PHOENICS数值模拟顺序输送管道混油浓度

张青松[1,2], 王 宏[1], 陆焱洪[1]

(1. 瑞吉格泰油气工程有限公司, 江苏 无锡 214072;
2. 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)

摘 要: 建立了顺序输送混油紊流模型, 利用 PHOENICS软件对它进行了模拟计算, 通过算例分析了批次对混油浓度的影响。结果表明前行油品粘度小所形成的混油段长度比前行油品粘度大时长, 截面浓度分布也相对较均匀的结论, 与工程现象完全吻合。验证了顺序输送混油紊流模型能真实反映顺序输送管内混油浓度分布情况和该紊流模型的正确性。证明了使用一些较为成熟的流体力学软件进行计算机模拟能够为顺序输送混油机理的研究提供一个较为准确而便利的手段。

关键词: 顺序输送; 混油; 数值模拟; PHOENICS

文章编号: 1006-5093(2007)03-0013-03 文献标识码: A

0 前言

在同一条管道内, 按一定顺序连续地输送几种油品, 这种输送方法称为顺序输送。在顺序输送过程中, 由于油品沿管道运动, 油品质点沿管道内壁的移动速度比中心部分慢, 因而使后面的油品呈楔形进入前面的油品中去。同时紊流扩散破坏了这个楔形, 使不同类的油品混合, 在一定程度上使油品沿截面均匀分布[1~4]。这段混油不符合产品质量指标, 造成了一定的混油损失。因此计算两种油品在交界面处产生的混油量与混油界面位置确定, 对混油界面的切割和管道终点油库的设计极为重要。目前, 混油量计算公式研究方法一般可分为两类: 一类是理论公式, 另一类是经验公式。理论公式是基于轴向伸展与径(轴)向扩散建立的一维或二维对流扩散方程, 经过简化得到的; 经验公式是在大量实验和生产数据的基础上经过理论分析而得到的, 通常采用的是 Austin-Palfrey混油计算公式。但由于影响混油的因素很多, 混油界面在管道内的运动又十分复杂, 这些公式在使用时都有一定的局限性, 如输送次序、一些管件、阀件、高差等的影响在经验公式中都没有考虑。因此本文基于 PHOENICS流体模拟计算软件, 结合顺序输送过程中混油的特点建立了混油模型, 并借助这个模型分析了输送次序对混油浓度的影响。旨在为顺序输送混油的研究提供了一种便利的手段。

1 顺序输送紊流模型

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[5]。为了使研究方程封闭, 本文采用了 Boussinesq假设, 把紊流脉动值附加项与时均值联系起来。通过选择紊流模型最终使方程组封闭。忽略了浮升力影响, 非稳态的油品顺序输送混油的紊流数学模型如下:

连续性方程:

$$\sum \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

动量方程(N—S方程):

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho\sum_j \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho\sum_j \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho g_i \qquad (2)$$

组分方程:

$$\rho\frac{\partial c}{\partial t} + \rho\sum_j \frac{\partial(u_i c)}{\partial x_j} = \rho\sum_j \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu_L}{Pr(c)} + \frac{\mu_T}{Prt(c)}\right)\frac{\partial c}{\partial x_j}\right] \qquad (3)$$

收稿日期: 2006-08-03
基金项目: 中石化集团公司项目(X504007)
作者简介: 张青松(1982-), 男, 江苏淮安人, 在读硕士, 主要从事油气储存与运输研究。电话: 15961879978

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

紊流流动的 K—ε 双方程：

$$\rho\frac{\partial(u_i K)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}\frac{\partial K}{\partial x_i}\right)+G-\rho\varepsilon \quad (4)$$

$$\rho\frac{\partial(u_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_1\frac{\varepsilon}{K}G-C_2\frac{\varepsilon^2}{K} \quad (5)$$

式中：$G=\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial u_i}\right)$；$\mu_{eff}=\mu_t+\mu$；$\mu_t=\rho C_\mu\frac{K^2}{\varepsilon}$；ρ为油品密度；$u_i$、$u_j$为油品速度；$x_i$、$x_j$表示距离；P为压力；Prt(C)为紊流 Schmid数；Prl(C)为层流 Schmid数；μ，μ_l为紊流和层流运动粘度；t为时间；g_i为重力加速度；C为前行油品的体积浓度；K为紊流脉动动能；ε为紊流脉动动能耗散率。对于(K—ε)双方程模型中 5个常数采用 Launder和 Spalding的推荐值，$C_1=1.44$，$C_2=1.92$，$C_\mu=0.09$，$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.3$。

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。本文采用最新版 PHOENICS3.6对以上方程进行了求解。该软件采用了 SIMPLEST算法。在这种算法中扩散项采用线迭代而对流项采用点迭代，可以防止迭代过程发散。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，适合于管内传质问题的计算。

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[6]。对顺序输送紊流混油模型，通用控制方程的形式如下：

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

式中：Φ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_Φ表示源项，对不能纳入非稳态项，对流项与扩散项的一律纳入源项中处理，如这里的重力项；U为速度矢量；$\Gamma_{\Phi,\,eff}$为广义的扩散系数；ρ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：

$$a_P\Phi_P=a_N\Phi_N+a_S\Phi_S+a_E\Phi_E+a_W\Phi_W+a_H\Phi_H+a_L\Phi_L+a_T\Phi_T+S_\Phi \quad (7)$$

这里的Φ代表变量，下标 P，E，W，N，S，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。

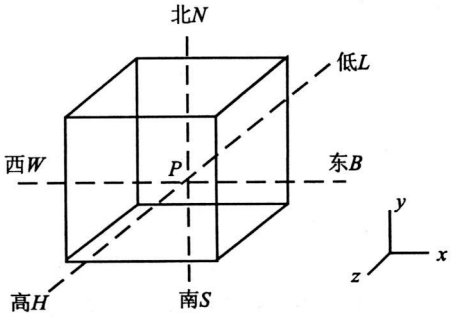

图 1 网络划分

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。将边界上的未知量从方程组中消去，并在邻近边界的节点方程中添加。附加源项的统一形式为：

$$S_\Phi=C_P(V_P-P_P)(V_\Phi-\Phi_P)+C_\Phi(V_\Phi-\Phi_P) \quad (8)$$

式中：C_P为外界与边界邻点上的质量流量系数；V_P为边界上的压力；P_P为边界邻点压力；C_Φ为边界条件化为附加源项式的相应系数；V_Φ为边界上变量Φ；Φ_P为边界邻点上变量Φ的值。对于有质量流入和流出的边界，忽略扩散项，取 $C_\Phi=0$，对于固体壁面条件，只考虑扩散项，取 $C_P=0$。

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 N1和 N2，用时间先后区别它们，这样得到了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，即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

对于单相流体流动，由于物性是常数，所以一般可以直接在前处理界面 VR中进行设置，而油品顺序输送混油段的物性参数由于它随各组分比例的不同而不同，需利用 PHOENICS中的 plant或 inform进行设置。

2.3.1 密度设置

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[7]：

$$\rho=C_B\rho_B+(1-C_B)\rho_A \quad (9)$$

式中：ρ_A，ρ_B，ρ分别为 A油品，B油品和混油的密度，kg/m³；C_B为 B油品的体积分数。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3.2　粘度设置

混油粘度不可以用简单的组分比例计算，但其组分仍接近于线性关系[7]。公式如下：

$$v = a_B C_v V_B + a_A (1 - C_B) v_A \qquad (10)$$

式中：v_A、v_B、v分别为 A油品，B油品和混油的运动粘度，m^2/s；a_A，a_B为待定因数。

3　算例分析

管长 20 m，内径为 500 mm的成品油管道中，油品流速为 1 m/s，当 93#汽油前行，0#柴油后行，初始混油界面前进 10 m时的混油情况如图 2所示。0#柴油前行，93#汽油后行，混油情况如图 3所示。输送次序对混油的影响浓度曲线如图 4所示。

图 2　汽油前行，柴油后行

图 3　柴油前行，汽油后行

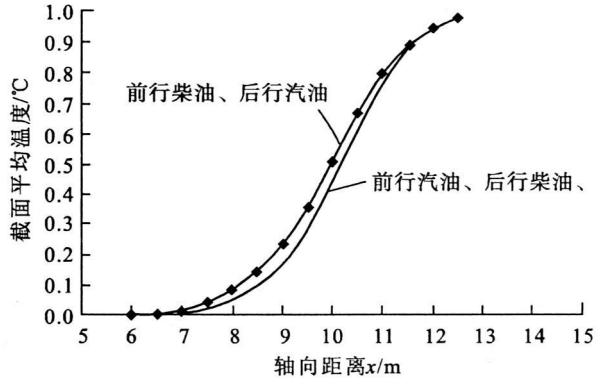

图 4　顺序输送次序对混油的影响

对图 2中可发现在混油段的任一截面上浓度分布比较均匀，在管壁附近，浓度梯度较大，是因为液流沿管道运动时，液体质点沿管道内壁面的移动速度比中心部分慢，因而使后行油品会楔入前行油品中去。同时紊流扩散过程破坏了这个楔形，使不同类的油品混合，在一定程度上使油品沿管道截面均匀分布。同时在紊流状态下，紊流扩散比分子扩散大得多，强劲的紊流径向扩散，使液体质点发生剧烈的横向交换，中部速度较快的油品把边缘滞后的油品迅速带走，大大缩短混油段长度。

从图 4中可以发现前行油品汽油时，混油长度比前行油品为柴油时形成的混油段长度短些。是因为在两种油品顺序输送过程中，后行油品在楔入前行的油品过程中，在管内表面会留有前行油品的液膜，这液膜将随混油流动而被冲走。又因为在相同的输送条件下，粘度小的油品在管壁上附着的油层薄，所以前行油品为汽油时，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。而前行油品是柴油时，由于在紊流中混油区中部浓度变化相当快，所以前行油品的膜差不多要到混油区的一半通过所选截面之后才被冲刷掉。因此形成了柴油浓度不很大的混油区“尾”。比较图 2与图 3也能直观地发现这个现象。

图 4中的两条曲线对比，还可以看出在紊流状态下，混油段相对于 50%浓度的混油界面是不对称的。因此产生混油浓度非对称分布的原因，除了初始混油、后行油品对前行油品的冲刷等因素外，管横截面速度分布的不均匀性对混油浓度非对称分布的影响也是比较显著的。

4　结束语

建立了顺序输送混油紊流模型，并借助计算流体力学软件 PHOENICS对它进行了求解。通过算例分析输送次序的不同对混油的影响，验证了这个混油模型是可靠的、正确的。对于影响混油的其他一些因素（如高差、管径、温度等等）也完全可以借助这个模型来进行分析，并可以设定多种因素同时考虑，找出其中规律。从而为混油的检测和切割处理提供依据和帮助。它对顺序输送的管理调度、减少混油损失也具有重要意义。

参考文献：

[1]　康正凌，宫　敬．管道顺序输送的混油研究[J]．油气储运，2002，21(5)：1-4，44.
[2]　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.
[3]　董红星，姜任秋．瞬态分子扩散传质过程中质量迁移特性理论研究[J]．哈尔滨工程大学学报，1995，16(3)：88-94.
[4]　蒲家宁．管道顺序输送混油分析中的若干问题[J]．油气储运，2000，19(12)：18-21.
[5]　陶文铨．数值传热学（第 2版）[M]．西安：西安交通大学出版社，1988，333-370.
[6]　严良文，王志文．折流板换热器的数值模拟及协同分析[J]，石油机械，2005，33(4)：13-15.
[7]　蒋仕章，蒲家宁．成品油顺序输送时混油粘度的计算与误差分析[J]．油气储运，2003，22(2)：16-19.

a　　www