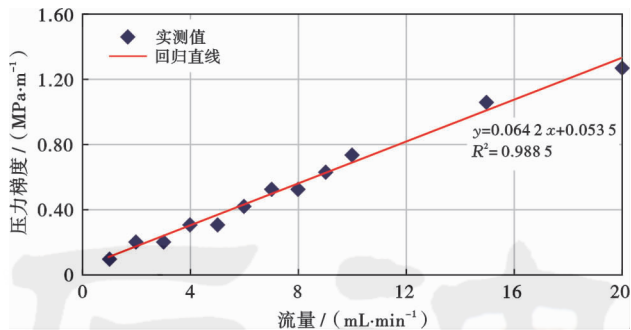


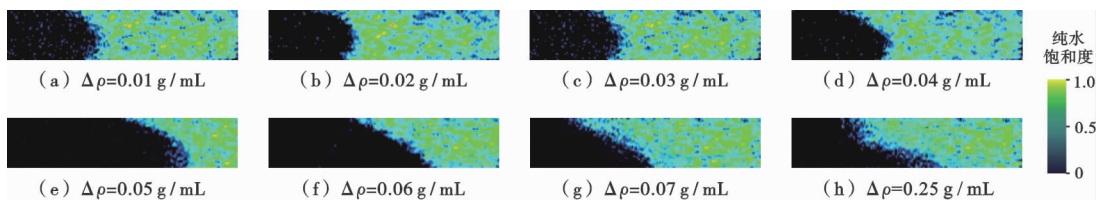
图3 岩心 A-1 水测渗透率

Fig. 3 Water permeability of core A-1

和后装入岩心夹持器进行水测渗透率,获得常规的压差—流量曲线(图3);然后取出岩心放入离心机高速离心后再装入岩心夹持器继续水驱;改变不同流量,获得压差—流量曲线中每个数据点对应的核磁共振图像(图4)。从图像中可以明显观察到不同流量对应的流体流动特征。

3.2 流体密度差对重力舌进的影响

配置不同密度的氯化锰水溶液驱水,研究驱替流体与被驱替流体之间的密度差对重力舌进特征的影响。



注:纯水饱和度—纯水(区别于氯化锰水溶液和重水)占岩心孔隙体积的比例;流动方向由左至右。

图5 不同驱替与被驱替流体密度差下的岩心矢状面图像(岩心 A-1)

Fig. 5 Sagittal plane images of the core under the different density difference of the displacement and displaced fluid

3.3 黏度对重力舌进的影响

为了研究黏度对重力舌进的影响,开展了重水驱水、重水聚合物驱水、重水驱油、重水聚合物驱油实验,具体实验及参数如表3和表4所示,对应的实验结果(矢状面图像)见图6。

从图6中可以看出,对于2种不同黏度的驱替介质(重水和重水聚合物),无论在驱水还是在驱油情况下均出现重力舌进特征;2种不同黏度的驱替介质在驱水和驱油时,驱替前缘的形状没有明显异同,说明黏度对重力舌进没有显著影响。

表4 黏度影响实验参数

Table 4 Experiment parameters of the viscosity influence

实验序号	实验名称	岩心编号	驱替流量/(mL·min ⁻¹)	驱替介质	被驱替介质
1	重水驱水	1-3	0.5	重水	水
2	重水聚合物驱水	1-3	0.5	聚合物重水溶液	水
3	重水驱油	4-6	0.5	重水	柴油
4	重水聚合物驱油	4-7	0.5	聚合物重水溶液	柴油

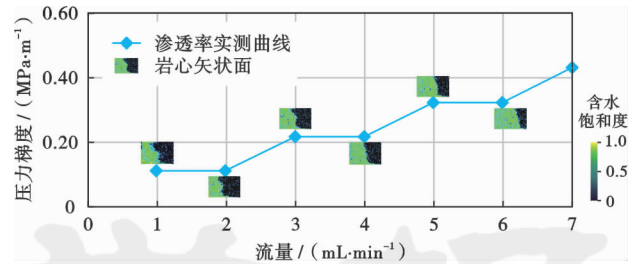


图4 岩心 A-1 可视化水测渗透率

Fig. 4 Visualized water permeability of core A-1

不同密度差条件下,驱替过程中的岩心核磁共振矢状面图像如图5所示,对应的驱替流量为0.5 mL/min。当密度差小于0.05 g/mL时,驱替前缘的轮廓线类似于抛物线;随着密度差的逐渐增大,抛物线的顶点逐渐下移;当密度差达到0.05 g/mL时,界面轮廓线顶点接近低端;当密度差达到0.06 g/mL时,出现重力舌进特征。该结果表明,驱替与被驱替流体间的密度差是产生重力舌进特征的一个重要原因;同时,存在一个临界密度差(实验为0.06 g/mL),当实际的密度差大于临界密度差时,产生重力舌进特征。

3.4 驱替流量对重力舌进的影响

使用不同相对密度的氯化锰水溶液进行驱水和驱油实验,获得驱替流量分别为0.5 mL/min和2 mL/min时的岩心矢状面图像(图7),以研究驱替流量对重力舌进的影响。

从图7中可以看出,当氯化锰水溶液的相对密度为1.01时,驱水过程中没有产生重力舌进现象,2种驱替流量下的驱替前缘形状未发生明显变化。当氯化锰水溶液的相对密度为1.07时,驱水过程中产生了明显的重力舌进特征,且随着驱替流量的增加,重力舌进

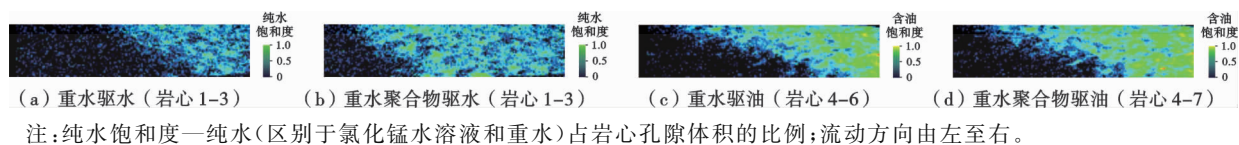
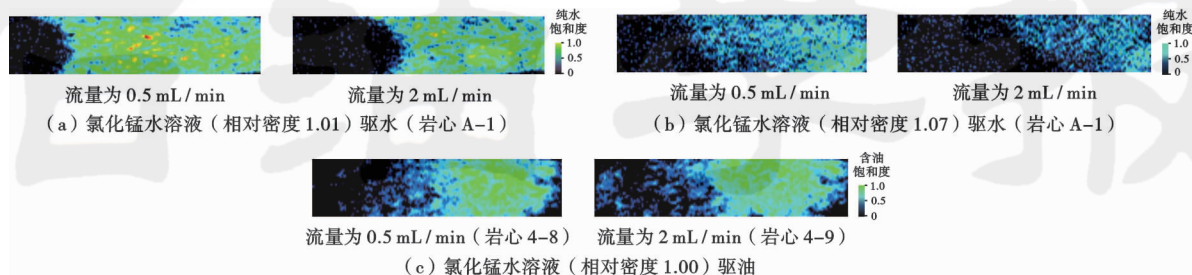


图 6 不同黏度流体驱水和驱油的岩心矢状面图像

Fig. 6 Sagittal plane images of the water and oil displaced by different viscosity fluid



注:纯水饱和度—纯水(区别于氯化锰水溶液和重水)占岩心孔隙体积的比例;流动方向由左至右。

图 7 不同驱替流量对应的岩心矢状面图像

Fig. 7 Sagittal plane images of the different flow velocity

特征略有加剧。使用氯化锰水溶液(相对密度 1.00)驱油时,同样发生重力舌进现象,两种驱替流量下的驱替前缘形状略有差异,其中驱替流量较大时,产生的重力舌进特征更为明显。

这些特征表明,驱替流量不是产生重力舌进现象的直接原因,但是当重力舌进现象产生时,驱替流量的增大会加剧重力舌进的程度。

4 结 论

(1) 使用基于 MRI 技术的可视化岩心驱替方法,不但可以获得压差—流量曲线,而且可以直观地观察驱替过程中岩心内部流体的流动特征。所提出的可视化实验方法有助于直观地认识岩心驱替过程中的重力舌进特征及其产生的原因和影响因素。

(2) 驱替流体与被驱替流体的密度差是产生重力舌进最直接的原因;驱替介质的黏度对重力舌进特征的影响不明显;驱替流量的增大会加剧重力舌进的程度。

符号注释: N_B —Bond 数; $R_{v/g}$ —黏滞力与重力的比; $\Delta\rho$ —两种流体之间的密度差, kg/m^3 ; v_o 、 v_w —油、水相渗流速度, m/s ; K —渗透率, mD ; K_{r_o} 、 K_{r_w} —油、水相相对渗透率; μ_o 、 μ_w —油、水相黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; p_o 、 p_w —油、水相压力, Pa ; p_i —原始地层压力, Pa ; p_{cwo} —毛管力, Pa ; ρ_o 、 ρ_w —油、水的密度, kg/m^3 ; D —油藏深度, m ; S_o 、 S_w —油、水相饱和度; S_{wc} —原始含水饱和度; ϕ —孔隙度; ϕ_a —大气压力下的孔隙度; C_t 、 C_L 、 C_f —综合、液体、岩石压缩系数, MPa^{-1} ; t —时间, s ; $\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\Gamma}$ —压

力沿边界 Γ 外法线方向的导数; Q_i —井所在网格的体积流量, m^3/s ; x_w 、 y_w 、 z_w —内边界网格的坐标; Q —流量, m^3/s ; Δp —进出口压差, Pa ; μ —液体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; A_{rk} —岩心截面积, m^2 ; L_{rk} —岩心长度, m ; b_k —斜率。

参 考 文 献

- [1] 胡勇,李熙喆,王玉金,等. 致密砂岩气渗流特征物理模拟[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):580-584.
HU Yong, LI Xizhe, WAN Yujin, et al. Physical simulation on gas percolation in tight sandstone[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 580-584.
- [2] 李伟才,姚光庆,周锋德,等. 低渗透油藏不同流动单元并联水驱油[J]. 石油学报,2011,32(4):658-663.
LI Weicai, YAO Guangqing, ZHOU Fengde, et al. Water displacing oil efficiency with cores grouped in parallel of different flow units in low-permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 658-663.
- [3] 谭锋奇,许长福,王晓光,等. 砾岩油藏水驱与聚合物驱微观渗流机理差异[J]. 石油学报,2016,37(11):1414-1427.
TAN Fengqi, XU Changfu, WANG Xiaoguang, et al. Differences in microscopic porous flow mechanisms of water flooding and polymer flooding for conglomerate reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1414-1427.
- [4] GRING L M, CAUDLE B H. A visual study of waterflooding a microlayered sandstone[R]. SPE 4106, 1972.
- [5] WILLIAMS J L A, TAYLOR D G, MADDINELLI G, et al. Visualisation of fluid displacement in rock cores by NMR imaging [J]. Magnetic Resonance Imaging, 1991, 9(5): 767-773.
- [6] ROSE H E L, BRITTON M M. Magnetic resonance imaging of reaction-driven viscous fingering in a packed bed [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2013, 178: 64-68.

- [7] CHENG Yichong, DI Qinfeng, GU Chunyuan, et al. Visualization study on fluid distribution and end effects in core flow experiments with low-field mri method[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2015, 27(2): 187-194.
- [8] 王为民, 郭和坤, 孙佃庆, 等. 用核磁共振成像技术研究聚合物驱油过程[J]. *石油学报*, 1997, 18(4): 54-60.
WANG Weimin, GUO Hekun, SUN Dianqing, et al. A study on polymer flooding by MRI techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4): 54-60.
- [9] 黄延章, 尚根华, 陈永敏. 用核磁共振成像技术研究周期注水驱油机理[J]. *石油学报*, 1995, 16(4): 62-67.
HUANG Yanzhang, SHANG Genhua, CHEN Yongmin. A study on the mechanisms of cyclic water flooding by NMRI techniques [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(4): 62-67.
- [10] 朱华银, 徐轩, 安来志, 等. 致密气藏孔隙水赋存状态与流动性实验[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 230-236.
ZHU Huayin, XU Xuan, AN Laizhi, et al. An experimental on occurrence and mobility of pore water in tight gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 230-236.
- [11] 代全齐, 罗群, 张晨, 等. 基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 887-897.
DAI Quanqi, LUO Qun, ZHANG Chen, et al. Pore structure characteristics of tight-oil sandstone reservoir based on a new parameter measured by NMR experiment: a case study of seventh Member in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 887-897.
- [12] 狄勤丰, 张景楠, 华帅, 等. 聚合物-弱凝胶调驱核磁共振可视化实验[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(2): 270-274.
DI Qinfeng, ZHANG Jingnan, HUA Shuai, et al. Visualization experiments on polymer-weak gel profile control and displacement by NMR technique[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(2): 270-274.
- [13] 岳湘安, 王尤富, 王克亮. 提高石油采收率基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
YUE Xiang'an, WANG Youfu, WANG Keliang. The basic of enhance oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [14] MORROW N R. Interplay of capillary, viscous and buoyancy forces in the mobilization of residual oil[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1979, 18(3): 35-46.
- [15] HOVE A O, DAWE R A, EVANS R N. Gravity segregation at the pore scale in cores under miscible and low interfacial tension conditions including in-situ tomography[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1995, 14(1/2): 89-98.
- [16] Eck T R, Haynes H J, Katz M L, et al. Enhanced oil recovery: an analysis of the potential for enhanced oil recovery from known fields in the United States, 1976 to 2000[J]. Washington, DC: National Petroleum Council, 1976.
- [17] 周海菲. 特低渗透油藏 CO₂ 混相驱实验研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
ZHOU Haifei. Experimental investigation on CO₂ miscible drive in ultra-low permeability reservoirs[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [18] 李菊花, 姜涛, 高文君, 等. 气水交替驱油藏注入能力分析 & 优化 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(6): 121-125.
LI Juhua, JIANG Tao, GAO Wenjun, et al. Analysis and optimization of injectivity by gas-alternating-water flooding in reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(6): 121-125.
- [19] 周源. 注气油藏优选及数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
ZHOU Yuan. Gas injection reservoirs optimization and numerical simulation study[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [20] 杨泽皓, 董明哲, 宫厚健, 等. 测量页岩径向渗透率和孔隙度的新方法[J]. *石油学报*, 2015, 36(4): 482-489.
YANG Zehao, DONG Mingzhe, GONG Houjian, et al. A new method to measure radial permeability and porosity of shale[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(4): 482-489.
- [21] 方建龙, 郭平, 肖香姣, 等. 高温高压致密砂岩储集层气水相渗曲线测试方法[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 84-87.
FANG Jianlong, GUO Ping, XIAO Xiangjiao, et al. Gas-water relative permeability measurement of high temperature and high pressure tight gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 84-87.
- [22] 杜庆龙. 长期注水开发砂岩油田储层渗透率变化规律及微观机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(9): 1159-1164.
DU Qinglong. Variation law and microscopic mechanism of permeability in sandstone reservoir during long-term water flooding development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(9): 1159-1164.
- [23] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 41-80.
KONG Xiangyan. Advanced fluid flow in porous media [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 41-80.

(收稿日期 2016-07-06 改回日期 2017-07-31 编辑 王培玺)