

引文: 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(9): 971–979.

WANG Weibin, LIU Kuirong, LI Yuxing. Current status and prospects of technological development for batch transportation of methanol via product oil pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 971–979.

成品油管道顺序输送甲醇技术发展现状与展望

王维斌¹ 刘奎荣² 李玉星³

1. 国家管网集团科学技术研究总院分公司; 2. 国家管网集团西部管道有限责任公司;
3. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气与新能源储运安全重点实验室

摘要:【目的】随着“碳达峰、碳中和”战略加速落地,传统油气消费结构发生深刻变革,石油天然气需求增速趋缓,现有油气管道年均利用率下降。甲醇作为能源绿色低碳转型的关键载体,依托成品油管道顺序输送可实现长距离、规模化的输送目标,同时可盘活大量闲置或处于低负荷运行状态的管道资产,提升输送设施的整体利用率。国内外成品油管道顺序输送甲醇工程经验较少,相关研究不充分。甲醇与成品油物化性质存在显著差异,使得成品油管道顺序输送甲醇面临材料相容性、关键设备设施适用性、混油机理与控制、运行安全保障、管道设计与标准规范等难题。【方法】分析了成品油管道顺序输送甲醇工程发展现状,梳理了利用成品油管道顺序输送甲醇所面临的核心科学与技术挑战,提出研究展望与发展建议。【结果】材料相容性是核心挑战:碳钢、铝合金等金属材料在含杂质甲醇环境下存在腐蚀与应力腐蚀开裂风险,氟橡胶等非金属材料在甲醇环境中的溶胀失效风险显著高于成品油环境。关键设备设施需进行适应性分析与针对性改造:需评价成品油储罐防腐涂层、氮封系统、防爆设计及运维体系等方面的适应性;需分析成品油泵的材料、密封结构、气蚀与混油控制等在甲醇输送环境下的适应性;需明晰阀门的材料相容性、密封可靠性、安全防护设计等问题。混油机理及控制是难点,需构建“机理-预测-控制-处理”全链条技术体系。需系统性研究成品油管道顺序输送甲醇的泄漏扩散演化规律,明晰事故演化特征,形成运行安全防控与应急处置技术。【结论】在此研究基础上,亟需开展工程示范,建立和完善成品油管道顺序输送甲醇标准规范体系,为中国成品油管道实现低碳化功能转型与资产高效利用提供理论支撑和实践指导。(图 1, 参 29)

关键词: 成品油管道; 甲醇管道; 顺序输送; 绿色甲醇

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)09-0971-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.09.002

Current status and prospects of technological development for batch transportation of methanol via product oil pipelines

WANG Weibin¹, LIU Kuirong², LI Yuxing³

1. PipeChina Institute of Science and Technology; 2. PipeChina West Pipeline Co., Ltd.; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Provincial Key Laboratory of Oil, Gas and New Energy Storage and Transportation Safety

Abstract: [Objective] With the accelerated implementation of carbon peaking and carbon neutrality strategies, the consumption mix of traditional oil and gas resources has undergone significant changes, reflected in a slowing growth rate of oil and gas demand and a decline in the average annual utilization rate of existing oil and gas pipelines. In this context, batch transportation through product oil pipelines is considered an effective solution for the long-distance and large-scale transportation of methanol, which is a key enabler of the green and low-carbon transformation in the energy sector. Furthermore, this approach can revitalize many idle pipeline assets or those operating at low loads, thereby increasing the overall utilization rate of pipeline facilities. However, there is limited engineering experience in the batch transportation of methanol via product oil pipelines, both in China and abroad, and relevant research remains inadequate. Moreover, significant differences in the physical and chemical properties between methanol and product oil present challenges to the batch transportation process. These challenges include material compatibility, the applicability of key equipment and facilities, oil mixing

mechanisms and control, operational safety assurance, pipeline design, and the establishment of standards and specifications. **[Methods]** This paper analyzes the current status of development in the field of batch transportation of methanol through product oil pipelines, identifies the core scientific and technological challenges associated with using these pipelines for batch methanol transport, and presents prospects for future research along with recommendations for development. **[Results]** First, material compatibility is recognized as one of the core challenges. Metallic materials, such as carbon steel and aluminum alloys, are susceptible to corrosion and stress corrosion cracking in environments containing impure methanol. Meanwhile, non-metallic sealing materials, such as fluororubber, face a significantly higher risk of swelling failures in methanol environments compared to product oil environments. Second, adaptability analysis and targeted modifications are essential for key equipment and facilities. This involves evaluating the adaptability of product oil storage tanks, including anti-corrosion coatings, nitrogen sealing systems, explosion-proof designs, and operation and maintenance systems, as well as assessing the adaptability of product oil pumps in methanol transportation environments, including materials, sealing structures, cavitation, and oil mixing control. Additionally, it is crucial to address various issues related to valves, including material compatibility, sealing reliability, and safety protection design. Third, the mechanisms and control of oil mixing are identified as challenging aspects, underscoring the need for a full-chain technological system that encompasses the mechanisms, prediction, control, and processing of oil mixing. It is also essential to systematically study the evolution patterns of leakage and diffusion of methanol transported in batches through product oil pipelines. This research aims to clarify the characteristics of developments that could lead to accidents and facilitate the creation of techniques for operational safety prevention and control, as well as emergency response. **[Conclusion]** Building on these research efforts, there is an urgent need to implement engineering demonstrations, as well as to establish and improve the standards and specifications for the batch transportation of methanol through product oil pipelines. This will provide theoretical support and practical guidance for transitioning product oil pipelines in China to low-carbon functionality and enhancing asset utilization efficiency. (1 Figure, 29 References)

Key words: product oil pipeline, methanol pipeline, batch transportation, green methanol

在全球能源结构转型与“双碳”战略加速推进的背景下,中国成品油消费市场正经历深刻变革。成品油消费量将于未来数年内达到峰值后逐步下降,市场需求萎缩导致传统成品油管道系统面临严峻挑战。目前,成品油管道输送能力与市场需求错配问题日益突出,部分成品油管道的实际输量远低于设计负荷。同时,新能源技术的快速普及进一步压缩成了品油需求空间,倒逼能源输送体系探索创新路径。

甲醇作为兼具能源与化工原料属性的重要载体,其战略价值在低碳转型背景下持续提升。中国作为全球甲醇产业的核心市场,已形成以化石能源制甲醇为主导的生产格局,产能分布与消费区域在地理位置上整体呈现错位分布特征,跨区域流动需求明显。此外,“双碳”目标驱动下的绿色甲醇生产技术革新,正在重塑甲醇产业生态。以可再生能源电解水制氢再与二氧化碳合成“电制甲醇”为代表的绿醇技术快速发展,推动了产能布局向风光资源富集区域转移,未来将形成大规模、跨区域的绿醇输送需求。这一转变不仅为甲醇产业注入低碳发展动能,也为传统成品油管道的功能转型提供了历史性机遇。

成品油管道顺序输送甲醇技术是衔接绿醇规模化

外输需求与既有管输资产高效利用的核心纽带。然而,甲醇在物性参数、输送兼容性、安全控制等方面与传统油品存在显著差异,从而对现有管输系统提出多重挑战。在此系统梳理成品油管道输送甲醇技术发展现状,解析关键技术的创新路径与工程实践瓶颈,并提出成品油管道顺序输送甲醇技术展望与建议,以期为中国成品油管道的低碳化功能转型提供参考。

1 成品油管道顺序输送甲醇需求分析

1.1 中国甲醇资源市场及政策分析

甲醇作为重要的化工原料,广泛应用于有机合成、染料、农药、医药、涂料等行业。同时,甲醇还是性能优良的能源与车船用燃料,正在成为替代化石能源、实现能源脱碳的重要途径^[1-2]。

中国是全球最大的甲醇生产国与消费国,产量与消费量均占全球的 50% 以上。2023 年,中国甲醇产量 $8\,317.3 \times 10^4$ t,居全球第一,进口量 $1\,455.3 \times 10^4$ t。2024 年,中国甲醇表观消费量为 1.05×10^8 t,同比增长 7%。目前,甲醇生产以化石能源制取为主(灰醇),煤炭、天然气占比分别为 76.7%、20.8%,产能主要分

布在西北(36.1%)、华北(29.3%)及华东(17.0%)等煤炭、油气化石能源产地,消费市场主要集中在华中、华北、华东地区,主要用途为甲醇制烯烃(Methanol to Olefins, MTO),呈现一定的跨区域输送特征。

随着“双碳”战略加速推进和风光发电成本下降^[3-4],电解水制绿醇将成为未来甲醇生产的发展方向,绿醇占比将逐年提高,预计到2060年将超过67%,新疆、内蒙古、青海、甘肃将是中国绿醇产能潜力最大地区,保守估计具有亿吨级产能潜力,存在较大跨区域输送需求^[5-8]。

近年来,中国制定并实施了一系列支持甲醇产业发展的政策措施。2019年3月,工业和信息化部、国家发改委等八部门联合发布了《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》,鼓励推动甲醇汽车及燃料技术研发与应用,加快甲醇汽车标准体系建设,确保甲醇汽车全生命周期达标排放,实现甲醇燃料生产过程清洁化、高效化,促进甲醇燃料绿色发展。2021年10月,国家发改委、生态环境部、工业和信息化部等十部门联合发布了《“十四五”全国清洁生产推行方案》,将“实施绿氢炼化、二氧化碳耦合制甲醇等降碳工程”列为重点行业清洁生产改造工程。2022年3月,国家发改委、国家能源局联合印发了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,支持扩大工业领域氢能替代化石能源应用规模,积极引导合成氨、合成甲醇、炼化、煤制油气等行业由高碳工艺向低碳工艺转变,促进高耗能行业绿色低碳发展。2023年12月,国家发改委牵头会同相关部门共同修订形成了《产业结构调整指导目录(2024年本)》,由鼓励、限制及淘汰三类目录组成。鼓励类目录明确指出,鼓励氢能、风电与光伏发电互补系统技术开发与应用,传统能源与新能源发电互补技术开发及应用,电解水制氢和二氧化碳催化合成绿色甲醇。各地方也发布了多项鼓励甲醇产业发展的政策措施,例如山西省《关于加快推动全省甲醇汽车推广应用的若干措施》、《甘肃省加快推进甲醇汽车应用的实施方案》、《西安市鼓励甲醇汽车产业发展若干政策》等。

1.2 中国甲醇运输方式与运输需求分析

中国甲醇产业的生产与消费具有明显的区域差异,因此中国在甲醇运输、储存及分配方面面临巨大挑战。目前,甲醇运输在中国以铁路、公路为主,运输成本为0.17~0.3元/(t·km),参照成品油管道,甲醇管道输送

价格约为0.15元/(t·km),运输经济优势明显,同时具备安全、稳定等优势。建设跨区域的甲醇管道输送网络,打通西北、华北等甲醇产区与东南沿海消费市场的物流通道,不仅有助于降低甲醇运输成本,提高运输效率,还能保障甲醇在不同地区之间高效流通,满足日益增长的市场需求。然而,新建甲醇管道周期长、投资大,经济性方面存在挑战。

根据国务院新闻办公室发布的《中国的能源转型》白皮书,截至2023年底,全国长输成品油管道已达到 3.3×10^4 km。随着国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)成立,成品油“全国一张网”基本成型,逐步形成上游资源多主体多渠道供应、中间统一管网高效集输、下游销售市场充分竞争的“X+1+X”成品油市场体系,提高成品油资源配置效率,保障成品油安全稳定供应^[9-11]。随着国家“双碳”战略加快推进以及新能源不断发展,成品油需求量逐步下降,越来越多的成品油管道处于低负荷运行甚至闲置状态,导致管道资产利用率严重不足^[12-14]。在此背景下,利用现有成品油管道顺序输送甲醇是实现甲醇规模化输送的经济可行方案。

经调研,截至2023年,新疆地区甲醇产能已超过 500×10^4 t,在建、规划甲醇项目产能超过 $2\,800 \times 10^4$ t/a,远期绿醇产能潜力超过 $7\,000 \times 10^4$ t/a,将成为绿醇产能潜力最大地区。在市场端,2023年,华中地区甲醇需求缺口约 354×10^4 t/a,华东地区甲醇需求缺口约 $2\,048 \times 10^4$ t/a,且需求量逐年增加,对进口甲醇有迫切需求,因此,甲醇输送将呈现“西醇东输”格局。

2 成品油管道顺序输送甲醇工程发展现状

国外甲醇管道主要为生产商与邻近用户之间的短距离管管道,根据美国管道和危险品安全管理局(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)统计数据,2015年美国液体甲醇管道约48 km。成品油管道顺序输送甲醇在全球范围内的规模化工程实践极为有限。国际上,该领域探索可追溯至20世纪80年代,如加拿大塞拉尼斯公司的甲醇-成品油管道顺序输送工程实践,成功将4 000 t甲醇从埃德蒙顿运输至温哥华,输送距离约1 200 km,初步验证了该技术的可行性,特别是对混合界面质量控

制的有效性。然而,此类早期案例数量稀少,详细的操作规程、长期运行数据及对管道系统完整性影响的系统性评估均未完全公开,可复制的成熟工程经验匮乏。

在中国,尽管甲醇产业规模庞大,但长距离专用甲醇管道建设仍处于起步阶段,现有管道里程短、输送量有限^[15],远不能满足未来绿醇大规模跨区域调配需求。其中,中煤鄂尔多斯能源化工图克—乌审召管道是目前最长的专用甲醇管道,长约 52 km,管材为 L290N 无缝钢管,设计压力 2.5 MPa,共设 4 座阀室。华电榆林天然气化工有限责任公司、云南大为制焦有限公司等企业也建有小型甲醇管道,但规模与辐射范围均较小。针对部分区域(如新疆)的甲醇外输需求与部分成品油管道低负荷运行现状形成的资源互补契机,国家管网集团已于 2024 年立项开展甲醇-成品油管道顺序输送关键技术研究,完成了北疆成品油管道顺序输送甲醇工业性试验,同时积极推动工程示范,积累了一定技术经验,证明了成品油管道顺序输送甲醇的适配性与改造潜力。

可见,国内外长距离甲醇管道建设运营经验相对匮乏,成品油管道顺序输送甲醇的工程实践尤为欠缺。因此,亟需深入开展相关技术研究,以期为中国绿醇规模化运输及现有成品油管道资源的高效利用提供技术支持。

3 成品油管道顺序输送甲醇关键技术问题

利用现有成品油管道顺序输送甲醇,由于甲醇的物理化学性质与成品油存在显著差异,对管输系统的材料相容性、关键设备设施适应性、混油、运行安全保障等方面均提出巨大挑战。

3.1 材料相容性

3.1.1 金属材料腐蚀与应力腐蚀开裂

工业甲醇在生产过程中会混入少量杂质,如水分、甲酸、甲酸甲酯、氯离子等。根据 GB 338—2011《工业用甲醇》规定,甲醇的合格品含水率在 0.2% 以内。此外在 MTO 行业新发布的行业标准 HG/T 6277—2024《甲醇制烯烃(MTO)级甲醇》规定,MTO 级甲醇的含水率为 I 型在 4.5% 以内,II 型在 7.5% 以内。100% 纯甲醇对于金属的腐蚀性不强,但是甲醇具有较强的极性,可与水以任意比例互溶;同时甲醇会氧化生成甲

酸,甲酸作为有机酸中的最强酸,会降低介质 pH 值,引发酸性腐蚀;甲酸、氯离子等杂质与应力进一步耦合,会加剧管线钢或设备设施金属材料的腐蚀与应力腐蚀开裂。甲醇管道腐蚀控制取决于温度、压力等参数以及甲酸、H₂O、O₂、氯离子等杂质含量,其中甲酸与含水量是重要的腐蚀影响因素。

国外学者指出,成品油管道顺序输送甲醇需重点关注管材腐蚀问题,尤其不能忽视管道低点的游离水残留导致的腐蚀与油品质量衰减问题^[16]。Wang 等^[17]探究 304 不锈钢在甲醇中的腐蚀行为,指出表面钝化膜会降低腐蚀速率。董厚生^[18]指出氯化物是导致甲醇环境金属材料应力腐蚀开裂的重要原因,需控制氯化物含量。黄勇等^[19]分析含水量对内腐蚀的影响发现,随着甲醇汽油中含水量的增加,金属腐蚀速率先增大后减小,存在一个临界含水量。贾伟艺^[20]指出,水分是造成金属腐蚀的重要因素,甲醇汽油中甲醇含量越高,对金属的腐蚀能力越强。在多杂质耦合对内腐蚀影响机理方面,相比仅存在 H₂O 的情况,同时存在甲酸、H₂O、O₂、氯离子等杂质时腐蚀情况更加严重,说明杂质之间存在协同作用,需进一步开展试验研究建立腐蚀理论模型,明确多元杂质的协同作用腐蚀机理,并建立成品油管道顺序输送甲醇的杂质含量控制标准。此外,经过长时间运行,在役成品油管道内壁不可避免存在凹坑、腐蚀等缺陷,需探究含缺陷管输系统金属材料的腐蚀与应力腐蚀开裂行为,从而形成成品油管道顺序输送甲醇金属材料腐蚀寿命预测模型与防护策略。

3.1.2 非金属材料溶胀失效

管输系统的连接部位及关键设备设施内部存在与输送介质直接接触的非金属高分子材料,甲醇分子能够渗透至这些高分子材料内部,同时甲醇分子含羟基(—OH),易与高分子材料中的极性基团发生相互作用,削弱高分子链的内聚力,导致链间距增大,造成非金属材料溶胀失效。非金属高分子材料的溶胀主要遵循相似相溶原理。当非金属高分子材料与溶剂极性、溶解度等参数接近时溶胀程度较大,反之较小。在溶剂与聚合物相互接触时,溶剂分子与高分子之间的作用力大于高分子材料内部作用力时,高分子材料溶胀。高分子网格结点密度、分子链的柔性、分子链的长短均会影响溶胀程度。非金属材料在甲醇环境下的耐溶胀性可参考化学相容性数据库。国际公认的化学相容性准则将密封件材料分成 4 个等级:1 级(优秀)、2 级(良好)、

3 级(可疑)、4 级(不使用)。例如, 甲醇与聚四氟乙烯(PTFE)为 1 级, 甲醇与氟橡胶为 3 级。目前已开展较多针对常用橡胶材料在甲醇汽油介质中的溶胀实验。

杨礼河等^[21]指出, 硅橡胶更适合 M50 甲醇汽油, 氟橡胶更适合 92 号乙醇汽油。李国钦等^[22]研究表明, 在纯甲醇汽油中, 抗溶胀效果最好的为硅橡胶, 三元氟橡胶、硅氟橡胶、氢化丁腈橡胶次之。穆仕芳等^[23]研究表明, 甲醇含量大于 60% 时硅橡胶耐溶胀较好, 甲醇含量小于 60% 时丁腈橡胶耐溶胀较好。李华静等^[24]研究指出, 丁腈橡胶适合在甲醇汽油中使用, 氟橡胶不适合在甲醇汽油中使用。但管输系统非金属材料在温度、压力波动条件下的甲醇相容性(溶胀率、力学性能衰减)及其损伤失效规律仍需进一步明确, 以期为成品油-甲醇顺序输送管道的非金属材料选型、密封结构优化提供依据。

3.2 关键设备设施适应性

3.2.1 储罐

成品油储罐储存甲醇的适应性分析应聚焦于材料耐腐蚀性、密封可靠性及安全防护等方面。含杂质甲醇会腐蚀碳钢罐体或罐壁, 可能导致密封材料溶胀或老化, 对储罐腐蚀防护、非金属密封材料选取提出更高要求。罐体优先采用碳钢或不锈钢材料, 弹性体使用丁腈橡胶、硅氟橡胶等耐甲醇材料, 聚合物推荐聚四氟乙烯(PTFE)或玻璃钢; 防腐涂料规避环氧树脂, 选用氟化物改性涂层或无机富锌涂料(含水工况下耐受性更优), 并禁用胺类固化剂以防甲醇污染。

甲醇饱和蒸气压与成品油存在显著差异, 在温度升高时, 甲醇蒸气压上升明显, 易造成储罐压力变化, 同时考虑甲醇氧化、挥发及爆炸风险控制, 对储罐呼吸系统、密封系统的适应性提出挑战。在浮盘与密封方面, 浮盘材质应以不锈钢为主, 结合机械鞋式密封增强气密性; 浮顶设计遵循 GB 50074—2023《石油库设计规范》、GB 50160—2008《石油化工企业设计防火规范》, 单罐容积大于 5 000 m³ 时强制采用钢制单/双盘式抗爆浮顶, 配套二次密封(如囊状密封袋)降低挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)逸散。针对安全与尾气处理, 氮封系统通过进/泄氮阀联动维持罐压平衡, 减少甲醇挥发, 但密封带老化易致微量泄漏; 尾气回收以吸收法(脱盐水洗涤工艺)为主导, 兼顾成本与效率, 冷凝法则因高能耗应用受限。

未来需进一步评价含杂质甲醇环境下储罐涂层的

适应性, 研发高耐受性防腐涂料; 探索氮封系统协同尾气吸收-冷凝复合回收工艺, 降低 VOCs 排放能耗。此外, 亟需构建适配甲醇特性的储罐材料选型、防爆设计及运维标准体系, 以填补现行规范在腐蚀监测、密封耐久性评估等环节的空白。

3.2.2 输油泵

在材料选择方面, 输甲醇泵体普遍采用不锈钢材料, 关键密封件多采用 PTFE 或碳化硅材料。在密封与防泄漏技术方面, 基于 API 682-2022《离心泵和转子泵用轴封系统》标准, 双端面机械密封为当前主流方案(如中煤鄂能化管道); 同步配置 ExdIIBT4 防爆与气体监测系统, 强化易燃易爆介质管控。在气蚀与混油抑制方面, 针对甲醇低黏度、高蒸气压特性, 可通过优化叶轮进口厚度与表面光洁度降低气蚀损伤; 通过流量调节算法与叶轮结构改进, 可减少顺序输送中甲醇与油品的剪切混油量。虽然 API 610-2021《石油、石化和天然气工业用离心泵》、API 682-2022 及 GB/T 51007—2014《石油化工用机泵工程设计规范》提供了基础标准规范框架, 但成品油-甲醇顺序输送管道专用标准缺失, 亟需建立甲醇-成品油交替输送的泵设备选型与测试规范。目前长距离成品油管道以离心泵为主, 但气蚀机理研究、动态密封耐久性及混油量化控制仍不充分, 需进一步融合试验数据与数值模拟提升适应性。

3.2.3 阀门

甲醇因其易挥发、高易燃性等特性, 对输送系统专用阀门提出高要求。甲醇阀门需满足以下核心性能指标: 阀体及接触部件需具备优异的耐腐蚀与抗溶胀性能, 优先选用 316L 不锈钢、哈氏合金或特种镀层材料, 避免甲醇介质引发的化学侵蚀及材料降解; 采用零泄漏密封设计, 密封元件推荐全氟醚橡胶(FFKM)、PTFE 等高耐甲醇材料, 保障长期运行中动态密封的稳定性; 甲醇阀门需集成防火(符合 API 607-2022《转 1/4 周阀门和非金属阀座阀门的耐火实验》)、防爆(满足 ATEX 认证)及紧急切断功能, 通过结构优化(如全焊接阀体、双截断泄放设计)降低泄漏与燃爆风险。此外, 还需评价在役成品油管道阀门系统在甲醇环境下的材料相容性、密封可靠性、安全防护设计等问题。

3.2.4 其他设备设施

成品油管道系统的流量计、密度计、腐蚀防护系统、泄漏监测系统等设备设施, 也需参考相关标准, 考虑甲醇特殊物理化学性质, 从材料相容性、功能适应

性、安全环保适应性等方面进行适应性评价。

3.3 混油

甲醇与成品油顺序输送的混油机理、预测、控制、处理等技术研究已取得一定进展,但仍面临复杂界面作用与动态流动耦合的挑战。管道顺序输送甲醇与成品油时在接触界面产生的传质是混油形成的重要原因。甲醇与成品油相间的宏观传质过程复杂,涉及分子扩散、湍流扩散及对流扩散的耦合作用。当前影响甲醇-成品油相间宏观传质的因素尚未完全明晰,主要可归结为介质性质、输送工况、管道特征等方面。在介质性质方面,除了传统的黏度差与密度差会影响流速分布、拖尾效应及重力分层外,甲醇与不同成品油之间特殊的相溶性也将影响混合界面的稳定性与传质速率。赵赏鑫等^[25]针对不同甲醇-成品油混合体系的溶解度开展实验研究,揭示了成品油-柴油、成品油-汽油体系的互溶规律及机理。此外,刘翠伟等^[26]、黄鑫等^[27]基于甲醇-柴油/汽油顺序输送的数值模型,揭示了不同输送工况、管道特征对混油过程的影响规律,为阐明甲醇-成品油相间宏观传质机理提供支撑。

传统的混油预测模型或侧重于经验公式,或基于简化的理论推导,难以全面反映甲醇-成品油混合段的动态发展过程。数值模拟方法虽然能够更精细地描述流场与传质过程,但计算量大,对于长距离管道难以实现快速求解。数据驱动模型在处理复杂非线性问题方面更具优势^[28],但依赖于大量高质量数据,且缺乏对物理机理的刻画,预测结果可能不符合物理实际。

混油控制策略聚焦输送次序与设备优化。刘翠伟等^[26]通过数值模拟证明了甲醇前行可使混油量减少20%~35%,但大落差管道中重力分层效应仍会导致混油界面失稳。赵海燕^[29]针对盲支管混油的研究表明,流线形接头设计可降低15%的局部混油量。在混油处理方面,传统蒸馏法能耗高。芳烃调和策略虽能降低甲醇-汽油相分离温度,但工业可行性受限;近期研究转向超临界CO₂萃取(回收率大于90%)与催化重整制氢(转化效率大于80%),但仍需解决催化剂中毒问题。

为探究成品油管道顺序输送甲醇混油系列问题,国家管网集团在新疆705站搭建中国首个工业级成品油管道顺序输送甲醇综合试验平台(图1)。平台环道全长约720 m,设计压力1 MPa,流速范围为0.8~1.5 m/s。其中,主管道采用DN100的L245碳钢管和



图1 国家管网集团成品油管道顺序输送甲醇705站综合试验平台

Fig. 1 Integrated experimental platform at Station 705 for batch transportation of methanol by product oil pipelines operated by PipeChina

有机玻璃透明管段。该试验平台可系统性支撑混油机理研究、混油预测模型优化、混油控制策略开发、混油界面实时监测及低碳处理工艺验证,同步推动管输设备设施适应性与可靠性测试、成品油管道顺序输送甲醇标准制定。

为推动成品油管道顺序输送甲醇的混油控制与处理技术发展,混油机理研究需聚焦于多相体系物性差异引发的界面作用机制,揭示动态流动中相态演化与稳定性规律。混油预测可借助多物理场耦合模型与智能算法的深度融合,构建高精度混油发展预测体系,进而拓宽传统经验方法的适用边界。混油控制技术应着重于输送参数的优化调整、设备的抗扰动性能设计以及智能调控系统的研发,从而有效降低复杂工况下的混油风险。混油监测则需要借助先进的传感技术与数据融合技术,实现动态流场中混油界面的实时追踪与精准质量评估。混油处理的关键在于突破高效的分离工艺以及拓展资源化利用的路径,以此推动低碳化、低能耗技术的广泛应用。旨在形成“机理-预测-控制-处理”全链条技术体系,提升甲醇与成品油管道顺序输送的安全性与经济性。

3.4 运行安全保障

中国《危险化学品目录》(2022调整版)指出,甲醇属于危险化学品,危险性类别为易燃液体;急性毒性,误食、皮肤接触、吸入有害;特异性靶器官毒性、一次接触。GB 50074—2014《石油库设计规范》指出,甲醇的毒性为中度危害(III),毒性大于汽油的低度危害(IV)。甲醇泄漏因其高挥发性、强水溶性与毒性、易燃性等多重风险耦合特性,对管输甲醇的运行安全保障提出更高要求,其泄漏扩散过程涉及气液两相动态交互,易引发燃爆、中毒及地下水污染等复

合型灾害,对现有应急处置技术体系提出严峻挑战。目前针对甲醇泄漏扩散特性及应急处置策略的研究较少,需系统性研究成品油管道顺序输送甲醇的泄漏扩散演化规律,明晰事故演化特征,形成运行安全防控与应急处置技术,推动应急装备与标准体系的迭代升级。通过构建“风险预警-动态防控-应急处置”的全链条运行安全保障体系,支撑成品油管道顺序输送甲醇的平稳推进,降低能源基础设施转型过程中的环境与社会风险。

3.5 管道设计与标准规范

国外甲醇管道设计可参考 ASME B31.4-2022《液体和浆体管道输送系统》、BS PD 8010-1-2015+A1-2016《管道标准—第一部分陆上管道》等标准。ISO 13623-2017《石油天然气工业—管道输送系统》中按照公众安全的危险性分类,将甲醇归属于类别 B,易燃和有毒液体,为甲醇管道设计提供了一定参考。目前,中国尚未建立针对长输甲醇管道的设计标准。需基于甲醇的物理和化学性质,重点考虑甲醇的毒性、易燃性、易挥发性等特性,建立适用于长距离甲醇管道系统材料选择、质量控制、工艺设计、腐蚀防护、密封措施、安全保护措施、完整性管理等方面的标准规范体系。

4 结论及建议

成品油管道顺序输送甲醇是实现绿醇规模化外输与管输资产高效利用的关键途径,目前国内外相关工程经验与研究较少。综述了成品油管道顺序输送甲醇面临的材料相容性、关键设备设施适应性、混油、运行安全保障等问题,得到以下结论:

1)国外甲醇管道多以短距离、区域性输送为主,历史案例中塞拉尼斯加拿大公司于 20 世纪 80 年代实现 1 200 km 成品油管道顺序输送甲醇,但技术细节未公开;中国最长甲醇管道(中煤鄂能化管道 52 km)及小规模企业管道虽已验证可行性,但输送规模与覆盖范围受限,成品油管道顺序输送甲醇工程实践仍处于技术验证与工业性试验阶段。

2)甲醇与成品油的物理化学性质差异引发材料相容性、设备适应性、混油控制及安全防护等核心挑战。现有成品油管道顺序输送甲醇的腐蚀防控、设备适应性评价、混油控制及处理、运行安全保障等关键技术缺乏系统性研究与实验验证,标准规范体系尚未建立。

为破解新疆等富醇产区外输瓶颈,国家管网集团搭建了中国首个工业级成品油管道顺序输送甲醇综合试验平台,完成了北疆成品油管道顺序输送甲醇工业性试验,证明了成品油管道顺序输送甲醇的适配性与改造潜力。未来需以区域示范工程为牵引,对接“双碳”战略,统筹优化全国成品油管网顺序输送甲醇布局,积极探索“西醇东送”,实现油气管道功能转换与改输技术推广应用。

参考文献:

- [1] 黄鑫,滕霖,聂超飞,刘罗茜,闫锋,邱姝娟,等.液氨/甲醇/成品油顺序输送技术研究进展[J].油气储运,2023,42(12):1337–1351. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003).
- HUANG X, TENG L, NIE C F, LIU L Q, YAN F, QIU S J, et al. Research progress on batch transportation technology of liquid ammonia/methanol/product oil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1337–1351.
- [2] 王梦川,洪子鑫,李峰,刘子洋,冯国莉.绿色甲醇产业发展现状及前景分析[J].国际石油经济,2024,32(5):78–84. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2024.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2024.05.009).
- WANG M C, HONG Z X, LI F, LIU Z Y, FENG G L. Green methanol industry development status and prospect analysis[J]. International Petroleum Economics, 2024, 32(5): 78–84.
- [3] 李玉星,刘翠伟,彭浩平,韩辉,朱建鲁,宋光春,等.氢能运输方式与技术发展现状及挑战[J].前瞻科技,2024,3(2):81–93. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.008](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.008).
- LI Y X, LIU C W, PENG H P, HAN H, ZHU J L, SONG G C, et al. Current status and challenges of hydrogen energy transportation methods and technological development[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 81–93.
- [4] 黄维和,李玉星,陈朋超.碳中和愿景下中国二氧化碳管道发展战略[J].天然气工业,2023,43(7):1–9. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2023.07.001](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2023.07.001).
- HUANG W H, LI Y X, CHEN P C. China's CO₂ pipeline development strategy under the strategy of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(7): 1–9.
- [5] 黄维和,王军,黄龔,梁严,郑龙焯.“碳中和”下我国油气行业转型对策研究[J].油气与新能源,2021,33(2):1–5. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2021.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2021.01.001).
- HUANG W H, WANG J, HUANG Y, LIANG Y, ZHENG L Y. “Carbon neutrality” oriented transformation strategies for China's

- petroleum industry[J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(2): 1–5.
- [6] 张对红, 李玉星. 中国超临界 CO₂ 管道输送技术进展及展望[J]. 油气储运, 2024, 43(5): 481–491. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.05.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.05.001).
- ZHANG D H, LI Y X. Development and prospect of supercritical CO₂ pipeline transmission technology in China[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(5): 481–491.
- [7] 舒斌, 陈建宏, 熊健, 吴其荣, 喻江涛, 杨平. 碳中和目标下推动绿色甲醇发展的必要性分析[J]. 化工进展, 2023, 42(9): 4471–4478. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2023-0647](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-0647).
- SHU B, CHEN J H, XIONG J, WU Q R, YU J T, YANG P. Necessity analysis of promoting the development of green methanol under the goal of carbon neutrality[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(9): 4471–4478.
- [8] 李仁贵, 李灿. 人工光合成太阳燃料制备途径及规模化[J]. 科技导报, 2020, 38(23): 105–112.
- LI R G, LI C. Perspectives on artificial photosynthesis for solar fuels production[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(23): 105–112.
- [9] 黄维和. 推动管道工程技术创新, 构建新型管道运输系统[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 4–7.
- HUANG W H. Promoting pipeline engineering technology innovation and constructing new pipeline transportation system[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 4–7.
- [10] 陈朋超, 马云宾, 张斌, 关中原, 刘啸奔, 陈锋. 现代管道运输系统构建与发展[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 8–18. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.001](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.001).
- CHEN P C, MA Y B, ZHANG B, GUAN Z Y, LIU X B, CHEN F. Construction and development of modern pipeline transportation system[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 8–18.
- [11] 梁永图, 廖绮, 邱睿, 涂仁福, 邵奇, 沈亮. 市场化改革背景下成品油油管网运营关键技术及展望[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 978–987, 1008. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.003).
- LIANG Y T, LIAO Q, QIU R, TU R F, SHAO Q, SHEN L. Key operation technologies and prospects to product oil pipeline network under market-oriented reform[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(9): 978–987, 1008.
- [12] 张浩然, 邱睿, 杜浙, 魏雪梅, 温凯, 涂仁福. 管网灵活运输关键技术与展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 30–38. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.003](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.003).
- ZHANG H R, QIU R, DU J, WEI X M, WEN K, TU R F. Key technologies and prospects for flexible pipeline network transportation[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 30–38.
- [13] 陈朋超, 关中原. 工程哲学视角下的油气管道工程发展与展望[J]. 油气储运, 2024, 43(9): 961–972. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.001).
- CHEN P C, GUAN Z Y. Development and prospect of oil & gas pipeline engineering from the perspective of the philosophy of engineering[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(9): 961–972.
- [14] 陈朋超. “双碳”愿景下管网多介质灵活运输与智能化高效利用发展战略思考[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 721–730. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001).
- CHEN P C. Strategic thinking on pipeline network development for flexible multi-media transport and intelligent efficient utilization under dual carbon vision[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(7): 721–730.
- [15] 聂超飞, 姜子涛, 刘罗茜, 左丽丽, 苗青, 李博生, 等. 甲醇管道输送技术发展现状及挑战[J]. 油气储运, 2024, 43(2): 153–162. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.004).
- NIE C F, JIANG Z T, LIU L Q, ZUO L L, MIAO Q, LI B S, et al. Current status and challenges in technology development for methanol pipeline transmission[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(2): 153–162.
- [16] BROMBERG L, CHENG W K. Methanol as an alternative transportation fuel in the US: options for sustainable and/or energy-secure transportation: 4000096701[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. Sloan Automotive Laboratory, 2010: 1–78.
- [17] WANG L X, KANG B, GAO N, DU X, JIA L N, SUN J C. Corrosion behaviour of austenitic stainless steel as a function of methanol concentration for direct methanol fuel cell bipolar plate[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 253: 332–341. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2013.12.043](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.043).
- [18] 董厚生. 甲醇合成装置材料损伤机理及设备 and 管道选材探讨[J]. 化工装备技术, 2023, 44(6): 21–23. DOI: [10.16759/j.cnki.issn.1007-7251.2023.12.005](https://doi.org/10.16759/j.cnki.issn.1007-7251.2023.12.005).
- DONG H S. Discussion on material damage mechanism and equipment and pipeline material selection of methanol synthesis unit[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2023, 44(6): 21–23.

- [19] 黄勇, 张娟利, 张书勤. M15 甲醇汽油对铜片的腐蚀性研究[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(6): 602–605. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2013.06.011](#).
- HUANG Y, ZHANG J L, ZHANG S Q. Corrosion effects research of M15 methanol-gasoline on copper[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2013, 42(6): 602–605.
- [20] 贾伟艺. 甲醇汽油对金属的腐蚀研究[J]. 现代化工, 2014, 34(6): 52–54. DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2014.06.043](#).
- JIA W Y. Study of metal corrosion by methanol gasoline[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(6): 52–54.
- [21] 杨礼河, 张建国, 孙玉德, 陈绪望. M50 甲醇汽油的橡胶溶胀性[J]. 石油化工, 2020, 49(1): 56–61. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8144.2020.01.009](#).
- YANG L H, ZHANG J G, SUN Y D, CHEN X W. Swelling property of rubber materials in M50 methanol gasoline[J]. Petrochemical Technology, 2020, 49(1): 56–61.
- [22] 李国钦, 谢宁, 李威威, 杨杰. 不同比例甲醇汽油对橡胶圈的溶胀性实验[J]. 化学工程与装备, 2014(6): 44–46.
- LI G Q, XIE N, LI W W, YANG J. Experiment on the swelling of rubber seals by methanol gasoline of different proportions[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014(6): 44–46.
- [23] 穆仕芳, 尚如静, 宋灿, 周秀苗, 魏灵朝, 蒋元力. 橡胶材料在甲醇汽油中抗溶胀性能的研究[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2016, 41(2): 25–29. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2016.02.006](#).
- MU S F, SHANG R J, SONG C, ZHOU X M, WEI L C, JIANG Y L. Investigation on swelling degree of rubber materials soaked in methanol gasoline[J]. Natural Gas Chemical Engineering, 2016, 41(2): 25–29.
- [24] 李华静, 梁耀东, 孙喜荣, 麻磊, 周安宁. 甲醇汽油对橡胶的溶胀性[J]. 石油化工, 2016, 45(10): 1236–1242. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8144.2016.10.014](#).
- LI H J, LIANG Y D, SUN X R, MA L, ZHOU A N. Swelling property of rubber materials in methanol gasoline[J]. Petrochemical Technology, 2016, 45(10): 1236–1242.
- [25] 赵赏鑫, 庞贵良, 邱姝娟, 黄鑫, 滕霖. 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. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.11.005](#).
- ZHAO S X, PANG G L, QIU S J, HUANG X, TENG L. Experimental research on the miscibility law of methanol-product oil blending systems[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(11): 1239–1248.
- [26] 刘翠伟, 艾丽纳, 杜长慧, 聂超飞, 杨文, 裴业斌, 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. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5005.2025.02.020](#).
- LIU C W, AI L N, DU C H, NIE C F, YANG W, PEI Y B, 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.
- [27] 黄鑫, 施鸿翔, 王良旭, 李卫东, 李加庆, 尹鹏博, 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. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.007](#).
- HUANG X, SHI H X, WANG L X, LI W D, LI J Q, YIN P B, 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.
- [28] TU R F, ZHANG H, XU B, HUANG X Y, CHE Y Y, DU J, et al. Machine learning application in batch scheduling for multi-product pipelines: a review[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(3): 100180. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100180](#).
- [29] 赵海燕. 顺序输送混油的 CFD 模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2010.
- ZHAO H Y. CFD simulation of contamination on batch transportation pipeline[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010.

(编辑: 刘朝阳)

基金项目:国家自然科学基金资助项目“基于气-液-声耦合机理的液体管道泄漏动态压力波传播规律研究”, 52274066。

作者简介:王维斌, 男, 1972 年生, 教授级高工, 2004 年博士毕业于北京工业大学材料加工工程专业, 现主要从事新能源储运相关技术研究工作。地址: 天津市经济技术开发区洞庭一街 4 号, 300450。电话: 022-61187300。Email: wangwb01@pipechina.com.cn

• Received: 2025-06-06

• Revised: 2025-06-09

• Online: 2025-06-20

