

油气储运工程过程中管道防腐问题的分析和研究

高宝龙

石嘴山市星泽燃气有限公司 宁夏石嘴山 753000

摘要：石油天然气储运管道因环境与介质作用易发生电化学腐蚀和应力腐蚀，进而导致管壁穿孔或破裂泄漏，严重威胁能源运输安全。因此，深入研究其腐蚀防护技术具有重要工程应用价值。本文基于国内外相关文献的系统分析，重点探讨了管道腐蚀的多因素耦合作用机理，详细介绍了管道防腐的多项措施。在此基础上，结合我国实际工程需求，针对防腐材料性能不足、监测技术滞后等问题提出了未来发展策略和展望，为提升油气管道长效防腐能力提供了有价值的参考。

关键词：油气管道；腐蚀；防腐

引言

油气能源作为国家战略性基础资源，是中国经济发展和能源安全的重要支撑，其运输系统的安全稳定运行将直接影响国民经济命脉和国际能源市场竞争力。随着城乡居民生活水平的持续提升和工业用能需求的快速增长，油气能源消费量呈现刚性增长态势，这使得油气储运系统的安全高效运行面临更大挑战。当前必须从国家能源安全战略高度，充分重视管道腐蚀防护技术研发和工程应用，通过建立全生命周期防腐体系，最大限度降低管道失效风险，避免因泄漏事故造成的资源浪费、经济损失和生态环境破坏。

一、防腐工作的重要性

作为国家经济发展的命脉和民生保障的重要支撑，能源安全特别是油气资源的开发储运工作具有关键战略意义。当前，随着我国经济持续发展和城镇化进程加快，油气能源需求呈现刚性增长态势，但在储运技术和管理水平上仍存在明显短板。油气资源的高效安全储运不仅直接影响国家能源供给体系的稳定运行，更与区域协调发展和社会民生改善密切相关。近年来，通过“南水北调”、“西气东输”等重大工程实施和智能调度技术创新，我国在能源资源优化配置方面取得了显著成效。然而，管道腐蚀问题始终是制约油气储运安全的主要瓶颈，其引发的泄漏风险既造成宝贵能源浪费，又可能酿成重大安全事故和环境污染。随着油气输送量的持续攀升和管道服役年限的延长，腐蚀问题日益凸显，不仅直接影响管道的输送效率和使用寿命，更威胁着沿线生态环境和社会公共安全。管道腐蚀导致的介质泄漏可能引发连锁

反应，造成难以估量的经济损失和社会影响。因此，构建科学完善的管道防腐体系，提升全生命周期防护能力，已成为保障国家能源安全和实现高质量发展的当务之急。需要从材料研发、防护技术创新、智能监测预警等多个维度协同发力，建立覆盖设计、施工、运行、维护全过程的多层级防护机制，为油气储运基础设施的安全可靠运行提供坚实保障。

二、导致油气储运中管道腐蚀问题出现的原因

1. 油气性质因素

油气组分特性的差异是引发管道腐蚀现象的本质因素。其中，各类酸性物质特别是硫化物的存在对腐蚀过程影响最为显著，这些物质与管道金属材料接触后会发生复杂的化学反应。在环境湿度较高的条件下，硫化物经过氧化反应最终转化为具有强腐蚀性的硫酸化合物，这种强酸会急剧加速金属管道的腐蚀速率。在油气输送过程中，介质内部溶解的水分会在温度和压力变化条件下逐渐析出并聚集，最终在金属管道内壁形成一层连续的电解质溶液薄膜。这种具有良好离子导电特性的液膜会与金属管壁构成完整的电化学腐蚀体系，在金属表面形成大量微观的阳极区和阴极区，并通过电子的定向转移和离子的自由迁移，持续引发氧化还原反应。特别是在流动介质冲刷作用下，这种电化学反应微电池系统会加速金属材料的损耗过程，导致管壁逐渐减薄。同时，伴随输送介质流动的各类矿物颗粒、砂粒等固态杂质会在管道内表面产生持续的机械冲刷效应，这些硬度较高的颗粒物质在高速流动状态下对管壁的反复摩擦冲击，不仅会导致均匀腐蚀减薄现象，更会在局部应力集中区域诱发严重的点状腐蚀和深坑蚀缺陷，形成潜在的管道

失效风险点。

2. 外界因素

油气储运管道的腐蚀问题受外部环境条件显著影响，主要包括温湿度变化和气候特征等关键因素。温度环境对腐蚀进程具有决定性作用——高温会加速金属材料的腐蚀反应速率，而低温则易引发冷凝水积聚和冰晶侵蚀。环境湿度同样直接影响腐蚀程度，尤其在含氧或氯离子的潮湿环境中，水分蒸发-凝结循环会显著加剧腐蚀效应。不同气候区域的管道腐蚀特征呈现显著差异性：沿海区域受海洋性气候影响，管道长期暴露于高盐雾环境中，同时遭受强风携带的盐粒冲击侵蚀；山区环境则因显著的昼夜温差变化导致管道材料反复热胀冷缩，加之持续高湿度条件，极易引发应力腐蚀开裂和电化学腐蚀。相较之下，宁夏等西部干旱地区形成了独具特色的复合型腐蚀环境，极端干旱气候导致地表盐分持续富集，频繁的强风沙天气造成管道表面机械磨损，盐碱化土壤与干旱大气的协同作用进一步加剧了腐蚀进程，使得该区域的管道防护面临比其他地区更为严峻的挑战。

3. 材料因素

在燃气输送领域，碳钢凭借其优异的性价比和经过长期验证的可靠性，成为全球范围内管道系统建设的首选材料。这种材料不仅具备理想的机械强度以承受燃气输送压力，还展现出卓越的焊接性能和加工成型特性，为各类复杂地形条件下的管道铺设提供了便利条件。虽然碳钢在自然环境中的耐腐蚀性能存在一定局限性，但通过采用多层复合防腐涂层配合电化学保护技术，并辅以必要的管道内涂层防护手段，同时建立完善的检测评估与维护保养体系，使得碳钢管道系统能够稳定运行数十年。历经一个多世纪的工程实践应用和技术发展，基于碳钢材料的燃气输送系统已经建立起涵盖材料选型、工程设计、施工安装及运营维护的完整技术体系，在常规地质环境采用标准碳钢材料即能满足使用要求，而针对特殊地质条件或环境腐蚀因素较为显著的区域，则可采用经过特殊处理的增强型管线钢来确保系统安全。

4. 设计和施工因素

管道系统的工程设计质量与施工工艺水平是决定其长期耐腐蚀性能的关键要素。在项目设计阶段，工程师需要综合考虑介质特性、环境条件和运行参数，科学选择与工况相匹配的管道材质，并系统规划包括涂层保护、阴极保护等多重防护措施。合理的结构设计能够有效避免应力集中区域的形成，从而降低局部腐蚀风险。在施工实施环节，焊接工艺的控制尤为关键，热影响区

的组织变化和残余应力会显著削弱材料的抗腐蚀能力，特别是焊缝区域更容易发生晶间腐蚀和应力腐蚀开裂。管道冷弯加工过程中产生的塑性变形会在金属内部形成复杂的应力场，这种残余应力与腐蚀介质的协同作用将加速材料的腐蚀失效进程。此外，施工机械操作不当造成的表面划伤、凹痕等机械损伤会破坏防腐涂层的完整性，形成腐蚀起始点。因此，严格控制施工质量，规范操作流程，对于确保管道系统的长期抗腐蚀性能具有重要意义。

三、油气储运中管道防腐措施

1. 合理选用管道材质

针对宁夏等西部地区高盐碱、强风沙的特殊腐蚀环境，油气管道选材应优先考虑采用具有优异粘结性能的三层聚乙烯防腐层结构，配合高强度低合金钢材，确保材料既具备卓越的耐磨蚀性能又能满足严格的力学性能指标要求。在燃气管道敷设工程中，针对地下管段应采用阴极保护系统作为主要防护措施，而地面敷设管段则需在常规防腐层中特别添加抗紫外老化添加剂。在选材方面，应当根据输送介质的特性合理确定管壁厚度，优先选用低碳当量且具备优良焊接性能的钢材品种。同时，需要运用全生命周期成本分析方法，科学评估各种防护技术的经济性与可靠性，从而确定最优的综合防腐技术方案。

2. 加强管道周围环境监管

针对宁夏等西部地区特有的高盐碱、强风沙复合腐蚀环境，油气输送管道必须构建多层级协同防护体系。在防腐涂层技术方面，应采用具有优异耐候性能的三层聚乙烯加强型防腐结构，其中特别添加抗紫外老化组分和耐磨填料，显著提升涂层的环境适应性。对于地面敷设管段，需选用经硅烷改性处理的聚合物面漆材料，有效增强涂层的耐候性和自清洁功能。在阴极保护系统设计上，应充分考虑当地土壤高电阻率的特性，优化阳极布置方式与输出参数配置，确保实现均匀稳定的保护效果。同时要配套安装智能监测与调控设备，实时评估保护系统运行状态并及时消除干扰因素。针对特殊盐渍地带，必须建立专门的涂层完整性检测机制，通过定期评估防护效果来指导维护策略的制定，确保整个防护体系的长期有效性。

3. 管道设计的优化

优化管道系统设计是实现长效防腐的基础性工程，需要从材料选择到结构布局进行全方位的技术考量。在结构优化方面，应当运用有限元分析等先进技术对管道

系统进行应力场模拟，结合计算流体力学分析介质流动状态，确保管道走向平顺过渡避免出现湍流区。针对连接工艺控制，推荐优先采用整体冷弯成型工艺替代传统焊接工艺，确实需要焊接的部位应采用自动焊技术并实施焊后热处理。在特殊部位处理上，除选用全通径球阀等标准化配件外，还需要对三通、变径管等关键节点进行流线型优化设计。空间布置方案必须综合考虑巡检通道设置、智能检测设备安装空间以及应急维修操作需求，建议采用模块化设计理念，将管道系统划分为若干功能单元。在管道防腐系统的现代化管理中，必须构建覆盖规划设计、建设施工、运行维护直至报废拆除的全生命周期数字化管理平台。该平台通过物联网技术实时采集管道运行状态数据，与BIM模型中的设计参数进行智能比对分析，建立多维度的腐蚀风险评估模型。同时运用大数据技术追踪历史腐蚀规律，结合人工智能算法预测未来发展趋势。通过数字孪生技术可实现防腐系统的虚拟仿真和优化迭代，为防腐决策提供可视化支持。这种深度融合信息技术与工程管理的系统性方法，不仅能够精准识别腐蚀隐患，还能基于全周期成本分析优化资源配置，显著提升防腐措施的经济性和可靠性，最终实现安全性与经济性的最佳平衡。

4. 定期做好管道防腐检测与维护

为确保油气储运管道的长期可靠性，必须建立一套完整的腐蚀防控与维护管理体系。该系统应当包含以下几个关键环节：首先需要制定科学的检测方案，采用目视检查、超声波测厚、涡流检测等多种技术手段，并结合智能检测设备进行全方位状态评估。其次要建立快速响应机制，对检测发现的防腐层破损、金属基体腐蚀等缺陷，按照分级标准立即采取打磨补焊、局部补口或整体更换等修复措施。在预防性维护方面，需定期采用高压水枪或化学清洗等方式清除管道表面积聚的污垢及腐蚀产物。对于服役时间较长的管道，建议采用新型纳米复合涂层或防腐胶带进行整体增强保护。同时要构建数字化管理平台，将检测数据、维护记录与管道运行参数进行关联分析，实现腐蚀风险的动态预警。通过实施这些系统化的维护策略，不仅可以显著延长管道的使用寿命，更能保障油气输送过程的本质安全，为企业的安全生产提供坚实保障。

四、未来防腐策略及展望

1. 创新防腐技术的发展

当前全球油气工业界正加速推进防腐技术革新，通

过跨学科研发突破传统防腐技术的局限性。在材料工程领域，科研机构正开发具有自修复功能的智能合金材料，能够在损伤初期自动修复微观缺陷；同时石墨烯增强复合材料的应用显著提升了防腐层的机械强度和化学稳定性。技术创新方面，基于人工智能的预测性防腐系统可实时分析管道腐蚀风险，结合量子点标记技术实现纳米级腐蚀监测。电化学防护技术已发展到第四代智能阴极保护系统，可根据环境变化自动调节保护参数。尽管这些前沿技术实验室表现优异，但在大规模工程应用时仍面临质量控制、施工工艺和全周期成本等现实挑战，需要产学研协同推进技术转化，建立从实验室到工程应用的完整技术链。

2. 规范化和标准化的未来

在油气储运管道的全生命周期管理中，规范化和标准化建设是提升防腐效果的核心保障。这需要建立覆盖设计、制造、施工、运行和维护全流程的技术标准体系，包括材料选型规范、防腐涂层施工工艺标准、阴极保护系统设计规程、腐蚀监测技术规范等具体内容。通过制定统一的性能指标和技术要求，可以确保各类防腐技术的规范实施，并为新技术评价提供基准。

结束语

作为现代能源体系的关键组成部分，油气资源的需求持续攀升。为确保国家能源储运系统的安全可靠运行，必须高度重视管道防腐工作。这要求我们：严格执行选材标准、充分吸收先进经验、持续开展技术研发、增强管道抗腐蚀性能等关键措施，从而保障油气储运系统的高效稳定运转。

参考文献

- [1] 杨雪梅, 刘玲莉, 刘志刚, 孟凡民. 我国油气管道防腐层大修技术现状. 油气储运, 2002 (10).
- [2] 刘恩斌, 张红兵, 彭善碧, 李长俊. 应用PE管修复油气管道技术. 海洋石油, 2004 (2).
- [3] 李强. 管道防腐技术在油气储运中的全程应用 [J]. 当代化工研究, 2022, (04): 81-83.
- [4] 王长征. 针对油气储运中管道防腐技术的分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41 (23): 195-196.
- [5] 孙雅倩, 王爽, 胡宗武等. 油气储运中的安全环保问题及其对策 [J]. 甘肃科技, 2021, 37 (12): 11-12+141.