

顺序输送混油过程的二维数值分析

夏增艳 刘青泉¹⁾

(中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 采用二维对流扩散模型对成品油顺序输送中的混油问题进行了数值模拟研究, 运用目前求解对流扩散方程比较有效的两步法, 对层流态和湍流态顺序输送的混油段流动分别进行了数值计算, 分析了层流态和湍流态下的顺序输送规律, 表明湍流态输送比层流态输送的混油量要小, 并得到了混油截面平均浓度随时间的变化特点, 以及湍流扩散系数对混油浓度的影响规律.

关键词 顺序输送, 成品油管道, 混油, 数值模拟

中图分类号: TE83 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)06-013-06

NUMERICAL SIMULATION OF THE CONTAMINATION BETWEEN BATCHES IN MUTI-PRODUCT PIPELINE TRANSPORT

XIA Zengyan LIU Qingquan¹⁾

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

Abstract The transport of different petroleum products through a single pipeline is known as batch transfer, which is the most common method in product transportation. A certain amount of mixing between products is called interface contamination. In order to ensure the quality of the products being transported, the mixing volume and the position of the mixing zone should be accurately predicted. This paper estimates the mixing volumes by using a two-dimensional model of convection-diffusion equation, which is solved by a two step method to obtain numerical solutions in laminar flow and turbulent flow, as a comparatively effective method. The results show that the mixing volume in turbulent flow is smaller than that in laminar flow, the distribution of the mean concentration in the cross section changes with time, and the diffusion coefficient influences the mixing volume in turbulent flow.

Key words batching transport, products pipeline, contamination, numerical simulation

引言

成品油作为一种重要能源在国民经济建设中起着举足轻重的作用. 鉴于每种成品油的输送量都很有限, 若单独为其铺设一条输油管道, 不仅线路工程量大, 投资增加, 而且管线的管道直径也相对较小, 使输油成本上升. 采用顺序输送多种油品的工艺, 把流向相同的几种油品沿同一条管道输送则能获得较高的经济效益. 因此, 成品油的输送通常都采用顺序输送^[1-2], 即在同一条管道上, 按一定顺序连续地输送几种油品^[3].

管道顺序输送过程中除了初始混油、过站混油、停输混油、意外混油外, 正常输送条件下, 沿程混油是最主要的^[3]. 在一条顺序输送管道中, 油品之间不采用隔离技术, 不同牌号的油品之间必然形成相互间的混油段. 各混油段因密度和黏度的差异将导致混油段间的能耗不同, 而且随着油品的流动, 管内不同牌号油品的比例也将不断发生变化, 因此, 顺序输送管道模拟难度和复杂性高于单介质管道.

沿程混油的产生主要是对流和扩散传递^[3]. 两种油品在管道内交替时, 流态对混油量有很大影响,

2009-04-20 收到第 1 稿, 2009-07-30 收到修改稿.

1) 刘青泉, 男, 博士, 研究员. 主要从事环境流体力学领域的研究工作. E-mail: qqiu@imech.ac.cn

流态不同其混油机理也不同。一般在层流或者湍流强度不大情况下，管道截面上流速分布不均匀造成的对流传递是沿程混油的主要原因，后行油品的楔形油头逐渐突入到前行油品中，这种情况下混油量有时会大得惊人。湍流情况时，管道截面上的流速相对均匀，对流传递不显著，扩散传递过程成为影响混油的主要原因。合理、准确地分析和预测不同流动状态下的混油过程一直是成品油顺序输送中关心的焦点问题。

因此，本文针对管道顺序输送中的混油问题，采用二维数值计算方法^[4-5]，模拟分析层流态和湍流态下，不同雷诺数时输运相同距离产生的混油量，并进行相互比较分析，探讨混油截面平均浓度随时间的变化特点，以及湍流扩散系数对混油浓度的影响规律，总结不同流动状态下的顺序输送规律，以期为生产实践提供科学依据。

1 管道顺序输送的二维模型

1.1 控制方程

管道中的顺序输送混油问题是典型的一种对流传散过程。通常采用不可压流动的对流传散方程来描述，其在柱坐标系下的对流传散方程形式为^[6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中， C 为前行油品 A 的体积浓度； x 为轴向坐标； r 为径向坐标； θ 为周向坐标； u 为沿管道轴线 x 方向的流速分量； v_r, v_θ 分别为管道径向和周向速度分量； D 为综合扩散系数； t 为时间。

对于有压管道流，通常可以将流动简化为二维轴对称流，即有 $v_r = v_\theta = 0, \partial C / \partial \theta = 0$ ，则方程 (1) 被简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

对于成品油顺序输送，其初始条件为

$$\left. \begin{aligned} t = 0, x = 0, & C = C_0 = 0.5 \\ t = 0, x > 0, & C = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

及边界条件为

$$\left. \begin{aligned} t > 0, x = 0, & C = 0 \\ t \geq 0, x \rightarrow +\infty, & C = 1 \\ t \geq 0, \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

C_0 为前行油品 A 切换成油品 B 时，油品 A 的相对体积浓度； R 为输油管内半径。

有压管道中的断面流速分布已有很多成熟的研究结果^[6-7]。对于管道内充分发展的湍流，一般可以将速度分布分 3 个区域：(1) 壁面附近的层流底层区，动量传递主要依靠分子扩散传递；(2) 湍流核心区，位于离壁面一定距离处，动量传递主要靠湍流紊乱扩散，分子扩散可以忽略；(3) 缓冲层，位于两者之间的过渡区，分子扩散和湍流紊乱扩散均需考虑。通常可以以无因次距离参数 y^+ 为依据划分 3 个区域^[6]

$$\left. \begin{aligned} u^+ = y^+, & y^+ < 5 \\ u^+ = 5.0 \ln y^+ - 3.05, & 5 < y^+ < 30 \\ u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5, & y^+ > 30 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， $y^+ = u_* y / \nu$ 为无量纲距离， y 表示某点距离管壁的距离， u_* 为摩擦速度， $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ ， τ_0 管道壁面的切应力， \bar{u} 为沿管道轴线 x 方向的流速平均值， $\tau_0 = 0.125 \lambda \rho \bar{u}^2$ ^[9]， $\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$ ^[3]。其中 ρ 为流体的密度， λ 为摩阻系数； Re 为雷诺数。 ν 为流体运动黏度。

在层流底层 ($0 < y^+ < 5$)，流动属于层流状态，其速度分布可采用下式表示

$$u = y \tau_0 / \mu \quad (6)$$

其中， μ 为动力黏度。在层流底层内，物质的扩散机理是分子扩散，其扩散系数为一常数， $D = D_L$ (分子扩散系数)，则二维对流传散方程可以简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] \quad (7)$$

此式与管道层流时的方程相同。

在缓冲层 ($5 < y^+ < 30$)，属于层流与湍流的过渡区，速度分布可表示为^[5]

$$u = \sqrt{\tau_0 / \rho} \left[-3.05 + 5 \ln \left(\frac{y \sqrt{\tau_0 / \rho}}{\nu} \right) \right] \quad (8)$$

在此区内，既要考虑分子扩散又要考虑湍流紊乱扩散，因此，综合扩散系数为分子扩散系数和紊乱扩

散系数之和, 即

$$D_b = D_t + D_L = \frac{(R-r)\sqrt{\tau_0/\rho}}{5} - \nu + D_L \quad (9)$$

则, 缓冲层的二维对流扩散方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D_b \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] + \\ &\frac{1}{r} \left[\frac{(R-2r)\sqrt{\tau_0/\rho}}{5} - \nu + D_L \right] \frac{\partial C}{\partial r} \end{aligned} \quad (10)$$

在湍流核心区 ($y^+ > 30$), 流速分布可表示为^[5]

$$u = \sqrt{\tau_0/\rho} \left[5.5 + 2.5 \ln \left(\frac{y\sqrt{\tau_0/\rho}}{\nu} \right) \right] \quad (11)$$

在该区, 分子扩散可以忽略, 综合扩散系数即为紊流扩散系数, 可表达为

$$D_c = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}r(R-r)}{2.5R} \quad (12)$$

则, 湍流核心区的二维对流扩散方程变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D_c \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] - \\ &\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}(-2R+3r)}{2.5R} \frac{\partial C}{\partial r} \end{aligned} \quad (13)$$

1.2 方程的离散求解

如图 1 所示坐标轴, 沿轴向 x , 径向 r 以及时间 t 的步长分别为 Δx , Δr , Δt , 并分别用节点 i, j, n 表示. 对流扩散方程 (7), (10), (13) 均属于对流占优的方程. 对于对流占优的扩散方程, 在数学上广泛使用的是两步法求解^[1,8], 其基本思想是, 在前半时间步 $[n\Delta t, (n+0.5)\Delta t]$ 用特征线方法求解纯对流方程; 在后半时间步 $[(n+0.5)\Delta t, (n+1)\Delta t]$ 用有限差分法求解纯扩散方程.

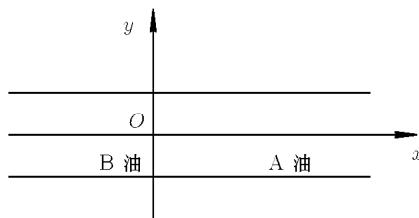


图 1 坐标轴示意图

其中, 纯对流方程及其相应的初始条件可表达为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial C_1}{\partial t} + u \frac{\partial C_1}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$x \in [0, +\infty)$, $r \in [0, R)$, $t \in [n\Delta t, (n+0.5)\Delta t]$

$$C_1(x, r, n\Delta t) = C(x, r, n\Delta t) \quad (15)$$

而纯扩散方程及其相应的初始条件可表达为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial C_2}{\partial t} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} \right] \quad (16)$$

$x \in [0, +\infty)$, $r \in [0, R)$, $t \in [(n+0.5)\Delta t, (n+1)\Delta t]$:

$$\left. \begin{aligned} C_2(x, r, (n+0.5)\Delta t) &= C_1(x, r, (n+0.5)\Delta t) \\ C(x, r, (n+1)\Delta t) &= C_2(x, r, (n+1)\Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

对纯扩散方程离散时, 在层流底层采用显示格式, 在缓冲层和湍流核心区采用隐式差分法, 以保证格式的稳定性. 在层流底层, 式 (16) 中的时间偏导数采用向前差商, 对 x 及 r 的偏导数则采用中心差商, 并采用显示格式. 该差分格式的稳定性条件为

$$\frac{D_L \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{D_L \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (18)$$

对于边界, 在 $r = R$ 处, 需考虑壁面的非渗透性. 对于层流底层和缓冲层的交界点, 以及缓冲层和湍流核心区的交界点, 速度 u 和扩散系数 D 在交界点分别属于不同的两个区域, 通过单独建立节点浓度平衡方程式处理. 在 $r = 0$ 处, 为避免出现奇异现象, 可采用直角坐标形式的对流扩散方程求解^[4]

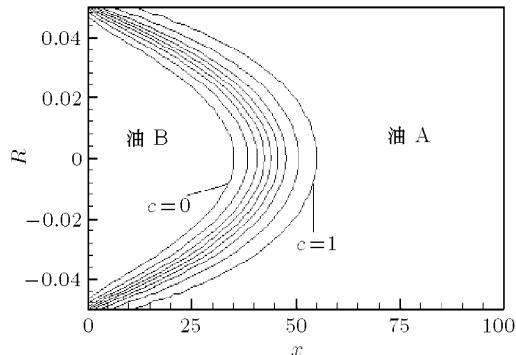
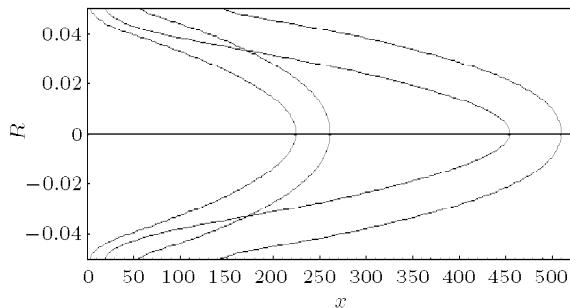
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_c \frac{\partial C}{\partial x} = D_c \left(\frac{\partial C^2}{\partial x^2} + \frac{\partial C^2}{\partial y^2} + \frac{\partial C^2}{\partial r^2} \right) \quad (19)$$

式中, u_c 为管中心流速, D_c 为管道中心附近综合扩散系数, 可近似为常量.

2 计算结果及其分析

2.1 层流态情况

假设一长 $L = 520$ m, 半径 $R = 0.05$ m 的管道, 油的黏性系数为 $\nu = 6 \times 10^{-6}$ m²/s, 初始平均流速 $u_0 = 0.09$ m/s, 雷诺数 $Re = 1500$, 管道流态为层流状态. 并依据经验, 取 $D_L = 1 \times 10^{-8}$ m²/s, 取轴向节点数为 $J_x = 260$, 径向节点数 $J_r = 20$ 进行模拟计算. 层流态流速分布为 $u = 2u_0[1 - (r/R)^2]$, u_0 表示管道截面平均流速. 当 $t = 30 \times 8$ s 时候, 油品的浓度分布如图 2 所示. 计算结果表明, 层流态输送情况下, 有非常明显的后行油品的楔形油头突入前行油品中. 图 3 所示为 $t = 170 \times 8$ s, $t = 340 \times 8$ s 时的混油浓度分布计算结果, 清楚地说明, 随着输油时间的增长, 后行油品的楔形油头突入前行油品更加显著.

图 2 层流 $t = 240$ s 时浓度分布图 3 $t = 170 \times 8$ s 和 $t = 340 \times 8$ s 时的浓度分布

改变输油流速, $u_0 = 0.045 \text{ m/s}$, $Re = 750$. 图 4 是 $j = 2$ 的情况下, $t = 100 \times 8 \text{ s}$ 和 $t = 600 \times 8 \text{ s}$ 时混油浓度和长度沿管道变化的计算结果. 不难看出, 当管内流速一定时, 混油段内任一截面上的油品浓度与该截面至起始接触面的距离 x 以及油品的输送时间 t 有关系. 距起始接触面越远, 输送时间越长, 混油段长度越大.

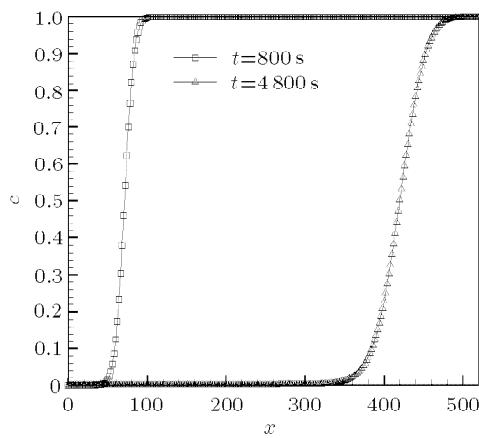
图 4 $j = 2$, $t = 100 \times 8$ s 和 $t = 600 \times 8$ s 浓度分布

图 5 表示两种不同流速情况下到达同一位置时的浓度分布对比情况, 即在 $i = 10$ 的位置, $Re = 1500$ 情况下 $t = 100 \times 8 \text{ s}$ 和 $Re = 750$ 情况下 $t = 200 \times 8 \text{ s}$ 时的浓度分布对比. 两种情况下, 对

流项推进的距离相同. 由于层流状态水平对流比径向扩散大得多, 所以对流项作用明显, 整个流场的浓度分布与速度抛面一致. 对于不同的输送流速, 只要推进的距离相同, 截面浓度分布差异很小, 表明层流态输送过程中, 扩散项的作用很小. 当然, 在管壁附近, 还是有稍大的差异.

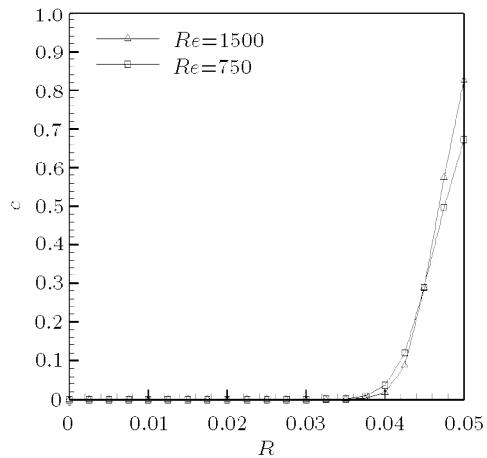
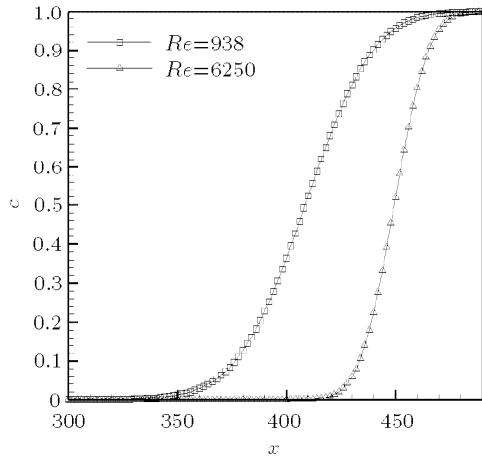


图 5 对流项推进相同的距离时浓度分布

2.2 湍流态情况

取管道长度 $L = 520 \text{ m}$, 半径 $R = 0.0625 \text{ m}$, 所输油品黏性系数 $\nu = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 轴向节点数为 $Jx = 260$, 径向节点数 $Jr = 40$. 图 6 为两种不同流速(层流和湍流)情况下顺序输送的混油情况计算结果, 即 $Re = 938$ 条件下 $j = 2$, $t = 580 \times 8 \text{ s}$ 时和 $Re = 6250$ 条件下 $j = 2$, $t = 150 \times 8 \text{ s}$ 时的混油段浓度分布情况(选择这两个时间是由于此时 A 油浓度为 1 的起始节点都出现在 $x = 490$ 处). 可见, 湍流态输送较层流状态下的顺序输送, 其混油段要小得多. 说明湍流态下输送油品由于湍流脉动扩散强

图 6 $j = 2$ 处层流态和湍流态下的浓度分布长度

烈, 导致截面浓度混合均匀, 使得混油段的长度比层流态下短很多, 所以在成品油顺序输送过程中, 工程上一般应要求在湍流状态下进行输送。

在均为湍流输送的情况下, 取不同的输送流速, 即不同的雷诺数, 分析其混油过程, 图 7 为湍流态不同雷诺数下 $j = 2$ 时的混油浓度分布计算结果。显然, 雷诺数越高, 混油段越短, 表明湍流径向扩散能力越强。这一结果也告诉我们, 一般在高流速下进行顺序输送更为有利。

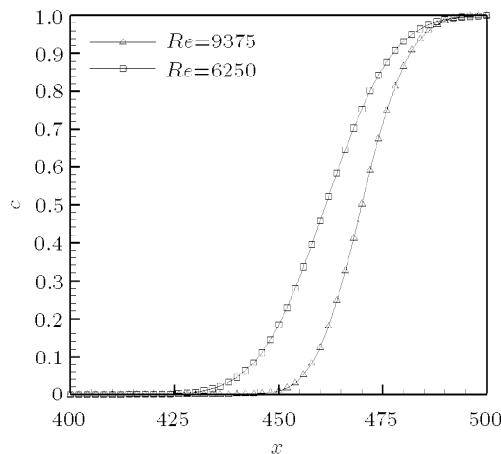


图 7 $j = 2$ 湍流态下混油长度比较

图 8 给出了湍流态下 ($Re = 6250$, $D_L = 1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), 不同时刻, 油品截面平均浓度随时间的变化过程, 可以看出, 截面平均浓度的油头比较短, 油尾比较长, 这与实际是相符合的。在管道顺序输送中, 随着时间的增加, 混油段逐渐变长。也就是说, 在同样的输送速度下, 输送距离越长, 产生的混油段也越长。图 9 为对于不同分子扩散系数 ($D_L = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $D_L = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) 的湍流情况下的浓度分布轮廓线, 可见分子扩散系数的不同, 影响了层流底

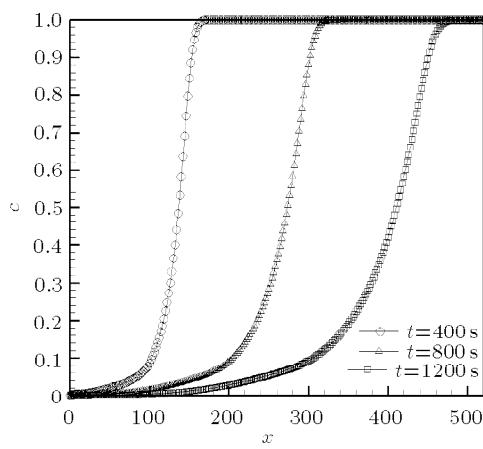


图 8 油品浓度随时间的变化关系

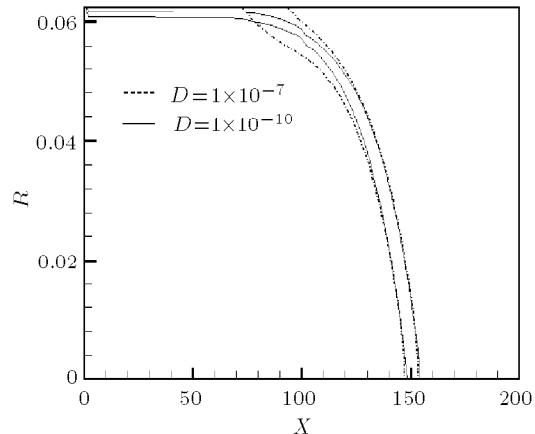


图 9 不同分子扩散系数浓度分布图

层和缓冲层的浓度分布, 但对于核心区基本上没有什么影响, 因为核心区的湍流扩散率远大于分子扩散系数; 同时分子扩散系数越大, 靠近壁面的轮廓越宽, 油品的混合部分分布的空间越广。因此, 混油段长度主要取决于输送速度、流态, 以及流动的湍动强度。

3 结 论

本文采用二维数值计算方法对管道顺序输送的混油段特征进行了模拟研究。在采用的二维模型中, 管道断面流速分布采用已有的研究成果, 并根据不同的流动特征, 将其分为 3 个不同区域, 分别得到其对流扩散模型。分别对层流态和湍流态两种不同流动状态下顺序输送中的混油过程和规律进行了模拟计算和对比分析, 得到了不同输送情况下的混油段浓度分布情况, 并得到如下主要结论:

- (1) 顺序输送中混油段的长度主要取决于流动的速度、流态, 以及流动的湍动扩散强度等。
- (2) 层流态下输送, 有非常明显的后行油品的楔形油头突入前行油品中, 混油段明显较湍流态下输送的混油段要长得多。因此, 在成品油顺序输送过程中, 工程上一般应要求在湍流状态下进行输送。
- (3) 同样在湍流态下输送, 雷诺数越高, 即输送速度越大, 混油段越短。这一结果也表明, 一般在高流速下进行顺序输送更为有利。

参 考 文 献

- 1 陆金甫. 对流占优扩散问题的特征线法——差分法计算格式. *计算物理*, 1989, 6(4): 486-493 (Lu Jinfu. Numerical schemes of the characteristics—difference method for convection-dominated diffusion problems. *Chinese Journal of Computation Physics*, 1989, 6(4): 486-493 (in Chinese))
- 2 M.B. 卢里耶等. 成品油顺序输送最优化. 石油工业出版社, 1989
- 3 杨筱衡. 输油管道设计与管理. 山东: 中国石油大学出版社,

2006

- 4 邓松圣, 蒲家宁. 对流扩散方程在成品油顺序输送混油分析中的应用. 应用数学和力学, 1997, 19(8): 707-714 (Deng Songsheng, Pu Jianing. Application of convection-diffusion equation to the analyses of contamination between batches in multi-products pipeline transport. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1997, 19(8): 707-714 (in Chinese))
- 5 邓松圣, 蒲家宁. 成品油顺序输送二维和一维混油模型比较. 油气储运, 1997, 16(1): 16-24 (Deng Songsheng, Pu Jianing. The comparison of mixing models of two-D and one-D

- products batching. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 1997, 16(1): 16-24 (in Chinese))
- 6 周光炯, 严宗毅等. 流体力学. 北京: 高等教育出版社, 2002
- 7 张兆顺. 流体力学. 北京: 清华大学出版社, 1999.2
- 8 吴江航, 孙毓平. 数值求解对流占优问题的分步解析方法. 中国科学 A 辑, 1989, 32(9): 957-964 (Wu Jianghang, Sun Yuping. Step-analytical method for numerical solving convection-dominated problems. *Science in China, Ser. A*, 1989, 32(9): 957-964 (in Chinese))
- 9 袁恩熙. 工程流体力学. 北京: 石油工业出版社, 1986

(责任编辑: 刘俊丽)