

超稠原油-水分散体系的黏弹性特征

张健, 许晶禹*

LMFS, 中国科学院力学研究所, 100190, 北京;

*通信作者,

摘要: 为提高超稠原油的生产和运输效率, 针对超稠原油-水两相分散体系的黏弹性特征开展系统的实验测试和理论分析。分别考虑温度、剪切作用频率等因素的影响, 给出超稠原油-水混合液在动态载荷作用下的储能模量、损耗模量、复黏度系数等参数的特征和规律。经研究得出, 随着温度的升高, 稠油-水乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随温度均呈现为近似指数衰减的规律, 交叉点对应的频率表现为指数衰减的规律, 表明随着温度的升高, 稠油-水乳状液由黏性主导 ($G' < G''$) 转变为弹性主导 ($G' > G''$) 的情况逐渐提前; 随着搅拌时间增加, 乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均呈现增加的趋势, 即黏弹性逐渐增强, 交叉点对应的频率逐渐增大。研究结果对深入了解超稠原油-水分散混合液的流动性、提高稠油开采和运输的效率提供可靠的数据基础和理论依据。

关键词: 超稠原油; 分散体系; 黏弹性; 储能模量; 损耗模量

1 引言

原油总体上可以分为流动性较好的轻质原油和流动性较差的高黏原油。高黏原油又包含含蜡原油、稠油和超稠原油等, 其普遍具有密度大、黏度高物理特性, 在开采、生产和管道运输等环节中均带来较大的难度。另外, 由于含水原油在开采和集输过程中, 油相(或水相)常被分割成单独的小液滴, 极容易形成油水两相均匀分散流动。这种两相分散流动在集输过程中呈现的流动规律与单相流体不同, 且混合液表现为复杂的非牛顿流体的性质, 故采用单相流体力学的计算方法进行的油气集输管网设计与实际情况偏差较大。从文献中可以看出, 原油流变学特性对其开采和生产效率, 以及相关系统的设计和建造均具有重要的影响, 能够有效节约生产成本, 降低能耗。本文研究中, 将针对稠油-水乳状液流变学特性中的黏弹性进行系统的研究, 为稠油开采运输系统的设计提供可靠的数据和理论基础。

针对稠油-水乳状液黏弹性的研究, 国内外学者开展了一系列的研究工作。李传宪和李琦瑰采用流变仪对多种原油的黏弹性进行测试, 结果表明胶凝原油具有典型的黏弹性固体特性, 如蠕变回复、复数模量大、损切角小等; 侯磊和张劲军对含蜡原油黏弹性的研究现状和趋势进行系统的总结, 给出了在含蜡原油低温黏弹性研究中存在的问题, 并建议在相关机理方面开展相应的工作。

本文中,针对目前稠油-水乳状液黏弹性研究的进展和发展趋势,采用模块化高级旋转流变仪同时对不同体积含率的稠油-水乳状液的黏弹性进行系统的测试和分析,分别考虑测试温度、剪切频率、体积相含率等参数的影响,给出系统的变化规律,为超稠原油开采和生产系统的设计提供精确的物性参数基础和理论依据。针对稠油-水黏弹性特征的测试,文中首先采用动态应力扫描,得出各个样品的线性黏弹性区域,及对应的储能模量(G')和损耗模量(G'')对应的数值,然后应用动态频率扫描,得到储能模量、损耗模量和损切角(δ)的变化规律。

2 实验装置和方法

研究中,主要通过实验的方法对配制得到的不同体积相含率的稠油-水乳状液进行直接测量,得到相应的黏弹性特性。流变学特性测试仪器分别为赛默飞生产的 Haake RS6000 同轴旋转式流变仪,其配有包括同轴圆筒、平板、锥板和叶片等一系列的测试转子,且具有控制剪切速率(CR)和控制剪切应力(CS)两种测量模式,扭矩范围为 $0.05\mu\text{Nm}\sim 200\text{mNm}$,温度控制通过配套的水浴循环来实现,变化范围为 $0^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 。

稠油-水乳状液黏弹性测试中,首先采用搅拌器配制不同乳化程度的乳状液,然后采用上述介绍的旋转流变仪进行直接测量,测量中采用同轴圆筒光滑转子,圆筒和转子之间的径向间隙为 2.5mm ,底部间隙为 8mm ,测试样品容量为 30.8ml 。具体测试中,分别进行应力扫描和频率扫描,应力加载的频率为 $0.1\sim 100\text{Hz}$ 。测试中温度的变化范围为 $20\sim 80^\circ\text{C}$,配比得到的稠油-水乳状液的体积含油率为 $0\sim 100\%$ 。

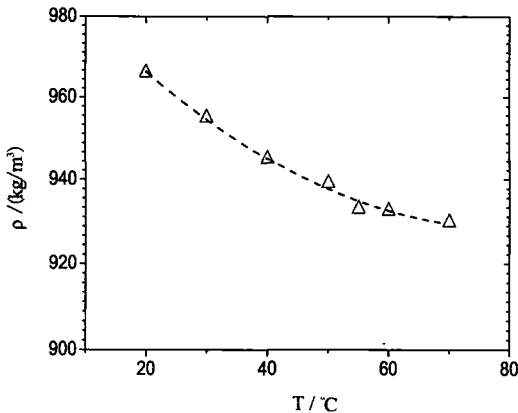


图1 稠油密度的变化规律

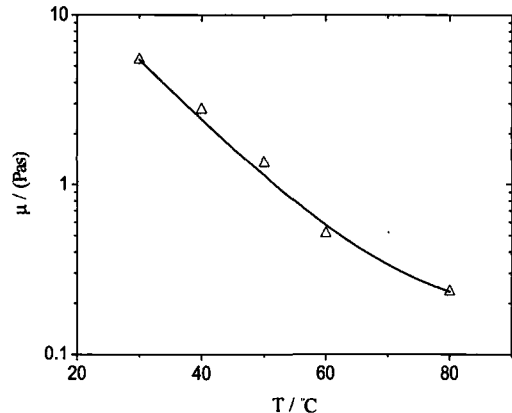


图2 稠油黏度随温度的变化规律

本研究中,采用的原油来自绥中海上终端处理厂,原油的密度和黏度的随温度的变化情况如图1和图2所示。从图中可以看出,研究中采用的稠油,其密度和黏度随着温度的升高,均表现出近似指数减小的规律,温度为 30°C 时,稠油的密度为 955kg/m^3 ,表观黏度为 $5.2\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

3 实验结果分析

稠油-水乳状液黏弹性测试中，分别配制不同体积相含率和乳化程度的乳状液，然后采用流变仪进行应力扫描和频率扫描。动态应力扫描，是为了确定液体线性黏弹性区间而进行的测试，为下一步的动态频率扫描研究确定线性区间的范围。动态频率扫描，用于给出外载荷的作用频率对物质变形的影响，其基于上述动态应力扫描的结果，选取线性黏弹性区间对应的应力值，对油水分散混合液进行动态频率扫描研究。

3.1 温度对黏弹性的影响

稠油开采中，混合液的温度会出现一定程度的不同，因此，此部分将针对稠油-水混合液在不同温度条件下的黏弹性进行测量和分析，测量的温度为 30℃~80℃。图 3 给出了体积含油率为 60%，不添加乳化剂配制得到的稠油-水乳状液的动态应力扫描结果，对应的温度分别为 40℃和 80℃。从图中可以看出，温度为 40℃条件下，扫描应力幅值低于 5.0Pa 时，稠油-水混合液呈现为线性黏弹性，而温度为 80℃条件下，测量的应力范围内均呈现为线性黏弹性的特征。图 4 给出了体积含油率为 60%，不添加乳化剂配制得到的稠油-水乳状液的动态频率扫描结果，对应的温度分别为 40℃和 80℃。从图中可以看出，随着外载荷剪切频率的增加，稠油-水乳状液均呈现出由黏性主导 ($G' < G''$) 向弹性主导 ($G' > G''$) 的转变。

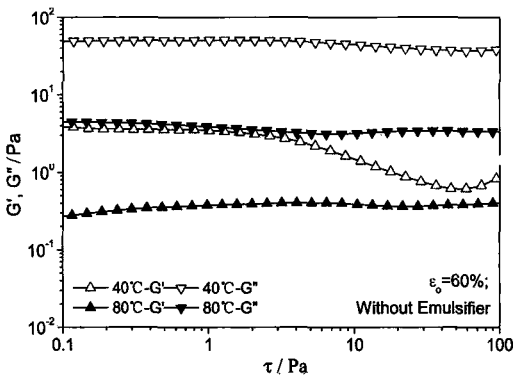


图 3 不同温度条件下应力扫描数据

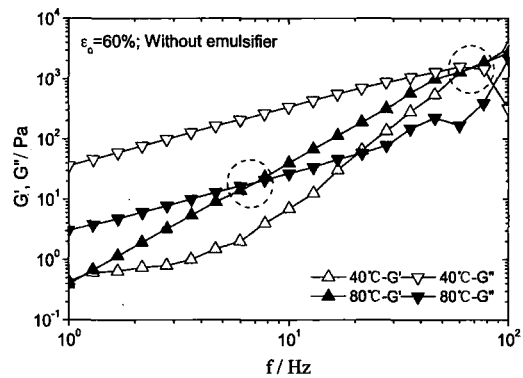


图 4 不同温度条件下频率扫描数据

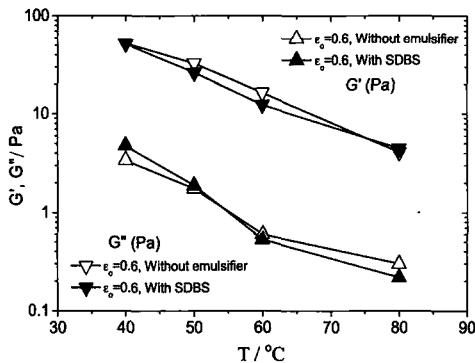


图 5 储能模量和损耗模量随温度的变化规律

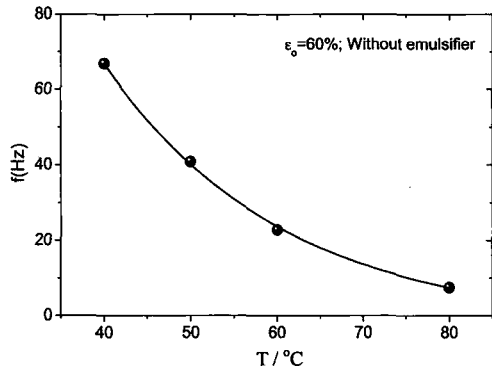


图 6 交叉点对应频率对温度变化规律

基于上述测量得到的数据,对温度的作用规律进行系统的分析。图 5 给出了稠油-水乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随温度的变化规律,图中分别为添加乳化剂 SDBS 和不添加乳化剂制备的两种乳状液的数据。从图中可以看出,随着温度的升高,稠油-水乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随温度均呈现为近似指数衰减的规律,且两种乳状液的变化规律和数值基本相同。图 6 给出了上述频率扫描数据中, $G'=G''$ 对应的外载荷作用频率随温度的变化规律,从图中可以看出,随着温度升高,交叉点对应的频率表现为指数衰减的规律,表明随着温度的升高,稠油-水乳状液由黏性主导 ($G'<G''$) 转变为弹性主导 ($G'>G''$) 的情况逐渐提前。

3.2 搅拌时间对黏弹性的影响

油水乳化液的流变学特性不仅受分散相相含率的影响,而且其分散相的粒径大小对其也有较大的影响。研究中,对不添加乳化剂、含油率为 50% 的混合液,添加乳化剂 SDBS、含油率为 60%,固定搅拌器的转速为 2000r/min,分别搅拌 100s、300s、600s 和 1200s 制备不同粒径分布的油水分散体系,采用显微镜对其微观结构进行对比,并应用流变仪测量各种分散体系的黏弹性特性。图 7 给出了不同搅拌时间条件下,制备的稠油-水乳状液的微观结构,对应的含油率为 50%,制备中不添加乳化剂。从图中可以明显看出,随着搅拌时间的增加,分散相水的粒径逐渐减小,且乳状液的结构初始为单一的油包水 (W/O),搅拌时间增加后开始逐渐出现 O/W/O 的结构。

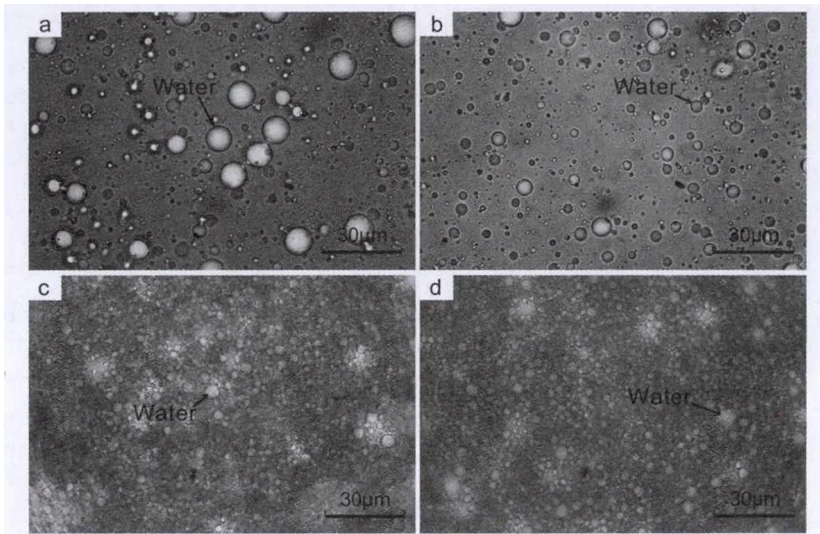


图 7 稠油-水乳状液的微观结构 (搅拌时间: 100s、300s、600s、1200s; $\epsilon_0=50\%$)

图 8 给出了不同搅拌时间条件下,稠油-水乳状液的动态应力扫描数据,可以看出,搅拌时间为 100s 时,稠油-水乳液在扫描应力幅值小于 10Pa 时,呈现为线性黏弹性特征,即 $G'=G''$; 搅拌时间为 300s 和 1200s 时,在测量的应力幅值范围 ($\tau<100\text{Pa}$) 内,均呈现为线性黏弹性的特征,即随着制备稠油-水乳状液搅拌时间的增加,其对应的线性黏弹性区间延长。图 9 给出了在上述线性黏弹性区间内,稠油-水乳状液动态频率扫描的数据,从中可以看出,给出的制备条件下,乳状液均由黏性主导向弹性主导转变,即低于某一作用频率时 $G'<G''$,高于此频率便 $G'>G''$,本文研究中,将频率扫描测试中给出的 $G'=G''$ 对应的频率

值定义为黏弹性转变的交叉点。

图 10 给出了黏弹性参数储能模量和损耗模量随稠油-水乳状液制备搅拌时间的变化规律，可以得出，随着搅拌时间增加，乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均呈现增加的趋势，即黏弹性逐渐增强。图 11 给出了上述动态频率扫描测试中交叉点对应的频率随搅拌时间的变化规律，可以看出，随着搅拌时间增加，交叉点对应的频率逐渐增大，即稠油-水乳状液由黏性主导向弹性主导的转变逐渐提前。

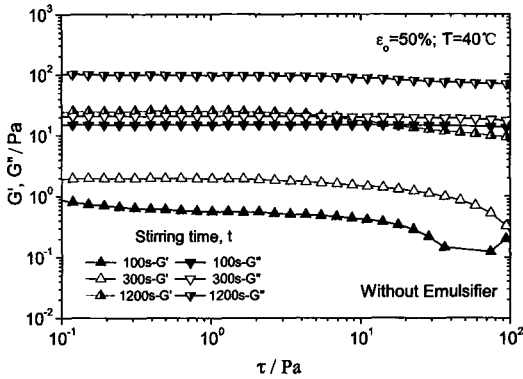


图 8 不同搅拌时间动态应力扫描结果

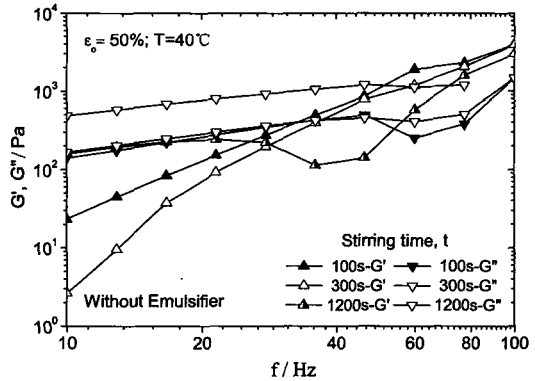


图 9 不同搅拌时间动态频率扫描结果

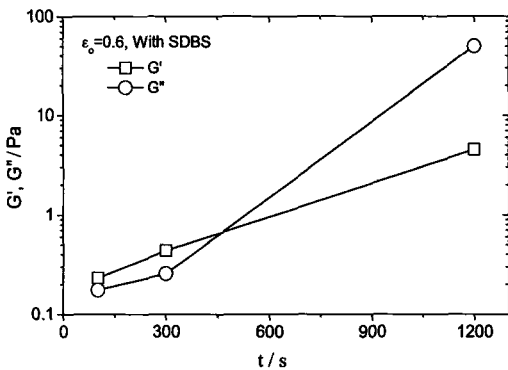


图 10 黏弹性参数随搅拌时间的变化规律

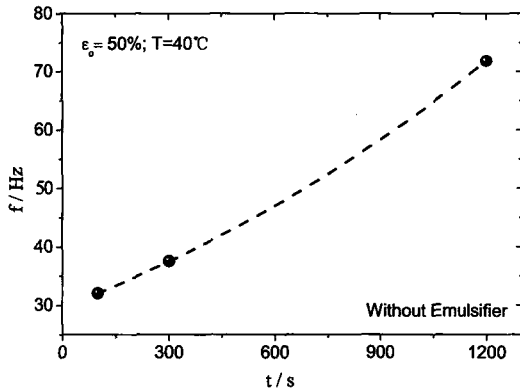


图 11 交叉点对应频率随搅拌时间的变化规律

4 结论

本研究中，针对目前稠油-水乳状液黏弹性研究的进展和发展趋势，稠油-水乳状液的黏弹性进行系统的测试和分析，分别考虑测试温度、剪切频率、体积相含率等参数的影响，给出系统的变化规律，为超稠原油开采和生产系统的设计提供精确的物性参数基础和理论依据。

通过系统的测试和分析得出：随着温度的升高，稠油-水乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随温度均呈现为近似指数衰减的规律；随着温度升高，交叉点对应的频率表现为指数衰减的规律，表明随着温度的升高，稠油-水乳状液由黏性主导 ($G' < G''$) 转变为弹性主

导 ($G' > G''$) 的情况逐渐提前; 随着搅拌时间增加, 乳状液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均呈现增加的趋势, 即黏弹性逐渐增强; 随着搅拌时间增加, 交叉点对应的频率逐渐增大, 即稠油-水乳状液由黏性主导向弹性主导的转变逐渐提前。

参 考 文 献

- [1] 刘海飞, 黄三平, 许晶禹, 等. 超稠油水在倾斜管路中两相流动研究, 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(6): 742-748
- [2] 张劲军, 王小龙. 原油流变学研究及应用的若干进展. 第十一届全国流变学学术会议文集, 2012, 廊坊.
- [3] Kane M, Djabourov M, Volle JL. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions. Fuel 2004; 83: 1591-1605.
- [4] Liu HF, Xu JY, Zhang J, Sun HQ, et al. Oil/water separation in a liquid-liquid cylindrical cyclone, Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 116-123
- [5] Stickel JJ, Powell RL. Fluid mechanics and rheology of dense suspensions, Annual Review Fluid Mechanics, 2005, 37: 129-149
- [6] Zhang J, Xu JY, Gao MC. Apparent Viscosity of Oil-Water (Coarse) Emulsion and Its Rheological Characterization During the Phase Inversion Region, Journal of Dispersion Science and Technology, 2013, 34(8): 1148-1160

Investigation on the visco-elastic characteristics of heavy crude oil-water emulsions

ZHANG Jian, XU Jing-yu*

LMFS, Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190

*Corresponding author,

Abstract: In order to improve the efficient of heavy crude oil extraction, the visco-elastic characteristic of heavy crude oil-water emulsions were investigated by through experiment and theory analysis. The effects of temperature, shear frequency and stirring time on storage modulus and loss modulus were measured and given in this research. In conclusion, the storage modulus and loss modulus of heavy crude oil-water emulsion are kept decreasing as the increase of temperature. And, the shear frequency, where the storage modulus equal to loss modulus, decreases as the increasing temperature. The storage modulus and loss modulus of heavy crude oil-water emulsion are kept increasing as the increase of stirring time, and junction of $G' = G''$ increased.

Key words: Heavy crude oil, Visco-elastic, Emulsion, Storage modulus, Loss modulus