

城镇燃气输配管道腐蚀机理与防护措施分析

曹艳伟 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 针对城镇燃气输配管道因腐蚀而出现的结构退化与潜在安全风险, 本文先对管道在使用过程中最常见的几种腐蚀类型及其背后的作用机理做了系统梳理。在腐蚀检测环节, 文章进一步整合了管道内外可部署的多种检测手段与腐蚀速率评估方法, 搭出一套覆盖完整生命周期的监测与诊断体系。到了防护策略层面, 则提出由材料、阴极保护、运行管理等多维度共同发力的应对措施, 希望为城镇燃气输配系统的腐蚀控制提供可落地的理论支撑。

关键词: 城镇燃气输配管道; 腐蚀机理; 防护措施

中图分类号: TE988.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0130-03

Analysis on Corrosion Mechanism and Protective Measures of Urban Gas Transmission and Distribution Pipeline

Cao Yanwei (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In view of the structural degradation and potential safety risks of urban gas transmission and distribution pipelines due to corrosion, this paper first systematically sorts out several common corrosion types of pipelines in use and the mechanism behind them. In the aspect of corrosion detection, this paper further integrates various detection methods and corrosion rate evaluation methods that can be deployed inside and outside the pipeline, and builds a set of monitoring and diagnosis system covering the whole life cycle. At the level of protection strategy, the countermeasures are put forward, which are made up of materials, cathodic protection and operation management, hoping to provide theoretical support for corrosion control of urban gas transmission and distribution system.

Key words: urban gas transmission and distribution pipeline; Corrosion mechanism; protective measure

燃气管道长年埋在成分复杂、湿度起伏的土壤中, 既承受外部土体应力, 又接触氯离子、硫化物等腐蚀介质, 两种因素叠加, 管壁很容易出现局部减薄或微裂纹, 泄漏概率随之抬升。随着新管线不断加密、老管线服役年限拉长, 腐蚀带来的隐患不再只是个案, 而是对供气安全形成持续放大的威胁。

1 城镇燃气输配系统概述

城镇燃气输配系统, 简单来说, 就是把高压天然气经过层层调压、分输, 最后送到千家万户的那套完整工程链。它通常由高压输气干线、中低压配气管网、调压箱柜、阀门井以及各类附属设备共同组成。由于要全年不停歇运行, 还要应付冬夏峰谷差极大的流量变化, 再加上城市地下地质条件复杂, 这套系统必须在结构完整和密封可靠两方面同时满足相当苛刻的标准, 才能守住安全底线。不同压力等级的管段, 在选材、壁厚、连接形式以及埋深上, 都得跟工况参数和安全规范一一对应, 容不得半点“差不多”。

2 输配管道腐蚀类型与机理分析

2.1 电化学腐蚀机制

电化学腐蚀是城镇燃气输配管道最常见的腐蚀形式, 其本质是原电池反应。管道表面形成电位差后, 阳极发生铁溶解反应 ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$), 电子经金属本体至阴极, 阴极发生氧还原反应 ($\text{O}_2 + 4\text{e}^-$

$+ 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{OH}^-$), 阳极金属持续溶解形成腐蚀坑, 最终可能导致管道穿孔。土壤的电阻率、含水率、pH值和氧扩散速率等参数, 会影响腐蚀电流密度与极化行为, 进而决定腐蚀速率与分布。

2.2 微生物腐蚀机制

微生物腐蚀并非微生物直接侵蚀金属, 而是其代谢活动改变局部环境, 间接加速腐蚀。燃气埋地管道中, 硫酸盐还原菌 (SRB)、铁氧化菌和产酸细菌是主要诱因。厌氧环境下, SRB将硫酸盐还原为硫化氢, 与钢材反应生成疏松的 FeS 锈瘤, 加快阳极溶解; 铁氧化菌把 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , 生成氢氧化铁沉积层, 形成氧浓差电池, 加剧局部点蚀。微生物形成的生物膜会改变局部环境、阻碍氧气传输, 使腐蚀从全面腐蚀转为局部集中腐蚀。生物膜的生长受土壤湿度、有机质含量和温度影响, 且微生物具备自我修复和抗干扰能力, 会降低传统防腐涂层的屏蔽效果, 造成长期腐蚀。

2.3 杂散电流腐蚀机理

杂散电流腐蚀是外部电源系统或地面设施的泄漏电流, 通过土壤流入地下金属结构, 在电流流出点形成阳极, 引发局部电化学腐蚀。地铁、直流电气化铁路、阴极保护装置及大型变电站附近易出现此类腐蚀, 因其高电压大电流易发生绝缘泄漏。相比自然电化

腐蚀，杂散电流腐蚀速度更快、攻击点更集中，数月内即可造成管壁点蚀甚至穿孔，常规防腐涂层和阴极保护系统难以有效抵御，形成的腐蚀热点会严重威胁管线结构安全。

3 输配管道腐蚀检测与评估技术

3.1 管道外检测技术

本技术依据土壤与管道电位差，评估埋地燃气管道外腐蚀及涂层完整性。直流电位梯度法(DCVG)可定位涂层破损、判断杂散电流腐蚀特征，精度 $\pm 5\text{mV}$ ，定位误差 $\leq 0.2\text{m}$ ；紧密电位测量评估阴极保护有效性，钢质管道需维持 $-850\text{mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$ 以下；交流电阻抗谱与四探针法土壤电阻率测试，辅助判断腐蚀状态与趋向。

3.2 管道内检测技术

管道内检测技术通常依靠一套搭载多种传感器的智能检测工具，在管道内部以匀速行进的同时对管壁进行高分辨率扫描，从而把腐蚀、凹陷、裂纹等结构性缺陷逐一捕捉下来；这套做法目前在中高压输气主干线的完整性评估里几乎成了标配磁漏检测技术利用铁磁材料在外加磁场中的磁通变化规律：一旦管壁出现减薄或穿孔，磁通便会在缺陷区域向外泄漏，形成可被探头捕获的异常信号；在工程实践中，这种方法对壁厚损失的检测灵敏度一般能达到10%，而轴向定位的误差通常可以控制在 $\pm 10\text{cm}$ 以内超声波检测则借助高频声波在金属内的传播特性，通过精确测量回波的时间与振幅来反推缺陷的几何形貌，因此特别适合发现内壁腐蚀坑、层状剥离这类微小损伤；在分辨率指标上，它对厚度变化的识别能力往往优于 0.5mm 为了把非均匀腐蚀区看得更清楚，现场常把涡流检测(EC)与漏磁技术(MFL+EC)打包使用，两者互补后，对形状复杂或深浅不一的腐蚀坑能给出更可信的判读结果高分辨率内检测工具一般还会内置IMU定位系统，在爬行过程中实时把自身轨迹与管线坐标系对齐，跑完一趟就能拼出一张带有精确里程的缺陷图谱，方便后续开挖验证与维修排序。

3.3 腐蚀速率评估方法

腐蚀速率评估在燃气输配管道的日常腐蚀管理里属于绕不开的核心技术环节，它的任务是把单位时间里材料被啃掉的深度变化先算清楚，再据此推断管道还剩多少强度、还能再撑多久。到了现场，工程师们最常掏出来的办法大致有三样：电化学测试、试片暴露法，以及把历史数据喂给模型做反演。线性极化电阻测试的做法是往金属表面扔一个极小的电压扰动，随即记录电流怎么回应，靠这波“刺激—反馈”间接捕捉腐蚀反应的活跃程度，再换算成金属表面的平均

腐蚀速率；这套手段可以搬到现场做连续监测，对碳钢、低合金钢这类管材反应灵敏，在土壤环境里误差通常能被压到 $\pm 10\%$ 以内。试片暴露法则先把标准材质的样片埋进具有代表性的工况点，隔一段时间再挖出来称质量、测厚度，用前后差值刻画腐蚀快慢，它更适合拉长时间尺度、盯准一个固定点看趋势，年腐蚀速率差个 0.1mm/a 甚至更多都不算稀奇。

4 腐蚀防护技术分析

4.1 防腐材料与涂层技术

在燃气输配钢管的整个防护体系里，防腐涂层被视作把金属管壁与外界腐蚀环境隔开的第一道、也是最关键的一道物理屏障，它的核心任务就是把氧、水、盐这类腐蚀介质挡在外面，让氧化还原反应难以在金属表面发生为了真正胜任这份工作，高性能涂层得同时拿得出几项硬指标：与钢材的粘结强度得足够高，水蒸气透过率得压到很低，酸碱盐雾的化学腐蚀要能扛得住，外加在阴极保护通电条件下还不能成片剥离眼下行业里铺得最多的几种体系，不外乎三层聚乙烯(3PE)、熔结环氧粉末(FBE)以及老牌的环氧煤沥青3PE的构造说起来也直观：先刷一层环氧底漆打底，中间再热涂胶粘剂当‘双面胶’，最外面套上高密度聚乙烯外护套，三层加起来厚度通常落在 $1.8\sim 3.0\text{mm}$ 区间，实验室里剥离强度普遍能跑到 85N/cm 以上，设计寿命轻轻松松就能标30年。FBE涂层要薄得多， $350\sim 450\mu\text{m}$ 的粉末一次熔结成型，耐温上限大约 95°C ，埋地管、高温输送管都能用，现场补口也方便相比之下，环氧煤沥青胜在便宜、施工门槛低，可一旦长期暴晒、遭遇机械磕碰或者常年泡在水里，涂层脆化、龟裂、失粘的速度会明显加快，这几年在新建主干线上已经逐步被前面提到的新材料挤出了主流序列。

4.2 阴极保护技术

阴极保护技术借助外加电流或牺牲阳极两种手段，把管道金属整体极化到热力学意义上的稳定区间，借此压低阳极反应速度，从而实现长期防腐的目标强制电流阴极保护系统依靠恒电位仪这类直流电源，把电流持续送到被保护管道表面，让整根管子维持在阴极极化状态。系统里必须盯紧的核心指标包括保护电位、电流密度以及土壤电阻率，对钢制燃气管道来说，行业普遍建议把保护电位定在 -850mV (以 Cu/CuSO_4 参比电极为基准)，而电流密度通常控制在 $10\sim 20\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之间牺牲阳极方案更适合拉电困难或者小口径支线，镁合金和高电位锌合金是现场最常见的阳极材料，前者的单位质量电流效率能达到 $1100\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，后者约为 $780\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，可分别对应不同电导率区间的土壤做

阴极保护设计时，必须把涂层缺陷率、线路总长度以及电接地条件一并考虑进去，通过分区布点的方式让极化尽量均匀，避免局部欠保护或过保护。

4.3 杂散电流控制措施

杂散电流对埋地燃气输配管道的腐蚀破坏往往表现出不可忽视的放大效应，尤其在贴近电气化铁路、直流地铁或大型电解车间的区段，泄漏电流一旦在金属外壁找到薄弱点，就会迅速形成高电位差的阳极带，局部腐蚀速率随之被抬升到远高于自然土壤腐蚀的水平。为了把杂散电流带来的腐蚀风险压到可控范围，设计阶段就得先把干扰源的位置、强度以及电位分布摸清楚，并据此划出高风险带；随后再布设绝缘接头、去耦合装置和引流保护系统，形成层层递进的防护链。绝缘接头的作用是把原本连成一体的管道电气通路切断，让杂散电流失去连续通道，因此它至少得扛住30kV的瞬时过电压，同时在常态下保持 $\geq 10^9 \Omega$ 的绝缘电阻，才算真正起到隔离效果。去耦合装置(DCD)则更像一道智能阀门：平时它把管道与地之间锁成高阻状态，一旦遭遇雷击、故障过电压或杂散电流冲击，能在不到1ms的时间内切换成低阻抗泄流通道，把危险能量快速放掉，因而特别适合电流波动剧烈的动态干扰场景。

4.4 微生物腐蚀防控

要想把微生物腐蚀压下去，得同时从三条线发力：先把生物膜的结构拆掉，再掐住微生物的代谢命脉，最后把管道周围的“居住环境”整得没那么友好，三条线互相打配合，才能搭出一个多层级的协同防护网。杀菌剂怎么选、怎么加，是整个环节里最吃功夫的一步，常用的药也就是季铵盐、异噻唑啉酮、戊二醛这几类，它们既能在短时间内把菌数压下来，又能在土壤这种复杂环境里稳住性子；其中戊二醛对厌氧菌群的“杀伤力”最明显，现场一般把浓度卡在100~200mg/L，一个处理周期跑下来大概7~10天，就能把活跃菌群压到低位。再把视角拉到土壤这边，只要把“细菌食堂”拆了，繁殖速度自然掉档：把排水路线理顺、让有机质少掉一截、再把含氧量控在低位，SRB和产酸细菌想扩繁也找不到足够的“口粮”。结构层面也能再上一道锁，现在不少工地会直接刷一层带抗菌因子的高分子涂层，拿纳米银改性的环氧涂层举例，它对常见腐蚀菌的抑制率能冲到95%以上，同时附着力和抗阴极剥离性能也没掉链子，等于给管道穿了件既杀菌又防磕的外套。

5. 腐蚀管理与运维策略

5.1 腐蚀监测与数据管理系统

腐蚀监测与数据管理系统构成了城镇燃气输配管

道完整性管理的技术支撑平台，其核心功能在于实现腐蚀状态的实时感知、异常预警与历史趋势分析。监测系统主要集成恒电位参考电极、电流传感器、土壤参数采集模块及数据远传装置，可实现对阴极保护电位、杂散电流、电化学噪声等参数的连续采集。电位测量精度优于 $\pm 1\text{mV}$ ，数据采样周期可设定为30min以内，确保捕捉短时干扰信号。在数据管理层，系统依托SCADA平台与GIS空间模型构建腐蚀分布图谱，实现风险区域可视化与动态评估。

5.2 运维中的腐蚀防护优化策略

燃气输配管道进入运行维护阶段后，腐蚀控制必须依据事先划定的风险等级采取差异化策略，才能把有限的人财物精准投向最薄弱的环节，进而把整体防护效率抬到最高。在日常巡检与维护过程中，运维团队需要把实时腐蚀监测数据同历年缺陷分布图谱放在一起比对，优先给高风险管段排期做定期复测和局部修复，以免小蚀点拖成大泄漏。阴极保护系统要按季度做一次全域电位体检，保证不少于95%的测点仍旧处在有效极化区间；一旦出现异常读数，必须在72h内完成原因排查和参数调整，让保护水平迅速归位。对于服役年限较长的老旧管网，建议采用智能内检测工具大约每5年做一次完整性评估，把测得的腐蚀深度和增长速率一并代入模型，据此倒推出下一次维修的合理时间窗口。涂层系统出现破损后，修复方案应视现场检测结果灵活选择局部重涂或整段重包；若采用重包工艺，新涂层干膜厚度需控制在2.0mm以上，同时附着力不得低于12MPa，才能重新建立起可靠的屏障。

6 结语

城镇燃气管道埋地环境复杂，多类腐蚀持续侵蚀管壁，防护缺失易引发供气安全事故。保障管道安全需系统识别腐蚀、科学组合防护技术、精细落实运维工作。未来行业将融合传感、计算及新型材料，实现主动精准的腐蚀防控。

参考文献：

- [1] 金鑫. 燃气输配管道材质选择与腐蚀防护的影响分析[J]. 石化技术, 2025, 32(08): 240-242.
- [2] 张晓华, 田铎. 城镇中低压燃气管道外腐蚀检验技术及难点分析[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(09): 25-29+37.
- [3] 李孝莹. 城市燃气管道地铁杂散电流干扰防护研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(09): 30-37.
- [4] 于欢. 基于多相流化工理论的燃气管道内腐蚀机理与控制[J]. 石化技术, 2025, 32(09): 404-405.
- [5] 辛凯, 张腾. 冷凝水对燃气输送管道腐蚀的影响与治理措施[J]. 流程工业, 2025(07): 30-32.