

成品油顺序输送过程中混油特性与控制研究

李同程 (国家管网集团东部原油储运有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为提升成品油管道输送效率、降低输送成本, 顺序输送已成为主流输送模式, 但不同油品交替输送过程中产生的混油现象, 会造成油品质量不达标、经济损失等问题。本文基于流体力学原理, 系统研究成品油顺序输送过程中的混油特性, 剖析流速、油品物性、管道工况等关键影响因素, 进而提出针对性的混油控制技术与优化策略, 为成品油顺序输送混油控制提供理论支撑与工程实践参考。

关键词: 成品油; 顺序输送; 混油特性; 影响因素; 控制策略

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0109-03

Research on Oil Mixing Characteristics and Control during Sequential Transportation of Finished Oil Products

Li Tongcheng (Eastern Crude Oil Storage and Transportation Co., Ltd., PipeChina, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract: In order to improve the transportation efficiency of refined products and reduce the transportation cost, sequential transportation has become the mainstream transportation mode, but the formation of mixed oil in the process of alternating transportation of different oil products will cause problems such as off-specification products and economic losses. In this paper, based on the principle of fluid dynamics, the characteristics of mixed oil in the process of sequential transportation are systematically studied, and the key influencing factors such as flow rate, physical properties of oil products, and pipeline conditions are analyzed. Subsequently, targeted mixed oil control technologies and optimization strategies are proposed. This work can provide theoretical support and practical guidance for the control of mixed oil in refined product transportation.

Keywords: Refined oil products; Sequential transportation; Oil blending characteristics; Influencing factors; Control strategy

管道因其具有运量大、能耗低以及安全可靠的特点而成为成品油长距离调配的主要手段之一。在顺序输送期间, 不同油品之间切换的过程中, 由于分子扩散、紊流脉动、界面剪切的作用, 前后两种油品发生混合而产生一段混油段, 混油段中的油品不符合标准, 需要进一步处理 (回掺、回炼或拔头), 这既增加操作费用又会造成油品浪费, 严重的时候还会引起事故与设备故障的发生。因此, 本文从理论上研究分析和实际生产运行相结合的方法, 探讨成品油顺序输送混油产生的机理和变化过程, 确定影响混油的主要因素, 并给出合理的混油控制方案, 以期为提高成品油顺序输送经济效益和社会效益提供技术指导。

1 成品油顺序输送混油特性分析

1.1 混油形成机制

在成品油顺序输送中, 由于分子扩散、紊流扩散及界面剪切的作用而产生的混油现象, 这三者的相互影响、相互叠加决定着混油段的产生和演变。其中, 分子扩散是指由分子热运动引起的不同油品分子在浓度梯度下的迁移造成的微观上的混合, 在层流状态和紊流状态下都存在, 但是影响相对较小。紊流扩散是紊流流动中质点的不规则脉动导致的, 管道内流体处

于紊流状态时, 流体微团的剧烈混合会使相邻油品的界面快速模糊, 是混油段扩大的主要驱动力。界面剪切则是由于不同油品的粘度、密度存在差异, 在输送过程中形成速度差, 导致界面处产生剪切应力, 进而破坏界面稳定性, 促进油品混合。

混油段的演化过程可分为三个阶段: 初始形成阶段, 相邻油品刚接触时, 主要受分子扩散与界面剪切作用, 混油段长度缓慢增长; 快速发展阶段, 随着流体流动, 紊流扩散作用逐渐增强, 混油段长度快速增大, 混油浓度梯度逐渐平缓; 稳定阶段, 当扩散与剪切作用达到动态平衡时, 混油段长度不再明显增长, 混油浓度分布趋于稳定。

1.2 混油特性评价指标

为了定量地评价成品油顺序输送中的混油性质, 一般选取混油长度及混油浓度作为主要指标进行分析。混油长度是指相邻两批油品混合而形成的质量不符合质量标准要求的油品段的长度, 它是表示混油损失的重要指标, 它决定着后处理工作量的大小以及耗费的成本多少; 混油浓度是指混油段中两种油品的体积分数或者质量分数, 常用浓度分布曲线来表示, 能形象地表达出混油段的混合均匀程度^[1]。

2 成品油顺序输送混油影响因素研究

2.1 输送流速的影响

输送流速也是影响混油的重要因素，它通过对流体流动形态及界面剪切力的作用来影响混油段的产生和发展。

基于相关文献与经验得知，当流速较低时，流体处于层流或过渡流状态，界面剪切作用较弱，但分子扩散作用相对显著，混油长度随流速增大缓慢减小；当流速处于最优输送流速区间时，流体处于充分紊流状态，紊流扩散作用成为主导，随着流速增大，紊流脉动增强，界面剪切强度提升，混油长度快速减小；当流速超过一定限值后，流速进一步增大导致界面处的剪切应力过大，破坏了流体流动的稳定性的，反而加剧了油品混合，混油长度随流速增大而增大^[2]。因此，存在最优输送流速区间，可使混油长度最小。

2.2 油品物性差异的影响

不同成品油的密度、粘度、折射率等物性参数存在差异，其中密度与粘度差异对混油特性的影响最为显著。

目前，常采用 Austin 和 Palfrey 总结的经验公式计算混油长度，当 Re 大于 Re_j 时， $C=11.75d^{0.5}L^{0.5}Re^{-0.1}$ ；当 Re 小于 Re_j 时， $C=18384d^{0.5}L^{0.5}Re^{-0.9}e^{2.18d^{0.5}}$ ；其中 C 为混油长度 (m)， d 为管道内径 (m)， L 为管道长度 (m)， $e=2.718$ ， $Re_j=10000e^{2.72d^{0.5}}$ 为临界雷诺数。

以苏北东线为例，设定流量为 $400\text{m}^3/\text{h}$ ，运动粘

度为 $7 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 时，计算出理论混油长度后，乘以管道内径截面积，得出以下混油量。

在实际生产运行中，以 2025 年为例，整理出部分 0# 柴油顶 92# 汽油末站切割具有代表性实际混油量。

通过分析以上统计表数据，可以得出以下三个结论：一是在同一个长输管道，流速基本一致情况下，相邻两种油品密度差值越大，混油量就越大；二是在同一长输管道，相邻两种油品密度差值相近时，管道停输时长越长，混油量就越大；三是在同一长输管道，相邻两种油品密度差值相近时，管道停输次数越多，混油量就越大。

查询相关试验和实际生产运行得知：相同输送流速下，当顺序输送粘度相差大的油品 (例如 92# 汽油和 0# 柴油，粘度差 $2.6 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) 比输送粘度相差小的油品 (例如 92# 和 95# 汽油，粘度差 $0.05 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)，混油长度和混油浓度最大值也更大。因为粘度相差越大，则相邻两种油品流速差也大，界面剪切应力越大，界面就越不稳定，促进了油品之间的混合。密度差异对于混油影响类似于粘度差异，密度差异越大，则流体的浮力差就越大，会产生二次流动，从而促进油品之间混合，增加混油长度。

2.3 管道工况与结构的影响

管道工况 (如压力、温度) 和管道结构 (如管径、弯头、阀门) 也会影响混油特性。随着温度上升，油

表 1 苏北东线理论混油量计算表

| 管段 | 管道长度 km | 管道外径 mm | 管道壁厚 mm | 流量 m^3/h | 运动粘度 m^2/s | 雷诺数 | 临界雷诺数 | 流速 | 混油量 m^3 |
|---------|---------|---------|---------|--------------------------|----------------------------|-------|-------|------|------------------|
| 扬子 - 泰州 | 142.3 | 355.6 | 7.1 | 400 | 0.000007 | 59198 | 49002 | 1.21 | 79.01 |

表 2 苏北东线实际混油量统计表

| 扬子发 0# 柴油时间 | 泰州 0# 柴油顶 92# 汽油切割时间 | 实际混油量 m^3 | 0# 柴油密度 kg/m^3 | 92# 汽油密度 kg/m^3 | 密度差 kg/m^3 | 运行时长 h | 运行工况 |
|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------|--------|
| 2025/9/19 1:43 | 2025/9/20 10:20 | 51.5 | 829.9 | 731.8 | 98.1 | 32.6 | 无停滞 |
| 2025/11/28 19:00 | 2025/11/30 3:40 | 52.3 | 830.4 | 733.4 | 97 | 32.7 | 无停滞 |
| 2025/7/27 21:00 | 2025/7/29 5:42 | 58.1 | 829.7 | 732.2 | 97.5 | 32.7 | 无停滞 |
| 2025/1/14 15:00 | 2025/1/16 0:06 | 67.5 | 833.9 | 728.2 | 105.7 | 33.1 | 无停滞 |
| 2025/8/28 22:00 | 2025/8/30 7:32 | 72.5 | 840.8 | 730.3 | 110.5 | 33.5 | 无停滞 |
| 2025/5/13 15:00 | 2025/5/16 14:00 | 51.3 | 841.7 | 729.3 | 112.4 | 71.0 | 混油段停一次 |
| 2025/4/18 4:05 | 2025/4/24 15:20 | 68.4 | 835.8 | 724.4 | 111.4 | 155.3 | 混油段停一次 |
| 2025/4/28 16:10 | 2025/5/6 10:37 | 104.1 | 835.8 | 723.8 | 112 | 186.4 | 混油段停两次 |

品粘度下降,相邻油品之间的粘度差值变小;温度升高后分子热运动加剧,综合来看混油长度将略微增加,但是其影响程度要小于流速和油品物性的差异。管道压力对混油特性的影响不大,当管道运行的压力处于一般范围(0.5MPa~5MPa)内时,管道压力的变化不会影响混油长度。

从管道结构上分析,管径越大,流体紊流程度越弱,界面上剪切力越低,则混油长度越短;弯头及阀口处产生局部漩涡,影响流体稳定状态,增加油品的混合程度,导致局部混油长度变长,如在管道弯头位置,比直管段的混油长度增加15%~20%,故在管道的设计以及施工过程中,尽量少用弯头,并合理设置阀门的位置,减少局部混油损失。

3 成品油顺序输送混油控制策略

3.1 优化输送序列

改进输送次序是指通过对各品种原油输送次序进行优化,减小相邻次序间原油的物性差异,从而降低混油量。结合上文中得出的结论可知:油品粘度及密度之间的差异越小,则对应的混油长度就越短。故对于顺序输送来说,“物性相近者先输后送”,应该将粘度、密度差异较小的油品安排在相邻的位置来输送,不同黏度等级油品尽量不混输。

如输送92#汽油-95#汽油-0#柴油-(-10#)柴油四类油品时,最佳输转顺序为:92#汽油-95#汽油-(-10#)柴油-0#柴油,且前后两种油品的黏度差值都小于 $0.5\text{MPa}\cdot\text{s}$,混合油总长比无序输转能缩短40%以上;尽可能避免大黏度油品后面紧跟小黏度油品,由于大黏度油品会在管壁上形成附着层,当低黏度油品冲刷附着层时,混合更加剧烈,增加混油长^[3]。

3.2 设置缓冲段与隔离装置

采用缓冲段或隔离装置也是抑制混油的一种有效工程措施。缓冲段就是在相邻油品之间输送一定的缓冲介质(同类型中间油品、惰性气体、凝胶隔离球),形成物理屏障,减少两种油品之间的直接接触,比如在汽油与柴油之间输送一定量的煤油作为缓冲段,基于煤油与汽油、柴油均有较好的相容性和物性接近等特点,可以有效地降低混油长度。试验发现,设置占管道容积5%的煤油缓冲段后,汽油-柴油混油长度可以减小30%~35%^[4]。

常用的隔离物主要有凝胶隔离球、活塞隔离器等,其中凝胶隔离球具有适用性好、价格便宜、容易回收的优点,在使用过程中得到了较广泛地推广。凝胶隔离球能够紧贴于管道内部,形成一个隔离密封膜,防止周边油品的扩散与混杂。在使用时,需要结合管道管径大小以及输送条件来选取对应规格与材料的隔离

球,保证隔离效果。

3.3 调控输送流速与工况

根据上文对输送流速的影响分析,可以通过控制输送流速,在最佳流速范围内减少混油长度。在实际输送中,可以通过改变泵组频率、调节阀调节来控制输送速度;另外,还可以通过控制管路输送温度,防止温度过高造成混油量增加。对于长距离管路,可以采取分段控制流速的方法,根据不同的管段工况的不同来优化不同管段的流速,达到整个管道混油量损失最小的目的^[5]。

另外,在切换开始和结束期间以较低速度输油可以减小界面剪切作用,减少初期混合量。如从汽油转柴油时,先降速到1.0m/s,等到两品种之间有清晰界面后再升到最佳流速;当柴油快要走完时,再降速直到汽油进满为止,然后再恢复到最佳流速。可以缩短混油长度20%左右。另一方面,也可以通过减少首站球阀切割时长或者首站增设蝶阀来进行快速切油,如苏北成品油管道。

4 结语

本文基于理论分析、经验公式计算以及实际运行数据统计分析对成品油顺序输送混油特性及控制策略进行了较为系统的研究,并得到了以下几点结论:①混油是由分子扩散、紊流扩散和界面剪切综合作用形成的,混油长度和混油浓度是评价混油特性的两个重要指标;②输送流速、油品物性差异、管道结构与工况是影响混油特性的主要因素,其中流速超过最优范围,油品粘度及密度差值越大,混油越严重;③优化输送次序、设置缓冲段与隔离带、控制输送速度等措施。

参考文献:

- [1] 杨文,黄尚圣,尹鹏博,等.甲醇-成品油顺序输送瞬变流动与混油特性[J].油气储运,2025,44(09):1034-1044.
- [2] 王维斌,刘奎荣,李玉星.成品油管道顺序输送甲醇技术发展现状与展望[J].油气储运,2025,44(09):971-979.
- [3] 王志强,王岳.弯管内成品油顺序输送混油数值计算[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(1):29-36.
- [4] 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[J].北京:中国石油大学,2018.
- [5] 刘刚,袁子云,孙庆峰,等.成品油顺序输送管道混油信息软测量方法[J].油气储运,2024,43(12):1413-1425.