

SVT20 旋转滴界面张力仪测量原理及影响因素分析

张彩霞¹ 李世勇² 张文超³ 姜晓光⁴ 白瑞婷¹

(1. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2 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 710018; 3 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710018; 4 康菲石油中国有限公司, 广东 深圳 518067)

摘要: 测量界面张力的方法很多, 但最受关注的是旋转滴法。SVT20 旋转滴界面张力仪是从德国进口的测量界面张力的一种新型仪器, 使用方便, 操作简单, 但是由于在测量界面张力的过程中影响因素较多, 没有得到很好的应用。从转速、液滴体积及光源亮度的选择、气泡的影响和排除等方面, 对如何使用 SVT20 旋转滴界面张力仪准确测量界面张力进行了试验。通过试验得到测量界面张力的转速范围为 5 000~8 000 r/min、注入液滴的体积为 0.3~0.8 mL 时测量结果准确。理论上界面张力越低的驱油剂其驱油效果应该越好, 在室内对一些表面活性剂进行了界面张力测量, 并做了相应的岩心驱替试验, 试验结果与理论相吻合。

关键词: 表面张力; 旋转滴液界面张力测定仪; 提高采收率; 测量原理; 影响因素

中图分类号: T E357.46 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2011)01-0115-04

The Field Application of SVT20 Spinning Drop Video Tensiometer to Improve Oil Recovery

Zhang Caixia¹ Li Shiyong² Zhang Wenchao³ Jiang Xiaoguang⁴ Bai Ruiting⁵

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China; 2. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi, 710018, China; 3. Xi'an Changqing Technology Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi, 710018, China; 4. Conocophillips China Incorporated, Shenzhen, Guangdong, 518067, China)

Abstract: Surfactant flooding is very important to enhance oil recovery in the late stage of oilfield development. Appropriate surfactants should be chosen according to the magnitude of interfacial tension. There are a lot of methods for measuring interfacial tension, the close attention was paid to spinning drop method. SVT20 spinning drop video tensiometer, a new type of instrument imported from Germany can be used easily and operated simply. The application was not good due to many factors impacting the measurement of interfacial tension. The experiment using SVT20 spinning drop video tensiometer for accurate measurement were conducted with consideration of the following prospect, the rotary speed, droplet size, the light source, effect of bubbles, and its elimination, etc. The best rotary speeds ranged from 5 000 to 8 000 rpm, and the injected droplet size ranged from 0.3 to 0.8 mL. Theoretically, the lower the interfacial tension of driving agent, the better the oil displacement effect. The interfacial tensions of some surfactants were measure in laboratory, the corresponding core displacement experiments were conducted and the experiment results agree with theoretical analysis.

Key words: surface tension; spinning drop video tensiometer; enhanced oil recovery; measuring principle; influence factor

液液界面张力的测定方法较多, 如毛细上升或下降法、脱环法、滴体积法(滴重法)、吊片法、泡压法(气泡最大压力法)、停滴法、悬滴法等。而适用于低界面张力(0.10~0.01 mN/m)或超低界面张力(小于 10⁻³ mN/m)测定的方法却很少, 只有滴外形法可以应用, 但实际测定时非常困难。通常只有在采

用旋转液滴法测定低或超低界面张力时, 人为地改变原来重力与界面张力的平衡, 使体系旋转, 增加离

收稿日期: 2010-03-31; 改回日期: 2010-11-23

作者简介: 张彩霞(1980—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 2005年毕业于西安石油大学化工工艺专业, 油气田开发专业在读硕士研究生。

联系方式: 15809225396, zhangcaixia200507@163.com

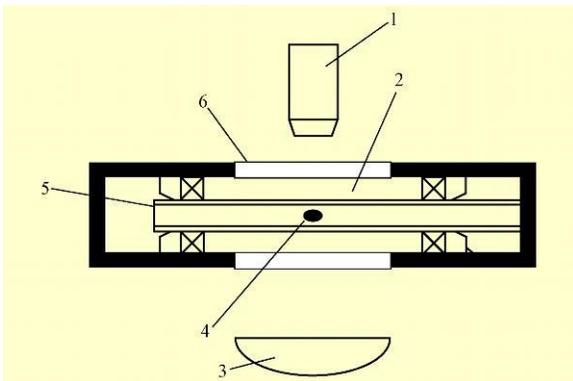
心力场的作用以实现界面张力的测定。因为, 旋转液滴法是一种对光学设备及其他设施要求都相对简单、易于建立且有较好正确度的测定方法^[1]。为此, 笔者介绍了自德国引进的 SVT 20 旋转滴界面张力仪的测量原理, 并利用该仪器进行了不同转速条件下不同正辛醇体积与蒸馏水界面张力和试验, 并详细分析了影响测量值的各种因素, 对三次采油中选择驱油剂有一定的借鉴意义。

1 SVT 20 旋转滴界面张力仪测量原理

SVT 20 旋转滴界面张力仪主要用于测量液-液之间的界面能, 这种界面能在工程应用中称为界面张力^[2]。

1.1 仪器组成及主要技术参数

SVT 20 旋转滴界面张力仪主要由摄像头、光源、测量窗口和毛细管(样品管)组成(见图 1), 样品管在马达的带动下可以在不同的速度下旋转。



1. 摄像头; 2. 测量室; 3. 光源; 4. 液滴; 5. 毛细管(样品管); 6. 测量窗口

图1 SVT20旋转滴界面张力仪基本组成
Fig.1 Schematic diagram of instrument

SVT 20 旋转滴界面张力仪的主要技术参数: 转速 0~ 20 000 r/min; 温度- 10~ 130 °C; 界面张力 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^3$ mN/m。

1.2 测量原理

样品管中装满高密度相, 然后再在高密度相中注入一滴低密度相(液滴), 样品管在马达的带动下转动, 在离心力的作用下液滴在样品管的中心轴线上, 并且被拉伸变形(见图 2)。

1.3 计算公式

传统的液滴外形近似法—Vonnegut 方程只适

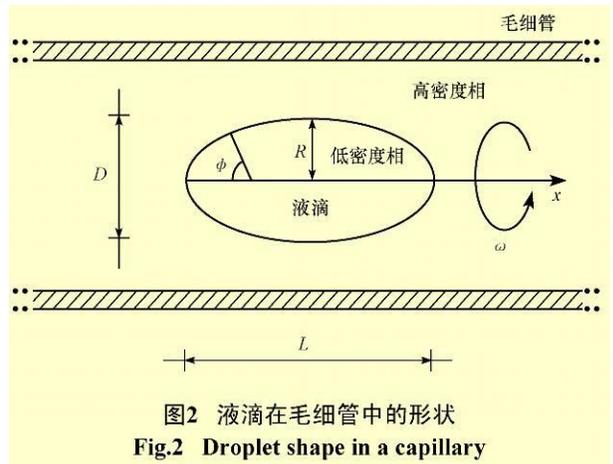


图2 液滴在毛细管中的形状
Fig.2 Droplet shape in a capillary

合于描述 $L/D > 4$ 的长液滴, 该方程为:

$$r_L = \frac{\Delta\rho_2}{4} R_{max}^3 \omega^3 \quad (1)$$

式中: r_L 为界面张力, mN/m; $\Delta\rho_2$ 为两液相密度差, kg/L; ω 为转速, r/min; R_{max} 为液滴被拉伸后垂直方向的最大半径, m。

而 SVT 20 旋转滴界面张力仪应用的是 Young-Laplace 方程:

$$r_L \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] = \frac{\Delta\rho_2}{2} R^2(x) \omega^2 \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为曲面在正交方向上的 2 个曲率半径, m。

式(2)精确地描述了旋转液滴的外形, 适合于各种液滴外形分析, 不受 L/D 的影响。同时 SVT 20 旋转滴界面张力仪在测量界面张力时, 液滴在样品管中不会被拉断, 而是逐渐由圆球体变成椭圆柱体(界面张力大于 0.1 mN/m), 或者液滴由椭圆柱体变成圆柱体(界面张力小于 0.1 mN/m)。在液滴的变化过程中, 软件的控制系統会一直追踪液滴的形状并拟合出其轮廓, 同时, 软件会自动算出界面张力值。

2 标定仪器试验及其结果

为了正确使用 SVT 20 旋转滴界面张力仪, 测量了不同转速条件下不同正辛醇体积与蒸馏水的界面张力。试验结果见表 1。

由表 1 可知, 要想得到准确的测量结果, 液滴的体积越小则需要的转速越高。液滴体积小于 0.2 μ L, 或转速低于 5 000 r/min 时且液滴体积小于 1.32 μ L 时, 无法测量到准确的结果, 因为测量数据不能稳定, 一直在波动。

表 1 不同转速条件下不同正辛醇体积与蒸馏水的界面张力

Table 1 Interfacial tension between distilled water and octanol in different volumes, with the variation of rotary speed

转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	液滴体积/ μL	界面张力/ $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$
4 000	0.16	0.003~4.871
	0.28	29.120~186.120
	0.31	15.280~21.690
	0.59	10.760
	0.78	10.560
	1.32	8.750
5 000	0.16	28.130~397.890
	0.28	12.590
	0.31	11.560
	0.59	9.100
	0.78	8.760
	1.32	8.490
6 000	0.16	8.020~13.170
	0.28	8.520
	0.31	8.540
	0.59	8.690
	0.78	8.510
	1.32	7.880
7 000	0.16	10.670~13.330
	0.28	8.520
	0.31	8.520
	0.59	8.490
	0.78	8.490
	1.32	7.870
8 000	0.16	9.950~12.440
	0.28	8.510
	0.31	8.510
	0.59	8.490
	0.78	8.490
	1.32	7.850

注: 20 ℃ 条件下正辛醇与蒸馏水的界面张力标准值为 8.5 $\text{mN}/\text{m}^{[3]}$ 。

3 影响因素分析

分析表 1 可知, 在使用 SVT 20 旋转滴界面张力仪测量界面张力时, 测量值的准确性受转速和注入液滴体积的影响很大。其实, 除此之外光源亮度、气泡清洁度、样品管清洁度等也是重要的影响因素。

3.1 转速的选择

转速过低或过高都会造成界面张力测量结果的不准确。转速过低, 液滴受浮力影响会偏离毛细管的轴心, 液滴也不易拉伸; 转速过高, 影响仪器的使用寿命。因此, 要得到好的液滴状态, 必须找到一个最佳转速范围, 同时转速的选择还与所测的表面活性剂体系有关, 要视具体的液滴(煤油)在表面活性剂溶液中的形状而定, 如液滴容易被拉长即界面张

力低, 此时可以选择低一点的转速, 但不应低于 5 000 r/min , 如液滴不容易被拉长即界面张力高, 此时可以选择高一点的转速, 直至把液滴拉为 $L/D > 1$ 为止。但仪器转速最好不要超过 8 000 r/min , 原因为: 1) 界面张力仪的样品管的材质为硅硼玻璃, 转速过高容易折断; 2) 动态直流马达系统长时间高速旋转会影响仪器的寿命。

3.2 液滴体积的选择

注入液滴的体积大小也应随表面活性剂界面张力的而定, 在界面张力小的表面活性剂溶液中液滴的体积应小一点, 否则液滴易被拉伸太长不利于测量。在界面张力大的表面活性剂溶液中液滴的体积可以稍大一点, 根据实践经验, 认为每次注入液滴的体积为 0.3~0.8 μL 较为合适。如果液滴容易拉伸为图 3 所示形状, 则注入液滴体积要小。



图3 表面活性剂溶液与煤油界面张力
Fig.3 Interfacial tension between surfactant solutions and kerosene

3.3 光源亮度的选择

光的明暗度会影响液滴成像的清晰度, 从而影响测量过程中放大倍数的传输, 光线太暗或太亮时液滴在溶液中的轮廓不清晰, 测量过程中放大倍数都无法传输过去, 就无法进行后面的测量。光线的调节一般是使液滴在溶液中的轮廓清晰, 在积分拟合图像轮廓时线条是连续的, 这样有利于放大倍数的传输, 且测量结果也准确。液滴成像的清晰度如图 4 所示。

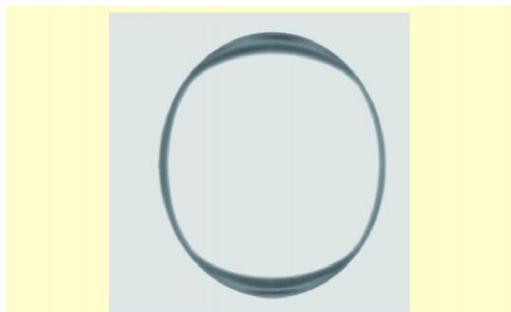


图4 正辛醇与蒸馏水界面张力液滴成像
Fig.4 Droplets image of normal octanol and distilled water with interfacial tension

3.4 样品的注入

该界面张力仪样品管的容积为 2 mL, 仪器要求

以高密度相为外相, 低密度相为内相。样品注入时, 先用 10 mL 的注射器在样品管中注满高密度相, 用微量进样器吸入低密度相, 然后左手水平拿样品管, 右手将吸有低密度相的微量进样器的针头插入样品管, 并且针头紧贴样品管壁将低密度相注入, 最后用高密度相将样品管补充满, 然后拧上样品管的封口螺丝。将样品管放在仪器上调节仪器的转速, 随着转速的升高, 粘附在样品管上的低密度相就脱离管壁, 以液滴的形式旋转在样品管的中心。

3 5 气泡的影响和排除

液滴上粘附气泡或者在测量窗口出现多余的小液滴都会影响到测量结果, 如果选定的测量液滴上粘附气泡, 测量值要比实际值大。因此, 向样品管注样和测量时要注意以下事项:

- 1) 注高密度相时要竖直拿样品管, 同时把注射器的针头插到样品管的底部, 边注样边搅动, 这样有利于把样品管底部的气泡排出去;
- 2) 注低密度相时, 微量进样器的针头容易附带气泡, 因此, 注液滴时要把针头擦干净;
- 3) 测量时, 通过调转速和平衡台将粘附在液滴

上的多余小液滴与被测的目标液滴分离, 且不能让其进入测量窗口选择框中。

3 6 样品管的清洗

由于 SVT 20 旋转滴界面张力仪的样品管内径为 4 mm 的硅硼玻璃毛细管, 不易用刷子清洗, 而表面活性剂又具有吸附性, 样品管如果洗涤不干净不利于液滴从样品管脱落, 所以在更换样品时用超声仪对样品管进行超声波洗涤。

4 在三次采油中的应用

三次采油中运用表面活性剂驱提高采收率时, 首先要评价表面活性剂溶液与油(煤油)的界面张力, 理论上界面张力越低驱油效果应该越好^[4,5]。在室内进行了表面活性剂界面张力测量, 并做了相应的岩心驱替试验, 结果见表 2。

从表 2 可看出, 驱油剂界面张力低的驱油效率高。现场应用也表明, 用 SVT 20 旋转滴界面张力仪测量、选择的界面张力低、驱油效率高的驱油剂在油田应用效果很好。

表 2 驱油剂驱油效率与界面张力数据

Table 2 Interfacial tension and displacement efficiency data of oil displacement agent

岩样号	孔隙度, %	液测渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	束缚水饱和度, %	驱油剂	界面张力/mN·m ⁻¹	驱油效率, %	
						注驱油剂前	注驱油剂后
13	17.78	19.50	42.12	5 [#]	0.063	70.56	81.39
1	11.00	18.87	6.53	18 [#]	0.213	71.08	84.31
7	17.74	20.70	40.22	14 [#]	1.129	71.01	75.27
2	18.93	6.66	37.29	12 [#]	2.740	71.22	72.66

5 结 论

1) SVT 20 旋转滴界面张力仪测定界面张力时要彻底清洗样品管, 注入液滴的体积以 0.3~0.8 μL 为宜, 注样品过程中要注意液滴上粘附的气泡, 在转速为 5 000~8 000 r/min 时调整光源使液滴成像清晰, 测量时拟合曲线连续有利于放大倍数传输, 然后进行测量自动采集界面张力数据。

2) 由标定结果看, SVT 20 旋转滴界面张力仪更适合测界面张力低的体系, 且在油田优选表面活性剂方面得到了很好的应用效果。

参 考 文 献

[1] 梅乐和, 余忠华, 朱自强, 等. 用于低或超低界面张力测定装置: 旋转液滴界面张力测定仪[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 12-14, 27.
M ei Lehe, Yu Zhonghua, Zhu Ziqiang, et al. Spinning drop ten-

siometer for measurement of low liquid-liquid interfacial tension[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 12-14, 27.
[2] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 184-185.
Yang Shenglai, Wei Junzhi. Petroleum reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 184-185.
[3] 姚允斌, 解涛, 高英敏. 物理化学手册[M]. 上海: 上海科技出版社, 1985: 570.
Yao Yunbin, Xie Tao, Gao Yingmin. Physical and chemical manual[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 570.
[4] 赵凤兰, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 碱对复合驱油体系与原油乳化作用的影响[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 64-65.
Zhao Fenglan, Yue Xiang'an, Hou Jirui, et al. Impact of alkali on emulsification of compound flooding system and crude oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 64-65.
[5] 王友启. 胜利油田聚合物驱后二元复合驱油体系优化[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 101-103.
Wang Youqi. Optimization of binary combination oil displacement system after polymer flooding in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 101-103.