

# 超稠原油的流变学特性

张健, 许晶禹\*, 张栋, 王淑京

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

通讯作者 E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**摘要:** 超稠原油具有高黏度、高密度比和非牛顿流体等特性, 给开采和输运等生产环节的设备和工艺流程带来较大的挑战。本研究中, 为提高超稠原油的生产效率, 将针对超稠原油的触变性、屈服应力和线性黏弹性等流变特性开展系统的实验测试和理论分析。实验中, 采用 HAKKE RS6000 旋转流变仪对三种来自不同油田或油井的超稠原油进行测试, 分别考虑温度、剪切速率和剪切历史等因素的影响。经研究得出, 由于各种原油中蜡质、沥青质等含量的不同, 对其流变学特性具有较大的影响。同时, 随测试温度的增加, 超稠原油的黏度、触变性和屈服应力均呈现出指数衰减的趋势; 超稠原油表现出明显的黏弹性性质, 且随作用频率的增加, 其均从黏性主导转变成弹性主导。研究结果对深入了解超稠原油的流动型、提高其开采和输运的效率提供可靠的数据基础和理论依据。

**关键词:** 超稠原油; 触变性; 屈服应力; 黏弹性

## 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。高黏原油又包含蜡原油、稠油和超稠原油等, 其普遍具有密度大、黏度高等物理特性, 在开采、生产和管道输运等环节中均带来较大的难度。另外, 超稠原油在不同的温度下表现出复杂的剪切变稀、触变性、屈服应力和黏弹性等非牛顿流体的性质。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。

针对原油流变学特性的研究, 国内外学者开展了一系列的研究工作。张劲军等在《第十一届全国流变学学术会议文集》中针对原油流变学的研究进展进行较系统的总结, 重点给出含蜡原油宏观流变性与原油组份及微观结构关系、胶凝原油结构特性等研究方面的进展。原油触变性研究中, 赵宗昌和王栋对常用来描述触变性 R-G 模型中的各参数随温度的变化规律进行了测试分析, 得到相应的变化趋势, 为描述原油触变性提供一定的依据; 贾

邦龙和张劲军对已有触变性的测试方法进行系统的对比分析, 主要包括恒剪切率、剪切率阶跃、控制剪切率滞回环和控制剪应力滞回环等; 张足斌和张国忠结合原油输运中条件, 采用管道流动模拟测试的方法, 对含蜡原油的触变性进行测试分析, 并对原有的触变性模式进行改进, 研究结果更接近于工业生产。原油屈服应力特征研究中, 国内外学者主要针对屈服应力的测试方法、主观存在性和描述方法等开展相应的工作, 侯磊和张劲军通过多种测试方案, 得出胶凝原油屈服应力对测量条件具有依赖性, 但屈服应变不受测量条件的影响。原油黏弹性研究中, 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。

本研究中, 针对目前原油流变学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来源超稠原油的触变性、屈服应力和黏弹性进行系统的测试和分析, 分别考虑测试温度、剪切速率、剪切频率等参数的影响, 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。

## 2 实验装置和方法

研究中, 主要通过实验的方法对三种不同的原油样品进行直接测量, 得到相应的触变性、屈服应力和黏弹性等流变学特性。流变学特性测试仪器设为赛默飞生产的 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  $0.05\mu\text{Nm}$ - $200\text{mNm}$ , 温度控制通过配套的水浴循环来实现, 变化范围为  $0^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ 。

超稠原油触变性测试中, 采用同轴圆筒光滑转子, 圆筒和转子之间的径向间隙为  $2.5\text{mm}$ , 底部间隙为  $8\text{mm}$ , 测试样品容量为  $30.8\text{mL}$ , 具体测试中, 采用控制剪切应变率的模式对样品进行循环测量, 首先将剪切应变率由  $0$  连续增加至  $300\text{s}^{-1}$ , 然后再降至  $0$ , 实现触变滞回环的测试, 测试时间为  $10\text{min}$ 。超稠原油的屈服应力测试中, 采用同轴四叶片转子, 控制启动速率进行, 分别考虑剪切速率和温度对原油屈服应力影响。超稠原油黏弹性特征测试中, 采用同轴圆筒光滑转子, 分别进行应力扫描和频率扫描, 应力加载的频率为  $0.1$ - $100\text{Hz}$ 。上述实验测试中温度的变化范围为  $20$ - $70^{\circ}\text{C}$ 。

本实验中, 采用的原油分别来自绥中海上终端处理厂 (Crude oil A)、渤海油田锦州区域 V104 (Crude oil B) 和 V102 (Crude oil C) 原油生产井, 三种原油的密度和零剪切黏度如表 1 中所述。

表 1 实验原油的物性参数 (T=30°C, P=0.1MPa)

原油	密度 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	黏度 /( $\text{mPas}$ )
Crude oil A	955	5239
Crude oil B	916	241
Crude oil C	933	334

### 3 实验结果分析

#### 3.1 原油的触变性

流变学中, 滞回环常用来描述非牛顿流体的触变性, 其能够直观的表现出流体的触变特征和程度。本研究中, 针对三种不同的原油, 分别测量得到相应的滞回环特征, 并同时考虑温度的影响。

图 1 给出了原油样品 A 的触变性测试结果, 测试的温度为 30~80°C, 剪切速率的变化设置范围为 0~300 $\text{s}^{-1}$ 。从图中可以看出, 原油样品 A 表现出较明显的触变性, 即测试得到的上升应力-应变率曲线均在下降测试得到结果的上部, 且从图中可以看出, 随着温度的增加, 原油的触变性逐渐降低。图 2 给出上述测试得到的滞回环面积随温度的变化规律, 其对原油触变性随温度的变化规律具有清晰的表达, 即在相同的测试条件下, 三种原油的触变性程度随温度的增加均呈现出近似指数衰减的规律。另外, 从图 2 中可以看出, 原油样品 A 的滞回环面积明显高于样品 B 和 C, 表明原油的成分对其触变性具有重要的影响。

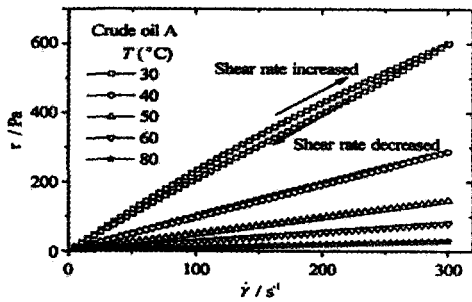


图 1 原油触变性测试曲线

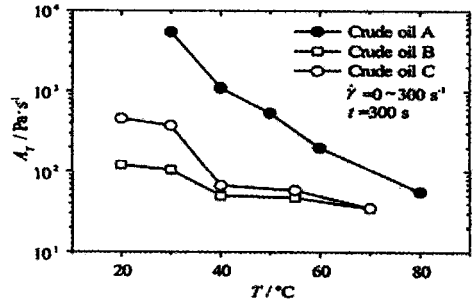


图 2 原油触变性中滞回环面积随温度的变化规律

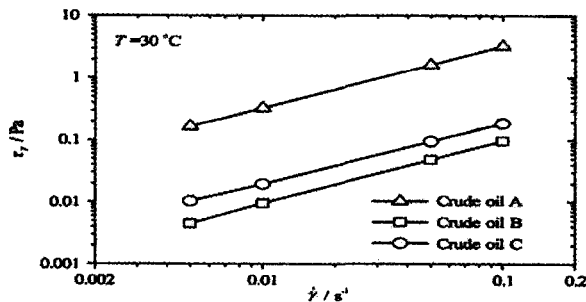


图 3 原油屈服应力随剪切速率的变化规律

### 3.2 原油的屈服应力特征

原油集输过程中,常存在停输后再启动的问题,而启动力与原油的屈服应力特性具有直接的关系,且高于常规流动中压降。本文研究中,分别考虑管道输运再启动中对应的启动速率和温度对原油屈服应力的影响。

图3为三种不同原油,在同一温度等测试条件下,屈服应力随剪切速率的变化规律。从图中可以看出,随着剪切速率,即启动速率的增加,三种原油的屈服应力均呈现出线性增加的趋势,且原油样品A的屈服应力远高于原油样品B和C。图4给出了屈服应力随温度的变化规律,可以看出,原油屈服应力随温度的变化规律与上述触变性特征类似,表现为指数衰减的规律。

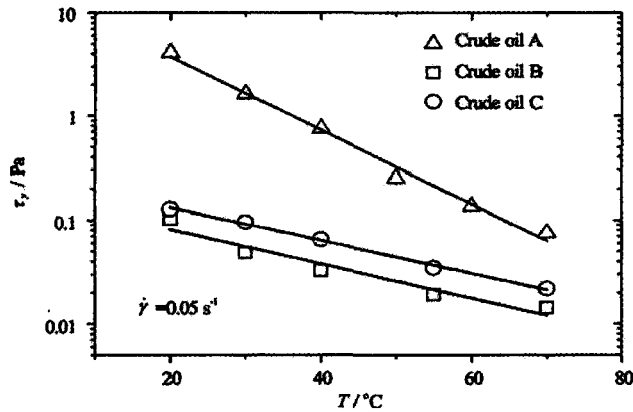


图4 温度对原油屈服应力的影响

### 3.3 原油的黏弹性特征

针对原油黏弹性特征的研究,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、损耗模量和损耗角( $\delta$ )的变化规律。

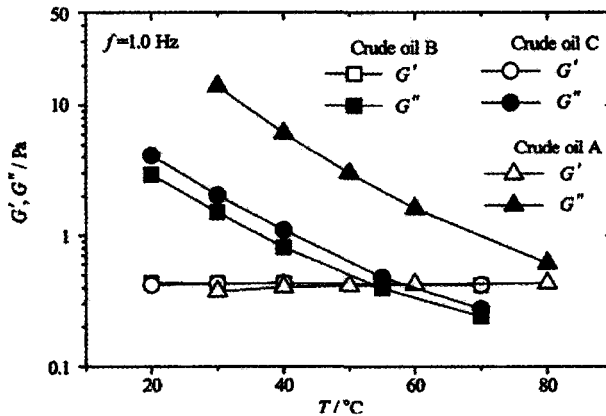


图5 线性黏弹性区域 $G'$ 和 $G''$ 随温度的变化情况

图5给出了三种原油样品,线性黏弹性区域内,储能模量和损耗模量随温度的变化情

况,可以看出,伴随温度的增加,损耗模量呈现为指数衰减的趋势,而储能模量基本保持不变,同样,原油样品 A 对应的损耗模量的数值远大于原油样品 B 和 C,即原油的成份对其黏弹性特征有较大的影响。图 6 为原油样品 A 动态频率扫描测试的结果,可以得出,随剪切力作用频率的增加,原油均从黏性主导转变为弹性主导,且随温度的增加,转变点对应的频率值逐渐降低。

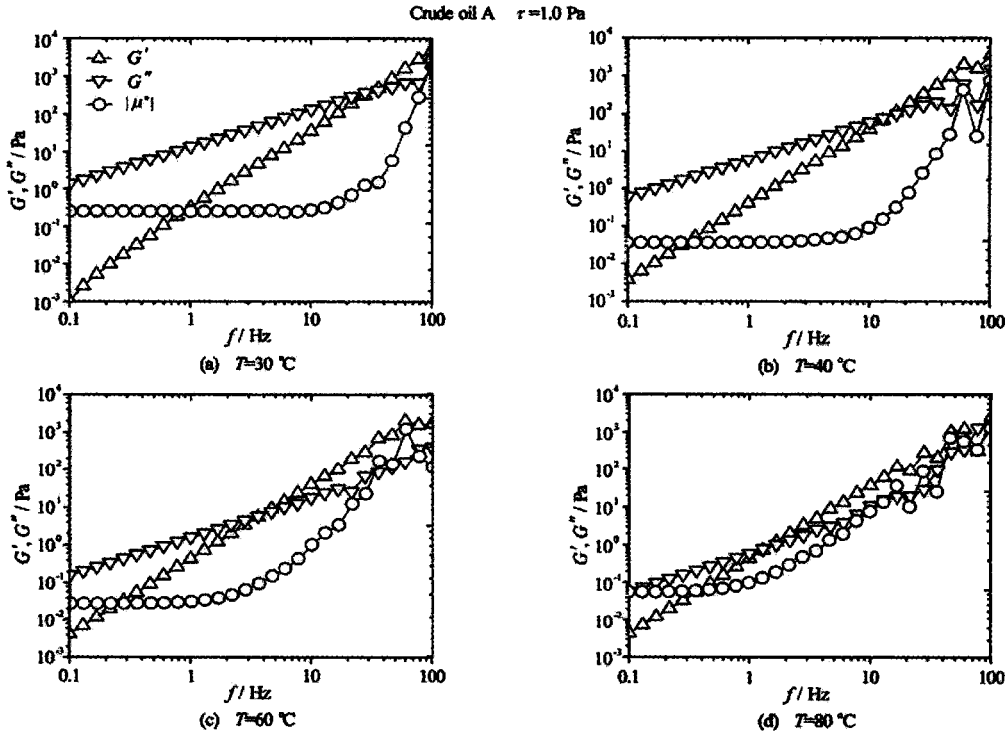


图 6 原油黏弹性测试中频率扫描结果 ( $T=30, 40, 60, 80^{\circ}\text{C}$ )

## 4 结论

采用模块化高级旋转流变仪,同时对三种不同成分原油的触变性、屈服应力和黏弹性等流变学特征进行测试和分析,且分别考虑剪切速率、温度等因素的影响,经系统的研究得出:① 原油在一定的温度下均表现出较明显的触变性,随着温度的增加,原油的触变性逐渐降低,可以通过滞回环的面积进行定量的描述;② 随着剪切速率,即启动速率的增加,原油的屈服应力均呈现出线性增加的趋势,原油屈服应力随温度的变化与上述触变性特征类似,表现为指数衰减的规律;③ 原油在测试频率范围内,表现为黏弹性特征,伴随温度的增加,损耗模量呈现为指数衰减的趋势,而储能模量基本保持不变,随剪切频率的增加,原油均从黏性主导转变为弹性主导,且随温度的增加,转变点对应的频率值逐渐降低。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Kane M, Djabourov M, Volle JL. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions. Fuel 2004; 83: 1591-1605.
- [3] Chhabra RP, Richardson JF. Non-Newtonian flow and applied rheology: Engineering applications (second edition). IChemE 2008.
- [4] 张足斌, 张国忠. 含蜡原油管道流动的触变性研究. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 72-74.
- [5] 赵宗昌, 王栋. 含蜡原油在凝点下的触变性研究. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 20-24.
- [6] 贾邦龙, 张劲军. 含蜡原油触变性测试方法. 油气储运, 2012, 31(4): 254-259.
- [7] 侯磊, 张劲军. 含蜡原油屈服特性的试验研究. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(6): 99-103.
- [8] 李传宪, 李琦瑰. 胶凝原油黏弹性的实验研究. 力学与实践, 2000, 22(3): 48-50.
- [9] 侯磊, 张劲军. 含蜡原油低温黏弹性研究的现状与分析. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 140-144.

## Investigation on the rheological characteristics of heavy crude oils

ZHANG Jian, XU Jing-yu\*, ZHANG Dong, WANG Shu-jing

Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190

\*Corresponding author, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

**Abstract:** Heavy crude oil defined as high viscosity and greater density ratio oils, which always perform the characteristic of non-Newtonian fluid and brings a series of difficult on the petroleum industry such as exploiting and transportation. The rheological characteristics included thixotropy, yield stress and viscoelastic were investigated in order to improve the petroleum production efficiency by through experiment. In this work, HAKKE RS6000 rheometer was used to measure the corresponded behaviors, and the effect of temperature and shear rate was considered systematically. Following the research, it has a great influence on the rheological characteristics due to the different components of crude oils. As the increasing temperature, the values of viscosity, thixotropy and yield stress are kept in decreasing with exponent rule. Heavy crude oil performs the viscoelastic characteristic in the measuring condition, and it is always changed from viscosity led to elastic as the increasing frequency.

**Key words:** Heavy crude oil; Thixotropy; Yield stress, Visco-elastic