

核磁共振研究低渗透砂岩油水两相渗流规律

王学武, 杨正明, 时宇, 李海波

中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007

摘要 低渗透岩芯孔喉细小, 孔隙结构复杂, 人造微观孔隙模型很难真实反映其微观孔隙结构。本研究利用真实岩芯, 以去氢煤油为模拟油, 利用核磁共振技术, 研究了油水两相渗流规律, 揭示了排驱和吸入过程的束缚水、残余油和采出油在不同孔隙中的分布, 讨论了其形成机制, 定量研究了驱替过程中渗吸作用的程度。结果表明, 随着孔隙半径的增大, 孔隙中束缚水饱和度逐渐降低, 大于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的孔隙空间是低渗透储层主要的储集空间, 而残余油主要分布在中小孔隙, 并且低渗透储层渗吸作用明显。本研究丰富了核磁共振技术在油田开发中的应用。

关键词 低渗透; 核磁共振; 渗流; 残余油; 渗吸

中图分类号 TE122.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0056-03

Experimental Study of Water-oil Two-phase Fluid Flow in Low Permeability Reservoir by Nuclear Magnetic Resonance

WANG Xuewu, YANG Zhengming, SHI Yu, LI Haibo

Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract A low permeability reservoir features fine throat and complex porous structure, which an artificial micro pore model can not well represent. A water flooding experiment was carried out with the real core and simulated oil without hydrogen. The water-oil two-phase fluid flow was studied using the technique of nuclear magnetic resonance, to obtain the distribution of irreducible water, irreducible oil and produced oil in cores of different porosity during drainage and imbibition, and to reveal the formation mechanism and imbibition mechanism quantitatively during the water displacement. The results show that the bigger the pore radius is, the lower the irreducible water saturation will be; the main reservoir space of low permeability reservoir is a medium with pores of more than $0.1\ \mu\text{m}$ in radius; residual oil is mainly distributed in mid-small pores; and imbibition is significant in low permeability reservoir.

Keywords low permeability reservoir; nuclear magnetic resonance; percolation flow; irreducible oil; imbibition

0 引言

油水两相渗流是渗流科学的一个重要研究领域, 也是石油工业的理论基础之一。近年来, 中国在微观孔隙模型两相驱替实验方面进展很快, 使用的实验模型不断改进, 模型的孔隙结构性质越来越接近实际储集岩。目前常用的微观驱替实验模型有蚀刻模型、粒状填充模型和砂岩孔隙模型等, 采用这些模型可直观地观测到两相渗流过程, 但仍与真实岩芯存在一定差距^[1-5]。本研究应用核磁共振手段, 对大庆外围低渗透岩芯的油水两相渗流过程进行研究, 揭示两相流体在多孔介质中的微观渗流规律和微观剩余油分布规律, 为油田开发调整提供指导。

1 材料及方法

1.1 实验装置

实验装置由驱动系统、岩芯夹持装置、采出液收集系统、核磁共振测试仪等组成。其中驱动系统采用 1 台 ISCO 500D 双缸柱塞泵, 其流量范围为 $0\sim 200\ \text{mL/min}$, 精度为 1%; 核磁共振测试采用渗流所研制的 Magnet 2000 型核磁共振岩样分析仪。

1.2 实验材料

岩芯采用直径为 $2.5\ \text{cm}$ 的真实地层岩芯, 长度为 $5.0\ \text{cm}$, 渗透率为 $6.4\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

收稿日期: 2009-06-05

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重点科技攻关项目 (06-02A-02-01)

作者简介: 王学武, 博士研究生, 研究方向为油层物理和渗流力学, 电子信箱: wangxuewu@163.com; 杨正明 (通信作者), 高级工程师, 研究方向为油层物理和渗流力学, 电子信箱: yzmhxj@263.net

实验所用流体为模拟地层水和模拟油。模拟地层水按地层水矿化度配制,矿化度为 6.2 g/L;模拟油为去氢模拟油(无核磁信号),在地层温度 64℃下,其黏度为 4.2 mPa·s。

1.3 实验方法

核磁共振不仅反映岩芯的孔隙结构,而且还受孔隙流体组分的影响^[6]。由于模拟油采用的氟油没有核磁信号,因此核磁测得的是岩芯中模拟水的信号,测试结果能准确反映流体在孔隙中的分布。实验岩芯同时测量了饱和模拟地层水时的 T_2 谱分布,并进行了压汞测试,因此可根据文献方法^[7-10],将 T_2 弛豫时间转化为孔隙半径 r 。其实验步骤如下:① 将岩样抽真空饱和地层水,用核磁共振测试其饱和水状态的 T_2 谱图;② 饱和模拟油,建立束缚水,用核磁共振测试其束缚水状态的 T_2 谱图;③ 采用恒定速度进行水驱油,记录中间过程的压力、油水产出量及 T_2 谱图;④ 水驱至没有油产出时,用核磁共振测试其残余油状态的 T_2 谱图。

2 结果分析

2.1 油驱水排驱实验

所用的岩芯为水湿,在多孔介质中两相流动时,存在毛管阻力 P_c , $P_c=2\sigma\cos\theta/r$, 其中 r 为喉道半径, σ 为表面张力, θ 为接触角。油驱水排驱过程中,只有当驱动压力大于毛管阻力时,油才能驱动水向前运移。由于多孔介质毛细管大小不一,油优先进入孔径最大的孔道,随着压力增加,逐渐进入较小的孔道。

图 1 为低渗透岩芯饱和水状态和饱和油状态的 T_2 谱图。饱和油状态下测得的 T_2 谱图为束缚水在孔隙中的分布。可以看出,束缚水主要分布在小孔隙空间,孔隙结构非均质性(微观上孔隙喉道大小的不均匀分布)对由毛细管作用引起的束缚水的形成有很大影响。油驱水时,油首先沿周围毛细管阻力小的大孔隙将水排走,进而将中间小孔隙群中的水包围起来。当排驱压力超过小孔隙群的毛细管压力时,小孔隙群已没有通道能让其中的水排出,从而形成束缚水。对于大小孔隙并联和 H 型孔隙,非润湿相油首先通过毛细管阻力较小的粗孔隙前行,形成绕流,从而将小孔隙中的水包围,断绝它与其他水在水动力上的联系,这也是形成束缚水的重要原因。

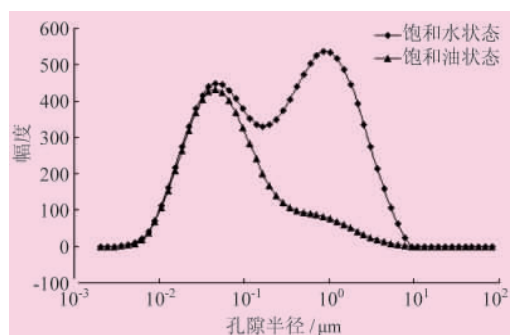


图 1 饱和水状态和饱和油状态的 T_2 谱图

Fig. 1 T_2 spectra distribution of water-saturated and oil-saturated states

对于较大空隙中的束缚水,主要是由于孔隙的形状不规则而在孔隙的死角处形成束缚水。

图 2 为不同孔隙中的束缚水饱和度分布。随着孔隙半径的增大,孔隙中束缚水饱和度逐渐降低,尤其当孔隙半径大于 0.1 μm 时,随着孔隙半径的增加,束缚水饱和度迅速降低,可见大于 0.1 μm 的孔隙空间是油主要的储集空间。

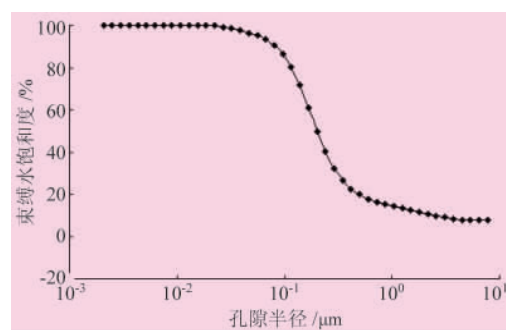


图 2 不同孔隙中的束缚水饱和度

Fig. 2 Irreducible water saturation in different pores

2.2 水驱油实验

图 3 为该岩芯水驱油过程中的 T_2 谱图。核磁共振测得的是水的信号,因此,饱和油状态和饱和水状态两条曲线之间区域为饱和进岩芯的油在孔隙中的分布;饱和油状态与见水状态两曲线之间区域为见水时采出油在孔隙中的分布;饱和水状态和残余油状态两曲线之间部分为最终采出油在孔隙中的分布;饱和水状态和残余油状态两曲线之间部分为残余油在孔隙中的分布。从图 3 可以看出,当见水时,大孔隙中的油已经采出程度比较高,而中小孔隙中的油采出程度较低,可见,水驱过程,水优先沿渗流阻力较小的大孔隙推进。图 4 为不同孔隙中油的最终采出程度。从图 4 可以看出,当孔隙半径大于 0.2 μm 左右时,随着孔隙半径的增加,最终采出程度也增大,说明随着孔隙半径的增加,其渗流阻力减小,有效驱动力增大,采出程度增加;当孔隙半径小于 0.2 μm 左右时,随着孔隙半径的较小,最终采出程度也有所增大,说明当孔隙半径小于 0.2 μm 左右时,随着半径的减小,毛管力作用增强,对于亲水岩芯,在水驱过程中,毛管力是驱油动力,因此随着孔隙半径的减小,采出程度增加。

从残余油分布规律来看,残余油主要分布在中小孔隙,而特别小的孔隙中由于基本未饱和进油,残余油极少,大孔隙中的残余油也较少。中小孔隙中的残余油,主要是由于注入水在孔隙空间内的绕流形成的。在水驱油过程中,注入水优先沿着阻力较小的孔道前进,即微观指进。当两条突进的水道在前方某些孔道合拢后,两条水道之间的油块就会残留下来,形成残余油。这是因为注入水总是沿着阻力最小的孔道流动,当注入水的通道形成后,水在这些通道内的流动阻力会大幅降低,从而更有利于水的流动,而油层内广泛存在微观非均质性,所以残余油在水驱油过程中能大量形成。在一些大孔隙中,大部分原油被水驱走,但水主要沿着亲水的

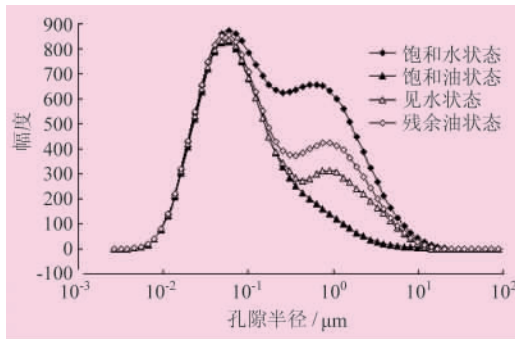
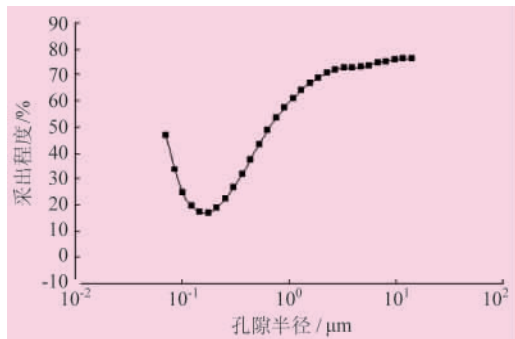
图3 水驱油过程中的 T_2 谱图Fig. 3 T_2 spectra distribution during water driving

图4 不同孔隙空间油的采收率

Fig. 4 Oil recovery in different pores

岩石壁面或壁面上的水膜前进,当孔道中形成连续水相,孔隙内的油被完全驱走之前,水已占据了油流通道前的喉道使油流被卡断,油即以油滴的形式留在大孔隙内,成为“孤岛状”残余油。此外,由于大孔隙形状极不规则,注入水未驱到的孔隙边角处也是重要的残余油聚集区。

2.3 驱替条件下的渗吸

核磁共振 T_2 截止值所对应的孔喉半径为单相流体流动孔喉半径下限^[11]。采出油既有大于此孔喉半径的孔隙空间的油,这部分油主要靠水的驱动力采出;又有小于此孔喉半径的孔隙空间的油,这部分油主要是靠渗吸作用采出^[12]。

对6块低渗透岩芯进行水驱油实验,当见水时,依靠渗吸作用采出模拟油的采出程度为1.14%~2.16%,而依靠驱动力作用采出模拟油的采出程度为22.37%~26.59%;水驱最终状态,依靠渗吸作用采出模拟油的采出程度为6.88%~9.86%,而依靠驱动力作用采出模拟油的采出程度为31.54%~36.89%。可见,水驱初期主要是驱动力作用,依靠渗吸作用采出模拟油较少,而水驱后期渗吸作用增大,依靠渗吸作用采出的模拟油也迅速增加。依靠渗吸作用驱出的采收率占总采收率的18%左右,因此在低渗透亲水砂岩油藏中,渗吸的作用不可忽视。

3 结论

1) 采用核磁共振手段研究油水两相渗流规律,可以定量得到不同阶段油水在不同大小孔隙中的分布。

2) 随着孔隙半径的增大,孔隙中束缚水饱和度逐渐降低,大于0.1 μm 的孔隙空间是低渗透储层油主要的储集空间。

3) 残余油主要分布在中小孔隙,特别小的孔隙中由于基本未饱和进油,残余油极少,大孔隙中的残余油也较少。

4) 低渗透岩芯驱替过程中渗吸作用明显,充分利用渗吸作用对提高采收率具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 郭尚平, 黄延章, 周娟, 等. 物理化学渗流微观机理 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Guo Shangping, Huang Yanzhang, Zhou Juan, et al. Micro-mechanism of physical chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [2] 曲志浩, 孔令荣. 用透明孔隙模型研究油层残余水的形成 [J]. 石油实验地质, 1986, 8(1): 72-77.
Qu Zhihao, Kong Lingrong. *Petroleum Geology and Experiment*, 1986, 8(1): 72-77.
- [3] 朱玉双, 孔令荣, 曲志浩, 等. 利用真实砂岩微观孔隙模型研究粘性不稳定指进[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1998, 28(2): 166-168.
Zhu Yushuang, Kong Lingrong, Qu Zhihao, et al. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 1998, 28(2): 166-168.
- [4] 李中锋, 何顺利, 杨文新, 等. 微观物理模拟水驱油实验及残余油分布分形特征研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 67-70.
Li Zhongfeng, He Shunli, Yang Wenxin, et al. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2006, 30(3): 67-70.
- [5] 朱华银, 周娟, 万玉金, 等. 多孔介质中气水渗流的微观机理研究[J]. 石油实验地质, 2004, 26(6): 571-573.
Zhu Huayin, Zhou Juan, Wan Yujin, et al. *Petroleum Geology and Experiment*, 2004, 26(6): 571-573.
- [6] 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.
- [7] 运华云, 赵文杰, 周灿灿, 等. 利用 T_2 分布进行岩石孔隙结构研究[J]. 测井技术, 2002, 26(1): 18-21.
Yun Huayun, Zhao Wenjie, Zhou Cancan, et al. *Well Logging Technology*, 2002, 26(1): 18-21.
- [8] 刘堂宴, 马在田, 傅容珊. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 328-333.
Liu Tangyan, Ma Zaitian, Fu Rongshan. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(4): 328-333.
- [9] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 737-742.
He Yudan, Mao Zhiqiang, Xiao Lizhi, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(2): 737-742.
- [10] 李海波, 朱巨义, 郭和坤. 核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志, 2008, 25(2): 273-279.
Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2008, 25(2): 273-279.
- [11] 万文胜, 杜军社, 佟国彰, 等. 用毛细管压力曲线确定储集层孔隙喉道半径下限[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 104-106.
Wan Wensheng, Du Junshe, Tong Guozhang, et al. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(1): 104-106.
- [12] 朱维耀, 鞠岩, 赵明, 等. 低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 56-59.
Zhu Weiyao, Ju Yan, Zhao Ming, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(6): 56-59.

(责任编辑 代丽)