

应用核磁共振技术评价水驱开发效果

熊伟^{1,2}, 朱志强², 高树生³, 胡志明³, 丁鲲⁴

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100087
2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
4. 中国石油集团工程设计有限责任公司青海分公司, 甘肃敦煌 736202

摘要 通常的室内岩心分析不能给出岩心水驱油过程中油的动用特征及剩余油的分布情况, 借助核磁共振 T_2 谱技术能够直观地观察到岩心经水驱后不同孔隙中油的动用规律及剩余油分布特征。对 3 类不同渗透率级别的岩心样品进行水驱油实验, 并借助核磁共振 T_2 谱技术对其渗流机制进行分析, 评价水驱后的采出程度。结果表明, 对于低渗透、特低渗透的岩心, 驱替过程中, 大、中孔隙中的油优先被驱替出来, 见水时水驱采出程度已较高, 见水后可通过增大驱替压力进一步提高采出率, 故此类油藏适合注水开发且效果较好。但驱替压力过高也会改变孔隙中剩余油的分布, 将部分油挤进更小的孔隙中, 很难再被开采出来。驱替结束后所有尺度的孔隙中都有残余油分布, 即使大孔隙, T_2 谱显示也有部分残余油存在。对于超低渗透岩心, 水驱过程中压力较高且见水时水驱采出程度很低, 故此类油藏注水开发效果较差, 需通过酸化、压裂等技术改善储层物性, 或寻找其他途径有效开发。

关键词 核磁共振; 水驱油; 渗流机制; 剩余油

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.26.004

Water-drive Mechanism with Nuclear Magnetic Resonance Technology

XIONG Wei^{1,2}, ZHU Zhiqiang², GAO Shusheng³, HU Zhiming³, DING Kun⁴

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100087, China
2. Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
4. Qinghai Branch, China Petroleum Engineering Design Co. Ltd., Dunhuang 736202, Gansu Province, China

Abstract The conventional core analysis conducted interiorly usually could not give the oil flowing performance in the process of water-flooding and the distribution of residual oil at the end of water-flooding. However, with Nuclear Magnetic Resonance (NMR) T_2 relaxation spectrum, the oil movement in porous media and the distribution of remaining oil could be directly observed. Some core samples which had different permeability levels were chosen to conduct displacement experiments. The results show that for the cores with low permeability, the oil in the big pores will be displaced easily and the breakthrough recovery is high. Increasing displacement pressure is also able to further enhance the final oil recovery. Therefore, in the development process of these reservoirs, injecting water will be reasonable and realistic and is able to obtain better result. However, exorbitant displacement pressure might change the distribution of residual oil, that is, some parts of oil will be driven into the smaller pores and will become harder to be developed in the future. When the experiments have been completed, some of oils are still found in all sizes of the pores, including the big ones. For the cores with ultra-low permeability, breakthrough recovery is very low compared with the cores with low permeability. Therefore, water-flooding displacement is no longer an efficient development mode for these reservoirs. Oil field needs some other techniques, such as acidifying treatment, fracturing work, etc to assist the development of the cores with ultra-low permeability.

Keywords nuclear magnetic resonance; displacement; seepage mechanism; residual oil

收稿日期: 2011-06-15; 修回日期: 2011-08-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202404)

作者简介: 熊伟, 高级工程师, 研究方向为低渗透油藏储集层评价、渗流理论和油藏工程, 电子信箱: xiongwei69@petrochina.com.cn

0 引言

目前核磁共振技术在石油工业中的应用主要集中在2个方面^[1],一是核磁共振测井及解释评价,二是低场核磁共振室内岩心分析,后者可以获得更加准确多样的岩石信息,为渗流机制的探讨以及提高采收率的基础研究提供一种有效的辅助方法。在常规的水驱油实验中,只能简单地获得岩心进、出口端的流体(油、气和水)的注入量和产出量,无法得到岩心内部流体的分布状况,例如,在驱替过程中,岩心哪部分孔隙中的油容易被驱替出来,或提高驱替压力是否改变岩心内部流体的分布状况^[2-3];残余油是分布在大孔隙、中孔隙还是小孔隙^[4],各类孔隙中油对采出程度的贡献率等。前人在水驱油机制方面已经做了大量的工作^[5-8],但对水驱状态的划分并不细致,为了更详细地研究油相在储层内部的运动规律,本文结合核磁共振技术进行了水驱油实验,以此对储层渗流机制进行研究。

1 核磁共振测试原理

核磁共振技术是有效认识储层和测试储层参数的重要手段之一^[9]。核磁共振实验过程中测试的信号是岩心内部流体中氢元素的信号,氢元素越多,测量的信号就越大,地层水中有氢,很容易测量到饱和和地层水时的 T_2 谱线,因而很容易得到地层水在岩心中的分布情况。但是,要得到饱和油岩心的 T_2 谱却不容易。一般原油或模拟油中也含有氢元素,则测出的 T_2 谱线,即包含束缚水的信号也包含油的信号,无法区分。为了区分地层水与模拟油的信号,研究岩心在实验过程中孔隙饱和油或存在束缚水的情况,以及孔隙中的油在水驱的作用下被采出等问题,选用去除氢元素的特殊合成油进行水驱油实验。这样在含油时,油相占据的孔喉中,氢元素信号消失,探测到的信号始终为水的信号。从水信号的变化中可以得到油在孔隙内部的分布变化情况。如图1所示,两条曲线分别是饱和地层水和饱和合成油的 T_2 谱曲线,两曲线之间的面积(阴影部分)就能够准确反映合成油进入岩心内的分布状态,包括进入的孔隙类型以及进入量。

这里定义核磁共振弛豫时间小于10ms的为小孔隙,10—100ms之间的为中孔隙,大于100ms的为大孔隙,如图1所示。

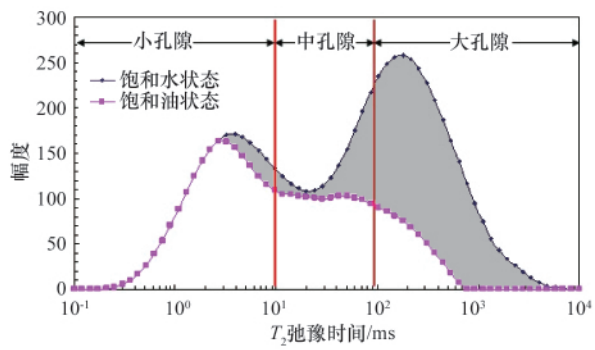


图1 孔隙尺度的定义

Fig. 1 Definition of pore size

2 实验方法

2.1 样品及条件

实验样品来自新疆油田的钻井取心,分别选用3类渗透率级差的岩心进行实验,A类岩心的渗透率为 $(10-50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属常规低渗透储层;B类岩心渗透率为 $(1-10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属特低渗透储层;C类岩心渗透率为 $(0.1-1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属超低渗透储层^[10]。

实验用水为模拟地层水,矿化度为30g/L;实验用油为氟氯合成油,黏度约为2.0mPa·s,密度为1.7695g/cm³。

实验温度为室温20℃。

2.2 过程

(1) 岩心经洗油、烘干、抽真空、饱和地层水后,测试饱和和地层水岩心的 T_2 谱线特征,此时为饱和水状态。

(2) 用氟氯合成油驱替岩心,饱和油直至没有水产出,计量岩心中的出水量,测试饱和油时岩心的 T_2 谱线特征,此时记为饱和油状态。

(3) 首先用小流量定流量进行水驱油实验,计量不同孔隙体积(PV)数(约0.1PV,0.2PV和1PV)下岩心中的出油量和出水量,直至不在有油驱出为止,计量岩心出水、出油量,计算采出程度。测试驱替后,岩心的 T_2 谱线特征,分别称为水驱油状态1、2、3。

(4) 提高驱替压力,驱替岩心,至不出油为止(一般3PV以上),计量出油量,并测试驱替后岩心的 T_2 谱线特征,此时为水驱油状态4。

(5) 进一步提高驱替压力,驱替岩心,至不出油为止(一般5PV以上),计量出油量,并测试驱替后岩心的 T_2 谱线特征,此时为水驱油状态5。

2.3 结果与分析

采用量筒接液计量(根据量筒中计量的油量和水量计算不同状态下采出程度)、称重密度计算(每次状态结束后,对岩心称重,利用质量差和密度计算采出程度)和核磁共振 T_2 谱线计算(通过曲线间的面积计算采出程度)3种方法计算每次驱替后的采出程度。各类渗透率级别岩心中选取具有代表性的一块作为实验结果分析,A类岩心的实验结果如表1所示,可以看出3种方法计算结果基本一致,表明实验数据的准确度较高。下面重点讨论不同驱替状态下的 T_2 谱线特征,了解不同孔隙类型对采出程度的贡献大小。图2—图4为3类岩

表1 3种方法的计算结果对比

Table 1 Results calculated by three methods

驱替状态	每次驱替采出程度/%		
	接液计算	密度计算	T_2 谱计算
水驱油状态1	31.33	32.56	34.74
水驱油状态2	39.00	40.38	43.89
水驱油状态3	48.00	49.43	50.22
水驱油状态4	53.67	55.31	56.55
水驱油状态5	63.00	64.75	65.25

心实测的 T_2 谱曲线 (C 类岩心只测试了 3 个不同压力的状态, 原因在于对于超低渗岩心, 渗透率和孔隙度极低, 前两个状态很难捕捉) 及不同驱替状态时不同孔隙对采出程度贡献率的直方图。

分析以上结果, 可以得出:

(1) 从图 2—图 4 可以看出, 不同渗透率级差的岩心中, 不同孔隙类型对采出程度的贡献不同, 渗透率越大, 大中孔隙所占比例越大, 对采出程度的贡献越大, 水驱最终采收率也越高。

(2) 由图 2 可以看出, 对于低渗透岩心, 小流量驱替下,

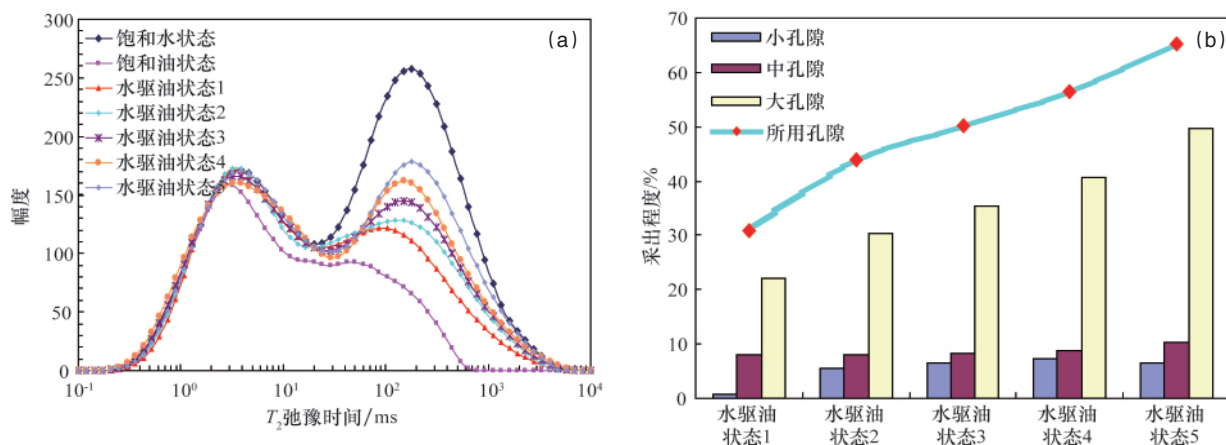


图 2 A 类岩心核磁 T_2 谱 (a) 及各孔隙对采出程度的贡献直方图 (b)

Fig. 2 T_2 spectrum test (a) and contribution rates (b) from different pores for A type cores

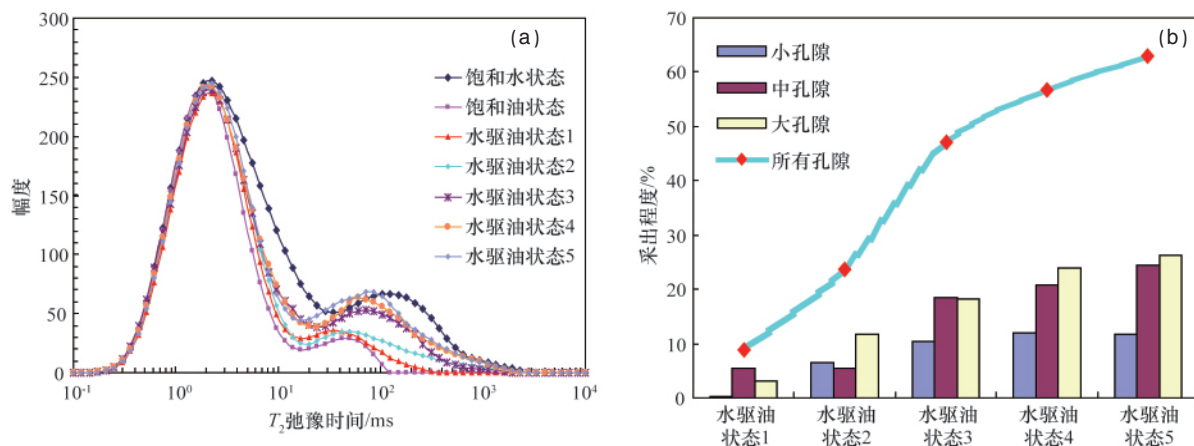


图 3 B 类岩心核磁 T_2 谱 (a) 及各孔隙对采出程度的贡献直方图 (b)

Fig. 3 T_2 spectrum test (a) and contribution rates (b) from different pores for B type cores

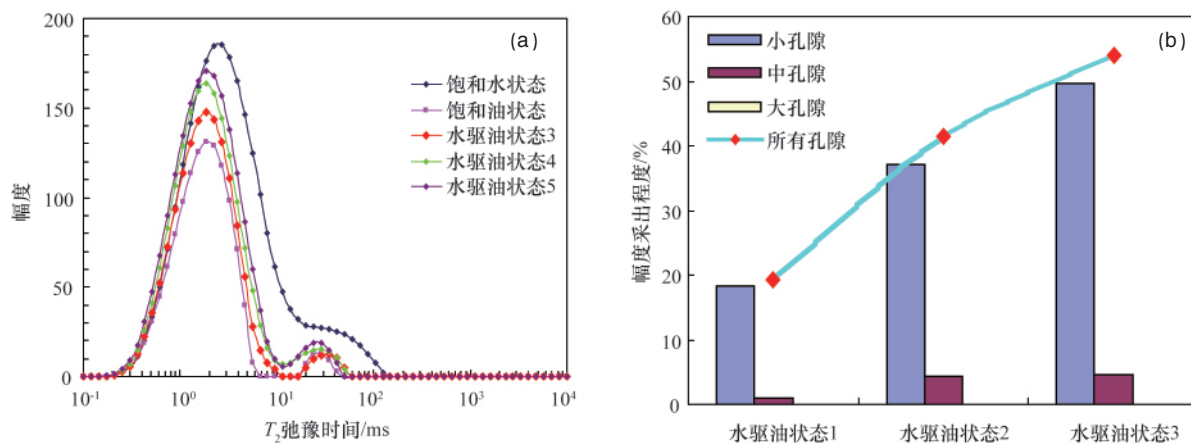


图 4 C 类岩心核磁 T_2 谱 (a) 及各孔隙对采出程度的贡献直方图 (b)

Fig. 4 T_2 spectrum test (a) and contribution rates (b) from different pores for C type cores

首先是大、中孔隙中的油被驱替出来,小孔隙基本对采出程度没有贡献,如水驱油状态 1。随着 PV 数的增加,小孔隙对采出程度有所贡献,但仍然是大孔隙的贡献起主要作用,如水驱油状态 2 和水驱油状态 3,此时采出程度达到 50%(即无水采收率为 50%)。见水后提高驱替压力,大中小孔隙对采出程度都有贡献,但增加较多的是占有较大比例的大孔隙,如水驱油状态 4。进一步提高压力,驱替结束后采收率达到 65%,如水驱油状态 5,这部分油全由大、中孔隙中驱出,小孔隙中含油反而增多了,即小孔隙在水驱油状态 5 时对采出程度的贡献出现负值(小孔隙对采出程度的贡献率从 7.32%下降为 6.45%,即-0.87%),所以驱替压力过大并不能保证所有孔隙对采收率有所贡献。从核磁测试的结果可以得出,过大的驱替压力会改变孔隙中剩余油的分布,将少量油从大孔隙中挤入小孔隙,而这部分油很难再被驱替出来。

(3) 由图 3 可以看出,对于特低渗透岩心,但存在一定比例大孔隙的岩心(弛豫时间大于 10ms 的孔隙比例为 30%左右),驱替过程中,各类孔隙对采出程度的贡献与低渗透岩心相似,但中孔隙所占比例已经和大孔隙持平。小孔隙在驱替压力过大时对采出程度的贡献率也会出现负值。相比低渗透岩心,最终采收率略低。

(4) 由图 4 可以看出,对于超低渗透岩心,大孔隙几乎不存在(弛豫时间大于 10ms 的孔隙比例占 5%以下),对采出程度的贡献只能是占有绝大比例的小孔隙所提供,提高压力或流量,可以提高采收率,但最终的采收率比低渗透、特低渗透岩心低约 10%,水驱最终效果较差。

(5) 从图中还可以看出,低渗、特低渗透岩心见水后(水驱油状态 3),采收程度接近 50%,但仍可以通过提高驱替压力或流量提高采收程度,使其最终可达 60%以上;对于超低渗透岩心,岩心见水(水驱油状态 3)后,采出程度仅为 20%左右,相比其他两类,采出程度相差较大。

(6) 无论是增加驱替 PV 数,还是提高驱替压力或流量,虽能一定程度下提高岩心采出程度,但都不能使孔隙中的油完全被驱替出来,即使是大孔隙仍然有剩余油的分布,如图 2、图 3 中水驱油状态 5 曲线与饱和水曲线之间的部分和图 4 中水驱油状态 5 曲线与饱和水曲线之间的部分。

3 结论

(1) 通过核磁共振技术能够准确认识到不同采油阶段不同孔隙对采出程度的贡献率。

(2) 对于低渗、特低渗透岩心,无水采油期随着注水量的增加,岩心大孔隙中的油较容易采出,对采出程度的贡献也较大,见水后可以通过提高驱替压力来提高最终的采收率。所以对于低渗透、特低渗透油藏,有效的注水开发能够达到较满意的结果。

(3) 低渗、特低渗透岩心通过提高驱替压力,虽可进一步提高采出程度,但过高的驱替压力会改变油藏中剩余油的分布,使部分油被挤进入更小的孔隙中。所以油田开发后期可

以通过井网调整和加密进一步提高最终采出程度。

(4) 对于超低渗透岩心,无水采收率较低,实验室提高压力虽可以通过提高压力提高采出程度,但矿场实际并不容易满足,所以对的有效开发,仅靠注水是不大理想的,需寻找其他途径(酸化、压裂等技术)合理开发超低渗透油藏。

参考文献 (References)

- [1] 肖立志. 我国核磁共振测井应用中的若干重要问题 [J]. 测井技术, 2007, 30(5): 401-407.
Xiao Lizhi. *Well Logging Technology*, 2007, 30(5): 401-407.
- [2] 胡志明, 郭和坤, 熊伟. 核磁共振技术采油机理[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(S1): 38-40.
Hu Zhiming, Guo Hekun, Xiong Wei. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2009, 28(S1): 38-40.
- [3] 邓瑞健. 核磁共振技术在水驱油实验中的应用 [J]. 断块油气田, 2002, 9(4): 33-36.
Deng Ruijian. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2002, 9(4): 33-36.
- [4] 贾丽华. 用核磁共振技术研究特高含水期剩余油分布[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(1): 40-42.
Jia Lihua. *Oil-Gas Filed Surface Engineering*, 2011, 30(1): 40-42.
- [5] 张硕. 低渗透油藏 CO₂ 气驱渗流机理核磁共振研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2009, 26(3): 228-232.
Zhang Shuo. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2009, 26(3): 228-232.
- [6] 郭建. 水驱油孔隙动用规律的核磁共振实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2005, 20(5): 45-48.
Guo Gongjian. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2005, 20(5): 45-48.
- [7] 孙军昌. 火山岩气藏微观孔隙结构及核磁共振特征实验研究 [D]. 廊坊:中国科学院渗流流体力学研究所, 2009: 33-35.
Sun Junchang. Experimental study of micro-structure and NMR features of volcanic gas reservoir [D]. Langfang: Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 33-35.
- [8] 杨正明, 郭和坤, 姜汉桥, 等. 火山岩气藏不同岩性核磁共振实验研究 [J]. 石油学报, 2009, 30(3): 400-408.
Yang Zhengming, Guo Hekun, Jiang Hanqiao, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 400-408.
- [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: 10-15.
Xiao Lizhi. Nuclear magnetic resonance (NMR) imaging logging and rock nuclear magnetic resonance (NMR) and its application [M]. Beijing: Science Press, 1998: 10-15.
- [10] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 4-5.
Huang Yanzhang. Porous flow mechanics for low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 4-5.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。