

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.02.003

超稠原油的流变学特性及流动特征研究*

张栋, 张健, 刘硕, 许晶禹

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

摘要: 该文针对三种不同类型的超稠原油的触变性、屈服应力和黏弹性等开展了研究工作。实验首先采用 Haake RS6000 旋转流变仪进行了流变学测试, 结果表明随温度的上升, 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, 且随频率的增大, 样品从黏性主导转变成弹性主导。室内管道流动实验中, 分别考虑温度、流速等因素研究了原油管道运输时的启动应力和流动规律, 并将管流的测试结果与流变仪测量数据进行了对比分析, 采用流变仪得到的在低剪切速率区间的流变学参数可以很好地应用于高剪切速率区的管道流动中。

关键词: 超稠原油; 触变性; 屈服应力; 黏弹性; 管道流动实验。

中图分类号: O359+.1

文献标识码: A

Investigation on rheological properties and flow characteristics of heavy crude oils

ZHANG Dong, ZHANG Jian, LIU Shuo, XU Jing-yu
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the thixotropy, yield stress and viscoelasticity of three different kinds of heavy crude oils were investigated. Haake RS6000 rheometer was used to measure the rheological characteristics. The results show that the values of viscosity, thixotropy and yield stress are kept in decreasing by exponent rule with increasing of the temperature. Heavy crude oil performs the obvious viscoelastic characteristic and will be changed from viscosity dominant to elastic dominant with the frequency increasing. By considering the influence factors of temperature and velocity, the law of start-up stress and the rule of flow were investigated in the experiments of pipeline transportation, respectively. A comparison between the pipe flow measurements and the rheological measurements indicated that the parameters of rheology under the low shear rates obtained by rheometer can apply successfully to the pipe-flow with the high shear rates.

Key words: heavy crude oil; thixotropy; yield stress, visco-elasticity, pipe flow experiment

* 收稿日期: 2015-07-25(2015-12-02 修改稿)

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”(2011YQ120048-02)

作者简介: 张栋(1991-), 男, 山东阳谷人, 硕士研究生。

通信作者: 许晶禹, Email: xujingyu@imech.ac.cn

Received: July 25, 2015 (Revised December 2, 2015)

Project supported by foundation: Supported by the Subsea High Efficiency Oil/Gas/Water Separating and Metering Device for the Special Development of National Key Scientific Instruments in China (2011YQ120048-02)

Biography: ZHANG Dong (1991-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

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。高黏原油又包括含蜡原油、稠油和超稠原油等,其普遍具有密度大、黏度高等物理特性,给开采、生产和管道运输等环节带来难度^[1,2]。针对原油流变学特性的研究,张劲军等^[3]给出了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。原油触变性研究中,Kane 等^[4]对含蜡原油的晶体结构和流变学特性之间的关系进行了研究。赵宗昌等^[5]对常用以描述触变性 R-G 模型中的各参数随温度的变化规律进行了测试分析,得到了相应的变化趋势。贾邦龙和张劲军^[6]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。张足斌等^[7]结合原油运输中条件,采用管道流动模拟测试的方法,对含蜡原油的触变性进行了测试分析,并对原有的触变性模式进行改进。原油屈服应力研究中,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。Chhabra 等^[8]对非牛顿的本构关系进行了详细的总结。侯磊等^[9]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,李传宪等^[10]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、复数模量大及损切角小等。侯磊等^[11]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。

在本文研究中,采用 Haake RS6000 旋转流变仪对不同来源超稠原油的触变性、屈服应力和黏弹性进行了系统的测试和分析,分别考虑测试温度、剪切速率及剪切频率等参数的影响,给出了变化规律。同时在实验室搭建管道循环测试系统,在考虑温度和流速的因素下,得到了超稠原油的流变学特

征,然后将管道循环测试得到的结果与流变仪测量得到的结果进行对比,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。

1 实验装置和方法

1.1 流变学特性测量

流变学为赛默飞生产的 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 $0.05 \mu\text{Nm} - 200 \mu\text{Nm}$,温度控制通过配套的水浴循环来实现,变化范围为 $0 - 100^\circ\text{C}$ 。

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 mm ,底部间隙为 8 mm ,测试样品容量为 30.8 ml 。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 s^{-1} ,然后再降至 0 ,实现触变滞回环的测试,测试时间为 10 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 $20 - 70^\circ\text{C}$ 。

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

表 1 实验原油的物性参数 ($T = 30^\circ\text{C}$, $P = 0.1 \text{ MPa}$)
Table 1. The physical parameters of crude oil ($T = 30^\circ\text{C}$, $P = 0.1 \text{ MPa}$)

原油	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1}$
Crude oil A	955	5239
Crude oil B	916	241
Crude oil C	933	334

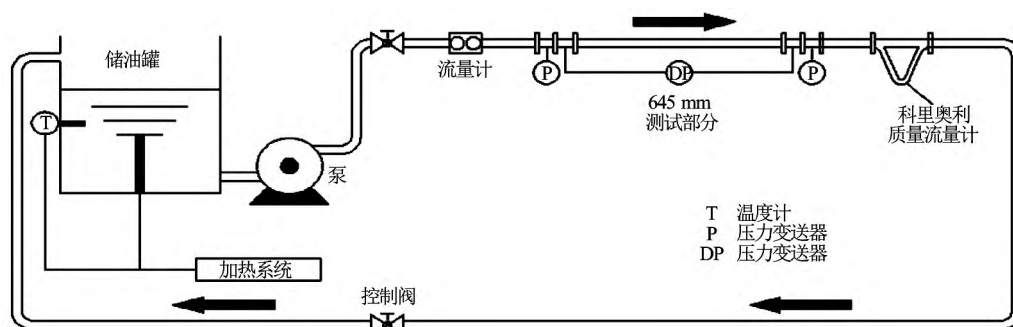


图 1 管道流动循环测试系统简图
Fig.1 Schematic diagram of the pipe flow loop

1.2 管道流动测试循环系统

管道循环测试系统中采用不锈钢钢管, 内径为 47 mm, 绝对粗糙度为 0.2 mm, 总长度为 15 m。利用精确度为 0.15% 的压力变送器 (Rosemount 3051TG) 测量管道内两个不同位置处的压强波动。用精确度为 0.15% 的差压变送器 (Rosemount 3051CD) 来测量压强梯度。用科里奥利质量流量计来测量密度, 温度和质量流量。流量的大小的控制通过调节泵的速率来实现并用齿轮流量计来计量。同时, 通过在储油罐中加装的加热系统给整个循环测试系统进行加热。

2 超稠原油流变学特性

2.1 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, 其能够直观地表现出流体的触变特征和程度。本文研究中, 针对三种不同的原油, 分别测量得到相应的滞回环特征, 并同时考虑了温度的影响。图 2 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 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。

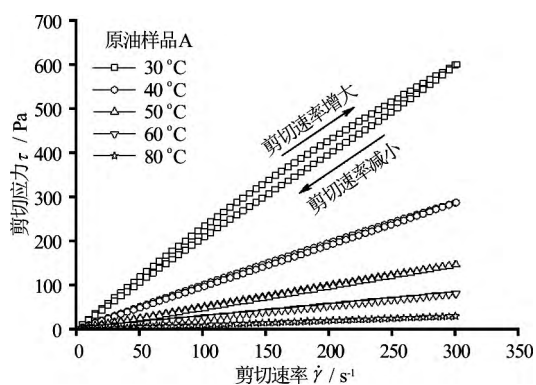


图 2 不同温度下, 原油样品 A 触变性特征曲线
Fig.2 The curves of thixotropic characteristic of crude oil A at different temperatures

2.2 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, 分别考虑管道运输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, 即启动速率的增大, 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。由图中可以看出, 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。

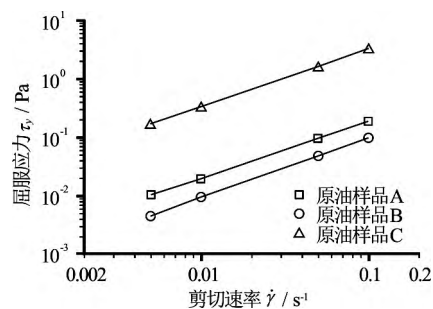


图 3 原油屈服应力随剪切速率的变化规律 ($T = 30^{\circ}\text{C}$)
Fig.3 Effect of shear rate or start-up rate on the yield stress for three crude oils ($T = 30^{\circ}\text{C}$)

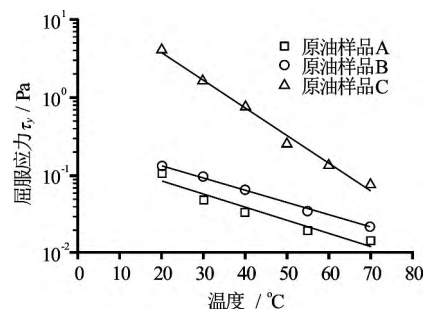


图 4 温度对原油屈服应力的影响
Fig.4 Effect of temperature on the yield stress for three crude oils

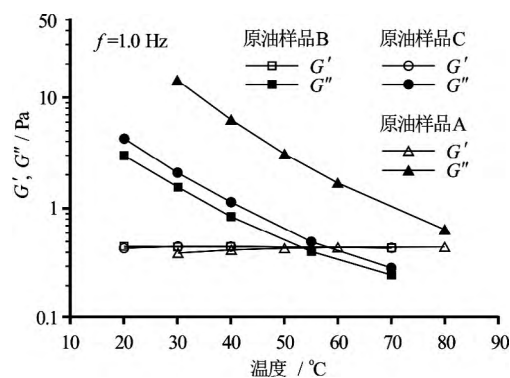


图 5 线性黏弹性区域 G' 和 G'' 随温度的变化情况
Fig.5 Effect of temperature on the G' and G'' at the region of linear viscoelasticity

2.3 原油的黏弹性特征

针对原油黏弹性特征的研究, 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, 得到储能模量和损耗模量的变化规律。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

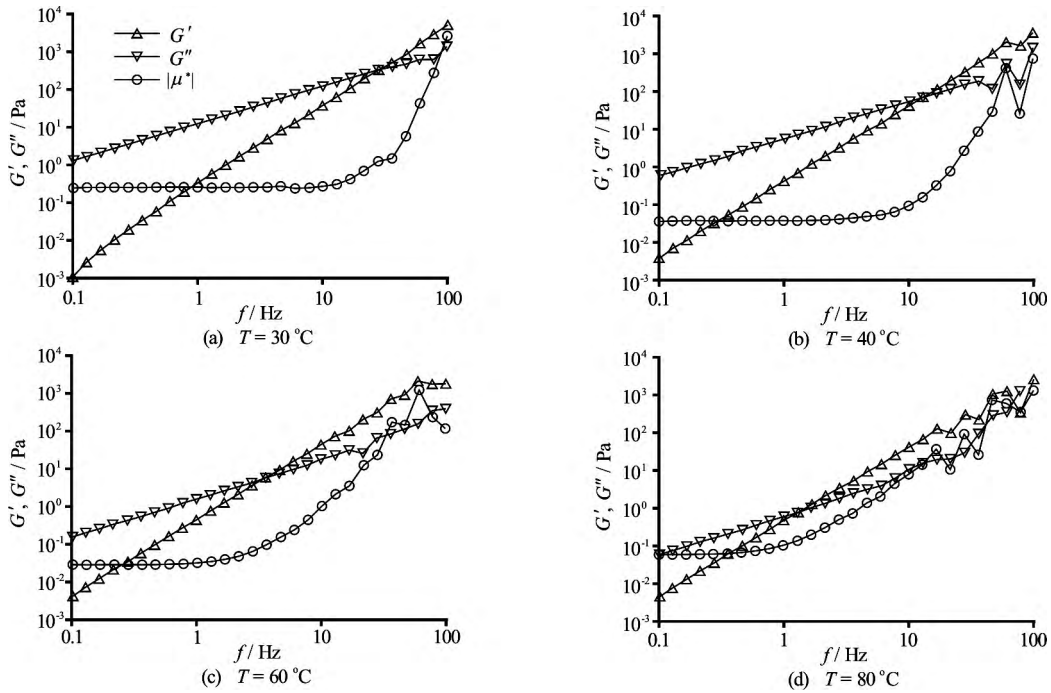


图 6 不同温度下原油黏弹性测试中频率扫描结果

Fig.6 The result of frequency scan in the test of linear viscoelasticity for three crude oils at different temperatures

情况。由图中可以看出，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。由图中可以得出，随着剪切力作用频率的增大，原油均从黏性主导转变为弹性主导，且随温度的上升，转变点对应的频率值逐渐降低。

3 管道内超稠原油流动特征

由于在管道测量中，不能通过直接测量得到剪切应力、剪切速率和屈服应力，但是可以通过测量压降、流速和启动应力来反算出剪切应力、剪切速率和屈服应力。在管道中完全发展的不可压缩的层流，壁面剪切应力与压强梯度 ($\Delta P/L$) 的关系为

$$\tau_w = \frac{D}{4} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \tag{1}$$

式中， τ_w 为壁面剪切应力， D 为管道直径。

流速与壁面剪切速率的关系为

$$\gamma_w^s = \frac{8v}{D} \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \tag{2}$$

式中， γ_w^s 为壁面剪切速率， v 为流速， n 为流性指数。

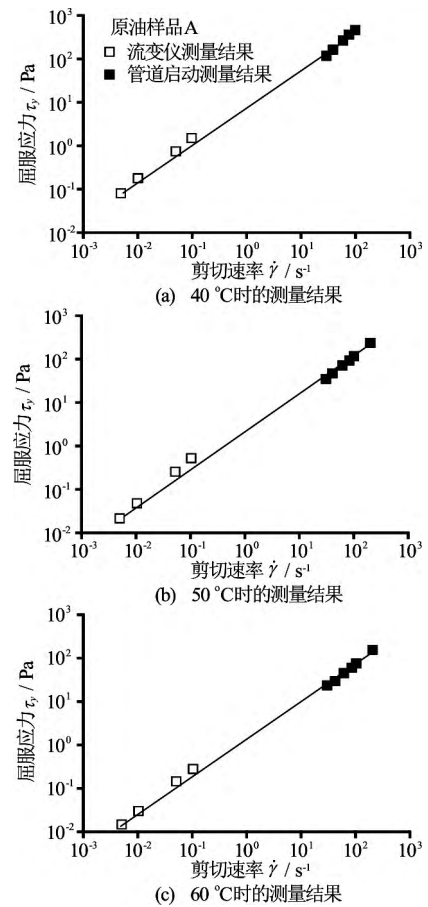


图 7 管道测量得到的原油样品 A 的屈服应力与剪切速率之间的关系与流变仪结果对比

Fig.7 Yield stress versus shear rate obtained in pipe start-up flow with those measured in the rheometer

启动应力与屈服应力的关系为

$$\Delta P_{\min} = \frac{4\tau_y L}{D} \quad (3)$$

式中, ΔP_{\min} 为启动应力, τ_y 为屈服应力。

3.1 管道中原油的屈服应力特征

本文研究中, 分别考虑 40°C、50°C 和 60°C 时, 管道运输对应的屈服应力和剪切速率之间的关系。图 7 为流变仪测量和管道循环测量得到的屈服应力与剪切速率之间的关系。从图中可以看出, 通过管道测量得到的屈服应力和剪切速率之间的关系与流变仪得到的关系基本相同。

3.2 管道中原油的本构关系

图 8 给出了 40°C、50°C 和 60°C 下, 剪切应力与剪切速率之间的关系。从图中可以看出, 通过管道循环测量得到的关系与流变仪得到的关系基本一致, 即通过流变仪测量得到的原油样品的本构关系可以很好的应用于管道中原油本构关系的确定。

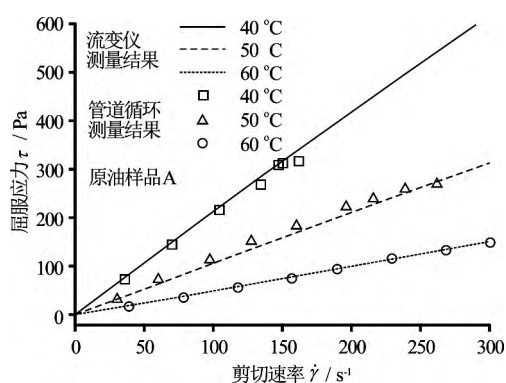


图 8 管道循环测量得到的原油样品的本构关系与流变仪测量结果对比

Fig.8 Comparison of the constitutive relation between the direct measurement by Rheometer and the calculation from pipe flow at different temperatures

4 结论

本文对三种不同成份原油的触变性、屈服应力和黏弹性等流变学特征开展了研究工作, 并得出以下主要结论:

(1) 在一定的温度下, 样品表现出较明显的触变性, 随着温度的上升, 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, 即启动速率的增大, 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, 伴随温度的上升, 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。随剪切频率的增大, 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。

(4) 通过超稠原油管道流动室内模拟和流变仪测试数据的对比分析得出, 采用流变仪直接测量原油的流变学特性, 可以很好的应用于管道流动中原油屈服应力、黏度等流变参数的确定。

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的研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2012, 27(6): 742-748.
LIU Hai-fei, HUANG San-ping, XU Jing-yu, et al. Experimental study for high viscosity ratio oil-water two phase flow in inclined pipes[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(6): 742-748.
- [2] BARNES H A. The yield stress□a review or 'παντα περ'□everything flows?[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999, 81: 133-178.
- [3] 张劲军, 王小龙. 原油流变学研究及应用的若干进展[C]. 第十一届全国流变学学术会议文集, 廊坊, 中国, 2012.
ZHANG Jin-jun, WANG Xiao-long. Some advances in crude oil rheology and its application[C]. The Eleventh National Academic Conference on Rheology, Langfang, China, 2012.
- [4] KANE M, DJABOUROV M, VOLLE J L. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions[J]. Fuel, 2004, 83: 1591-1605.
- [5] 赵宗昌, 王栋. 含蜡原油在凝点下的触变性研究[J]. 大连, 中国: 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 20-24.
ZHAO Zong-cang, WANG Dong. Study of thixotropy of waxy crude oil below solidification point[J]. Dalian, China: Journal of Dalian University of Tecnology, 2006, 46(1): 20-24.
- [6] 张足斌, 张国忠. 含蜡原油管道流动的触变性研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 72-74.
ZHANG Zu-bin, ZHANG Guo-zhong. Thixotropy of waxy crude oil flowing through pipeflow[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Socian Sciences, 2001, 25(4): 72-74.
- [7] 贾邦龙, 张劲军. 含蜡原油触变性测试方法[J]. 油气储运, 2012, 31(4): 254-259.

- JIA Bang-long, ZHANG Jin-jun. Thixotropy test method of waxy crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(4): 254-259
- [8] CHHABRA R P, RICHARDSON J F. Non-Newtonian flow and applied rheology: Engineering applications[M]. IChemE, 2008.
- [9] 侯磊, 张劲军. 含蜡原油屈服特性的试验研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(6): 99-103.
- HOU Lei, ZHANG Jin-jun. An experimental study on yield characteristics of waxy crude oil[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(6): 99-103.
- [10] 李传宪, 李琦瑰. 胶凝原油黏弹性的实验研究[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 48-50.
- LI Chuan-xian, LI Qi-gui. Experimental study on the viscoelasticity of gelled crude oil[J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(3): 48-50.
- [11] 侯磊, 张劲军. 含蜡原油低温黏弹性研究的现状与分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 140-144.
- HOU Lei, ZHANG Jin-jun. Status and analysis of low temperature viscoelasticity of waxy crude oil[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Socian Sciences, 2004, 28(6): 140-144.