

管道内含蜡原油停输再启动的流动特征

张健, 杨乐乐, 张栋, 许晶禹*

LMFS, 中国科学院力学研究所, 100190, 北京;

*通讯作者, Tel.: +86 10 8254 4179; E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

摘要: 含蜡原油是一种组成复杂的混合物, 析蜡点以下常表现为复杂的非牛顿流体特性, 而其中含蜡原油所具有的屈服应力特性, 对管道输运系统中的停输再启动具有重要的影响。本文研究中, 为系统的分析含蜡原油屈服应力特性在管道停输再启动过程中的作用, 将对含蜡原油的屈服应力进行直接测量, 并结合管道输运的模拟对停输再启动现象进行系统的分析。实验中, 采用 HAAKE RS6000 旋转流变仪对含蜡原油的屈服应力进行直接测量, 分别考虑温度和剪切速率等因素的影响。同时, 建立含蜡原油管道输运模拟系统, 对其启动过程进行测试分析, 给出不同温度和速率条件下启动过程中的压力变化规律。经研究得出, 含蜡原油的屈服应力随温度的降低呈近似指数增加的规律, 随剪切速率的增加呈现为近似线性增加的规律。管道输运再启动过程中, 压力变化的规律与流变仪直接测量得到的应力变化规律相同, 表现有屈服的特性, 即启动过程中首先表现出弹性变形的现象, 随着变形的增大出现屈服, 随后产生流动完成启动。通过对比分析得到, 流变仪直接测量得到的屈服应力可以应用于计算管道输运停输再启动过程中需要的最大外载荷, 具有较高的精度。研究结果对含蜡原油输运系统的设计, 以及含蜡原油的开采具有重要的理论和工程意义。

关键词: 含蜡原油, 屈服应力, 管道输运, 再启动

1 引言

在目前已开采的石油资源中, 稠油或超稠油占据着较大的比重, 但由于其自身的性质, 很难在管道中进行输运和开采, 一般常需要进行加热处理。通常, 稠油或超稠油呈现出多种流变学特征, 包括剪切变稀、屈服应力、触变性、黏弹性等, 而其中的屈服应力特征一般为含蜡原油特有的性质 (Cawkwell, 1987; Chang, 1998), 其影响着管道流动中系统的启动 (Phan-Thein, 1997), 当输运系统供给的动力低于物质的屈服应力时, 液体不会发生流动, 只有当外动力大于对应的屈服应力, 输运系统才能够启动, 实现原油输运 (Cawkwell,

1987)。因此，屈服应力也可定义为一个临界应力，当物质受力低于临界应力，其表现为固体的性质，当物质受力高于临界应力值，液体发生流动 (Keentok, 1982)。在管道运输系统中，为了让原油（假设不可压缩）产生流动，理论上需要的最小压力差值 (ΔP_{\min}) 可采用下面公式进行计算：

$$\Delta P_{\min} = \frac{4\tau_y L}{D}$$

式中， τ_y 为流体的屈服应力，单位为 Pa； L 为管道的长度，单位为 m； D 为管道的内径，单位为 m。

本文研究中，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超稠原油的屈服应力进行直接测量，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。同时，建立管道内原油停输再启动模拟系统，测量相应的启动特征，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原油样品进行直接测量，得到相应屈服应力特性。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 $0.05\mu\text{Nm}$ - 200mNm ，温度控制通过配套的水浴循环来实现，变化范围为 0°C - 100°C 。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。实验测试中温度的变化范围为 $20\sim 70^\circ\text{C}$ 。

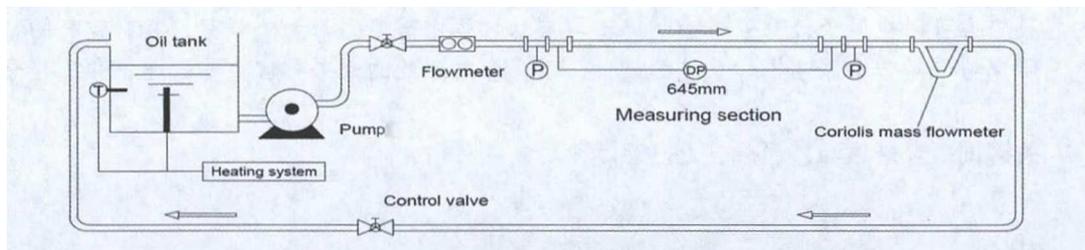


图1 管道流动循环测试系统

图1为研究中建造的管道停输再启动循环模拟系统，包括：加热及温度控制装置、循环泵、流量计、测试管段、压力测量系统等，实验测试管段的内径为 50mm 。同时，实验循环管道的外部采用热电阻进行恒温，用于测量不同启动温度条件下，原油停输再启动的压力波动和流动等特征。

本文实验中，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℃, P=0.1MPa)

原油	密度 / (kg/m ³)	黏度/ 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 原油的屈服应力特征

图 2 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 3 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。

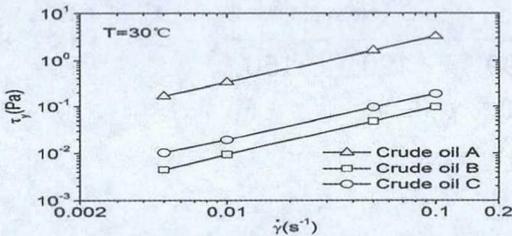


图 2 原油屈服应力随剪切速率的变化规律

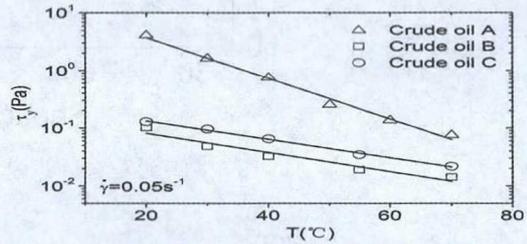


图 3 温度对原油屈服应力的影响

3.2 管道内原油停输再启动特征

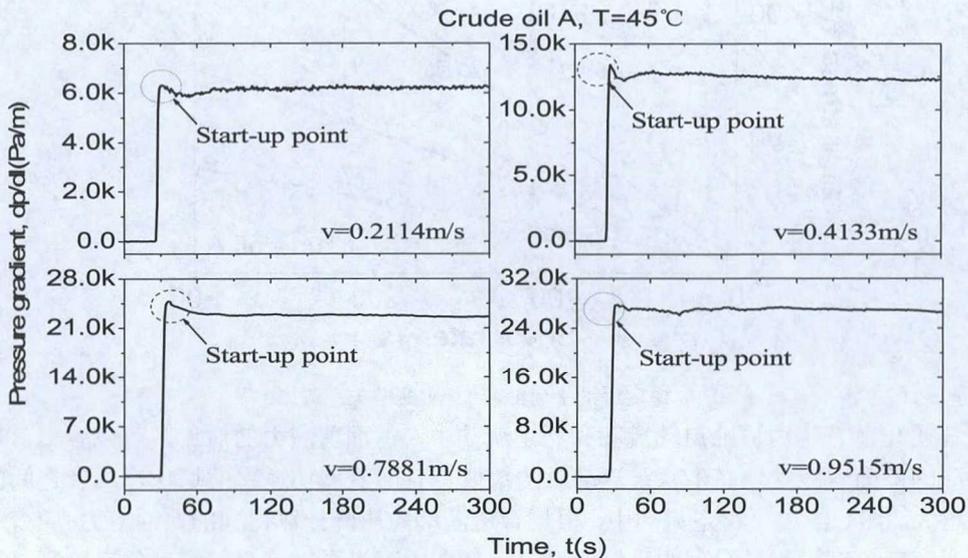


图 4 停输再启动过程压力梯度的变化规律

图 4 给出了管道内原油停输再启动过程中压力梯度的变化规律。从图 4 中可以看出，随着启动过程的进行，管道内的压力梯度呈现急剧的增加，然后出现下降的趋势，而此时压力梯度出现的峰值便体现为原油的屈服特性，可以明显看出，对应的屈服应力值，均高于原油稳定流动时的压力梯度。

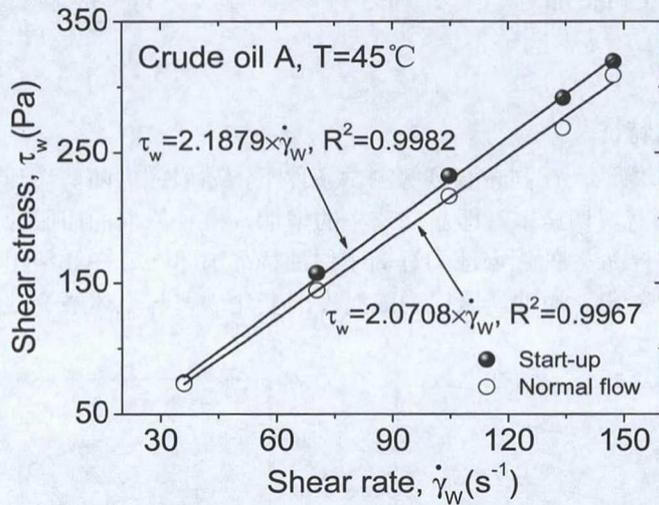


图 5 启动过程与稳定流动过程中壁面剪应力对比

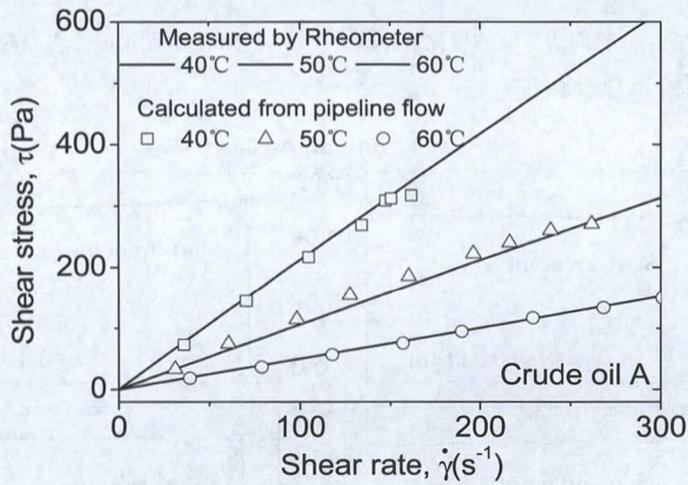


图 6 稳定流动中原油应力-应变率关系对比

图 5 给出了管道内原油启动流动和稳定流动中，壁面剪应力的对比，可以看出，启动过程对应的壁面剪应力均高于稳定流动时的数值，且随着剪切速率的增加，二者之间的差值逐渐增大。图 6 给出了稳定流动中，根据管道流动的压降计算得到的原油应力-应变率曲线与采用流变仪直接测量得到的数值的对比。从图中可以看出，采用流变仪直接测量得到

的原油本构关系，及对应的表观黏度数值，与管道内稳定流动时的数值相同。

图 7 为流变仪直接测量得到的屈服应力与管道停输再启动计算得到数值对比，可以看出，两种测量方法得到的原油屈服应力的变化规律完全相同，随着剪切速率或启动速率的增加，屈服应力呈现为线性增加的趋势，随着温度的升高均呈现为降低的趋势。同时，采用流变仪直接测量得到的屈服应力，可以较好的与管道停输再启动在线测量得到的数值相吻合，即可以采用流变仪离线测量的方法用于预测管道中原油停输再启动需要的最大压力梯度，具有重要的工程价值和意义。

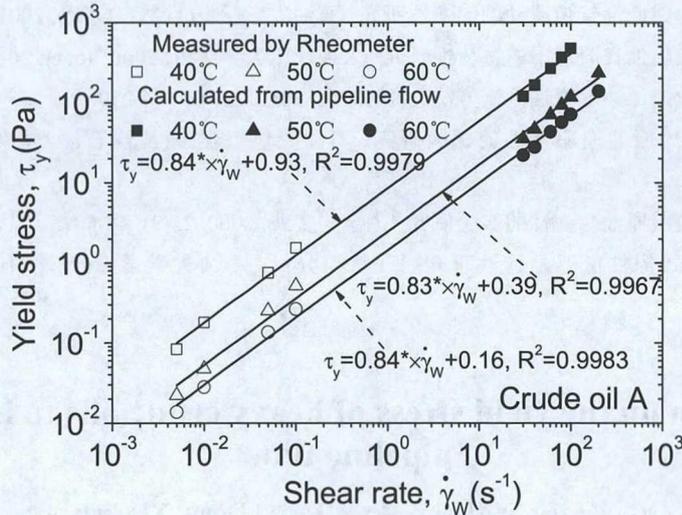


图 7 管道内停输再启动屈服应力预测分析

4 结论

采用模块化高级旋转流变仪，同时对三种不同成份原油屈服应力进行测试和分析，且分别考虑剪切速率、温度等因素的影响，同时，建立含蜡原油管道运输模拟系统，对其启动过程进行测试分析，给出不同温度和速率条件下启动过程中的压力变化规律。经研究得出，含蜡原油的屈服应力随温度的降低呈近似指数增加的规律，随剪切速率的增加呈现为近似线性增加的规律。管道运输再启动过程中，压力变化的规律与流变仪直接测量得到的应力变化规律相同，表现有屈服的特性，即启动过程中首先表现出弹性变形的现象，随着变形的增大出现屈服，随后产生流动完成启动。通过对比分析得到，流变仪直接测量得到的屈服应力可以应用于计算管道运输停输再启动过程中需要的最大外载荷，具有较高的精度。研究结果对含蜡原油运输系统的设计，以及含蜡原油的开采具有重要的理论和工程意义。

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. 见: 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 yield stress of heavy crude oils to improve the pipeline flow

ZHANG Jian, YANG Le-le, ZHANG Dong, XU Jing-yu*

LMFS, Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190

*Corresponding author, Tel.: +86 10 8254 4179; 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 of yield stress was 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. Also, the pipeline simulation system was built to measure the behavior of start-up flow. 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 value of yield stress is kept in decreasing with exponent rule. And, the yield stress will be increased as the increasing start-up shear rate.

Key words: Heavy crude oil; Yield stress, Pipeline transportation; Start-up