

表面活性剂对低渗透油藏渗吸敏感因素的影响

李洪¹, 李治平¹, 王香增², 王才¹, 白瑞婷¹

(1. 非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室(中国地质大学(北京)), 北京 100083; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075)

摘要:界面张力和岩石润湿性是影响毛细管压力大小的决定性因素, 因此研究表面活性剂对这两个因素的影响, 可以充分发挥渗吸作用、提高低渗透油田原油的渗吸采收率。利用7块不同渗透率的亲水人造岩心, 通过渗吸试验、旋滴法和动态接触角法研究了表面活性剂对油水界面张力、水湿表面润湿性、毛细管压力以及渗吸采收率的影响。试验结果发现: 随着表面活性剂 RS-1 质量分数的增大, 油水界面张力先有较大幅度降低后略有升高, 最后趋于平稳; 表面活性剂具有很强的改变水湿表面润湿性的能力, 且能降低毛细管压力、提高渗吸采收率。研究表明: 表面活性剂降低界面张力效果明显, 并且复配表面活性剂降低界面张力的效果比单一活性剂好, 岩样渗吸采收率与油水界面张力和毛细管压力的对数呈线性负相关关系。

关键词:表面活性剂; 低渗透油藏; 渗吸; 界面张力; 润湿性; 采收率

中图分类号: TE312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)05-0100-04

The Effect of Surfactants on Imbibition-Sensitive Factors of Low-Permeability Reservoirs

LI Hong¹, LI Zhiping¹, WANG Xiangzeng², WANG Cai¹, BAI Ruiting¹

(1. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering (China University of Geosciences (Beijing)), Beijing, 100083, China; 2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710075, China)

Abstract: Interfacial tension and wettability are decisive factors for capillary force. Identifying the effect of surfactants on interfacial tension and wettability can be beneficial in improving the oil imbibition recovery rate in low permeability reservoirs. In this study, the effects of surfactants on the oil-water interfacial tension, surface wettability, capillary pressure and imbibition recovery were investigated through imbibition tests, spinning drop and dynamic contact angle methods, with 7 hydrophilic artificial cores with different permeability. Research results suggest that oil-water interfacial tension decreases significantly as the mass fraction of surfactant RS-1 increases, and then increases slightly before eventually becoming stable. The surfactant is highly capable in water wet surface wettability change, and can reduce the capillary pressure and improve the imbibition recovery. Results indicate that the surfactant is ostensibly capable of reducing the interfacial tension, especially with mixed surfactants which can achieve better performance than individual surfactants. Imbibition recovery is negatively correlated with the logarithm of capillary pressures and interfacial tension.

Key words: surfactants; low-permeability reservoir; imbibition; interfacial tension; wettability; recovery

低渗透储层的渗吸是指在低渗透储层中多孔介质自发地吸入某种亲润湿流体的作用, 渗吸作用决定着低渗透油田原油的产量以及采出程度。渗吸作用受许多因素的影响, 如渗透率、基岩形状、边界条件、流体黏度、界面张力和润湿性等^[1]。界面张力和岩石润湿性是影响毛细管压力大小的决定性因素, 因此研究表面活性剂对这两个因素的影响, 对充分发挥渗吸作用具有指导意义。目前, 已有多位学者^[2-6]研究了表面活性剂对渗吸作用的影响, 发现表面活性

剂有助于提高渗吸采收率, 然而关于表面活性对油水界面张力、水湿表面润湿性、毛细管压力和渗吸采收率的影响尚未进行系统研究。为此, 笔者通过试

收稿日期: 2016-03-14; 改回日期: 2016-07-31。

作者简介: 李洪(1989—), 男, 四川眉山人, 2013年毕业于中国地质大学(北京)石油工程专业, 在读博士研究生, 主要从事致密油藏数值模拟方面的研究工作。E-mail: lihongcosa@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“CO₂驱油对储层的伤害机理研究”(编号: 51174178)、北京市自然科学基金项目“超临界 CO₂对储层性质的改变及油气田开发的影响”(编号: 3162026)资助。

验方法利用不同表面活性剂及其复配剂系统研究了表面活性对油水界面张力、水湿表面润湿性、毛细管压力以及渗吸采收率的影响,发现界面张力的降低有利于提高低渗透油藏的采收率,并且得到了岩样渗吸采收率与油水界面张力和毛细管压力的关系式。

1 试验方法

试验材料:亲水人造岩心,基本物性参数见表 1;试验用油由大庆油田有限责任公司第五采油厂所采原油和精制煤油混合而成;溶液均用相应油田的注入水配制;化学剂有 RS-1(润湿反转剂)、石油磺酸盐(阴离子表面活性剂)、OP-10(非离子表面活性剂)和 MD-100A(MD 膜)。

表 1 试验岩心基本物性参数

Table 1 Physical properties of core samples

编号	长度/ cm	直径/ cm	渗透率/ mD	孔隙度	原始含油 饱和度, %
0	6.00	2.5	4.12	0.251	65.41
1	6.10	2.5	5.73	0.255	63.75
2	6.50	2.5	4.23	0.264	64.69
3	5.95	2.5	2.39	0.253	63.79
4	6.00	2.5	4.27	0.254	64.42
5	6.40	2.5	4.10	0.249	63.22
6	6.15	2.5	3.65	0.252	63.63

试验装置:渗吸仪、Texas-500 型界面张力仪和 DCA-322 型动态接触角分析仪等。

试验步骤:先将 7 块不同渗透率的亲水人造岩心烘干后称重,用氮气测其渗透率,然后抽真空饱和地层水,再将其放入岩心夹持器用驱替方法饱和模拟油,驱替速度控制在 0.01 mL/min,最后通过自发渗吸研究渗吸采收率。25 °C 条件下,用旋滴法测定油水界面张力。

2 试验结果及分析

2.1 表面活性剂对界面张力的影响

对试验用流体和表面活性剂编号:1[#] 为注入水;2[#] 为质量分数 0.05% 的 OP-10;3[#] 为质量分数 0.05% 的 MD-100A;4[#] 为质量分数 0.05% 的石油磺酸盐+质量分数 0.003% 的阻垢剂;5[#] 为质量分数 0.05% 的 RS-1+质量分数 0.003% 的阻垢剂;6[#] 为质量分数 0.05% 的 RS-1+质量分数 0.05% 的 NaOH;7[#] 为质量分数 0.05% 的 RS-1。然后,改变表面活性

剂 RS-1 的质量分数并复配不同表面活性剂,研究表面活性剂对界面张力的影响,试验结果见图 1 和图 2。

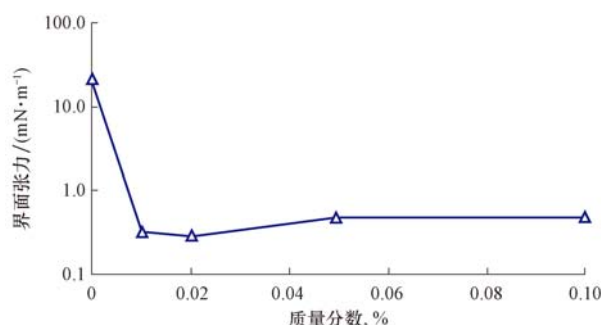


图 1 界面张力与表面活性剂 RS-1 质量分数的关系

Fig. 1 Relationship between interfacial tension and mass fraction of the surfactant RS-1

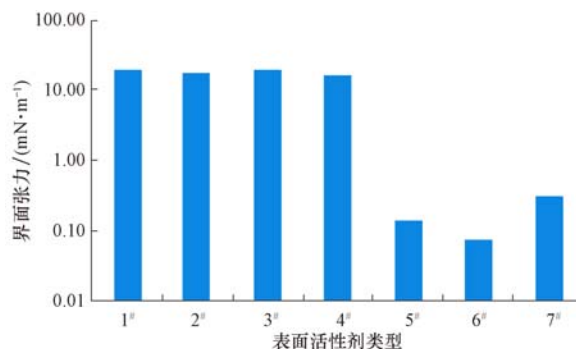


图 2 不同种类表面活性剂对界面张力的影响

Fig. 2 Effects of different surfactants on interfacial tension

从图 1 可以看出:随着表面活性剂 RS-1 质量分数的增大,油水界面张力先有较大幅度降低后略有升高,最后趋于平稳;当 RS-1 的质量分数为 0.01%~0.02% 时,油水界面张力达到最低值,这表明质量分数为 0.01%~0.02% 的 RS-1 降低界面张力的能力最强。分析认为,随着表面活性剂质量分数的增大,吸附在油水界面的表面活性剂增多,油水界面张力逐渐降低,当表面活性剂在油水界面的吸附达到平衡时,油水界面张力不再发生变化。

从图 2 可以看出,5[#]、6[#] 和 7[#] 表面活性剂降低界面张力的效果更好,其中在质量分数 0.05% 的 RS-1 中加入质量分数 0.05% 的 NaOH 后,可使油水界面张力的数量级降低至 10^{-2} 。分析认为,原油中的活性物质与 NaOH 发生化学反应后,生成了新的活性物质^[7],因而降低界面张力的能力增强。

2.2 表面活性剂对界面润湿性的影响

改善岩石表面润湿性有 2 个途径:固体表面改

性和添加润湿剂^[8]。润湿剂主要是表面活性剂,它通过降低界面张力或在固体表面形成一定结构的吸附层来改善介质的润湿条件。从不同种类表面活性剂对润湿角的影响情况(见图3)可知,表面活性剂具有很强的改变水湿表面润湿性的能力,其中3[#]表面活性剂在岩石表面沉积形成纳米级超分子薄膜^[9],使岩石润湿性向中性变化。2[#]表面活性剂和7[#]表面活性剂具有较强的改善岩石表面润湿性的能力,且质量分数0.05%的RS-1与质量分数0.05%的碱或质量分数0.003%的阻垢剂复配,增强了RS-1改善岩石表面润湿性的能力。由此可知,对表面活性剂进行复配,有利于改善岩石表面的润湿性。

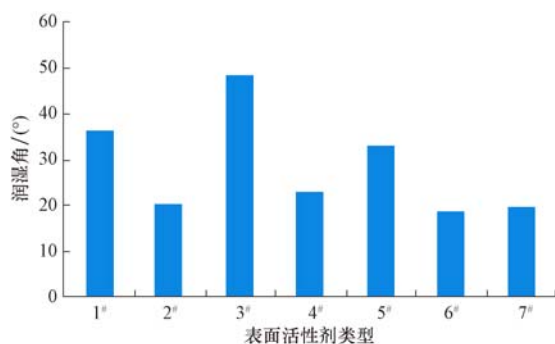


图3 不同种类表面活性剂对润湿角的影响

Fig.3 Effects of different surfactants on wetting angle

2.3 表面活性剂对毛细压力的影响

在模拟油中加入不同的表面活性剂后,测量采收率及毛细管压力随界面张力的变化情况,结果见表2。

表2 表面活性剂对渗吸采收率的影响

Table 2 Effects of surfactants on imbibition recovery

表面活性剂类型	界面张力/ (mN·m ⁻¹)	毛细压力/ kPa	采收率, %
1 [#]	19.450	87.40	16.2
2 [#]	17.420	77.15	16.3
3 [#]	19.440	71.04	27.1
4 [#]	16.420	90.79	16.7
5 [#]	0.142	0.66	17.8
6 [#]	0.073	0.51	18.1
7 [#]	0.320	1.61	17.6

从表2可以看出,表面活性剂的加入降低了界面张力,并且毛细管压力也随表面活性剂的加入而减小。因为由毛细管压力计算公式可知,毛细管压力与界面张力和润湿角有关,表面活性剂降低界面

张力的同时也降低了润湿角,然而界面张力降低的幅度大于润湿角余弦值增加的幅度,因此毛细管压力降低(其中4[#]所用的岩心渗透率较小,由Carman-Kozeny公式可知,其喉道半径较小,因此毛细管压力异常大)。

2.4 表面活性剂对渗吸采收率的影响

P. P. Jadhunandan、S. Akin 和李士奎等人^[10-12]通过渗吸试验发现,低渗透油藏的采收率随油水界面张力的降低而提高。从表2和渗吸采收率与界面张力的关系(见图4)可以看出,采收率呈现随界面张力降低而提高的趋势(其中3[#]所用岩心的孔隙度较大,影响了试验结果,因此在2.4中未考虑3[#]的结果),即加入表面活性剂降低界面张力后,能够改善孔隙介质的渗吸过程,从而提高渗吸采收率,与文献^[10-12]的试验结果一致。这说明表面活性剂促进了低渗岩心中原油的活化^[13],降低了油滴的启动阻力,使更多的原油参与渗流,从而使剩余油变为可动油,提高了低渗岩心的渗吸采收率。

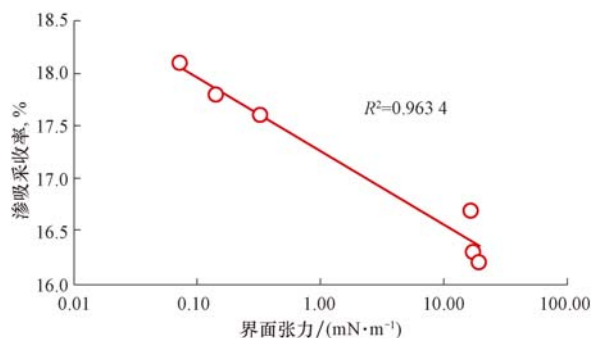


图4 渗吸采收率与界面张力的关系

Fig.4 Relationship between imbibition recovery and interfacial tension

通过表2中试验数据拟合得到岩样渗吸采收率与油水界面张力的关系式为:

$$R_b = -0.302 \ln \sigma + 17.264 \quad (1)$$

式中: R_b 为岩心渗吸采收率,%; σ 为油水界面张力,mN/m。

从表2和渗吸采收率与毛细管压力的关系(见图5)可以看出,随着毛细管压力的增加,低渗岩心的采收率降低。分析认为,主要是因为毛细管压力的增加是由界面张力增大引起的,界面张力的增加增大了油滴的启动阻力,从而降低了低渗岩心的渗吸采收率。因此,对于主要由毛细管压力提供渗吸动力的亲水低渗透油藏,增大毛细管压力并不能提高油藏采收率,反而降低了低渗透油藏的渗吸采收率。

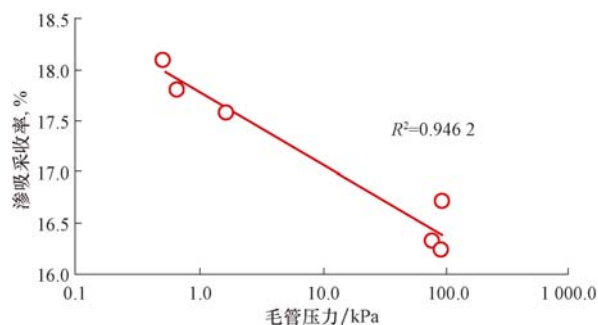


图5 渗吸采收率与毛管压力的关系

Fig. 5 Relationship between imbibition recovery rate and capillary pressure

通过表2中试验数据拟合得到岩心渗吸采收率与毛细管压力的关系式为:

$$R_b = -0.309 \ln p_c + 17.771 \quad (2)$$

式中: p_c 为毛细管压力, kPa。

3 结 论

1) 界面张力随表面活性剂质量分数增加呈现先降低、后略升高、最后趋于平稳的特征,在低渗透油田开发时,应通过试验找到达到平衡时的最小质量分数,从而使效益最大化。

2) 与单一表面活性剂相比,复配表面活性剂降低界面张力和改善润湿性的效果更好,其中质量分数为0.05%的RS-1与质量分数为0.05%的NaOH复配对界面张力的降低及油湿表面润湿性的改善能力最强。

3) 表面活性剂的添加,降低了界面张力,促进了低渗岩心中原油的活化,从而减小了油滴的流动阻力,改善了孔隙介质的渗吸过程,有利于渗吸作用的发挥,从而提高了渗吸采收率。

4) 室内试验数据表明,岩样渗吸采收率与油水界面张力和毛细管压力的对数值呈线性负相关关系。

参 考 文 献

References

[1] 华方奇,宫长路,熊伟,等.低渗透砂岩油藏渗吸规律研究[J].大庆石油地质与开发,2003,22(3):50-52.
HUA Fangqi, GONG Changlu, XIONG Wei, et al. Low permeability sandstone reservoir imbibition law research[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(3): 50-52.

[2] 彭昱强,郭尚平,韩冬.表面活性剂对中性砂岩渗吸的影响[J].油气地质与采收率,2010,17(4):48-51.
PENG Yuqiang, GUO Shangping, HAN Dong. Imbibition behavior of brine with and without surfactant in neutral-wet

sandstone[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(4): 48-51.

- [3] 张洁,杨长春,汤颖,等.表活剂类型对旋转滴界面张力测定的影响研究[J].石油化工应用,2012,31(6):58-60,72.
ZHANG Jie, YANG Changchun, TANG Ying, et al. Study of influence of the surfactant type on the measurement of spinning drop interfacial tension[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(6): 58-60, 72.
- [4] 方国庆,樊建明,何永宏,等.致密砂岩油藏热水+表活剂驱提高采收率机理及其对产能贡献的定量评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2012,27(6):57-60.
FANG Guoqing, FAN Jianming, HE Yonghong, et al. Enhanced oil recovery mechanisms of "hot water + surfactant" flooding and quantitative evaluation of their contribution to the productivity of tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2012, 27(6): 57-60.
- [5] 陈明贵,杨光,王登科,等.砂岩油藏双表面活性剂渗吸配方研究[J].油田化学,2014,31(3):400-404.
CHEN Minggui, YANG Guang, WANG Dengke, et al. Formula study of gemini surfactant imbibition for sandstone reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(3): 400-404.
- [6] 王桂娟,李爱芬,王永政,等.低渗油藏表面活性剂降压增注性能评价研究[J].科学技术与工程,2015,15(6):69-73.
WANG Guijuan, LI Aifen, WANG Yongzheng, et al. Study on performance evaluation of reducing injection pressure and increasing injection by surfactant for low permeability reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(6): 69-73.
- [7] 李继山,姚同玉.不稳定系数法筛选驱油用表面活性剂及碱剂[J].油田化学,2004,21(3):271-273.
LI Jishan, YAO Tongyu. Using unstability index method in surfactant/alkaline selection for EOR[J]. Oilfield Chemistry, 2004, 21(3): 271-273.
- [8] 姚同玉. MD膜驱剂驱油机理探讨[J].油田化学,2003,20(2):172-174.
YAO Tongyu. An investigation on oil displacement mechanisms in MD filming/flooding[J]. Oilfield Chemistry, 2003, 20(2): 172-174.
- [9] AYIRALA S C, RAO D N. Multiphase flow and wettability effects of surfactants in porous media[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, 241(1/2/3): 313-322.
- [10] JADHUNANDAN P P, MORROW N R. Spontaneous imbibition of water by crude oil/brine/rock systems[J]. In Situ, 1991, 15(4): 319-345.
- [11] AKIN S, KOVSCEK A R. Imbibition studies of low-permeability porous media[J]. SPE 54590, 1999.
- [12] 李士奎,刘卫东,张海琴,等.低渗透油藏自发渗吸驱油实验研究[J].石油学报,2007,28(2):109-112.
LI Shikui, LIU Weidong, ZHANG Haiqin, et al. Experimental study of spontaneous imbibition in low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 109-112.
- [13] BABADAGLI T. Dynamics of capillary imbibition when surfactant, polymer, and hot water are used as aqueous phase for oil recovery[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 246(1): 203-213.

[编辑 令文学]