

成品油盲支管和阀腔对混油影响的数值研究

朱婷婷 李顺利 张大同

中国航空国际建设投资有限公司, 北京 100120

[摘要] 顺序输送是成品油管道的主要运行方式, 输送过程中前后两种油品将产生混油现象, 混油的存在会影响油品的品质, 造成经济损失。影响混油的因素众多, 此文主要采用数值模拟的方法, 研究了盲支管和阀腔这两种结构对混油的影响, 这两种结构的共同特点是, 其均具有一个半封闭的腔体结构, 可能会存在一部分“死油区”。此文分析了盲管直径和长度对盲管内半封闭区域内“前行油”被“后行油”主流携带走的规律, 及其对混油量的影响; 分析了阀门通径和主管道流速, 对阀门中半封闭区域内“前行油”被“后行油”主流携带走的规律, 及其对混油量的影响。本研究对成品油顺序输送管道的设计和运行具有一定的指导意义。

[关键词] 成品油管道; 顺序输送; 盲支管; 阀腔

DOI: 10.33142/ec.v5i3.5510

中图分类号: TE9

文献标识码: A

Numerical Study on the Influence of Product Oil Blind Branch Pipe and Valve Cavity on Oil Mixing

ZHU Tingting, LI Shunli, ZHANG Datong

China Aviation International Construction and Investment Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract: Sequential transportation is the main operation mode of product oil pipeline. In the process of transportation, the two kinds of oil products will be mixed. The existence of mixed oil will affect the quality of oil products and cause economic losses. There are many factors affecting oil mixing. This paper mainly uses the method of numerical simulation to study the influence of blind branch pipe and valve cavity on oil mixing. The common feature of these two structures is that they both have a semi closed cavity structure, and there may be a part of "dead oil area". This paper analyzes the influence of the diameter and length of the blind pipe on the law that the "forward oil" is carried away by the "backward oil" mainstream in the semi closed area inside the blind pipe, and its influence on the amount of oil mixing; The influence of valve diameter and main pipeline velocity on the law of "forward oil" being carried away by the mainstream of "backward oil" in the semi closed area of the valve and its influence on the amount of oil mixing are analyzed. This study has certain guiding significance for the design and operation of product oil sequential transmission pipeline.

Keywords: product oil pipeline; sequential conveying; blind branch pipe; valve chamber

引言

我国的石化资源主要分布在西部和东北地区, 资源和经济发达地区存在空间差异。成品油管道是将航空煤油、汽油、柴油等从生产地运送至消费地的主要方式之一, 其具有效率高、运输能力大、连续性高、费用低、以及有利于环境和生态保护等优越性, 符合国家环保、经济的主题。与原油管道不同, 由于成品油种类繁多、下游用户的需求也不同, 因此根据各个地区的需求, 多种油品通常按照一定的批量和次序, 以一定油品顺序进行连续地输送, 这一工艺通常称为顺序输送或交替输送^[1]。

成品油顺序输送的过程中, 受到油品输送顺序、流速、地形、管道尺寸和局部部件等多种不同因素的影响, 使得相邻油品之间相互掺混, 产生大量混油。混油的存在影响油品的品质, 无法作为合格油品直接销售, 造成很大的经济损失。深入全面地掌握成品油混油规律, 有利于减少混油量, 提高经济效益, 对顺序输送管道的设计和运行管理具有重要意义。因此, 研究人员开展了一系列相关研究。

在实验研究方面, 早在 1945 年, 壳牌石油公司就开展了顺序输送研究, 并且通过对实验数据的统计, 总结得

到用于计算汽油-柴油混油长度的 Birge 经验公式^[2]; 1964 年 Austin 和 Palfrey 通过大量的实验^[3], 综合考虑了摩擦项、流态等因素, 提出了目前公认精度最高的 Austin 混油计算公式。在这一公式的基础上, 陈庆勋^[4]考虑了经过分输点和变径点时雷诺数的变化会导致混油量的增加, 提出了当量长度的概念并对 Austin 公式进行了修正, 扩大了 Austin 公式的适用范围。宫敬等^[5]对实际管道运行数据与 Austin 公式的计算结果进行了对比分析, 考虑初始混油, 过站混油以及变径管对混油量的影响, 提出了更加符合管道特性的混油计算公式。何国玺^[6]通过实验环道风险了顺序输送中的拖尾现象, 并在此基础上提出了一种新的模拟混合段的浓度分布的模型。

实验方法所需成本高, 且对于混油问题采集数据困难, 难以细致的探究混油变化规律。而数值模拟方法具有运用范围广、成本低的优点, 可运用于求解复杂流动问题。因此, 通过数值模拟研究成品油管道混油的影响因素, 可以对实验研究形成有效的补充。成品油管道混油数值模型, 主要包含了一维和 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模型。

在一维模型中^[7-9], 其假定速度、浓度只沿管道方向

有变化,在管道径向均匀分布,然后根据质量守恒和 Fick 扩散定律得到浓度分布的解析关联式,也可以与实验数据相结合获得半经验和半解析公式。一维模型具有求解难度较小,计算速度较高等优点,故工程上常用一维模型对混油进行近似计算。但是一维模型在建模的过程中对混油过程做了较大简化,计算误差较大。

相比于一维模型,混油计算的二维和三维模型,无法获得解析解,需要采用 CFD 的方法进行求解,因此统一将其称为 CFD 模型。其中,二维模型通常将管内区域视为轴对称的区域,并且将管内的紊流分为层流底层、缓冲层和紊流核心区,通过对流动方程和扩散方程的求解实现混油的模拟^[10]。近年来,由于计算流体力学发展迅速,可以直接将湍流模型,引入到流动方程,再结合组分输运方程即可实现三维管道内,混油速度、浓度分布的计算,这一思路当然也可以用于二维模型中^[11]。

本文采用 CFD 模型,对成品油顺序输送管时,盲支管和阀腔内的速度、压力和浓度分布进行了模拟,分析了各参数对混油量的影响,可以为成品油管道的设计和运行提供技术参考。

1 数理模型

成品油顺序输送时,主要包含两个物理过程:一是,油品向前流动的过程;二是,不同油品间的组分扩散过程。因此,成品油顺序输送是一个典型的对流扩散过程,其控制方程包含了流动方程和组分输运方程,另外由于涉及到湍流,还需引入湍流模型:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2) Reynolds 式:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \overline{\rho u_i' u_j'}] \quad (2)$$

(3) 质量输运式:

$$\frac{\partial (\rho c)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial (\rho u_j c)}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} [\frac{\mu}{Pr_i(c)} \frac{\partial (\rho c)}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' c}] \quad (3)$$

式中: x_i, x_j ——x、y 方向的空间坐标, m;

u_i, u_j ——x、y 方向的时均速度分量, m/s;

u_i', u_j' ——x、y 方向的速度脉动分量, m/s;

g_i ——质量力矢量, N;

μ ——层流动力粘度, Pa·s;

c ——前行油品脉动浓度;

$Pr_i(c)$ ——层流 Schmidt 数。

在上式基础上结合 $k-\varepsilon$ 两式湍流模型即可实现成品油顺序输送的描述。本文采用了开源的 OpenFOAM 对相关方程进行了离散、求解和计算。

2 数值模拟结果分析

2.1 盲支管对混油的影响

成品油输送过程中,某些废弃副管等可能会形成图 1 所

示的盲支管。在这一类型的管道中,前行油品可能会储存在盲管中形成“死油区”,死油区会对混油产生持续的影响。

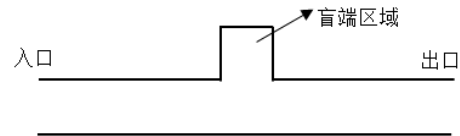


图 1 盲支管示意图

首先定性分析存在盲管时混油的规律。模拟工况为:管径为 200mm,主管长度为 10m,支管长度为 50cm;初始时刻前行油品(A 油)充满了整个管道,后行油品以 1m/s 的速度向前推进。图 2 给出存在盲管时后行油品的浓度分布,蓝色表示低浓度、红色表示高浓度。

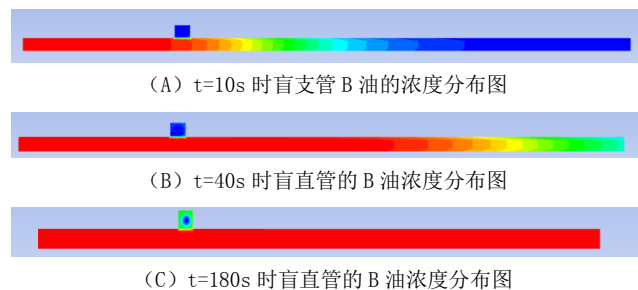


图 2 存在盲管时后行油品的浓度分布

从图中可以看出,混油段在后行油品进入的情况下,由于对流和扩散的综合作用,混油的长度随着时间的推进不断增加。但是,盲支管内部的流动非常弱,其与主流的质量交换主要依靠局部交界面的冲刷和扩散,因此当主管中无前行油品(A 油)时,盲管中仍然存在一部分 A 油,并且随着时间的推进,持续缓慢释放,对后行油品造成污染。下面定量分析盲管直径、盲管长度、盲管直径对盲管内前行油品释放过程的影响规律。

(1) 盲管直径对混油量的影响

当主管道管径为 273×5.6mm,主管道油品的流速为 1.5m/s,盲管长度为 2m 时,随着盲管直径的变化,主管道油品单位时间所能携带出的盲管中前行油品的量随着时间的变化如图 3 所示。

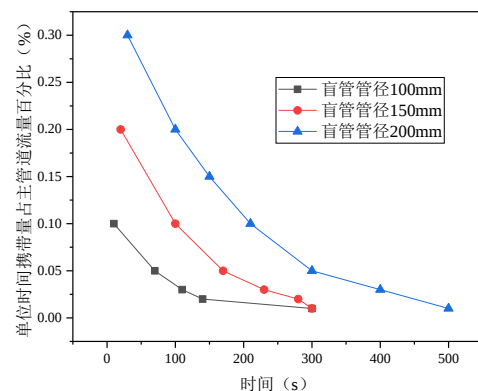


图 3 不同直径盲管中的前行油品被携带流量占主管道流量的体积分数

从图中可以看出,可以看出,单位时间内携带出的量,随着时间的推进逐渐减小,这主要是由于初始时刻主流携带的前行油品主要位于靠近主管和盲管交界面附近,随着时间的推移,前行油品与后行油品的界面逐渐延伸至盲管内部,将其携带出变得来愈加困难;对于内部较深出的前行油品,难以依赖对流的作用被冲刷出来,只能通过分子扩散的方式与后行油品缓慢掺混;随着盲管的直径增加,被携带出的前行油品质随之增加,主要原因是壁面对靠近壁面处的油品存在黏滞作用,大直径盲管中受到壁面黏滞作用的前行油品所占比例小,盲管中部大部分前行油品容易被携带,所以大直径盲管中前行油品被携带量更大。

(2) 盲管长度对混油量的影响

主管道管径为 $273 \times 5.6\text{mm}$, 主管道油品的流速为 1.5m/s , 盲管直径为 150mm 时, 随着盲管长度的变化, 主管道油品单位时间所能携带出的盲管中前行油品的量随时间的变化如图 4 所示。

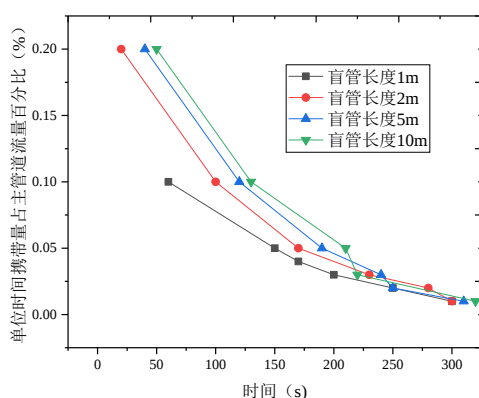


图 4 不同长度盲管中的前行油品被携带流量占主管道流量的体积分数

从图中可以看出,随着盲管长度的增加,盲管中被携带的前行油品质随之增加,但所需的携带时间与携带量成负相关。盲管长度增长,盲管中受壁面影响小的前行油品质增加,所以被携带的量随之增加。但随着盲管长度的增加,油品受到壁面黏滞作用增强,对流作用衰减更快,所需携带时间呈现出相反的规律。长度为 5m 和 10m 的盲端携带结果差别不大,说明在壁面黏滞作用下,盲端长度进一步增加,能被携带出的前行油品的量变化不大。

2.2 闸阀对混油的影响

闸阀是成品油管道中不可或缺的管件,当前行油品流经阀门时,不可避免的会有部分油品储存在阀腔中,从而对后行油品的纯净性产生影响。为了研究这一问题的规律,本文将闸阀抽象为如图 5 所示。

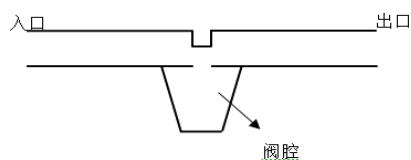
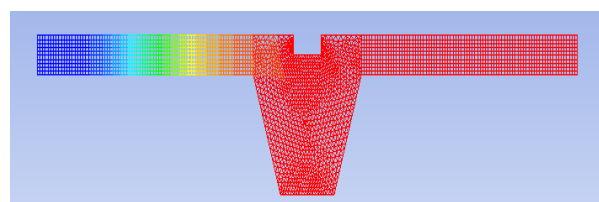
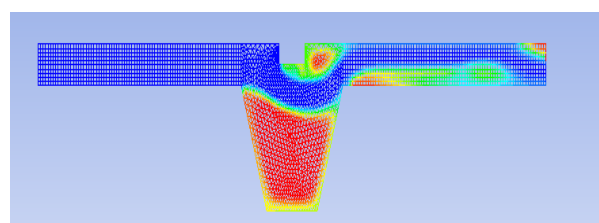


图 5 阀腔区域示意图

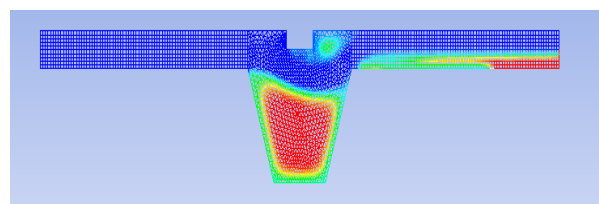
首先定性分析阀腔内前行油品被置换的规律。图 6 给出了阀体内后行油品浓度的变化过程,其中蓝色表示低浓度,红色表示高浓度。从图中可以看出,后行油品会逐渐将前行油品置换,但是由于阀腔是一个半封闭的空间,导致其内部存在大量的前行油品残留,需要较长时间才能置换掉。下面定量分析主管道后行油品流速和闸阀通径对混油量的影响。



(a) $t=1\text{s}$ 时阀门内的浓度分布图



(b) $t=7\text{s}$ 时阀门内的浓度分布图



(c) $t=10\text{s}$ 时阀门内的浓度分布图

图 6 阀门内部后行油品浓度分布

(1) 主管道后行油品流速对混油量的影响

当闸阀通径为 200mm , 阀门开度为 40% , 随着主管道油品流速的变化, 主管道油品所能携带出的阀腔区域中前行油品的量随时间的变化如图 7 所示。

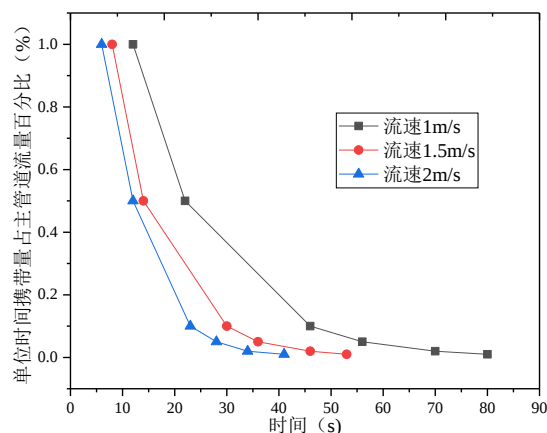


图 7 不同主管道流速下阀腔中前行油品被携带流量占主管道流量的体积分数

从图中可以看出,前行油品被携带走的流量随着时间的增加逐渐减小,根据其中蓝色的区域当流速为 2m/s 时携带流量在时间为 40s 时接近于 0 (为 0.01%),这意味着阀腔内的前行油品被全部携带走花费了 41s;当流速为 1.5m/s 时,阀腔内的流体被全部排出则需要 53s(见红色的曲线);当流速为 1m/s 时耗时为 80s。主要原因是,阀腔体积较小且长宽比差异不大,壁面对油品的黏滞作用不强,所以全部前行油品均被携带出。同时,流速越大,对应阀腔口处的流速越大。后行油品的携带能力增强,只需更短的时间便能携带出阀腔中所有的前行油品。

(2) 闸阀通径对混油量的影响

当主管道中油品的流速为 1.5m/s,阀门开度为 40% 时,随着阀门通径的变化,主管道油品所能累积携带出的阀腔区域中前行油品的量随时间的变化如图 8 所示。

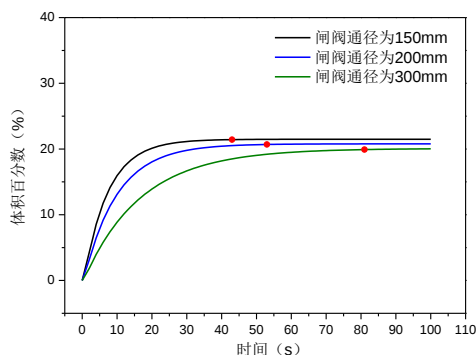


图 8 不同通径下阀腔中的前行油品累积被携带量占主管道流量的体积分数

从图 8 中可以看出,不同阀门通径下,阀腔内油品被携带的规律基本相同,且最终被携带走的总量非常接近。但是不同通径下,将阀腔内前行油品全部携带走花费的时间(图 8 中红点所对应的时间)不同,通径越小所耗费的时间越少。主要原因是,当流速相同时,小直径管道层流底层更薄,所以靠近阀腔口处的平均流速更大,对阀腔内前行油品的携带能力更强。所以小直径主管道中的后行油品携带出全部前行油品所需时间更短。

3 结论

本文采用数值模拟的方法研究了,盲支管和阀腔内所储存的“死油”,对混油的影响,具体结论如下:(1)由于盲管壁面黏滞作用,盲管中的前行油品无法被后行油品

完全携带出。盲管直径越大,盲管长度越短,主管道流速越大,主管道管径越小,盲管中前行油品被主管道后行油品携带出来的量越大;(2)由于闸阀腔体较小,阀腔中的前行油品可被主管道中的后行油品全部携带出来。主管道流速越大,通径越小所需的携带时间越短。

[参考文献]

- [1]杨筱蓓.输油管道设计与管理[M].东营:中国石油大学出版社,2011.
 - [2]梁翥章.国外成品油管道运行与管理[M].北京:石油工业出版社,2010.
 - [3]Patrachari A R,Johannes A H.A conceptual framework to model interfacial contamination in multiproduct petroleum pipelines[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(18):4613-4620.
 - [4]陈庆勋.成品油顺序输送分输和变管径混油量的计算[J].油气储运,1999,18(1):7-8.
 - [5]官敬,王琴,王卫东,等.成品油管道的混油计算方法研究[J].管道技术与设备,2013(1):1-3.
 - [6]何国玺.成品油管道输送过程混油特性及泄漏测算方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
 - [7]Hull D E,Kent J W.Radioactive tracers to mark interfaces and measure intermixing in pipelines[J].Industrial & Engineering Chemistry,1952,44(11):2745-2750.
 - [8]梁翥章.国外成品油管道运行与管理[M].北京:石油工业出版社,2010.
 - [9]Couto N C.Products separation in pipeline by using low-density foam pigs Final Report[C].Internal Report Petrobras-Petróleo Brasileiro SA:Cenpes Supep Diplot Seprot,1998.
 - [10]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[J].应用数学和力学,1998,19(8):707-714.
 - [11]赵海燕.顺序输送混油的 CFD 模拟[D].黑龙江:大庆石油学院,2010.
- 作者简介:朱婷婷(1989.4-)女,职称:助理工程师,专业方向:油气储运专业。