

储层润湿性改变对采收率的影响

苏 欢¹ 吴新民² 李文彬³

(1. 中国石油川庆钻探工程有限公司 钻采工程技术研究院,陕西 西安 710021;2. 西安石油大学 石油工程学院,陕西 西安 710065;3. 中国石油川庆钻探工程有限公司 长庆井下技术作业公司,陕西 西安 710021)

摘 要:改变储层润湿性是提高原油采收率的重要手段之一,传统的观点认为:注水开发时,岩石表层亲水更容易使油滴从岩石表面剥落下来。通过天然岩心润湿性测定和驱油剂驱油试验发现,驱油剂能提高驱油效率 10% 左右,驱油剂并不能将岩石的润湿性转变成水湿,而是向着中性润湿的方向发展。通过分析毛管力发现,在水驱油到残余油状态时,毛管力是阻力,将阻碍原油从微小的孔隙吼道中流出。由毛管力计算公式可知,当润湿角为 90°时,毛管力最小。因此得出结论:中性润湿最有利于提高采收率;驱油剂不但能使储层岩石向中性润湿发展,同时能起到降压增注的作用。

关键词:储集层;润湿性;采收率;毛细管压力;驱油效率
中图分类号:TE311 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)06-0092-03

The Effect of Change of Reservoir Wettability on Oil Recovery

Su Huan¹ Wu Xinmin² Li Wenbin³

(1. Research Institute of Drilling Engineering, Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710021, China; 2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China; 3. Changqing Underground Technology Operating Company, Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710021, China)

Abstract: The change of wettability is one of the important means to improve oil recovery. It is believed that rock hydrophilic surface is easier to flake the oil droplets from the rock surface under water-flooding. Through the experiments of measuring wettability and oil displacement, it is found that oil displacement agent can improve efficiency by 10%. It turned the rock wettability into intermediate wettability instead of water-wet. Though the analysis of capillary force, it shows that capillary force becomes resistance force which prevents oil flowing from micro-pore-throat when oil saturation reaches residual oil saturation under water-flooding. According to the theory of capillary force, the force reaches minimum when the contacting angle is 90 degree. The conclusion is that intermediate wettability is the most favorable to enhance oil recovery, and the oil displacement agent not only change the wettability but also decrease pressure and increase injection.

Key words: reservoir; wettability; recovery factor; capillary pressure; oil displacement efficiency

油层的润湿性是油田注水开发中普遍关注的问题,因为当水驱油时,原油采收率的高低、驱油效果的好坏在很大程度上与地层岩石的润湿性有关^[1]。传统观点认为,在均质润湿系统中,水湿储层比油湿储层的驱油效果要好,原油采收率要高。这可解释为:在水湿地层中,水所波及的孔道范围更大,水的润湿作用若能充分发挥,则油层颗粒表面上的原油就被采出更多^[2]。根据大量文献调研发现,对降低界面张力的研究已经很成熟,但是岩石润湿性的改变对原油采收率的影响程度的认识还不够具体系统,为此,笔者通过室内试验,分析了储层润湿性的改变对原油采收率的影响程度。

1 室内试验

为了弄清润湿性对采收率的影响程度,首先测定两种驱油剂对天然岩心润湿性的改变程度,再利用岩心驱替装置测定这两种驱油剂的驱油效率,并

收稿日期:2009-09-28;改回日期:2010-10-17

作者简介:苏欢(1983—),女,陕西西安人,2007年毕业于西安石油大学电气工程及其自动化专业,2010年获西安石油大学油气井工程专业硕士学位,助理工程师,主要从事钻井液技术研究工作。

联系方式:(029)86597010,suhuan873@163.com

以此来评价润湿性的改变对采收率的影响。

试验温度 40 ℃;试验用水为西区延安组模拟地层水;试验用油为由煤油、西区原油、变压器油配成的模拟油,其黏度为 2.21 mPa·s,密度为 0.81 kg/L。

1.1 润湿性测定

采用文献[3]中的自吸法测定岩石的润湿性。试验岩心为空气渗透率接近的天然岩心。试验步骤

为:岩心洗油烘干→抽真空饱和地层水→油驱→自吸水排油→水驱→自吸油排水→油驱→岩心二次洗油烘干→抽真空饱和地层水→油驱→自吸水排油(模拟地层水中加入 0.3%驱油剂)→0.3%驱油剂溶液水驱→自吸油排水→油驱。

在每个过程中记录排水量和排油量,采用文献[3]中的计算公式计算出润湿指数和相对润湿指数,结果见表 1。

表 1 岩心润湿性测定试验结果
Table 1 Experimental results of core wettability measurement

岩心号	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度, %	润湿指数		相对润湿指数	润湿类型
			油湿指数	水湿指数		
1 号	93.309	19.25	0.063	0.901	0.838	强亲水
5 号	90.884	19.05	0	0.854	0.854	强亲水
1 号加 13 [#]	93.309	19.25	0.156	0.806	0.650	亲水
5 号加 13 [#]	90.884	19.05	0.111	0.761	0.650	亲水
2 号	114.790	19.73	0	0.871	0.871	强亲水
4 号	134.135	19.79	0	0.825	0.825	强亲水
2 号加 26 [#]	114.790	19.73	0.074	0.793	0.718	强亲水
4 号加 26 [#]	134.135	19.79	0.052	0.732	0.680	亲水

从表 1 可以看出:1 号和 5 号岩心在加入 13[#] 驱油剂前都是强亲水型,加入 13[#] 驱油剂后均变成亲水型,均朝着中性润湿方向发展;2 号和 4 号岩心在加入 26[#] 驱油剂前都是强亲水型,加入 26[#] 驱油剂后,4 号岩心变成亲水型,2 号岩心虽然没有变成亲水型,但相对润湿指数在降低,也向着中性润湿方

向发展。

1.2 岩心驱油效率试验

试验步骤为:岩心抽真空饱和地层水→油驱水→水驱油至含水 98%→注入 0.5 倍孔隙体积驱油剂→水驱油至含水 99%~100%。试验结果见表 2。

表 2 人工岩心驱油试验结果
Table 2 Experiment data of oil displacement for artificial core

岩心号	气测渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	水测渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度, %	束缚水饱和度, %	注前驱油效率, %	注后驱油效率, %	注入驱油剂	驱油效率增加值, %
25-17	29.0	26.65	17.81	39.12	68.39	80.83	13 [#]	12.44
25-25	24.0	17.49	17.13	39.01	67.75	79.95	13 [#]	12.20
25-18	27.0	23.01	17.68	36.29	63.04	73.16	26 [#]	10.12
25-28	27.0	17.28	17.59	38.68	67.80	74.61	26 [#]	6.81

从表 2 可以看出:在同样的条件下,注入 13[#] 和 26[#] 驱油剂后,4 块岩心驱油效率的提高幅度都很明显,都提高 5%以上,其中有 3 块岩心提高 10%以上。

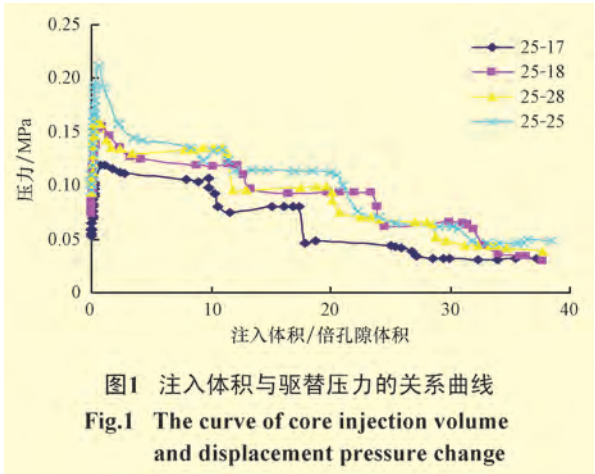
图 1 为 4 块岩心整个驱油试验过程中驱替压力与注入体积的关系曲线。

从图 1 可以看出,压力都呈下降趋势,基本上下降了 2/3 左右,表面活性剂在一定程度上起到降压增注的作用。同时由于压力的下降提高了水的波及系数,增大了注入量,从而提高了采收率。

2 试验结果分析

通过以上润湿性试验和驱油试验可以得出结

论:13[#]、26[#] 驱油剂能改变岩石的润湿性,但并没有



将岩石从亲油性转变成亲水性,而是向着中性润湿方向转变。经过驱油试验发现,注入了一定量的驱油剂后,驱油效率较注驱油剂前平均提高10%左右,提高幅度很可观。

理论分析认为:改变岩石润湿性的驱油剂应该使岩石的润湿性由亲油性变为亲水性更容易提高采收率^[4-6]。根据理论似乎解释不了这次试验的结果,也找不到2个驱油剂大幅度提高采收率的原因。

对于亲油油层,由于油能优先润湿岩石的颗粒表面,油与固体颗粒间存在着较强的附着力。当注入水进入亲油孔道时,由于油与岩石表面的附着力,使水很难与岩石表面接触和在岩石表面流动,并且毛管力为驱油阻力^[7]。另一方面,水的黏度比油更小,水会沿孔道中心窜流而留下油膜,成为残余油^[8]。分析发现,当水驱到残余油状态的时候,所有的毛管力将成为阻力,阻碍油的流通,只有降低毛管力,才能增大原油的流动能力,从而提高采收率^[9-10],结合毛管力的理论来分析试验结果^[11]。

毛管力的计算公式为:

$$p_c = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中: p_c 为岩样的毛管压力,Pa; σ 为两相间界面张力,N/m; θ 为润湿接触角,(°); r 为毛管半径,m。

由式(1)可以看出,当 $\cos\theta$ 最小的时候,岩样的毛管力最小,也就是说,当 $\theta=90^\circ$ 时 p_c 最小。从接触角的角度来衡量润湿程度的标准为: $\theta=0^\circ$ 时为强水湿, $\theta<90^\circ$ 时为水湿, $\theta=90^\circ$ 时为中间润湿, $\theta>90^\circ$ 时为油湿, $\theta=180^\circ$ 为强油湿。由此可以看出, $\theta=90^\circ$ 即为中性润湿,也就是说岩石的润湿性达到中性的时候,毛管阻力最小。

试验结果显示,13[#]和26[#]驱油剂均将岩石的润湿性转变为中性润湿或接近中性润湿,最大程度上降低了岩样的毛管阻力,同时在这一条件下油水界面张力也最小,13[#]和26[#]驱油剂能明显提高采收率的原因是将岩石转变成了中性润湿。

通过上述毛管力的理论分析可以看出,中间润湿能将毛管阻力降至最低,原油和岩石之间的界面张力最小,提高了水的波及系数,从而提高了原油采收率。

3 结 论

1) 从毛管力的理论分析发现:当润湿接触角 $\theta=90^\circ$ 时,阻碍原油流动的毛管力最小,原油最容易从岩石表面剥落,此时,从润湿性的角度来说,岩石

正处在中间润湿。也就是说,驱油剂将岩石润湿性改变成中性润湿能提高采收率。

2) 驱油剂不但起到了改变储层岩石润湿性的作用,同时可以有效降低注入压力梯度,增加注入量,起到了降压增注的作用,从而有效提高采收率。

参 考 文 献

- [1] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社,1994:177-194.
He Gengsheng. Reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1994:177-194.
- [2] 王凤清,姚同玉,李继山. 润湿性反转剂的微观渗流机理[J]. 石油钻采工艺,2006,28(2):40-43.
Wang Fengqing, Yao Tongyu, Li Jishan. Microscopic porous flow mechanics of wetting alteration agents[J]. Oil Drilling & Production Technology,2006,28(2):40-43.
- [3] SY/T 5153—2007 油藏岩石润湿性测定方法[S].
SY/T 5153—2007 Test method of reservoir rock wettability[S].
- [4] 陈蓉,曲志浩,赵阳. 油层润湿性研究现状及对采收率的影响[J]. 中国海上油气:地质,2001,15(5):350-355.
Chen Rong, Qu Zhihao, Zhao Yang. The study history of reservoir wettability and its effect on recovery[J]. China Offshore Oil and Gas:Geology,2001,15(5):350-355.
- [5] 鄢捷年. 油藏岩石润湿性对注水过程中驱油效率的影响[J]. 石油大学学报:自然科学版,1998,22(3):43-46.
Yan Jienian. Effect of rock wettability on oil recovery by waterflooding[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition,1998,22(3):43-46.
- [6] 彭珏,康毅力. 润湿性及其演变对油藏采收率的影响[J]. 油气地质与采收率,2008,15(1):72-76.
Peng Jue, Kang Yili. Effect of wettability and its evolution on oil reservoir recovery[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2008,15(1):72-76.
- [7] 刘中云,曾庆辉,唐周怀,等. 润湿性对采收率及相对渗透率的影响[J]. 石油与天然气地质,2000,21(2):148-150.
Liu Zhongyun, Zeng Qinghui, Tang Zhouhuai, et al. Effect of wettability on recovery and relative permeability[J]. Oil & Gas Geology,2000,21(2):148-150.
- [8] 任晓娟,刘宁,曲志浩,等. 改变低渗透砂岩亲水性油气层润湿性对其相渗透率的影响[J]. 石油勘探与开发,2005,32(3):123-124,134.
Ren Xiaojuan, Liu Ning, Qu Zhihao, et al. Effect of wettability alteration on the relative permeability of low-permeability water-wet oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development,2005,32(3):123-124,134.
- [9] 程军. 改变井底油层段的润湿性以提高驱油效率的室内研究[J]. 山东化工,2008,37(3):14-16.
Cheng Jun. Wettability alteration of bottomhole formation area as enhanced oil recovery method[J]. Shandong Chemical Industry,2008,37(3):14-16.
- [10] 宋新旺,张立娟,曹绪龙,等. 润湿性对油水渗流特性的影响[J]. 油田化学,2008,25(4):305-308.
Song Xinwang, Zhang Lijuan, Cao Xulong, et al. Effects of wettability on oil and water flow through porous media[J]. Oilfield Chemistry,2008,25(4):305-308.
- [11] 任向海,刘波,李扬帆. 润湿性反转剂在低渗透和底水油藏中的应用[J]. 断块油气田,2008,15(5):72-74.
Ren Xianghai, Liu Bo, Li Yangfan. Application of wettability reversal agent in low permeability and bottom water oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2008,15(5):72-74.