

文章编号: 1000-8241(2015)11-1171-06

# 稠油降黏减阻及其流变学性质

陈小平 张健 许晶禹

中国科学院力学研究所, 北京 100190

**摘要:** 针对稠油的管道输送问题, 从降黏减阻的角度开展研究工作。采用管流实验和流变仪测试相结合的方法, 探讨了升温、充气和掺混稀油对稠油降黏减阻的作用效果。结果表明: 对于具有牛顿流体本构关系的稠油, 升温 and 掺混稀油均具有明显的降黏减阻作用, 其减阻效果呈指数关系衰减; 充气减阻仅在大流量、低温度的条件下发生, 且黏度的降低幅度不大。针对掺稀油减阻, 提出了一个指数关系式对混合黏度进行预测, 该公式是稠油黏度、稀油黏度及稀油体积含率的函数, 通过与实验数据进行对比, 证明了其预测精度较高。(图 10, 参 17)

**关键词:** 稠油; 降黏减阻; 流变学性质; 管道流动

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.007

## Viscosity/drag reduction and rheological properties of heavy crude oil

CHEN Xiaoping, ZHANG Jian, XU Jingyu

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

**Abstract:** In this paper, research is conducted in respect of viscosity/drag reduction to solve the problems in heavy oil pipeline transportation. Pipe flow experiment and rheometer test are used together to reveal effects of heating, gas injection and dilution on heavy oil viscosity/drag reduction. Research results show that, for the heavy crude oil with Newtonian fluid constitutive relation, both heating and dilution have significant impacts on viscosity/drag reduction, which may decrease exponentially. For gas injection, drag reduction only happens under the condition of large flowrates or at low temperatures, but viscosity does not decrease greatly. Furthermore, for the dilution, an exponential equation is developed to predict viscosity of heavy crude oil and light oil mixture. The equation is a function of heavy oil viscosity, light oil viscosity and volumetric content of light oil. Comparison with test data may confirm accuracy of the prediction deduced by using the equation. (10 Figures, 17 References)

**Key words:** heavy oil, viscosity/drag reduction, rheological properties, pipe flow

在非常规石油资源的开采中, 稠油和超稠油以其储量巨大受到广泛的关注。然而, 随着产量的不断攀升, 寻找有效而经济的输送方式变得越来越重要。近年来, 国内外学者利用不同手段探索稠油输送的有效方法, 主要包括稠油降黏和管流减阻。其中, 稠油降黏方法主要有掺轻油稀释、形成水包油型乳化液、加热和降低倾点等; 管流减阻方法主要有加气减阻、添加减阻剂和水环减阻等<sup>[1-8]</sup>。

稠油降黏方面, Ghannam 等<sup>[9]</sup>采用流变仪研究了剪切速率、温度及轻油浓度对黏度的影响, 结果表明: 稠油表现出非牛顿流体的剪切变稀性质, 掺混少量的轻质油可以有效降低黏度; Centeno 等<sup>[10]</sup>比较了现有

的稠油及其掺稀油混合液的黏度预测公式, 指出还没有公式能够完全准确地预测所有样品的黏度, 稠油及其掺稀油混合液的黏度预测依旧面临挑战。管流减阻方面, Al-Sarkhi 等<sup>[11]</sup>总结了气-液和液-液两相流通过添加减阻剂实现减阻的研究成果, 对多相流中减阻剂的作用机制做了统一解释, 给出了添加减阻剂时摩擦因子的预测公式; 赖英旭等<sup>[12]</sup>研究了蒸汽引射直接加热稠油输送的技术, 讨论了蒸汽量对稠油的温度、压降和含水率的影响; 许晶禹等<sup>[13-14]</sup>研究了加气对幂律流体水平管流的减阻效果, 结果表明: 当流动特性指数很小时, 减阻现象将在大部分液相含率范围内发生, 同时给出了分层流和弹状流下减阻发生的判别公式。

综上所述,针对稠油在管道输送中的流动特性的研究成果尚不成熟,现有研究主要集中在流变学测试方面,很少采用油田稠油进行管流实验,且关于稠油管流的一些研究成果还处于定性描述阶段,特别是掺混稀油减阻的混合油黏度预测公式有待进一步完善。因此,以渤海油田原油为介质,从降黏减阻的角度对稠油的流变学特性和管流特征开展研究,重点探讨升温、充气和掺混稀油等不同手段对稠油降黏减阻的影响。

## 1 实验设备与流程

### 1.1 实验设备

流变学实验部分,采用德国赛默飞公司生产的 Hakke RS6000 高级旋转流变仪,并采用测量转子 rotor Z38 和 cup Z43 对稠油和掺混稀油的混合油进行应力-剪切速率测量,设置的剪切速率范围为  $0.001 \sim 200 \text{ s}^{-1}$ 。通过水浴温度控制系统保持测量过

程中油样的温度恒定,同一油样按温度从低到高依次进行测量。

管道流动特性实验,采用科里奥利质量流量计测量混合流量和密度<sup>[15]</sup>。本研究使用的 Emerson 科里奥利质量流量计为弯管型,变送器型号为 1700 型,传感器型号为 R200S418。

### 1.2 管道流动实验流程

为研究升温、充气和掺混稀油 3 种方法对稠油降黏减阻的作用,设计了一套内径为 47 mm 的不锈钢水平循环管路系统(图 1)。稠油流量采用齿轮泵输送,采用齿轮流量计计量,空气流量由空压机提供并由玻璃转子流量计计量。稠油或其混合液流过水平管路以后回到加热罐完成循环。在水平长直管段的稳定段进行流动参数的测量,采用罗斯蒙特系列变送器测量压降,气体相含率由科氏质量流量计所测的密度反算得到,所有数据均在流动达到稳定后测试得到。实验所用的稠油来自渤海油田绥中陆地处理终端。

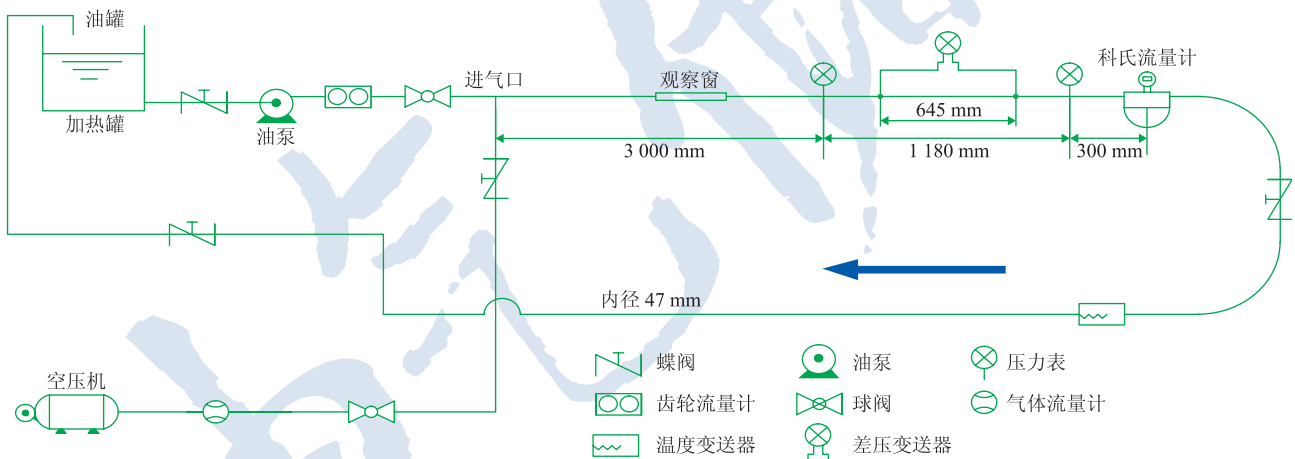


图 1 实验室循环管路示意图

#### 1.2.1 稠油升温减阻实验

稠油置于加热罐中,罐内安装有温度传感器,采用温度控制装置调节加热罐内稠油的温度。管道内部温度采用罗斯蒙特温度变送器和科氏质量流量计测量。管道输送时,流动介质的黏性耗散使管流的温度升高,稠油通过不锈钢管向环境的热传递使管流温度降低。实验中,通过调节缠绕在管道上的保温电缆保持管流温度与加热罐内温度一致。

关闭气路阀门,保持稠油温度不变,依次增加稠油流量进行实验。实验中,稠油单相流量依次为  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $8 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,稠油的温度依次为  $46 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $53 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $58 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $62 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $67 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 1.2.2 稠油充气减阻实验

实验中,进气管口安装在水平管路的初始端,科氏流量计安装在水平管路的末端。气路用空压机供气,采用球阀控制流量,用玻璃转子流量计计量,流量计的量程分别为  $0 \sim 15 \text{ L}/\text{min}$  和  $0 \sim 50 \text{ L}/\text{min}$ ,油路流量由齿轮流量计计量。保持温度和油路流量不变,改变入口含气率进行实验,入口含气率介于  $1\% \sim 10\%$ 。所设置的温度和油路流量与升温实验所述相同。实验中记录每一工况下的压差、流量和相含率数据,相含率由科里奥利质量流量计测得的密度计算得到<sup>[16]</sup>。

#### 1.2.3 掺混稀油减阻实验

在稠油中加入一定量 0# 柴油,待混合均匀后进行

循环实验。所使用柴油的物性参数:密度  $835 \text{ kg/m}^3$ , 运动黏度  $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。实验中柴油体积含率依次为 0.6%、5%、10%、15% 和 25%。由于柴油易燃易爆, 仅在加入柴油之前将稠油加热至  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其后通过调节保温电缆使稠油温度保持在  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  不变。实验时, 分别对稠油以及不同稀油含率的混合油样进行取样, 为后期流变学实验做准备。

## 2 实验结果与分析

进行管道流动实验之前, 用 Hakke RS6000 旋转流变仪对稠油油样进行流变学特性研究(图 2), 结果表明: 当温度一定时, 随着剪切速率的增大, 稠油剪切稀释的特性并不明显, 剪切应力和剪切速率近似呈线性关系, 即稠油样品近似于牛顿流体。因此, 在管流研究中可以将稠油样品作为牛顿流体进行相关理论分析。

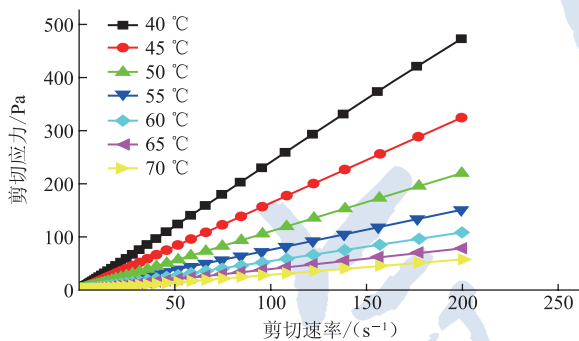


图 2 不同温度下稠油的流变学曲线

### 2.1 稠油管流时的升温减阻

由于稠油的高黏特性, 其在实验中所有工况下的雷诺数均小于 2 000, 在管道中处于层流。因此, 流体的黏度可由测得的摩擦压降获得:

$$\mu = \frac{\Delta p}{L} \frac{\pi D^4}{128 Q} \quad (1)$$

式中:  $\Delta p/L$  为管道的摩擦压降;  $D$  为管道直径;  $Q$  为管道流量。

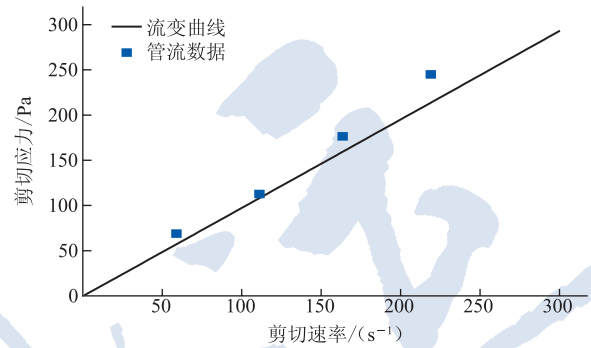
稠油在管道中流态为层流时, 不同流量对应不同的剪切速率, 平均剪切速率  $\bar{\gamma}$  可以通过泊肃叶流动关系式计算:

$$\bar{\gamma} = \frac{32 Q}{\pi D^3} \quad (2)$$

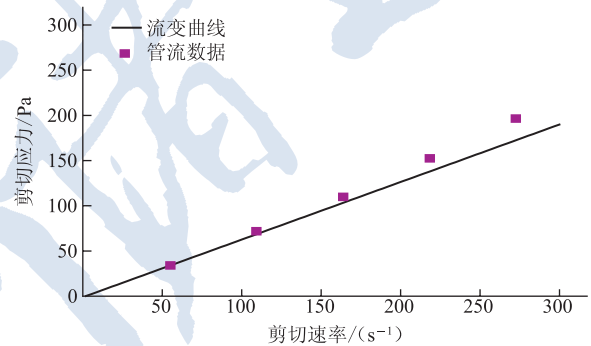
管道壁面剪切应力为:

$$\tau = \frac{D}{4} \frac{d\rho}{dx} \quad (3)$$

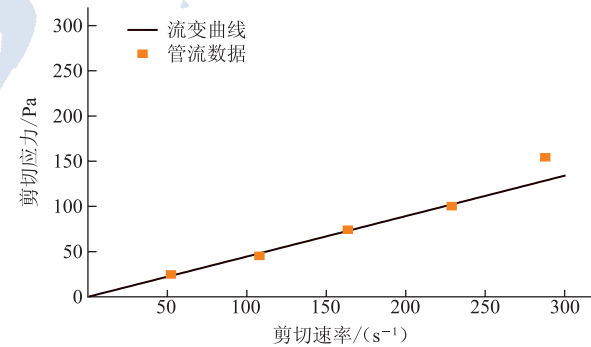
通过上述关系式, 可以计算得到稠油管流实验中的剪切应力-剪切速率关系(图 3), 其中实线为通过流变仪直接测量得到的结果, 分散点为管道流动中通过式(2)和式(3)计算的结果。可见, 两种实验方法测得的结果吻合较好。



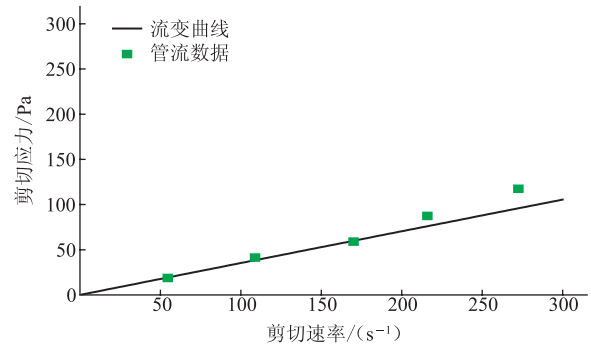
(a)  $52 \text{ }^\circ\text{C}$



(b)  $58 \text{ }^\circ\text{C}$



(c)  $63.5 \text{ }^\circ\text{C}$



(d)  $67 \text{ }^\circ\text{C}$

图 3 管道层流和流变仪测得的剪切应力-剪切速率关系对比

根据不同流量时由式(1)计算的黏温曲线(图4,其中曲线代表流变仪测得的结果,分散点代表管流实验所得的结果),升温具有明显的降黏减阻作用,当温度从45℃升至65℃时,黏度从1680 mPa·s降至420 mPa·s,降黏幅度达75%。此外,黏温曲线满足Arrhenius指数关系式<sup>[17]</sup>:

$$\mu = Ae^{E/RT} \quad (4)$$

式中: $A$ 为常数; $E$ 为活化能; $R$ 为气体常数,其值为8.314 J/(mol·K); $T$ 为绝对温度。

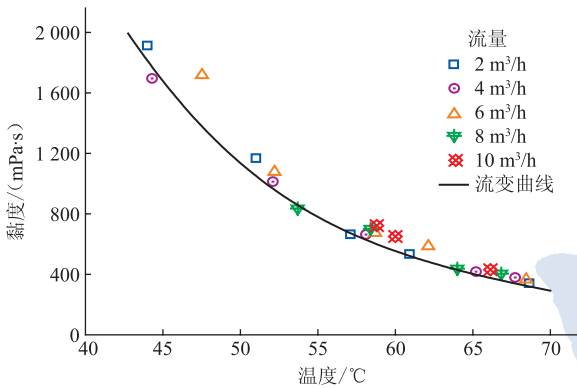


图4 管道层流和流变仪的黏温曲线对比

通过最小二乘法拟合,得到各参数如下: $A=1.84 \times 10^{-7}$  Pa·s,  $E=6868$  J/mol, 拟合度  $R^2=0.98$ 。

此外,由图4可见,稠油在管道内流动时,流量对黏度的影响很小。主要原因是:实验稠油近似为牛顿流体,稠油的黏度受剪切速率的影响不明显,这与流变仪测试的结论是一致的。根据不同流量下稠油单相流动时压降随温度的变化规律(图5),流量一定时,压降随温度升高呈指数关系衰减,因此升温有明显的减阻作用。

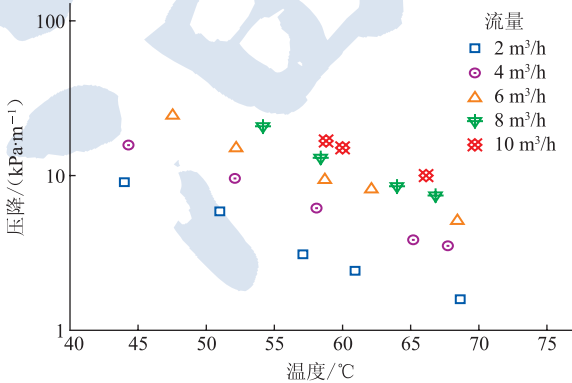


图5 不同流量下压降随温度的变化规律

### 2.2 稠油管流时的充气减阻

根据前人研究成果,气体的充入可降低管道内的摩擦压降,特别是针对具有剪切变稀性质的流体,

效果更为显著<sup>[14]</sup>。根据温度为58.5℃时,压降随气相表观流速的变化规律(图6),当稠油表观流速较高( $U_{sl}=1.60$  m/s)时,气体的加入可以降低管道中的压降,减阻现象发生,两相流动的压降随着气相表观流速的增加而降低,即低于单相流动的压降。但是,随着液相流量的降低,减阻现象消失,两相压降与单相稠油流动时的压降持平或略高于充气前的单相压降。原因主要在于:随着气相流速的增加,有效黏度随混合速度的增加而降低,而黏度的降低必将导致压降减小;但另一方面,随着气相流速的增加,气相对液相的干扰程度加剧,产生的附加压力损失增大,导致两相压降升高。因此,当固定液相表观流速向管道内通入气体时,这两种相反的变化趋势最终将导致气/稠油的两相压降随气相流速的增加呈现出增加、不变或降低等不同的变化趋势。

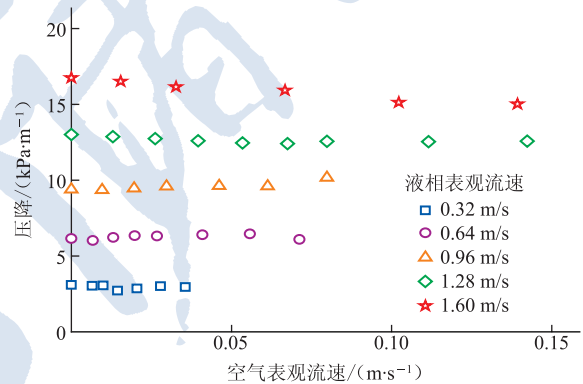


图6 同一温度下压降随气相表观流速的变化规律

根据稠油流量固定( $U_{sl}=6.0$  m³/h)时温度变化对于两相压降的影响规律(图7),气体的充入对低温柔时的原油流动有着明显的减阻效果。当系统温度为48℃时,压降随着气相表观流速的增大而减小。随着温度的升高,减阻现象消失,两相压降呈现轻微的上趋势。同时,当气相表观流速固定时,温度越高,压降

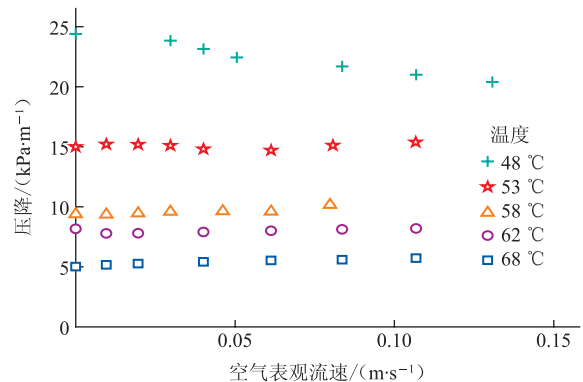


图7 同一稠油流量下压降随气相表观流速的变化规律

越低。结合图6可以得出,在低温、大流量条件下,充气对管道内的稠油流动具有一定的减阻作用,但减阻效率不显著。

### 2.3 稠油管流时的掺混稀油减阻

在掺稀油减阻实验中,首先对不同柴油含率下的柴油/稠油混合液,采用流变仪测试剪切应力-剪切速率曲线(图8)。可见,柴油的添加并未改变稠油的近似牛顿流体的特性,两相混合液的流变学曲线近似于直线,即混合液为牛顿流体。

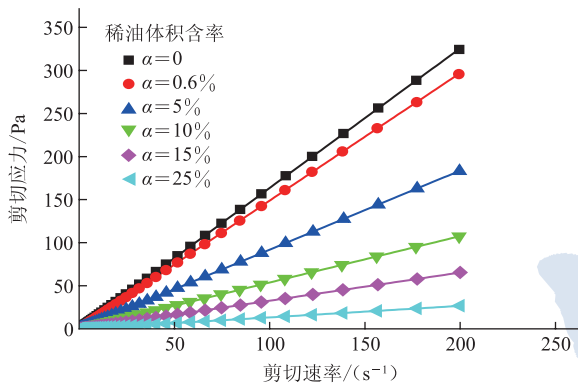


图8 不同稀油体积含率下混合液流变学曲线

应用式(1)计算柴油/稠油混合液在管道内流动时的黏度随含油率的变化关系(图9)。管流压降计算的黏度与流变仪测得的黏温曲线吻合较好,说明对于一定物性的稠油,采用掺稀油的方法进行降黏减阻时,可以直接通过混合液流变仪的测量结果进行预测。此外,当柴油体积含率为10%时,可将混合液黏度从1750 mPa·s降至690 mPa·s,降黏率达66%;当柴油体积含率为25%时,混合液黏度降至120 mPa·s,降黏率达93%。因此,掺混稀油能够大幅度对稠油进行降黏。

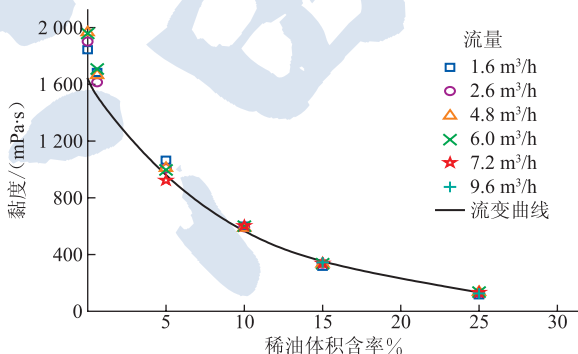


图9 不同稀油体积含率下混合液管道层流和流变仪黏温曲线对比

由图9可知,混合液的黏度随稀油体积含率的增加呈指数衰减。因此,假设混合液黏度与稀油体积含率满足如下指数关系式:

$$\mu_{\text{mix}} = B e^{k\alpha} \quad (5)$$

式中: $B$ 为稠油黏度系数; $k$ 为降黏系数; $\alpha$ 为稀油的体积含率。当 $\alpha=0$ 时, $\mu_{\text{mix}}=\mu_1=B$ ,其中 $\mu_1$ 为稠油黏度;当 $\alpha=1$ 时,混合黏度为稀油黏度,即 $\ln(\mu_2/\mu_1)=k$ ,其中 $\mu_2$ 为稀油黏度。

因此,式(5)可写成:

$$\mu_{\text{mix}} = \mu_1 \left( \frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^\alpha \quad (6)$$

由于稠油或稀油的黏温曲线均满足 Arrhenius 指数关系式,因此,将稠油和稀油两种不同的黏温指数关系式代入式(6),可以得到:

$$\mu_{\text{mix}} = (A_1 e^{E_1/RT})^{1-\alpha} (A_2 e^{E_2/RT})^\alpha \quad (7)$$

式中: $A_1$ 、 $A_2$ 均为常数; $E_1$ 、 $E_2$ 分别为稠油和稀油的活化能。

对于具有牛顿流体或近似牛顿流体质性的稠油而言,在已知温度  $T$  和稀油体积含率  $\alpha$  的情况下,可以运用式(7)进行混合液黏度的预测。根据不同混合流速下柴油/稠油混合液流动时管道压降随稀油体积含率的变化规律(图10,其中数据点为实验测试结果,曲线为式(6)的预测结果),理论预测结果的精度很高,压降随着稀油体积含率的增加呈指数衰减。总的来说,稠油掺稀油降黏方法具有很好的减阻效果。

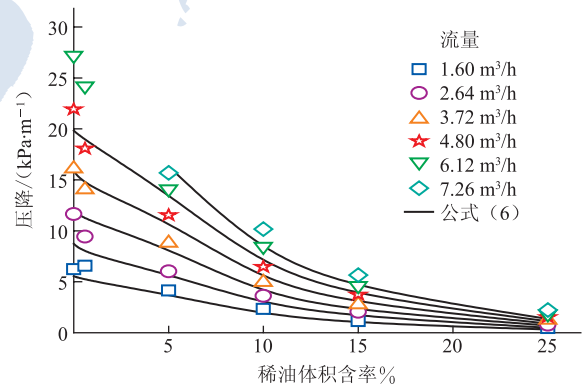


图10 不同混合流量下压降随稀油体积含率的变化规律

## 3 结论

针对稠油管道输送中的流动特性开展研究工作,从降黏减阻的角度探讨了稠油升温、充气和掺混稀油对稠油降黏减阻的影响,得到以下结论:

(1) 实验稠油的流变学性质接近于牛顿流体。通过流变仪与管流测试结果的对比可知,当稠油在管道内层状流动时,二者在低剪切速率下的吻合度很高,因

此,流变仪的测试结果可直接应用于稠油层流的相关计算中。

(2)升温能够起到很好的降黏作用,黏度随温度呈指数降低,即黏温曲线满足 Arrhenius 指数关系式。由于稠油的剪切变稀特性并不明显,因此,充气减阻的作用不显著,降黏效果仅在大流量、低温度的条件下有所显现,且黏度的衰减程度不高。

(3)有关掺稀油减阻的研究表明,混合液的黏度随稀油体积含率的变化满足指数关系。因而提出了一个指数关系式对两相混合液黏度进行预测,该公式是稠油黏度、稀油黏度及稀油体积含率的函数。通过与实验数据的对比发现,该公式的预测精度较好。

参考文献:

[1] 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.

[2] 关中原. 我国油气储运相关技术研究新进展[J]. 油气储运, 2012, 31(1): 1-7.

[3] 赵珂珂, 李传宪, 杨飞, 等. 管道入口段雾化加注天然气减阻剂的数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 50-55.

[4] 郭旭, 代晓东, 宋林花, 等. 聚合物基纳米复合材料作为油品减阻剂的相关分析[J]. 油气储运, 2013, 32(10): 1037-1042.

[5] 郭海峰, 王月琴, 徐新河, 等. 六元环烷基硅氧烷-磷酸酯类天然气管道缓蚀型减阻剂的研制[J]. 油气储运, 2013, 32(8): 868-871.

[6] 杨法杰, 宋盛菊, 刘玮莅, 等. 双峰 MWD 聚  $\alpha$ - 烯烃油品减阻剂的研制[J]. 油气储运, 2013, 32(7): 731-735.

[7] 郭海峰, 高安东, 周广, 等. 高分子纳米材料缓蚀型气体减阻剂及其性能[J]. 油气储运, 2013, 32(1): 43-46.

[8] 李业, 敬加强, 代科敏, 等. 基于 FLUENT 的黏稠油垂直上升水环输送数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(2): 205-210.

[9] GHANNAM M, HASAN S, ABU-JDAYIL B, et al. Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 76(1): 122-128.

[10] CENTENO G, SÁNCHEZ-REYNA G, ANCHEYTA J, et

al. Testing various mixing rules for calculation of viscosity of petroleum blends[J]. Fuel, 2011, 90(12): 3561-3570.

[11] ALASRKHI A, NAKLA M, AHMED W. Friction factor correlations for gas-liquid/liquid-liquid flows with drag-reducing polymers in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(5): 501-506.

[12] 赖英旭, 郑之初, 吴应湘. 蒸汽引射稠油输送新技术[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(2): 78-83.

[13] XU J, WU Y, LI H, et al. Study of drag reduction by gas injection for power-law fluid flow in horizontal stratified and slug flow regimes[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 147(2-3): 235-244.

[14] 许晶禹, 吴应湘, 李东晖. 液相介质对水平气液间歇流动压降的影响[J]. 过程工程学报, 2006, 6(2): 161-166.

[15] WANG T, BAKER R. Coriolis flowmeters: A review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 40(12): 99-123.

[16] HENRY M, TOMBS M, DUTA M, et al. Two-phase flow metering of heavy oil using a coriolis mass flow meter: A case study[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6): 399-413.

[17] ZHANG J, XU J, GAO M, et al. Apparent viscosity of oil-water (coarse) emulsion and its rheological characterization during the phase inversion region[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2013, 34(8): 1148-1160.

(收稿日期: 2015-06-22; 修回日期: 2015-08-12; 编辑: 关中原)



**作者简介:** 陈小平, 在读博士生, 1987年生, 2010年毕业于武汉理工大学机械设计专业, 现主要从事稠油混输及多相流动相关技术的研究工作。

CHEN Xiaoping, Ph.D candidate, born in 1987, graduated from Wuhan University of Technology, mechanical design, in 2010,

engaged in the research of technologies for mixed transportation and multi-phase flow of heavy oil.

Tel: 15313015608, Email: chenxiaoping2@imech.ac.cn