

燃气管道内腐蚀成因及多技术协同防腐研究

于 森 (济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 燃气管道作为城市能源输送的核心基础设施, 其安全运行直接关系到公共安全与社会经济稳定。内腐蚀是导致管道失效的主要风险因素之一, 具有隐蔽性强、危害性大的特点。本文系统分析了燃气管道内腐蚀的主要成因, 包括电化学腐蚀、化学腐蚀及微生物腐蚀的作用机制, 并结合工程实际探讨了内壁涂层防护、缓蚀剂应用及阴极保护等三种常用防腐技术的原理与应用效果。研究表明, 综合运用多技术协同防腐策略可显著提升管道使用寿命, 为燃气管道的安全管理提供理论与技术支持。

关键词: 燃气管道; 内腐蚀; 电化学腐蚀; 防腐技术; 阴极保护

中图分类号: TU996.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0151-03

Research on the Causes of Corrosion in Gas Pipelines and Multi technology Collaborative Corrosion Prevention

Yu Sen (Jinan Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: As the core infrastructure for urban energy transmission, the safe operation of gas pipelines is directly related to public safety and socio-economic stability. Internal corrosion is one of the main risk factors leading to pipeline failure, characterized by strong concealment and high harm. This article systematically analyzes the main causes of internal corrosion in gas pipelines, including the mechanisms of electrochemical corrosion, chemical corrosion, and microbial corrosion. Combined with engineering practice, the principles and application effects of three commonly used anti-corrosion technologies, including inner wall coating protection, corrosion inhibitor application, and cathodic protection, are discussed. Research has shown that the comprehensive application of multi technology collaborative anti-corrosion strategies can significantly improve the service life of pipelines and provide theoretical and technical support for the safety management of gas pipelines.

Keywords: gas pipeline; Internal corrosion; Electrochemical corrosion; Anti-corrosion technology; Cathodic protection

近年来, 我国城市化进程以前所未有的速度推进, 城市燃气供应系统作为城市基础设施的重要组成部分, 其规模正随着城市的扩张而持续扩大。燃气管道如同城市的“血管”, 承担着将清洁高效的天然气输送到千家万户和各类工商业用户的关键任务, 在能源供应体系中占据着举足轻重的地位。然而, 随着燃气管道网络规模的不断扩大, 一系列潜在问题也日益凸显, 其中管道腐蚀问题尤为突出。在管道腐蚀的多种形式中, 内腐蚀作为管道内部介质长期作用的累积结果, 已成为威胁管道安全的“隐形杀手”。与外腐蚀相比, 内腐蚀由于发生在管道内部, 难以通过常规的外部检测手段及时发现, 具有更强的隐蔽性和潜在危险性。深入研究城市燃气管道内腐蚀成因并优化防腐技术, 对于保障燃气供应安全、降低运维成本具有至关重要的意义。一方面, 保障燃气供应安全是维护社会稳定和居民正常生活秩序的基本要求。一旦因内腐蚀引发重大燃气泄漏事故, 不仅会造成巨大的人员伤亡和财产损失, 还可能引发公众恐慌, 对社会稳定产生负面影响。另一方面, 降低运维成本是燃气企业实现可持续发展的关键因素。通过有效的防腐措施, 可以延长管道使用寿命, 减少管道维修和更换的频率,

从而降低企业的运营成本, 提高经济效益。此外, 优化防腐技术还有助于推动燃气行业技术创新和绿色发展, 提升我国城市燃气管道建设和运维的整体水平。因此, 开展城市燃气管道内腐蚀成因及防腐技术的研究, 已成为当前燃气行业亟待解决的重要课题。

1 燃气管道内腐蚀的主要成因

1.1 电化学腐蚀

燃气介质中含有的水分、硫化氢 (H_2S)、二氧化碳 (CO_2) 等成分易形成电解质溶液, 与管道金属表面构成微电池系统。以铁基金属管道为例, 其腐蚀过程遵循电化学反应原理: 在微电池系统中, 铁作为阳极发生氧化反应, 释放出的电子通过金属内部传导至阴极区域。

阴极反应机制随介质环境呈现显著差异: 在酸性条件下, 发生析氢腐蚀, 氢离子在阴极得电子生成氢气; 而在中性或碱性环境中, 则以吸氧腐蚀为主, 溶解氧与电子、水结合生成氢氧根离子。

当燃气中 H_2S 含量超过 $50mg/m^3$ 时, H_2S 与铁发生化学反应生成硫化亚铁 (FeS) 膜层。该膜层虽具有一定保护作用, 但因结构疏松多孔且存在晶格缺陷, 难以形成完整致密的防护层。随着腐蚀持续, 膜层局

部破损形成缝隙,进一步浓缩 H_2S 等腐蚀性介质,加速局部腐蚀电池的形成。这种局部腐蚀会引发坑蚀现象,使管道表面出现凹坑,降低管道壁厚;在应力集中区域,还可能诱发应力腐蚀开裂(SCC),导致管道出现裂纹甚至贯穿性破损,严重威胁燃气输送安全。

1.2 化学腐蚀

CO_2 溶于水生成碳酸(H_2CO_3),与铁发生直接化学反应,生成的 FeCO_3 溶解度较低,若在管道内壁形成完整保护膜可减缓腐蚀,但实际工况中介质流速、温度波动易破坏膜层,导致腐蚀持续进行。研究表明,当燃气中 CO_2 分压超过 0.2MPa 且含水率高于露点时,腐蚀速率可达到 0.1mm/a 以上。

1.3 微生物腐蚀(MIC)

硫酸盐还原菌(SRB)、铁氧化菌(IOB)等微生物通过代谢活动改变局部微环境。SRB 在厌氧条件下将硫酸盐还原为硫化物,产生 H_2S 并降低局部 pH 值,其代谢产物与 Fe^{2+} 反应生成 FeS 腐蚀产物,形成具有强吸湿性的多孔结构,进一步加剧腐蚀。微生物腐蚀常与电化学腐蚀协同作用,形成复杂的腐蚀形态,如瘤状腐蚀、溃疡状腐蚀。

2 常用防腐技术及原理

2.1 内壁涂层防护技术

原理:通过在管道内壁涂覆高性能防腐涂层,形成物理隔离屏障,阻断腐蚀介质与金属的接触。常用材料包括环氧树脂、聚乙烯(PE)、熔结环氧粉末(FBE)等。环氧树脂涂层通过环氧基团与金属表面形成化学键合,结合力强,耐化学腐蚀性能优异;FBE 涂层采用静电喷涂工艺,形成均匀无孔隙的防腐层,适用于高压燃气管道。应用:某城市次高压燃气管道采用无溶剂环氧树脂内涂层后,运行 5 年检测显示内壁腐蚀速率由 0.08mm/a 降至 0.01mm/a,防护效果显著。

2.2 缓蚀剂应用技术

原理:缓蚀剂通过吸附作用在金属表面形成分子膜,抑制阳极溶解或阴极析氢反应。分为有机缓蚀剂(如咪唑啉类、季铵盐类)和无机缓蚀剂(如铬酸盐、磷酸盐)。有机缓蚀剂分子中的极性基团(如 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{COOH}$)定向吸附于金属表面,非极性基团形成疏水层阻碍腐蚀介质扩散;无机缓蚀剂通过与金属离子反应生成难溶保护膜(如 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$)。应用:在含 H_2S 的燃气管道中注入咪唑啉类缓蚀剂,当浓度达到 50mg/L 时,腐蚀速率可降低 85% 以上。需注意缓蚀剂与燃气介质的相容性,避免产生二次污染。

2.3 阴极保护技术

2.3.1 外加电流阴极保护(ICCP)原理

通过外部直流电源将管道与惰性阳极(如钛基氧

化物阳极)连接,使管道成为阴极,阳极发生氧化反应消耗电子,从而抑制管道金属的腐蚀。电源输出电压需根据管道电位动态调节,确保金属表面电位低于保护电位(如 $-0.85\text{V}_{\text{vsCSE}}$)。应用:适用于长输高压燃气管道,某天然气干线采用 ICCP 系统后,管道电位稳定在 -1.0V ,完全抑制了腐蚀反应。

2.3.2 牺牲阳极阴极保护(SACP)原理

选用电位较负的金属(如镁、锌)作为牺牲阳极,与管道连接形成原电池,阳极优先腐蚀消耗,释放电子使管道成为阴极。镁阳极适用于土壤电阻率较高的环境($>50\Omega\cdot\text{m}$),锌阳极适用于低电阻率环境($<20\Omega\cdot\text{m}$)。应用:城市埋地中低压燃气管道常采用锌阳极保护,阳极寿命可达 8-10 年,无需外部电源,维护成本低。

3 防腐技术对比与协同应用

3.1 内壁涂层防护技术

该技术通过在管道内壁涂覆环氧树脂、熔结环氧粉末(FBE)等高性能材料,形成致密物理隔离屏障,从根本上阻断 H_2S 、 CO_2 等腐蚀介质与金属基体的直接接触。以环氧树脂为例,其分子结构中的环氧基团可与铁表面形成化学键合,结合力强度可达 $50\text{N}/\text{cm}^2$ 以上,同时具备优异的耐酸碱性(pH4-12 范围内性能稳定)。然而,涂层防护对施工工艺要求苛刻——需通过喷砂处理使内壁粗糙度达到 $\text{Ra}50-75\mu\text{m}$,且喷涂过程中温度、湿度需严格控制(如 FBE 涂层要求固化温度 $230\pm5^\circ\text{C}$),一旦出现漏涂或涂层厚度不均(低于 $300\mu\text{m}$),易形成腐蚀薄弱点。因此,该技术主要适用于新建管道的预制涂装,或在役管道通过清管器彻底除锈后的内壁修复,典型应用如西气东输三线管道采用 FBE 内涂层,经 10 年运行检测显示涂层完整率达 98.7%。

3.2 缓蚀剂应用技术

缓蚀剂通过分子吸附或成膜反应抑制腐蚀电化学反应,分为以咪唑啉衍生物为代表的有机缓蚀剂和以钼酸盐为代表的无机缓蚀剂。有机缓蚀剂的极性基团(如吡啶环、酰胺基)可定向吸附于金属阳极区,使电荷转移电阻从 $100\Omega\cdot\text{cm}^2$ 提升至 $5000\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上,非极性碳链则在溶液中形成疏水层,阻碍 H^+ 、 Cl^- 等腐蚀离子扩散;无机缓蚀剂则通过与 Fe^{2+} 反应生成 FeMoO_4 保护膜,膜层厚度随缓蚀剂浓度(50-200mg/L)呈线性增长。该技术的显著优势是无需停产施工,可通过燃气管道的注剂口实现动态添加,尤其适用于枝状分布的城市管网。但实际应用中存在缓蚀剂选型匹配难题——某含 CO_2 湿气管道曾因误用阳离子型缓蚀剂,导致在金属表面发生竞争性解吸,反而加速局部

腐蚀；同时，长期加注可能造成缓蚀剂有效成分在阀门、流量计处沉积，需定期进行管道内检测（ILI）评估。

3.3 阴极保护技术

3.3.1 外加电流阴极保护（ICCP）

通过钛基混合金属氧化物阳极与直流电源（如恒电位仪）构建外电路，将管道电位强制极化至 -0.85V （CSE）以下，使金属表面的腐蚀微电池阳极反应被完全抑制。该技术适用于土壤电阻率 $>20\Omega \cdot \text{m}$ 的长输管道，如陕京四线天然气管道全长 935km，共设置 18 座阴极保护站，通过智能监测系统实时调节输出电流（0–50A），确保沿线管道电位波动 $\leq \pm 50\text{mV}$ 。其局限性在于对绝缘层完整性依赖度高，当防腐层破损率超过 15% 时，保护电流需求将增加 3 倍以上，导致能耗成本上升。

3.3.2 牺牲阳极阴极保护（SACP）

利用镁合金（电位 $-1.5\text{V}_{\text{CSE}}$ ）或锌合金（电位 $-1.1\text{V}_{\text{CSE}}$ ）的活泼性，通过导线与管道连接形成原电池，使阳极材料以 $0.05\text{--}0.1\text{mm/a}$ 的速率优先腐蚀，释放的电子持续中和管道表面的 Fe^{2+} 。该技术无需外部电源，特别适合无市电供应的郊区管道，如上海崇明岛低压燃气管道采用锌阳极保护，单组阳极（质量 20kg）保护半径可达 300m，维护周期长达 8 年。但镁阳极在土壤含水率 $<10\%$ 时效率显著下降，需配合回填盐膏层（NaCl 含量 $\geq 20\%$ ）改善导电环境。

3.4 多技术协同应用策略

单一技术难以应对复杂腐蚀环境，工程中普遍采用“涂层隔离 + 阴极保护 + 缓蚀剂补强”的三级防护体系：

基础防护：新建燃气管道优先选用无溶剂环氧树脂内涂层，该涂层具有优异的抗渗透性和附着力，其厚度需严格控制在 $\geq 500\mu\text{m}$ ，以形成致密的物理隔离层。针对管道焊缝、弯头这些易受介质冲刷、应力集中的关键部位，采用手工刷涂的方式进行加强处理，确保涂层均匀覆盖无死角，有效抵御腐蚀性介质与金属管壁直接接触，从而构建起第一道坚固的物理屏障。

电化学保护：对于压力 $\geq 1.6\text{MPa}$ 的高压燃气管道，实施外加电流阴极保护技术。该技术通过外部电源向管道施加阴极电流，使管道表面成为阴极，从而抑制金属腐蚀的阳极反应。每间隔 10km 设置电位监测桩，借助高精度的电位测量设备，实时监测管地电位。通过动态调整外加电流的大小和方向，确保管地电位稳定维持在 $-0.95\text{--}1.2\text{V}$ （CSE）区间，使管道始终处于阴极保护的有效范围内，最大限度降低电化学腐蚀风险。

动态补偿：在气质波动较大的特殊管段，如 LNG

混气站出口等区域，由于介质成分复杂多变，传统防护手段难以满足防护需求。因此，配置智能注剂系统，该系统集成了在线监测、自动控制等功能，能够根据管道内介质的实时变化，定期定量注入复配缓蚀剂（主要成分为咪唑啉和苯并三氮唑）。缓蚀剂浓度控制在 $30\text{--}80\text{mg/L}$ ，其中咪唑啉可在金属表面形成吸附膜，抑制酸性介质的腐蚀；苯并三氮唑对铜等金属具有特效防护作用，二者协同作用，能够有效填补涂层微孔，并对阴极保护存在的盲区进行化学防护，实现对管道的动态、全方位保护。

某丘陵地带燃气管道（设计压力 4.0MPa ，介质含 $\text{H}_2\text{S}80\text{mg/m}^3$ 、 $\text{CO}_25\%$ ）在应用多技术协同防腐方案后，通过系统性开挖检测获取了详实的防腐效果数据。在涂层完整区域，腐蚀速率显著降低至 0.005mm/a ，近乎处于腐蚀停滞状态，这得益于高性能防腐涂层对管道内壁的严密隔绝，有效阻断了腐蚀性介质与金属基体的直接接触。而在涂层破损处，阴极保护系统迅速响应，通过电化学作用促使 Fe^{2+} 与 OH^- 结合，在破损部位表面形成致密的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 保护膜，相较于单一涂层防护的管道，该区域腐蚀速率降低达 92%，充分展现了阴极保护技术对涂层缺陷的有效弥补能力。

4 结论与展望

针对上述复杂腐蚀机制，防治技术需深度结合介质特性与管道工况进行选择。内壁涂层技术通过在管道内壁喷涂环氧树脂、熔结环氧粉末（FBE）等材料，形成致密物理屏障，阻断介质与金属接触；缓蚀剂添加技术则通过向介质中注入咪唑啉类、季铵盐类等缓蚀剂，吸附于金属表面形成保护膜，抑制电化学腐蚀过程；阴极保护技术通过施加外部电流或牺牲阳极，使管道电位负移至非活性状态，改变金属腐蚀电位。三者协同作用，可构建起“隔离 – 抑制 – 防护”三位一体的全方位防护体系。

参考文献：

- [1] 雒新宇. 基于利用事故树分析法延缓城市燃气管道腐蚀的安全管理方法研究 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2024, 26(02): 27–31.
- [2] 李想, 李真, 华剑英, 等. 某小区燃气管道腐蚀原因检测分析 [J]. 设备管理与维修, 2023, (14): 113–114.
- [3] 胡哲辉, 唐鹰翔, 朱神平. 城镇中低压钢质燃气管道腐蚀泄漏风险评估 [J]. 煤气与热力, 2021, 41(04): 93–96+103.
- [4] 雷婷, 游蕙榕. 城镇燃气管道腐蚀防护对策研究 [J]. 清洗世界, 2020, 36(07): 117–118.
- [5] 黄爽. 燃气管道腐蚀分级评价理论研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2017.