

水包稠油乳状液界面性质实验分析

邹 鹏, 杨雨凡, 沈明明, 肖江涛

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月15日

摘 要

针对水包稠油乳状液的界面性质, 开展油水界面研究对于水包稠油型乳状液稳定性研究是重要的研究手段之一。本论文首先对稠油进行了稠油四组分分析, 然后确定了油品A的密度和粘度的特性, 并确定了模型。选取了两种不同的表面活性剂OP-10和TX-100, 开展了油水界面乳化性质的影响因素分析。分析结果表明: 当两种表面活性剂的浓度在一定范围内变化时, 它们的界面张力大小不同, 但是呈现着一样的规律, 随着表面活性剂含量的增多, 油水界面张力下降, 水包油型乳状液的稳定性增加。当频率一定时, 随着表面活性剂浓度的增加, 油水界面膜的扩张模量增大, 当浓度达到一定值时, 活性剂间发生缔合, 形成聚合物, 降低了油水界面膜的强度, 扩张模量减小。

关键词

水包稠油型乳状液, 表面活性剂, 界面张力, 影响因素分析

Experimental Analysis of the Interfacial Properties of Water-in-Heavy Oil Emulsions

Peng Zou, Yufan Yang, Mingming Shen, Jiangtao Xiao

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Jan. 8th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

Aiming at the interfacial properties of water-in-heavy oil emulsions, conducting oil-water interface research is one of the important research methods for the stability of water-in-heavy oil emulsions. This paper first analyzed the four components of heavy oil, then determined the density and viscosity characteristics of oil product A and determined the model. Two different surfactants, OP-10 and TX-100, were selected to analyze the influencing factors of the emulsification properties of the oil-water interface. The analysis results show that when the concentrations of the two surfactants vary

within a certain range, their interfacial tensions are different, but they show the same law. With the increase of the surfactant content, the oil-water interfacial tension decreases, and the stability of the water-in-oil emulsion increases. When the frequency is constant, with the increase of the surfactant concentration, the dilation modulus of the oil-water interfacial film increases. When the concentration reaches a certain value, the surfactants fuse to form polymers, which reduces the strength of the oil-water interfacial film and reduces the dilation modulus.

Keywords

Water-in-Heavy Oil Emulsion, Surfactant, Interfacial Tension, Analysis of Influencing Factors

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了探寻界面张力的影响规律，围绕着这个方向，国内于群等[1]对普通稠油驱替影响进行了研究，油水界面张力影响化学体系驱替乳化性能，减小油水界面张力有利于降低残余油启动难度，促进原油乳化作用的发生，发现界面张力过高或者过低都不利于改善驱油效率。徐玲玲[2]通过实验结果发现，烃分子的链长对界面张力的影响十分明显，其影响规律与使用的表面活性剂的性质直接相关。在该稠油水包油乳化体系中存在多层次多尺度的复杂结构：表界面层次存在表面活性物分子在油滴表面的吸附，从而影响油滴的表界面结构以及稳定性[3]。另外，油滴的聚并和破碎过程不仅受周围流场的影响，同时与表面活性剂的性质相关，涉及非常复杂的多层次多尺度物理机制[4]。本研究将基于这些研究，进一步开展油水界面乳化性质的影响因素分析。

2. 实验材料

2.1. 稠油

1) 采用稠油四组分分析

首先采用《原油中胶质、沥青质、芳香烃、饱和烃含量测定法》(SY/T 7550-2004)确定所选油品 A 的基本组分，得到的测试分析结果如表 1 所示。

Table 1. Basic component content of oil product A
表 1. 油品 A 的基本组分含量

类别	质量组分(%)
饱和烃	26.6
芳烃	35.2
胶质	18.1
沥青质	20.1

由表 1 可知，稠油油品 A 中胶质、沥青质含量高，它们是天然活性成分，与外加的表面活性剂产生协同作用，对稠油水包油型乳状液的界面性质、黏度、粒径分布均产生显著的影响。

2) 稠油密度实验及数学模型

采用密度一体化检测仪测量了稠油油品 A 在不同温度下的密度, 结果如图 1 所示。

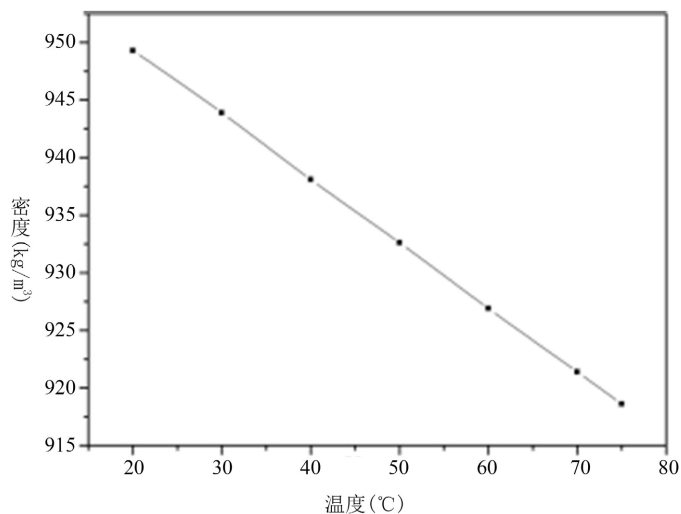


Figure 1. Relationship between density and temperature

图 1. 密度与温度的关系

实验数据表明, 稠油的密度随着温度的升高而逐渐降低, 温度每上升 10°C, 密度会下降 5.4~5.8 kg/m³。原油密度与温度之间的通用关系式如下:

$$d_t = 0.9623 - (A - B)(T - 20) \quad (1)$$

式中, d_t 为原油的相对密度; d^{20} 为原油在 20°C 时的相对密度; A 、 B 为与原油特性相关的系数。

根据实验得到的原油密度 - 温度关系, 采用非线性最小二乘法拟合得到的稠油密度计算公式如下:

$$d_t = d^{20} - (0.00183 - 0.001295d^{20})(T - 20) \quad (2)$$

3) 稠油黏度实验及数学模型

采用奥地利 Anton Paar MCR 302 可视化流变仪对稠油黏度进行了测试, 测试结果如图 2 所示。

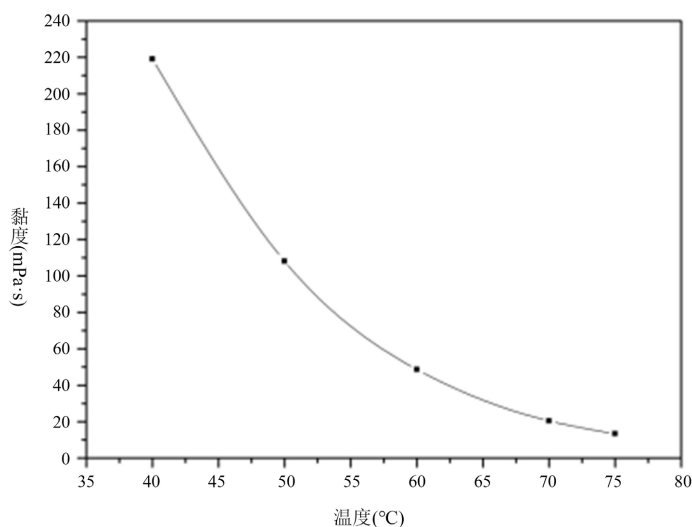


Figure 2. Heavy oil viscosity-temperature relationship curve

图 2. 稠油黏温关系曲线

根据上述实验结果，拟合得到的稠油黏度计算模型如下：

$$\mu_{oil} = 5780.67e^{-0.081T} \tag{3}$$

式中， μ_{oil} 为油品黏度，mPa·s。

上述公式计算值与实验值之间的相对偏差小于 0.5%，精度较高。

2.2. 表面活性剂

在本研究中选用 2 种非离子表面活性剂进行研究，如表 2 所示。

Table 2. Surfactant types

表 2. 表面活性剂类型

商品名称	化学名称	分析浓度范围(质量分数 1.5%)
OP-10	烷基酚聚氧乙烯醚	0.5%~3%
TX-100	辛基苯基聚氧乙烯醚	0.5%~3%

3. 实验方法

参照石油天然气行业标准《表面及界面张力测定方法》(SY/T 5370-1999)在 30℃ 下用 Texas-500 C 旋滴界面张力仪(美国科诺公司)测量含有不同表面活性剂浓度下水与稠油间的界面张力[5]。用界面扩张黏弹性测定仪测定油 - 水界面扩张流变参数，油相加量为 50 mL。

4. 油水界面影响因素分析

4.1. 表面活性剂浓度对界面性质的影响

在 30℃ 条件下，油水界面张力随 OP-10 与 TX-100 浓度变化的情况如图 3 所示。

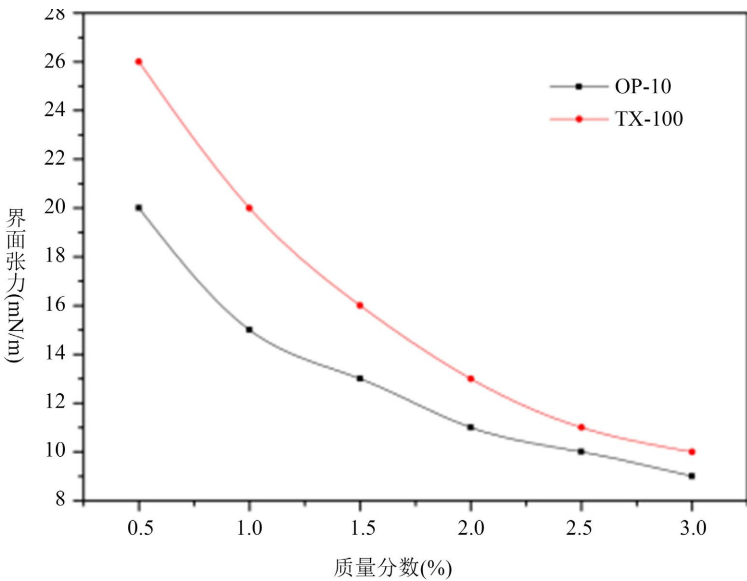


Figure 3. Effect of surfactant concentration on interfacial tension

图 3. 表面活性剂浓度对界面张力的影响

当 OP-10 与 TX-100 质量分数在 0.5%至 3.0%之间变化时，随着表面活性剂含量的增多，吸附在油水

界面上的表面活性剂含量增多,油水界面张力下降,水包油型乳状液的稳定性增加。

当界面面积产生扰动时,液液界面上和界面附近则会存在多种弛豫过程[6],这个过程与时间相关,会使得界面膜的扩张黏弹性对频率产生依赖。图4为2种不同表面活性物质作用下的油水界面膜的扩张模量的变化情况。由图4可知,随着频率的增加,界面与体相间的扩散交换作用增强,界面扩张模量逐渐增大,界面膜稳定性增强。

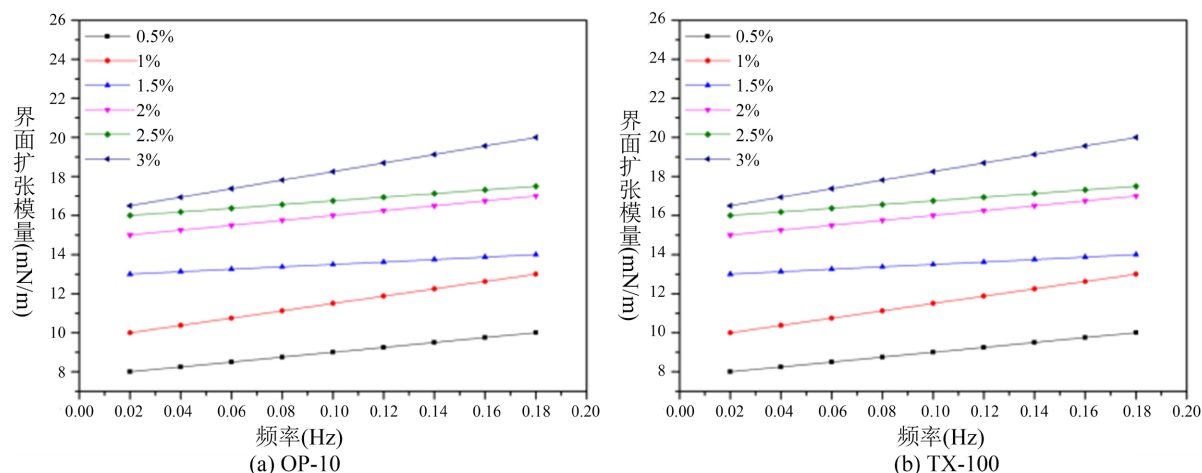


Figure 4. Interface expansion modulus at different expansion frequencies

图4. 不同扩张频率下的界面扩张模量

图5为扩张频率为0.08Hz时,OP-10与TX-100浓度变化对油水界面膜黏弹性的影响。在一定范围内,随着表面活性剂浓度的增加,油水界面膜扩张模量增大,当质量分数达到3%时,扩张模量减小,这是因为,在较大浓度时,活性剂间发生缔合,从而形成聚合物,降低了油水界面膜的强度[7]。

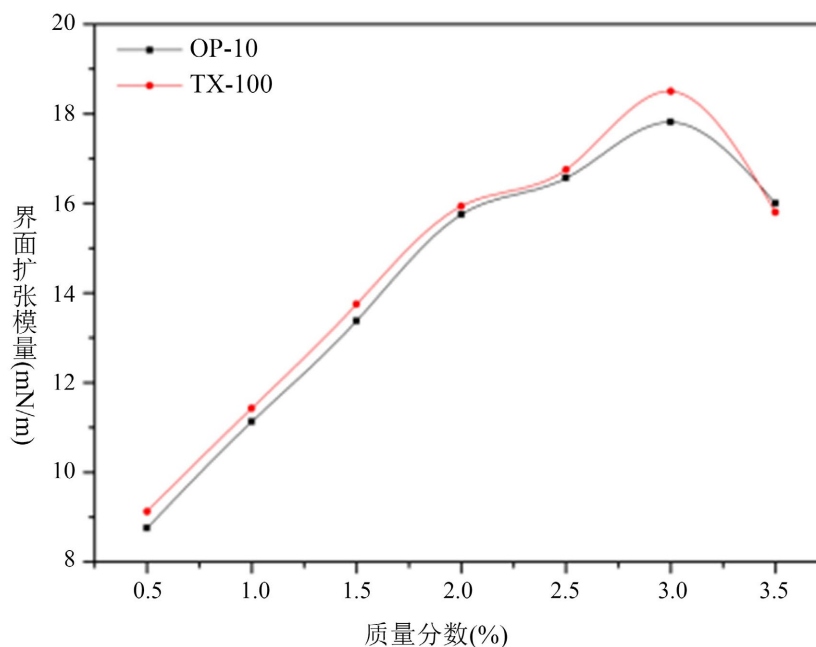


Figure 5. Effect of surfactant concentration on interface expansion modulus

图5. 表面活性剂浓度对界面扩张模量的影响

4.2. 温度对界面性质的影响

图 6 为温度对界面张力的影响,随着温度的升高,分子热运动愈发剧烈,分子动能增加,使得分子间引力作用减弱,使得界面张力降低。

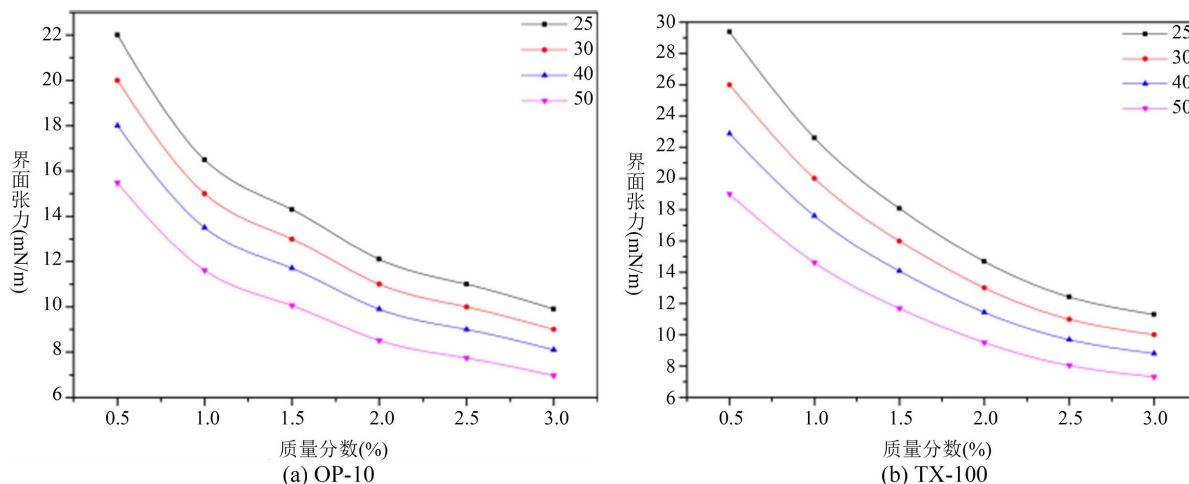


Figure 6. Effect of temperature on interfacial tension

图 6. 温度对界面张力的影响

5. 总结

1) 对稠油进行了稠油四组分分析,然后确定了油品 A 的密度和粘度的特性,进而确定了粘度和密度的预测模型。

2) 分析了两种表面活性剂 OP-10 和 TX-100 的浓度对界面张力的影响,随着表面活性剂含量的增多,吸附在油水界面上的表面活性剂含量增多,油水界面张力下降,水包油型乳状液的稳定性增加。

3) 当频率为 0.08 Hz 时,在一定范围内,随着表面活性剂浓度的增加,油水界面膜的扩张模量增大,当浓度达到 3% 时,活性剂间发生缔合,形成聚合物,降低了油水界面膜的强度,扩张模量减小。

4) 随着温度的升高,分子热运动愈发剧烈,分子动能增加,使得分子间引力作用减弱,使得油水界面张力降低。

参考文献

- [1] 于群, 曹绪龙, 祝仰文, 等. 油水界面张力对普通稠油驱替影响研究[C]/2020 油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC2020) 论文集. 成都: 成都理工大学, 2020: 1-9.
- [2] 徐玲玲. 普通稠油组分对界面张力影响研究[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(35): 232.
- [3] Jing, J., Sun, J., Zhou, J., Shen, X., Tan, J., Li, X., et al. (2015) Dynamic Stability of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37, 980-990. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1077454>
- [4] Sun, N., Jing, J., Jiang, H., An, Y., Wu, C., Zheng, S., et al. (2016) Effects of Surfactants and Alkalis on the Stability of Heavy-Oil-in-Water Emulsions. *SPE Journal*, 22, 120-129. <https://doi.org/10.2118/181742-pa>
- [5] 葛际江, 王东方, 张贵才, 等. 稠油驱油体系乳化能力和界面张力对驱油效果的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2009, 25(5): 690-696.
- [6] 刘延莉. 永平油田稠油自乳化驱油方法研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
- [7] 王东方. 影响表面活性剂驱油效率的因素研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009.