

成品油管道顺序输送混油控制技术研究进展

方 舟¹, 梁晶莹^{2,3*}

¹陕西博天节能环保科技有限公司, 陕西 西安

²西安石油大学, 油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安

³西安石油大学, 西安市高碳资源低碳化利用重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月22日; 发布日期: 2025年10月31日

摘 要

随着成品油需求的持续增长, 顺序输送技术因其高效经济的优势成为主流输油工艺。然而, 该技术在输送过程中相邻油品界面处的混油问题导致油品质量下降和经济损失。本文系统梳理了混油的产生机理、危害及国内外控制技术的最新研究进展, 包括固体隔离、液体隔离、气体隔离与凝胶体隔离等方法。研究表明, 凝胶隔离技术凭借其优异的流变性能和相容性, 展现出显著降低混油量的潜力, 尤其是油基凝胶因其破胶残渣少、相容性好等特点成为研究热点。未来, 需要进一步深化多物理场耦合模型的研究, 开发环保型隔离材料, 并探索数字孪生技术在混油监测中的应用潜力。此外, 本文还探讨了混油的预测、监测与后处理技术, 指出通过优化输送工艺和采用先进的混油处理技术, 可以有效控制混油的影响。通过合理选择隔离方法和优化输送顺序, 可以显著降低混油量, 提高管道输送效率。

关键词

成品油管道, 顺序输送, 混油控制, 凝胶隔离, 油基凝胶

Research Progress on Mixed Oil Control Technology for Sequential Transportation of Finished Oil Pipelines

Zhou Fang¹, Jingying Liang^{2,3*}

¹Shannxi Botian Energy Saving Environmental Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry, Universities of Shaanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

³Xi'an Key Laboratory of Low-Carbon Utilization for High-Carbon Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

Received: September 30, 2025; accepted: October 22, 2025; published: October 31, 2025

*通讯作者。

文章引用: 方舟, 梁晶莹. 成品油管道顺序输送混油控制技术研究进展[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(4): 467-480.
DOI: 10.12677/amc.2025.134048

Abstract

With the continuous growth of demand for refined oil products, sequential transportation technology has become the mainstream oil transportation process due to its high efficiency and economic advantages. However, the problem of mixed oil at the interface between adjacent oil products during transportation leads to a decrease in quality and economic losses. This paper systematically reviews the generation mechanism, hazard, and control technology research progress of oil mixing at home and abroad, including solid isolation, liquid isolation, gas isolation, and gel isolation. The research shows that the gel isolation technology has the potential to significantly reduce the amount of oil mixed by virtue of its excellent rheological properties and compatibility. Among them, oil-based gel has become a research hotspot due to its less gel-breaking residue and good compatibility. In the future, it is necessary to deepen the research on multi-physics coupling models, develop environmentally friendly isolation materials, and explore the potential application of digital twin technology in mixed oil monitoring. Additionally, this paper discusses the prediction, monitoring, and post-treatment of mixed oil, pointing out that optimizing transportation processes and using advanced mixed oil treatment technologies can effectively control the impact of mixed oil. By reasonably selecting isolation methods and optimizing transportation sequences, the amount of mixed oil can be significantly reduced, and pipeline transportation efficiency can be improved.

Keywords

Finished Oil Pipeline, Sequential Transportation, Mixing Oil Control, Gel Isolation, Oil-Based Gel

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的快速发展, 成品油的需求量日益增长, 成品油管道运输作为一种主要的运输方式, 因其具备高效、安全和经济等优势, 在全球能源供应链中占据着愈发重要的地位[1] [2]。截至 2023 年, 中国成品油管道总里程已达到约 4.5 万公里, 年输送能力超过 2 亿吨, 且仍保持稳步增长的态势, 预计到 2025 年, 总里程将达到 5.0 万公里, 年输送能力将提升至 2.3 亿吨[1] [3]。然而, 传统的管道输送方式在单向、大量和多品种油品输送方面存在一定局限性。为解决这一问题, 顺序输送技术应运而生, 通过合理调度不同类别的油品, 有效地提高了管道系统的利用率[4] [5]。但顺序输送过程中相邻批次油品在界面接触区域必然会发生掺混现象, 由此产生的混合油品在物理化学性质(如密度、馏程、闪点等关键指标)方面与标准商品油存在显著差异。这种不符合产品质量标准的混油无法直接进入商业销售渠道, 从而导致其市场价值显著降低, 形成不可避免的经济损失[6]-[8]。在减少成品油顺序输送混油量方面, 国内外广泛采用隔离输送方式, 利用缓冲液、互不相溶的液相、气相或凝胶体等将相邻油品完全隔离, 其经济效益和隔油效果都已得到充分验证[9] [10]。当前, 国家石油天然气管网集团有限公司已将成品油管道顺序输送技术列为“十四五”科技攻关重点, 计划投入 15 亿元专项经费建设智能输送研发中心, 并在西气东输三线、中俄东线等战略通道开展技术集成示范。然而, 国内在关键隔离技术领域仍存在显著短板: 凝胶体隔离技术方面, 自主研发的聚硅氧烷基凝胶耐温上限仅 80℃, 远低于国际同类产品 120℃的技术指标, 在西南山区管道应用中因温度波动导致隔离失效率达 4.2%; 液体隔离技术方面, 国产隔离液表面张力调控范

围局限在 25~35 mN/m, 难以适配不同粘度油品的界面特性, 导致长江三角洲管网混油量增加 18% [11]; 耐磨隔离球领域, 国产聚氨酯基材料在 10 MPa 压力下的体积磨损率达 $0.15 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$, 较德国 ContiTech 公司产品高 3 倍, 致使塔里木盆地输油管道年均更换隔离球数量超 2000 个。这种技术差距直接制约着管网运营效率——据统计, 华北地区成品油管网因隔离技术缺陷导致的年混油量达 12 万吨, 相当于损失 3.6 亿元经济效益。面对国内成品油消费量年均 4.5% 的增长速度, 以及新能源汽车冲击下油品型号精细化发展趋势, 现有技术体系已难以满足多频次、小批量、高精度的输送需求。为此, 国家管网正联合清华大学等机构攻关新型纳米复合隔离材料, 其阶段性成果显示, 氧化石墨烯增强型隔离球的耐磨性能提升 40%, 并在陕京四线实现连续 500 公里无故障运行。未来三年, 随着“智慧管网 2030”专项的实施, 国产隔离技术有望突破高温稳定性、动态适配性等核心技术瓶颈, 支撑我国成品油管道年周转能力突破 3 亿吨大关。

2. 混油的产生和危害

2.1. 混油的产生

顺序输送是一种通过单条管道连续输送多种石油产品的先进工艺[11][12]。该工艺主要适用于轻质油品(如汽油、煤油、柴油)、液化石油气以及重质油品等不同油品系列的输送。在实际应用中, 不仅可对同一油品类型中不同规格或牌号的产品进行批次输送, 还可根据炼化需求对不同油田、物性各异的原油实施分批顺序输送[13]。在技术实施层面, 顺序输送主要采用两种界面处理方式: 其一是在不同油品之间设置机械隔离器或注入隔离液; 其二是允许相邻油品直接接触输送。但是这两种方式均会导致油品界面处产生不同程度的混油现象[14]; 具体输送方案的选择需综合考虑管道地形起伏状况、混油控制标准等工程参数。相较于建设多条单一油品输送管道, 顺序输送工艺在投资成本、运营效率等方面展现出显著的经济优势[15]。尽管该工艺不可避免地会产生混油, 但通过先进的混油处理技术可有效控制其影响。正是基于这些技术经济特性, 顺序输送已成为长距离成品油管道运输领域的主导工艺方案。19 世纪末期, 美国开创性地在石油运输领域应用了顺序输送技术, 首次实现了三种不同等级煤油的交替输送。进入 20 世纪 30 年代后期, 壳牌石油管道公司(美国)在其运营的伍德河至莱马输油管道系统中, 创新性地采用染色标记技术, 通过添加着色剂实时追踪汽油与煤油这两种密度相近油品在界面处的混合情况[16]-[18]。20 世纪 40 年代是该技术取得重大突破的时期, 随着混油形成机制研究和理论计算方法的不断完善, 这种输送方式在全球长距离成品油管道建设中得到了普遍应用。此时通过单条管道顺序输送的油品种类已扩展至十余个大类, 而不同规格和型号的产品更达到数百种之多。我国于 1980 年末在广东省湛江至茂名原油管道首次实施顺序输送作业, 成功实现了大庆油田(高含蜡)与胜利油田(高含硫)原油的交替输送[19]。值得关注的是, 为提升管道运输系统的利用率, 法国和美国等发达国家近年来研发了新型输送模式, 即在传统成品油管道中引入原油与成品油的混合顺序输送技术[20], 进一步加大了混油的产生量 and 处理成本。管道中混油区域的产生扩展过程由多因素协同作用驱动, 在柴油和汽油顺序输送时混油结果如图 1、图 2 所示, 随着后行油品输送时间增加, 其逐渐侵入前行油品形成动态混合区, 尤其在管壁附近因层流滞留效应形成混油尾; 管道横截面上流速呈径向不均匀分布(中心最高达 2.5 m/s, 壁面流速降低 30% 以上), 导致后行油品呈楔形分界面分布并被中心高速流体持续推动形成延伸混油头[17][21][22]。

同时, 对流扩散与紊流扩散($Re \geq 4000$ 时界面破坏显著)共同扩大混合区域, 其中紊流扩散引发的质点交换进一步削弱楔形界面稳定性; 而近壁面区域的层流流动特性使前行油品受粘性附着力作用减速, 后行油品通过冲刷作用在此形成混油尾, 这种效应在柴油先行时尤为明显(混油尾稳定附着于管底并伴随周期性涡旋脱落)[23][24]。在层流流动条件下, 管道横截面上的速度分布呈现典型的抛物线型速度剖面

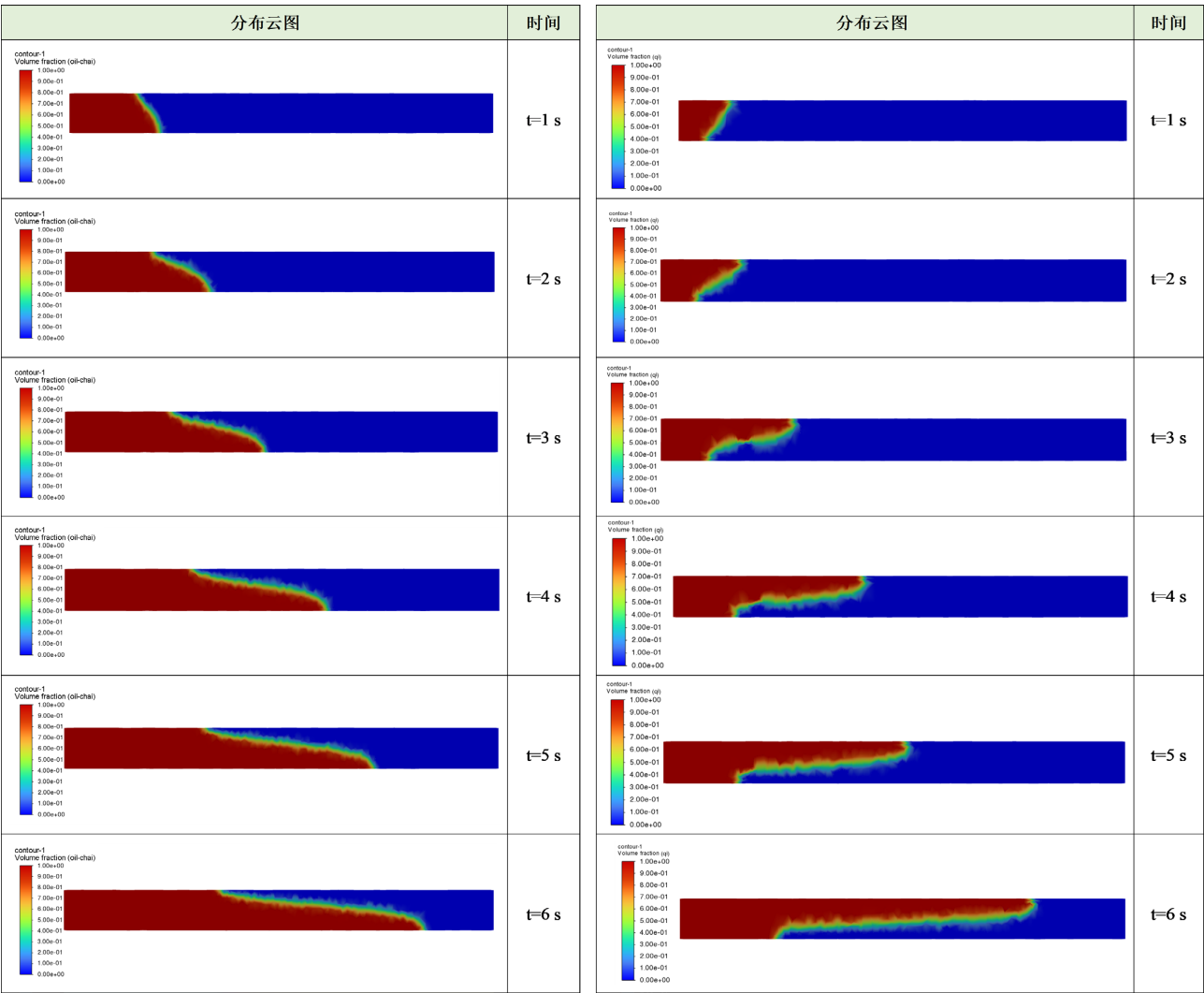


Figure 1. Mixing oil condition simulation (left: gasoline first; right: diesel first)

图 1. 混油状况模拟(左: 汽油先行; 右: 柴油先行)

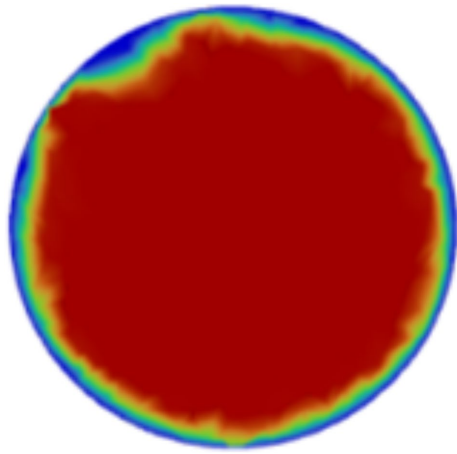


Figure 2. Cross-section diagram of straight pipe outlet

图 2. 直管出口截面图

(图 3(a)), 其中管道轴线处的最大流速达到截面平均流速的两倍。当流动进入湍流状态时, 由于流体微团的强烈掺混作用, 速度分布趋于平坦化(图 3(b)), 最大流速与平均流速的比值显著降低。值得注意的是, 在两种油品的界面区域, 由于中心流速较高, 后行油品会向前行油品中楔入, 形成特征性的锥形界面结构(图 3(c))。此外, 湍流扩散效应主要源于流体中涡旋结构的产生和发展(图 3(d)), 其扩散强度与湍流雷诺数密切相关, 可用湍流强度参数定量表征[25]。

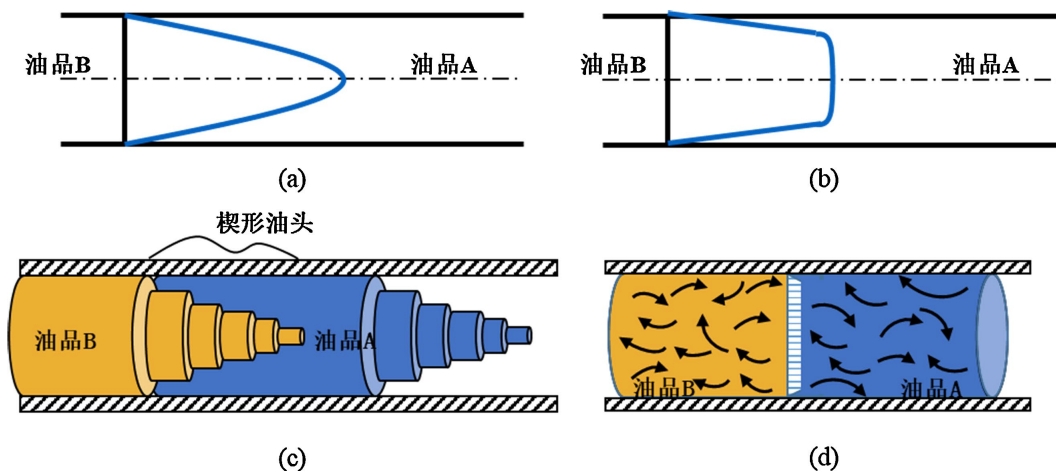


Figure 3. Microscopic simulation of mixing oil
图 3. 混油微观模拟

混油传输过程中, 汽油与柴油因密度、粘度及流动特性的差异呈现显著不同的混合规律。汽油先行时, 低密度流体上浮形成中心高速混油头(最高流速可达 2.5 m/s), 管壁附近因层流滞留形成混油尾, 界面在紊流扩散作用下逐渐破坏并呈指数扩展; 柴油先行时, 高密度流体下沉导致向下倾斜界面(倾角约 8°), 混油区呈锥形扩展, 其高粘度特性使混油尾稳定附着于管底并伴随周期性涡旋脱落。两种工况下, 流速分布不均(管壁流速较中心低 30%)及湍流动能差异(近壁面低湍流强度)共同加剧了界面混合, 但柴油的高粘度显著抑制了扩散速率, 延长了界面清晰时间[16] [26]。混油行为受密度差(影响权重柴油 > 汽油)、粘度比(柴油 > 汽油)及输送流速(汽油敏感性更强)主导, 密度效应通过“上浮/下沉”改变界面形态, 粘度差异则影响混合速率与界面稳定性[23] [24] [27]。工程应用中需根据油品特性优化输运顺序: 柴油优先输送可减少界面扰动, 汽油输送应控制流速低于 2.0 m/s 以抑制混油头发展[28]。未来研究需深化多组分混输界面动力学机制, 并探索数字孪生技术在高精度实时监测中的应用潜力。

2.2. 混油造成的危害

混油所带来的一系列不良影响不容小觑, 其涉及油品质量、经济效益、安全风险以及环境影响等多个重要领域。从油品质量层面来看, 不同类型或标号油品特定的性能指标在出现混油时会发生改变, 从而偏离标准要求, 诸如不同标号汽油混合导致辛烷值变动, 影响发动机点火与燃烧效果; 柴油混入汽油改变其粘度、闪点等指标, 对燃烧及润滑性能产生负面作用[6] [29]。同时, 不同来源或批次油品中杂质与污染物相互作用, 生成新的不溶性物质或胶质, 严重影响油品清洁度与稳定性, 像润滑油混入不同添加剂配方油品后产生沉淀或絮状物, 降低其润滑与抗磨损性能。在经济效益方面, 混油后为使油品达到可销售或使用标准, 需投入额外人力、物力、财力进行调和或专门处理, 多次试验调整配方增加生产成本。若无法调和至原质量标准, 产品只能降级销售, 造成直接经济损失, 例如高标号汽油混油后售价大幅降低[6] [8]。而且混油易在管道内壁形成污垢与沉积物, 加速管道腐蚀磨损, 增加管道维护清洗成本与

停机时间, 影响生产效率[2] [29]。安全风险上, 混油改变油品燃烧特性, 升高火灾与爆炸风险, 其导致的油品性能变化还会损害设备, 增加设备故障概率[2] [26] [30]。环境影响方面, 混油燃烧不充分使排放物增多, 尾气排放超标污染大气; 储存、运输和处理过程中若发生泄漏, 油品有害物质渗入土壤影响植被生长, 进入水体形成油膜破坏水生生物生存环境等[31]。经调研, 华南公司 2021 年输送批次 457 个, 混油量近 17.3 万吨, 混油处理费用约 6800 万元, 若能通过有效手段减少混油量, 其经济效益将十分可观。

3. 混油的预测、监测与后处理

在成品油管道顺序输送工艺中, 油品排序的核心原则是确保相邻批次油品具有相似的物性参数, 从而有效控制界面混油量[11] [32]。首先, 相邻输送油品的密度(重度)和粘度等关键物性参数应当呈现渐进式变化。这种渐进式变化设计既能显著降低界面混油程度, 又可确保输送工况的稳定性。同时, 当不同油品发生不可避免的混合时, 必须确保不会产生有害的物化反应, 特别是要严格控制对油品质量有重大影响的指标参数, 包括但不限于铅含量、闪点等关键质量指标。当实际输送需求无法满足上述物性相近原则时, 可采用隔离缓冲技术。具体措施是在物性差异较大的两种油品之间注入适量过渡油品, 形成有效的物性过渡区[33]-[35]。图 4 美国科洛尼尔成品油管道[36]的油品输送顺序设计具有典型参考价值。其采用对称式输送方案: 优质汽油→普通汽油→航空燃油→煤油→柴油→无铅汽油, 之后按照完全相反的对称顺序(无铅汽油→柴油→煤油→航空燃油→普通汽油→优质汽油)进行输送。这种设计充分体现了物性渐进变化的优化原则。在成品油管道运输中, 混油预测、监测与控制技术的应用主体呈现多元化特征, 国内外能源企业及研究机构通过不同技术路径实现了显著成效。



Figure 4. American Colonial refined oil pipeline
图 4. 美国科洛尼尔成品油管道

在混油监测和后处理方面, 国内外已形成较为成熟的技术体系。研究者利用先进的检测手段, 能够精准监测混油界面和混油量, 采用高效的混油处理工艺, 如高精度的掺混技术、先进的蒸馏分离技术等, 最大程度降低混油带来的经济损失。同时, 学者们对混油机理进行了深入研究, 建立了多种数学模型来

预测混油的形成和发展, 为优化输送工艺提供了有力的理论支持[22] [37] [38]。李继明教授团队[39]从宏观调度策略出发, 提出基于密度差与粘度比的“三级隔离”理论框架, 其 2018 年对国外技术的系统梳理为国内管道设计提供了重要参考; 张阳与李勇[35]通过 CFD 仿真揭示了紊流状态下界面扩散的局部湍流特性, 提出的管壁粗糙度优化方案被应用于中石油华北管道工程, 显著降低了层流附壁导致的混油尾形成风险。黄东魁等[40]构建的雷诺数依赖型混油长度预测模型解决了传统格拉公式未考虑管径影响的局限; 而吕坦[38]结合温度梯度修正后的扩散模型则为高寒地区管道输送提供了适应性更强的理论工具。美国学者 Austin 与 Palfrey [41]在 1963 年进一步开发了分段函数形式的 Austin-Palfrey 公式, 虽未考虑管径变量, 但仍广泛应用于短距离管道设计。近年来, Liang 等[42]考虑成品油管道网络的技术特性, 以由泵、管道和阀门组成的管道系统为研究对象, 利用液压网络的基本定律建立数学模型, 并通过网络分割算法计算, 在一个传输周期内可以获取管道系统中每条分支管道的压力和流量, 从而可以预测混油情况。在成品油管道输送过程中, 针对界面混油问题已发展出多种处理技术, 主要包括物理掺混、蒸馏分离、金属氧化物处理、碱液处理以及过滤分离等方法[43], 在这些方法中, 物理掺混技术因其操作简便、成本效益高等优势, 已成为国际成品油管道行业的主流处理方案。该技术的实施需要满足两个基本条件: 首先, 管输油品需具备足够的质量冗余度; 其次, 掺混后的油品必须确保各项质量指标符合国家标准要求。物理掺混技术的具体操作是将混油按特定比例掺入同类型纯净油品中, 可采用部分掺混或完全掺混两种模式。然而, 该技术存在若干局限性: 其一, 掺混过程会导致油品整体质量下降, 通常需要降级使用; 其二, 尽管掺混后的油品在短期内能够满足质量标准, 但长期储存过程中可能出现稳定性问题。相关研究表明[28] [44], 储存时间延长会导致掺混油品产生组分分离现象, 严重时甚至出现明显的分层问题, 这对油品储存和后续使用均带来不利影响。

4. 顺序输送中减少混油的措施

国外采用管道顺序输送两种性质不同的成品油时, 多采用隔离输送的方式, 即在两种油品之间添加隔离介质来减少混油的产生。国内外目前多采用液体隔离、双液相(气相)隔离、固体隔离器和凝胶体隔离四类方法[43]。国外在成品油管道顺序输送及隔离技术方面起步较早, 研究成果丰富且应用广泛, 在隔离技术上, 除了普遍采用隔离输送方式, 还不断在研发新型隔离材料和设备。

4.1. 固体隔离

固体隔离法一般指在两油品界面处投放隔离球(塞), 隔离球(塞)随油品沿管路推进避免油品间的直接接触, 这是减少混油损失的最有效的方法[45], 理想情况下, 隔离物与管壁紧密接触后无渗流或极小渗流, 从而实现零混油[7] [34]。国内现已成功试制出橡胶隔离球且研制出一套收球、放球、越站、跟踪的技术[46]。倪健乐[47]的固体隔离物研究是最早系统分析隔离球混油机制的文献, 提出通过结构优化减少渗流。后续研究进一步结合数值模拟与现场试验, 验证了改进设计的必要性。在成品油管道顺序输送中, 固体隔离物(如隔离球)被置于两种油品界面处, 通过物理阻隔防止油品直接接触。其核心原理是借助隔离物的密封性和流动性, 随油流移动并维持界面稳定。国内长输管道(如西南管道、海南管道)的顺序输送实践中, 改进型隔离器被用于航煤、柴油的分隔, 通过动态预测模型优化切割点, 显著降低混油损失。国内外学者围绕成品油管道运输中的固体隔离技术开展了广泛研究, 重点聚焦于隔离材料的性能优化、结构设计及其在复杂工况下的适用性。杨亚吉等[48]针对管道清管需求, 开发了“检测-清洗-密封”一体化智能清管器, 通过集成超声波测厚仪与漏磁检测模块, 实现了对油膜残留的高效清除, 实验表明该装置可将管道内混油残留量降低至 8% 以下。吕坦[38]则探索了纳米涂层技术在固体隔离中的应用, 通过实验验证了石墨烯改性涂层(接触角 $> 150^\circ$)对油品附壁行为的抑制效果, 指出该涂层可使混油尾迹长度缩短 40%。

国外研究方面, 日本 JXTG 公司[49]率先研发了聚氨酯泡沫球隔离技术, 其直径 50~100 mm 的泡沫球遇油膨胀至 3 倍体积, 填充管道间隙率达 95%, 并公布了其在北海油田管道中的现场测试数据, 显示混油量减少率达 65%。但固体隔离物与管壁不可避免存在缝隙, 导致后行油品会通过该缝隙向前渗流, 隔离物很难与油品平均流速一致, 可能扰乱混油界面, 从而增加混油量, 同时隔离物的投放与接收显著增加了操作的复杂性, 因此该方法在国内管输企业应用较少[34]。研究表明, 固体隔离技术正从被动防护向主动调控演进, 未来研究需进一步探索材料耐久性、规模化生产工艺及与智能监测系统的协同机制。

4.2. 液体隔离

液体隔离法, 也叫液体缓冲塞(隔离液), 即在顺序输送时的相邻两种原油或成品油之间注入缓冲液以减少混油量, 起缓冲和隔离段塞的作用[11][32][50]。可以作为隔离液的类型有: 与被输送的油品性质相近的第三种油品; 两种油品的混油; 一种或多种非烃类液体等, 隔离液在管道中起缓冲和隔离段塞的作用。其中, 第一、二类隔离液由于与输送油品性质相近, 可统称为缓冲液, 该工艺方式需搭配混油切割工艺来处理混油段[50]。例如: 汽油-柴油交替可放入一段煤油, 汽油或柴油中允许混入煤油浓度比汽油允许混入柴油和柴油允许混入汽油浓度大很多, 可减少需要处理的混油量。在成品油管道顺序输送中, 液体隔离技术通过注入特定功能液体形成物理屏障, 抑制油品间的混合扩散, 其研究核心在于隔离液的性能优化与界面稳定性控制。实验研究与数值模拟揭示了液体隔离的关键作用机制: 一方面, 高密度隔离液(如柴油或煤油)可通过密度差形成稳定的液膜屏障, 阻止低密度油品(如汽油)的侵入, 中石化鲁皖管道[51]采用 97#汽油作为隔离液, 成功将柴油混油量减少 30%~40%; 另一方面, 功能性添加剂(如表面活性剂或纳米粒子)的引入显著改善了隔离液的界面张力与粘弹性, 实验表明添加 10 ppm 硅烷偶联剂的隔离液可使界面稳定性提升 60%。研究进一步发现, 液体隔离的效能受流体动力学条件影响显著, 管壁流速梯度导致的剪切应力会破坏液膜完整性, 而湍流状态下液滴的聚并与分散行为则加剧界面扰动, 这一现象通过 Reynolds 数与 Weber 数的耦合分析得以量化[52]。针对极端工况(如高温高压或长距离输送), 刘富杰[53]提出了创新性解决方案: 超临界 CO₂ 隔离技术通过调控压力与温度使 CO₂ 呈现气体-液体双重相态, 形成低粘度、高扩散率的动态屏障, 其界面张力较常规液体降低 85%, 在 LNG 与原油交替输送中展现出独特优势; 温敏型水基凝胶隔离液则在 40℃~80℃条件下发生相变, 形成弹性膜结构, 有效抑制管壁附壁现象, 现场试验表明其混油残留量可控制在 5%以下[54]。然而, 液体隔离技术仍面临后处理复杂、回收成本高、环境影响大等挑战, 例如生物降解型隔离剂(如 PLA 聚合物)虽可减少二次污染, 但其完全降解周期长达 90 天, 与管道运营效率存在矛盾。未来研究需结合多物理场耦合仿真与智能传感技术, 优化隔离液的注入策略与实时监测系统, 以实现低成本、高可靠性的混油控制。

4.3. 双液相(气体)隔离

双液相隔离法, 也叫气体隔离法, 是将一种同烃类可以溶混的气体插入顺序输送时的相邻两种不同原油或成品油之间, 作隔离段塞用[24]。采用此法顺序输送两种不同原油或成品油的过程中, 该隔离段塞可将前面被隔离液体残留在管壁上的烃溶洗下来, 同时, 又能将后续被隔离液体的超前部分溶混掉[55]。当注入的可溶混气体中的溶烃达到足够数量之后, 即形成了一个不可再混合的双液相隔离段塞。该段塞中的压力只要能保持住, 就不会有气体释放出来, 即可保证良好的隔离效果[56][57]。英国工程师 Griffith 等[58]提出的段塞流抑制技术通过注入气体屏障隔离油品, 被俄罗斯西伯利亚管道采用后成功将柴油混油量降至 8%。在成品油管道顺序输送中, 气体隔离技术[59]通过注入惰性气体(如氮气)或超临界流体构建动态屏障, 利用气液界面张力差与流体动力学特性抑制油品混合扩散。该技术的核心在于气体扩散速率与油品流速的匹配优化, 通过调整气体注入压力与频率, 可实现界面张力的动态调控, 实验数据显示,

当雷诺数超过临界阈值($Re \geq 100,000$)时, 气液混合界面趋于稳定。近年来, 超临界 CO_2 因其独特的流体性质成为研究热点, 其在 25 MPa、50℃ 条件下兼具气体低粘度与液体高扩散率的特性, 可使汽油与柴油界面张力下降 85%, 显著抑制界面扰动[60]。荷兰壳牌在北海风电制氢项目中应用数字孪生技术模拟超临界 CO_2 隔离过程, 通过耦合传质方程与流动模型, 实现了混油风险的精准预测与控制。但是气体在管道中隔离存在管内压力大等不安全因素, 在实际使用中仍需慎重。

4.4. 凝胶体隔离

该技术通过在被输送的相邻油品(包括原油或成品油)或其混合液中添加特定增稠剂, 形成具有特殊流变特性的隔离介质[61], 具体实施过程如下: 首先将增稠剂与其中一种油品或其混合物均匀混合, 配制成具有凝胶特性的流体; 然后将该流体注入管道系统中相邻不同油品之间; 最终在管道输送条件下, 该流体会进一步形成具有优异自持性能的凝胶隔离段塞[62]。该隔离介质在化学组成上区别于传统胶体物质, 实际上是一种具有特殊流变特性的高粘弹性流体。这种新型隔离体系展现出以下关键特性: 首先, 其具备优异的界面阻隔能力, 能够有效防止相邻油品的相互渗透; 其次, 该流体在保持超高动态粘度的同时, 仍维持良好的管道输送流动性; 此外, 在剪切力作用下表现出显著的结构稳定性、较好的非牛顿性和自持性等[63] [64]。清扫型弹性凝胶体隔离塞隔离系统采用葡聚糖类的亲水、非油溶型高分子(不低于 $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)聚合物凝聚而成的高粘($10^2 \sim 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)弹性凝胶配制而成。该方法的主要特点如下: 分隔兼清管、能净化原油、减缓硬质沉积物的形成、耗量小、成本低、易调整、适应性强。以工业用聚丙烯酰胺为主, 在酸性环境中与水 and 工业用甲醛液混合, 合成羟甲基 - 聚丙烯酰胺低粘度混合液最后, 将形成的凝胶状混合物送入盲管、收发球筒内或停运后的增压泵管路内静置一小时即成[65]。可变形功能胶体是指一类具有独特流变行为的软物质材料, 其典型特征包括: 在外力作用下可发生可控形变, 同时保持结构完整性; 具备适度的弹性恢复能力和流动性。从化学组成来看, 这类材料主要由低浓度高分子聚合物(如聚丙烯酰胺、瓜尔胶等)与交联剂通过分子内/间交联作用形成的弱交联凝胶网络体系[10] [66] [67]。该类胶体通常具有优异的机械性能, 即兼具良好的剪切稳定性和界面密封能力; 以及工程适用性, 即已在油气输送领域成功应用于管道清洁、介质回收及批次隔离等工艺环节。研究进展方面, 国内外学者已开展系统研究, 重点关注幂律型流变特性的胶体体系[9]。这类非牛顿流体具有时间无关性、零屈服应力、剪切稀化效应等特征: 静态时呈现凝胶状, 施加剪切力后粘度急剧下降, 表现出类液体流动行为[68], 多数研究表明在直圆管和弯管中, 凝胶以柱塞的形式流动, 压降和管长、长径比成线性关系, 流动能量损失和流速、管长、弯角大小以及收缩比成正比关系, 还发现凝胶表观粘度受剪切速率的影响较为明显, 例如管壁处的剪切速率最大, 其粘度最小, 而且随管径变小, 剪切速率逐渐升高, 粘度也随之变小。在顺序输送工艺中, 将功能性可变形胶体引入不同油品界面区域, 可在管道压力驱动下实现同步移动, 全程维持相邻油品的有效隔离, 显著降低界面混油现象。从制备工艺来看, 主要通过两种途径获得功能性隔离剂: 其一是以水为分散介质, 通过水溶性高分子聚合物(如聚丙烯酰胺、葡聚糖衍生物或聚乙烯吡咯烷酮等)与交联剂的反应制备[54] [69] [70]; 其二则是直接在输送介质中添加特定增稠组分(如脂肪酸盐或环烷酸盐类化合物), 在管道剪切条件下形成具有自持能力的粘弹性体系。工程实践表明, 该技术已取得显著成效。以苏尔吉特 - 帕诺茨克管道工程为例, 采用弹性凝胶隔离系统后, 不仅有效控制了混油现象, 在管径 1220 mm 的工业试验中更展现出优异的运行性能, 使管线输送能力每日提升达 1500 吨。王树立等[71]开发的集成化隔离系统进一步验证了该技术的可靠性, 其采用聚丙烯酰胺/柠檬酸铝交联体系制备的水基胶体, 配合专用注入回收装置, 仅需 5~15 倍管径的隔离段塞即可实现 77% 以上的混油量降低, 同时兼具管道清洁和防腐功能。

胶体隔离技术较传统方法具有多方面优势: 优异的流变性能使其能够自适应管道形变, 保持 90% 以

上的截面密封效率；独特的自修复特性确保其在经历泵组剪切后能快速恢复原始粘度；此外，还具有经济环保(成本降低 40%~60%)、设备友好(磨损率 $< 0.01\%$)等显著特点[72] [73]。这些特性使其成为多品种油品顺序输送的理想选择，在不影响正常输送工况的前提下，实现了管道维护与油品隔离的双重功效，展现出广阔的应用前景。化学凝胶封隔技术的核心是基于“结构流体流变学”和“高分子化学交联”等理论形成的粘弹性凝胶，旨在利用可动胶体密封性、变形性、流动性和抗剪切性等诸多特异性能隔离顺序输送油品[74]。综上所述，考虑到我国成品油管道输送特点多为单管顺序输送，综合多种隔离方式的优缺点及工艺条件，建议采用凝胶体隔离的方式满足对成品油管道顺序隔离输送工艺的需求，减少混油量，提高成品油管道输送能力，如图 5 所示。企业实践层面，中石化研发团队通过温敏型水基凝胶隔离液(与双阀组联动控制技术(响应时间 < 50 ms)，在湛江 - 北海输气管道中将混油量控制在 2%以内。在成品油管道顺序输送中，凝胶隔离技术通过注入具有三维网络结构的高分子材料形成半固态屏障，利用其剪切稀释特性与界面吸附效应抑制油品间混合扩散[75] [76]。研究表明，温敏型水基凝胶在特定温度范围内(如 $40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$)发生相变形成弹性膜层，可有效封堵管壁缺陷并降低界面能，中石油管道研究院的现场试验表明，注入浓度为 2%的聚丙烯酰胺/黄原胶复合凝胶后，柴油与汽油的混油量减少至 5%以下[77]。近年来，智能响应型凝胶因其环境敏感性备受关注，例如 pH 值响应型凝胶可在酸性环境中快速交联，而光热触发型凝胶通过近红外辐射实现可控固化，这类材料在海底管道泄漏修复中展现出独特优势[78]。此外，基于纳米复合技术的改性凝胶(如石墨烯/壳聚糖复合材料)显著提升了力学强度与热稳定性，其抗剪切性能较传统凝胶提高 3 倍以上，在高压输气管道中的应用前景广阔[79] [80]。

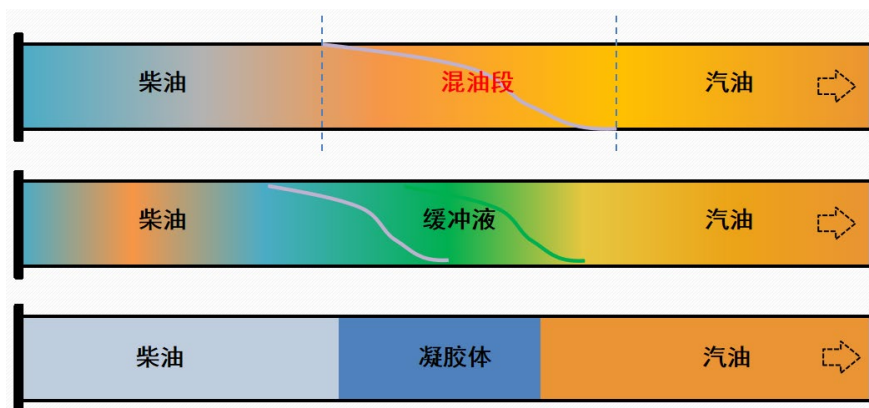


Figure 5. Mixing oil situation before and after isolation medium

图 5. 隔离介质前后混油情况

尽管如此，凝胶隔离技术仍面临规模化应用的瓶颈：一方面，高分子材料的生物降解周期与管道运行周期存在矛盾(如 PLGA 类凝胶完全降解需 18~24 个月)，可能导致二次环境污染[81] [82]；另一方面，高粘度凝胶的注入能耗较高，英国 BP 公司测算显示每千米管道的凝胶注入成本约为传统氮气隔离的 2.3 倍[83]。在成品油管道隔离应用中，水基凝胶也暴露出诸多问题。其与成品油的相容性较差，容易发生乳化现象，这不仅会影响油品质量，还会导致后续处理难度增大。水基凝胶破胶后会产生较多残渣，这些残渣可能会堵塞管道，增加管道清洗成本，还会造成油品不必要的浪费[84]。油基凝胶是以油为连续相，通过凝胶剂形成三维网络结构的凝胶材料。主要成分包括烷基磷酸酯、脂肪酸皂和油溶性高分子等。其中，烷基磷酸酯凝胶因其低毒性、对成品油品质影响小等优点，在成品油管道隔离领域备受关注。烷基磷酸酯分子含有磷酸基($-\text{PO}_4$)等活性官能团，在特定条件下，这些官能团能与高价态金属离子(如 Al^{3+} 、 Fe^{3+})发生交联反应，从而在油基基液中形成三维网状结构，实现油的凝胶化[85] [86]。国内外学者对油基

凝胶的合成工艺、性能优化及应用进行了大量研究。在合成工艺上,不断探索更高效、环保的合成方法,以提高凝胶剂的产率和纯度。在性能优化方面,研究人员通过调整凝胶剂的结构、添加助剂等方式,改善油基凝胶的粘弹性、抗剪切性、热稳定性等性能。通过引入特定的侧链基团,增强凝胶剂分子间的相互作用,提高凝胶的强度和稳定性[87]。在应用方面,油基凝胶在成品油管道隔离中展现出良好的潜力。它能够在油性环境中稳定存在,有效分隔不同油品,减少混油现象[1] [13]。与水基凝胶相比,油基凝胶不会与成品油发生乳化,破胶后残渣较少,对管道和油品的影响较小。

5. 总结与展望

在成品油管道顺序输送方面,国内外学者已经对混油产生的机理和后处理有了较为系统的研究,但是关于使用隔离物使用方面仍存在较大困难:

1) 固体隔离技术(如聚氨酯泡沫、陶瓷球等)存在机械磨损、堵塞及残留清理困难等问题,管道振动与颗粒摩擦易致隔离层破损,残留介质嵌入管壁或阀门影响后续作业;高温下材料软化导致失效风险增加,静电积聚可能引发燃爆隐患;刚性结构对非牛顿流体适配性差,且经济性受限。

2) 液体隔离实际应用较多,但其介质易在管壁残留引发后续作业污染,高温或流速波动导致隔离层稳定性下降,可能引发二次混油。部分隔离液与油品界面兼容性差,易诱发乳化或相分离,增加处理难度。

3) 气体隔离技术虽能减少油品混油风险,但其稳定性受流速与压力波动影响显著,高速流动易撕裂气体层,压力骤变导致泄漏风险升高;残留气体溶解或滞留管道会增大流动阻力,易燃气体(如天然气)还可能引发爆炸;高能耗注入(如氮气需维持高压)加剧设备损耗;此外,温室气体泄漏及毒性危害引发环境安全隐患。

因此,凝胶体在隔离应用中具有显著优势,其粘附性与油品相容性高,能与油品形成稳定界面,有效抑制分层与湍流混合;剪切恢复特性可适应管道压力波动,维持隔离层完整性;相较于水基介质,油基凝胶不易引发乳化问题,降低后续分离能耗;同时,其疏水特性可减少管壁残留污染,缓解清管器卡阻风险。综上,油基凝胶应用于成品油管道顺序输送中具有较大的应用潜力。

参考文献

- [1] 张宝江. 成品油物流配送运输优化分析[J]. 中国储运, 2022(6): 131-132.
- [2] 张政. 成品油管道企业常见高危作业问题及防范措施[J]. 化工管理, 2020(10): 161-163.
- [3] 赵志才, 张志远, 胡志勇, 等. 顺序输送润滑油基础油与柴油掺混实验研究[J]. 当代化工, 2018, 47(10): 2049-2053, 2058.
- [4] Li, X., Han, W., Shao, W., Chen, L. and Zhao, D. (2021) Data-Driven Predictive Model for Mixed Oil Length Prediction in Long-Distance Transportation Pipeline. 2021 *IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, Suzhou, 14-16 May 2021, 1486-1491. <https://doi.org/10.1109/ddcls52934.2021.9455701>
- [5] Serediuk, M.D. (2022) Methods of Hydrodynamic Calculation Oil Pipeline Sequential Transportation of Small Batches of Various Oil. *Archives of Materials Science and Engineering*, **117**, 25-33. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1394>
- [6] Wallner, T., Paminger, M., Scarcelli, R., Powell, C., Simeu, S.K., Wooldridge, S., *et al.* (2019) Performance, Fuel Economy, and Economic Assessment of a Combustion Concept Employing In-Cylinder Gasoline/Natural Gas Blending for Light-Duty Vehicle Applications. *SAE International Journal of Engines*, **12**, 271-289. <https://doi.org/10.4271/03-12-03-0019>
- [7] 杨军, 孙艳, 古丽努尔·牙哈甫, 等. 盲管段对原油管道顺序输送的影响因素分析与研究[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(5): 46-51.
- [8] 张焱. 北美地区管线运力问题对西加拿大重油 WCS 价格的影响[J]. 科技创业月刊, 2014, 27(1): 44-46.
- [9] 程磊, 聂超飞, 李其抚, 等. 可动胶体技术在油气输送管道内的应用现状[J]. 石化技术, 2020, 27(5): 36-38.
- [10] 余红伟, 倪友伟, 姚士洪. 胍胶隔离技术在海底输油管道上的应用[J]. 油气储运, 2009, 28(11): 75-79, 81, 110.
- [11] 曹威. 国外长输管道试运投产技术标准先进性探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(2): 5-9.

- [12] 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.
- [13] 张鹏, 葛子铭. 中国西部地区成品油管网线路规划建议[J]. 国际石油经济, 2024, 32(2): 85-91, 100.
- [14] 袁子云, 刘刚, 陈雷, 等. 融合机制与高斯混合回归算法的成品油管道顺序输送混油长度预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 123-128.
- [15] Yang, Y. (2007) Status and Prospect of Oil and Gas Pipelines in China. *China Oil & Gas*, **2**, 54-59.
- [16] He, G., Tang, X., Wang, L., Liao, K., Wang, B. and Yang, N. (2023) The Component Displacement Process of Two Miscible but Dissimilar Fluids Transported Sequentially in a Multiproduct Pipeline. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **14**, Article ID: 04023036. <https://doi.org/10.1061/jpsea2.pseng-1386>
- [17] Liu, E., Li, W., Cai, H. and Peng, S. (2018) Formation Mechanism of Trailing Oil in Product Oil Pipeline. *Processes*, **7**, Article 7. <https://doi.org/10.3390/pr7010007>
- [18] 赵海燕. 顺序输送混油的 CFD 模拟[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- [19] 林康, 施雯, 王琪, 等. 湛茂输油管道混油数值模拟研究[J]. 广东石油化工学院学报, 2015, 25(6): 38-41, 49.
- [20] Kaufmann, K.D. (1998) Development and Application of 'Safe Time' Calculation Software for High Waxy Crude Oil Pipelines on the Example of the Kharyaga to Uninsk Pipeline. *UNITAR (United Nations Institute for Training and Research) International Conference on Heavy Crude and Tar Sands*, 27-30 October 1998, Beijing, 1-21.
- [21] 邓澜波, 高美佳. 研究长输成品油管道混油形成的途径、控制措施及回掺[J]. 化学工程与装备, 2019(9): 129-131.
- [22] 陆世平. 成品油管道顺序输送混油界面在线化预测应用研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- [23] 陈朝俊, 李斌, 赵宏伟. 流变学的应用与发展[J]. 当代化工, 2008(2): 221-224.
- [24] 鞠岚, 廖柯熹, 陈莎, 等. 成品油管道落差地段水力特性研究[J]. 天然气与石油, 2011, 29(3): 14-16, 84.
- [25] 李雪, 包真, 傅钰江. 成品油管道中间站下载对沿程混油分布的影响[J]. 油气储运, 2023, 42(6): 678-684.
- [26] 万捷, 李卫涛, 曹喜文, 等. 稠油管道与柴油管道同沟敷设热力分析[J]. 石油工程建设, 2015, 41(6): 31-33.
- [27] Yuan, Z., Chen, L., Liu, G. and Zhang, Y. (2023) Knowledge-Informed Variational Bayesian Gaussian Mixture Regression Model for Predicting Mixed Oil Length. *Energy*, **285**, 129248. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129248>
- [28] 韩海彬. 原油管道投产方式及存在问题浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(14): 47-49.
- [29] Fan, T., Liu, Z., Li, M., Zhao, Y., Zuo, Z. and Guo, R. (2022) Development of Cost-Effective Repair System for Locally Damaged Long-Distance Oil Pipelines. *Construction and Building Materials*, **333**, Article ID: 127342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127342>
- [30] 万里平赵立志, 孟英峰. 清洁生产工艺在油田生产过程中的应用[J]. 油气田环境保护, 2004(1): 3-6, 59.
- [31] 卢阿雷, 刘丽艳, 黄东魁. 长输油气管道企业区域化改革中压缩机自动化专业维护探讨[J]. 科技创新与应用, 2019(36): 118-119.
- [32] 代晓东, 王余宝, 李晶淼, 等. 中俄成品油管道运行技术对比研究[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 1-6.
- [33] 马开良, 韩玉琴. 合理库存模型在成品油供应链中的应用实践[J]. 车用能源储运销技术, 2024, 2(3): 72-78.
- [34] 马荣荣, 王雅倩. 成品油管道顺序输送现状与发展研究[J]. 辽宁化工, 2025, 54(2): 288-291.
- [35] 张阳, 李勇. 成品油管道顺序输送中混油的研究[J]. 管道技术与设备, 2020(2): 11-14.
- [36] 宋艾玲, 梁光川, 王文耀. 世界油气管道现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2006, 25(10): 1-6.
- [37] Li, C., Qi, H., Zhang, X., Zhu, H. and Wang, Q. (2025) Spectral Characterization of Refined Oils and Their Binary Mixtures at Unconventional Temperatures. *Journal of Applied Spectroscopy*, **91**, 1369-1377. <https://doi.org/10.1007/s10812-025-01862-9>
- [38] 吕坦. 成品油管道顺序输送混油分析与模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [39] 李继明, 李磊, 马宏宇, 等. 国外成品油管道运行技术先进性探讨[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(4): 1-5, 16.
- [40] 黄东魁, 刘丽艳, 廉明明, 等. 输油站计量检定系统管理实践与思考[J]. 工业计量, 2021, 31(S1): 112-116.
- [41] Austin, J.E. and Palfrey, J.R. (1963) Mixing of Miscible but Dissimilar Liquids in Serial Flow in a Pipeline. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **178**, 377-389. <https://doi.org/10.1177/002034836317800160>
- [42] Liang, X.J., Zhao, H.J. and Zhou, N. (2011) Hydraulic Model and Simulation of Products Oil Pipeline Network. *Oil & Gas Storage and Transportation*, **30**, 21-24, 4.
- [43] 蔡立. 长输成品油管道混油形成的途径、控制措施及回掺[J]. 石油库与加油站, 2018, 27(6): 12-14, 15.

- [44] 周浩. 低场核磁共振技术应用于管输成品油质量检测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [45] 朱莹, 王树立. 原油顺序输送的现状与展望[J]. 管道技术与设备, 2008(3): 9-11, 44.
- [46] 赵宁, 马爽. 油气管道清管技术探析[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 86-89.
- [47] 倪健乐. 隔离球隔离效果分析和新型隔离器的设计[J]. 油气储运, 1995(2): 6-9, 65.
- [48] 杨亚吉, 刘春雨, 唐宁依, 等. 海底输油管道清管过程中出口温度变化研究[J]. 石油机械, 2023, 51(7): 156-164.
- [49] 谢小波. 混输海管清管作业模拟分析研究[J]. 天津科技, 2020, 47(5): 34-37.
- [50] 李元. 润滑油顺序输送工艺研究[J]. 当代化工, 2014, 43(6): 1076-1078.
- [51] 于金广. 鲁皖成品油管道增设混油处理设施的实践[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 157-161.
- [52] 万腾. 超临界流体在拟临界温度附近的湍流流动与传热特性研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [53] 刘富杰. 油气储运技术的创新[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 167-168.
- [54] 张文喜, 徐国瑞, 王晓龙, 等. 双相复合凝胶堵水体系研究与应用[J]. 石油化工应用, 2020, 39(12): 48-53.
- [55] 刘伟钟, 刘峰, 邓震海, 等. 长输原油加热管道的减输技术[J]. 油气储运, 2004(11): 6-9, 60.
- [56] 谭力文, 文豪, 夏白鹭. 新型管道打开封堵装置的设计与应用[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(2): 56-58.
- [57] 杨炳华, 张想, 林俊锋. 新型气囊式管道堵塞器的设计与应用[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(3): 31-34.
- [58] Griffith, P. and Wallis, G.B. (1961) Two-Phase Slug Flow. *Journal of Heat Transfer*, **83**, 307-318. <https://doi.org/10.1115/1.3682268>
- [59] 刘雪梅, 谢英, 袁宗明, 等. 输气管道投产安全的探讨[J]. 天然气与石油, 2007(4): 11-14, 66.
- [60] 冯雪威, 陈晨, 陈大勇. 油页岩原位开采技术研究新进展[J]. 中国矿业, 2011, 20(6): 84-87.
- [61] 刘祥骏, 杨嘉瑜. 原油及油品顺序输送的隔离系统[J]. 油气储运, 1986(4): 9-15, 5-6.
- [62] 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.
- [63] 储乐平, 咸竣瀚, 赵晓磊, 等. 水下跨接管用纤维素基 MEG 凝胶的制备与性能[J]. 天津理工大学学报, 2021, 37(3): 60-64.
- [64] 王亮, 袁志坤. 哈萨克原油外输管线冬季清防蜡技术研究[J]. 中国石油和化工, 2016(S1): 247-248.
- [65] 何国锋, 王健, 张国强, 等. 聚丙烯酰胺水解机理及抑制方法研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(22): 18-21.
- [66] 彭欢, 王苛宇, 王历历. 压裂用胍胶衍生物的研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(18): 13-15.
- [67] 王晓蓓, 孙金鹏, 李艳霞, 等. 聚乙烯醇双组份水性涂料的制备及性能研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2024, 34(6): 16-18.
- [68] 许冬进, 吴坤, 印文龙, 等. 非常规油气微注压降返排分析技术现状及发展趋势[J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(3): 151-158.
- [69] 师亚栋, 刘晓娟, 周海成, 等. 化学堵剂性能评价[J]. 石化技术, 2016, 23(6): 52.
- [70] 王长豹, 程云, 马诚, 等. 裂缝性地层油基钻井液用堵漏材料的研究进展[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2621-2627.
- [71] 王树立, 朱茵. 一种混油隔离系统及其使用方法[P]. 中国专利, CN200810019608.3. 2008-08-13.
- [72] 邹婧文, 徐国瑞, 李丰辉, 等. 低黏高强凝胶堵剂性能评价及机理分析[J]. 当代化工, 2025, 54(1): 121-124.
- [73] 王金冉, 张百川, 陈宇祺, 等. 耐盐聚丙烯酰胺共聚物稠化剂研究进展(III) [J]. 精细石油化工, 2024, 41(6): 68-72.
- [74] Wang, P.Q., Nie, X.Y., Zhang, X.M., Luo, P.Y. and Bai, Y. (2012) Study on a Special Association Polymer Gel Applied in Vicious Lost Circulation in Crushed Zones. *Advanced Materials Research*, **518**, 102-107. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.518-523.102>
- [75] 邱贤亮. 色粉对聚丙烯加工及结晶行为的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(12): 138-144, 153.
- [76] 于培志. 聚合物增韧脲醛树脂封堵剂的研究与应用[J]. 油田化学, 2002(1): 36-38, 42.
- [77] 程磊, 郭海峰, 杨法杰, 等. 管道胶体技术应用现状[J]. 管道技术与设备, 2014(3): 46-48.
- [78] Babiker, M.E. and Muhuo, Y. (2011) The Thermal and Mechanical Properties of Ultra-High Molecular Polyethylene/Montmorillonite Clay (UHMWPE/MMT) Nanocomposites Using Gel and Pressure-Induced Flow Process (PIF). *Polymers and Polymer Composites*, **19**, 685-696. <https://doi.org/10.1177/096739111101900810>

- [79] Wang, W. and Wang, A. (2011) Preparation, Swelling, and Stimuli-Responsive Characteristics of Superabsorbent Nanocomposites Based on Carboxymethyl Cellulose and Rectorite. *Polymers for Advanced Technologies*, **22**, 1602-1611.
<https://doi.org/10.1002/pat.1647>
- [80] Xu, K., Wang, J., Xiang, S., Chen, Q., Yue, Y., Su, X., *et al.* (2007) Polyampholytes Superabsorbent Nanocomposites with Excellent Gel Strength. *Composites Science and Technology*, **67**, 3480-3486.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.02.009>
- [81] Teacă, C., Ignat, M., Nechifor, M., Tanasă, F. and Ignat, L. (2022) In-Soil Degradation of Polymer Materials Waste—A Survey of Different Approaches in Relation with Environmental Impact. *BioResources*, **18**, 2213-2261.
<https://doi.org/10.15376/biores.18.1.teaca>
- [82] Zhang, X., Yin, Z., Xiang, S., Yan, H. and Tian, H. (2024) Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review. *Polymers*, **16**, Article 2807.
<https://doi.org/10.3390/polym16192807>
- [83] Pahari, S., Bhandakkar, P., Akbulut, M. and Sang-Il Kwon, J. (2021) Optimal Pumping Schedule with High-Viscosity Gel for Uniform Distribution of Proppant in Unconventional Reservoirs. *Energy*, **216**, Article ID: 119231.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119231>
- [84] 何敏, 李丽华, 张金生, 等. 压裂液从聚合物到无聚合物的转变[J]. 应用化工, 2016, 45(7): 1351-1353, 1358.
- [85] 匡立新. 新型铝离子无水压裂液的制备及其性能[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(1): 81-86.
- [86] 王满学, 何静, 张文生. 磷酸酯/Fe³⁺型油基冻胶压裂液性能研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 150-154.
- [87] Zhao, W., Wei, Z. and Xue, C. (2021) Recent Advances on Food-Grade Oleogels: Fabrication, Application and Research Trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **62**, 7659-7676.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922354>