

特/超低渗透油藏不同气驱方式物理模拟

肖朴夫¹, 杨正明², 王学武², 姜柏材¹, 刘国忠²

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

摘要 选取大庆外围特/超低渗透储层岩心进行物理模拟实验, 结合核磁共振, 通过注水转注气、CO₂混相驱、CO₂非混相驱和周期注气4种驱替方式, 研究不同渗透率级别岩心的驱油效率和剩余油分布, 以此对大庆现场注CO₂先导实验区开发提供参考意见。结果表明, 在相同条件下, 常规注水开发的效果最差, 但转注气后能有较大的提升; 对于特低渗岩心, 周期注气的驱油效率最高; 对于超低渗岩心, 注水转注气的效果高于其他3种方式。剩余油分布研究表明, 注水转注气、CO₂混相驱和CO₂非混相驱3种方式动用的主要是大-中孔隙中的油, 对于黏土微孔隙中的原油很难进行动用, 但是通过周期注气过程中的停注时间, 在毛管力和弹性能的作用下, 微孔隙中的原油向中-大孔隙中流动, 从而增加小孔隙中难动用的原油的动用程度。

关键词 CO₂驱油; 微观驱油机制; 可动流体; 超低渗透油藏; 核磁共振

中图分类号 TE311

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.22.003

Physical simulation of different gas flooding modes in extra/ultra-low permeability reservoirs

XIAO Pufu¹, YANG Zhengming², WANG Xuewu², JIANG Baicai¹, LIU Guozhong²

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China
2. Langfang Branch, PetroChina Research and Development Institute of Petroleum, Langfang 065007, China

Abstract The physical simulation of the core of Daqing peripheral extra/ultra-low permeability reservoirs is designed, combined with the nuclear magnetic resonance (NMR), in consideration of four kinds of gas injection modes, that is, water injection converting to gas injection, CO₂ miscible flooding, CO₂ immiscible gas injection and the cycle gas injection, to study the oil displacement efficiency and the residual oil distribution of different levels permeability cores, for the development of the pilot area of Daqing CO₂ pilot test area. Results indicate that, under the same conditions, the effect of the conventional water injection is the worst, but after converting to the gas injection, a larger ascension may be achieved. For extra low permeability cores, the cycle gas injection displacement efficiency is the highest. For ultra-low permeability cores, the effect of the water transfer gas is higher than that of other three modes. The residual oil distribution shows that, for the water transfer gas, the CO₂ miscible flooding and the immiscible CO₂ flooding, with a main use of oil in the large-medium pore, the crude oil in clay micro pore is hard to drive, but during the time of the cycle gas injection process, under the action of capillary force and the elastic energy, the crude oil flows from the micro pore to the large-medium pore, thus increasing the utilization of crude oil in small pores.

Keywords CO₂ flooding; microscopic displacement mechanism; movable fluid; ultra-low permeability reservoirs; nuclear magnetic resonance

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2015-06-30

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006); 中石油重点科技攻关项目(2011-13)

作者简介: 肖朴夫, 博士研究生, 研究方向为低渗/致密油藏储层特征及渗流机制, 电子信箱: xiaolove99@qq.com

引用格式: 肖朴夫, 杨正明, 王学武, 等. 特/超低渗透油藏不同气驱方式物理模拟[J]. 科技导报, 2015, 33(22): 27-31.

近年来,随着中国许多特/超低渗透油藏投入开发,出现了地层能量不足、地层压力下降过快等许多问题,由于渗透率低注水补充能量存在启动压力梯度,注入比较困难,导致采收率较低^[1,2]。而注CO₂气驱可以通过体积膨胀、降低原油黏度、降低界面张力来建立起油藏有效的驱动体系,已成为提高特/超低渗油藏采收率的重要技术手段,受到广大研究者的重视^[3,4]。目前研究的重点主要集中在尚未全面开发的超低渗透油藏,对已经进行注水开发的一些油田,如何进行注气有效开发及驱替过程的动态特征研究相对较少^[5]。

大庆外围超低渗储量丰富,潜力较大,但是由于储层渗透率低、孔喉小,表现在水驱开发见效慢、吸水能力较差、采油速度低等问题^[6]。本文针对大庆CO₂试验区的特/超低渗岩心,进行岩心物理模拟实验和低磁场核磁共振测试,分析不同气驱方式下特/超低渗岩心的驱油效果、剩余油的分布,验证超低渗油藏CO₂驱开发的可行性。

1 驱替实验

1.1 实验材料

实验样品采自大庆油田南区某CO₂试验区,含油面积2.36 km²,地质储量217.8×10⁴ t,井区周围断裂比较发育,均为正断层,走向以近于南北向为主,天然裂缝不发育。扶余油层组平均孔隙度10.65%,空气渗透率1.16×10⁻³ μm²,杨大城子油层组孔隙度10.8%,空气渗透率0.96×10⁻³ μm²,属于典型的超低渗储层。

实验原油按照黏度值的大小(3.6 mPa·s)混合煤油配制油样;实验使用岩心均为一口井砂岩岩心,分别取4块渗透率、孔隙度相近的岩心为一组进行实验,其中4块渗透率0.7×10⁻³ μm²左右的超低渗平行岩样,4块3.7×10⁻³ μm²左右的特低渗平行岩样,实验岩心如表1。

1.2 实验步骤与流程

实验装置流程如图1所示,实验驱动系统采用一台

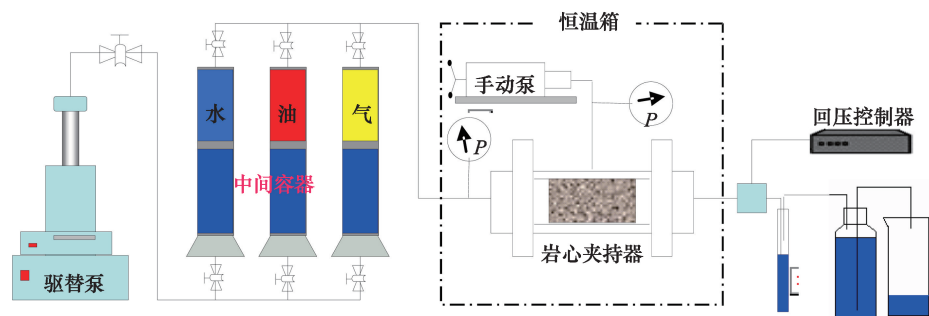


图1 岩心驱替实验流程

Fig. 1 Flow chart of the core displacement experiment

2 结果分析

2.1 不同驱替方式实验结果

图2为不同驱替方式下,超低、特低渗岩心的采出程度。由图2可以得出,对于不同渗透率岩心进行驱替实验,最优的

表1 岩心基础物理参数

Table 1 Petrophysical parameters of core samples

岩心号	长度/ cm	直径/ cm	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	类型	孔隙 度/%	注入 方式
1-1	9.618	2.51	0.725	超低渗岩心	12.241	水驱转气驱
1-2	9.106	2.51	0.751	超低渗岩心	12.517	非混相驱
1-3	9.084	2.51	0.713	超低渗岩心	12.489	混相驱
1-4	9.330	2.51	0.769	超低渗岩心	11.903	周期注气
6-1	9.126	2.51	3.783	特低渗岩心	14.165	水驱转气驱
6-2	9.092	2.51	3.610	特低渗岩心	14.686	非混相驱
6-6	9.182	2.52	3.642	特低渗岩心	14.204	混相驱
6-4	9.290	2.52	3.571	特低渗岩心	14.268	周期注气

Quizix Q5000 驱替泵,核磁共振测试采用中国科学院渗流流体力学研究所自主研制的Magnet2000型低磁场核磁共振岩样分析仪。实验基本步骤为:1) 首先将岩样抽真空饱和和地层水,并用核磁共振测试其饱和水状态的T₂谱图;2) 将岩心在MnCl₂溶液中浸泡,至无核磁信号;3) 再将岩心装入流程,用原油饱和和岩心,建立束缚水,驱替倍数为10倍孔隙体积(PV),并用核磁共振测试其束缚水状态的T₂谱图;4) 最后依次采用进行注水转注CO₂、CO₂混相驱、CO₂非混相驱和周期注CO₂驱油,并测试驱替后岩心的T₂谱图。

最小混相压力通过细管实验法^[7]测试为28 MPa,注水后转CO₂驱、混相驱和周期注气中气驱均为混相驱,混相驱压力为32 MPa,非混相驱为15 MPa。其中前期通过多次注水转注气对比实验后,确定注水20%以后再转气驱10 PV的效果最好;周期注气先注0.5 PV后停泵保持静置2 h后,再驱替10 PV后停泵保持静置2 h;混相驱和非混相驱在不同的压力下驱替10 PV。

驱替方式存在差异。

对超低渗岩心来说,水驱后转气驱得到的采收率略高一些,但是与混相驱、周期注气这两种方式相差并不大;而对于特低渗岩心,周期注气的效果最佳。

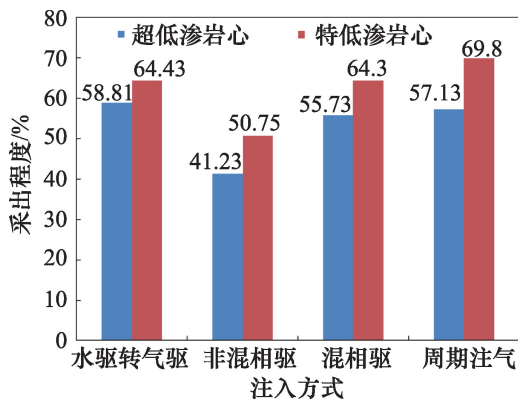


图2 岩心不同注入方式实验结果

Fig. 2 Oil recovery percent for cores in different modes of injection

表2 不同孔隙区间的含油饱和度核磁分析结果

Table 2 NMR analysis results of oil saturation in different porosity regions

岩心号	总孔隙 束缚水 饱和度/%	总孔隙 含油饱和 度/%	黏土微孔 含油饱和 度/%	中等孔隙 含油饱和 度/%	大孔隙 含油饱 和度/%
1-1	37.27	62.73	20.12	30.53	12.08
1-2	38.65	61.35	22.84	29.39	9.12
1-3	38.29	61.71	21.68	30.24	9.79
1-4	39.35	60.65	22.78	31.53	6.34
6-1	26.58	73.42	28.01	31.31	14.08
6-2	33.21	66.79	22.00	30.00	14.79
6-6	33.60	66.40	21.85	29.65	14.90
6-4	25.70	74.30	23.12	33.80	17.38

替前后不同流体在岩心孔隙空间分布情况。浸泡 MnCl_2 水溶液后, 锰水能消除模拟地层水核磁信号, 所得信号全部是油样信号, 通过分析不同驱替方式前后岩心 T_2 弛豫时间谱, 可以分析原油在孔隙中的微观变化规律。通过大量对不同砂岩研究表明^[11-15]: 当弛豫时间 T_2 小于 10 ms 时, 对应孔隙为黏土微孔; 当弛豫时间 T_2 大于 100 ms 时, 对应孔隙为大孔隙; T_2 弛豫时间介于 10~100 ms 时为中等孔隙。由表 2 可看出, 两种不同渗透率级别的岩心含油饱和度规律大体相同, 中等孔隙中含油最多, 其次为黏土微孔, 大孔隙空间较大, 水膜厚度增加导致原油弛豫时间的增加, 从而大孔隙中含油饱和度较低。

结合表 3 进一步分析得知, 对超低和特低渗岩心来说, 不同的驱替方式主要驱替中等孔隙和大孔隙中的原油; 注水过程中水驱采出程度很低, 但是转气驱后能有较大的提升, 同时可以延缓气体突破的时间, 有益于最终采出程度的提高。

2.2 微观驱油机制对比分析

不同渗透率级别岩心, 采用 4 种不同驱替方式后的不同孔隙空间的含油饱和度和采出程度的分布统计结果见表 2、表 3, 饱和水、饱和油及残余油饱和度的核磁共振 T_2 谱分析结果如图 3 和图 4。

由核磁共振弛豫机制^[8-10]可知, 在均匀磁场中测量的横向弛豫时间 T_2 为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (1)$$

其中, T_{2B} 为流体的体积弛豫时间, ms; ρ_2 为弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S/V 为孔隙比表面。弛豫时间反应的是原油和岩心孔隙表面距离大小, 弛豫时间越短说明原油离孔隙表面距离越近。利用低磁场核磁共振仪分别测试岩心饱和水状态、浸泡 MnCl_2 水溶液下状态、不同驱替方式后的 T_2 弛豫时间谱, 可以得到驱

表3 不同孔隙区间的采出程度核磁分析结果

Table 3 NMR analysis results of different pore intervals

岩心号	总孔隙 采出程度/%	黏土微孔 采出程度/%	中等孔隙 采出程度/%	大孔隙 采出程度/%
1-1先水驱	10.14	1.62	3.88	4.64
1-1后气驱	58.81	4.25	34.71	19.85
1-2	41.23	-3.91	30.27	14.87
1-3	55.73	2.69	31.17	15.87
1-4	57.13	6.69	35.98	14.36
6-1先水驱	21.13	1.14	8.39	11.60
6-1后气驱	64.43	6.03	37.22	21.18
6-2	50.75	-2.14	30.74	22.14
6-6	64.30	2.90	38.94	22.46
6-4	69.80	8.69	39.72	21.38

在注气驱替过程中, 随着 CO_2 在混相压力下注入, CO_2 溶于水和油中, 处于一个动态平衡^[16], CO_2 可以通过水层直接接触原油进行驱替, 但是主要对中-大孔隙中的原油进行驱替, 对微孔隙中的原油动用程度比较低。

采用 CO_2 非混相驱, 在驱替前沿能溶解原油中的轻质组分, 重质组分被萃取出来后黏附在岩心壁上^[17], 在谱图上表现为原油信号增加, 所以导致在黏土微孔部分的采出程度出现负增长。进行混相驱和周期注气实验中, 中等孔隙和大孔隙中的原油采出程度相差不大, 不同在于黏土微孔部分。周期注气通过停注后的静置时间, 由于毛管力和膨胀作用使微孔中流动性差的原油进入到中-大孔隙中, 所以微孔部分的原油采出程度是这 4 种方式中最高的。图 3(d)、图 4(d) 实验结果表明, 静置后的谱图整体向右偏移, 这也说明当静止一段时间后, 该部分原油在毛管力和弹性能的作用下, 流动到较大的孔喉空间, 成为易于流动的原油。

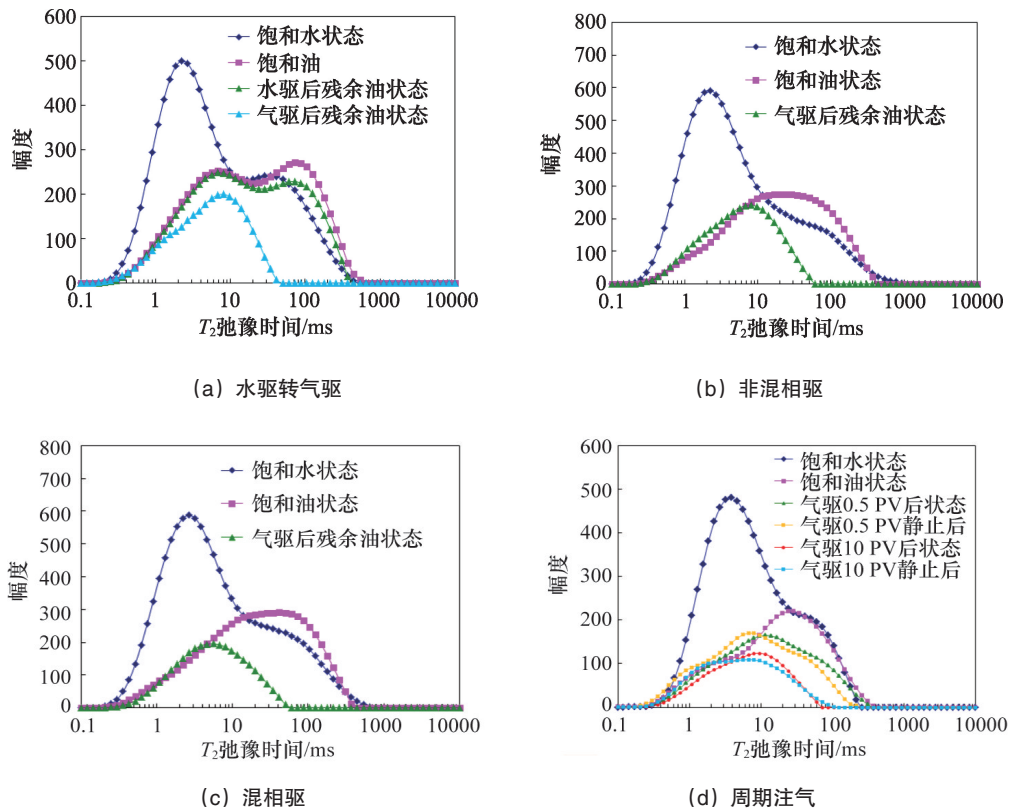


图3 超低渗透岩心不同注入方式下的核磁 T_2 谱图比较

Fig. 3 Comparison of NMR T_2 spectra in different injection modes of ultra-low permeability cores

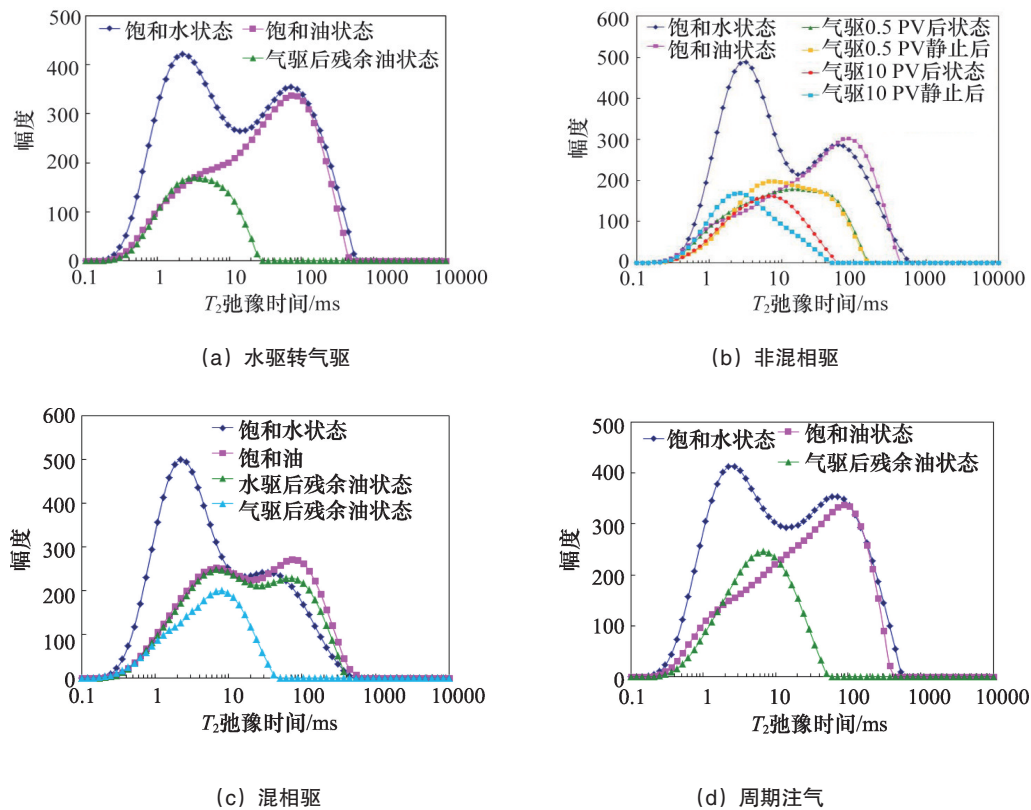


图4 特低渗透岩心不同注入方式下的核磁 T_2 谱图比较

Fig. 4 Comparison of NMR T_2 spectra in different injection modes of extra-low permeability cores

3 结论

1) 利用常规物理模拟实验结合核磁共振技术,在室内试验中验证了注CO₂气驱开发特/超低渗透油藏的可行性。

2) 对于特低渗透油藏来说,周期注气的最终采出程度较高,并且微小孔隙中的原油动用程度最高;而超低渗透油藏通过注水转注气方式得到的采收率是最好的,但是对微小孔隙动用程度低于周期注气。

3) 通过注水开发超低渗透油藏采收率较低,通过注水后转注CO₂气驱使得采收率大幅提高,且比单纯注气驱的效果更为明显。

4) 注水转注气、CO₂混相驱和CO₂非混相驱这三种方式驱替的都是岩心中大-中孔隙的原油,对于黏土微孔隙中的原油很难进行动用。周期注气通过停注时间,由于毛管力和弹性能的作用,使得微孔隙中的原油向中-大孔隙中流动,从而对微孔隙中的原油进行有效动用。

参考文献(References)

- [1] 李士伦, 张正卿, 冉新权. 注气提高石油采收率技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.
Li Shilun, Zhang Zhengqing, Ran Xinquan. Gas injection enhanced oil recovery technology[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001.
- [2] 孙焕泉. 胜利油区低渗透油藏提高采收率技术对策[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 10-13.
Sun Huanquan. Countermeasures of EOR of low permeability reservoirs in Shengli Oilfield[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2002, 9(2): 10-13.
- [3] Koottungal L. Special Report 2010 worldwide EOR survey[J]. Oil & Gas Journal, 2010, 108(14): 41-53.
- [4] 李士伦, 周守信, 杜建芬. 国内外注气提高石油采收率技术回顾与展望[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 1-5.
Li Shilun, Zhou Shouxin, Du Jianfen. Review and prospect of domestic and foreign gas injection enhanced oil recovery technology[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2002, 9(2): 1-5.
- [5] 汪益宁, 吴晓东, 展转盈. 低渗透高含水油藏水气交替驱实验[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(11): 43-44.
Wang Yining, Wu Xiaodong, Zhan Zhuanying. Experiment of water and gas alternating displacement in low permeability and high water cut reservoir[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2013, 32(11): 43-44.
- [6] 刘淑霞. 特低渗透油藏CO₂驱室内实验研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 133-136.
Liu Shuxia. Experimental study on CO₂ flooding in ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute: Science & Technology Edition, 2011, 33(2): 133-136.
- [7] 国家经济贸易委员会. SY/T 6573—2003 最低混相压力细管实验测定法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Economy and Trade Commission. SY/T 6573—2003 Measurement method for minimum miscibility pressure by slim tube test[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [8] George R C, Xiao L Z, Prammer M G. NMR Logging principles & applications[M]. Houston: Gulf Company, 1999.
- [9] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Xiao Lizhi. NMR imaging logging principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [10] 王学武, 杨正明, 李海波, 等. 核磁共振研究低渗透储层孔隙结构方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 69-72.
Wang Xuewu, Yang Zhengming, Li Haibo, et al. Experiment Study on pore structure of low permeability core with NMR spectra[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute: Science & Technology Edition, 2010, 32(2): 69-72.
- [11] 李艳, 范宜仁, 邓少贵, 等. 核磁共振岩心实验研究储层孔隙结构[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(2): 129-132.
Li Yan, Fan Yiren, Deng Shaogui, et al. Experimental study of pore structure with nuclear magnetic resonance[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 31(2): 129-132.
- [12] 刘卫, 肖忠祥, 杨思玉, 等. 利用核磁共振(NMR)测井资料评价储层孔隙结构方法的对比研究[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 773-778.
Liu Wei, Xiao Zhongxiang, Yang Siyu, et al. Comparison researches of reservoir pore evaluated methods which used NMR logging data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 773-778.
- [13] 苏俊磊, 孙建孟, 王涛, 等. 应用核磁工作测井资料评价储层孔隙结构的改进方法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(增1): 380-386.
Su Junlei, Sun Jianmeng, Wang Tao, et al. An improved method of evaluating reservoir pore structure with nuclear magnetic log data[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(Suppl 1): 380-386.
- [14] 李海波, 朱巨义, 郭和坤. 核磁共振T₂谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志, 2008, 25(2): 273-280.
Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. Study on the distribution of pore radius of T₂ spectrum of nuclear magnetic resonance[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(2): 273-280.
- [15] 李海波, 郭和坤, 刘强, 等. 致密油储层水驱油核磁共振实验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(12): 4370-4376.
Li Haibo, Guo Hekun, Liu Qiang, et al. NMR experimental study of water displacing oil of tight oil reservoir[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12): 4370-4376.
- [16] 俞宏伟, 杨思玉, 李实, 等. 低渗透油藏CO₂驱过程中含水率变化规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 1028-1032.
Yu Hongwei, Yang Siyu, Li Shi, et al. Rules of water cut variation in low permeability oil reservoir CO₂ flooding process[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4): 1028-1032.
- [17] 姜洪福, 雷友忠, 熊霄, 等. 大庆长垣外围特低渗透扶杨油层CO₂非混相驱油试验研究[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 659-663.
Jiang Hongfu, Lei Youzhong, Xiong Xiao, et al. An CO₂ immiscible displacement experimental study aiming at Fuyang extra-low permeability layer at peripheral of Daqing placanticline[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 659-663.

(责任编辑 刘志远)