

胶凝原油初始应力递增过程的力学模型

陈雷¹, 刘刚¹, 兰浩², 张国忠¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油管道科技研究中心, 河北廊坊 065000)

摘要: 考虑胶凝原油具有蠕变与松弛特性, 将 Maxwell 线性黏弹性体与幂律流体元件进行并联, 得到机械比拟模型。在幂律流体元件应力项中引入与应变相关的损伤因子, Maxwell 黏弹性体剪切应力项中引入完整性因子, 得到胶凝原油初始应力递增阶段的描述公式。分别对大庆原油、南阳原油进行恒剪切速率试验测试, 利用模型公式拟合初始应力递增阶段的试验数据, 计算胶凝原油应力松弛过程。结果表明: 拟合效果良好, 模型参数不随剪切测试条件改变, 能够反映胶凝原油的物性特征。该模型可以表述胶凝原油的松弛特性; 应变幅值越大, 结构损伤越明显, 对应的剪切模量数值越小, 符合胶凝原油的真实流变特性。

关键词: 胶凝原油; 初始应变; 应力递增; 损伤因子

中图分类号: TE 832.3 **文献标志码:** A

引用格式: 陈雷, 刘刚, 兰浩, 等. 胶凝原油初始应力递增过程的力学模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 135-139.

CHEN Lei, LIU Gang, LAN Hao, et al. Mechanical model of shear stress increasing process during initial deformation of gelled crude oil[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 135-139.

Mechanical model of shear stress increasing process during initial deformation of gelled crude oil

CHEN Lei¹, LIU Gang¹, LAN Hao², ZHANG Guozhong¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Pipeline R & D Center, Langfang 065000, China)

Abstract: Considering the creep and relaxation properties of gelled crude oil, a mechanical model was established by combining the Maxwell viscoelastic analog and a power-law dashpot in parallel. Constitutive equation of the mechanical model was figured out by introducing strain-dependent damage factor into the power-law dashpot and integrity factor into the Maxwell analog. Mechanical responses of Daqing and Nanyang crude oils were tested using rheometer under constant shear rates. The constitutive equation was used to fit the experimental data of shear stress increasing process. Stress relaxation processes under constant shear strain were calculated using the fitted model parameters. It has been found that the constitutive equation fits the data very well, and the parameters in the equation keep unchanged under different shear rates, which could be regarded to represent the actual properties of gelled crude oil. The proposed model can describe the relaxation properties of gelled crude oil theoretically. The relaxation modules decrease and the structure damage becomes greater with the increase of shear strain, which is consistent with the actual rheological properties of gelled crude oils.

Keywords: gelled crude oil; initial deformation; increasing shear stress; damage factor

准确描述胶凝原油流变性是计算低温胶凝原油管道再启动压力的关键。黏弹性材料流变性研究过

收稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574274); 中央高校基本科研业务费专项(14CX02107A); 中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0604)

作者简介: 陈雷(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为油气长距离管输技术。E-mail: chenleichenlei303@126.com。

通讯作者: 刘刚(1975-), 男, 教授, 博士, 研究方向为油气储运工程技术。E-mail: liugang@upc.edu.cn。

程中通常采用恒定剪切应力、恒定剪切速率加载试验。恒定剪切速率下,胶凝原油的受力变形过程分为应力递增的初始结构破坏过程和屈服后应力递减触变过程^[1]。描述材料结构裂降、应力衰减过程的触变模型分为两类:一类是应力-时间的直接对应模型,如张足斌、董平省等^[2-3]提出的触变模型,该类模型仅适用于拟合恒定剪切速率下的应力衰减过程;另一类是以结构参数为中间量,利用剪切应力状态方程与结构破坏速率方程,间接表征剪切应力随时间的变化,如 Cheng 等^[4-6]提出的触变模型。然而,上述两种模型均未考虑恒定剪切速率条件下材料屈服触变前的应力上升阶段。Mujumdar 等^[7-8]假设剪切应力由弹性应力部分 σ_e 和黏性应力部分 σ_v 组成,建立了不同的触变模型。de Souza 等^[9-10]将剪切应力表征为黏性应力 σ_v 与特殊 Maxwell 体黏弹性应力 σ_M 之和,即类 Jeffreys 模型。Teng 等^[11]研究含蜡原油触变特性认为结构脆弱的胶凝态原油更适合 Mujumdar、Dullaert 等提出的一类模型,而非 de Souza 等提出的类 Jeffreys 模型。然而,此类模型本质上属于类 Voigt-Kelvin 模型,此类模型无法表征黏弹性材料的松弛特性^[12],而胶凝原油具有蠕变与松弛特性^[13],所以此类模型理论上存在不足。de Souza 等的模型在理论上更为严谨,但在该类模型中 Maxwell 体弹簧的弹性模量与黏壶的黏度均与结构参数相关,形式复杂,仅能通过特定模型参数计算流变曲线,并未能实现试验数据的拟合。兰浩等^[1]基于线性 Maxwell 黏弹性体建立了胶凝原油初始变形过程的力学模型。然而,胶凝原油初始变形阶段存在一定程度的结构破坏,导致不同剪切速率试验数据拟合得到的模型参数显著不同。笔者对初始应变阶段剪切应力递增至最大值的过程开展研究。综合胶凝原油的蠕变与应力松弛特性,通过并联 Maxwell 黏弹性体与幂律流体元件,引入与应变相关的损伤变量,建立描述胶凝原油恒剪切速率条件下初始应力递增至最大值阶段的数学模型。

1 模型建立

将黏弹-触变一类材料的总剪切应力视为弹性应力 σ_e 与黏性应力 σ_v 之和。当剪切应变超过一定范围, σ_e 减小至 0,材料仅表现出黏性流动特征。对于黏弹-触变一类材料(如含蜡原油),低温流动状态下常表现出幂律流体特性,描述黏性剪切应力项为^[7,11]

$$\sigma_v = (K_0 + \lambda \Delta K) \varepsilon^n \tag{1}$$

式中, λ 为结构参数,区间内变化; K_0 为基础稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; ΔK 为可触变稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; ε 为剪切速率, s^{-1} 。

胶凝原油受剪切变形后的应力递增至最大值的阶段,原油结构并未出现显著裂降,所以结构参数 $\lambda \approx 1$,式(1)中的黏性剪切应力简化为与时间无关的幂律流体方程。

考虑胶凝原油具有的蠕变与应力松弛特性,以 Maxwell 黏弹性体剪切应力代替文献[7]、[11]中的弹性应力项。模型由 Maxwell 黏弹性体与幂律流体元件并联而成,如图 1 所示。与 de Souza 等提出的一类模型不同,Maxwell 模型中弹簧弹性模量与黏性元件黏度为恒定值,而与 Maxwell 黏弹性体并联的元件表现出非牛顿特性。

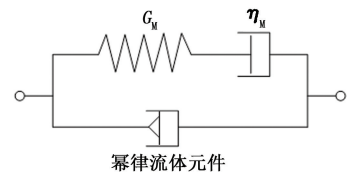


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

1.1 Maxwell 黏弹性体

Maxwell 黏弹性体剪切模量可以表述为

$$G'(t) = G_M \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} t\right) \tag{2}$$

式中, $G'(t)$ 为 Maxwell 体剪切松弛模量, Pa ; G_M 为 Maxwell 黏弹性体中弹簧元件弹性模量, Pa ; η_M 为 Maxwell 黏弹性体中黏性元件黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t 为时间, s 。

恒定剪切速率 ε 条件下, Maxwell 黏弹性体不同时刻剪切应力 $\sigma'_M(t)$ 可以描述为

$$\sigma'_M = \eta_M \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} t\right) \right] = \eta_M \varepsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right) \right] \tag{3}$$

式中, ε 为剪切应变; σ'_M 为 Maxwell 黏弹性体的剪切应力, Pa 。

1.2 幂律流体元件

幂律流体的本构方程为

$$\sigma'_p = K \varepsilon^n \tag{4}$$

式中, σ'_p 为幂律流体元件的剪切应力, Pa ; K 为幂律流体元件的稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n 为流变指数。

胶凝原油初始应力上升阶段,应变量小,认为胶凝原油没有出现明显的结构裂降,所以稠度系数 K 为恒定值。

1.3 总剪切应力

1.3.1 损伤变量

文献[7]、[11]中,弹性应力与黏性应力的相对大小随剪切应变 ε 不断变化,且最终黏性应力占据主导,这意味着材料变形过程中存在黏弹性至黏性流动特征的转换阶段。本文利用损伤变量表征胶凝原油从黏弹性特征到黏性流动特征的过渡。刘刚、李传宪等^[14-15]在含蜡原油蠕变模型中引入损伤变量,认为损伤变量为时间 t 的函数。但李传宪等^[16-17]开展胶凝原油屈服过程研究时,将剪切应变视为材料是否屈服破坏的指标。所以,相比时间 t ,剪切应变可能更适合表征材料的结构损伤情况。受此启发,本文认为胶凝原油损伤变量为剪切应变 ε 的函数。Weibull分布被认为比较适合描述材料损伤过程^[18],使用Weibull函数描述缺陷随应变的变化过程^[19]:

$$f(\varepsilon) = \frac{k}{\delta} \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^k\right]. \quad (5)$$

式中, k 为形状参数; δ 为尺度参数;形变量 $\varepsilon \geq 0$ 。

损伤演化方程可以定义为

$$\frac{dD(\varepsilon)}{d\varepsilon} = f(\varepsilon). \quad (6)$$

对式(6)进行积分,可得出由Weibull函数定义的应变相关的连续损伤因子为

$$D(\varepsilon) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^k\right]. \quad (7)$$

当 $\varepsilon=0$ 时, $D(\varepsilon)=0$, $1-D(\varepsilon)=1$,此时材料不存在损伤;当 $\varepsilon \rightarrow +\infty$ 时, $D(\varepsilon)=1$, $1-D(\varepsilon)=0$,此时材料完全软化。这里, $1-D(\varepsilon)$ 为表征完整性特征的因子。

1.3.2 考虑损伤的剪切应力表达式

低温含蜡原油内部蜡晶形成网状结构,在初始微弱变形阶段,由于蜡晶网络束缚,内部黏性流动摩擦并不显著,表现出弹性力学响应特性。文献[7,11]中通常在形如式(1)所示的黏性应力项前乘以 $(1-\lambda)$,使初始变形阶段内黏性应力项近似为0。同样,本文中所提出的模型中幂律流体元件剪切应力在初始微弱变形阶段趋于0;随着应变增加,胶凝原油发生损伤,逐渐表现出黏性流动特性。考虑将式(4)中幂律流体元件的剪切应力引入损伤因子。幂律流体元件的应力-剪切速率关系可以描述为

$$\sigma_p = D(\varepsilon) K \dot{\varepsilon}^n. \quad (8)$$

式中, σ_p 为引入损伤因子的幂律流体元件剪切应力,Pa。

Maxwell弹性体随着材料损伤,黏弹特性逐渐消失。所以,将式(3)引入表征材料结构完整性的因

子,相应的Maxwell黏弹性体的剪切应力转换为

$$\sigma_M = [1-D(\varepsilon)] \eta_M \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right)\right]. \quad (9)$$

式中, σ_M 为引入完整性因子后的Maxwell体剪切应力。

恒定剪切速率条件下总应力可以描述为

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_M = [1-D(\varepsilon)] \eta_M \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right)\right] + D(\varepsilon) K \dot{\varepsilon}^n. \quad (10)$$

引入损伤因子 $D(\varepsilon)$ 的意义在于表征材料受剪切时从黏弹性特征到黏性流动特征的软化过程。将式(7)代入式(10),可以获得剪切应力表达式为

$$\sigma = \eta_M \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right)\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^k\right] + \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)^k\right]\right\} K \dot{\varepsilon}^n. \quad (11)$$

胶凝原油在初始微小应变范围内表现出弹性固体特性^[20]。当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, $D(\varepsilon) \rightarrow 0$,幂律流体元件作用可忽略,模型近似为线性Maxwell体,瞬时外载条件下模型中的弹簧发生瞬时变形,对应胶凝原油初始瞬时发生弹性变形。随着应变增加, $D(\varepsilon)$ 增大,幂律流体元件影响逐渐显著,由于幂律流体元件的黏滞作用,材料仅能发生缓慢变形;当外载撤销后,在弹簧回复力和幂律流体元件的阻尼作用下,应变逐渐回复,表现出蠕变/回复特性。瞬时应变加载后,幂律流体元件对应的剪切应力为零,Maxwell体中的弹簧发生瞬时应变,之后黏壶逐渐被拉开,弹簧回缩,总剪切应力逐渐降低,表现出应力松弛现象。

2 模型验证与讨论

2.1 胶凝原油初始力学响应试验

利用Anton Paar Physica MCR301流变仪分别对大庆原油与南阳原油开展恒定剪切速率条件下的初始力学响应特性测试。表1为两种原油的基础物性参数。

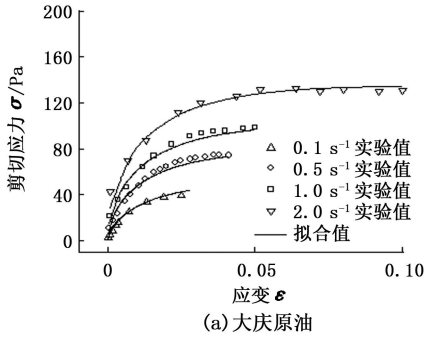
表1 油样的基础物性参数

Table 1 Basic physical properties of oil samples

原油	凝点/ ℃	含蜡量/ %	胶质含 量/%	沥青质 含量/%
大庆原油	34.0	28.98	10.4	—
南阳原油	34.0	26.30	26.4	0.33

流变测试系统选择同轴圆筒,型号为CC27。数据采集频率为200 Hz,为流变仪的采集频率上限。剪切速率越大,胶凝原油初始应变阶段时间越短,受数据采集频率限制,数据采集点越少。为针对性研究初

始应力递增阶段,试验选用的剪切速率不高于 3.0 s^{-1} 。具体的试验步骤为: $50 \text{ }^\circ\text{C} \xrightarrow{0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}} 36 \text{ }^\circ\text{C} \xrightarrow{0.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}} 27 \text{ }^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{静置 } 4 \text{ h}} 27 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow$ 恒定剪切速率试验。
两种原油初始变形过程中的剪切应力递增至最



大值的试验测试结果如图 2 所示。利用式 (11) 对数据进行拟合,借助 MATLAB 软件中的 Curve Fit 工具,以应变量为 x 轴,剪切速率为 y 轴,剪切应力为 z 轴建立三维图形,并进行数据拟合。拟合曲线如图 2 所示,相应参数见表 2。

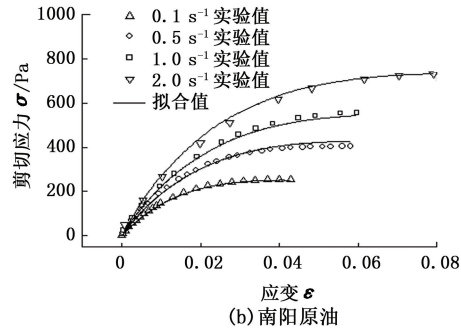


图 2 不同剪切条件下原油应力-应变曲线与拟合结果

Fig. 2 Fitting Curves and Experimental data of gelled crude oil under different shear rates

表 2 模型参数拟合结果

Table 2 Fitting results of parameters in model

油品	$\eta_M / (10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$G_M / 10^4 \text{ Pa}$	$\delta / 10^{-2}$	k	$K_0 / (\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n
大庆原油	6.968	0.430	1.312	0.488	76.17	0.568
南阳原油	9.085	1.160	3.100	0.979	518.8	0.447

由图 2 可以看出,式 (11) 可以准确地描述不同剪切条件下的胶凝原油初始应力-应变关系。相比文献 [1] 中的数学模型,该模型参数数值与试验条件无关,更能反映胶凝原油的物性特征。相比文献 [9]、[10] 提出的模型,该模型考虑了低温流动状态下含蜡原油的幂律流体特性。相比文献 [7]、[8]、[11] 中提出的一类模型,本文提出的模型在恒定应变条件下表现出松弛特性。

2.2 胶凝原油应力松弛特性计算

当瞬时施加恒定应变 ε_0 后,模型可以表现出应

力松弛特性。恒定应变条件下,剪切速率 $\dot{\varepsilon} = 0$, 所以幂律流体元件剪切应力 $\sigma_s(t) = 0$ 。结合式 (2), 总剪切应力随时间的变化规律可表示为

$$\sigma(t) = \sigma_M(t) = G_M \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} t\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\delta}\right)^k\right]. \quad (12)$$

对应的松弛模量可以表征为

$$G(t) = G_M \exp\left(-\frac{G_M}{\eta_M} t\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\delta}\right)^k\right]. \quad (13)$$

式中, ε_0 为瞬时施加的恒定应变; $G(t)$ 为材料剪切松弛模量, Pa。

根据式 (13) 与表 2 的参数数值可以计算出大庆原油、南阳原油在不同应变条件下的松弛模量。图 3 给出了不同应变下的胶凝原油松弛模量的计算结果。

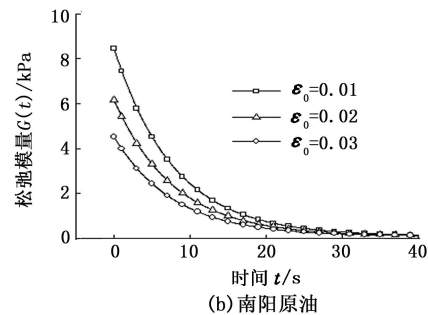
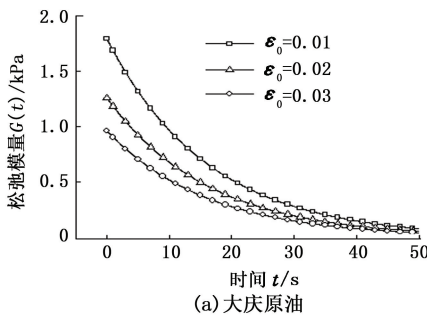


图 3 不同应变条件下的胶凝原油松弛模量

Fig. 3 Relaxation moduli of gelled crude oil under different conditions

由图 3 可以看出,当施加恒定应变后,本文提出的模型可以表现出应力松弛特性,更能反映胶凝原油的真实黏弹特性。通常情况下,剪切应变越大,胶凝原油结构破坏越显著,相应的剪切模量越小。从

图 3 也可以看出,应变为 0.03 情况下的松弛模量曲线位于最下方,这也更符合胶凝原油应力松弛的真实情况。

3 结 论

(1)模型对不同油品、剪切速率下的应力-应变曲线拟合效果良好,模型拟合参数与试验条件无关,更能反映胶凝原油的物性特征。

(2)该模型可表述胶凝原油的松弛特性。应变幅值越大,结构损伤越明显,对应的剪切模量数值越小,更符合胶凝原油的真实流变特性。

参考文献:

[1] 兰浩,张国忠,刘刚,等.恒剪速下胶凝原油初始结构破坏过程力学特性[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(2):117-121.
LAN Hao, ZHANG Guozhong, LIU Gang, et al. Mechanical behavior of gelled crude oil under constant shear rate in initial structural failure process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 117-121.

[2] 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.

[3] 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.

[4] CHENG D C H. Yield stress: a time dependent property and how to measure it[J]. Rheologica Acta, 1986, 25(5): 542-554.

[5] MOORE F. The rheology of ceramic slips and bodies[J]. Transactions of the British Ceramic Society, 1959, 58: 470-494.

[6] HOUSKA M. Engineering aspects of the rheology of thixotropic liquids[D]. Prague: Czech Technical University of Prague, 1981.

[7] 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.

[8] DULLAERT K, MEWIS J. A structural kinetics model for thixotropy[J]. Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics, 2006, 139(1): 21-30.

[9] de SOUZA M P R. Thixotropic elasto-viscoplastic model for structured fluids[J]. Soft Matter, 2011, 7(6): 2471-

2483.

[10] de SOUZA M P R, THOMPSON R L. A unified approach to model elasto-viscoplastic thixotropic yield-stress materials and apparent yield-stress fluids[J]. Rheologica Acta, 2013, 52(7): 673-694.

[11] TENG H, ZHANG J. Modeling the thixotropic behavior of waxy crude[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(23): 8079-8089.

[12] MAINARDI F, SPADA G. Creep relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology[J]. The European Physical Journal-Special Topics, 2011, 193(1): 133-160.

[13] 王志方,张国忠,刘刚.胶凝原油的黏弹性流变模型[J].高校化学工程学报,2008,22(2):351-355.
WANG Zhifang, ZHANG Guozhong, LIU Gang. The rheological model in view of the viscoelastic properties for the gelled crude oil[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(2): 351-355.

[14] 刘刚,卢兴国,徐贝贝,等.胶凝原油的黏弹塑性损伤模型[J].石油学报,2011,32(6):1078-1082.
LIU Gang, LU Xingguo, XU Beibei, et al. A viscoelastic/plastic damage model for gelled crude oils[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1078-1082.

[15] 李传宪,林名桢,杨飞,等.胶凝含蜡原油非线性蠕变模型研究[J].高校化学工程学报,2011,25(4):579-583.
LI Chuanxian, LIN Mingzhen, YANG Fei, et al. A nonlinear creep model of gelled waxy crude oil[J]. J Chem Eng Chinese Univ, 2011, 25(4): 579-583.

[16] 李传宪,李琦瑰.新疆胶凝原油屈服特性研究[J].油气储运,1999,18(12):5-7.
LI Chuanxian, LI Qigui. Research on yielding behavior of Xinjiang gelled crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1999, 18(12): 5-7.

[17] HOU L. Experimental study on yield behavior of Daqing crude oil[J]. Rheologica Acta, 2012, 51(7): 603-607.

[18] 郑健龙,吕松涛,田小草.基于蠕变试验的沥青黏弹性损伤特性[J].工程力学,2008,25(2):193-196.
ZHENG Jianlong, LÜ Songtao, TIAN Xiaoge. Viscoelastic damage characteristics of asphalt based on creep test [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 193-196.

[19] PAPOULIS A, PILLAI S U. Probability, random variables, and stochastic processes [M]. New York: Tata McGraw-Hill Education, 2002.

[20] 李传宪.原油流变学[M].东营:中国石油大学出版社,2007.