

输油管道内腐蚀对航空煤油泄漏的影响研究

王宇君（北京中航油工程建设有限公司，北京 100012）

摘要：航空煤油作为航空运输核心能源，其输送安全关乎航空业稳定与公共安全，而输油管道内腐蚀是诱发泄漏事故的关键隐患。本文论述了输油管道内腐蚀的具体情况，从管道结构完整性、泄漏风险演化机制及煤油质量等方面分析了输油管道内腐蚀对航空煤油泄露的影响，提出了材料优化、运行环境调控以及监测预警等预防策略，以期为保障航空煤油输油管道的安全运行提供参考。

关键词：输油管道；腐蚀；航空煤油泄露

中图分类号：TE988.2

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)034-0154-03

Study on the Impact of Internal Corrosion in Oil Pipelines on Aviation Kerosene Leakage

Wang YuJun (Beijing China Aviation Oil Engineering Construction Co., Ltd. Beijing 100012, China)

Abstract: As the core energy source of aviation transportation, aviation kerosene's transportation safety is related to the stability of the aviation industry and public safety, and corrosion in oil pipelines is the key hidden danger that triggers leakage accidents. This article discusses the specific situation of corrosion inside oil pipelines, analyzes the impact of corrosion inside oil pipelines on aviation kerosene leakage from the aspects of pipeline structural integrity, leakage risk evolution mechanism, and kerosene quality, and proposes prevention strategies such as material optimization, operating environment regulation, and monitoring and warning, in order to provide reference for ensuring the safe operation of aviation kerosene oil pipelines.

Keywords: oil pipeline; Corrosion; Aviation kerosene leakage

随着全球航空业快速发展，航空煤油输送需求量持续攀升，输油管道作为高效运输载体，其安全运行受政策与技术变革双重约束。近年来，各国相继出台更严格的航空安全与环保政策，要求大幅降低危险化学品泄漏风险，而新能源技术推广背景下，煤油炼制工艺升级也使介质成分更复杂，加剧管道腐蚀隐患。当前，内腐蚀引发的管道泄漏不仅造成能源浪费，还易引发燃爆事故与生态污染，严重威胁公共安全。因此，研究输油管道内腐蚀对航空煤油泄漏的影响，对降低泄漏事故发生率、保障航空运输安全与生态环境具有重要意义。

1 输油管道内腐蚀概述

输油管道内腐蚀是介质作用下的材质劣化现象，明确其类型、机理及影响因素是研究泄漏问题的基础，需从核心维度全面解析其本质特征。化学腐蚀、电化学腐蚀、生物腐蚀及多相流冲蚀是主要类型，各类腐蚀在航空煤油输送场景中因诱因不同呈现特定发生规律，明确这些类型是精准防控的前提^[1]。其中，化学腐蚀在航空煤油输送中常表现为煤油中微量硫化物与管道金属发生缓慢氧化还原反应，生成易脱落的金属硫化物薄层，破坏管壁表层初始保护结构，且该反应速率会随煤油温度升高而显著加快。生物腐蚀则依赖煤油中微量水分形成的局部湿润环境，硫酸盐还原菌等微生物在此环境下代谢产生硫化氢等腐蚀性气体，

持续侵蚀管壁金属，同时微生物聚集形成的生物膜会遮蔽腐蚀位点，导致腐蚀隐患难以被早期发现。

腐蚀的发生是多因素共同作用的化学与物理过程，内在机理决定着发展速率与破坏形式，电化学腐蚀的原电池效应、化学腐蚀的物质直接反应等均是各类腐蚀的具体反应原理。内腐蚀的发生与发展受管道自身、输送介质及运行环境等多重因素调控，管道材质与制造工艺、航空煤油中腐蚀性物质及水分含量、输送温度压力与流速等运行参数，均会对其产生直接且关键的影响。例如，普通碳钢管道在含 Cl⁻ 的航空煤油环境中，电化学腐蚀的原电池效应会显著增强，而 316L 不锈钢因铬、镍元素形成的致密钝化膜，能有效抵御此类离子侵蚀；输送流速若长期低于 0.6m/s，易导致煤油中杂质在管道底部沉积，形成局部高浓度腐蚀介质环境，若流速高于 2.8m/s，则会加剧多相流对管壁的冲刷力度，加速腐蚀产物剥离，暴露新鲜金属表面引发新一轮腐蚀循环。

2 输油管道内腐蚀对航空煤油泄漏的影响

2.1 内腐蚀对管道结构完整性的破坏作用

航空煤油管道泄漏隐患源于三类腐蚀破坏：一是煤油长期冲刷与腐蚀致管壁减薄，承压能力下降；二是活性离子等破坏钝化膜，形成点蚀坑并连通；三是拉应力与腐蚀介质协同作用产生微裂纹，扩展后引发突发性泄漏。

第一，在航空煤油长期冲刷与腐蚀介质作用下，管道内壁金属持续损耗，管壁厚度逐渐降低。管壁厚度的减小，使管道承受压力的能力大幅下降。当管道承受的压力超过其耐压极限时，就可能引发管道破裂，从而为航空煤油的泄漏创造了条件。第二，在航空煤油中某些活性离子和杂质的作用下，管道内壁钝化膜局部被破坏，形成微小阳极区域，金属不断溶解，逐渐形成点蚀坑。随着时间的推移，这些点蚀坑会不断扩大、加深，多个点蚀坑相互连通，最终成为航空煤油泄漏的隐患^[2]。第三，在航空煤油输送过程中，管道承受着内压、温度变化等产生的拉应力，同时，航空煤油中含有的某些杂质及水分等构成特定腐蚀介质。在拉应力与腐蚀介质联合作用下，管道金属晶格结构被破坏，逐渐形成微裂纹。这些裂纹不断扩展，当达到一定程度时，管道结构会突然失效，致使航空煤油发生突发性泄漏。

2.2 内腐蚀引发航空煤油泄漏的风险演化机制

输油管道内腐蚀经萌生、损伤发展至泄漏三阶段，由腐蚀性离子、水分等触发，压力波动与流速变化推动腐蚀孔扩大，最终在底部、弯头等处形成泄漏，其位置分布与腐蚀驱动因素相关。

第一，腐蚀萌生阶段由航空煤油中的腐蚀性离子、微量水分与管道内壁金属发生化学反应触发，管壁表面致密的钝化膜出现局部破损，沉积物逐渐在破损处附着聚集，为垢下腐蚀的启动提供了必要的局部环境条件。第二，损伤发展阶段中，沉积物形成的密闭空间会加剧局部腐蚀反应，输送过程中的压力波动持续冲击微小腐蚀孔，同时介质流速变化导致腐蚀产物难以排出，共同推动腐蚀孔不断扩大加深，管道结构完整性逐步被削弱。第三，泄漏发生阶段，腐蚀孔深度与宽度突破管道安全临界值，形成贯通性通道，航空煤油沿通道向外泄漏，且泄漏位置多集中在管道底部、弯头及焊缝等流体易滞留、应力易集中的区域。第四，这些泄漏位置的分布规律与各阶段腐蚀驱动因素密切相关，流体滞留区域易积累沉积物引发垢下腐蚀，应力集中部位在压力波动下更易出现腐蚀孔扩展，最终形成泄漏风险高发区域。

2.3 内腐蚀对航空煤油质量与泄漏后果的叠加影响

输油管道内腐蚀产物会污染航空煤油，影响发动机燃烧性能与运行稳定，泄漏后还会加剧土壤和水体污染，增加环境治理难度，同时可能危害人体健康、提升燃爆风险。

第一，输油管道内腐蚀产生的金属氧化物、氢氧化物等固体颗粒会不断混入航空煤油，打破燃料原有的纯净状态并增加杂质含量。这些杂质会干扰煤油在

航空器发动机内的雾化过程，导致燃烧不充分，不仅使燃烧性能下降，还可能在发动机部件表面形成积碳，影响设备运行稳定性^[3]。第二，受腐蚀产物污染的航空煤油发生泄漏时，污染物会与煤油共同渗透到土壤和水体中，加速有害物质的扩散速度与范围。这种复合污染会改变土壤的理化性质、破坏水体生态平衡，大幅增加环境治理的技术难度与成本投入。第三，含有腐蚀产物的泄漏煤油接触人体时，可能因污染物的刺激性引发皮肤红肿、呼吸道不适等健康问题，遇到明火或高温时，杂质还可能催化燃烧反应，提升燃爆事故的发生概率，进一步放大泄漏事故的安全隐患。

3 输油管道内腐蚀的预防策略

3.1 基于材料优化的源头防腐蚀防控

基于材料优化的源头防腐蚀策略包括：选用适配航空煤油特性的耐蚀材料，强化生产质量管控减少材料缺陷，优化热处理与焊接工艺消除残余应力，探索新型复合耐蚀材料应用，全面提升管道抗腐蚀能力。

第一，针对航空煤油的介质成分与输送环境特点，优先选用耐蚀性能优异的不锈钢、特种合金钢等材料制作输油管道，这类材料的化学稳定性可有效抵御煤油中腐蚀性离子与微量水分的侵蚀。材料选择需充分适配介质特性，从源头构建抵御内腐蚀的基础屏障。强化管道材料的生产质量管控，严格把控原材料筛选环节，剔除含杂质、有缺陷的基材，同时规范生产加工流程，避免材料内部形成疏松、夹杂等结构薄弱点。通过提升材料本身的纯净度与致密性，减少腐蚀萌生的潜在位点。

第二，优化管道的热处理与焊接工艺，采用科学的加热、冷却方案消除材料加工过程中产生的残余应力，运用精准焊接技术降低焊缝区域的结构差异与缺陷。合理的工艺处理可提升管道整体结构稳定性，削弱应力腐蚀开裂的诱发条件^[4]。探索新型复合耐蚀材料的应用，通过在基材表面复合耐蚀涂层或采用金属基复合材料，结合不同材料的性能优势提升管道内壁的抗腐蚀能力。新型材料的合理应用可进一步拓宽源头防控的技术路径，增强腐蚀防护的全面性。

3.2 基于运行环境调控的过程腐蚀抑制

输油管道内腐蚀过程抑制需多部门协同：油品处理部门严控煤油中腐蚀性物质与水分，微生物防控小组用抑制剂阻断生物腐蚀，运维与管理部门动态调整输送参数、优化策略，形成高效防腐体系。

第一，通过优化航空煤油的精制与过滤流程，采用化学脱除、深度过滤等技术手段，严格控制油中硫化物、Cl⁻等腐蚀性物质的含量，同时搭配高效脱水设备降低油内水分占比。这些操作能减少腐蚀介质与

管道内壁金属发生反应的机会，从物质层面削弱内腐蚀的发生基础。微生物防控小组通过定期检测管道内微生物种类与活性，筛选适配的生物抑制剂并制定规范添加方案，针对性抑制硫酸盐还原菌等微生物的繁殖代谢。该措施能阻断微生物腐蚀路径，补充物理与化学调控的不足，形成多维度防腐体系。

第二，通过实时监测系统动态调整输送参数，将温度、压力稳定在适宜运行区间，同时根据管道材质、管径等特性设定合理流速。这种调控可避免极端工况导致腐蚀速率骤升，维持管道内壁环境稳定以减缓腐蚀发展。运行管理部门建立环境参数动态评估机制，定期汇总分析腐蚀性物质含量、水分占比、微生物活性等数据，结合季节变化、介质成分波动及时优化调控策略。持续的动态调整可确保防腐措施始终适配实际工况，长期维持高效的过程腐蚀抑制效果。

3.3 基于监测预警的动态风险管控

输油管道动态风险管控通过三类监测实现：离线检测精准掌握腐蚀状况，在线系统实时追踪并预警，专项监测预判生物腐蚀风险，整合数据制定分级方案，形成全方位隐患排查处置体系。

第一，按固定周期采用超声波检测、漏磁检测等离线技术对输油管道开展全面腐蚀检测，超声波检测通过分析声波在管壁内的反射信号判断壁厚减薄情况，漏磁检测利用磁场变化识别管道表面及近表面的腐蚀缺陷，两种技术互补可精准掌握管道离线状态下的腐蚀分布与严重程度。运维单位在管道弯头、底部等易腐蚀关键区域部署在线监测系统，系统搭载的壁厚传感器与腐蚀产物分析模块实时采集数据，数据经无线传输至监控平台后，后台算法会自动对比历史基线，发现异常波动时立即触发预警，实现对腐蚀进程的实时追踪。

第二，建立管道内微生物活性专项监测机制，定期从管道取样口采集煤油样本，通过实验室分析确定硫酸盐还原菌等腐蚀相关微生物的数量与代谢活性，依据微生物代谢产物浓度变化预判生物腐蚀风险，为提前采取抑制措施提供依据。管理团队整合三类监测数据构建动态数据库，结合管道输送温度、压力等运行参数制定分级管控方案，当某一监测指标接近临界值时，自动提升其他监测手段的频次，形成“离线检测兜底、在线监测预警、专项监测补位”的全方位动态风险管控体系，确保腐蚀隐患及时被发现并处置。

3.4 基于维护修复的全生命周期管理

输油管道腐蚀管控通过定期清洗除垢、修复或更换腐蚀管段抑制腐蚀，建立腐蚀数据库动态评估风险，制定预测性维护计划并优化方案，形成全生命周期闭环管控。

第一，结合管道运行工况与沉积物积累规律，制定针对性定期清洗除垢方案，选用机械冲洗、化学溶垢等适配技术清除管壁沉积物。这种操作能彻底破坏垢下腐蚀的密闭环境，消除沉积物对腐蚀的催化作用，从环境层面抑制腐蚀进展。检测人员发现管道腐蚀部位后，对轻微腐蚀区域采用耐蚀涂层修复技术填补缺陷，对腐蚀深度超标、结构强度不足的管段及时实施局部更换^[5]。这些修复措施可快速阻断腐蚀蔓延路径，恢复管道局部结构的完整性与抗腐蚀能力。

第二，建立全维度管道腐蚀数据库，系统收录腐蚀检测结果、维护修复记录、运行环境参数等信息，通过数据整合分析实现腐蚀风险的动态评估。基于评估结果制定预测性维护计划，提前介入高风险区域，避免腐蚀隐患发展为泄漏事故。技术团队根据管道服役年限、腐蚀发展趋势及维护效果，动态优化维护修复方案，将定期预防性维护与突发应急修复相结合。这种全生命周期管理模式既保障管道正常输送功能，又能最大化延长管道服役寿命，构建持续有效的腐蚀管控闭环。

4 结语

综上所述，输油管道内腐蚀对航空煤油泄露的影响涵盖了腐蚀破坏管道结构完整性、推动泄漏风险演化及叠加泄漏危害等影响，需要通过材料源头防控、过程抑制、动态监测等预防策略，来维持输油管道的稳定。未来，可进一步结合人工智能、大数据等技术优化腐蚀监测预警系统，研发更高效的耐蚀材料与抑制剂，探索数字化全流程管控模式，持续提升输油管道抗腐蚀能力与泄漏防控精准度，为航空煤油输送安全提供更全面的保障。

参考文献：

- [1] 冯连坤,陈晓华,冯连朋.航煤加氢装置存在的问题及解决措施[J].石化技术与应用,2018,36(3):198-201.
- [2] 刘静.基于多相流模拟的输油管道内腐蚀规律研究[D].青岛理工大学,2025.
- [3] 陈玲.输油管道设备安装与故障管理研究[J].石油和化工设备,2025,28(04):98-101.
- [4] 朱世元,王增峰,靳亚笛.老旧航空煤油长输管道全面检验实例[J].全面腐蚀控制,2025,39(03):186-188.
- [5] 张闻.油气储运中输油管道防腐工艺研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(18):152-154.

作者简介：

王宇君(1991-)，男，汉族，山西大同人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：航空煤油。