

引文:王财林,古自强,邱姝娟,等.成品油管道顺序输送甲醇的关键设备适应性分析[J].油气储运,2025,44(9):998-1011.

WANG Cailin, GU Ziqiang, QIU Shujuan, et al. Analytic Research on Adaptability of Key Equipment for Sequential Methanol Transportation in Product Oil Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(9): 998-1011.

成品油管道顺序输送甲醇的关键设备适应性分析

王财林¹ 古自强² 邱姝娟² 李小龙² 李敬法³ 宇波³ 李玉星¹ 俞欣然¹

1. 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;

2. 国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司; 3. 长江大学石油工程学院

摘要:【目的】中国部分成品油管道输送负荷率低,利用成品油管道顺序输送甲醇,既能满足甲醇长距离运输与大规模储存的需求,也是提高管道利用率的有效途径。甲醇的水溶性、强极性、易挥发性、易燃性、毒性等性质与汽油、柴油等成品油存在较大差异,易导致金属材料腐蚀失效、非金属密封材料溶胀失效、设备风险防控方案失效等问题,对成品油管道顺序输送甲醇关键设备的适应性提出了巨大挑战。【方法】结合国内外标准规范与工程实践,从材料适应性、功能适应性及安全环保适应性 3 方面出发,深入探究了储罐、输送泵、阀门、流量计等关键设备在成品油管道顺序输送甲醇场景中的适应性,建立了关键设备适应性评价策略:在材料适应性方面,需重点评价关键设备中防腐涂层、与甲醇直接接触的易腐蚀金属(碳钢、铸铁等)、非金属密封材料等在甲醇受压环境下的服役性能,并评估使用寿命。在功能适应性方面,需评价成品油储罐浮盘功能、输送泵抗汽蚀性能、阀门等关键设备的密封性能。在安全环保适应性方面,需评价成品油储罐呼吸与尾气回收系统、输送泵等关键设备的泄漏监测系统、泄漏应急处置方案等在甲醇环境下的适应性。【结果】基于关键设备适应性评价策略,提出以下改进建议:材料适应性方面,甲醇储罐应优先选用不锈钢或涂覆有氟化物或环氧改性涂层的碳钢,密封部件推荐采用聚四氟乙烯等耐甲醇溶胀材料;输送泵与阀门主体推荐采用 316L 不锈钢等高耐蚀材料。功能适应性方面,储罐推荐采用钢制抗爆内浮顶与多重密封系统以强化气密性;输送泵可通过优化入口条件并采用动态压力/流量调节算法以抑制汽蚀、减少过泵混油;阀门需集成零泄漏密封与防火防爆设计,实现紧急工况下的快速截断。安全环保适应性方面,建议从材料选择、密封控制、泄漏监测、挥发性有机物回收、应急处置等多维度进行关键设备安全防护体系升级改造。【结论】构建关键设备适应性评价与改进策略,可助力中国成品油管道顺序输送甲醇工程实践,推动现有油气管道系统向多介质、新能源方向发展,并为行业标准制定提供技术参考,促进能源行业可持续进步。(表 4, 参 54)

关键词: 成品油管道; 甲醇管道; 顺序输送; 关键设备; 适应性

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)09-0998-14

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.09.005

Analytic Research on Adaptability of Key Equipment for Sequential Methanol Transportation in Product Oil Pipelines

WANG Cailin¹, GU Ziqiang², QIU Shujuan², LI Xiaolong², LI Jingfa³, YU Bo³, LI Yuxing¹, YU Xinran¹

1. 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; 2. Western Branch, PipeChina United Pipeline Co., Ltd.;

3. School of Petroleum Engineering, Yangtze University

Abstract: [Objective] Some refined oil pipelines in China operate at low load rates. Utilizing these pipelines for batch transportation of methanol not only supports long-distance, large-scale methanol storage and transportation, but also maximizes pipeline asset utilization. The water solubility, strong polarity, volatility, flammability, toxicity, and other properties of methanol differ significantly from those of refined oil products such as gasoline and diesel, increasing the risk of corrosion in metallic components, swelling of non-metallic seals, and failure of existing risk prevention measures, thereby posing challenges to the adaptability of key equipment in refined oil pipelines. [Methods] In light

of domestic and international standards, specifications, and engineering practices, the adaptability of key equipment—such as storage tanks, transfer pumps, valves, and flow meters—for methanol batch transportation via refined oil pipelines was thoroughly examined to establish an evaluation strategy from three perspectives: material adaptability, functional adaptability, and safety and environmental protection adaptability. Material adaptability focused on evaluating the service performance and lifespan of anti-corrosion coatings on storage tanks, metallic materials that are prone to corrosion (like carbon steel and cast iron) and in direct contact with the medium, and non-metallic sealing materials exposed to pressurized methanol. Functional adaptability focused on evaluating the floating roof of refined oil storage tanks, the transfer pump's anti-cavitation performance, and the sealing performance of key equipment. Safety and environmental protection adaptability focused on evaluating the adaptability of the refined oil storage tank breathing system, exhaust gas recovery system, key equipment leakage monitoring system, and emergency response plan in a methanol environment. [Results] Based on the adaptability evaluation strategy, it is recommended that methanol storage tanks use stainless steel or carbon steel with fluoride or epoxy-modified coatings; sealing components employ polytetrafluoroethylene or other methanol swelling-resistant materials; and transfer pumps and valve bodies be made from 316L stainless steel or other highly corrosion-resistant materials. Storage tanks should feature steel explosion-proof internal floating roofs and multiple sealing systems to enhance airtightness. Transfer pumps require optimized inlet conditions and dynamic pressure/flow regulation algorithms to suppress cavitation and reduce oil mixing during pumping. Valves should incorporate zero-leakage sealing and fire/explosion protection for rapid emergency shutdown. For safety and environmental protection, key equipment safety systems should be improved across material selection, sealing control, leakage monitoring, volatile organic compound (VOC) recovery, and emergency response. [Conclusion] From the above results, establishing an adaptability evaluation and improvement strategy for key equipment can support methanol batch transportation via refined oil pipelines in China, advance the evolution of oil and gas pipeline systems toward multi-medium and new energy transportation, provide technical guidance for industry standards, and promote sustainable development in the energy sector. (4 Tables, 54 References)

Key words: refined oil pipeline, methanol pipeline, batch transportation, key equipment, adaptability

当前,在全球能源结构转型与中国“碳达峰、碳中和”战略目标的双重驱动下,发展清洁能源已成为保障国家能源安全与实现可持续发展的重要路径^[1-2]。绿色甲醇的氢源来自可再生能源(风电、光伏等)电解水制取的“绿氢”,碳源则来自生物质、工业废气或直接空气捕集的二氧化碳,其生产过程完全脱离化石能源依赖^[3-6]。绿色甲醇可将西北地区弃风弃光电力转化为稳定能源储备,有效解决了新能源消纳难题,同时能降低二氧化碳排放,是中国能源转型的重要载体^[7-11]。2021年11月工信部印发《“十四五”工业绿色发展规划》,支持“二氧化碳耦合制甲醇”绿色低碳技术推广应用;2022年3月国家发改委、国家能源局联合制定的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》提出探索可再生能源制氢合成甲醇以替代化石能源,共同推动了国内绿色甲醇产业的蓬勃发展。

中国绿色甲醇产业呈现出显著的“西产东需”地理分布特征。在供给侧,西部地区充足的风光资源为电解水制绿氢提供了清洁电力,丰富的煤炭资源通过碳捕集技术转化为稳定碳源;需求侧则高度集中于东部地区,利用绿色甲醇作为化工原料与船用燃料^[12-16]。

这种显著的区域供需错配迫切要求大力发展大规模、长距离的甲醇输送方案。在此背景下,中国部分成品油管道面临着输送负荷率偏低的问题,为实现甲醇运输提供了潜在的利用空间。充分利用现有成熟、覆盖广泛的成品油管道网络的富余能力,通过顺序输送方式实现甲醇运输,既是满足甲醇大规模、经济、高效储运需求的重要手段,也是盘活成品油管道资产、提升基础设施利用率的有效途径^[17-18]。国外已形成较成熟的甲醇管道设计标准,并成功开展了成品油管道顺序输送甲醇的工程实践^[19-21]。相比之下,中国甲醇管道多为化工园区管道,输送规模与覆盖范围有限,尚未建立长距离甲醇管道设计标准;同时,中国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^[22-23]。

甲醇的水溶性、强极性、易挥发性、易燃性、毒性等性质与汽油、柴油等成品油存在显著差异^[24-27],这直接导致:水溶性易诱发金属材料腐蚀;强极性易导致橡胶类非金属密封材料溶胀失效;低黏度与高蒸气压加剧泵内汽蚀风险。而现有成品油管道储罐、输送泵、阀门等关键设备的设计基准(材料选型、密封结构、汽蚀

裕量等)主要基于成品油物性制定,其固有结构参数与功能设计难以适配甲醇的物性,可能引发腐蚀泄漏、密封失效、汽蚀损伤等问题,造成安全隐患。因此,在国内缺乏成熟标准与实践经验的背景下,针对甲醇与成品油物性差异带来的潜在设备失效风险,从材料适应性、功能适应性、安全环保适应性 3 个维度,系统梳理关键设备的应用现状、国内外相关标准规范及工程实践案例,深入分析其局限性与失效机理,提出适应性评价要素与改进建议,对于保障中国甲醇-成品油顺序输送管道的安全、高效、可持续运行具有重要的理论意义与工程价值。

1 储罐

在成品油管道顺序输送甲醇的过程中,储罐作为关键的储存设备,能够根据实际需求灵活调控甲醇的输出流量,凭借缓冲效能稳定输送压力,降低压力波动带来的干扰,确保输送过程连续、稳定且安全。新建甲醇储罐存在周期长、投资高及选址受限等现实制约,而现有成品油管道输送系统中大量在役成品油储罐因市场调整而处于闲置状态,且具备优越区位与成熟配套设施优势。利用这些存量成品油储罐转存甲醇,成为快速响应需求、降低成本的战略选择。现有成品油储罐用于储存甲醇面临严峻的适应性挑战,其核心问题集中体现于材料适应性、功能适应性及安全环保适应性等关键领域。材料相容性不足可能引发罐体腐蚀、

涂层失效及浮盘损伤,密封及浮盘功能可靠性下降,难以有效遏制高挥发性甲醇蒸气逸散,安全环保系统(密封装置、呼吸系统、尾气处理系统等)的不匹配则显著增加了可燃气体积聚、环境污染及运行风险。上述问题若未得到针对性解决,将严重威胁储罐的结构完整性、密封效能及运行安全,成为成品油储罐安全储存甲醇的重大制约因素。因此,系统剖析并解决这些适应性瓶颈,是保障甲醇安全储存与输送的关键前提。

1.1 甲醇储罐应用发展现状

当前甲醇储罐广泛应用于化工、燃料储存及船舶动力等领域^[28],多采用新建专用储罐方案,通过针对性设计应对甲醇的独特性质:①选用耐腐蚀金属、涂层材料或电化学防护以抵抗含杂质甲醇的腐蚀性;②采用抗溶胀密封件防止渗透泄漏;③配置氮封、气体探测及专用灭火系统应对低闪点与宽爆炸极限特性;④设置多层防渗结构保障环保安全^[29]。利用在役成品油储罐储存甲醇时,需评估其材料适应性、功能适应性及安全环保适应性,并进行适应性改造。2019 年,浙江乍浦美福码头仓储有限公司成功实施柴油储罐改造为甲醇储罐的项目,将原有的 10 000 m³ 拱顶柴油储罐改造成内浮顶加氮封的甲醇储罐,浮盘采用双密封结构,以适应甲醇特性。

1.2 甲醇储罐相关标准规范

利用现有成品油储罐设施转存甲醇的技术可行性高度依赖国内外标准规范(表 1)对储罐材料兼容性、

表 1 国内外甲醇储罐相关标准规范表
Table 1 Domestic and international standards and specifications for methanol storage tanks

类别	标准名称及标准规范号	相关内容
国外	API 653-2014 《储罐检验、维修、改造和重建》	规定了在役储罐投入运行后保持其完整性的最低技术要求,相关设计、焊接、检验及材料要求可应用于在役储罐的维护检查、定级、修理及改造;依据各个部件或部位的检验结果,对储罐的完好性进行评估与预测,针对劣化或有劣化风险的部件或部位,提出维修建议
	API STD 2000-2014 《常压与低压储罐通风》	涵盖了储罐在正常与紧急条件下的蒸气通气要求,规定了通气方法,通气装置的选择、安装、维修以及泄放装置的测试与标识
	NFPA 30-2024 《可燃和易燃液体规范》	规定了易燃与可燃液体的储存、处理及运输等方面的技术要求
中国	GB/T 37327—2019 《常压储罐完整性管理》	规定了常压储罐完整性管理的基本要求,包括设计、建造、运行、维护、检验、监测及修理等方面的内容
	AQ/T 4112—2023 《化工企业可燃液体常压储罐区安全管理规范》	规定了化工企业可燃液体常压储罐区安全管理的总体要求、规划布局与总图布置、设计要求、施工质量管理、投料试车、运行管理、检维修管理、应急管理
	GB 50074—2014 《石油库设计规范》	规定了石油库设计、建造及运行的安全技术要求,明确规定了甲 B 类液体(如甲醇)库址选择与总平面布置、储罐设计与布置、防火防爆设施、消防系统、装卸与管道系统、环保以及安全防护等设计要求

安全防护重构及运行管理体系的适应性要求。通过系统整合美国消防协会(National Fire Protection Association, NFPA)、美国石油学会(American Petroleum Institute, API)标准及中国国家标准等与甲醇储罐相关的标准规范条款, 可为改造工程提供标准依据。在完整性评估与材料适应性方面, API 653-2014 与 GB/T 37327—2019 构成了改造基础框架。前者要求基于在役储罐检验结果(重点关注罐体腐蚀、焊缝缺陷及底板劣化)预测介质变更后的完整性风险, 明确碳钢材质在甲醇环境中的腐蚀加速隐患, 并提出缺陷维修与改造建议; 后者进一步要求将甲醇的强溶解性、微量甲酸腐蚀特性纳入完整性管理, 获取甲醇储罐中腐蚀成分分析数据进行外加电流阴极保护系统、储罐内底板牺牲阳极、防腐涂层的检查检测。API STD 2000-2014 为蒸气排放系统改造提供了直接依据, 要求依据甲醇饱和蒸气压力重新计算呼吸阀排放量, 并按要求配置氮封系统以抑制爆炸性气体形成。NFPA 30-2024 规定了易燃液体储罐防火间距与防溢流措施。GB 50074—2014 涵盖了新建、扩建及改建石油库的设计要求, 针对库址选择、库区布置、储罐区、易燃与可燃液体泵站等方面提出了详细的规定。

1.3 成品油储罐存储甲醇适应性分析

1.3.1 材料适应性

1.3.1.1 罐体材料适应性

纯甲醇的腐蚀速率相对较低, 但在含水或含杂质的情况下, 由于电化学腐蚀与甲酸腐蚀的影响, 其腐蚀性会显著增强。常见的成品油储罐多采用碳钢材质, 其具有成本低、强度高等优点, 能够满足成品油储存的基本要求。相关标准 GB 338—2011《工业用甲醇标准》、GB/T 41884—2022《车用甲醇燃料作业安全规范》规定, 对于纯度达到一等品及以上的甲醇, 储罐材质推荐采用碳钢或不锈钢。碳钢比不锈钢更易受到腐蚀, 特别是在沿海潮湿环境或含水工况下。对于纯度较低的甲醇, 碳钢的腐蚀风险更高, 因为甲醇中的杂质(水、有机酸等)会加速腐蚀, 考虑到介质的耐腐蚀性与长期稳定性, 在甲醇的储存过程中, 建议优先选择不锈钢储罐。弹性体材料则建议使用丁腈橡胶、氟硅橡胶、氯丁橡胶或聚硫橡胶等, 这些材料在耐甲醇腐蚀方面表现出了良好的性能。对于聚合物材料, 推荐采用缩醛树脂、尼龙、聚丙烯、聚四氟乙烯或玻璃纤维增强塑料, 以上材料能够有效抵抗甲醇的

侵蚀, 确保储罐的长期稳定与安全。

1.3.1.2 防腐涂料适应性

在防腐涂料的选择上, 传统的环氧树脂涂层常用于成品油储罐, 但并不适用于甲醇储罐。这是因为甲醇具有较强的极性, 对有机树脂漆膜的穿透力较强, 环氧树脂涂层在含水甲醇环境中, 其环氧醚键易被破坏, 导致漆膜性能下降, 出现羟基功能团, 进而使漆膜遭到破坏^[30], 易导致漆膜溶胀而过早失效。相比之下, 无机硅酸锌涂料在含水甲醇溶液中展现出更强的耐腐蚀性, 其性能变化较小, 氟化物或环氧改性涂层同样在防腐蚀性上表现出色, 可有效延长甲醇储罐的使用寿命。

GB/T 42416—2023《M100 车用甲醇燃料》推荐环氧酚醛导静电涂料和无机富锌类涂料为常用涂料, 但在部分甲醇储罐应用中出现失效。相关耐受性实验显示, 纯甲醇环境下这两种涂料耐受性较高; 而在含水质量分数为 37.5% 的甲醇溶液中, 无机硅酸锌涂料耐受性优于环氧酚醛^[31]。此外, 防腐涂料对甲醇质量的影响也是选择涂料的重要考量因素。有学者将由环氧树脂、环氧富锌底漆、黑色环氧抗静电面漆、胺类固化剂等分别配制的防腐涂料应用于甲醇储罐中, 发现甲醇可渗入涂层内部, 致使部分溶解的胺类物质、锌粒子、活性炭物质溶入甲醇致其质量不合格。因而, 应避免使用胺类固化剂防腐涂料, 以免对甲醇质量产生不良影响。

1.3.1.3 浮盘材料适应性

对于储存 I、II 级毒性液体的内浮顶储罐, 以及直径大于 40 m 的储存甲 B、乙 A 类液体的内浮顶储罐, 严禁采用易熔材料制作的浮盘。因此, 现有的成品油储罐浮盘通常采用铝合金或其他轻质金属材料, 这些材料在储存成品油时性能良好, 但用于储存甲醇则可能面临腐蚀性挑战。特别是铝合金, 在含水甲醇环境中易发生腐蚀失效。甲醇与消防泡沫水中的强侵蚀性阴离子反应, 会导致浮盘上方出现小孔腐蚀现象。此外, 铝制浮盘在浮盘反复升降过程中会受到冲刷腐蚀的严重影响, 因而采用铝制浮盘的甲醇储罐故障率较高。在实际应用中, 建议选用耐腐蚀性更强的不锈钢材质浮盘, 且日常运营期间需密切监测浮盘的使用状况, 一旦泡沫消防水进入内浮顶储罐, 应立即清除泡沫并更换不锈钢盖板或整体浮盘, 以避免造成更大的损失。

1.3.2 功能适应性

成品油储罐浮盘常见的密封形式主要包括囊式密封、弹力片补偿密封、机械式鞋形密封、浸液式密封等^[32]。囊式密封利用泡沫的压缩回弹力使密封带贴紧罐壁,但摩擦阻力较大,使用寿命较短。弹力片补偿密封采用不锈钢弹性材料,密封性能好,使用寿命可达 20 年,且能与罐壁全接触,边缘密封性好。机械式鞋形密封通过弹簧或配重杠杆使金属薄板紧抵于储罐罐壁,但故障率相对较高。浸液式密封将浮盘边缘密封浸入储存物料液面,可有效减少油气挥发。对于甲醇储罐,由于其储存介质的特殊性(易挥发、易燃等特性),对密封形式有更严格的要求^[33]。单盘式与双盘式是国内外甲醇储罐常用的两种浮盘形式(表 2)。在密封设计上,多数储罐采用的是一次密封与二次密封相组合的形式。一次密封常为三芯软密封,二次密封多为带油气隔膜的结构,可提升密封性能。此外,为确保浮盘密封可靠,需保证浮顶盖板、内

浮盘与罐壁之间的材料与结构密封性。盖板密封通常采用密封胶或垫片,内浮盘与罐壁间则采用囊状密封袋、舌形橡胶密封带等部件。在储罐实际运行中,要重点关注浮盘的结构稳定性与耐火安全性。依据 GB 50074—2014 要求,储存 I、II 级毒性液体的内浮顶储罐,以及储存甲 B、乙 A 类液体且单罐容量大于 5 000 m³ 的内浮顶储罐,应选用抗爆耐火浮顶。GB 50160—2018《石油化工企业设计防火标准》也规定,单罐容积大于 5 000 m³ 的内浮顶储罐应采用钢制单盘或双盘式浮顶。但现有的钢制单、双盘式内浮盘浮舱数量较少,易致浮力下降或受力不均,引发下沉事故。甲醇的挥发性较强,在役成品油储罐的浮盘密封方式可能无法完全阻止甲醇蒸气的泄漏,如传统液体镶嵌式密封可能在长期使用中出现老化、失效等问题。建议采用更高效的密封方式,如机械式鞋形密封或双封式密封,以便更好地防止甲醇蒸气泄漏,降低火灾与爆炸风险^[28]。

表 2 国内外常见甲醇储罐浮盘类型表
Table 2 Types of floating roofs for methanol storage tank

浮盘类型	特点	输送甲醇适应性分析
钢制单盘式	质量小、结构简单、施工方便、散热快;浮仓结构强度高,浮盘表面需防腐处理	应选用抗爆耐火浮顶;碳钢材质,安装完毕后需进行大面积防腐
钢制双盘式	附件密封措施普遍较差,增加挥发性有机物治理成本	碳钢材质,安装完毕后需进行大面积防腐

1.3.3 安全环保适应性

1.3.3.1 密封系统适应性

根据 GB 31571—2015《石油化学工业污染物排放标准》,甲醇排放限值应低于 50 mg/m³。SH/T 3007—2014《石油化工储运系统罐区设计规范》则要求压力或低压储罐需防止空气进入,并密封收集处理排出气体。内浮顶罐虽与氮封联用可提升罐内密封与安全水平,却难以杜绝储罐呼吸尾气中甲醇浓度超标的风险,仍可能对环境造成危害。正常情况下,浮盘与罐壁间隙会有少量甲醇蒸气逸出,与氮气混合后经呼吸阀排放;出液时补入氮气,甲醇会闪蒸挥发形成可燃气体。丁丽芹等^[34]指出甲醇储罐存在蒸发损耗的原因:①通气窗与通气孔无法完全消除油气空间;②外界风干扰增加油气损耗;③密封材料老化与检修不便导致浮盘与储罐之间间隙扩大;④昼夜温差影响油气浓度。因此需评价在役成品油储罐密封系统对甲醇的密封性,保证不超过甲醇排放限值。

1.3.3.2 呼吸系统适应性

氮封系统主要由进氮阀、泄氮阀、紧急泄放阀及配装阻火器的呼吸阀构成,因其具有运行可靠、响应灵敏、节能降耗、维护便捷、操作简便及环保安全等特性,可有效减少挥发性有机物的排放,在储罐的日常运营中发挥着不可替代的作用。与储罐配套的浮盘可进一步降低介质的自然挥发量,但随着运行时间的累积,储罐的密封带对罐壁的密封补偿效能会逐渐衰退,导致少量挥发性气体逸出,存在挥发性有机物排放超标的风险。鉴于罐内甲醇的挥发性,储存时易与空气混合成可燃气体,尤其是储存易燃易爆、低闪点、易挥发介质的罐体,建议优先配置氮封系统,以提升安全防护。

1.3.3.3 尾气回收系统适应性

在役成品油储罐改储甲醇的尾气回收系统需要依据尾气成分进行优化。目前,尾气处理主要采用分解、回收两种方式。分解法通过催化或燃烧将尾气组分转

化为安全无害的 H_2O 、 CO_2 等; 回收法则采用冷凝、吸附或吸收等方式, 将有害物质分离并实现资源化利用。冷凝法需在一定压力下将气体温度降至 $-80\sim-70\text{ }^\circ\text{C}$, 使甲醇蒸气冷凝成液体进行回收, 该方法处理成本高、维护工作量大; 吸附法利用活性炭、分子筛或改性树脂等吸附剂对甲醇蒸气的选择性吸附作用, 将尾气中的甲醇捕集在固体表面, 再通过降压、升温或吹扫再生, 使甲醇脱附并冷凝回收。吸附剂可循环使用, 系统能耗较低, 自动化程度高, 但对进气湿度和杂质敏感, 需定期更换或再生活性炭; 吸收法利用甲醇与水互溶的特性, 通过脱盐水洗涤回收甲醇储罐顶部呼出气中的甲醇。吸收后的富液可作为废水处理, 经汽提、精馏回收有机物, 或用作其他生产工艺的原料。该方法工艺设备简单, 投资、操作费用低, 已被企业广泛应用。

2 输送泵

输送泵作为成品油管道顺序输送甲醇系统的核心动力设备, 承担着介质加压输送、流量调节等关键作用。成品油输送泵的甲醇适应性直接决定了管道系统运行的效率、安全性及经济性。输送泵的材料相容性问题可能加速金属腐蚀与非金属密封溶胀失效; 甲醇高蒸气压与低黏度特性易加剧泵内汽蚀损伤风险, 侵蚀过流部件并降低运行效率; 过泵剪切作用易破坏甲醇-成品油界面稳定性, 诱发混油加剧与油品污染; 密封可靠性下降则直接提升易燃介质泄漏、燃爆事故概率。上述问题若未能得到针对性解决, 将严重制约输送系统的结构完整性、运行稳定性及本质安全水平, 成为成品油管道安全输送甲醇的关键瓶颈。因此, 攻克成品油泵输送甲醇的适应性问题, 是保障系统高效、安全、环保运行的核心前提。

2.1 甲醇泵应用发展现状

2.1.1 低温甲醇洗

贫甲醇输送泵是低温甲醇洗装置中的重要设备, 是中国甲醇泵主要使用的场景之一, 其承担着洗涤原料气贫甲醇的输送任务^[35]。该泵的主要作用是来自再生塔的热甲醇经换热降温, 洗涤净化酸性气体, 并送往洗涤塔, 选择性地脱除硫、脱碳阶段的净化^[36]。低温甲醇洗工艺运行温度通常为 $-70\sim-50\text{ }^\circ\text{C}$ ^[37-38], 多选用低温离心泵。贫甲醇泵在泵体材料上选择耐低温

性能优异同时对甲醇、 CO_2 、 H_2S 及酸性环境均表现出良好耐腐蚀性的 316L 不锈钢, 机械密封的密封圈材料多采用 PTFE, 内衬弹簧圈增强密封圈弹性, 以防止甲醇泄漏并适应低温环境^[39]。

2.1.2 甲醇精馏

在甲醇化工行业中, 通过甲醇泵将合成的粗甲醇加压后进行精馏, 也是甲醇泵的主要使用场景之一。行业实践表明, 磁力驱动泵与屏蔽泵因具备本质安全密封特性已成为现代甲醇精馏装置的主流选择。典型工程案例中, 河南某大型煤化工企业在 500 kt/a 级甲醇装置中选用全密闭磁力泵, 其隔离套组件采用碳化硅或陶瓷材料, 满足了腐蚀性介质工况下的长期稳定运行需求; 山西某化工集团在 400 kt/a 级甲醇工程中则采用屏蔽泵作为关键输送设备, 在杜绝介质外泄风险的同时, 还兼具了维护便捷与运行周期长的优势。

2.1.3 甲醇管道输送

在甲醇管道输送系统的设计与选型中, 长输管道因其流量大、扬程高的特点, 通常优先选用离心泵作为核心增压设备。然而, 目前国内外长距离甲醇管道建设与运营的成熟案例相对较少, 代表性的案例是中国于 2021 年 5 月建成投运的首条甲醇制烯烃 (Methanol to Olefins, MTO) 级甲醇长输管道——中煤鄂能化 100 万吨甲醇技改项目配套工程^[40]。该管道全长约 52 km, 设计压力为 2.5 MPa, 采用了离心泵方案, 其关键密封形式为双端面机械密封, 并选用 PTFE 作为密封部件材料, 初步验证了利用离心泵实现甲醇长距离管道输送的技术可行性。

2.2 甲醇泵相关标准规范

API、中国国家标准化管理委员会及海事安全管理局 (Maritime Safety Administration, MSA) 等机构发布的标准规范条款 (表 3), 可为甲醇泵的选型、设计、安装、检验及操作维护等提供技术支撑与标准依据。API 610-2021 标准作为石油、天然气及化工行业离心泵的权威技术规范, 系统规定了泵体结构、材料选型及安全性能要求。虽然该标准未单列甲醇介质专项条款, 但其通用技术体系仍可为甲醇泵设计提供基础框架。在材料选型方面, 标准明确规定叶轮、泵壳、轴等核心部件需根据介质特性 (腐蚀性、温度、压力) 选择适配材料, 针对甲醇介质环境推荐采用不锈钢、双相不锈钢等材料。GB/T 51007—2014 作为中国石油化工

表 3 国内外甲醇泵相关标准规范表
Table 3 Domestic and international standards and specifications for methanol pumps

类别	标准名称及标准规范号	相关内容
国外	API 610-2021 《石油、石化和天然气工业用离心泵》	对离心泵的设计、材料、密封、测试等环节提出了严格的技术要求,如叶轮、泵壳、轴等关键部件需根据介质性质、温度、压力及腐蚀性选择材料,常用材料包括碳钢、不锈钢、铸铁、双相不锈钢等,针对甲醇介质推荐选择不锈钢、双相不锈钢等材料
	API 682-2014 《离心泵和转子泵用轴封系统》	针对离心泵的密封系统提出了规定,如双端面机械密封适用于需要高密封性、低泄漏率的场合,该密封方式适用于高危流体与气体的密封,如易燃易爆介质
	GB/T 3215—2019 《石油、石化和天然气工业用离心泵》	对输送甲醇等特殊介质的离心泵提出了明确的技术要求,主要涉及材料选择、密封系统、汽蚀防护等关键领域
中国	GB/T 34875—2017 《离心泵和转子泵用轴封系统》	对甲醇泵的 O 形圈选型进行了规定
	GB/T 51007—2014 《石油化工用机泵工程设计规范》	对输送泵的设计,从材料、密封性能、安全到安装维护均提出了系统性要求,如挥发性有机物流经泵时,应进行泄漏检测与控制,工程设计应易于泄漏检测与修复操作
	GB 50275—2010 《风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范》	针对输送泵的安装与调试提出了要求,针对输送易燃、有毒介质的泵静密封需无泄漏,动密封泄漏量不得超过技术文件规定
	MSA 2025 年 第 3 号 《中华人民共和国船舶技术法规》	针对船舶上甲醇泵的安全防护与维护操作做出了规定,如甲醇加注泵、驳运泵出口应设置管路高/低压报警装置,报警时自动停止泵的运行

行业用泵的核心标准,同样包含了甲醇泵的设计、选型、材料选择及安全运行的系统性要求。尽管该规范没有专门针对甲醇泵的规范内容,但其技术条款通过介质特性适配、材料耐腐蚀性、密封性能等维度,全面覆盖了甲醇泵的特殊技术要求。GB/T 3215—2019 对输送甲醇等特殊介质离心泵的材料选择、密封系统、汽蚀防护等关键领域进行了规定。GB/T 34875—2017 对甲醇泵的 O 形圈选型进行了规定。API 682-2014 标准针对机械密封系统提出专项要求,特别指出双端面机械密封适用于易燃易爆高危介质,其低泄漏率与高可靠性特征可有效应对甲醇易挥发、高燃爆风险的输送需求。尽管 API 标准体系未对甲醇泵设置独立章节,但其通用安全条款(防爆结构设计、腐蚀裕量计算、泄漏监测要求等)已基本覆盖甲醇输送的核心风险,实际应用中需结合甲醇低黏度、高蒸气压等物性参数优化水力设计与密封配置。《中华人民共和国船舶技术法规》对船舶上甲醇泵的安全防护与维护操作做出了规定。GB 50253—2014《输油管道工程设计规范》主要针对传统油品设计,对甲醇特有的腐蚀防护、气相挥发控制、挥发性有机物治理等缺乏专项条款,导致管道泵送系统的材料兼容性评价、密封性能评价等环节缺乏依据,亟待通过工程实践与科研攻关完善技术标准体系。

2.3 成品油泵输送甲醇适应性分析

2.3.1 材料适应性

甲醇作为极性溶剂,若是在含有杂质(如甲酸、水、

氯化物等)的工况下,极易会引发输送泵金属部件的腐蚀失效^[41-43],因此,甲醇泵的设备选型需要考虑甲醇的杂质成分及其导致的腐蚀与磨损风险^[44]。与输送介质接触的金属材料不宜使用碳钢、铝及铝合金等,泵体及关键部件应选用不锈钢(如 316L)或更高等级的耐腐蚀合金^[45-46]。甲醇对非金属密封材料的溶胀效应同样是可能导致输送泵泄漏的关键因素。硅橡胶、氟橡胶等密封材料不适用于甲醇管道环境,推荐选用 PTFE 等耐甲醇溶胀材料作为输送泵的密封材料。在役成品油管道的输送泵经过长时间运行,与输送介质接触的金属材料或非金属材料往往存在缺陷或老化等问题,需要结合甲醇泵相关标准与实验研究,评价含缺陷材料与含杂质甲醇的相容性,并在必要的时候进行改造。

2.3.2 功能适应性

2.3.2.1 泵汽蚀效应

当输送泵内局部压力低于甲醇饱和蒸气压时,液态甲醇将汽化形成气泡,随介质流动至高压区时气泡溃灭,瞬间产生高频冲击力,造成输送泵的汽蚀。汽蚀现象会侵蚀过流部件表面,引发振动噪声,降低泵效,严重时导致金属疲劳剥落。甲醇的饱和蒸气压随温度升高急剧增加,易挥发,温度敏感性较高。Log 等^[47]通过实验研究了从 20 ℃ 到 40 ℃ 的甲醇蒸气压情况,其蒸气压从 13.0 kPa 升至 47.4 kPa(与二氯甲烷接近),而汽油的蒸气压变化相对平缓,因此,甲醇在

高温工况下的汽蚀风险高于汽油。与类似有机物(如乙醇)相比, 甲醇的饱和蒸气压对温度更敏感: 这种差异源于甲醇分子量较小、分子间作用力较弱, 导致更易挥发, 温度敏感性更高。金哲学^[48]的研究表明, 甲醇环境下泵的汽蚀风险高于成品油环境, 这是由于甲醇的黏度更低, 低黏度环境不仅降低了气泡运动阻力, 促进空泡生成, 更使气泡溃灭时能量释放集中, 加剧材料侵蚀。在相同的入口条件(压力、温度)和流量下, 现有成品油泵输送甲醇时发生汽蚀的风险远高于输送成品油, 尤其是在高温、低入口压力工况下^[49]。现有研究多聚焦于静态单一介质工况, 对顺序输送过程中流量脉动、压力瞬变及介质交替引发的动态汽蚀机理缺乏系统解析, 尤其甲醇高蒸气压、低黏度特性在复杂流态下的汽蚀动态演变规律尚未明晰。为防止输送泵在输送甲醇时出现汽蚀问题, 需针对成品油管道输送泵进行特性曲线换算, 基于汽蚀裕量分析输送甲醇时的适应性, 必要时可采取改进泵入口的结构参数、在泵的吸入口加装诱导轮、改进吸入管路与调整安装高度、优化工艺操作条件等方案。从不影响管道安全运行的角度出发, 优化工艺操作条件(如维持足够的吸入压力、避免温度过高、动态调节压力/流量参数等措施)具有更好的可行性。

2.3.2.2 过泵混油效应

甲醇与成品油物性差异显著, 在顺序输送过程中相间传质与相溶性会导致混油段形成分层或乳化现象, 影响油品质量。过泵时高速湍流剪切力易破坏甲醇-成品油界面的稳定性, 诱发非均质混合与相间扩散增强效应, 从而加剧混油扩展风险。目前研究多集中于传统成品油之间的混合, 分析了传统油品过泵对混油段长度的影响, 然而输送泵对甲醇-成品油体系界面特性与传质速率的影响仍不清晰。需明确不同输送工况下输送泵对甲醇-成品油体系传质与混油的影响规律及机理, 构建适应甲醇特性的过泵混油预测模型, 提出基于压力/流量参数与批次切换逻辑调节的混油控制策略。

2.3.3 安全环保适应性

成品油管道顺序输送甲醇过程中, 泵的安全环保适应性需重点关注介质理化特性引发的密封失效与泄漏风险。建议采用双端面机械密封提高离心泵的密封性能。电机、仪表及电气设备需符合 ExdIIBT4 或更高防爆等级。需安装适用于甲醇的可燃气体传感器, 传

感器应与自动切断阀和报警装置联动, 以便在检测到泄漏时能够迅速响应, 自动切断输送系统并发出警报; 同时根据 API 等成熟规范标准, 制定专门针对甲醇输送泵的应急处理方案。

3 阀门

阀门作为长距离管道输送系统的核心控制单元, 其甲醇介质适配性直接影响系统安全性与运行效能。相较于常规油品阀门, 甲醇的水溶性、高挥发性及易燃性等特性, 对阀门的材料体系、密封结构及安全防护提出了更严苛要求。材料相容性问题可能引发金属腐蚀加速与密封件溶胀失效; 密封结构可靠性下降难以有效阻隔高挥发性甲醇介质渗漏; 安全防护机制不匹配则会显著增加易燃介质泄漏、静电积聚及火灾爆炸事故概率。上述问题将直接威胁管道系统的密封完整性、控制精度及本质安全水平, 构成制约甲醇安全输送的关键瓶颈。因此, 突破成品油阀门输送甲醇的适应性壁垒, 是实现系统可靠调控与安全运行的核心前提。

3.1 甲醇阀门应用现状

在煤化工甲醇生产装置中, 专用阀门的技术发展紧密贴合工艺流程的特殊需求。以气化炉、合成反应器及精馏系统等关键环节为例, 甲醇阀门需在高温与高腐蚀性环境下实现精准控制并防止泄漏^[50-51]。在材料选择方面, 阀体材料通常采用 316L 不锈钢或内衬聚四氟乙烯的碳钢, 而阀座密封材料则优先选用全氟醚橡胶或聚四氟乙烯。在结构设计上, 非接触传动的磁力驱动阀与全封闭屏蔽式球阀的应用, 大大减少了传统机械密封的泄漏风险; 随着精馏工艺的规模化, 高压锻钢球阀需求逐渐增加, 部分项目开始采用双密封结构以应对复杂工况。

3.2 甲醇阀门相关规范标准

甲醇阀门选型、设计、制造、测试及安装维护的技术可行性, 同样高度依赖于国内外标准规范对材料相容性、极端工况密封(如防火、低温)、逸散性排放控制及功能适用性的严格规定。API、国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)及中国国家标准化管理委员会等权威机构发布的标准规范条款(表 4), 可为甲醇工况下各类阀门的工程应用提供技术支撑和依据。API 6D-2021 作为管道阀门的

表 4 国内外甲醇阀门相关标准规范表
Table 4 Domestic and international standards and specifications for methanol valves

类别	标准名称及标准规范号	相关内容
国外	API 6D-2021《管道阀门规范》	规定管道阀门的设计、材料、试验及验收要求, 涵盖全焊接阀体、双活塞效应阀座等关键结构, 适用于甲醇长输管道的高压密封需求
	ISO 14313-2007《石油和天然气工业—管道运输系统—管道阀门》 (2025 年第 3 版制定中)	规定石油天然气(含甲醇等低碳能源)管道系统中应用的球阀、止回阀、闸阀和旋塞阀的设计、制造、测试和文件编制的要求和建议
	API 607-2022《软密封直角回转阀的防火测试》	针对易燃易爆环境(如甲醇储罐区)的阀门防火性能进行了规定, 甲醇阀门选型必须严格满足该标准的防火要求, 在火灾条件下保持密封性和结构完整性
	ISO 15848-2015《工业阀—逸散性排放的测量、试验和鉴定程序》	明确阀门逸散性排放(如阀杆、阀座)的限值, 甲醇阀门需达到 Class AH 级(极低泄漏), 符合环保与安全要求
中国	GB/T 19672—2021 《管线阀门技术条件》	对管道阀门的技术要求、材料选取、低温材料性能要求、阀门焊接、硬度要求、检验规则、试验方法等进行了规定, 适用于甲醇介质
	GB/T 12224—2015 《钢制阀门一般要求》	通过对压力-温度额定值、材料分组、壁厚公式及试验条款的系统引用, 可覆盖甲醇工况阀门的设计、制造与检验需求
	GB/T 50892—2013《油气田及管道工程仪表控制系统设计规范》	主要从安全仪表系统、防爆、材料相容性及泄漏控制角度提出强制性要求, 适用于甲醇介质

通用技术标准, 系统规定了密封结构、材料适应性及试验验收要求, 其通用技术条款可为甲醇高压管道阀门设计提供基础框架。ISO 14313-2007 涵盖甲醇管道系统中球阀、止回阀、闸阀和旋塞阀等阀门的选型原则及建议。基于现行中国标准, 甲醇输送阀门的技术要求如下: GB/T 19672—2021 规定, 甲醇工况阀门需采用全焊接阀体或双密封结构, 阀座材料优先选用 PTFE 或金属增强复合材料, 并规定阀门在低温(−50 ℃ 以下)工况的夏比冲击试验要求。GB/T 12224—2015 进一步规范材料适配性, 明确阀体材质需不低于连接管道标准, 可采用 316L 不锈钢或 PTFE 内衬碳钢, 且密封面需经硬化处理以抵御甲醇介质的冲刷腐蚀。API 607-2022、GB/T 50892—2013 等标准从防火、防爆及泄漏控制等角度对甲醇阀门选型提出了要求。

国内外现行标准规范虽对甲醇阀门的金属材料选型、密封结构等提出了要求, 却未明确给出非金属密封材料在甲醇管输工况下的选型建议, 也未考虑成品油与甲醇顺序输送产生的非金属材料溶胀与多介质相容性问题, 亟需建立管输工况下非金属密封材料相容性数据库, 完善相关标准体系。在长距离甲醇管道和成品油管道顺序输送甲醇场景下, 针对阀门逸散泄漏及燃烧爆炸等风险, 现行标准规范中的阀门设计、选型及安全防控等要求亟待验证与完善。

3.3 成品油管道阀门输送甲醇适应性分析

GB/T 19672—2021 规定, 甲醇阀门需采用全焊接阀体或双密封结构, 阀座材料优先选用聚四氟乙烯或

金属增强复合材料, 并规定阀门在低温(−50 ℃ 以下)工况的夏比冲击试验要求。GB/T 12224—2015 规定, 阀体材质不能低于连接管道标准, 甲醇阀门常用 316L 不锈钢或内衬聚四氟乙烯碳钢, 阀杆采用 2Cr13 不锈钢, 密封面需通过硬化处理以应对甲醇冲刷。成品油管道阀门输送甲醇, 需基于管道工程中的阀门实际材质、服役状态及输送环境, 结合甲醇阀门相关规范标准与相容性实验, 评价成品油管道阀门金属材料的甲醇相容性。

调研数据显示, 当前成品油管道系统中普遍使用的球阀(如伯马、耐莱斯等品牌)均采用锻钢阀体、镀铬球体及氟橡胶密封的组合设计, 在短期内能够满足甲醇输送的基本要求。然而, 考虑到甲醇的强溶剂特性, 氟橡胶密封件在长期运行的过程中可能会出现溶胀现象, 建议采用聚四氟乙烯材料作为替代方案, 以提高密封可靠性。对于调节阀, 316L 不锈钢阀体配合聚四氟乙烯填料可展现出优异的耐腐蚀性能; 泄压阀则需采用 316L 不锈钢结构并集成防火阻火装置, 以确保热稳定性与安全性。此外, 需重点强化两方面防护: 一是针对甲醇易挥发、易燃特性, 实施静电导除与跨接措施; 二是监控苛刻温度工况(高温、低温)下密封材料的性能稳定性。虽然现有阀门系统通过材料优化和定期维护可以满足甲醇输送的基本要求, 但仍需通过小规模试点运行来验证其长期适应性, 尤其是要重点监测密封材料的性能衰减情况, 确保系统的安全与稳定。

4 流量计

在成品油管道顺序输送甲醇系统中, 采用流量计精确测量甲醇的即时流量与累计输送量可保障贸易结算精度, 从而避免因流量误差导致的经济损失。同时, 通过实时监测流量数据, 可有效监控管道运行状态, 及时发现泄漏、堵塞等异常情况。国外采用的甲醇流量计主要为质量流量计与涡轮流量计, 国内煤化工领域计量甲醇的流量计以质量流量计与涡街流量计为主。流量计的材质以 304 不锈钢、316L 不锈钢等为主。从安全环保的角度出发, 甲醇流量计也需要具备高精度、耐腐蚀性、密封性及防爆安全性等功能。

GB 50253—2014《输油管道工程设计规范》规定了输油管道流量计宜选用速度式、容积式或质量式流量计, 其准确度应高于 0.2 级。甲醇输送过程中, 流量计的选型需综合考虑流体特性、测量精度与工况条件。质量流量计(如科里奥利式)因其直接测量质量流量的优势, 避免了密度变化引起的误差, 具有较好的甲醇适应性^[52-54]。然而, 甲醇的低黏度特性可能导致科里奥利流量计振动管阻尼过小, 影响相位差检测精度。此外, 应避免甲醇发生相变、管内出现多相流影响流量计的精度。涡街流量计通过传感器产生的涡旋频率来确定流量, 受流体密度和温度影响较小, 也具有较好的甲醇适用性。涡轮流量计在甲醇计量中面临的核心问题源于其机械结构特性。甲醇的弱润滑性会加速涡轮轴承磨损, 导致仪表系数漂移, 故对介质纯净度要求较高, 微米级颗粒物即可引发表面磨损与动平衡破坏, 同时也需采用耐磨材料并定期校准。

5 结论

综合国内外技术规范与工程实践经验, 从材料相容性、功能匹配性及安全环保性等多维视角出发, 系统评估了成品油管道顺序输送甲醇工况下关键设备的适用性, 具体包括储罐、输送泵、阀门及流量计等核心设备, 为中国成品油管道顺序输送甲醇的可行性分析及标准规范建立提供了技术参考, 主要结论如下:

1) 甲醇储罐作为关键储运设备, 广泛应用于化工、燃料储存及船舶动力领域。国外在设计与应用技术上不断进步, 尤其在安全与环保方面成果显著, 如开发

泄漏检测技术、改进消防系统方案。国内储罐设计研发也取得突破, 已形成较完善的设计与管理体系。国内外均制定了相关标准规范, 为储罐安全管理提供了指导。然而, 成品油储罐改存甲醇仍面临防腐蚀、防泄漏、防火、防爆等关键问题, 需优化材料选择与功能设计。未来应加强储罐设备的研发改进, 提升智能化与自动化水平, 推动甲醇储罐技术发展。

2) 甲醇输送泵在化工行业中有广泛应用, 目前化工行业已构建了甲醇泵设计、选型及维护等方面的标准规范。成品油管道输送泵输送甲醇, 材料方面推荐采用 316L 不锈钢等高耐蚀合金并配以改性聚四氟乙烯密封组件, 以应对甲醇介质在含杂质工况下的腐蚀与溶胀效应; 汽蚀防控方面需融合性能参数核算与工艺参数优化; 混油控制方面需明确输送泵对甲醇-成品油体系传质与混油的影响规律及机理, 构建过泵混油预测模型, 提出过泵混油控制策略; 安全方面应集成双端面机械密封、ExdIIBT4 防爆系统及泄漏监测联锁装置, 形成风险闭环管理。

3) 甲醇阀门作为管道输送系统的核心控制设备, 其介质适配性直接影响管道运行安全与效率。材料方面推荐采用 316L 不锈钢或聚四氟乙烯内衬碳钢阀体, 密封组件升级为全氟醚橡胶或金属-聚四氟乙烯复合结构; 结构设计方面, 全封闭屏蔽式球阀与磁力驱动阀的应用可消除动密封泄漏点, 双密封及防火阀体(符合 API 607-2022)适配高压与易燃工况。安全方面需集成 ExdIIBT4 防爆系统、静电疏导装置及泄漏联锁保护, 构建风险闭环管理。

4) 在成品油管道顺序输送甲醇系统中, 流量计作为核心计量设备, 其选型需兼顾精度保障与工况适配性。目前国内外甲醇流量计以质量流量计、涡街流量计、涡轮流量计等为主。成品油管道系统的质量流量计与涡街流量计具有较好的甲醇适用性。涡轮流量计对介质纯净度要求较高, 需考虑甲醇的弱润滑性并控制固体颗粒物含量。

参考文献:

- [1] 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.
- 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.
- [2] 林凯, 杨放, 谢文江, 张瑶, 代盼, 王晨, 等. “双碳”目标下 CO₂ 输送管道与腐蚀防治技术研究现状及展望[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 39(5): 116–126. DOI: [10.3969/j.issn.1673-064X.2024.05.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-064X.2024.05.015).
- LIN K, YANG F, XIE W J, ZHANG Y, DAI P, WANG C, et al. Current status and prospects of research on CO₂ transmission pipelines and their corrosion prevention technologies under the “Dual Carbon” target[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2024, 39(5): 116–126.
- [3] 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.
- [4] FASIHI M, BREYER C. Global production potential of green methanol based on variable renewable electricity[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(10): 3503–3522. DOI: [10.1039/D3EE02951D](https://doi.org/10.1039/D3EE02951D).
- [5] BLANCO E C, SÁNCHEZ A, MARTÍN M, VEGA P. Methanol and ammonia as emerging green fuels: evaluation of a new power generation paradigm[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 175: 113195. DOI: [10.1016/j.rser.2023.113195](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113195).
- [6] LI J G, WU C N, CAO D F, HU S X, WENG L, LIU K. Green methanol-an important pathway to realize carbon neutrality[J]. *Engineering*, 2023, 29: 27–31. DOI: [10.1016/j.eng.2023.08.005](https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.005).
- [7] 江同文, 窦立荣, 王红岩, 赵群, 卢颖, 夏永江, 等. 能源转型: 通往净零之路: 第24届世界石油大会综述[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 1–6. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2023.11.001](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2023.11.001).
- JIANG T W, DOU L R, WANG H Y, ZHAO Q, LU Y, XIA Y J, et al. Energy transformation: The path to net zero: Overview of the 24th World Petroleum Congress[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 1–6.
- [8] 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.
- [9] 侯梅芳, 梁英波, 徐鹏. 中国式现代化目标下构建新型能源体系之路径思考[J]. *天然气工业*, 2024, 44(1): 177–185. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.01.016](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.01.016).
- HOU M F, LIANG Y B, XU P. The path of building a new energy system under the goal of Chinese modernization: A discussion[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1): 177–185.
- [10] SONTALIA A, KUMAR N, TOMAR M, EDWIN GEO V, THIYAGARAJAN S, PUGAZHENDHI A. Moving ahead from hydrogen to methanol economy: scope and challenges[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2023, 25(2): 551–575. DOI: [10.1007/s10098-021-02193-x](https://doi.org/10.1007/s10098-021-02193-x).
- [11] 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.
- [12] LI C J, HAO Q W, ZHANG W, WANG S Y, YANG J. Development strategies for green hydrogen, green ammonia, and green methanol in transportation[J]. *Renewable Energy*, 2025, 246: 122904. DOI: [10.1016/j.renene.2025.122904](https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122904).
- [13] GU Y, WANG D F, CHEN Q Q, TANG Z Y. Techno-economic analysis of green methanol plant with optimal design of renewable hydrogen production: a case study in China[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(8): 5085–5100. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.11.148](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.148).
- [14] CUI J Y, AZIZ M. Techno-economic analysis of hydrogen transportation infrastructure using ammonia and methanol[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(42): 15737–15747. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.01.096](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.096).
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 黄维和, 刘刚, 陈雷, 杨文, 袁子云. 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. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5005.2023.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5005.2023.05.012).
- HUANG W H, LIU G, CHEN L, YANG W, YUAN Z Y. 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] NUGROHO Y K, ZHU L D, HEAVEY C. Building an agent-based techno-economic assessment coupled with life cycle assessment of biomass to methanol supply chains[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118449. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118449](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118449).
- [20] SCHORN F, BREUER J L, SAMSUN R C, SCHNORBUS T, HEUSER B, PETERS R, et al. Methanol as a renewable energy carrier: an assessment of production and transportation costs for selected global locations[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 3: 100050. DOI: [10.1016/j.adapen.2021.100050](https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100050).
- [21] TABIBIAN S S, SHARIFZADEH M. Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on renewable methanol[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 179: 113281. DOI: [10.1016/j.rser.2023.113281](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113281).
- [22] 林宝辉, 张文伟, 王法, 孟凡鹏, 吴凤荣, 吴文, 等. 长距离甲醇输送管道技术研究进展[J]. 油气与新能源, 2025, 37(2): 17–25. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2025.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2025.02.003).
- LIN B H, ZHANG W W, WANG F, MENG F P, WU F R, WU W, et al. Research progress in long-distance methanol pipeline transport technology[J]. Petroleum and New Energy, 2025, 37(2): 17–25.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 赵赏鑫, 庞贵良, 邱姝娟, 黄鑫, 滕霖. 甲醇-成品油混合体系相容性规律实验[J]. 油气储运, 2024, 43(11): 1239–1248. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.11.005](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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] POUYAKIAN M, JAFARI M J, LAAL F, NOURAI F, ZAREI E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 811–836. DOI: [10.1016/j.psep.2020.11.051](https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.051).

- [29] 徐梦豪, 刘龙飞, 郭勤, 苗瑾超, 杨成玉. 甲醇储罐设计技术及注意事项[J]. 云南化工, 2020, 47(1): 91–93. DOI: [10.3969/j.issn.1004-275X.2020.001.035](#).
- XU M H, LIU L F, GUO Q, MIAO J C, YANG C Y. Technical progress and matters needing attention in methanol tank design[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(1): 91–93.
- [30] 黄苍碧, 任显诚, 李赛, 卜玮杰. 储罐防腐涂料在不同含水率甲醇中的性能研究[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 93–97. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2023.06.014](#).
- HUANG C B, REN X C, LI S, BU W J. Performance study of storage tank anticorrosive coatings in methanol with different moisture content[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(6): 93–97.
- [31] 冯拉俊, 刘潇, 沈文宁, 雷阿利, 罗宏. 甲醇储罐用防腐环氧涂料对甲醇质量的影响研究[J]. 焊管, 2014, 37(9): 10–13. DOI: [10.3969/j.issn.1001-3938.2014.09.002](#).
- FENG L J, LIU X, SHEN W N, LEI A L, LUO H. Effects of anticorrosion epoxy coating for methanol storage tanks protection on the quality of methanol[J]. Welded Pipe and Tube, 2014, 37(9): 10–13.
- [32] 刘微, 叶航, 乔群, 陈志强, 赵春霞. 内浮顶罐浮盘产品现状及耐火性能研究进展[J]. 石油化工设备技术, 2024, 45(6): 5–11. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8805.2024.06.002](#).
- LIU W, YE H, QIAO Q, CHEN Z Q, ZHAO C X. Current status of floating decks in internal floating roof tanks and re-search progress of their fire resistance performance[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2024, 45(6): 5–11.
- [33] 丁少君. 全接液内浮盘与弹力片补偿密封在成品油储罐上的应用[J]. 石油化工设备技术, 2023, 44(5): 7–12, 17. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8805.2023.05.002](#).
- DING S J. Application of roof deck being in full contact with the liquid surface and elastic compensation seal in product oil tank[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2023, 44(5): 7–12, 17.
- [34] 丁丽芹, 念利利, 袁晓东, 李孟阁, 梁生荣. 甲醇储罐的蒸发损耗分析及对策[J]. 低碳化学与化工, 2019, 44(5): 107–111. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2019.05.021](#).
- DING L Q, NIAN L L, YUAN X D, LI M G, LIANG S R. Analysis of evaporation loss of methanol storage tank and countermeasures[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2019, 44(5): 107–111.
- [35] 巩守龙. 低温甲醇洗工艺发展及国内研究进展[J]. 化工管理, 2016(9): 121. DOI: [10.3969/j.issn.1008-4800.2016.09.108](#).
- GONG S L. Development and domestic research progress of low-temperature methanol washing process[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(9): 121.
- [36] 郭华. 贫甲醇泵在低温甲醇洗工艺的应用和发展现状[J]. 河南科技, 2015(21): 61, 63. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5168.2015.21.042](#).
- GUO H. Application and development status of lean methanol pump in low-temperature methanol washing process[J]. Henan Science and Technology, 2015(21): 61, 63.
- [37] 陈晓媛. 低温甲醇洗的工艺特点及其相关问题探究[J]. 科技视界, 2012(26): 88–89.
- CHEN X Y. Exploration of the process characteristics and related issues of low-temperature methanol washing[J]. Science & Technology Vision, 2012(26): 88–89.
- [38] WU Z C, XU G, ZHANG W T, XUE X J, CHEN H. Thermodynamic and economic analysis of a new methanol steam reforming system integrated with CO₂ heat pump and cryogenic separation system[J]. Energy, 2023, 283: 128501. DOI: [10.1016/j.energy.2023.128501](#).
- [39] 吴晓玲, 尚旭阳. 浅谈低温甲醇洗装置机泵密封的选型[J]. 石油化工设备技术, 2006, 27(5): 45–47. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8805.2006.05.015](#).
- WU X L, SHANG X Y. Brief talk on PUPM seal type selection in low-temperature methanol-wash plant[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2006, 27(5): 45–47.
- [40] 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](#).
- 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.
- [41] JIANG T H, GONG Y, YANG Z G. Failure analysis on abnormal damage and corrosion of methanol distillation column in MTBE production plant[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 205: 105011. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2023.105011](#).
- [42] ROYANI A, AIGBODION V S, HANAFI M, MUBARAK N M, VERMA C, ALFANTAZI A, et al. Enhancing the corrosion

- inhibition performance of *Tinospora cordifolia* extract using different fractions of methanol solvent on carbon steel corrosion in a seawater-simulated solution[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2023, 18: 100465. DOI: [10.1016/j.apsadv.2023.100465](https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100465).
- [43] WANG H X, GROSS A, LIU J. Influence of methanol addition on bio-oil thermal stability and corrosivity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433(Part 3): 133692. DOI: [10.1016/j.cej.2021.133692](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133692).
- [44] HUGGINS-GONZALEZ A S, SRIDHAR N, THODLA R, HAWK J, ALMAN D. Localized corrosion of chromium-containing conventional and multiprincipal element alloys in methanol and aqueous chloride environments[J]. *Corrosion*, 2022, 78(9): 840–849. DOI: [10.5006/4075](https://doi.org/10.5006/4075).
- [45] WANG J, LIU J Y, LIU Q, CHONG Y. Corrosion inhibition performance of synergistic inhibitors on Q235 steel in methanol/formic acid medium[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(33): 16025–16047. DOI: [10.1007/s10853-022-07629-3](https://doi.org/10.1007/s10853-022-07629-3).
- [46] SATHISH KUMAR T, ASHOK B. Material compatibility of SI engine components towards corrosive effects on methanol-gasoline blends for flex fuel applications[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 296: 127344. DOI: [10.1016/j.matchemphys.2023.127344](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127344).
- [47] LOG T, MOI A L. Ethanol and methanol burn risks in the home environment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): 2379. DOI: [10.3390/ijerph15112379](https://doi.org/10.3390/ijerph15112379).
- [48] 金哲学. 空泡现象和气蚀机理研究现状[J]. *力学与实践*, 1981, 3(1): 19–24.
- JIN Z X. Research status of bubble phenomenon and cavitation mechanism[J]. *Mechanics in Engineering*, 1981, 3(1): 19–24.
- [49] CUI Y Y, CHENG B, DING Q M, LI X M, ZHAO M J. Study on cavitation bubble characteristics in centrifugal pump based on image recognition[J]. *Processes*, 2023, 11(12): 3314. DOI: [10.3390/pr11123314](https://doi.org/10.3390/pr11123314).
- [50] 叶闯. 成品油管道固定球阀密封失效分析与内漏定量检测方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2022.
- YE C. Analysis of sealing failure and quantitative detection method for internal leakage of fixed ball valve in finished oil pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.
- [51] MA B D, YAO A R, YAO C D, WANG W C, AI Y K. Numerical investigation and experimental validation on the leakage of methanol and formaldehyde in diesel methanol dual fuel engine with different valve overlap[J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117355. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117355](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117355).
- [52] GUI L Y, YANG J, WU J T, MENG X Y. Isobaric heat capacity measurements of methanol by flow calorimeter at elevated temperatures and pressures[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2024, 69(6): 2085–2094. DOI: [10.1021/acs.jced.3c00745](https://doi.org/10.1021/acs.jced.3c00745).
- [53] PERNG S W, WU H W. Influence of inlet-nozzle and outlet-diffuser mounted in the plate-shape reactor on PEMFC net power output and methanol steam reforming performance[J]. *Applied Energy*, 2022, 323: 119510. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119510](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119510).
- [54] 武治年, 郭永强, 蒋成银, 蔺嘉昊, 罗飞. 科氏质量流量计运用评价及前景分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2024, 44(19): 96–98. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4076.2024.19.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4076.2024.19.032).
- WU Z N, GUO Y Q, JIANG C Y, LIN J H, LUO F. Application evaluation and prospect analysis of Coriolis mass flowmeter[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2024, 44(19): 96–98.
- (编辑: 黄星烨)
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目“耦合腐蚀产物膜的掺氢天然气管道渗氢扩散机制研究”, 52302445。
- 作者简介:**王财林, 男, 1995年生, 副教授, 2022年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事新能源管道输送方向的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 18764217502。Email: clwang0330@163.com
- 通信作者:**俞欣然, 女, 1994年生, 副教授, 2021年博士毕业于卡尔加里大学化学与石油工程专业, 现主要从事新能源管道输送方向的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 266580。电话: 13641596027。Email: joyyu94@163.com
- Received: 2025-05-19
 - Revised: 2025-06-19
 - Online: 2025-08-01

