

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2017.01.002

稠油动力黏度预测研究*

陈小平, 许晶禹

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: chenxiaoping2@imech.ac.cn)

摘要: 在稠油的开采、管输等过程中, 动力黏度是一个重要的参数, 目前对稠油黏度的估计常采用稠油黏度预测公式进行。然而, 由于现有的黏度预测关系式大多基于区域性稠油数据, 因此, 这些关系式只对特定区域特定组分的稠油才有很高的预测精度。该文采用 Hakke RS6000 旋转流变仪对中海油采油技术服务公司和渤海油田绥中陆地处理终端的共计 3 种稠油的动力黏度进行了测量。稠油 30°C 的黏度范围为: 241 mPa·s - 5 239 mPa·s, 测量温度范围为: 20°C - 70°C。将 Beal、Hossain 等和张春明等共计 11 个黏度预测关系式与该文实验数据进行了对比分析。研究表明, 在所研究的关系式中, 张春明和 Hossain 关系式具有最高的预测精度, 而 Alomair 关系式的预测精度最差。同时, 结合国内多个学者以及该文的实验数据, 推出了一个新的黏度预测关系式。该关系式是温度 T 和 50°C 的黏度 μ_{50} 的函数。它由国内多个区块的稠油黏度数据得来, 因此能更好地预测国内稠油的黏度。

关键词: 稠油; 流变仪; 动力黏度; 预测关系式

中图分类号: TE832

文献标识码: A

Prediction of dynamic viscosity of heavy crude oil

CHEN Xiao-ping, XU Jing-yu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Dynamic viscosity is an important parameter both in exploitation and pipeline transportation process of heavy oil. Current estimating of viscosity of heavy oil is often made by using viscosity prediction formulas. However, because most of the existing formulas are empirical equations based on regional data, they are of good prediction precision only for heavy oil with specific components in a particular area. In this paper, viscosities of three heavy oil from Suizhong oil field and China National Offshore Oil Corporation were measured using Hakke RS6000 rotational rheometer. The dynamic viscosity range at 30°C was: 241 mPa·s-5239 mPa·s and the temperature range was: 20°C-70°C. Eleven kinds of viscosity calculation models including Beal, Hossain et al. and Zhang Chunming et al. were analyzed comparing with the experimental data. Studies had shown that in all of the eleven models, the prediction accuracy of Zhang Chunming and Hossain was the highest, and Alomair the worst. Besides, a viscosity prediction equation was developed based on the database including the experiment and other scholars'. This formula is a function of temperature and viscosity at 50°C. Since it is derived from several blocks of heavy oil viscosity data in China, it can better predict the domestic heavy oil viscosity.

Key words: heavy oil; rheometer; dynamic viscosity; predicting formula

* 收稿日期: 2016-01-27(2016-12-12 修改稿)

作者简介: 陈小平(1987 -), 男, 湖北广水人, 博士研究生.

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

Received: January 27, 2016 (Revised December 12, 2016)

Biography: CHEN Xiao-ping (1987-), Male, Ph. D. Candidate.

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

引言

随着稠油、超稠油资源的不断开发，关于稠油的研究逐渐增多^[1-3]。稠油高黏度所引起的开采和输送等问题迫切需要解决^[4]。不论采用何种方式对稠油进行降黏减阻，稠油黏度的确定都是保证其开采和输送合理设计的前提^[5]。实际生产中，对于黏度很高的稠油，其黏度的准确测量是很难实现的，而且黏度测量也不可能覆盖所有的温度和黏度范围。特别是对于油层条件下的含气稠油黏度预测，由于缺少油藏条件下的 PVT 数据，也必须借助黏度预测关系式^[6]。目前，采用黏度预测关系式对稠油的黏度进行计算是常用的方法。施亚洲等^[7]针对海上稠油油田地层流体取样少或无取样的问题，通过分析渤海地区稠油油田地面及地层流体性质资料，初步建立了渤海稠油油田地层原油黏度评价方法。龙安厚等^[8]运用人工神经网络的方法来模拟各影响因素与超稠油表观黏度之间的映射关系，建立了超稠油表观黏度的预测模型。综合考虑了温度、剪切速率对超稠油表观黏度的影响，模型所需参数少、计算简单和预测精度较高。

由于稠油的组分复杂，严格来讲要想实现稠油黏度的高精度预测，其微观性质是必须考虑的因素。然而，将稠油组分或者由组分决定的倾点和反常点等因素考虑在内的计算关系式是不方便的，因为这首先涉及到稠油微观组分的确定^[9]。相比之下，基于温度和 API 等参数的稠油黏度预测方法则简单的多。较具代表性的研究有 Beal、Beggs 等、Glaso、Kartoatmodjo 等、Elsharkawy 等、Hossain 等、Alomair 等、Petrosky 等、Naseri 等和 Labedi 等^[10-19]。该类研究的预测关系式主要可以分为 3 类，即脱气稠油黏度关系式、饱和稠油黏度预测关系式以及不饱和稠油黏度预测关系式^[18]。虽然以上研究涵盖了来自伊朗、科威特、北海和美国等多个地区的稠油，部分关系式也具有较好的预测精度，但是还不能直接应用于国内稠油黏度的预测。

本文采用哈克流变仪测量了国内 3 种不同区域脱气稠油的黏度，并分别与上述关系式进行了对比分析。研究表明，上述几种关系式在对本文稠油黏度的预测方面均表现出一定的误差，其中 Alomair 等关系式几乎完全失去作用。最后，在本文实验数据的基础上，结合国内多个学者的稠油数据推出了一个新的黏度预测关系式，其具有较好的精度。

1 流变测量实验

本文所用 3 种不同稠油分别取自中海油采油技

术服务公司和渤海油田绥中陆地处理终端。在室内采用 Hakke RS6000 旋转流变仪分别对稠油的黏度进行测量。流变仪自带的水浴温度控制系统用于控制稠油的温度。在测量开始前，设定好水浴温度，保持水浴达 3 min 以上以确保稠油的温度达到恒定。对于同一种稠油，温度从低到高依次进行测量。

图 1—图 3 分别为稠油 A、B 和 C 的流变曲线，从图中可以看出，3 种稠油的黏度随着剪切速率的增加略有降低，即表现出轻微的剪切稀释性。同时，对于同一种稠油，温度越高，黏度越低。也就是说，随着温度的升高，稠油的黏度逐渐降低。比较 3 种稠油可以发现，同一温度下的黏度关系为 A > B > C。

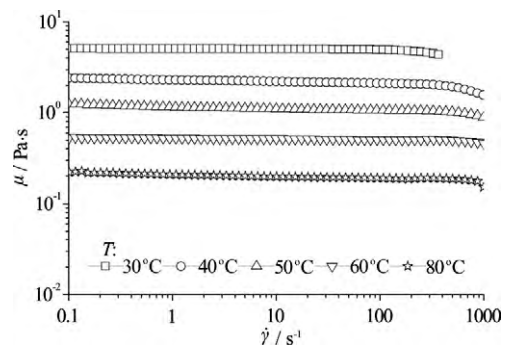


图 1 稠油 A 的流变曲线
Fig.1 Rheological curve of heavy oil A

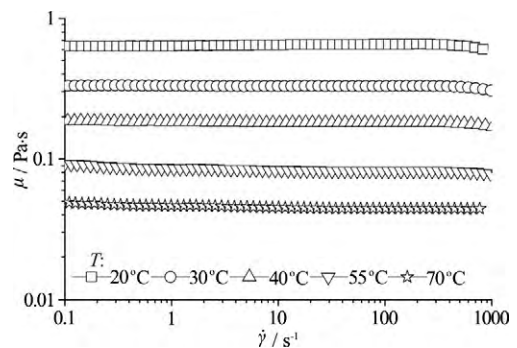


图 2 稠油 B 的流变曲线
Fig.2 Rheological curve of heavy oil B

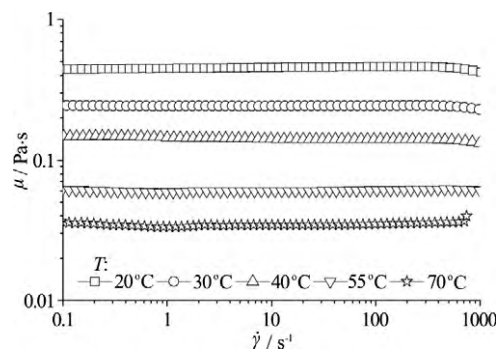


图 3 稠油 C 的流变曲线
Fig.3 Rheological curve of heavy oil C

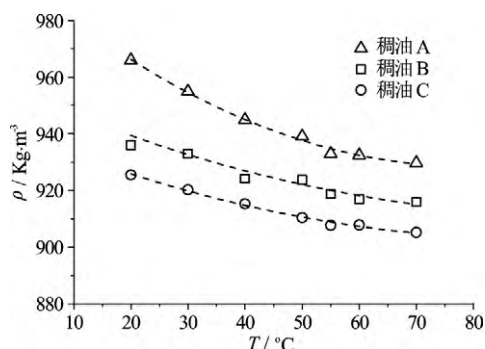


图 4 3 种稠油的密度-温度关系

Fig.4 Density-temperature curve of the three heavy oil

采用称重法分别测量了 3 种稠油不同温度下的密度,如图 4 所示。从图中可以看出,当温度从 20°C 升高到 70°C 时,稠油 A 的密度由 966 kg/m³ 降至 930 kg/m³,稠油 B 的密度由 936 kg/m³ 降至 916 kg/m³,稠油 C 的密度由 926 kg/m³ 降至 905 kg/m³。因为随着温度的升高,稠油的体积膨胀,3 种稠油的密度均随着温度的升高而降低。3 种稠油的密度关系为 A > B > C,即稠油的黏度越高,相应的密度也越大。这主要是因为稠油的黏度越高,其内部重质组分的含量相应的也越多,导致稠油密度更大。

表 1 常用稠油黏度预测关系式

Table 1. Common used viscosity equations of heavy oil

序号	作者	年份	模型和公式	参考文献
1	Beal	1946	$\mu = \left(0.32 + \frac{1.8 \times 10^7}{API^{4.53}} \right) \left(\frac{360}{T_r - 260} \right)^a;$ $a = 10^{(0.43 + 8.33 / API)}$	[10]
2	Beggs and Robinson	1975	$\mu = 10^x - 1;$ $x = y \times (T_r - 460)^{-1.163};$ $y = 10^z;$ $z = 3.0324 - 0.02023 \times API$	[11]
3	Glaso	1980	$\mu = (3.141 \times 10^{10}) \times (T_r - 460)^{-3.444} \times [\log_{10}(API)]^a;$ $a = 10.313 \times [\log_{10}(T_r - 460)] - 36.447$	[12]
4	Kartoatmodjo and Schmidt	1994	$\mu = 16 \times 10^8 \times T_f^{-2.8177} \times (\log_{10} API)^x;$ $x = 5.7526 \times \log_{10}(T_f) - 26.9718$	[13]
5	Elsharkawy and Alikhan	1999	$\mu = \text{antilog}_{10}(x) - 1;$ $x = \text{antilog}_{10}(y);$ $y = 2.16924 - 0.02525 \times API - 0.68875 \times \log_{10}(T_f)$	[14]
6	Hossain et al.	2005	$\mu = 10^{(-0.71523 \times API + 22.13766)} T_f^{(0.269024 \times API - 8.268047)}$	[15]
7	Alomair et al.	2011	$\mu = 30.5149 - 2.7935 \times \ln(T_f) - 1.508 \times [\ln(API)]^2$	[16]
8	Petrosky and Farshad	1995	$\mu = 2.3511 \times 10^7 \times T_f^{-2.10255} [\log_{10}(API)]^x;$ $x = 4.59388 \times \log_{10}(T_f) - 22.82792$	[17]
9	Naseri et al.	2005	$\mu = \text{antilog}_{10}(y);$ $y = 11.2699 - 4.298 \times \log_{10}(API) - 2.052 \times \log_{10}(T_f)$	[18]
10	Labedi	1992	$\mu = \frac{10^{9.224}}{API^{4.7013} \times T_f^{0.6739}}$	[19]
11	张春明等	2005	$\mu = (0.0148 \times \ln T + 0.9421) \times \mu_{50}^{(3.1613 - 0.5525 \times \ln T)}$	[20]

注:上述公式中, μ 为脱气黏度,单位为 mPa·s; API 为稠油 API 重度, T_r 为兰金温度,单位为 R; T_f 为华氏温度,单位为 F; T 为摄氏温度,单位为 °C; μ_{50} 为 50°C 时的黏度,单位为 mPa·s。具体温度换算关系为: $T_r = T_f + 460$, $T_f = 1.8T + 32$ 。

从上文的分析可知，温度不是影响稠油黏度的唯一变量，因为同一温度下 3 种稠油的黏度各不相同。因此，要准确简洁地预测稠油的黏度，还必须找出能反应稠油种类差异的另一个参量。本文所选择的 11 个黏度关系式中，除张春明等^[20]之外，均采用了 API 度作为稠油黏度的另一个参量，而忽略稠油其他的物性参数。API 度的计算根据式 (1) 得到，式中，15.6°C 时稠油的密度由本文拟合的密度-温度关系多项式计算得到，经计算 A、B 和 C 3 种稠油的 API 度分别为 13.3°、18.4° 和 20.8°。

$$API = \frac{141.5}{\rho_o / \rho_w} - 131.5 \quad (1)$$

2 结果分析

我们整理了目前常用的 11 个稠油黏度预测关系式，表 1 给出了各个关系式的具体表达形式。图 5-图 7 分别为稠油 A、B 和 C 的黏度与各黏度预测关系式的对比。从图中可以看出，在所有 11 个关系式中，张春明等^[20]更接近于实测的稠油黏度。除在 20°C 及以下时有较大偏差外，其余都吻合得很好，但该关系式黏度随温度的变化比实验值略快。其次，预测精度较好的是 Hossain 等、Elsharkawy 等关系式。Alomair 等关系式过低地预测了 3 种稠油的黏度，且均出现了较大的偏差，由此说明该关系式是不能被用于国内稠油黏度的预测的；另外，Naseri 等关系式也有较大偏差。Beggs 等关系式的黏度变化速率最为显著，且大于本实验所用稠油的黏度变化速率。Labedi 等和 Alomair 等关系式的变化速率则最为缓慢，说明温度的影响最为微弱，这主要是因为这 2 个关系式所采用的油品低黏所造成的。综合分析还可以发现，绝大多数的黏度预测关系式过低地估计了本文稠油的黏度，这间接说明国内稠油重质组分（胶质和沥青质等）的含量相对更高，稠油黏度相对更大。

在上述定性分析的基础上，我们定义了平均相对误差（% AARD）来衡量各关系式的预测精度，如式 (2) 所示

$$\% AARD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\mu_{cal} - \mu_{exp}|}{\mu_{exp}} \times 100 \quad (2)$$

式中： $n=5$ 为每一种稠油所测量的温度组数。表 2 给出了各关系式对 A、B 和 C 3 种稠油预测误差的大小，从表中可以看出，张春明等^[20]的关系式对于 3 种稠油的预测误差能够达到 20%，预测精度最高。这可能是由于该关系式直接采用国内稠油的黏度

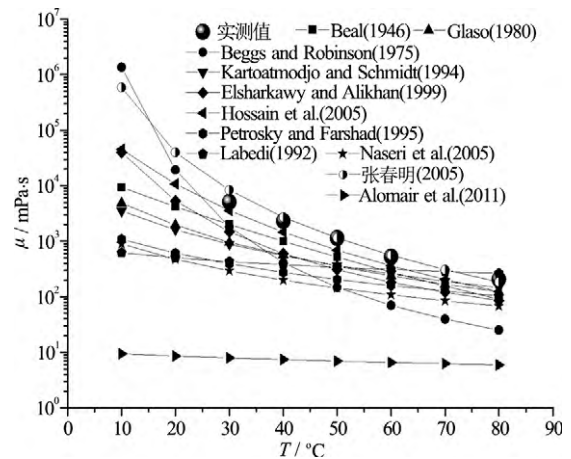


图 5 实测与预测黏度对比（稠油 A）

Fig.5 Comparison between measured and predicted viscosities (heavy oil A)

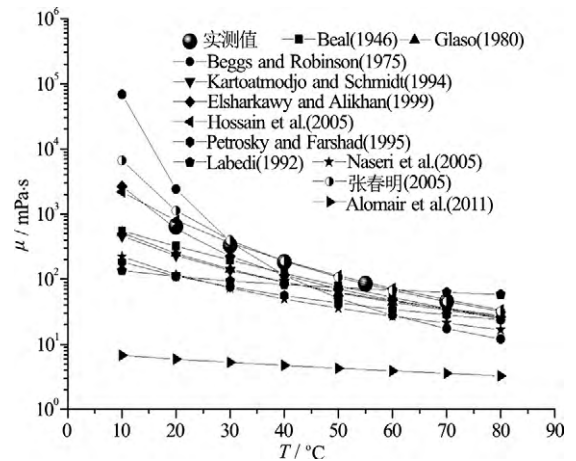


图 6 实测与预测黏度对比（稠油 B）

Fig.6 Comparison between measured and predicted viscosities (heavy oil B)

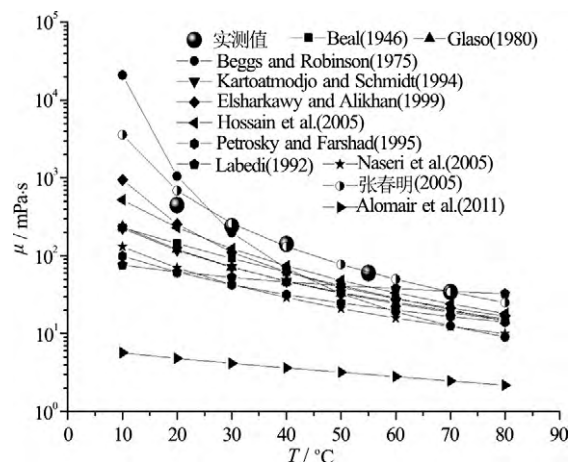


图 7 实测与预测黏度对比（稠油 C）

Fig.7 Comparison between measured and predicted viscosities (heavy oil C)

数据，与我们所采用的稠油在性质上具有一定的相似性。但是由于该关系式的数据来源范围有限，在预测其他稠油黏度时出现了较大的偏差。Hossain

等和 Elsharkawy 等也具有很高的精度, 其中 Hossain 等的预测误差能够达到 40%。

表 2 各黏度关系式的平均相对误差
Table 2. The average relative error of each viscosity equation

稠油	A	B	C
Beal (1946)	55.1	33.7	53.3
Beggs and Robinson (1975)	81.6	89.3	65.3
Glaso (1980)	64.1	46.3	60.8
Kartoatmodjo and Schmidt (1994)	61.3	45.6	60.2
Elsharkawy and Alikhan (1999)	68.4	26.2	46.5
Hossain et al. (2005)	35.5	9.90	40.8
Alomair et al. (2011)	99.0	96.3	96.3
Petrosky and Farshad (1995)	76.4	63.4	71.1
Naseri et al. (2005)	83.9	69.4	75.3
Labedi (1992)	62.9	49.7	50.5
张春明等 (2005)	20.0	20.7	15.1

基于上述研究, 我们选取了王大为等^[21]、张春明等^[20]、康志勇等^[22]以及目前的实验数据共计 35 组稠油黏度数据进行了分析, 这些黏度数据涵盖了辽河油田、渤海油田、中海油油技服等国内多个油田的稠油, 因此具有广泛的适用性。当将参量温度 T 作为横坐标时, 各稠油的黏度-温度曲线较分散, 并不能直接用一个统一的关系式拟合, 因此我们考虑选择 50°C 时的黏度 μ_{50} 作为稠油黏度预测的另一个参量, 即为横坐标进行分析^[20]。

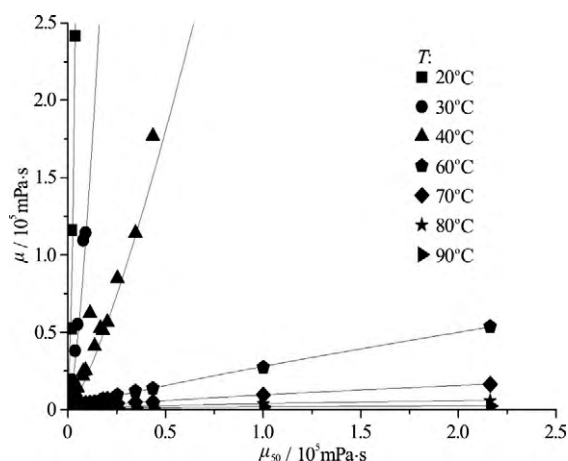


图 8 稠油黏度随 50°C 黏度 μ_{50} 的变化

Fig.8 The heavy oil viscosity changing with viscosity of 50°C

图 8 给出了所有稠油不同温度时黏度随 μ_{50} 的变化规律。从图中可以看出, 同一温度下, 随着 μ_{50} 的增加黏度逐渐增加。这主要是因为在前文中我们

已经把 μ_{50} 作为衡量稠油种类的唯一参量, μ_{50} 越大, 稠油越稠, 同一温度下的黏度也越大。同时, 同一温度下不同种类稠油的黏度接近同一曲线。若采用直线对上述数据进行拟合, 拟合效果较差。因此采用式 (3) 的幂次函数对上述数据进行了拟合, 式中 A 和 B 为参数。除 90°C 时的拟合度 $R^2 = 0.979$ 外, 其他拟合度均为 $R^2 > 0.99$, 良好的拟合效果也说明了国内稠油在性质上具有某种程度的相似。

$$\mu = A \times \mu_{50}^B \quad (3)$$

由于稠油黏度是温度 T 和 50°C 黏度 μ_{50} 的函数, 因此参数 A 和 B 必定是温度 T 的函数。图 9 给出了参数 A 和 B 随温度 T 的变化规律, 从图中可以看出, 参数 A 随着温度的升高逐渐增加, 参数 B 随着温度的升高逐渐减小。分别采用式 (4) 和式 (5) 对参数 A 和参数 B 进行了拟合, 拟合度分别为 $R^2 = 0.96$ 和 $R^2 = 0.99$, 式中, $a = 1.42 \times 10^{-4}$, $b = 197.3$; $c = -1.89$, $d = 4.22$ 。良好的拟合结果表明该预测公式具有较广的适用范围。

$$A = a \times b^{\log_{10} T} \quad (4)$$

$$B = c \times \log_{10} T + d \quad (5)$$

$$\mu = 1.42 \times 10^{-4} \times 197.3^{\log_{10} T} \times \mu_{50}^{-1.89 \times \log_{10} T + 4.22} \quad (6)$$

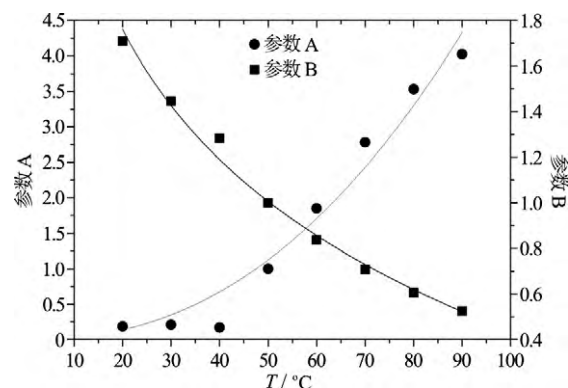


图 9 参数 A 和 B 随温度的变化关系

Fig.9 Parameters A and B changing with the temperature

3 结论

本文采用哈克流变仪测量了国内 3 种不同稠油不同温度下的黏度, 并分别与 Beal 等 11 个常见黏度计算关系式进行了对比分析。研究表明, 脱气稠油动力黏度和密度都随着温度的升高而降低, 黏度越高的稠油对应的密度也越大。温度是稠油黏度预

测的一个重要参量, 另一个重要参量可以选择 *API* 度或者 50°C 时的黏度 μ_{50} 。在所有 11 个关系式中, 张春明等的关系式更接近于实测的稠油黏度, 其次是 Hossain 等和 Elsharkawy 等关系式, 而 Alomair 等关系式对所有 3 种稠油均失去预测作用。在本文实验数据的基础上, 选择了国内多个油田的稠油黏度数据进行分析, 研究发现所有稠油的黏度均随着 μ_{50} 的增加呈幂次关系增加。通过线性回归得到了一个适用范围更广的稠油黏度预测关系式, 该关系式是温度 T 和 50°C 时黏度 μ_{50} 的函数。

参 考 文 献:

- [1] 姚海元, 宫敬. 稠油-水两相水平管流压降规律的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2005, 20(2): 174-179.
YAO Hai-yuan, GONG Jing. Experimental study of pressure drop of heavy oil-water two-phase horizontal pipe flow[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2005, 20(2): 174-179.
- [2] 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. Research of extra-heavy oil-water two-phase flow in an inclined pipe[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(6): 742-748.
- [3] 胡江平, 孙德军. 稠油聚驱中聚合物溶液的最优浓度与最优段塞尺寸[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(2): 218-224.
HU Jiang-ping, SUN De-jun. Optimal concentration of polymer solution and optimum size of slug in the polymer flooding of heavy oil[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(2): 218-224.
- [4] 石在虹, 石爽, 韩冬深, 等. 稠油掺稀多相流动规律及生产参数设计[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2012, 27(3): 284-292.
SHI Zai-hong, SHI Shuang, HAN Dong-shen, et al. Multiphase flow rule and production parameters design of heavy oil mixing with light oil[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(3): 284-292.
- [5] MARTÍNEZ-PALOU R, MOSQUEIRA M, ZAPATA-RENDÓN B, et al. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 75(3-4): 274-282.
- [6] 韩卓明. 确定稠油油藏地层原油黏度的方法[J]. 石油勘探与开发, 1988(1): 60-64.
HAN Zhuo-ming. Method of determining oil viscosity of heavy oil reservoir[J]. Journal of Petroleum Exploration and Development, 1988(1): 60-64.
- [7] 施亚洲, 解婷, 傅英. 渤海稠油油田地层原油黏度计算新方法[J]. 复杂油气藏, 2014(2): 54-56.
SHI Ya-zhou, XIE Ting, FU Ying. A new method to calculate the oil viscosity of bohai oil field[J]. Journal of Complex Reservoirs, 2014(2): 54-56.
- [8] 龙安厚, 张雪, 龙莎. 基于人工神经网络的超稠油表观黏度预测[J]. 科学技术与工程, 2009(15): 4458-4461.
LONG An-hou, ZHANG Xue, LONG Sha. Apparent viscosity prediction based on artificial neural network[J]. Science, Technology and Engineering, 2009(15): 4458-4461.
- [9] 朱战军, 林壬子, 汪双清. 稠油主要组分对其黏度的影响[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 512-513.
ZHU Zhan-jun, LIN Ren-zi, WANG Shuang-qing. Effects of main groups on viscosity of heavy oil[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(5): 512-513.
- [10] BEAL C. Viscosity of air, water, natural gas, crude oil and its associated gases at oil field temperature and pressures[J]. Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1946, 165: 114-127.
- [11] BEGGS H D, Robinson J R. Estimating the viscosity of crude oil systems[J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 27(9): 1140-1141.
- [12] GLASO O. Generalized pressure-volume-temperature correlation for crude oil system[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980(2): 785-795.
- [13] KARTOATMODJO T, SCHMIDT Z, KARTOATMODJO T, et al. Large data bank improves crude physical property correlations[J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(27): 51-55.
- [14] ELSHARKAWY A M, ALIKHAN A A. Models for predicting the viscosity of Middle East crude oils[J]. Fuel, 1999, 78(8): 891-903.
- [15] HOSSAIN M S, SARICA C, ZHANG H Q. Assessment and development of heavy-oil viscosity correlations[C]. International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, 2005(1-3): 1-9.
- [16] ALOMAIR O, ELSHARKAWY A, ALKANDARI H. Viscosity predictions of Kuwaiti heavy crudes at elevated temperatures[C]. Heavy Oil Conference and Exhibition, Kuwait, 2011(12-14): 1-18.
- [17] PETROSKY G E, FARSHAD F F. Viscosity correlation for gulf of mexico crude oil[C]. Production Operations

- Symposium, Oklahoma, 1995(2-4): 249-258.
- [18] NASERI A, NIKAZAR M, DEHGHANI S A M. A correlation approach for prediction of crude oil viscosities[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2005, 47(3-4): 163-174.
- [19] LABEDI R. Improved correlations for predicting the viscosity of light crudes[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 1992, 8(3): 221-234.
- [20] 张春明, 赵红静, 肖乾华, 等. 稠油黏度预测新模型[J]. *长江大学学报: 自科科学版*, 2005(7): 216-218. ZHANG Chun-ming, ZHAO Hong-jing, XIAO Qian-hua, et al. New model of heavy oil viscosity prediction[J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2005(7): 216-218.
- [21] 王大为, 岳宝林, 刘小鸿, 等. 渤海稠油油藏原油黏温关系研究[J]. *石油地质与工程*, 2015, 29(5): 84-86. WANG Da-wei, YUE Bao-lin, LIU Xiao-hong, et al. The study of viscosity-temperature relationship of bohai heavy oil reservoir[J]. *Journal of Petroleum Geology and Engineering*, 2015, 29(5): 84-86.
- [22] 康志勇, 张勇. 辽河油区计算稠油黏度通用方程[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(6): 101-102. KANG Zhi-yong, ZHANG Yong. Calculation of heavy oil viscosity general equation of liaohe oil region[J]. *Journal of Special Reservoirs*, 2005, 12(6): 101-102.