

文章编号: 1673- 9620 (2007) 01- 0041- 04

# 大落差顺序输送管道混油 PHOENICS 模拟研究<sup>\*</sup>

赵会军<sup>1,2</sup>, 张青松<sup>1</sup>, 张国忠<sup>2</sup>, 周诗崇<sup>1</sup>, 王树立<sup>1</sup>

(1 江苏工业学院 江苏省油气储运技术重点实验室, 江苏 常州 213016; 2 中国石油大学 (华东) 储运学院, 东营 257061)

**摘要:** 在  $k-\varepsilon$  紊流模型和使用壁面函数法处理近壁区问题的理论基础上, 提出了顺序输送混油新的模型, 并利用 PHOENICS 软件成功地对该数学模型进行了数值求解。分析了竖直管道顺序输送油品时, 密度和粘度差对混油的影响, 并给出了模拟结果。研究结果表明: 密度对大落差管道顺序输送过程中层流底层的影响, 比较明显, 不可忽略。研究结果对于研究我国西部地形复杂地区的顺序输送管道混油问题具有理论指导意义。

**关键词:** 落差; PHOENICS; 混油; 顺序输送; 管道

中图分类号: TE 832

文献标识码: A

## PHOENICS- Based Numerical Study of Concentration Distribution of Contamination on Elevation Difference Batch Pipeline

ZHAO Hui- jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing- song<sup>1</sup>, ZHANG Guo- zhong<sup>2</sup>, ZHOU Shi- dong<sup>1</sup>, WANG Shu- li<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China; 2. College of Transport & Civil Engineering in the China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** The new model of contamination on the- turbulent model and the wall function that is used to predict problems near the wall has been proposed. Numerical simulation for this model has been investigated with the help of PHOENICS. The effects of density and viscosity differences on contamination in erect pipeline are analyzed and the results are given. The study results showed that the effect of density on laminar bottom in elevation difference pipeline is distinct and can not be ignored. The study has a theoretical significance to research on contamination of batch pipeline in the hypsography area in East- China.

**Key words:** elevation difference; PHOENICS; contamination; batch transportation; pipeline

顺序输送管道中的油品交替, 在接触面处将产生一段混油<sup>[1]</sup>。由于输送油品的物性存在差异, 在倾斜管道顺序输送中, 密度差异对混油的形成将产生影响, 尤其是在事故性停输的情况下, 特别是在- 线路起伏, 高密度油品处于斜坡的上方、低密度油品处于斜坡的下方时可大大增加混油量。粘度差

对混油量的影响与输送油品的次序有关, 粘度小的油品后行时的混油量比其前行时的混油量多 10% ~ 15%<sup>[2]</sup>。在古比雪夫- 勃良斯克成品油管道上输送粘度相差近 9 倍的柴油和汽油时, 因输送次序不同产生的混油量差别可达 10%<sup>[3]</sup>。在我国的顺序输送试验中也发现, 油品交替时, 粘度小的油品代

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006- 05- 10

基金项目: 中国石油化工集团总公司基金资助 (X504007)

作者简介: 赵会军 (1965- ), 男, 河北保定人, 高级工程师。

替粘度大的油品所形成的混油长度大于次序相反时的混油长度，两者比值在 1.04~ 1.36，随流速和输送距离的变化而不同<sup>[4]</sup>。用与输送次序有关的公式估算对称浓度范围内的相对混油量，紊流时，密度差和粘度差对混油过程的影响与混油区内流速断面的变化有关，也与混油区和油流均质区流速分布的差异有关。本文利用 PHOENICS 计算流体力学软件模拟竖直管道顺序输送的混油特性，并对输送次序、上行、下行进行了模拟分析。研究结果对于研究我国西部地形复杂地区的顺序输送管道混油问题具有理论指导意义。

### 1 高差混油模型

对顺序输送管道，为减少混油损失，应使管道在紊流流态下运行。目前工程上，紊流计算中所采用的基本方法是雷诺时均法<sup>[5]</sup>。在该方法中，把瞬时速度、浓度等物理量表示成时均值与脉动值之和并代入相应的方程，再对该式作时均运算。由于所得的时均方程个数小于未知量的个数，而且不可能依靠进一步的时均处理而使控制方程封闭。因此，本文通过 Boussinesq 假设，引入脉动所造成的 Reynolds 应力及质量输运流率，最后利用 k-ε 两方程紊流模型，使研究方程组得到了封闭。高差混油模型时均方程组如下：

连续性方程：

$$\sum \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Reynolds 方程：

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \sum_j \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = & - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \\ \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_L \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \end{aligned} \tag{2}$$

质量输运方程：

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \sum_j \frac{\partial (u_j C)}{\partial x_j} = \\ \rho \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu_L}{Pr_t(C)} \frac{\partial C}{\partial x_j} - \overline{u_j C} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

紊流脉动所造成的应力：

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho k \frac{2 \zeta_{ij}}{3} \tag{4}$$

紊流脉动所造成的质量输运流率：

$$-\overline{\rho u_j C} = \frac{\nu_T}{Pr_t(C)} \frac{\partial C}{\partial x_j} \tag{5}$$

式中  $x_i, x_j$  表示空间坐标； $u_i, u_j$  表示空间时均速度分量； $u'_i, u'_j$  表示脉动速度分量； $\rho$  表示密度； $g_i$  表示质量力分量； $P$  表示压力； $Pr_t(C)$ 、 $Pr_t(C)$ ，分别是层流和紊流 Schmidt 数； $\nu_T, \nu_L$

是紊流和层流运动粘度； $C'$  是前行油品脉动浓度； $C$  为前行油品的分子浓度。 $k$  是紊流脉动动能； $\varepsilon$  紊流脉动动能耗散率。考虑到顺序输送过程的特点，本文选取用以确定紊流粘性系数的  $k-\varepsilon$  两方程紊流模型，其经验常数的取值见表 1。

表 1 k-ε 紊流模型经验常数

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_u$	$C_d$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_k$
1.15	1.9	1.0	0.24	0.547 8 0	164.3	1.15	0.75

### 2 模型求解

PHOENICS 主要应用于动力、化工、制冷、航空、核能等工业领域的流体流动与传热过程的数值模拟，是目前世界上最流行的计算流体力学的软件之一。本文采用 PHOENICS3.6 对以上方程进行了求解。该软件采用了 SIMPLEST 算法<sup>[6]</sup>。

#### 2.1 控制方程

PHOENICS 将质量守恒、动量守恒、能量守恒和其它守恒特性等控制方程统一为通用偏微分方程式，以此来描述流体的流动、传质传热、化学反应等物理现象。对高差紊流混油模型，通用控制方程的形式如下：

$$\frac{\partial (\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div} (\rho U \Phi - \Gamma_{\text{eff}} \text{grad} (\Phi)) = S_\Phi \tag{6}$$

式中  $\Phi$  为通用因变量，可代表浓度、速度、焓、单位质量的动量及紊流动能等； $S_\Phi$  表示源项； $U$  为速度分量； $\Gamma_{\text{eff}}$  为广义的扩散系数； $\rho$  为流体密度； $t$  表示时间。采用有限体积法对控制方程进行离散，其离散形式为：

$$a_P \Phi_P = a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_H \Phi_H + a_L \Phi_L + a_T \Phi_T + S_\Phi \tag{7}$$

这里  $\Phi$  代表变量，下标  $P, N, S, E, W, H, L$  表示该变量所处的位置如图 1 所示，下标  $T$  代表前时步时间的值， $a$  代表系数。

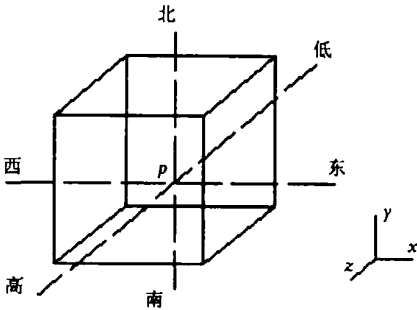


图 1 网格划分

## 2 2 边界条件

PHOENICS 软件对于边界条件的处理采用附加源项法<sup>[6]</sup>。在进行顺序输送混油段浓度模拟时, 最主要的边界条件为入口, 设置了两个入口 IN1、IN2, 用时间先后区别它们, 以得到先后输送两种油品的目的。出口, 规定为自由出口, 物理量的条件可按坐标局部单向化方式处理, 既不规定任何边界条件。管道壁面均为固体壁面, 采用壁面函数法处理。

## 2 3 物性参数的设置

### 2 3 1 混油密度<sup>[7]</sup>

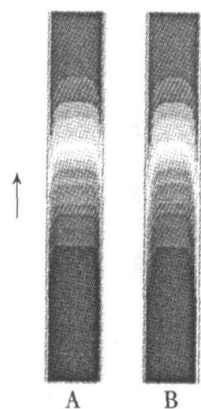
混油段截面密度变化遵循简单的比例相加规律, 即混油段密度为每种油品体积分数与其密度乘积之和  $\rho_m = C_A \rho_A + (1 - C_A) \rho_B$  式中:  $\rho_A$ 、 $\rho_B$ 、 $\rho_m$  分别为 A 油品、B 油品和混油的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_A$  为 A 油品的分子浓度。

### 2 3 2 混油粘度<sup>[7]</sup>

混油粘度不可以用简单的组份比例计算, 但其组份仍接近于线性关系。公式如下:  $\nu_m = a_A C_A \nu_A + a_B (1 - C_A) \nu_B$ , 式中:  $\nu_A$ 、 $\nu_B$ 、 $\nu_m$  分别为 A 油品、B 油品和混油的运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $a_A$ 、 $a_B$  为待定因数。

## 3 算例分析

内径为 500 mm 的成品油管道顺序输送两种油品, 93# 汽油与 0# 柴油, 流速为 2 m/s, 竖直段长度为 10 m。前行油品充满管道并达到稳定情况下, 开始输送第二种油品。即作为输送第二种油品的初始条件。沿竖直管道向上流动时, 混油情况与混油段浓度分布如图 2、图 3 所示。



A 先行汽油后行柴油 B 先行柴油后行汽油

图 2 竖直向上输送油品的混油情况

Fig 2 The distribution of concentration (flow- up)

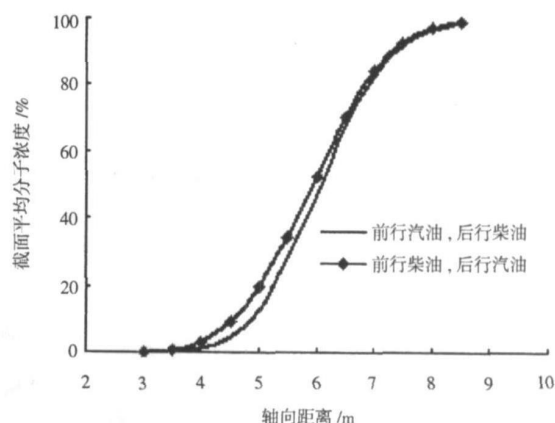


图 3 输送次序对混油段浓度分布影响 (向上流动)

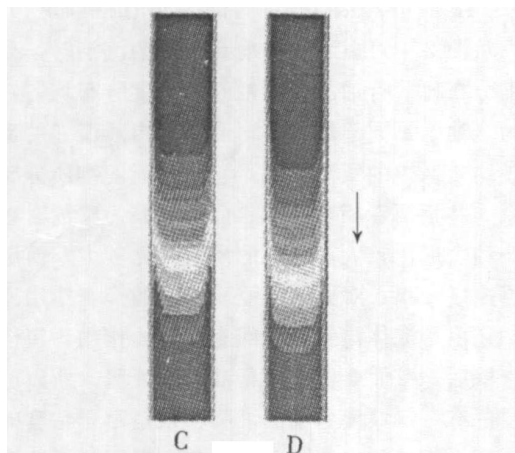
Fig 3 The effect of transporting order (flow- up)

从图 2 中可以看出, 前行油品为汽油时, 截面浓度分布比前行油品为柴油时的浓度分布均匀, 是因为混油区不同于均质区, 混油区内紊流强度也不同于均质区内的紊流强度, 它与油流的物质分布有关系, 并且两者相互影响。前行油品为柴油时, 由于柴油密度比较大, 受到的质量力比较大, 而层流底层速度较小, 对柴油所受质量力的抑制作用比较小, 还由于流体与管壁之间有附着力作用, 流体流过管壁后, 壁面会留有前行油品的液膜。所以层流底层留有一定厚度的柴油液膜不仅是由于粘度的影响, 还由于截面速度分布不均匀, 层流底层速度比较小, 紊流脉动强度比较小, 密度差影响此时比较显著, 这几个方面共同作用的结果。

从图 2 中还可以看出柴油前行时, 有柴油混油区尾。这是因为: 两种油品顺序输送时, 后行油品会楔入前行油品中去, 在楔入的过程中, 管内表面会有前行油品的液膜, 这液膜将随混油流动而被冲走。在相同的输送条件下, 粘度小的油品在管壁上附着的油层比较薄。当前行油品密度比较大时, 由于层流底层脉动强度小, 所以此时油品所受质量力在层流底层所起作用也比较明显。减弱了后行油品对前行油品壁面液膜的冲刷。因此形成了柴油浓度不很大的混油区“尾”。而前行油品为汽油时, 液膜可以认为在层流层的混油浓度和核心层浓度相同, 汽油膜瞬间冲掉。正如图 3 所示的混油段浓度分布情况, 前行油品密度比较大时, 形成混油区长度相对于前行密度不太大的油品混油区长度长的缘故。沿竖直管道向下流动时, 混油情况与混油段浓度分布如图 4、图 5 所示。

前行柴油, 后行汽油, 此时粘度对边界层的影响相同。对比图 4 中 C 与图 2 中 B, 可以发现上行

时, 有较长的混油尾, 密度在层流边界层的影响大于粘度的影响。这是因为竖直顺序输送油品时, 油品必将受到重力作用, 而此时所受重力影响也是最大, 对于下行, 若密度大的油品所处的地势高于密度小的油品, 因此密度大的后行油品受到重力势能较大, 会很容易地楔入前行油品中去, 混油界面也会全体向前移动, 这个现象从图 4 中可以得到证实。对比图 2 与图 4, 还可以发现无论采用上行或者下行进行顺序输送, 汽油在前, 柴油在后, 截面浓度分布总比柴油在前, 汽油在后较均匀。边界层对紊流核心区的影响也相对较小, 边界层内浓度梯度较大。



C 前行柴油后行汽油 D 前行汽油后行柴油

图 4 竖直向下输送油品的混油情况

Fig 4 The distribution of concentration (flow- down)

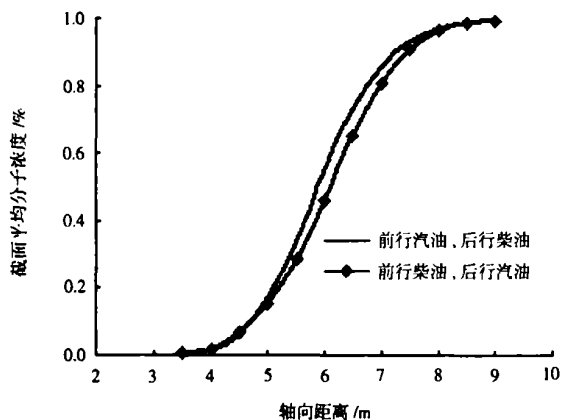


图 5 输送次序对混油段浓度分布影响 (向下流动)

Fig 5 The effect of transporting order (flow- down)

总之在管道高差很大的情况下顺序输送油品时, 密度对混油的影响是不可忽视的, 特别对于速度比较小, 紊流强度比较弱的层流边界层, 影响更加明显。

## 4 结束语

(1) 混油尾的形成是许多因素共同作用的结果, 并不仅仅是粘度差的影响。在落差较大的管道中进行顺序输送, 密度差对层流边界层的影响会表现的比较明显且大于粘度差的影响。

(2) 算例分析表明: 对于汽柴油顺序输送, 上坡段时, 前行柴油所形成的混油长度比前行汽油所形成的混油长度长; 而对于下坡段管道, 前行汽油所形成混油长度比前行油品为柴油长。因此不能一概而论地认为在顺序输送过程中, 前行油品粘度比后行油品粘度小, 所形成的混油段长度一定短。这也是对以往的概念补充与完善。

(3) 无论竖直上行还是下行进行油品顺序输送, 汽油在前, 柴油在后, 截面浓度分布总比柴油在前, 汽油在后较均匀。边界层对紊流核心区的影响也相对较小, 边界层内浓度梯度较大。

## 参考文献:

- [1] 康正凌, 宫敬, 严大凡. 管道顺序输送高差混油研究 [J]. 石油学报, 2003, 24 (4): 94- 98
- [2] 严大凡. 输油管道设计与管理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986 225- 236
- [3] [苏] 卢里耶 M B 成品油顺序输送最优化 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989 125- 135
- [4] 康正凌, 宫敬, 严大凡. 成品油管道输送高差混油模型研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (6), 65- 67
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002 337- 350
- [6] 任洪娟, 刘爱萍. 基于 PHOENICS 螺旋翅片管的数值研究 [J]. 山东理工大学学报, 2004, 18 (6): 31- 34
- [7] 蒋仕章, 蒲家宁. 管道顺序输送混油粘度的计算与分析 [J]. 管道技术与设备, 2003, (3): 39- 41