文章编号:1673-5005(2010)03-0125-05

冷热原油顺序输送弯管内混油特性数值模拟

吴玉国^{1,2},陈保东²,李小玲²,王卫强²

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院,山东 青岛 266555; 2. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院,辽宁 抚顺 113001)

摘要:针对冷热原油顺序输送工艺,在已有混油理论基础上,建立冷热原油顺序输送混油计算的数学模型,采用有限 容积法进行数值求解,并对竖直弯管内的混油特性进行分析研究。结果表明:重力作用方向与管道轴向的角度变化 及流速分布变化是影响竖直弯管内混油特性的主要因素;在水平管段,重力方向与管道轴向垂直,导致混油浓度在 径向分布不对称,而在竖直管段,重力方向与管道径向垂直,密度大的油品在上方时,混油量相对较大;在弯头及其 后面直管内流速分布发生较大变化,高速区发生偏移,致使混油增强,混油前峰形状发生变化并且后行油品在径向 的高含量区发生偏移。

Numerical simulation on contaminated oil characteristics in bend pipe of batch pipelining of cold and hot crude oils

WU Yu-guo^{1,2}, CHEN Bao-dong², LI Xiao-ling², WANG Wei-qiang²

(1. College of Storage & Transportation and Architectural Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;
 2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: According to the process of batch pipelining of cold and hot crude oils, a mathematical model for contaminated oil of batch pipelining of cold and hot crude oils was established based on current contamination theory. And the mathematical model was numerically solved by finite volume method. The characteristics of contaminated oil in vertical bend pipe were numerically simulated and analyzed. The results show that the change of the angle between gravity direction and pipe's axial direction and the change of velocity distribution are the main factors influencing the characteristics of contaminated oil in vertical bend pipe. In horizontal straight pipe section, gravity direction is vertical to axial direction, which leads to the asymmetric distribution of contaminated oil volume is relatively large when the heavy oil is on the upper side. At bend and in the straight pipe after the bend, velocity distribution changes a lot and the high velocity area migrates. It leads to more contaminated oil, and the change of the shape of contaminated oil front and the migration of high concentration of posterior oil in the radial direction.

Key words: batch pipelining of cold and hot crude oils; contaminated oil; bend pipe; finite volume method; numerical simulation

中国进口原油逐年增多,由于进口原油油品物 性较好,可实现常温输送,而国产原油凝点较高,需 要加热输送,为了不影响炼制加工品的品质,对不同 种类的原油应分储分输,因此国产原油与进口原油 的顺序输送是一个冷热原油交替输送的过程^[1-2]。 这一过程会带来一系列的问题,如混油、交变温度 场、管道疲劳寿命等。管道横截面流速分布不均匀 的对流和紊流扩散作用是形成沿程混油的重要原

收稿日期:2009-12-08

基金项目:辽宁省教育厅项目(2009R37)

作者简介:吴玉国(1977-),男(汉族),辽宁葫芦岛人,讲师,博士研究生,从事油气储运技术及设备研究工作。

因^[34]。笔者针对冷热原油顺序输送工艺,建立冷热 原油顺序输送混油计算的数学模型,采用有限容积 法进行数值求解,并对竖直弯管工况下的混油特性 进行分析。

1 数学模型及其求解

为减少混油损失,顺序输送管道在紊流流态下运行。对该紊流计算采用雷诺时均法得到冷热原油顺序输送混油计算的时均控制方程组^[5-7]为

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0.$$
 (1)

Reynolds 方程:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u}_i)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right).$$
(2)

质量输运方程:

$$\frac{\partial(\rho\bar{c})}{\partial t} + \sum_{j} \frac{\partial(\rho\bar{u}_{j}\bar{c})}{\partial x_{j}} = \sum_{j} \frac{\partial}{\partial x_{j}} \Big[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial(\rho\bar{c})}{\partial x_{j}} - \overline{\rho u'_{i}c'} \Big].$$
(3)

$$\frac{\partial E \equiv \mathcal{J} \notin \Xi}{\partial t} + \sum_{j} \frac{\partial (\rho \overline{u}_{i} \overline{T})}{\partial x_{j}} = \sum_{j} \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[k \frac{\partial (\overline{T})}{\partial x_{j}} - c_{p} (\overline{\rho u'_{i} T'}) \right] + \overline{S_{T}}.$$
(4)

式中, x_i , x_j 为空间坐标, $m;\bar{u}_i$, \bar{u}_j 为空间时均速度分量, $m/s;u'_i$, u'_j 为脉动速度分量, $m/s;\rho$ 为密度, kg/m³;p为压力,Pa; μ 为层流动力黏度,Pa·s; c',\bar{c} 分别为后行油品的脉动浓度和体积时均浓度; T',\bar{T} 分别为脉动温度和时均温度,K;Pr为层流普朗特数; c_p 为比定压热容,J/(kg·K);k为流体的传热系数,W/(m²·K)。

紊流模型采用
$$k - \varepsilon$$
 模型。 k 方程为
 $\rho \Big[\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \Big] = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[\Big(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \Big) \frac{\partial k}{\partial x_j} \Big] + \mu_i \Big(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \Big) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon.$ (5)
 ε 方程为

$$\rho \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + C_1 \mu_i \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}.$$
(6)

在模型中,通过紊流黏性系数和紊流扩散系数的概念,将 Reynolds 应力项、脉动质量通量项和脉

动温度项分别与时均速度、时均浓度和时均温度联 系起来,即

$$-\overline{u'_{i}u'_{j}} = \frac{\mu_{t}}{\rho} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}.$$
(7)

$$-\overline{u'_{i}c'} = \Gamma_{t} \frac{\partial c}{\partial x_{i}}, \qquad (8)$$

$$-\overline{u'_{i}T'} = \Gamma_{t} \frac{\partial T}{\partial x_{i}}.$$
(9)

其中,紊流黏性系数 μ_{ι} 和紊流扩散系数 Γ_{ι} 按如下方法计算:

$$\mu_{t} = c_{\mu}\rho k^{2}/\varepsilon, \ \Gamma_{t} = \mu_{t}/\sigma_{t}.$$

式(5)~(9)即为冷热原油顺序输送混油浓度 $k - \varepsilon$ 紊流模型。

模型中 c_{μ} , C_1 , C_2 , σ_k , σ_s , σ_1 分别为 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3, 0.9。

PHOENICS 软件的控制方程是由连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程组成的^[8],可统一写为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \operatorname{div}(\rho u\phi - \Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi}.$$
(10)

式中, ϕ 表示所求解的变量,如焓、温度、速度、电势 和质量等; ρ 为密度,kg/m³;u为对应方向的速度, m/s; Γ_{ϕ} 为对流项; S_{ϕ} 为源项;t为时间,s。

在划分计算区域时采用交错网格系统,用于在 流场计算中检测不合理的压力场。采用有限容积法 来实现控制方程的离散化,数值求解方法采用 SIMPLEST 算法,这种方法对流项采用绝对稳定的 迎风格式,由迎风差分引起的假扩散问题,采取逐步 加密网格以获取与网格稀密程度无关的解加以克 服^[5]。扩散项采用线迭代而对流项采用点迭代,这 种混合式的计算方法有利于促进强烈非线性问题的 迭代过程收敛。对于所有边界条件均采用附加源项 法进行处理^[4]。

顺序输送的两种原油为进口俄罗斯原油和国产 大庆原油(以下简称俄油和庆油)。两种原油油样的 物性可由文献[3]查得。由于油品界面处,冷热原油 间进行传热,混油温度不断变化,混油的物性随着温 度的变化而变化。对混油特性影响较大的密度和黏 度两个物性参数进行了计算,经过计算和数据处理 确定了两种油样关于温度的密度和黏度计算公式。

庆油密度公式为 $\rho_1 = 860.7 - 0.69318(\theta - 20),$ 俄油密度公式为 $\rho_1 = 885.2 - 0.72132(\theta - 20).$ 式中, θ 为油品温度, \mathbb{C} ; ρ_1 为该温度下油品的密度, kg/m³。

庆油动力黏度为

 $\ln \mu = -43.0186 + 12613.1168/T,$

俄油动力黏度为

 $\ln \mu = -16.9625 + 3741.4698/T.$

式中,T为油品温度,K; μ 为该温度下油品的动力黏度, $Pa \cdot s_{\circ}$

混油段截面密度变化遵循比例相加规律,即混 油段密度为每种油品浓度与其密度乘积之和,

 $\rho_{\rm m} = C_{\rm b}\rho_{\rm b} + (1 - C_{\rm b})\rho_{\rm a}.$

式中, ρ_a , ρ_b , ρ_m 分别为 a 油、b 油和混油的密度; C_a , C_b 分别为 a 油和 b 油的浓度。

混油黏度采用双对数模型^[3]进行计算,即

 $lglg \mu_{m} = C_{b} lglg \mu_{b} + (1 - C_{b}) lglg \mu_{a}.$ 式中, μ_{a} , μ_{b} , μ_{m} 分别为 a 油、 b 油和混油的动力黏度, Pa · s_o

2 模拟计算结果及其分析

采用 PHOENICS 软件建模并进行混油特性数 值模拟计算。弯管模型如图 1(a)所示。两水平直 管段长度均为5 m,竖直管段长度为5 m,管道直径 为0.5 m。计算区域为 11.5 m×0.5 m×7 m,计算 网格数为 96×20×96,弯头处温度场和速度场变化 剧烈,因此对网格进行了加密处理,如图 1(b)所示。

初始条件:管内充满前行油品且达到稳定状态。

边界条件:壁面无滑移,入口流体速度为1 m/s,出口设置为自由出口。

2.1 水平管段1

图2所示的是输送后行油品3s之后,水平管 段内混油浓度变化情况。对于工况1,由于前行的 俄油密度较大,重力作用方向与管道轴向垂直,导致 在混油段重油"下沉",使整个混油段混油浓度在径 向呈不对称分布。越靠近混油头,这种不对称分布 越明显,形成后行油品"上浮"的楔形插入前行油品 之势。在水平管段的横截面后行油品的浓度在径向 的最大值出现在中心线之上。图 3 为水平管段不同 截面径向的浓度分布情况。从图 3 中可以看出,5 个横截面处后行油品的浓度最大值均出现在径向位 置 z = 0.4 m 附近,浓度值分别为 0.934,0.728, 0.463,0.248,0.126。对于工况2,密度较大的后行 俄油,在重力作用下的"下沉"使得同一截面后行油 品浓度峰值位置向下偏移。在流经第一个水平直管 段时,工况3,工况4分别与工况1,工况2的情况相 似。

> 图 2 各工况管内混油可视化图(t=3 s) Fig. 2 Visual diagram of contaminated oil under different working conditions (t=3 s)

图1 弯管模型和计算网格

Fig. 1 Bend pipe model and computational grid

俄油输送温度为20℃,庆油输送温度为60℃。 分4种工况进行模拟计算。

(1) 工况1: 俄油前行, 竖直管段上行;

(2) 工况 2: 俄油后行, 竖直管段上行;

(3) 工况3: 俄油前行, 竖直管段下行;

(4) 工况 4: 俄油后行, 竖直管段下行。

以下按混油段流经不同位置分3个阶段对弯管 混油特性数值计算结果进行分析。 图 3 工况 1 水平管段不同截面径向浓度分布 Fig. 3 Radial concentration distribution at different cross sections in horizontal pipe under working condition 1

2.2 竖直管段

图 4 为混油段经过弯管进入竖直管段的可视化 过程。图 5 为竖直管段不同高度径向浓度分布。油 品流经弯管后速度分布发生很大变化,图 6(a)所示 为后行油品进入管道 8 s 后, y = 0.25 截面处,流速 分布情况,图 6(b),(c)为不同横截面处的流速分 布及对应的浓度分布情况。由于弯管处横截面的流 速分布更加不均匀,导致混油进一步增强。对于工况1,在第一个弯管处,内侧流速大,加之先前直管段浓度分布的不均匀,导致在弯头处及靠近弯头的竖直管段后行油品的的浓度径向分布极其不均匀,且不对称,靠左侧管壁处浓度大。在竖直管段,重力作用方向与管道径向垂直,不会象水平管段那样密度较大的俄油在重力作用下在管道径向"下沉"而导致混油浓度在径向分布的不对称。但是,在竖直管段的流速分布不对称,使得经过弯管后,高流速区向右侧管壁方向偏移,有混油前峰向右侧管壁方向偏移,有混油前峰向右侧管壁方向偏移,有混油前峰向右侧管壁方向偏移,有混油前峰向右侧管壁方向

图 4 各工况管内混油可视化图(t=8 s)

Fig. 4 Visual diagram of contaminated oil under different working conditions(t = 8 s)

图5 工况1竖直管段不同高度径向浓度分布(*t*=8 s) Fig.5 Radial concentration distribution at different cross sections in vertical pipe under working condition 1(*t*=8 s) 不断向右侧偏移。图5所示为竖直管段不同高度横 截面后行油品径向的浓度最大值位置随着竖直高度 的增加不断向右移动,即向管壁方向偏移。取得最 大浓度的径向位置分别为*x*=5.5,5.65,5.75, 5.77,5.82 m,对应的浓度分别为0.855,0.675, 0.470,0.275,0.132。另外,在管壁处,受管壁的附 着力和重力作用影响,且前行油品密度较大,使得后 行油品嵌入前行油品形成的混油前峰形状变得越来 越尖。对于工况2,在第一个弯管处,内侧流速大, 后行油品容易嵌入前行油品,而另一方面,在重力作 用下,较重油品有"下沉"倾向,两方面的作用使得

图 6 工况 1 数值计算结果(t=8 s)

Fig. 6 Numerical results under working condition 1(t = 8 s)弯头处后行油品浓度在管道径向分布接近对称。在 水平管段时,重力作用使得混油前峰向下方管壁偏 移,而在竖直管段,一方面重力方向垂直于管道径 向,在扩散作用下,使得混油前峰向管中心偏移,另 一方面流速分布不均匀,靠右侧管壁处速度大,在此 形成楔形油头。从而,渐渐形成了图4中所示的混 油"双前峰"的情形。随着油流继续上行,高流速区 管中心转移,混油前峰又向"单峰"过渡。与工况1 不同的是,工况2中后行油品密度大,因而形成的混 油段比较短,混油前峰形状也不如工况1那样尖。 对于工况3,弯头处与工况2在流经第一个弯头时 的情况相似,即在竖直管段,高流速区紧靠左侧管 壁,前峰不断向左侧管壁偏移。对于工况4,在流经 第一个弯头时,情况与工况1相似,后行油品浓度在 径向分布不对称,在弯头内侧浓度很大。进入竖直 管段,重力与轴向相同,加之竖直管段高流速区向左 侧管壁偏移,使得混油前峰不断向左侧管壁偏移。 工况4与工况3相比,由于密度较小的后行油品在 上面,相对而言不容易楔入到前行油品中。

2.3 水平管段2

图7为油流经过第二个弯管后重新进入水平直 管段的混油可视化过程。在此阶段,重力作用方向 与管道的轴向垂直。对于工况1,较重的前行油品 "下沉",较轻的后行油品"上浮"从靠近上侧管壁处 嵌入前行油品,而且油流刚离开弯管时,高流速区略 向上侧偏移,因而混油前峰逐渐向上方管壁偏移。 图8显示了水平管段2轴向5个不同位置后行油品 径向浓度分布情况。径向浓度最大值分别出现在*z* =6.51,7,7,7,6.9 m,最大浓度分别为0.607, 0.470,0.366,0.268,0.166。对于工况2,经过第二 个弯管后,高流速区向上偏移以及重力作用导致的 重油"下沉"综合作用结果是,混油前峰在径向基本 对称分布。当然,离开弯头的距离增大时,高流速区 会恢复到管子的中心,在重力作用下,混油前峰向下 偏移。流经第二个弯管后,工况3的情形和工况2 相似,工况4与工况1相似。

图 7 各工况管内混油可视化图(t = 14 s) Fig. 7 Visual diagram of contaminated oil under different working conditions(t = 14 s)

图8 工况1水平管段不同截面径向浓度分布(t=14 s)

Fig. 8 Radial concentration distribution at different cross sections in horizontal pipe under working condition 1 (t = 14 s)

3 结 论

(1)竖直弯管弯头前后重力作用方向与管道轴向的角度发生变化。在水平管段,重力方向与管道轴向垂直,导致混油浓度在径向分布不对称;在竖直管段,重力方向与管道径向垂直,重力作用使得密度大的油品在上方时混油量相对较大。

(2)在弯头及其后面直管内流速分布发生较大 变化,高速区发生偏移,致使混油增强,混油前峰形

(上接第124页)

- [12] HOSCHEK J. Circular splines [J]. Computer-Aided Design, 1992,24(11):611-618.
- [13] MEEK D S, WALTON D J. Approximation of discrete data by G1 arc splines [J]. Computer-Aided Design, 1992,24(6):301-306.

状发生变化并且后行油品在径向的高浓度区发生偏 移。

参考文献:

- [1] 王凯,张劲军,宇波. 冷热原油交替顺序输送中加热时 机的经济比选[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(5):102-107.
 WANG Kai, ZHANG Jin-jun, YU Bo. Optimal heating ratio of batch pipelining of cold and hot crude oils[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(5):102-107.
- [2] 鹿广辉,张冬敏,于达,等. 冷热原油交替输送的传 热过程研究[J]. 油气储运,2007,26(4):14-16. LU Guang-hui, ZHANG Dong-min, YU Da, et al. Study on the heat transfer process of alternating transportation of cold and hot crude oils[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007,26(4):14-16.
- [3] 杨筱蘅. 输油管道设计与管理[M]. 东营:中国石油大 学出版社,2006: 120-303.
- [4] 赵会军.成品油管道顺序输送特性研究[D].东营: 中国石油大学储运与建筑工程学院,2008.
 ZHAO Hui-jun. Study on the characteristics of batch transportation of multi-product pipeline[D]. Dongying: College of Storage & Transportation and Architectural Engineering, China University of Petroleum, 2008.
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2版. 西安:西安交通大学 出版社,2001: 332-409.
- [6] 吴子牛. 计算流体力学[M]. 北京:科学出版社, 2001:70-76.
- [7] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政,等,译. 北京:科学出版社, 1984:12-17.
- [8] 魏淑惠. 偏心环空流场的 CFD 模拟[D]. 大庆:大庆石 油学院 计算机与信息技术学院计算机科学技术系, 2007.

WEI Shu-hui. CFD numerical simulation of flow field of eccentric annulus [D]. Daqing: School of Computer & Information Technology, Daqing Petroleum Institute, 2007.

(编辑 沈玉英)

- [14] SCHONHERR J. Smooth biarc curves [J]. Computer-Aided Design, 1993,25(6):365-370.
- [15] LIU Zhong, ZHOU Yun-fei, LI Pei-gen, et al. A novel approach to solve the FMS formation problem[J]. CAD-DM, 2001,11(2):15-21.

(编辑 沈玉英)