

文章编号:1673-5005(2006)01-0107-04

管流实验装置中原油温度分布研究

刘刚, 张国忠

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:利用管流实验装置可以模拟原油在实际管道中的动态降温、静态降温以及再启动的全过程,然而,在模拟过程中管内油品温度场分布、管内油品降温速率与管外水浴降温速率的关系等问题仍未解决。在 FLUENT 平台上对管流实验中的动态及静态降温过程进行了数值模拟。结果表明,按照实验中设定的降温速率进行降温,动态降温过程中油壁温差在 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,静态降温过程中油壁温差在 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,可以认为实验过程中某一时刻管路截面上油温是一致的。

关键词:管流实验装置; 原油; 数值模拟; 温度场

中图分类号:TE 832.3 **文献标识码:**A

Investigation on crude oil temperature distribution for experimental loop

LIU Gang, ZHANG Guo-zhong

(College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The dynamic cool down during the transportation, the static cool down during the shut-down and the start-up of the oil in the pipeline in the field can be effectively simulated on the experimental loop(EL). There are some considerable issues unsolved such as the development of the oil temperature field in the pipeline and the relation of the cool down rate between the oil and the wall. Dynamic and static cool down process in experiments are numerically simulated using FLUENT. The simulated results show that under the cooling rates chosen in the experiments, the difference between the average temperature of oil in the pipeline and the pipe wall temperature during the dynamic cooling is within $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, and also the temperature difference during the static cooling is within $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Therefore, the temperature of the oil in the same cross section of the pipe is uniform during tests.

Key words: experimental loop; crude oil; numerical simulation; temperature field

利用管流实验装置可以模拟管道正常运行、停输和再启动全过程,能实现在设定条件下(如剪切速率一定、油温一定)对原油长时间的连续剪切以及停输启动过程,这对指导热油管道的生产实践具有重要意义^[1]。在对原油长时间的连续降温剪切过程中,实验管道静置于水浴中,通过控制水的降温速率,实现原油在管道中按设定速率降温。降温过程中,管内原油与管外水浴温度存在温差,管内油品温度场如何分布,管内油品降温速率与管外水浴降温速率的关系,一直是亟待解决的问题^[2-5]。笔者利用 FLUENT 软件对动态降温和随后的静态降温过

程进行数值模拟,考察管内油品温度沿径向的分布。

1 模拟计算

1.1 物理过程描述

动态降温:把预处理后的原油加热到设定温度($50\text{ }^{\circ}\text{C}$),选择一定的动态降温(也称预剪切)流量,按照设定的温降速率($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$),连续降温剪切油样至设定温度。在动态降温过程中测定管路压降随温度的变化,即可获得动态全粘温曲线。

静态降温:经过动态降温过程,当油温达到设定

收稿日期:2005-06-30

基金项目:“十五”中油股份公司重点课题资助项目(010206-02)

作者简介:刘刚(1975-),男(汉族),山东聊城人,讲师,博士,研究方向为长距离管输技术。

温度,恒温循环一定时间,停泵。随后,管内原油按照设定的降温速率静态降温。静态降温结束以后,可以依据实验方案进行相应的启动实验。上述过程可以模拟管道正常运行、停输和再启动全过程。

降温过程是将实验管道静置于水浴中进行,通过控制水的降温速率,实现原油在管道中按设定速率降温。即管壁的温降速率已知,需要考察原油在管内沿径向的温度分布。

1.2 网格划分及该软件边界条件

本文中利用 FLUENT 商业软件对管流实验装置中的温度场及速度场进行数值模拟,该软件的数学模型不再罗列,假设条件为壁面无滑移,流动为轴对称稳定流动^[6,7]。

由于假设管道内的流动是对称的,计算域可以简化为二维,因此采用 FLUENT 中无旋的非稳态轴对称模型进行计算。计算域长度取为管道总长 24.18 m,宽度为管道半径 10.68 mm。采用完全正交的矩形网格进行网格划分,沿半径方向网格的宽度约为 0.5 mm,沿轴向网格长度为 1 mm,网格总数大约为 50 万。

在模拟动态降温过程时,以初始温度下的稳态流场作为初始条件。在得到动态降温过程结束时的结果后再将管道内各个方向的速度给定为零作为静态降温过程的初始条件。

1.3 物性参数的确定

给定管道的入口质量流量 77.079 g/s(相应于动态降温过程中,预剪切流量 90 mL/s,此时管内为层流流动);实验中管道是首尾相接的,因此管道中的速度分布连续,为了模拟这种情况,计算中采用了 FLUENT 中的混合面(mixing plane)模型,将计算域出口的速度分布作为入口的速度分布,这样就实现了封闭管道的模拟,与实际流动情况更为接近。根据估算,管壁与水的换热系数在 10⁴ 量级,因此可以忽略管壁热阻,直接将水浴的温度作为管道内壁面的温度。由于水域的温度是随着时间逐渐下降的,因此需要采用用户自定义函数(UDF)给定。

原油是一种比较稳定的胶体分散体系,在较高的温度下,原油中蜡分子中的相邻原子绕 C—C 键的旋转运动相应加快,形态复杂的卷曲构象增多,趋向于形成线团状态,蜡分子主要溶解在原油体系中。当温度降低时,蜡分子具有与最小势能相对应的拉长形式,分子排列时分子间的相互制约作用增强,当蜡分子与蜡分子之间的吸引力大于蜡与油相之间的吸引力时,蜡分子将连接形成晶核,然后形成大的晶

体^[9]。上述过程宏观上表现为原油的各项物性随温度发生变化,尤其是流变特性将发生明显改变。为使数值模拟过程更接近实际情况,必须对物性随温度的变化进行考虑。本实验选用的油样为大庆原油,实验测得的全粘-温曲线见图 1。动态降温过程中,油温高于 36℃,原油呈牛顿流体特性;当油温低于 36℃时,原油表现为非牛顿特性,在 36℃到 30℃之间时,可用幂律方程进行描述。因而,模拟过程中原油的表观粘度通过 UDF 分段给定。此外,原油的密度、比热容和热传导系数等物性参数与温度的关系式亦可用 UDF 给出,具体形式如下^[8]:

$$\begin{aligned} \rho &= 888.5 - 0.802T, \\ c_p &= 4186.0 - 916.2\exp(0.01732T), \\ k &= 0.16276(1 - 0.00054T)/d_4^{1.5}. \end{aligned}$$

式中, ρ 为密度,采用国标法-密度计法测定,kg/m³; T 为温度,℃; c_p 为质量定压热容,J/(kg·℃); k 为热传导系数,W/(m·℃)。

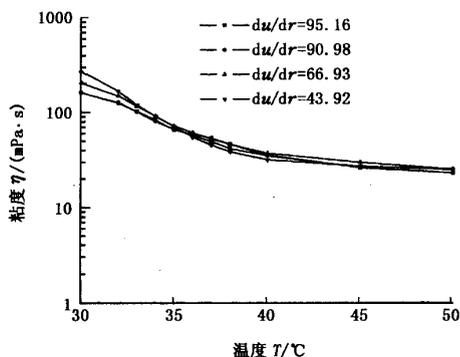


图 1 大庆原油全粘-温曲线

2 计算结果

2.1 动态降温过程模拟

对原油从 50℃ 动态降温至 30℃ 的过程进行模拟计算。在动态降温过程中,管壁温度随时间不断变化,对应不同的管壁温度,可以获得管内原油的温度和速度分布。图 2,3 是管壁温度为 49.9℃ 时,计算所得的温度和速度分布。可以看出,此时原油温度高于 36℃,原油表现出牛顿流体特性,由于管中心油温与管壁温度的差异所造成的速度场畸变并不明显。

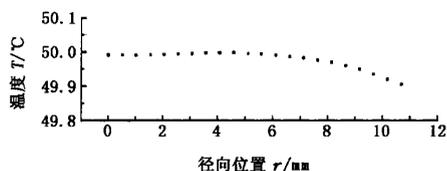


图 2 管内温度分布

考虑到管内油温沿径向存在差别,假设微元 $2\pi r dr$ 内油温为 T_r , 定义油品平均温度为 $\frac{\int_0^R 2\pi r T_r dr}{\pi R^2}$ 。利用 FLUENT 模拟计算出的温度分布数据进行数值积分,即可获得上述油品平均温度。温度无量纲量定义为 $\theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}$, 其中, T_w 为管壁温度, T_0 为油品平均温度, T 为径向位置为 r 处的原油温度。径向位置的无量纲量为 $x = \frac{r}{R}$, 其中, R 为管路的半径。不同管壁温度下油品无量纲温度分布如图 4 所示。

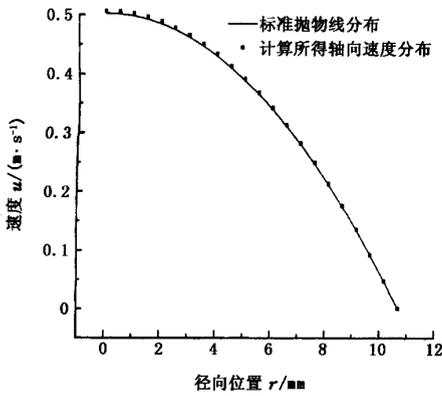


图3 管内速度分布

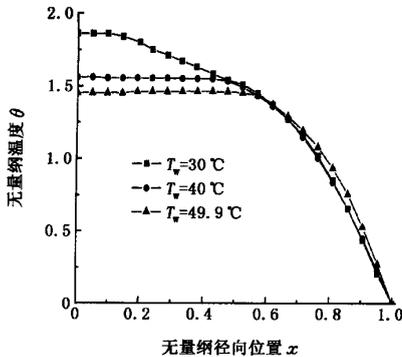


图4 不同壁温时管内无量纲温度分布

可以看出,管壁温度为 $49.9\text{ }^\circ\text{C}$ 时,沿径向方向距管中心约 $0.6R$ 处,油品温度分布发生明显变化,在 $0.6R$ 以内油品温度与管壁温度一致;管壁温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,位置在 $0.5R$ 附近;管壁温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,变化位置在 $0.2R$ 附近。在动态降温过程中,既存在摩擦功损失,又存在油品向管壁的传热,致使管中心附近的油品温度趋于一致。当油品温度降低时,其表观粘度升高,摩擦功损失增大^[10],从而出现上述温度分布的变化。

计算得知,管内平均油温($49.965\text{ }^\circ\text{C}$)与管壁温度之差(以后简称油壁温差)为 $0.065\text{ }^\circ\text{C}$ 。当管壁温度降至 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,油壁温差达到 $0.16\text{ }^\circ\text{C}$ 。随着温度继续降低,大庆原油表现出幂律流体特性,壁温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时油壁温差为 $0.103\text{ }^\circ\text{C}$ 。对数值计算所得的管中心油温和管壁温度随时间的变化绘制成图,结果见图 5。油壁温差最大值为 $0.16\text{ }^\circ\text{C}$,可以认为在本实验的降温速率条件下,动态降温过程中某一时刻管路截面上油温是一致的,而且整个动态降温过程中,管中心油温和管壁温度的降温速率几乎完全同步,没有明显的滞后现象。

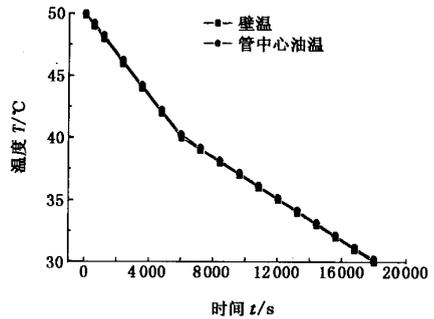


图5 动态降温过程平均油温和管壁温度随时间的变化

在实际实验过程中,动态降温过程结束后,让原油在管路中循环一定时间(0.5 h),然后再进行静态降温过程。以动态降温结束时的温度场和速度场为初始条件,管壁温度降至 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 后保持恒温(即改变管壁的边界条件),对该实验过程进行模拟计算的 1000 s 后和 2000 s 后沿径向温度分布见图 6。

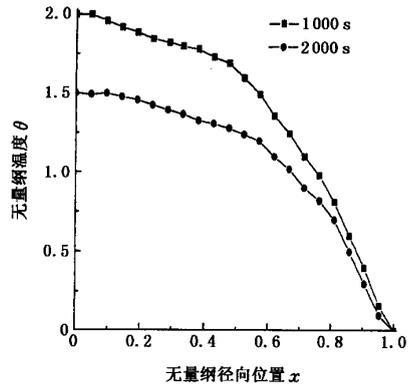


图6 恒壁温循环不同时间后管内无量纲温度分布

可以看出,恒壁温循环 1000 s 后,油壁温差降至 $0.026\text{ }^\circ\text{C}$;而 2000 s 后油壁温差已接近于 0。因此实验中设定恒壁温循环时间为 0.5 h ,基本可以达

到管内恒温要求。

上述模拟计算表明,整个动态降温及随后的恒壁温循环过程中,油壁温差始终保持在 0.16 ℃ 以内,在原油流变特性的实验研究中这一温差值是可以接受的。

2.2 静态降温过程模拟

在模拟静态降温过程中,只求解能量守恒方程,实际上就是只模拟管道内的热传导过程。静态降温数值模拟以恒壁温循环 2 000 s 后所得的温度场为初始条件,原油初始温度 30 ℃,静置 5 h 至设定温度,设定温度分别为 26 ℃ 和 28 ℃ (即静降温幅度分别为 4 ℃ 和 2 ℃ 的情形)。

(1) 静降温 4 ℃。管壁温度经 2.5 h 降至 28 ℃,经过 5 h 达到 26 ℃,管内温度分布如图 7 所示。此时温度分布呈类似抛物线的形式。计算可知,壁温为 28 ℃ 和 26 ℃ 时,油壁温差分别为 0.50 ℃ 和 0.49 ℃。可以看出,静态降温幅度为 4 ℃ 的实验过程中,油壁温差始终在 0.05 ℃ 左右。

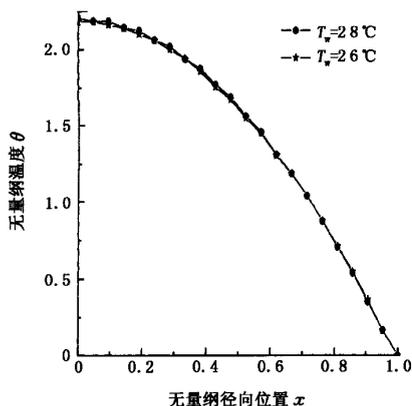


图 7 静态降温不同壁温下管内无量纲温度分布

(2) 静降温 2 ℃。按照设定的速率静态降温至 29 ℃ 和 28 ℃ 时,温度分布与图 7 类似,油壁温差均为 0.025 ℃。温降幅度减小,意味着静态降温的速率降低,相同的油壁温差对应的导热时间较长,使得油壁温度更加接近。总之,静态降温过程中,油壁温差非常微小,可以认为某一时刻管路截面上油温是一致的。

3 结束语

对含蜡原油在管流实验装置中的动态降温和静态降温过程进行了数值模拟。动态降温过程中油壁温差在 0.16 ℃ 以内,而静态降温过程中油壁温差在 0.05 ℃ 以内,管内原油和管壁的温度几乎同步

降低。在原油流变特性研究过程中,可以认为在设定的降温条件下,某一时刻管路截面上油温是一致的。

参考文献:

[1] 刘刚,张国忠,骆建武. 胶凝原油管流特性研究进展[J]. 油气储运,2003,22(1):4-11.
LIU Gang, ZHANG Guo-zhong, LUO Jian-wu. The development on the pipe flow characteristics study for gelled crude oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003,22(1):4-11.

[2] VERSCHUUR E, DEN HARTOG A P, VERHEUL C M. Pilot-scale studies on re-starting pipelines containing gelled waxy crudes[J]. J Inst Petrol, 1971,57(555): 139-146.

[3] SESTAK J, CHARLES M E, CAWKWELL M G, et al. Start-up of gelled crude oil pipeline[J]. Journal of Pipeline,1987,6(15):15-24.

[4] WILLIAMS T M, HSUJ J C, PATTERSON H L. System developed to predict waxy crude's breakaway yield stress[J]. Oil and Gas Journal, 1996, 94 (51): 35-39.

[5] KARAN Kunal, RATULOWSKI John, GERMAN Philip, et al. Measurement of waxy crude properties using novel laboratory techniques[R]. SPE 62945, 2000.

[6] 李勇,刘志友,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件——FLUENT[J]. 水力学研究与进展,2001,16(2): 256-259.
LI Yong, LIU Zhi-you, AN Yi-ran. A brief introduction to FLUENT-ageneral purpose CFD code[J]. Journal of Hydrodynamics, 2001,16(2):256-259.

[7] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

[8] 杨筱蘅,张国忠. 输油管道设计与管理[M]. 东营:石油大学出版社,1996.

[9] 李锦昕,权忠舆. 原油改性机理研究中的几个问题[J]. 油气储运,1998,17(4):8-12.
LI Jin-xin, QUAN Zhong-yu. Some problems in the study of crude oil modifying mechanism[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998,17(4):8-12.

[10] 李兆敏,张平,董贤勇,等. 屈服假塑性流体轴向往心环空中速度及温度分布研究[J]. 水动力学研究与进展,2004,19(1):31-37.
LI Zhao-min, ZHANG Ping, DONG Xian-yong, et al. Study of the velocity and temperature profiles for the annulus pipe flow of H-B fluid [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004,19(1):31-37.

(编辑 沈玉英)