

文章编号: 0253-2697(2012)06-1080-06

## 六参数含蜡原油触变模型

贾邦龙<sup>1,2</sup> 张劲军<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学油气管道输送安全国家工程实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室 北京 102249)

**摘要:**含蜡原油在较低温度下具有典型的触变特征,触变模型是含蜡原油输送管道再启动数值模拟的基础。在分析现有触变模型的基础上,结合含蜡原油的特性以及悬浮体系流变学的相关理论,提出了一个适用于含蜡原油的包含 6 个参数的黏塑性触变模型,并利用基于剪切率阶跃方法测试的触变数据对该模型进行了检验。结果表明,该模型对触变数据的拟合效果优于目前常用的包含 8 个参数的 Houska 模型,与 12 个参数的双结构参数模型相当。与 Houska 模型和双结构参数模型相比,所提出的六参数模型因拟合参数少且状态方程形式较为简单,通过优化算法拟合确定的触变参数定性上更为合理,更适用于含蜡原油管道停输再启动数值模拟。

**关键词:**含蜡原油;触变性;黏塑性;模型;停输再启动

**中图分类号:**TE 732

**文献标识码:**A

### A six-parameter thixotropic model for waxy crude oil

JIA Banglong<sup>1,2</sup> ZHANG Jinjun<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Beijing Key Laboratory of Oil & Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Thixotropy is one of the typical rheological characteristics of waxy crude at low temperatures, and a thixotropic model is essential for numerical simulation of pipeline restart. In this paper, based on the analysis of existing thixotropic models and combined with characteristics of waxy crude and related theories of suspension rheology, we proposed a viscoplastic model with six parameters to describe thixotropic behaviors of waxy crude. The capability of this model in fitting experimental data was verified using thixotropic data obtained from tests by the step gradient method of shear rate. The result shows that the fitting effect of this six-parameter model about experimental data is equivalent to that of the double-structural-parameter model with twelve parameters, much better than that of the conventional eight-parameter Houska model. Besides, compared with the two existing models, parameter values obtained from data regression with this proposed model are physically more reasonable thanks to less parameters and simpler state equations. Consequently, this six-parameter model may be more suitable for the numerical simulation of pipeline restart.

**Key words:** waxy crude oil; thixotropy; viscoplasticity; model; pipeline restart

我国所产原油 80% 以上为含蜡原油,在管输过程中广泛面临蜡沉积<sup>[1-2]</sup>以及长时间停输后凝管<sup>[3-4]</sup>等安全隐患。目前,基于含蜡原油触变性的管道停输再启动数值模拟是管道流动安全评价的重要手段,而建立能够准确描述原油触变性的模型则是保证数值模拟结果可靠性的重要基础。现有含蜡原油触变模型大体上可分为两类:一类是基于恒剪切率条件<sup>[5-6]</sup>或特定试验装置(中试环道)<sup>[7-8]</sup>的实测数据得出,具有模型参数少、结构简单的特点,但由于模型中不含剪切率参数,因此不适用于管道停输再启动数值模拟;另一类触变模型<sup>[9-16]</sup>借助一个无量纲参数 $\lambda$ (取值 0~1)表征结构

的完整程度,模型参数具有明确的物理意义,可以对复杂流动条件下的触变行为进行表征,目前应用最为广泛。但是,现有的这类模型存在模型参数个数和拟合精度之间的矛盾,即参数少的模型对实验数据的拟合精度一般不高,而由于该类模型具有较强的非线性特征,增加模型参数又会给参数拟合过程中寻求全局最优解增加困难,同时也更难保证拟合参数的合理性。因此,需要在保证模型物理意义和拟合精度的前提下减少模型参数。笔者在分析现有含蜡原油触变模型的基础上,结合含蜡原油的特性以及悬浮体系流变性的相关理论,提出了一个物理意义明确、模型参数少的六

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(No. 51134006)和北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(YB20081141401)资助。

**第一作者:**贾邦龙,男,1984 年 1 月生,2006 年获中国石油大学(北京)学士学位,现为中国石油大学(北京)油气储运工程专业博士研究生,主要从事油气储运工程相关技术的研究。Email:jiabanglong\_112@126.com

**通讯作者:**张劲军,男,1962 年 3 月生,1998 年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)机械与储运工程学院教授,主要从事油气长距离管输技术及易凝高黏原油流变学教学与科研工作。Email:zhangjj@cup.edu.cn

参数黏塑性触变模型,并利用基于剪切率阶跃加载方式<sup>[17]</sup>的触变试验数据对模型可靠性进行了验证。

## 1 原油触变试验

试验油样为大庆原油,20℃密度为862.4 kg/m<sup>3</sup>,含蜡量为24.1%,析蜡点为39.0℃。为保证测试结果的可重复性,油样均经过80℃预处理以消除历史效应。经预处理的油样加热至45℃后凝点为32℃。试验仪器为德国HAAKE公司产RS150控制应力流变仪,采用Z41Ti同轴圆筒测量系统,配备的F8/C35程控水浴控温精度为±0.1℃。装样前将油样加热至45℃,并将流变仪控温水浴温度调至45℃,装样后在流变仪中以相同温度恒温15 min。恒温结束后以0.5℃/min降温速率分别降至35℃、34℃、33℃、32℃和31℃,恒温30 min后对油样进行触变性测试。

为了考察模型对复杂流动条件下触变行为的表征能力,以剪切率阶跃方法对油样触变性进行测试,测试剪切率 $\dot{\gamma}$ 依次为1 s<sup>-1</sup>、2 s<sup>-1</sup>、4 s<sup>-1</sup>、8 s<sup>-1</sup>、16 s<sup>-1</sup>和32 s<sup>-1</sup>,每个剪切率下剪切5 min。重复测试结果表明,相同试验条件下触变数据的平均偏差(相同时间和剪切率对应的应力偏差的平均值)在15%以内。

## 2 六参数黏塑性触变模型

### 2.1 模型建立

由于蜡晶析出并形成三维网络结构,含蜡原油在低温下表现出屈服应力。若蜡晶结构被完全破坏,含蜡原油变为以蜡晶颗粒为分散相的悬浮体系,则原油不应具有静屈服应力。因此,剪应力 $\tau$ 可分为蜡晶结构的贡献 $\tau_s$ 以及液相组分的贡献 $\tau_l$ 两部分:

$$\tau(\lambda, \dot{\gamma}) = \tau_s(\lambda, \dot{\gamma}) + \tau_l(\dot{\gamma}) \quad (1)$$

其中 $\tau_s$ 又可分为结构强度的贡献 $\tau_{sy}$ 及与结构相关的黏度贡献 $\tau_{svs}$ 两部分:

$$\tau_s(\lambda, \dot{\gamma}) = \tau_{sy}(\lambda) + \tau_{svs}(\lambda, \dot{\gamma}) \quad (2)$$

基于结构参数的定义以及目前触变机理模型的普遍做法<sup>[5,12]</sup>,取 $\tau_{sy}$ 和 $\tau_{svs}$ 均与结构参数 $\lambda$ 成正比,则

$$\tau_s(\lambda, \dot{\gamma}) = \tau_y \lambda + \eta_s \lambda(\dot{\gamma}) \quad (3)$$

式中: $\tau_y$ 为结构完整状态下的屈服应力,Pa; $\eta_s$ 为与结构相关的黏度(表征固相有效体积分数对体系黏度的贡献),Pa·s。

现有模型对剪切条件下黏性阻力与剪切率关系的处理方法有两种:①二者呈线性关系<sup>[9,11-12]</sup>;②黏性阻力和剪切率之间为幂函数关系<sup>[10,13-16]</sup>。在剪切条件下结构的裂降是一个瞬变的过程,含蜡原油中蜡晶结构的形态以及有效体积分数发生持续的变化,黏性阻力与剪切率之间的关系也不断变化,用一个恒定的幂指

数表征黏性阻力和剪切率之间的非线性关系是不现实的,并且采用指数形式的状态方程将增加模型参数拟合的难度。因此,笔者假定各结构状态下黏性阻力与剪切率呈线性关系,即

$$\tau_{svs}(\eta_s \lambda, \dot{\gamma}) + \tau_l(\dot{\gamma}) = (\eta_s \lambda + \eta_\infty) \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中: $\eta_\infty$ 为结构完全裂解后体系的黏度,Pa·s。

据此,得出如下形式的状态方程:

$$\tau = \tau_y \lambda + (\eta_s \lambda + \eta_\infty) \dot{\gamma} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,该形式的状态方程通过结构参数的变化可以表征黏性阻力和剪切率之间不断变化的非线性关系。

速率方程用以表征结构在剪切过程中的裂解,由结构破坏速率和结构恢复速率两部分构成。现有触变模型<sup>[9,16]</sup>的速率方程结构基本相同,以Houska模型<sup>[14]</sup>的速率方程为例:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1-\lambda) - b\lambda\dot{\gamma}^m \quad (6)$$

式中: $a$ 为结构恢复速率常数,s<sup>-1</sup>; $b$ 为结构裂降速率常数,s<sup>m</sup>·s<sup>-1</sup>; $m$ 为模型参数。

在恒剪切率条件下,剪切平衡时有:

$$\lambda = \frac{a}{a + b\dot{\gamma}^m} \quad (7)$$

剪切平衡条件下的结构参数 $\lambda$ 随剪切率 $\dot{\gamma}$ 的增大而减小,剪切率为0时,结构参数为1;当剪切率趋于无穷大时,结构参数趋于0。这与反常点温度以下含蜡原油的剪切稀释性相符,在一定程度上说明式(6)形式速率方程的合理性。笔者借鉴在速率方程中采用前置因子 $1/t^{\beta}$ 参与表征悬浮体系应力衰减过程<sup>[18]</sup>的做法,同时为了避免因时步过小而导致结构变化速率趋于无穷,在速率方程中采用前置因子 $1/(1+[t]^{\alpha})$ ,参与表征结构逐渐趋缓的裂解过程(其中 $[t]$ 为在数值上与剪切时间相等的变量, $\alpha$ 为经验常数)。

关于剪切引起的结构破坏,部分研究者<sup>[11,16]</sup>认为结构破坏速率与剪切率的 $m(m>0)$ 次方成正比,也有研究者<sup>[9,11,19-21]</sup>认为结构破坏速率与剪切率成正比。为了减少模型参数同时降低模型的非线性程度,笔者假设结构破坏速率与剪切率成正比。

含蜡原油结构破坏后若无温度变化,在有限的时间内结构恢复水平一般很低。这是因为所谓的“结构恢复”并非蜡晶结构向剪切前的状态发展,而是分散的蜡晶颗粒在碰撞到一起后依靠相互间弱的范德华作用力粘连在一起<sup>[21]</sup>,进而形成一种新的结构,这种结构较之伴随着结晶而生成的初始结构要弱得多。因此,在触变模型速率方程中,结构的恢复速率在一定程度上等同于体系中单位时间内蜡晶颗粒相互碰撞的次



数。Selomulya 等人<sup>[22]</sup>研究指出,在静置条件下悬浮体系中的小颗粒( $<1\mu\text{m}$ )可以做布朗运动或热扩散运动,而大颗粒或聚集体只有在剪切条件下相互碰撞和聚集才更为明显。而含蜡原油中蜡晶颗粒尺寸一般为微米量级<sup>[23]</sup>,因此在结构恢复过程中,相对于热扩散,剪切作用对颗粒碰撞的贡献要大得多。van de Ven 等人<sup>[24]</sup>分析指出,在低皮克列数下剪切引起的颗粒聚集速率与剪切率的平方根成正比,该观点也被 Mewis 等人<sup>[18]</sup>在建模中采纳。笔者采用 van de Ven 等人的观点,同时出于减少模型参数的目的,在模型中忽略热扩散作用的影响,仅考虑剪切引起的结构恢复。需要指出的是,由于忽略了热扩散作用的影响,本模型不能表征静置条件下的结构恢复。

据此,提出如下形式的速率方程:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{1 + [\dot{\gamma}]^a} [a(1 - \lambda)\dot{\gamma}^{b-1} - b\lambda\dot{\gamma}] \quad (8)$$

式(8)和式(5)即为笔者提出的六参数含蜡原油触变性模型。

## 2.2 模型参数确定

六参数模型中需要确定的参数有  $\tau_y$ 、 $\eta_s$ 、 $\eta_\infty$ 、 $a$ 、 $b$  和  $\lambda$ 。图 1 所示为大庆原油在 32℃ 时(凝点温度)的平衡流变曲线(其他温度下类似)。由图 1 可以发现,当剪切率超过  $100\text{ s}^{-1}$  时,表观黏度的变化范围已经很小,说明结构已经裂降至较低水平。因此,近似选取  $1000\text{ s}^{-1}$  对应的表观黏度为  $\eta_\infty$ 。对于不同含蜡原油,可以通过测试高剪切率下的平衡表观黏度来获得  $\eta_\infty$  值。

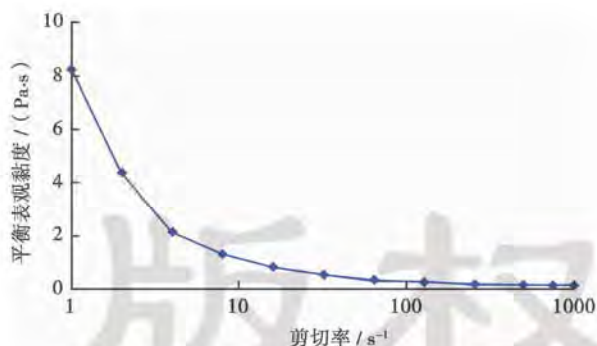


图 1 大庆原油 32℃ 下的平衡流变曲线

Fig. 1 The equilibrium flow curve of the Daqing crude oil at 32℃

常用的触变参数获取方法可以分为两类:一类是 Cawkwell 等<sup>[25]</sup>采用的通过多次试验逐步测试触变参数的方法;另一类是应用较广泛的基于最小二乘原理的拟合方法(一次确定所有触变参数)。比较而言,采用多次试验逐步测试触变参数的方法,仅适用于部分简单的触变模型,对于大部分触变模型,模型参数无法直接测取。在此,笔者基于最小二乘法,对其余 5 个触变参数进行一次性回归。

首先对触变模型进行离散化处理,采用差分代替微分,其代数方程组如下:

$$\begin{cases} \tau_i = \tau_y \lambda_i + \eta_s \lambda_i \dot{\gamma}_i + \eta_\infty \dot{\gamma}_i \\ \lambda_{i+1} = \lambda_i + \frac{[\dot{\gamma}]_{i+1} - [\dot{\gamma}]_i}{1 + [\dot{\gamma}]_i^a} \times \\ \quad [a \times (1 - \lambda_i) \dot{\gamma}_i^{b-1} - b \times \lambda_i \dot{\gamma}_i] \end{cases} \quad (9)$$

模型离散后,根据最小二乘原理,分别对测试数据进行拟合,获得模型参数。该问题是非线性曲线拟合的最小二乘问题,其数学模型如下:

$$\min \|F(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{data}}, \mathbf{r}_{\text{data}}) - \mathbf{y}_{\text{data}}\|_2^2 = \sum_i (F(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{data},i}, \mathbf{r}_{\text{data},i}) - \mathbf{y}_{\text{data},i})^2 \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{x}_{\text{data}}$ 、 $\mathbf{r}_{\text{data}}$ 、 $\mathbf{y}_{\text{data}}$  分别为时间、剪切率和剪应力向量;  $F(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{data}}, \mathbf{r}_{\text{data}})$  为剪应力向量函数,由式(9)触变模型离散式计算得出;  $\mathbf{x}$  为需要拟合的触变参数向量。

## 3 模型对比

### 3.1 对比模型

现阶段对含蜡原油应用最为广泛的触变模型为 Houska 模型<sup>[14]</sup>,其状态方程为

$$\tau = \tau_{y0} + \tau_{y1} \lambda + (k + \Delta k \lambda) \dot{\gamma}^n \quad (11)$$

式中:  $\tau_{y0}$  为结构充分裂降后的屈服应力, Pa;  $\tau_{y1}$  为与结构相关的屈服应力, Pa;  $k$  和  $\Delta k$  为模型参数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ;  $n$  为模型参数。

Houska 模型速率方程见式(6)。

此外,对含蜡原油研究表明,一个采用双结构参数的触变模型对剪切率阶跃、恒剪切率和剪切率滞回环方法所测数据拟合效果最好<sup>[26-27]</sup>。该模型状态方程为

$$\tau = \tau_{y0} + \lambda_1 \tau_{y1} + \lambda_2 \tau_{y2} + (k + \lambda_1 \Delta k_1 + \lambda_2 \Delta k_2) \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

速率方程为

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_1}{dt} = a_1 (1 - \lambda_1) - b_1 \lambda_1 \dot{\gamma}^{m_1} \\ \frac{d\lambda_2}{dt} = -b_2 \lambda_2 \dot{\gamma}^{m_2} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为表征可恢复和不可恢复结构的参数;  $\tau_{y2}$  是与不可恢复结构相关的屈服应力, Pa;  $\Delta k_1$ 、 $\Delta k_2$  分别为可恢复结构和不可恢复结构对应的稠度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ;  $a_1$  为可恢复结构的结构建立速率常数,  $\text{s}^{-1}$ ;  $b_1$  为可恢复结构的裂降速率常数,  $\text{s}^{m_1-1}$ ;  $b_2$  为不可恢复结构的裂降速率常数,  $\text{s}^{m_2-1}$ ;  $m_1$ 、 $m_2$  为模型参数。

### 3.2 试验数据拟合

图 2 为在 31~35℃ 范围内采用  $1\text{ s}^{-1}$ 、 $2\text{ s}^{-1}$ 、 $4\text{ s}^{-1}$ 、 $8\text{ s}^{-1}$ 、 $16\text{ s}^{-1}$ 、 $32\text{ s}^{-1}$  剪切率阶跃方法测试的大庆原油触变曲线。图 3 为六参数模型、Houska 模型和双结构参数触变模型对测试数据的拟合情况。从模型的拟



合结果与测试曲线的吻合程度看,六参数模型和双结构参数模型对实测数据的拟合结果相当[图 3(a)和图 3(c)],Houska 模型的拟合结果与实测数据偏差较大[图 3(b)]。从图 3(d)中 3 个模型对试验数据的拟合偏差[计算方法见式(10),每个温度下的触变数据为 2700 组]也可以看出:六参数模型和双结构参数模型对试验数据的拟合偏差相当;Houska 模型对试验数据的拟合偏差明显高于另外两个模型,并且拟合数据的测试温度越低,差距越明显。

此外,为了考察六参数触变模型对不同含蜡原油的适应性,采用吐哈、北疆(西部原油管道输送)、中原、陆梁、苏丹等含蜡原油的触变测试数据对模型进行检验,并与 Houska 模型和双结构参数触变模型进行对比。结果与大庆原油触变数据的检验结果相似,六参数触变模型对各含蜡原油触变数据的拟合结果与双结构参数触变模型相当,整体平均拟合偏差约为 3%;

Houska 模型对各含蜡原油触变数据平均拟合偏差约为 5%<sup>[28]</sup>。

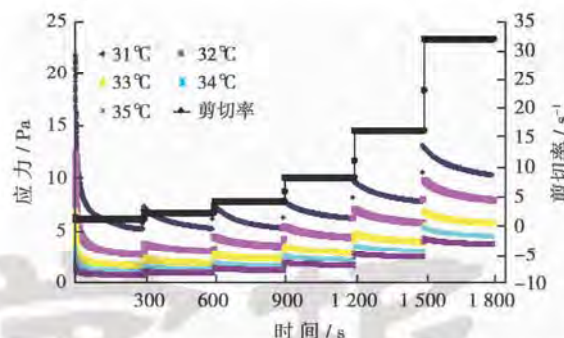


图 2 大庆含蜡原油在  $1\text{ s}^{-1}$ 、 $2\text{ s}^{-1}$ 、 $4\text{ s}^{-1}$ 、 $8\text{ s}^{-1}$ 、 $16\text{ s}^{-1}$  和  $32\text{ s}^{-1}$  阶跃剪切条件下(每阶 5 min)的触变曲线

Fig. 2 Thixotropic curves of Daqing waxy crude oil on stepwise increasing of shear rate, the shear rates are  $1\text{ s}^{-1}$ ,  $2\text{ s}^{-1}$ ,  $4\text{ s}^{-1}$ ,  $8\text{ s}^{-1}$ ,  $16\text{ s}^{-1}$ , and  $32\text{ s}^{-1}$ , and the shear duration at each step is 5 min

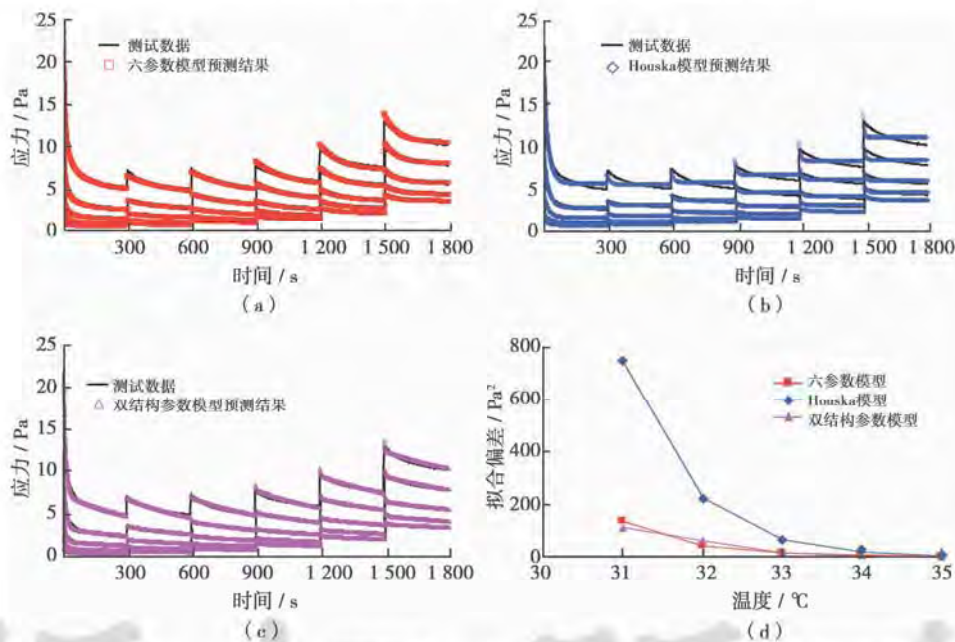


图 3 六参数模型、Houska 模型和双结构参数模型对试验数据的拟合结果及各温度下拟合偏差对比

Fig. 3 The fitting of the six-parameter model, the Houska model and the double-structural-parameter model to the experimental data, and comparison of deviations of the three models

### 3.3 模型参数对比

由表 1 可见,随着测试温度的降低,与结构相关的屈服值  $\tau_y$ 、黏度  $\eta_s$  以及结构完全裂解后的黏度  $\eta_\infty$  均有所上升,这在定性上与温度降低结构增强并且液相黏度增加的客观事实相符;速率方程中,结构恢复速率常数  $a$  随温度的上升而增大,这是因为结构参数是一个相对的概念,温度升高,油样结构变弱,即使绝对恢复水平低,相对恢复水平也会高出温度相对低的油样;结构破坏速率常数  $b$  取值范围为 0.2607~0.3311,虽规

律不明显,但变化范围不大; $\alpha$  取值为 0.8557~0.8944。

Houska 模型和双结构参数触变模型的拟合参数如表 2 和表 3 所示。需要说明的是,Houska 模型和双结构参数模型的参数均采用最小二乘法拟合获取。由表 2 和表 3 可见,在状态方程所包含的参数中,结构充分裂解后的屈服应力  $\tau_{y0}$  数值为 0 或比与结构相关的屈服应力  $\tau_{y1}$  或  $(\tau_{y1} + \tau_{y2})$  小很多,这也在一定程度上证明了含蜡原油不同于典型的黏塑性物质,在结构充分裂解条件下不会表现出屈服值;Houska 模型结构完

全裂解后的黏度参数  $k$  取值均为 0, 这与客观事实严重不符; 表征油样黏性阻力与剪切率关系的指数  $n$  随温度的变化也毫无规律; 结构建立/破坏速率常数和经

验常数值也无明显规律; 与结构相关的屈服应力  $\tau_{y1}/\tau_{y2}$  以及稠度系数  $\Delta k$  或  $\Delta k_1/\Delta k_2$  随温度上升而成下降趋势, 这在定性上与客观事实相符。

表 1 六参数触变模型参数

Table 1 Parameters of the six-parameter model

温度/℃	$\tau_y/\text{Pa}$	$\eta_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$a$	$a/s^{-0.5}$	$b$	$\eta_\infty/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	拟合偏差/ $\text{Pa}^2$
31	17.7647	7.4415	0.8557	0.0476	0.2678	0.0867	137.0
32	7.8682	5.2759	0.8794	0.0568	0.3086	0.0790	44.4
33	4.0536	2.5248	0.8889	0.0802	0.3311	0.0722	15.9
34	1.8895	1.4368	0.8944	0.0936	0.3216	0.0662	7.9
35	0.7751	0.7333	0.8597	0.1130	0.2607	0.0608	3.7

表 2 Houska 触变模型拟合参数

Table 2 The fitted parameters of the Houska model

温度/℃	$\tau_{y0}/\text{Pa}$	$\tau_{y1}/\text{Pa}$	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$\Delta k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$n$	$a/s^{-1}$	$b/s^{m-1}$	$m$	拟合偏差/ $\text{Pa}^2$
31	0.0000	14.5173	0.0000	4.2889	0.9441	0.0141	0.0325	0.4381	747.8
32	0.0000	5.5923	0.0000	3.3384	0.8567	0.0139	0.0298	0.3562	225.8
33	0.0000	2.6558	0.0000	1.6619	0.8793	0.0161	0.0266	0.3343	65.5
34	0.0000	1.1826	0.0000	0.9905	0.8808	0.0139	0.0179	0.3126	19.5
35	0.0000	0.4733	0.0000	0.5480	0.8971	0.0108	0.0089	0.3102	5.9

表 3 双结构参数触变模型拟合参数

Table 3 The fitted parameters of the double-structural-parameter model

温度/℃	$\tau_{y0}/\text{Pa}$	$\tau_{y1}/\text{Pa}$	$\tau_{y2}/\text{Pa}$	$k/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$\Delta k_1/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$\Delta k_2/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$n$
31	0.3101	10.2413	1.7752	0.0000	4.6775	3.4480	1.0000
32	0.0000	4.1972	0.9293	0.0000	3.1375	1.5244	0.9367
33	0.3934	0.7921	0.4596	0.0000	2.3565	0.7261	1.0000
34	0.0000	0.9659	0.2423	0.0000	0.9274	0.4181	0.9517
35	0.0372	0.4757	0.0523	0.0000	0.4694	0.2083	0.9736

温度/℃	$a_1/s^{-1}$	$b_1/s^{m_1-1}$	$m_1$	$b_2/s^{m_2-1}$	$m_2$	拟合偏差/ $\text{Pa}^2$
31	0.0110	0.0749	0.2964	0.0022	0.0001	111.7
32	0.0103	0.0627	0.2627	0.0015	0.0001	63.4
33	0.0086	0.0669	0.2634	0.0015	0.0001	17.5
34	0.0155	0.0507	0.2381	0.0012	0.0151	5.0
35	0.0173	0.0325	0.1915	0.0010	0.1669	1.7

分析原因如下: 由于模型的非线性较强, 需要拟合的参数较多 (Houska 模型 8 个, 双结构参数模型 12 个), 而非线性曲线拟合是个难题, 待拟合的参数越多寻求全局最优解就越困难; 并且拟合的数据量较大 (本文中每个温度下测试的触变数据为 2700 组), 通过最小二乘法拟合所得的模型参数仅在数学上对拟合效果负责。而笔者提出的六参数触变模型需要拟合的参数仅为 5 个, 并且状态方程为线性方程, 这可以在一定程度上缓解拟合参数不合理的问题。

## 4 结 论

(1) 在分析现有含蜡原油触变模型的基础上, 提出了物理意义明确且模型参数更少的六参数触变模

型。对大庆原油及其他多种原油触变数据的拟合结果表明, 该六参数模型的拟合效果优于目前常用的 8 个参数的 Houska 模型, 与目前对含蜡原油拟合效果最好的 12 个参数的双结构参数模型拟合效果相当。

(2) 与 Houska 模型及双结构参数模型相比, 六参数模型因拟合参数少且状态方程较为简单, 拟合的触变参数定性上更为合理, 因此更适用于含蜡原油管道停输再启动数值模拟。

## 参 考 文 献

- [1] 黄启玉, 李瑜仙, 张劲军. 普适性结蜡模型研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 459-462.  
Huang Qiyu, Li Yuxian, Zhang Jinjun. Unified wax deposition model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 459-462.



- [2] 黄启玉,张劲军,高学峰,等.大庆原油蜡沉积规律研究[J].石油学报,2006,27(4):125-129.  
Huang Qiyu, Zhang Jinjun, Gao Xuefeng, et al. Study on wax deposition of Daqing crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 125-129.
- [3] 张国忠,马志祥,热油管道安全经济输油温度研究[J].石油学报,2004,25(1):106-109.  
Zhang Guozhong, Ma Zhixiang. Determination of safe and economic transportation temperature in hot oil pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 106-109.
- [4] 张劲军,朱英如,李鸿英,等.含蜡原油特征温度实验研究[J].石油学报,2007,28(4):112-114.  
Zhang Jinjun, Zhu Yingru, Li Hongying, et al. Experimental research on characteristic temperature of waxy crude[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 112-114.
- [5] 宋艾玲,梁光川,王文耀.描述含蜡原油触变性的新型三参数模型[J].油气储运,2007,26(7):40-45.  
Song Ailing, Liang Guangchuan, Wang Wenyao. The thixotropy of the waxy crude: a novel three-parameter model[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(7): 40-45.
- [6] Phung D T, Bich H V, Son T C, et al. A new approach to study on thixotropic properties of waxy crude oils from Dragon and White Tiger fields Offshore Vietnam[R]. SPE 54374, 1999.
- [7] 张足斌,张国忠.含蜡原油管道流动的触变性研究[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(4):72-74.  
Zhang Zubin, Zhang Guozhong. Thixotropy of waxy oil flowing through pipeline[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(4): 72-74.
- [8] 董平省,张国忠,扈新军.描述含蜡原油触变特性的一种新模式[J].油气储运,2005,24(2):29-32.  
Dong Pingsheng, Zhang Guozhong, Hu Xinjun. A novel thixotropy model for waxy crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2005, 24(2): 29-32.
- [9] Moore F. The rheology of ceramic slips and bodies[J]. Transaction of the British Ceramic Society, 1959, 58(7/8): 470-492.
- [10] Kemblowski Z, Petera J. Rheological characterization of thixotropic fluids[J]. Rheologica Acta, 1979, 18(6): 702-710.
- [11] Cross M M. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudo-plastic systems[J]. Journal of Colloid Science, 1965, 20(5): 417-437.
- [12] Worrall W E, Tulliani S. Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions[J]. Transaction of the British Ceramic Society, 1964, 63: 167-185.
- [13] Carleton A J, Cheng D C H, Whittaker W. Determination of the rheological properties and start-up pipeline flow characteristics of waxy, crude and fuel oils[M]. London: Institute of Petroleum, 1974.
- [14] Houska M. Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids[D]. Prague: Czech Technical University of Prague, 1981.
- [15] 赵晓东.改性原油输送管道启动过程非稳态水力热力计算方法研究[D].北京:石油大学,1999.  
Zhao Xiaodong. Study on the unsteady hydraulic and thermal computation of the restart process of the PPD-beneficiated crude oil pipeline[D]. Beijing: The University of Petroleum, China, 1999.
- [16] 陈宏健.原油管道停输再启动压力研究[D].北京:石油大学,2002.  
Chen Hongjian. Study on restart pressure of crude oil pipeline[D]. Beijing: The University of Petroleum, China, 2002.
- [17] Mewis J, Wagner N J. Thixotropy[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 147-148: 214-227.
- [18] Dullaert K, Mewis J. A structural kinetics model for thixotropy[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2006, 139(1/2): 21-30.
- [19] Mujumdar A, Beris A N, Metzner A B. Transient phenomena in thixotropic systems[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2002, 102(2): 157-178.
- [20] Toorman E A. Modelling the thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions[J]. Rheologica Acta, 1997, 36(1): 56-65.
- [21] Lopes da Silva J A, Coutinho J A P. Dynamic rheological analysis of the gelation behaviour of waxy crude oils[J]. Rheologica Acta, 2004, 43(5): 433-441.
- [22] Selomulya C, Bushell G, Amal R, et al. Aggregate properties in relation to aggregation conditions under various applied shear environments[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 73(2/4): 295-307.
- [23] Kanè M, Djabourov M, Volle J L, et al. Morphology of paraffin crystals in waxy crude oils cooled in quiescent conditions and under flow[J]. Fuel, 2003, 82(2): 127-135.
- [24] van de Ven T G M, Mason S G. The microrheology of colloidal dispersions VIII: effect of shear on perikinetic doublet formation[J]. Colloid & Polymer Science, 1977, 255(8): 794-804.
- [25] Cawkwell M G, Charles M E. Characterization of Canadian arctic thixotropic gelled crude oils utilizing an eight-parameter model[J]. Journal of Pipelines, 1989, 7: 251-264.
- [26] Zhang Jinjun, Guo Liping, Teng Houxing. Evaluation of thixotropic models for waxy crude oils based on shear stress decay at constant shear rates[J]. Apply Rheology, 2010, 20(5): 53944.
- [27] 张劲军,国丽萍.基于滞回环的含蜡原油触变模型评价[J].石油学报,2010,31(3):494-500.  
Zhang Jinjun, Guo Liping. Assessment of thixotropy models for waxy crude based on the hysteresis loop[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 494-500.
- [28] 贾邦龙.预剪切对含蜡原油触变性及管道再启动影响研究[D].北京:中国石油大学,2012.  
Jia Banglong. Study on the effect of pre-shearing on the thixotropy of waxy crude and the restart of waxy crude pipelines[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2012.