

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.01.03.01

文章编号: 1674-5086(2020)04-0155-10

中图分类号: TE832

文献标志码: A

成品油管道拖尾油形成机理研究

刘恩斌^{1*}, 李文胜¹, 蔡泓均^{1,2}, 谢萍³, 尚臣³

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 中国航空油料集团有限公司, 四川 成都 610200;
3. 中国石油西北联合管道有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830001

摘要: 拖尾油是混油的尾段。在成品油顺序输送过程中不可避免地会产生拖尾油, 而拖尾油会污染后行油品。在盲管段主要是由于死油区的前行油品混入主管而形成拖尾油。传统的混油量计算式没有考虑拖尾油的影响, 采用雷诺时均法对紊流进行模拟计算, 利用 CFD 对不同的流速及盲管长度的情况进行模拟得到混油相关实验数据, 模拟结果表明, 盲管中油品替换速度与流速呈指数关系, 为使混油量较小, 流速最好控制在 1.6 m/s 内。盲管长度与油品替换时间呈指数关系, 为减少混油量, 盲管长度应小于 5 倍主管管径。利用 MATLAB 对盲管段油品替换时间、盲管长度和流速进行多元非线性拟合, 得到盲管段所产生的拖尾油长度, 结合混油长度计算的 Austin-Palfery 式得到混油长度的计算修正公式。对比现场实际数据表明, 修正公式计算得到的混油量更加接近实际值。

关键词: 顺序输送; 拖尾油; 盲管; 混油量; 计算修正

Study on Formation Mechanism of Trailing Oil in Product Oil Pipeline

LIU Enbin^{1*}, LI Wensheng¹, CAI Hongjun^{1,2}, XIE Ping³, SHANG Chen³

1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China
2. China National Aviation Fuel Group Limited, Chengdu, Sichuan 610200, China
3. Northwest United Pipeline Co. Ltd., PetroChina, Urumqi, Xinjiang 830001, China

Abstract: Trailing oil is the tail section of contamination in oil pipelines. It is generated in batch transportation, and it has an effect on the quality of oil. In the dead-leg section, the main reasons for the formation of trailing oil contamination is the outflow of the preceding batch that remains in the dead-legs. The traditional calculation formula of oil mixing does not consider the influence of trailing oil. The Reynolds time-averaged method is used to simulate turbulence. To obtain contamination-related experimental data, Computational Fluid Dynamics (CFD) software is used to simulate different flow rates and bypass lengths. The oil replacement rate in a dead-leg is exponentially related to the flow speed and the length of the dead-leg is exponentially related to the replacement time of the oil. To reduce the amount of contamination, the main flow speed should be kept at about 1.6 m/s, and the length of the dead-leg should be less than five times the diameter of the main pipe. The MATLAB software was used to perform multi-nonlinear regression for the oil substitution time, the length of the dead-leg, and the flow speed to calculate the contamination length. A modified equation for calculating the length of the contamination was obtained by combining the Austin-Palfery equation with new factors. Using engineering data, the contamination predicted by the corrected equation is closer to the actual contamination than that predicted by other equations.

Keywords: batch transportation; trailing oil; dead-leg; contamination; modified equation

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.te.20200405.0956.002.html>

刘恩斌, 李文胜, 蔡泓均, 等. 成品油管道拖尾油形成机理研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 155-164.

LIU Enbin, LI Wensheng, CAI Hongjun, et al. Study on Formation Mechanism of Trailing Oil in Product Oil Pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(4): 155-164.

* 收稿日期: 2019-01-03 网络出版时间: 2020-04-08

通信作者: 刘恩斌, E-mail: sunriselebpb@163.com

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2019YJ0352); 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2019-11)

引言

成品油顺序输送过程中会产生混油,在切除混油时往往会忽略拖尾油对油品质量的影响,从而造成相当多的混油。拖尾油形成的原因主要有两种,一种是层流边界层的影响,另一种是死油段或管道起伏段滞留的前行油品。层流底层的传质过程制约着由黏度差异而导致的速度分布变化,进而影响前后两种油品间混油的形成^[1]。在顺序输送过程中,前行油品所形成的边界层会慢慢掺混进后行油品,形成拖尾油。

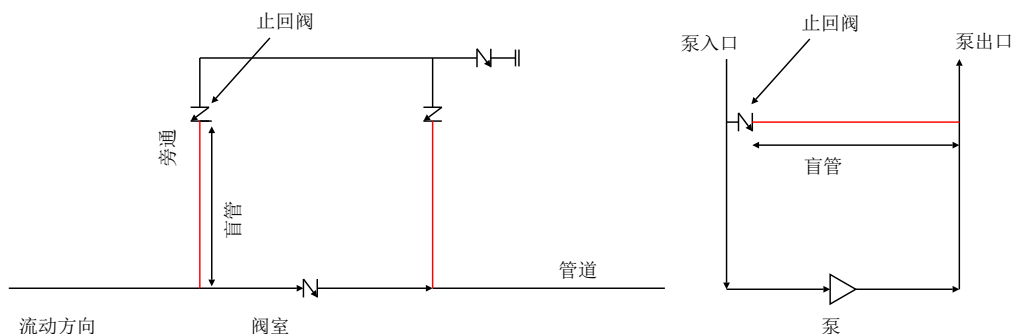


图1 阀室和泵站内由于旁通而形成的盲管段

Fig. 1 Dead-legs formed by bypasses in valve chambers and pumping stations

从加拿大哈迪斯提到美国帕托卡的 Keystone 管道在 2 982 km 的 NPS30/36 管道间有 39 个泵站,在有盲管的管道中,仅因第一个泵站 4 个盲管混油量所增加的部分是 37.5%,经过第二个泵站后额外增加了 18.3%^[3]。

成品油顺序输送过程中产生的大量混油提高了输送成本,减少了油品的经济价值^[4]。对于成品油顺序输送混油问题,众多学者从基础理论和实验等多方面进行了研究。Taylor 通过研究发现,当混油段缓慢通过一个小口径管时,它在分子扩散和速度变化的联合作用下,会在横截面上扩散^[5]。Taylor 指出,速度变化在物质轴向扩散中至关重要,并提出了菲克模型以计算轴向扩散程度。Levenspiel 提出,在湍流管道中,分子扩散不会造成明显的混油^[6]。Scott 等通过大量的实验分析发现,扩散传递是导致混油的主要因素^[7]。Austin 和 Palfrey 指出,在高雷诺数下, Taylor 的分析会由于拖尾油的影响而存在轻微的误差。Austin 和 Palfrey 还发现, Taylor 分析中低雷诺数下的湍流模型忽视了近壁面处黏度的影响所导致的偏差。他们提出了一种可以计算混油界面长度的方程,并提出了混油长度的经验

成品油长输管道有许多阀室和泵站,油品在经过这些阀室、泵站时会形成死油段(图 1),当后行油品流经充满前行油品的死油段时,由于重力作用,后行油品进入死油区,前行油品从中流出,两种油品在接口处形成封闭交换流^[2],这时,引起混油的主要因素是对流传递。当死油段前行油品被替换了一半左右后,对流传递的影响逐渐减小,扩散传递开始发挥作用。在湍流扩散作用下,后行油品逐渐混入死油区,前行油品慢慢被替换。在这两个过程中,湍流扩散进行的时间要明显大于对流传递,从死油区流出的前行油品会在主管中形成较长的拖尾油。

常数^[8]。Aunicky 发现, Taylor 模型存在一定缺陷:随着管道长度的增加,扩散系数并不是一个恒定值^[9]。Krantz 对 Taylor 分析法进行修正,发现直管段流体接近层流区域时,轴向混油量迅速增加,管道粗糙度也会导致少量的轴向混油^[10]。Deng 等发展了一个二维有限差分方法的方程,该方法预测了 Austin 之前观察到的“尾部效应”^[11]。Rachid 等提出了新的混油计算模型,他们通过实验发现在同种管径变化情况下,流动方向对混油量没有影响^[12]。研究表明,黏度差异是引起混油拖尾的主要因素,但这些研究仅针对成品油干线管道,没有结合阀室中产生的死油区等特殊情形进行分析,没有考虑盲管对混油的影响,与实际工程结合得还不够紧密。

Patrachari 等研究了管道干流携带盲管段死油的问题。他们的工作表明,一个有 4 个泵的泵站,每个泵的旁通管线将形成一个盲管,4 个盲管将会导致混油扩散增加 400~420 m^[13-14]。他们还发现,盲管所形成的混油是由于停滞在盲管中的流体通过接口进入主管中流动的流体。这其中有两种作用机制:最开始是由于重力作用,导致停滞在盲管中的流体流出,形成混油;随后是在盲管接口轻微

渗入盲管的湍流混合和扩散作用,形成混油。两种机制大约各占流出体积的一半。然而,第二种机制在流出相同体积的流体时却要花更长的时间。但 Patrachari 等未针对盲管段死油区造成的拖尾油问题对传统混油量计算式进行修正。

对于由阀室或泵站引起的拖尾油问题仍缺乏相关研究。本文将针对盲管段易形成拖尾油的情形,分析拖尾油的形成机理,将这一工程中实际存在的混油加以考虑,利用 CFD 方法对不同的流速及盲管长度的情况进行模拟得到混油相关实验数据,运用 matlab 对盲管段油品替换时间、盲管长度和流速进行多元非线性拟合,得到盲管段所产生的拖尾油长度,结合混油长度计算的 Austin-Palfery 式得到混油长度的计算修正模型,并通过工程实际数据进行混油量计算的对比分析。

1 混油长度计算方法与模型

方法一是将对流扩散作用视为混油形成最基本的因素,在二维对流扩散的作用下,由于速度不均而导致混油轴向扩散,由于浓度差异而形成混油径向扩散,这些扩散作用都有使浓度变得均匀的趋势,以此,利用扩散理论推导方程来计算特定时刻的混油长度。混油长度在浓度对称范围内的扩散理论计算式为^[15]

$$C = 4\alpha Z \sqrt{dL} \sqrt{\frac{3000 + 60.7Re_{pj}^{0.545}}{Re_{pj}}} \quad (1)$$

式中:

C —混油长度, m;

α —修正系数,流速越小,层流底层越厚,混油量越多,其值越大,无因次;

Z —综合变量,与混油段切割浓度相对应的值,无因次;

d —管道内径, m;

L —管道长度, m;

Re_{pj} —混油段两种油品的平均雷诺数,无因次。

在对称的浓度范围内,运用扩散理论推导出来的混油长度与管内流态、管道直径以及混油界面流过的长度有关。

方法二采用混油长度计算经验公式是 Austin-Palfery 式^[8]。

通常将前行油品浓度的 99%~1% 的混油长度视为混油段的长度,当管径和管道长度为定值时,雷诺数对混油长度的影响存在两种状态。这两种状态的雷诺数和无因次量 $C^2/(dL)$ 在对数坐标系中都是线性关系。当雷诺数大于混油临界雷诺数时, $C^2/(dL)$ 随雷诺数的降低而逐渐变大,直线形状较为平滑,其斜率为 -0.2,这一状态下的混油长度为

$$C = 11.75d^{0.5}L^{0.5}Re^{-0.1} \quad (2)$$

式中:

Re —混油雷诺数,无因次。

当雷诺数小于混油临界雷诺数时, $C^2/(dL)$ 随雷诺数的减小而迅速增大,直线形状较为陡峭,其斜率为 -1.8,这一状态下的混油长度为

$$C = 18384d^{0.5}L^{0.5}Re^{-0.9}e^{2.18d^{0.5}} \quad (3)$$

混油临界雷诺数

$$Re_j = 1000e^{2.72d^{0.5}} \quad (4)$$

式中:

Re_j —混油临界雷诺数,无因次。

通过临界雷诺数 Re_j 将这两种流体的流动状态区分开来,并判段两种油品的混油特点,从而选择合适的公式来计算混油长度。通过对这些混油计算公式的分析与介绍,发现它们都没有考虑到拖尾油对混油长度的影响,故本文将在进行模拟和数据分析后,对盲管段油品替换时间、盲管长度和流速进行多元非线性拟合^[16],得到混油长度的计算修正模型,以修正之前的混油长度计算式,使其更符合实际情况。

本文模拟的是兰成渝管道顺序输送中的混油情况,根据现场实际数据,得到主要的参数见表 1。

表 1 油品物性参数

Tab. 1 Physical property parameters of oil

油品	密度/(kg·m ⁻³)	动力黏度/(mm ² ·s ⁻¹)
92# 汽油	724	0.404
0# 柴油	842	5.069

顺序输送混油过程中的拖尾油,其形成原因就是前行油品黏附在管壁处被后行油品携带走,因此,拖尾油形成量受壁面黏性影响很大,尤其要考虑层流底层对混油量的影响,因此,在 Fluent 中,壁面函数不能用于模拟,选用近壁模型法来模拟拖尾油形成的模型壁面更加合适^[17-18]。针对拖尾油的形成,采用多相流模型中的 VOF 模型,采用结构化六面体来划分网格^[19-20],网格和截面位置见图 2,图 3。

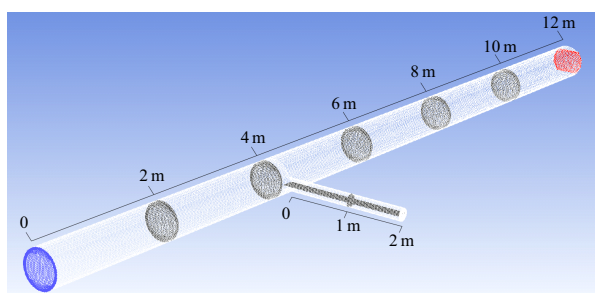


图2 模型网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the model grid

运用 Fluent 来模拟泵站盲管混油。该泵站的泵配有一个结构类似图 2 的旁通管道。

旁通管道止回阀和盲管接口之间的长度是 2 m。该泵站均采用管径 508 mm 的管道,盲管段的管径为 168 mm。因此,一个盲管段的体积约为 0.4 m^3 。

根据计算结果,当时间进行到 4 s 时,后行油品已经流过管道三分之二处的截面,因此,取 4 s 时的油品体积分数做网格无关性验证和步长独立性验证^[21-22]。比较 3 号截面上油品的体积分数。

对 603 042, 1 532 451, 2 034 861 和 3 021 581 共 4 种网格输量进行网格无关性验证,对 0.000 5, 0.001 0, 0.010 0 和 0.050 0 s 等 4 种时间步长进行步长独立性验证(图 4)。

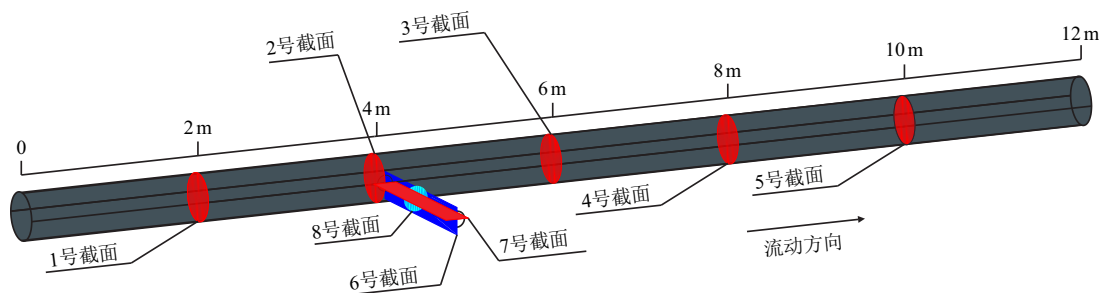


图3 截面位置示意图

Fig. 3 Section position diagram

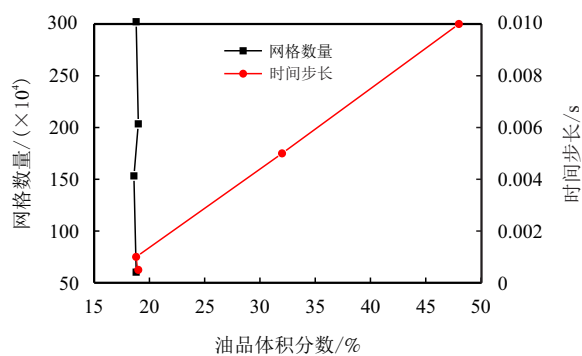


图4 网格无关性、步长独立性验证图

Fig. 4 Grid independence and step-length independence verification diagram

当网格数量从 60×10^4 变至 300×10^4 时,随着网格数的增加,油品体积分数变化很小,说明这 4 种网格数量对计算结果的影响很小,可以认为到 60×10^4 的网格已达到网格无关,因此,取 60×10^4 的网格作为计算网格。随着步长的减小,油品体积分数变化越来越小,在时间步长为 0.001 s 时可以近似认为油品体积分数达到稳定。若步长取得太小会大大增加计算周期,若步长取得太大又会影响到计算精度,综合考虑,在本文计算中的时间步长取 0.001 0 s。

2 模拟结果及分析

2.1 盲管混油机理分析

图 5 为流速 1.4 m/s 时不同时间的一系列混油浓度分布图。

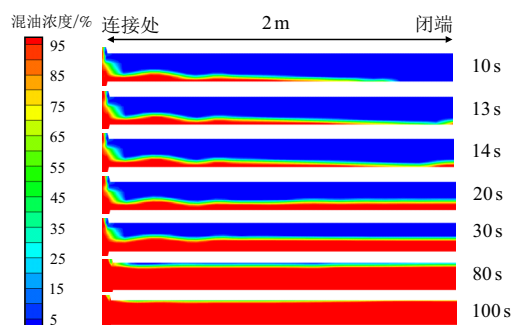


图5 不同时间6号截面混油浓度分布图

Fig. 5 Cross section diagram of contamination concentration at section 6 with different times

由于密度差的存在,主管中的柴油先是由于重力作用移向盲管闭端,然后再返回至盲管接口,该过程大概要花 26 s,其中,前 13 s 移向盲管闭端,后 13 s 折回到盲管接口。重力流的行进速度是 0.15 m/s。

本例中流体特征高度和管道直径的比值为0.33,弗劳德数为0.91,与之相应的无黏光滑非混合重力流的流速为0.21 m/s。0.15 m/s的真实流速在相同的重力流高度下比理想流体流速大约低44%。其原因为:(1)汽油和柴油的黏度都较高,流体并非无黏;(2)在两种油品的交界面处有很明显的混合迹象,它们交换动量,导致先行流体流速下降;(3)汽油进入主管时,由于主管柴油流速较高,在盲管接口处会出现水力波动。若没有上述3种降低重力流流速的影响因素时,流体的重力流特征高度将会到达管径的一半,并以0.21 m/s的速度流动。

柴油从盲管接口流进盲管时,相同体积的汽油从盲管流出并进入主管,这种流动称作封闭交换流。因为从盲管流出的汽油流速较小,主管柴油流速较大,所以在盲管接口处会形成明显的混油拖尾,尤其是重力占主导作用的时候。

30 s后,汽油流出主导作用从重力变为湍流扩散,从盲管中流出的汽油将会在距离接口2~3个管径的距离处形成与湍流混合相似的流动,这是由汽油和柴油间的界面剪切力导致的,盲管中也会因此出现较多的混油,其混油浓度分布图见图6。

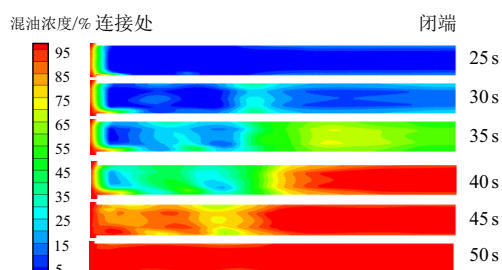


图6 不同时间7号截面混油浓度分布图

Fig. 6 Cross section diagram of contamination concentration at section 7 at different times

图7为8号截面处汽油体积分数随时间变化曲线。由图7中,盲管距接口1 m处的8号截面的汽油体积分数于8 s开始下降。在30 s时,也即重力流从盲管闭端返回接口时,约有一半的汽油在重力作用下与柴油形成封闭交换流,从而流出盲管,这与之之前的盲管混油浓度分布图相一致。剩下的一半汽油将会花费更长的时间流出盲管,因为它们的流出机制变成了湍流扩散,该作用主要发生在接口处,柴油通过湍流扩散缓慢渗入盲管,从而将汽油替换出来,这也是为什么在重力流阶段盲管内的混油界面会有波动,而湍流扩散阶段则没有。

图8是不同管道截面处的汽油体积分数随时间

变化曲线。由于图8统计的数据是从1 s开始,此时,管道1号截面处的汽油已被替换完,因此,随着时间发生变化,该截面的汽油体积分数基本没有变化。2号截面处位于管道盲管之前,该截面没有从盲管中携带出来的汽油,因此,2号截面的汽油体积分数只反映了主管中的汽油体积分数,而另外3种曲线平缓阶段的变化则呈现出一定的规律性:随着管道距离的增加,平缓阶段的最大值增加,曲线斜率增大。最大值增加是因为2号截面以后,截面汽油体积分数都要考虑盲管的影响,这些截面的汽油体积分数是主管中附着在管壁的汽油体积分数和盲管流出的汽油体积分数之和。随着距离增加,这两者之和的值也增加,也即混油量增加。斜率增加是因为在扩散作用的影响下,由于盲管中流出的汽油与柴油混合,距离越远的截面,盲管影响也越小,其汽油体积分数减少速度越接近无盲管情况,所以曲线斜率也越大。

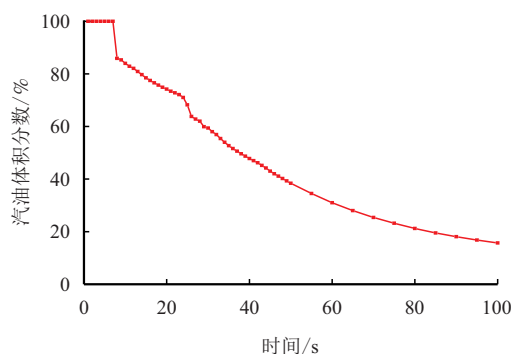


图7 8号截面处汽油体积分数随时间变化曲线

Fig. 7 Variation in the gasoline volume fraction at section 8 with time

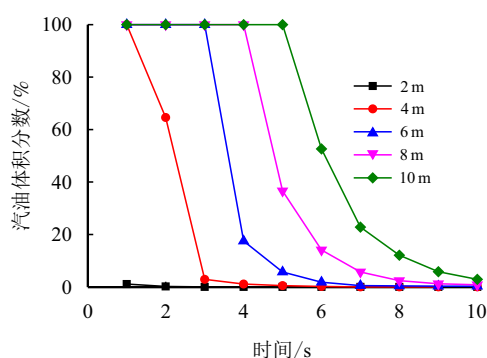


图8 不同管道截面处的汽油体积分数随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of gasoline volume fraction varying with time at different pipe sections

盲管混油首先由于重力作用,前行油品从盲管中流出,两种油品在接口处形成封闭交换流,这时引起混油的主要因素是对流传递。当盲管段前行油品

被替换了一半左右后,对流传递的影响逐渐减小,扩散传递开始发挥作用。在湍流扩散作用下,后行油品逐渐混入死油区,前行油品慢慢被替换。在这两个过程中湍流扩散进行的时间要明显大于对流传递,从盲管段流出的前行油品会在主管中形成拖尾油。

2.2 流速对盲管段拖尾油的影响

不同流速下主管道 3 号截面处混油量随时间变化曲线见图 9。

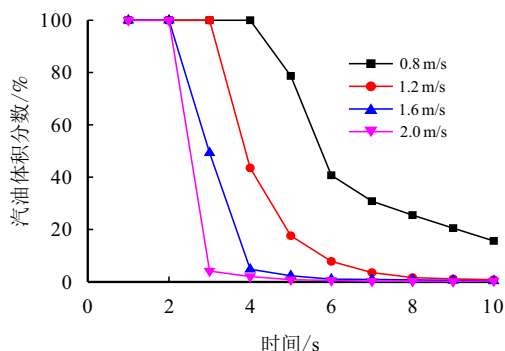
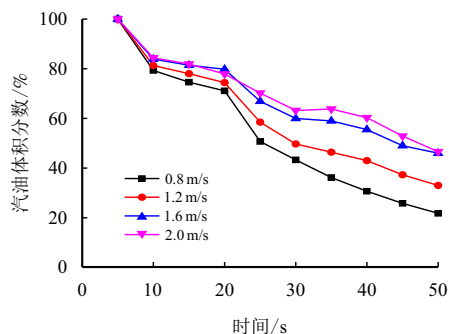


图 9 不同流速下主管道 3 号截面处混油量随时间变化曲线

Fig. 9 The relationship between gasoline volume fraction and time at Section 3 at different flow rates

图 9 中存在 3 个阶段。第 1 阶段:柴油还未到达该截面,该阶段曲线为一条值为 1 的直线。第 2

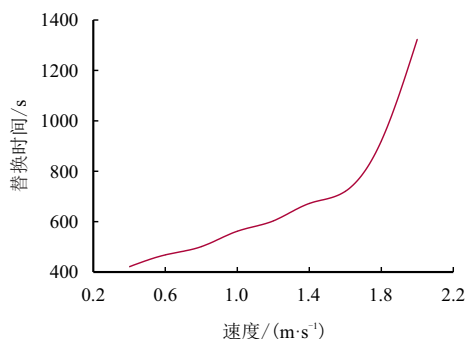


a 时间与汽油体积分数的关系

阶段:混油初始阶段,管道中大部分汽油被柴油推走,汽油体积分数快速下降,曲线斜率很大。在不同流速下,该阶段持续时间都是 2 s 左右。第 3 阶段:拖尾油形成阶段,该阶段的汽油基本都附着在管壁上,该阶段汽油体积分数下降速度较慢,曲线斜率较小。

上述 3 个阶段存在差异:(1)速度 0.8 m/s 时,第 1 阶段持续约 4 s,而在速度 1.6 m/s 时,该阶段只持续了约 2 s;(2)第 2 阶段汽油体积分数下降幅度不一样。该阶段结束时,在速度 0.8 m/s 时,汽油还剩约 40%,而在速度 1.6 m/s 时,汽油则只剩约 5%;(3)第 3 阶段,汽油体积分数下降快慢不同。0.8 m/s 和 1.2 m/s 两种情况下,汽油体积分数从 20% 下降到 15%,0.8 m/s 大约需要 1 s,而 1.2 m/s 大约只需要 0.4 s。这些差异说明:(1)初始混油阶段,流速越大,柴油会越快到达获取数据的截面,油品替换速度越快,该阶段基本都只有 2 s 左右;(2)初始混油阶段,流速越大,柴油对汽油的携带能力越强;(3)流速越快柴油对汽油的携带速度越快,形成的拖尾油越短。

流速对盲管段的影响见图 10。



b 速度与替换时间的关系

图 10 流速对盲管段的影响

Fig. 10 Effect of flow velocity on dead-leg

根据图 10a 盲管中的混油情况,在前 20 s,尽管流速不同,但是盲管中的汽油体积分数下降速度基本一致,因盲管中的汽油进入主管主要是因为重力作用所形成的封闭交换流^[23],主管中黏度较高的柴油在重力作用下进入盲管,将盲管中的汽油替换出来,这一过程不受流速影响,因此,在前 20 s 内盲管中汽油进入主管的量基本相同。在 20~30 s 内,封闭交换流仍然是汽油进入主管的主要形式,但湍流扩散作用也随着柴油进入盲管而愈加突出。到 30 s 后,盲管中有将近一半的油品都是柴油,此时,湍流

扩散作用取代重力成为盲管中汽油流入主管的主要动力。主管流速越大,在盲管与主管接口面积恒定的制约下,尽管单位体积柴油对汽油的携带能力没变,但其携带汽油的时间越少,越不能与盲管中的汽油发生充分的湍流扩散作用。这使得盲管中剩余的汽油体积分数随着主管中柴油输送速度的增加而增加,也即盲管中油品替换速度减慢。

当盲管中的汽油体积分数小于 1% 时视作品替换完成。由图 10b 可知,当流速大于 1.6 m/s 时,盲管油品替换所需时间大幅增加,在主管中形成

的拖尾油长度也会因此增加,所以要将流速控制在 1.6 m/s 内。

根据图 10b 中的数据可以拟合出盲管油品替换时间与流速之间的关系为

$$T = 345.59e^{0.1252v} \quad (5)$$

式中:

T —盲管油品替换时间, s;

v —主管段油品流速, m/s。

2.3 盲管长度对盲管段拖尾油的影响

主管道的直径为 $d=508$ mm, 将盲管长度分别设为 1.0d, 2.0d, 3.0d, 4.0d, 5.0d, 6.0d 及 7.0d, 流速定为 1.4 m/s, 支管直径取 168 mm, 输送顺序为柴油推送汽油, 当盲管中的汽油体积分数小于 1% 时视作油品替换完成, 计算结果见图 11。

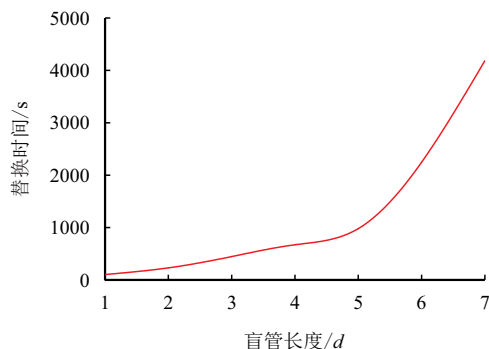


图 11 盲管长度与盲管油品替换所需时间的关系曲线
Fig. 11 Relationship between the dead-leg length and the time required for gasoline replacement

分析实验数据, 依据其变化趋势, 得出经验公式, 来估计所需的时间。根据图 11 中的数据可以拟合出盲管长度和盲管油品替换所需时间的关系式

$$T = 64.547e^{0.5878d} \quad (6)$$

当盲管长度大于 5 倍主管管径后, 盲管中的前行油品被后行油品替换所需时间陡增, 这说明湍流扩散的影响作用在盲管长度为 5 倍主管管径时还是比较大, 但超出该长度范围后, 湍流扩散作用的影响效果将大大削弱, 这样将在主管中形成很长的拖尾油。

图 12 显示了距接口 1 m 处, 不同长度的盲管中汽油体积分数随时间的变化情况。各曲线间存在 3 种变化规律: 第一种是随着时间增加, 不同循环周期内的曲线斜率逐渐减小; 第二种是随着盲管长度增加, 汽油体积分数减小速度越来越小; 第三种是随着盲管长度增加, 汽油体积分数减小速度循

环变化的周期时间越来越长。第一种是因为盲管汽油流出机制从封闭交换流变为湍流扩散, 后者流出相同体积的汽油所需时间更长。第二种是因为盲管越长, 湍流扩散作用对闭端的汽油影响越小, 油品替换所需时间越长。第三种是因为曲线表示的汽油体积分数是指距接口 1 m 处 8 号截面上的汽油体积分数, 而非是整个盲管段的汽油体积分数, 盲管长度越长, 重力流回该截面所需时间越多, 从而使汽油体积分数减小速度循环变化的周期时间越来越长。

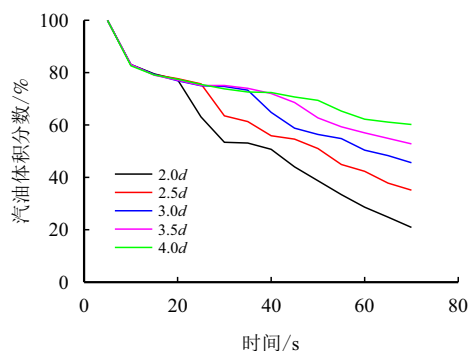


图 12 不同长度盲管中汽油体积分数随时间变化曲线
Fig. 12 Relationships between gasoline volume fractions and time for different dead-leg lengths

通过对不同盲管长度进行模拟与分析可知: 盲管段长度越长, 盲管段油品替换速度越慢, 主管中拖尾油长度越长, 混油量越大。

3 混油长度计算修正模型

根据模拟所得数据, 将这些数据进行拟合, 得到在 508 mm 的管道中, 以柴油推送汽油的顺序输送时, 不同管段拖尾油长度与各影响因素之间的关系式。

对盲管段油品替换时间、盲管长度和流速进行多元非线性拟合, 可得

$$T = 119.1v + 15.48e^{0.7756L_m} + 175.3 \quad (7)$$

式中: L_m —盲管长度, m。

该式的拟合系数高达 0.996 9, 说明该式的可靠性。得到了盲管中油品替换所需时间后, 就可以计算经过一个盲管后在主管中产生的拖尾油长度

$$C = Tv \quad (8)$$

由于站场中往往存在多个盲管, 前一盲管中的前行油品进入主管后势必会对管道中油品密度造成

影响,进而影响后续盲管的油品携带速度和拖尾油长度。

表 2 为后行柴油密度 842 kg/m^3 、前行汽油密度 722 kg/m^3 时,盲管数量对拖尾油长度的影响。

表 2 盲管数量对拖尾油长度的影响
Tab. 2 The effect of the number of dead-legs on the trailing oil length

盲管数量	混油段平均密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	盲管油品替换时间/s	拖尾油长度/m
1	832	672	136
2	820	690	148
3	810	705	158
4	802	717	166
5	795	727	173
6	789	735	179
7	784	742	185
8	781	749	190
9	779	754	195
10	778	758	200
11	777	760	201
12	777	762	202

由表 2 可知,随着盲管数量的增加,混油段平均密度下降,盲管油品替换所需时间增加,拖尾油长度也相应增加,通过非线性拟合出其增加规律,对式(8)进行修正

$$C = (0.21 \ln N + 0.96) T v \quad (9)$$

式中: N —盲管数量,个。

本文还模拟不同密度下 3 号截面处混油量随时间变化曲线(图 13)。由图 13 可知,后行油品密度越大,主管中前行油品的体积分数下降得越慢,这说明两种油品的密度差越大,盲管中前行油品流出速度越快,形成的拖尾油长度越短。

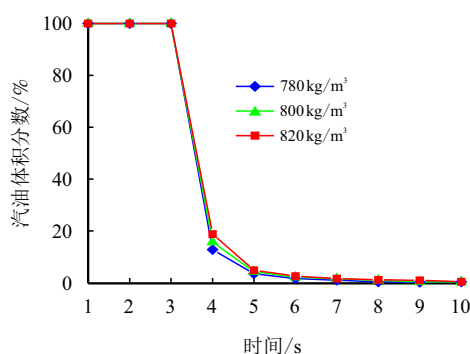


图 13 不同密度下 3 号截面处混油量随时间变化曲线

Fig. 13 Relationship between the contamination volume fraction in Section 3 and time for different densities of the rear batch

在实际计算混油长度时,出于混油切割的需要,通常只考虑混油段中油品质量不合格的部分。出于

对混油的定义和现场混油切割的需要,现有的计算公式所计算的混油长度也是考虑前行油品体积分数大于 1% 的部分,因此,在公式修正过程中也只考虑这部分,后面大部分拖尾油对油品质量的影响可以忽略。

由图 13 可知,在 6~9 s 时,汽油体积分数汽油体积分数已低于 1%。

把前行油品浓度为 99%~1% 的两界面间的距离定义为混油段长度,对式(9)进行修正

$$C = 9(0.21 \ln N + 0.96) v \quad (10)$$

兰成渝管道全线共设 16 座站场,全长 1 250 km,兰州—江油段的管径为 508.0 mm,江油—成都段的管径为 457.0 mm,成都—重庆段的管径为 323.9 mm。

对兰成渝管道输送情况进行分析,全线输量为 21 220.021 t,终点混油量为 334.109 t。方法一扩散理论计算式混油量为 396.785 t,方法二 Austin-Palfery 式计算得到混油量为 314.415 t。方法 Austin-Palfery 式混油量加修正量为 331.067 t,相对误差为 0.9%(图 14)。

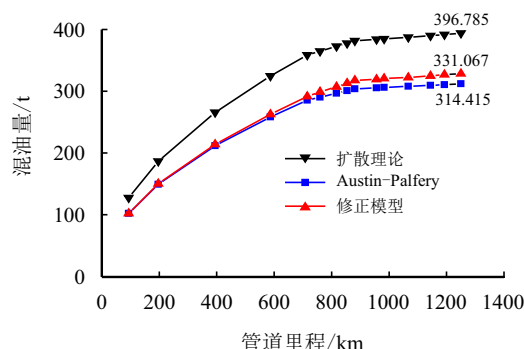


图 14 3 种方法计算所得混油量

Fig. 14 Calculation of contamination content by three different ways

通过上述对比,对于混油量计算,对式(2)和式(3)进行修正,可以得到考虑了拖尾油长度的混油长度计算公式。

当雷诺数大于混油临界雷诺数时

$$C = 11.75 d^{0.5} L^{0.5} Re^{-0.1} + 9(0.21 \ln N + 0.96) v \quad (11)$$

当雷诺数小于混油临界雷诺数时

$$C = 18384 d^{0.5} L^{0.5} Re^{-0.9} e^{2.18 d^{0.5}} + 9(0.21 \ln N + 0.96) v \quad (12)$$

这一混油长度计算公式更加符合实际情况,能够指导现场进行更加精确的混油切割,具有一定的

实践意义。

4 结 论

(1) 死油区以及残留在管壁形成层流底层的前行油品混入后行油品是拖尾油形成的主要原因。死油区拖尾油形成有两个阶段:重力流阶段和湍流扩散阶段,其中湍流扩散阶段进行的时间较长,形成的混油量较大。

(2) 流速对主管与盲管中的油品替换时间影响效果相反。主管中油品替换时间与流速负相关,而盲管中油品替换时间与流速正相关,两者呈指数关系,油品替换时间越长,混油长度越长,形成的混油量越大。由于盲管中油品替换时间受流速影响较大,因此,为使混油量较小,流速最好控制在1.6 m/s内。

(3) 盲管长度与油品替换时间呈指数关系,为减少混油量,盲管长度最好小于五倍主管管径。

(4) 根据模拟结果对混油长度理论计算公式进行修正后,该式能够综合考虑因盲管段所形成的拖尾油对混油长度的影响,使得该式计算结果更加符合工程实际。

参考文献

- [1] CAFARO V G, PAUTASSO P C, CERDÁ J, et al. Efficient planning of crude oil supplies through long-distance pipelines[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 122: 1–15. doi: 10.1016/j.compchemeng.2018.06.028
- [2] SHIN J O, BALZIEL S B, LINDEN P F. Gravity currents produced by lock exchange[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 521: 1–34. doi: 10.1017/S002211200400165X
- [3] PARFOMAK P W, NERURKAR N, LUTHER L, et al. Keystone XL pipeline project: Key issues[C]. Congressional Research Service, 2011.
- [4] 任瑾云, 曾宇平, 贾旭, 等. 中银原油管道改成品油管道混油量的研究[J]. *现代化工*, 2016, 36(5): 196–198. doi: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.05.050
REN Jinyun, ZENG Yuping, JIA Xu, et al. Study on the mixture oil of the Zhong Yin crude oil pipeline modify the product pipeline[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, 36(5): 196–198. doi: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.05.050
- [5] TAYLOR G. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1953, 219(1137): 186–203. doi: 10.1098/rspa.1953.0139
- [6] LEVENSPIEL O. Longitudinal mixing of fluids flowing in circular pipes[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1958, 50(3): 343–346. doi: 10.1021/ie50579a034
- [7] SCOTT D S, DULLIEN F A L. Diffusion of ideal gases in capillaries and porous solids[J]. *American Institute of Chemical Engineers*, 1962, 8(1): 113–117. doi: 10.1002/aic.690080126
- [8] AUSTIN J E, PALFREY J R. Mixing of miscible but dissimilar liquids in serial flow in a pipeline[J]. *Archive: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, 178: 377–395. doi: 10.1177/002034836317800160
- [9] AUNICKY A. The longitudinal mixing of liquids flowing successively in pipelines[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1970, 48(1): 12–16. doi: 10.1002/cjce.5450480103.21
- [10] KRANTZ W B, WASAN D T. Axial dispersion in the turbulent flow of power-law fluids in straight tubes[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1974, 13(1): 56–62. doi: 10.1021/i160049a011
- [11] DENG S, PU J. Application of convection-diffusion equation to the analyses of contamination between batches in multi-products pipeline transport[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1998, 19(8): 757–764. doi: 10.1007/BF02457750
- [12] RACHID F B D F, ARAUJO J H C D, BAPTISTA R M. The influence of pipeline diameter variation on the mixing volume in batch transfers[C]. *The 4th International Pipeline Conference*, 2002: 997–1004. doi: 10.1115/IPC2002-27168
- [13] PATRACHARI A R, JOHANNES A H. A conceptual framework to model interfacial contamination in multi-product petroleum pipelines[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(17–18): 4613–4620. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.04.017
- [14] BOTROS K K, CLAVELLE E J, VOGT G M. Interfacial contamination between batches of crude oil to dead-legs in pump station piping[J]. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, 2016, 138(5): 1–8. doi: 10.1115/1.4033401
- [15] 杨筱衡. 输油管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013.
YANG Xiaoheng. Design and management of oil pipe-

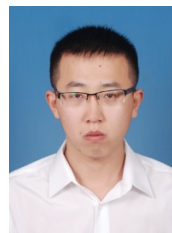
line[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2013.

- [16] DE ARAUJO J H C, GOMES P D, RUAS V. Study of a finite element method for the time-dependent generalized stokes system associated with viscoelastic flow[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010, 234(8): 2562–2577. doi: 10.1016/j.cam.2010.03.025
- [17] LIU Enbin, LÜ Liuxin, MA Qian, et al. Steady-state optimization operation of the west-east gas pipeline[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(1): 1–15. doi: 10.1177/1687814018821746
- [18] MENTER F, EGOROV Y. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 1: Theory and model description[J]. Applied Scientific Research, 2010, 85(1): 113–138. doi: 10.1007/s10494-010-9264-5
- [19] LIU Enbin, YAN Shikui, PENG Shanbi, et al. Noise silencing technology for manifold flow noise based on Ansys fluent[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 322–328. doi: 10.1016/j.jngse.2016.01.021
- [20] LIU Enbin, LI Wensheng, CAI Hongjun, et al. Formation mechanism of trailing oil in product oil pipeline[J]. Processes, 2019, 7(1): 1–18. doi: 10.3390/pr7010007
- [21] LIU Enbin, PENG Shanbi, YANG Tiaowei. Noise-silencing technology for upright venting pipe jet noise[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(8): 1–15. doi: 10.1177/1687814018794819
- [22] PAN Z, CHEN B, SHANG L. Numerical simulation of v-cone flow meter in product oil pipeline of batch transportation[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(9): 925–933. doi: 10.1080/10916460902937034
- [23] YUAN Qing, WU Changchun, YU Bo, et al. Study on the thermal characteristics of crude oil batch pipelining with differential outlet temperature and inconstant flow rate[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 160: 519–530. doi: 10.1016/j.petrol.2017.10.074

作者简介



刘恩斌, 1980 年生, 男, 汉族, 四川遂宁人, 教授, 博士, 主要从事油气管网仿真与优化技术、瞬变流、计算流体力学等方面的科研教学工作。E-mail: sunriselepsb@163.com



李文胜, 1993 年生, 男, 汉族, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事成品油管道运行关键技术方面的研究。E-mail: 201721000517@stu.swpu.edu.cn



蔡泓均, 1993 年生, 男, 汉族, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事航空油料的储存运输工作。E-mail: hoganchoi66@gmail.com



谢萍, 1972 年生, 女, 汉族, 甘肃武威人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气管道安全经济输送方面的研究工作。E-mail: xieping@petrochina.com.cn



尚臣, 1987 年生, 男, 汉族, 青海互助人, 工程师, 主要从事油气储运工艺、设备、全尺寸爆破试验等方面的研究工作。E-mail: xbgdsc@petrochina.com.cn

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>