

白油-水非混溶体系顺序输送界面掺混特性的实验研究

刘锦伟¹, 吕品², 安振武¹, 毛港涛³, 王凯³

(1. 中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300452; 2. 国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司, 宁夏银川 750001; 3. 北京石油化工学院 深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京 102617)

摘要: 随着绿色能源体系的快速发展, 海底管道正面临着如非混溶体系顺序输送等日益复杂的运行工况, 批次间掺混风险显著增大。为了明确此类体系在输送过程中的界面演化及掺混特性, 创新性地利用全可视化轮式环路和 565 m 长距离缩尺多相流环路, 并选取白油-水非混溶体系开展实验, 系统研究了非混溶体系顺序输送过程中的混油行为, 揭示其掺混机理和主控因素, 并提出可参考的优化输送策略。结果表明, 非混溶体系的掺混行为受流体剪切、湍流及重力不稳定性的共同控制。低流速时, 流型以稳定的分层流为主, 掺混段长但含油率低。高流速时, 分层流转为分散流, 湍流促进油滴细化和壁膜剥离, 掺混现象集中于水段塞两端。实验条件下, 分散流中含油段长度最低可降至分层流的 28.56%, 而出口平均含油率为分层流的 2.68 倍。基于上述结果, 建议在能耗可控的前提下采用较短的初始油塞, 在较高流速下维持分散流输送, 并采用低黏度相先行、高黏度油相后行的输送策略, 以缩短掺混段、抑制壁膜拖尾, 从而提升输送稳定性。研究结果可为非混溶体系顺序输送中的掺混风险管控与操作参数优化提供参考, 助力多元能源安全高效输送。

关键词: 海底管道; 非混溶体系; 顺序输送; 界面演变; 掺混机理

中图分类号: TE832 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-11

Experimental investigation of interfacial mixing characteristics during sequential transportation of white oil-water immiscible system

LIU Jinwei¹, LV Pin², AN Zhenwu¹, MAO Gangtao³, WANG Kai³

(1. CNOOC EnerTech Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300452, China; 2. PetroChina Pipeline Company Limited Northwest Branch, Yinchuan 750001, Ningxia, China; 3. Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas Development, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: With the rapid development of green energy systems, subsea pipelines are facing increasingly complex operating conditions such as the sequential transportation of immiscible systems, and the inter-batch mixing risk is significantly increased. To clarify the interface evolution and mixing characteristics of such systems during transportation, a fully visualized wheel loop and a 565 m long-distance scaled multiphase flow loop were innovatively employed. A white oil-water immiscible system was selected to carry out experiments. The mixed-oil behavior during sequential transportation of immiscible systems was systematically investigated, and the mixing mechanism and dominant controlling factors were revealed, and feasible optimization transportation strategies were proposed. The results show that the mixing behavior of immiscible systems is jointly controlled by fluid shear, turbulence and gravitational instability. At low flow rates, the flow pattern is dominated by stable stratified flow, with a long mixing section but low oil content. At high flow rates, the stratified flow transitions to dispersed flow, where turbulence accelerates droplet breakup and wall-film detachment, and the mixing is concentrated at the two ends of the water slug. Under the experimental conditions, the minimum length of the oil-containing section in dispersed flow can be reduced to 28.56% of that in stratified flow, while the average oil content at the outlet is 2.68 times that of stratified flow. Based on the above results, it is recommended, under the premise of controllable energy consumption, to adopt shorter

收稿日期: 2025-10-12; 修回日期: 2025-11-09。

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(3222029)。

第一作者: 刘锦伟(1974—), 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋工程技术咨询、工程设计及数字化技术服务工作, E-mail: liujw@cnooc.com.cn。

通信作者: 毛港涛(1997—), 博士, 讲师, 研究方向为油气管道输送及流动保障和新能源油气融合, E-mail: maogangtao@bipt.edu.cn。

initial oil slugs, maintain dispersed flow transportation at relatively high flow rates, and apply a transportation strategy in which the low-viscosity phase precedes and the high-viscosity oil phase follows, so as to shorten the mixing section and suppress wall-film trailing, thereby improving transportation stability. This results can provide a reference for mixing risk control and operation parameter optimization in the sequential transportation of immiscible systems, and support the safe and efficient transportation of multi-energy systems.

Keywords: subsea pipeline; immiscible system; sequential transportation; interfacial evolution; mixing mechanism

海底管道是高效、远距离输送多种能源的关键基础设施^[1-3]。顺序输送工艺实现了多介质的高效动态切换与协同输送,成为现代海洋能源体系的重要技术手段。其中,非混溶体系的顺序输送(如水置换、预热等)广泛应用于保障海底管道安全与环境友好运行^[4-5]。近年来,甲醇、液氨等新型储氢载体的应用推动了非混溶体系顺序输送的进一步发展^[6-9]。2025年3月,我国建成并投运了首个海洋氢氨醇一体化示范项目,实现了海底管道在绿色能源多元输送中的工程应用^[10-14]。然而,甲醇和液氨管道主要应用于中短距离运输,难以满足大规模输送需求。充分利用既有成品油管道开展储氢载体与油品的顺序输送,已成为间接输氢技术的重要发展方向^[15-17]。其中,大部分储氢载体与成品油体系呈现非混溶特征,其输送面临界面稳定性与掺混控制等关键问题。因此,系统揭示非混溶体系顺序输送的界面掺混机理及其调控规律,对提升海底管道输送系统的安全性及经济性具有重要的科学意义和工程价值。

目前,成品油顺序输送的混油机理与调控规律已较为成熟,其研究内容涵盖混油界面演变、混油影响因素及批次优化等,并已广泛应用于实际管网运行^[18-20]。相比之下,非混溶体系的顺序输送研究仍相对不足。在油水置换、液氨与部分低极性或高分子量油品,以及甲醇与某些重质柴油、润滑油等非混溶体系中,由于两相界面张力大、极性差异显著且乳化倾向增强,其顺序输送过程表现出与传统油品不同的界面混合行为,故难以直接借鉴成品油的输送经验^[21]。近年来,部分学者通过数值模拟方法(计算流体力学方法和OLGA多相流动态模拟软件等)对该类体系的输送规律进行了初步研究,探讨了甲醇-柴油^[22-25]、液氨-汽油^[26-28]等非混溶体系在输送过程中的混合特征与稳定性。然而,已有模型受限于参数假设和工况简化,难以全面反映实际工程中多介质复杂耦合及多尺度协同演化,预测结果依赖经验校准且存在较大不确定性。相较之下,室内实验能够在真实物理条件下直观捕捉非混溶体系界面的演化过程,更准确地揭示两相之间的相互

作用机制,已成为研究多相流输送行为的重要手段。部分研究者针对非混溶体系的相溶性及批次输送特征开展了初步实验,但实验工况有限,多停留于探索性阶段,尚缺乏系统性与定量化研究,导致非混溶体系掺混机理及其关键控制参数尚不清晰^[29-30]。

基于上述问题,本文依托自主设计的全可视化轮式环路与长距离缩尺多相流环路,系统研究白油-水非混溶体系在顺序输送过程中的界面演化与掺混机理,探讨批次顺序、批次长度(入口油塞长度)和流速等因素对掺混特性的影响,相关实验结果可为非混溶体系顺序输送策略优化提供依据,并对储氢载体的顺序输送亦有参考价值。

1 实验部分

为满足非混溶体系顺序输送实验中界面实时观测与掺混区长度测量的需求,本文搭建了两套互补的实验平台:全可视化轮式环路与带透明观察段的长距离缩尺多相流环路。前者用于流型识别与界面细节的动态观察,后者用于在可控条件下观测长距离输送过程中界面演变与混油区长度的定量特征。

1.1 实验材料

液氨和甲醇作为典型的储氢载体,虽在工程上具有代表性,但其高挥发性和毒性特征使得室内环路实验存在较高操作复杂度和安全风险。为在确保实验安全性的同时获取可对比的界面演化规律,本文选用白油-水体系作为代表性的非混溶双液体体系,用于分析非混溶体系顺序输送过程中的界面演化与掺混机理。工业白油为非极性相,与水互不相溶,其密度为 0.820 g/cm^3 、黏度为 $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。自来水为强极性相,密度为 0.988 g/cm^3 、黏度为 $0.9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。上述两相在密度、黏度和极性上存在显著差异。结合与液氨、甲醇的物性参数对比(表1)可知,以白油为参照相时,水与氨醇在黏度水平及极性特征方面具有一定的相似性,用其替代液氨、甲醇开展实验能够较为准确地反映非混溶体系输送过程的掺混行为,可为后续掺混机理分析与定量评估提供可靠保障。

表1 储氢载体与实验介质的物性对比

Table 1 Comparison of physical properties of hydrogen storage carriers and experimental media

输送介质	密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏度 / ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	导热系数 / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	颜色	在油中溶解性	极性	安全性
液氨	0.611	0.139	0.51	无色透明	与油混合时分层明显	较高极性,与水完全互溶,非极性溶剂中溶解性差	易燃、易挥发,高浓度下对人体有刺激性和毒害性
甲醇	0.785	0.54	0.2	无色透明	微溶于柴油、润滑油,但加入少量水即与油完全分层	较高极性,可与水互溶	有毒且易燃
水	0.988	0.9	0.58	无色透明	几乎不溶于所有油类,易分层	高极性,与油完全不互溶	无毒、安全、操作简便
白油	0.82	20	0.13	无色透明	在水中几乎不溶,与油互溶	非极性,与水互溶极差	相对稳定、闪点较高、挥发性低

已有研究为本文实验体系的选取提供了理论支撑。黄鑫等^[30]指出“该顺序输送过程的混油类似于管道投产时油顶水产生的混油”,赵赏鑫等^[31]也通过实验证实了无水甲醇与柴油体系的分层现象。这些研究说明,在界面动力学层面,不同非混溶体系的混合行为主要由黏度比和界面张力等参数决定,而化学组成仅通过影响这些参数间接作用于界面演变。因此,白油-水体系可被作为研究非混溶体系界面演化普适机制的代表介质,其研究目的在于揭示界面掺混机理,而非在热力学或化学层面直接模拟氨醇-成品油体系。应当指出,本文所得定性规律在应用于具体的储氢载体与部分成品油构成的非混溶体系时仍需结合实际物性进行修正。

1.2 实验装置

1.2.1 全可视化轮式环路

为实现非混溶体系界面演化的可视化研究,本文搭建了一套透明的全可视化轮式环路(图1)。主要材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),其密度为 1.18 g/cm^3 ,透光率为96%。管道的内径为25 mm,壁厚为3 mm。环路由一台交流齿轮减速电机驱动,可实现最高135 r/min的转速,以便通过不同转速模拟实际管道内流体的流动状态。整个系统可在连续旋转过程中保持封闭循环,等效于一个“准无限”试验段,便于在有限空间内实现长距离输送的动态再现。实验中配备了两台高清摄像机(分辨率 3840×2160 ,具有10倍光学变焦功能),用于捕捉界面细节及流型演化。该实验装置主要用于:(1)验证染色白油与水在流动过程中的分层稳定性;(2)观察油水顺序输送过程中的掺混特性,分析转速和批次顺序对其的影响;(3)与已有实验和数值模拟结果进行对比,为非混溶体系顺序输送的机理研究提供实验依据。该轮式环路的设计解决了传统直管环路实验中试验段长度受限、可视性不足、实验介质需求量大等问题,可在低成本与高安全条件下

模拟非混溶体系的多相流动行为。实验结果有助于阐明非混溶体系的掺混机理,并为液氨、甲醇与部分成品油组成的典型非混溶体系的顺序输送研究提供实验基础。

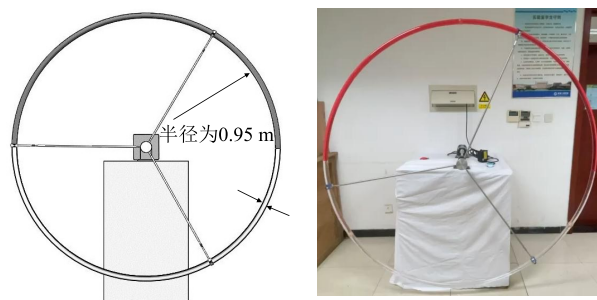


图1 全可视化轮式环路实验装置结构及照片

Fig. 1 Structure and photograph of fully visualized wheel loop experimental apparatus

1.2.2 长距离缩尺多相流环路

为研究非混溶体系在长距离输送条件下的界面演化与掺混规律,本文搭建了一套室内长距离缩尺多相流环路(图2),总长为565 m,管道内径为28 mm,壁厚为2 mm。系统由油罐、水罐、油泵、水泵、重力沉降器及多组阀门组成,形成循环结构。实验流程为:水罐和油罐为起点,自来水由螺杆泵B经阀门1、13和9注入主环路;稳定运行3~5 min后,开启阀门8并关闭阀门13,使输入介质由水相切换为油相;当注油时间达到设定值后,再次切换阀门8与13,实现油水顺序输送。混合流体经主环路进入重力沉降器,在室温下静置分离一段时间后,油、水分别经回流管路返回各自储罐,形成连续循环。在环路末端560~565 m处设置一段长度为5 m的透明有机玻璃管(与主管同径),并在其入口(560 m处)和中部(563 m处)各布设一台高清摄像机(参数同前),用于记录界面到达、掺混区演变及含油段拖尾等时空特征。该实验装置主要用于:(1)在长距离与稳定边界条件下验证流型转变判据;(2)测量不同流

速、批次长度和输送顺序下的掺混段长度和持续时间(出口处含油段的通过时间);(3)评估临界速率区间与参数敏感性,为非混溶体系顺序输送的工程化设计提供实验依据。

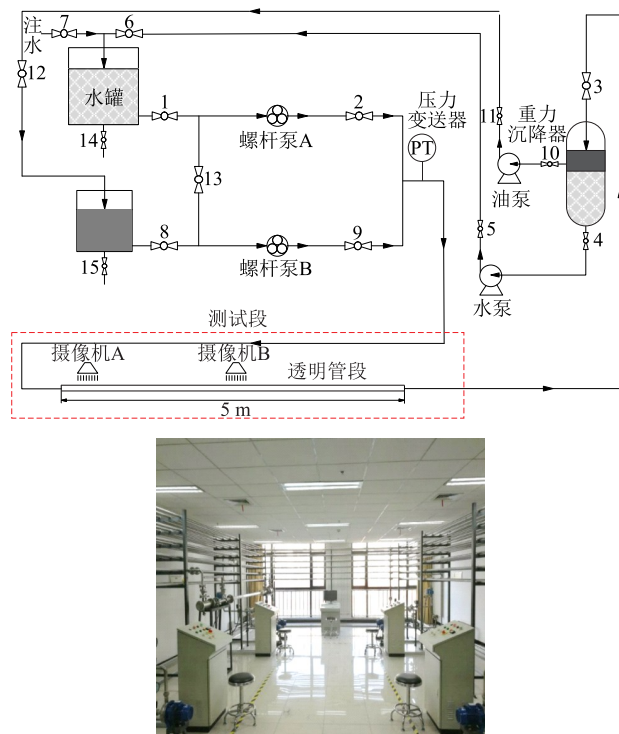


图2 长距离缩尺多相流环路实验装置结构及照片

Fig. 2 Structure and photograph of long-distance scaled multiphase flow loop experimental apparatus

1.3 实验方法

1.3.1 全可视化轮式环路实验

实验采用自来水和工业白油作为实验介质,为观察不同转速条件下非混溶体系界面形态及其演化规律,实验按以下步骤进行。

(1)系统注液与排气:轮式环路顶部设置注液口和排气口,实验开始前,先向环路下半部分注入水相,再向上半部分注入油相,使环路内形成初始分层状态;注液完成后,将装置静置24 h,以排除油相中残留气泡,并检验环路系统的密封性。

(2)初始状态建立:在确认系统无泄漏且油水界面清晰后,启动轮式环路,使其在低转速条件下平稳运行。待系统运行平稳、界面形态清晰后,开始进行后续实验。

(3)界面演化观测:实验过程中,轮式环路以恒定转速连续转动,利用高清摄像机实时记录油水界面形态及局部掺混特征。

(4)重复实验:在不同转速和油水体积下重复

上述实验过程,以考察批次长度和流动强度变化对油水分层稳定性和掺混特征的影响。

1.3.2 长距离缩尺多相流环路实验

为确保装置安全与测量准确,实验前对全环路进行气密性核验,确认无泄漏后方可运行。

(1)排除空气:打开阀门1、2、3和16,其他阀门保持关闭;启动螺杆泵A将自来水注入环路,直至管路中空气完全排出且流量稳定;然后打开阀门9和13,启动螺杆泵B;同时关停螺杆泵A,关闭阀门2,确保整个管道充满水相。实验采用E4H600-V-W201型单螺杆泵(天津市工业泵总厂),最大压差为2.4 MPa,额定工作流量为3.3 m³/h,转速为504 r/min,轴功率为3.68 kW。

(2)泵频率校准:通过变频器调控系统流量,实验前根据预标定关系校准电源频率,确保流量稳定与重复性。设定的频率分别为13.4 Hz、26.9 Hz和40.3 Hz,对应流速分别为0.5 m/s、1.0 m/s和1.5 m/s,所有实验(表2)均在稳定运行条件下进行。

表2 实验方案

Table 2 Experimental schemes

方案	电源频率/Hz	流速/(m·s ⁻¹)	入口油塞长度/m	输油时间/s
1	13.4	0.5	50	100
2	13.4	0.5	100	200
3	13.4	0.5	150	300
4	13.4	0.5	200	400
5	26.9	1.0	50	50
6	26.9	1.0	100	100
7	26.9	1.0	150	150
8	26.9	1.0	200	200
9	40.3	1.5	50	33.3
10	40.3	1.5	100	66.7
11	40.3	1.5	150	100
12	40.3	1.5	200	133.3

顺序输送实验按以下步骤进行。

(1)水相注入:自来水由泵B通过阀门1、13和9注入实验管道。初始电源频率为10 Hz,然后逐渐增加到设定值,使其稳定3~5 min,以确保流体状态均匀稳定(管道入口的瞬时流量保持恒定,入口压力传感器读数无显著波动,且透明段内流态平稳,无明显气泡、分层或脉动现象)。

(2)油相切换:打开阀门8,关闭阀门13,使输入流体从水相切换为油相,持续注入至达到预设的注油时间。

(3)二次进水:打开阀门13,关闭阀门8,使输入

流体重新转为水相,从而形成“水-油-水”的双界面结构。

(4)混合物收集与分离:油水混合物进入分离器后,静置一段时间且无需额外处理便可实现油水自然分离;当沉降罐内液面达到一定高度时,通过泵将油相与水相分别输送至油罐和水罐,实现循环利用。

(5)重复实验:在不同流速和批次长度条件下,重复步骤(1)~(4),采集各实验工况下水油界面演变及混合特性数据。

在实验过程中,通过在两个水塞之间形成可控长度的油塞,可在油塞前后分别形成水-油界面与油-水界面,从而有效表征顺序输送过程中的掺混状态。实验过程中实时记录了压力、温度及运行时间等参数,并利用分离器中收集的混合物总体积计算含油段长度和平均含油率。

由于出口处收集的混合物包含纯油段与掺混段,且二者界限难以精确划分,本文将其合并定义为含油段,以反映掺混区的整体空间范围与油相分布特征。在出口处收集含油混合物的总体积,利用式(1)可以计算含油段长度。

$$L_{\text{out}} = \frac{V_{\text{mix}}}{A} \quad (1)$$

式中, L_{out} 为含油段长度,m; V_{mix} 为出口处收集的含油混合物总体积, m^3 ; A 为管道横截面积, m^2 。

通过静置混合物并测定油相体积可进一步计算平均含油率,计算方法见式(2)。

$$\phi_{\text{oil}} = \frac{V_{\text{oil}}}{V_{\text{mix}}} \quad (2)$$

式中, ϕ_{oil} 为混合物平均含油率; V_{oil} 为油相体积, m^3 。

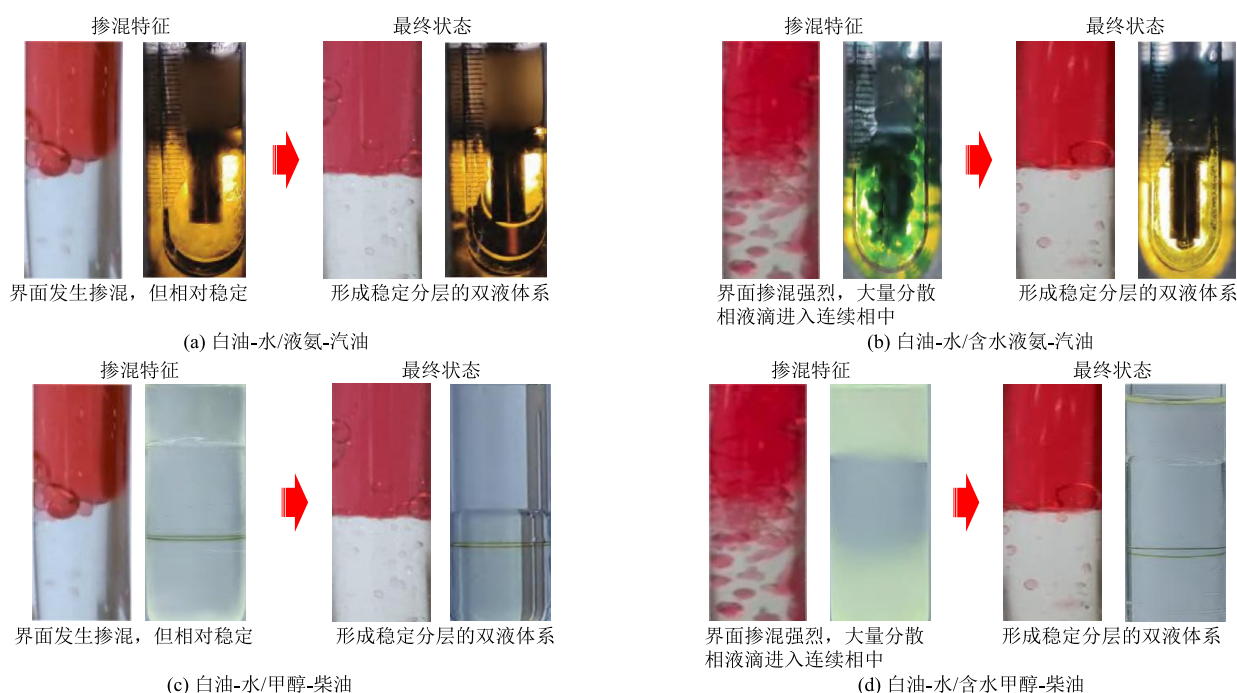
考虑到实验中采用不可压缩的白油-水体系,且系统运行压力较低,液体体积可视为恒定,因此无需对压力进行修正。

2 结果与讨论

2.1 可行性实验

2.1.1 界面掺混特征和稳定性验证

为便于观察界面掺混特征,在白油中加入溶剂红43($\text{C}_{20}\text{H}_6\text{Br}_4\text{Na}_2\text{O}_5$,质量分数 15×10^{-6})作为示踪染料。该染料为非极性有机物,能溶于白油而几乎不溶于水,低浓度下基本不影响体系的密度、黏度及界面张力。为验证溶剂红43对体系物性的影响,在烧杯中分别对未加与已加溶剂红43的白油-水体系进行搅拌对比实验(120~150 r/min)。结果显示,两者均未出现明显乳化现象,表明溶剂红43对白油-水体系掺混行为的影响可忽略。随后,将染色白油与自来水按等体积(体积比1:1)注入轮式环路,在不同转速下(以改变剪切与湍流强度)开展混合实验,对比转动过程中界面掺混的动态特征和最后静态条件下的界面分层稳定性(图3)。



红色为主的照片为本文轮式环路实验所得,作为对比,其右为文献^[30-31]中的照片;分图(a)、分图(c)为低转速条件,分图(b)、分图(d)为高转速条件。

图3 非混溶体系界面掺混与分相特征对比

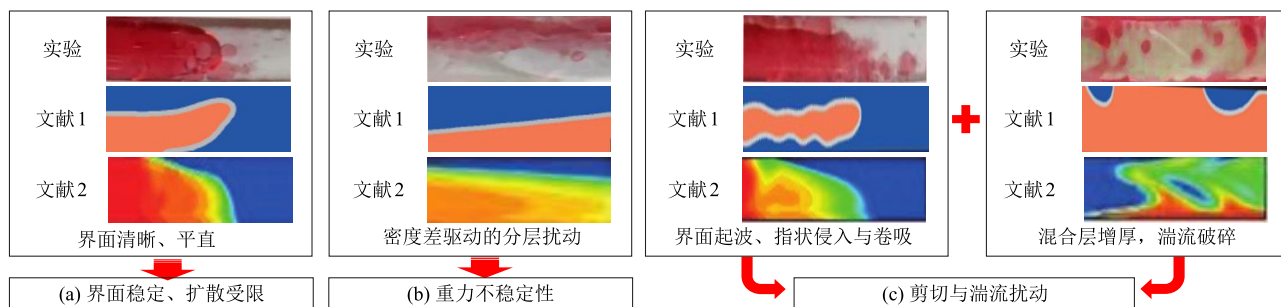
Fig. 3 Comparison of interfacial mixing and phase-separation characteristics of immiscible systems

结果表明,在低转速下,界面形态基本保持平直,仅出现少量液滴夹带;随着转速升高,流体剪切与湍流增强,界面发生明显掺混,油相在水相中的分散程度显著提高。停止转动后,体系在短时间内自发恢复为清晰的双相分层结构。该结果与液氨-汽油和甲醇-柴油体系中的特征一致:在无水条件下对应低剪切状态,界面稳定、分层明显;在含水条件下,界面张力、黏度及密度差异的变化使得失稳阈值降低,体系表现出与高剪切等效的强掺混现象。静置后,各体系均恢复为界面清晰、相互独立的双层结构^[21,30-31]。由此可见,白油-水体系在界面稳定性与分相行为上具有良好的代表性。由于极性差异显著、分子间作用较弱而呈低互溶性,该体系能够较为准确地反映非混溶体系的界面特征。

2.1.2 界面演变特征和掺混机理

在非混溶体系(如水-油、液氨-成品油、甲醇-重油等)顺序输送过程中,局部掺混现象普遍存在。与传统成品油体系相比,该过程更为复杂,受到密度差、黏度比及界面张力等多因素影响。已有研究基于数值模拟对液氨-汽油、甲醇-柴油等体系的两相流动进行了系统分析,揭示了界面演变与掺混的主要特征与控制因素^[21-25,28-29],为本文的实验设计与机理分析提供了依据。在此基础上,进一步通过两

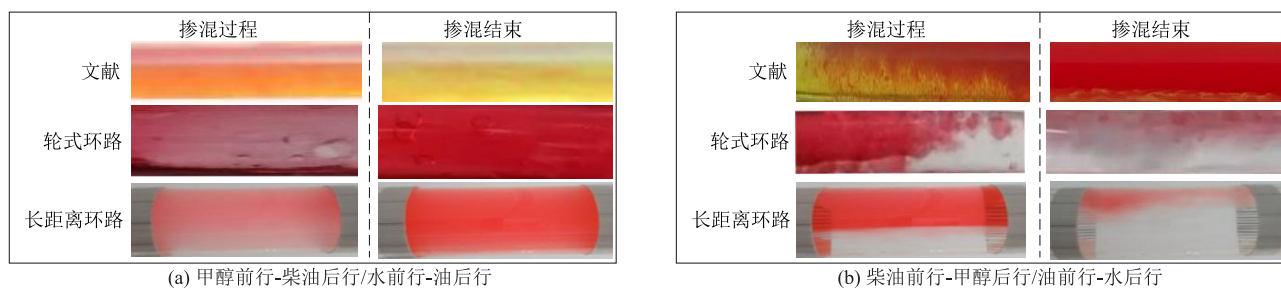
种环路实验考察了典型非混溶体系顺序输送的掺混机理,并评估了实验方法的可行性。在不同管段位置及流速条件下,轮式环路所观察到的界面波动、卷曲、局部断裂等现象,与数值模拟的结果高度一致(图4)。同时,将本文的两种环路实验结果与已有实验进行对比(图5),在相近条件下,两组体系均呈现出一致的掺混特征与演化趋势。对比发现,密度差主要决定两相的空间分布,而掺混过程主要受黏度比与壁面润湿及吸附控制。低黏度相(水、氨醇等)易在流体剪切下发生指状侵入或卷吸,而高黏度相(如油或部分成品油)更倾向于被剪切剥离并沿壁面形成连续薄膜。进一步对比发现,“低黏度先行”常得到前沿较稳定、掺混区较短且壁膜连续的结构;而“高黏度先行”则更易形成指状前沿与较长的掺混区,且通常伴随薄膜残留。非混溶体系的界面演变主要受剪切扰动、重力不稳定和湍流破碎三种机制的竞争与协同作用控制。低流速时由重力不稳定性主导;中流速时由剪切扰动与湍流共同作用;高流速时由湍流破碎主导,使界面细化为大量微小液滴。综上,上述实验揭示了典型非混溶体系中多机制协同下的界面演化规律和掺混机理,为顺序输送中界面稳定性分析与混合控制提供了实验依据。



文献1为液氨-汽油顺序输送模拟^[28];文献2为甲醇-柴油顺序输送模拟^[24]。

图4 非混溶体系界面演变特征对比

Fig. 4 Comparison of interfacial evolution characteristics of immiscible systems



文献中实验使用染为红色的甲醇^[29]。

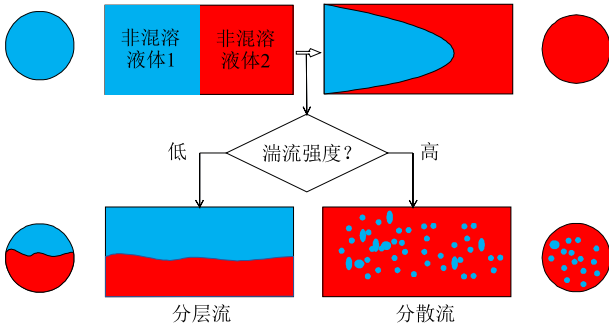
图5 不同批次顺序下掺混特征对比

Fig. 5 Comparison of mixing characteristics under different batch sequences

2.2 流型转变特征与演化规律

2.2.1 流型转变判据与临界条件

上述多种混油机制的共同作用决定了非混溶体系顺序输送过程中界面流型的演变(图6)。本文采用HINZE^[32]提出的湍流液滴分散理论,建立了非混溶体系中由分层流向分散流转变的判据框架。当湍流诱发的局部压力波动超过界面张力时,液滴发生破碎并形成分散流。根据该理论,连续相中分散相液滴的临界直径(\tilde{d}_{MD})可用式(3)和式(4)计算。



非混溶体系中液体1为成品油;液体2为液氨、甲醇或水等。

图6 非混溶体系顺序输送流型演变机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flow pattern evolution mechanism for sequential transportation of immiscible liquids

$$\tilde{d}_{MD} = \frac{0.549}{W_c^{0.6} f_m} \quad (3)$$

$$W_c = \frac{d \rho_m v_m^2}{\sigma} \quad (4)$$

式中, f_m 为混合流体摩擦阻力系数; d 为管道内径, m ; ρ_m 为混合流体密度, kg/m^3 ; v_m 为混合流体流速, m/s ; σ 为两相界面张力, N/m 。

为了避免分散相在管道顶部积聚,一般需要强湍流,使液滴在湍流和浮力的作用下保持平衡,此时分散相的临界直径(\tilde{d}_{CB})可用式(5)和式(6)^[33]计算。

$$\tilde{d}_{CB} = \frac{3}{8} f_c \frac{\rho_c}{|\rho_c - \rho_D| \cos \theta} F_r \quad (5)$$

$$F_r = \frac{v_c^2}{dg} \quad (6)$$

式中, f_c 为连续相摩擦阻力系数; ρ_c 为连续相密度, kg/m^3 ; ρ_D 为分散相密度, kg/m^3 ; θ 为倾角, rad ; v_c 为连续相速率, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

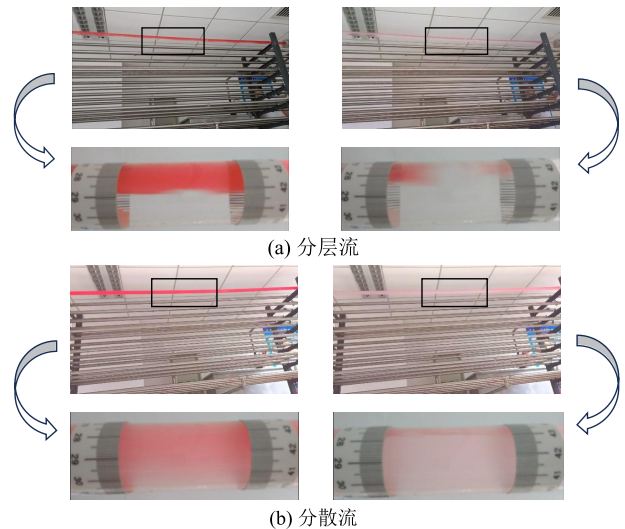
在这种情况下,从广义分层流过渡到完全分散流的临界条件需满足式(7)。

$$\tilde{d}_{MD} \leq \tilde{d}_{CB} \quad (7)$$

2.2.2 流型演变特征

根据式(3)~式(7)计算,分层流向分散流转换的临界速率在 $0.6 m/s$ 左右。取初始入口油塞长度为 $50 m$,保持介质体系(白油-水,下同)、管径及温度

(约 $25^\circ C$)等其他条件一致,仅改变流速进行实验(图7)。结果表明,在低流速($0.5 m/s$)时,重力与较弱流体剪切共同作用,油水界面总体趋于平直;输送至 $560 m$ 后,油相全部与水相形成分层流。在高流速($1.0 m/s$)时,流体剪切与湍流作用占优,界面失稳并进入分散流状态。经过 $560 m$ 的输送距离后,油相前后段仅有少部分与水相发生混合,形成局部掺混的分散流状态,而中间大部分区域仍保持单相流动。因此,高流速显著增强了局部混合,但掺混区被约束在两端,整体掺混范围被有效控制。为进一步分析流型演化中不同输送顺序对掺混行为的影响,本文采用“水-油-水”三批次切换进行观察,结果见图7。由图7可知,水先行(低黏度在前)时,掺混区较短而掺混浓度较高;油先行(高黏度在前)时,掺混区明显延长,但掺混浓度较低,表现出显著的拖尾现象。其原因在于,水先行时,后续油相因界面位置不稳定且流速较低,易受重力不稳定性驱动发生破碎,虽形成高浓度掺混区,但持续时间短、空间范围有限;油先行时,高黏度油相在壁面铺展形成连续油膜,后续水流虽然有一定的冲刷作用,但仍易在管壁残留,导致掺混段变长,产生明显的拖尾现象。总体来看,掺混行为主要受黏度差和润湿性的协同控制。水先行导致短促而剧烈的混合,油先行则更易形成沿壁滞留与持续拖尾。



各分图左侧为水先行-油后行,右侧为油先行-水后行。

图7 不同流型中的掺混特征

Fig. 7 Mixing characteristics under different flow patterns

2.3 批次长度和流速对掺混特征的影响

2.3.1 批次长度

在保持介质体系、管径及温度等条件一致的前提下,选取两种典型流速 $0.5 m/s$ 和 $1.0 m/s$ (分别对应

分层流和分散流),仅改变入口油塞长度(50~200 m),对比分析不同批次长度对掺混长度(含油段长度)和混油比例(平均含油率)的影响。

(1)对掺混长度的影响

将入口处油塞长度用 L_{in} 表示,含油段(纯油段+掺混段)长度用 L_{out} 表示,长度统一按照50 m归一化处理,不同流型中含油段长度和持续时间随入口油塞长度的变化见图8。

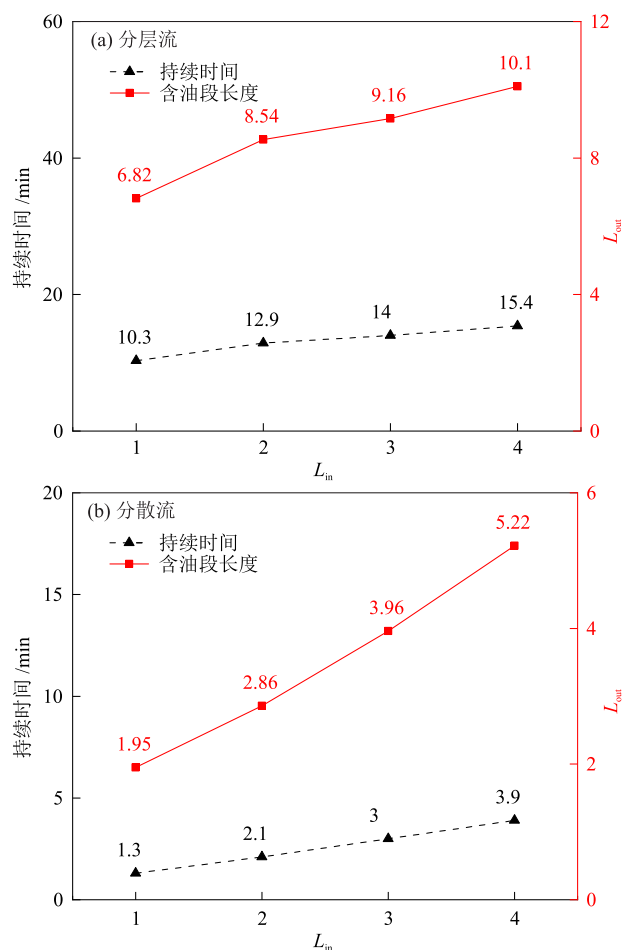


图8 不同流型中含油段长度和持续时间随入口油塞长度的变化

Fig. 8 Variations of oil-containing section length and duration with inlet oil slug length under different flow patterns

通过对比发现,随着入口油塞长度增加,含油段长度和持续时间均显著增加。在分层流中, L_{out} 从6.82增大至10.10,绝对增量达3.28,增大率为48%;而在分散流中, L_{out} 从1.95增大至5.22,绝对增量达3.27,且增大率高达168%。分散流的含油段长度最低降至分层流的28.56%。这是由于在分层流中,界面的不稳定性主要受重力主导,油相易在壁面形成连续油膜并随流迁移,水相以近恒定效率剥离/夹带,因而掺混长度呈线性累积,拖尾更长。而在分

散流中,流体剪切与湍流效应增强,界面破碎加剧、油滴显著细化,掺混区集中于油塞前后缘,中部则较为清晰,因而总体掺混段更短,但相对增加率更高。综上,批次长度是控制掺混长度与持续时间的关键因素,在分层流中表现为“线性累积+拖尾延伸”,而分散流中呈现“边缘集中+相对增长快”的特征。适度缩短入口油塞长度可有效减少拖尾并提高界面稳定性。

(2)对混油比例的影响

本文将出口混合段流体中油相体积占比定义为混油比例,以表征出口平均含油率。通过对比分析发现,随着入口油塞长度的增加,两种流型的出口平均含油率随之升高(图9)。其中,在分层流中出口平均含油率由14.76%升高至39.50%,绝对增量为24.74%,增长率为168.0%,呈近似线性上升。而在分散流中,出口平均含油率由51.70%升高至76.40%,绝对增量为24.70%,但增长率仅为47.8%,并且表现为先快后慢,其中在50~100 m(入口油塞长度)区间内升高最快,随后逐步减缓直至进入平台期。在相同入口油塞长度下,分散流的出口平均含油率整体高于分层流,绝对增量平均为40.89%,约为分层流的2.68倍。原因在于,在分层流中油相主要以壁面成膜和上层聚集的形式存在,扩散范围大,因此出口平均含油率基线较低。但是,由于油黏度大,油相易在管壁形成稳定油膜,油膜沿程持续被水以近似恒定效率剥离和夹带,使出口平均含油率随油塞长度增加线性累积,整体升高趋势稳定。相比之下,在分散流中较强的流体剪切与湍流

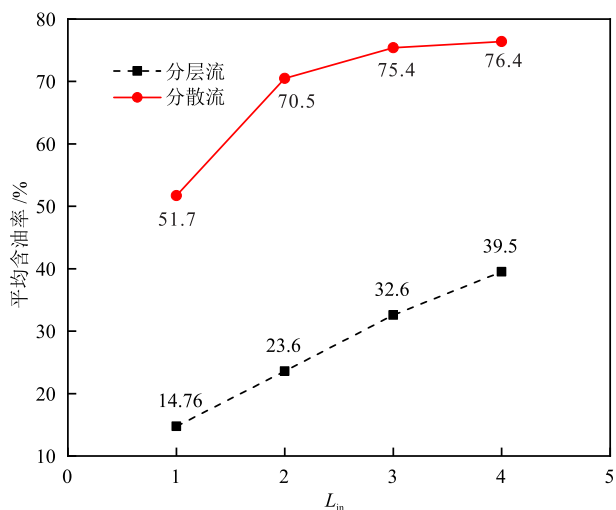


图9 不同流型中出口平均含油率随入口油塞长度的变化
Fig. 9 Variation of outlet average oil content with inlet oil slug length under different flow patterns

诱发界面破碎,油相细化为大量微小油滴并被水相稳定携带,整体掺混程度显著提升,因而出口平均含油率基线较高。随着入口油塞长度进一步增加,体系中油滴数量趋于饱和,破碎与并聚达到动态平衡,出口平均含油率升高逐渐趋缓。综上,出口平均含油率随入口油塞长度增加而升高,同时受流型显著影响。分层流中掺混行为以油膜累积为主,而分散流中出口平均含油率虽高,但易受携油能力限制,实际工况应优先选用较短的入口油塞长度。

2.3.2 流速

在保持介质体系、管径及温度等条件一致的前提下,保持分散流状态,设置 1.0 m/s 和 1.5 m/s 两种流速开展实验,研究流速对掺混特征的调控规律,结果见图 10。由图 10 可知,随着入口油塞长度的增加,两种流速下的含油段长度均呈逐步增加趋势。除入口油塞长度为 100 m 的工况外,流速为 1.0 m/s 时的含油段长度普遍长于流速为 1.5 m/s 时,平均长 3.47%,与数值模拟结果一致^[29]。而从混油比例可以看出,在流速为 1.0 m/s 时,出口平均含油率由 51.7% 升至 76.4%,总体呈升高趋势并逐渐趋于平

台。在流速为 1.5 m/s 时,出口平均含油率由 56.4% 升至 77.8%,整体水平更高,但在入口油塞长度为 100 m 时略低于流速为 1.0 m/s 时。最终,在长油塞条件下,两种流速的出口平均含油率均进入平台段,表明体系已达到稳定的油水分布状态。这是由于随着入口油塞长度增加,油水接触时间延长、界面面积增大,油相在较强流体剪切作用下更易破碎为细小油滴并被水相稳定夹带,导致含油率快速升高;随后体系趋于“破碎-并聚”与壁膜冲刷的准稳态,混油比例进入平台段。在流速为 1.5 m/s 时,尽管掺混程度更高,但强流体剪切也加快了油滴聚并和壁膜排空,导致出口平均含油率在入口油塞长度为 200 m 时出现轻微回落。

总体来看,流速对混油行为具有双重调控效应。一方面,提高流速会增强流体湍流与壁面剪切作用,加剧了对油膜的冲刷和剥离,导致掺混区整体长度缩短;另一方面,提高流速会强化流体剪切促使油相破碎为微小油滴,显著提高了夹带稳定性,从而提升出口平均含油率。上述结论可以概括为:高流速“浓而短”,低流速“稀而长”。

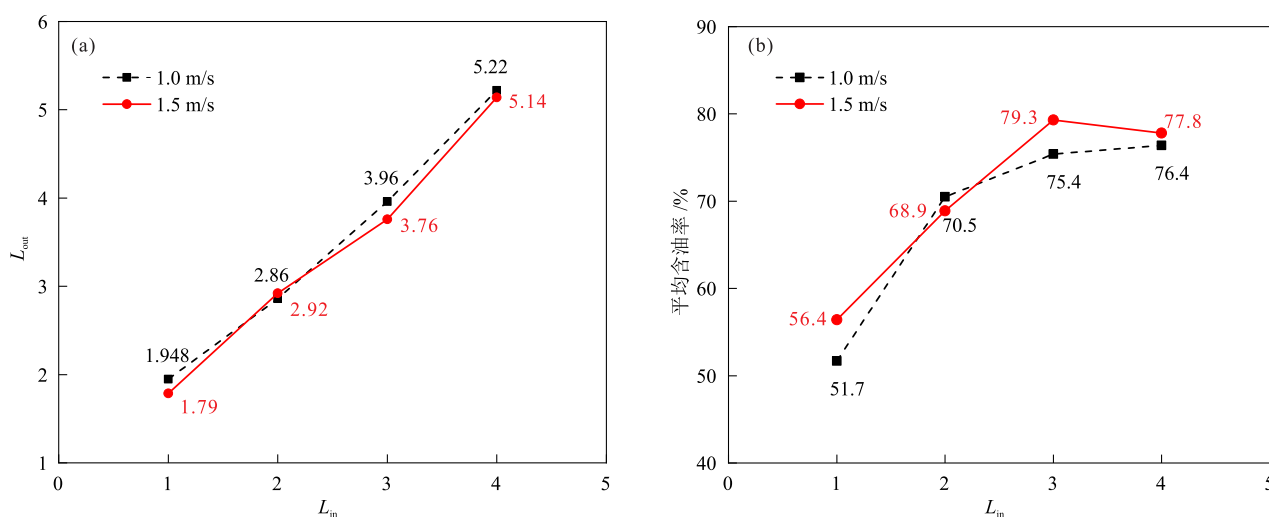


图 10 分散流中不同流速对掺混特征的影响

Fig. 10 Effect of flow velocity on mixing characteristics in dispersed flow

2.4 局限性和展望

本文基于室内全可视化轮式环路及长距离缩尺多相流环路,通过实验获得了白油-水非混溶体系顺序输送过程中掺混特征的可视化结果与定量数据,为非混溶体系掺混机理的分析提供了数据支撑。然而,实验室条件与实际工程环境仍存在一定差异。首先,实验中未引入现场常见的管道粗糙度及杂质扰动等因素,可能低估界面波动和非稳态掺混过程的复杂性。其次,本文实验均以水平管道为

主,虽然轮式环路具备旋转特性,但仍未充分考虑倾斜或大落差管道中重力分层、界面变形及回流行为的影响,这在实际输送工况下可能显著改变界面形态与掺混特征。此外,本文采用的白油-水体系虽为代表性的非混溶体系,但与实际工况中其他非混溶体系(如氨醇-部分成品油等)在黏度、密度和界面张力等物性参数上存在一定差异,且未考虑如液氨或甲醇体系在热力学相变等特殊性质方面的差异。因此,本文所提出的定性规律在工程推广时仍需结

合具体介质物性条件进行修正与再分析。

未来研究可结合多尺度数值模拟与现场中试试验,拓展实验参数与管道构型的范围,重点关注非水平管道(倾斜、大落差管道)条件下的界面演化机制与多场耦合效应对掺混区边界与混油比例的影响。在此基础上,有望构建出更具普适性与工程适用性的掺混预测模型,形成面向工程应用的掺混控制与优化策略,这对非混溶体系(如储氢载体-部分成品油等)的顺序输送设计与安全运行具有重要的理论价值与工程参考意义。

3 结论

本文基于全可视化轮式环路与565 m长距离缩尺多相流环路开展实验,系统研究了白油-水非混溶体系顺序输送的掺混行为,揭示了非混溶体系的界面演变及掺混机理,识别了主控因素,并提出了顺序输送的优化策略,得到如下主要结论。

(1)白油-水与液氨-汽油和甲醇-柴油等体系的界面演变与掺混特征具有良好相似性,验证了其在非混溶体系顺序输送研究中的代表性。非混溶体系的掺混过程受流体剪切、湍流扰动及重力不稳定性共同控制。

(2)低流速可形成稳定的分层流,界面平整、掺混区范围广;高流速可形成分散流,界面扰动增强、掺混区缩短。相比油相先行,水相先行掺混更集中,有利于提升顺序输送效率。

(3)初始油塞长度与流速共同决定了掺混长度与含油率。油塞长度越长,含油段越长、含油率越高。提高流速可强化流体湍流与剪切,在缩短掺混长度的同时提高含油率。实验条件下,分散流中含油段长度最低可降至分层流的28.56%,出口平均含油率为分层流的2.68倍。

(4)在确保压降与能耗可控的前提下,建议采用较短的初始油塞,以较高流速保持分散流状态,并优先选择“低黏度相”先行的批次顺序,以提升输送效率。

参考文献

- [1] 卢迪,王永昌,王帝,等. 海洋封存CO₂泄漏扩散特性研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(9): 75-82.
LU D, WANG Y C, WANG D, et al. Research progress on CO₂ leakage and diffusion characteristics of ocean storage [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2025, 50(9): 75-82.
- [2] 曲顺利,刘翔,王武昌. 管道内天然气水合物沉积实时监测系统研究[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(2): 162-167.
QU S L, LIU X, WANG W C. Study on real-time monitoring system for gas hydrate deposition in pipelines [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(2): 162-167.
- [3] 杨明,李龙冬,张伟凯,等. 氢能管道输送技术发展现状与分析[J]. 现代化工, 2025, 45(5): 25-30+36.
YANG M, LI L D, ZHANG W K, et al. Development status and analysis of hydrogen pipeline transportation technology [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(5): 25-30+36.
- [4] LEUCHTENBERGER R F, BIAZUSSI J L, VERDE W M, et al. Experimental analysis of water/oil displacement tests in horizontal pipe [J]. SPE Journal, 2021, 26(5): 2993-3010.
- [5] WANG Y, WEI N, WAN D J, et al. Numerical simulation for preheating new submarine hot oil pipelines [J]. Energies, 2019, 12(18): 3518.
- [6] LI H, CAO X W, LIU Y, et al. Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges [J]. Energy reports, 2022, 8: 6258-62691.
- [7] 王鑫,陈叔平,朱鸣. 液氢储运技术发展现状与展望[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 500-514.
WANG X, CHEN S P, ZHU M. Development status and prospect of liquid hydrogen storage and transportation technology [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(1): 500-514.
- [8] 李敬法,李建立,王玉生,等. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(2): 856-871.
LI J F, LI J L, WANG Y S, et al. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(2): 856-871.
- [9] 尹鹏博,曾培琰,滕霖,等. 国内外液氨管道输送技术标准对比分析[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(11): 81-89.
YIN P B, ZENG P Y, TENG L, et al. Comparative analysis of domestic and foreign liquid ammonia pipeline transportation technical standards [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(11): 81-89.
- [10] ZHANG T T, URATANI J, HUANG Y X, et al. Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 176: 113204.
- [11] YANG M, HUNGER R, BERRETTONI S, et al. A review of hydrogen storage and transport technologies [J]. Clean Energy, 2023, 7(1): 190-216.
- [12] 赵赏鑫. “双碳”目标驱动下甲醇高质量发展路径与储运体系重构[J]. 油气储运, 2025, 44(9): 961-970.
ZHAO S X. High-quality development path for methanol and reconfiguration of its storage and transportation system driven by the “dual carbon” goals [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 961-970.
- [13] 姜海,王宇霖,刘文质,等. 氢基能源多元化储运体系研究[J]. 现代化工, 2025, 45(5): 17-24.
JIANG H, WANG Y L, LIU W Z, et al. Study on diversified storage and transportation system for hydrogen-based energy [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(5): 17-24.
- [14] 邢承治,赵明,尚超,等. 有机液体载氢储运技术研究进展及应用场景[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 643-651.
XING C Z, ZHAO M, SHANG C, et al. Research progress

- and application scenarios of storage and transportation technology with liquid organic hydrogen carrier [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 643-651.
- [15] 尹鹏博, 曾培琰, 滕霖, 等. 国内外液氨管道输送技术标准对比分析[J]. *低碳化学与化工*, 2024, 49(11): 81-89.
YIN P B, ZENG P Y, TENG L, et al. Comparative analysis of domestic and foreign liquid ammonia pipeline transportation technical standards [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(11): 81-89.
- [16] 张岩, 王旭升, 林羲, 等. 新型氢储运技术发展及应用现状[J]. *科技导报*, 2025, 43(7): 67-78.
ZHANG Y, WANG X S, LIN X, et al. Development and application status of new hydrogen storage and transportation technologies [J]. *Science & Technology Review*, 2025, 43(7): 67-78.
- [17] 张慧敏, 田磊, 孙云峰, 等. 有机液体储氢研究进展及管道运输的思考[J]. *油气储运*, 2023, 42(4): 375-390.
ZHANG H M, TIAN L, SUN Y F, et al. Progress of research on hydrogen storage in organic liquid and thinking about pipeline transportation [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(4): 375-390.
- [18] 黄维和, 刘刚, 陈雷, 等. 中国成品油管道顺序输送混油研究现状与展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 122-129.
HUANG W H, LIU G, CHEN L, et al. Current status and prospect of studies on mixed oils in batch transportation of multi-product pipelines in China [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 122-129.
- [19] 倪玮隆. 成品油管道运行模式对比分析研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
NI W L. Research on the comparative analysis of operation mode of multi-product pipelines [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [20] 陈海宏, 左丽丽, 吴长春. 成品油管道批次计划优化方法研究进展[J]. *油气储运*, 2020, 39(10): 1103-1108.
CHEN H H, ZUO L L, WU C C. Research progress on optimization methods for batch scheduling of multiproduct pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(10): 1103-1108.
- [21] 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(9): 1034-1044.
YANG W, HUANG S S, YIN P B, et al. Transient flow and mixed oil characteristics of the methanol-refined oil batch transportation [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(9): 1034-1044.
- [22] 陈帝武, 史博会, 闫锋, 等. OLGA 软件模拟甲醇-柴油顺序输送混油长度适用性分析[J]. *油气储运*, 2025, 44(9): 989-997.
CHEN D W, SHI B H, YAN F, et al. Applicability analysis of mixed oil length simulation using OLGA software for methanol-diesel batch transportation [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(9): 989-997.
- [23] 尹鹏博, 黄尚圣, 黄鑫, 等. 甲醇成品油管道顺序输送混合规律[J]. *化学工程*, 2025, 53(5): 42-47.
YIN P B, HUANG S S, HUANG X, et al. Mixing rules of methanol-product oil pipeline batching transportation [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2025, 53(5): 42-47.
- [24] 刘翠伟, 艾丽纳, 杜长慧, 等. 甲醇/柴油顺序输送混油规律模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(2): 205-213.
LIU C W, AI L N, DU C H, et al. Simulation of mixed oil law of methanol/diesel in sequential transportation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(2): 205-213.
- [25] 黄鑫, 施鸿翔, 王良旭, 等. 水平管道中甲醇和汽油顺序输送过程混油规律研究[J]. *油气与新能源*, 2024, 36(4): 57-66.
HUANG X, SHI H X, WANG L X, et al. Study on the mixed oil law in the batch transportation of methanol and gasoline in horizontal pipeline [J]. *Petroleum and New Energy*, 2024, 36(4): 57-66.
- [26] 涂仁福, 梁永图, 邵奇, 等. 绿氨-成品油综合运输系统适应性分析与规划[J]. *油气储运*, 2024, 43(4): 361-372.
TU R F, LIANG Y T, SHAO Q, et al. Adaptability analysis and planning of green ammonia and product oil integrated transmission system [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(4): 361-372.
- [27] 黄明月, 涂仁福, 廖琦, 等. 大落差成品油管道改输液氨系统参数适应性分析[J]. *油气储运*, 2025, 44(5): 508-519.
HUANG M Y, TU R F, LIAO Q, et al. Adaptability analysis of the parameters of liquid ammonia system for the conversion of large-drop refined oil pipeline [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(5): 508-519.
- [28] 黄鑫, 施鸿翔, 李逸龙, 等. 液氨与成品油顺序输送过程两相流动规律研究[J]. *油气储运*, 2024, 43(10): 1099-1108.
HUANG X, SHI H X, LI Y L, et al. Study on the two-phase flow behavior in batch transportation of liquid ammonia and product oil [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(10): 1099-1108.
- [29] 刘翠伟, 杜长慧, 杨飞, 等. 甲醇-柴油顺序输送管道混油变化规律实验研究[J]. *油气储运*, 2025, 44(9): 1021-1033.
LIU C W, DU C H, YANG F, et al. Experimental study on the variation law of mixed oil in methanol-diesel batch transportation pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(9): 1021-1033.
- [30] 黄鑫, 李逸龙, 李卫东, 等. 液氨-成品油混合体系相平衡及减压相变规律研究[J]. *化工学报*, 2025, 76(1): 71-80.
HUANG X, LI Y L, LI W D, et al. Research on the phase equilibrium and depressurization phase transition characteristics of liquid ammonia-refined oil mixed system [J]. *CIESC Journal*, 2025, 76(1): 71-80.
- [31] 赵赏鑫, 庞贵良, 邱姝娟, 等. 甲醇-成品油混合体系相溶性规律实验[J]. *油气储运*, 2024, 43(11): 1239-1248.
ZHAO S X, PANG G L, QIU S J, et al. Experimental research on the miscibility law of methanol-product oil blending systems [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(11): 1239-1248.
- [32] HINZE J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes [J]. *AIChE journal*, 1955, 1(3): 289-295.
- [33] BARNEA D. Transition from annular flow and from dispersed bubble flow—Unified models for the whole range of pipe inclinations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1986, 12(5): 733-744.