

燃气输配系统中管道腐蚀防护技术与材料研究

樊祥洋（太原燃气集团有限公司，山西 太原 030000）

摘要：燃气输配系统中的管道腐蚀问题直接威胁着管网的安全运行以及使用寿命。本文深入且系统地剖析了燃气管道腐蚀的主要类型，并详细探讨了不同环境，包括土壤、大气、输送介质等因素对腐蚀产生的影响。深入探究了新型防腐材料的应用前景，进而提出了未来燃气管道腐蚀防护技术的发展方向。

关键词：燃气输配系统；管道腐蚀；防护技术

中图分类号：TE988 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)021-0151-03

Research on Pipeline Corrosion Protection Technology and Materials in Gas Transmission and Distribution System

Fan Xiangyang(Taiyuan Gas Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: The corrosion problem of pipelines in gas transmission and distribution systems directly threatens the safe operation and service life of the pipeline network. This article deeply and systematically analyzes the main types of corrosion in gas pipelines, and explores in detail the effects of different environments, including soil, atmosphere, and transport media, on corrosion. The application prospects of new anti-corrosion materials were deeply explored, and the development direction of corrosion protection technology for gas pipelines in the future was proposed.

Keywords: gas transmission and distribution system; Pipeline corrosion; Protective technology

燃气输配系统作为城市能源供应的关键基础设施，其安全性与可靠性对居民生活和工业生产起着决定性作用。然而，在管道长期运行过程中，极易受到腐蚀的侵害。相关统计数据显示，全球每年因管道腐蚀所造成的经济损失高达数千亿美元。管道腐蚀不仅会导致管壁逐渐减薄，引发泄漏事故，严重时甚至可能引发爆炸，对人民生命财产安全和生态环境构成巨大威胁。例如某市某年发生的一起燃气管道泄漏爆炸事故，就是由于管道长期受到腐蚀，未及时发现和维护，最终造成了严重的人员伤亡和财产损失。因此，深入研究燃气管道腐蚀机理及防护技术，具有极为重要的工程价值和紧迫的现实意义。本文将从腐蚀类型、影响因素、防护技术及材料选择等多个方面展开深入分析，力求为燃气输配系统的安全运行筑牢理论根基，提供技术支撑。

1 燃气管道腐蚀的主要类型

1.1 化学腐蚀

化学腐蚀是指燃气管道与周围介质，如O₂、H₂S、CO₂等发生纯粹的化学反应，进而致使金属发生氧化或硫化现象。以在潮湿环境中为例，H₂S能够与铁发生反应，生成FeS，反应方程式为：
Fe+H₂S→FeS+H₂，这一反应过程会显著加速管道的腐蚀进程。化学腐蚀通常在高温、干燥的环境中较为常见，虽然其发生的频率相对较低，但一旦发生，对管道的损害也不容小觑。

1.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是燃气管道腐蚀最主要的形式，其

产生的原因是金属与电解质溶液，比如土壤、水等形成了原电池。以下是几种常见的电化学腐蚀类型：

1.2.1 土壤腐蚀

不同地区的土壤在电阻率、pH值、含盐量等方面存在差异，这些差异会对腐蚀速率产生显著影响。一般来说，土壤电阻率越低，越容易形成导电通路，从而加速腐蚀；而酸性土壤（低pH值）中的氢离子会参与腐蚀反应，也会加快金属的溶解。

1.2.2 杂散电流腐蚀

附近电力设施产生的杂散电流会干扰管道的电化学平衡，使管道成为电流的流出或流入点，从而加速金属的溶解。例如，地铁、电气化铁路等附近的燃气管道就容易受到杂散电流的影响而发生腐蚀。

1.2.3 点蚀和缝隙腐蚀

在局部区域，由于氧浓度存在差异，会形成氧浓差电池，进而产生腐蚀坑。例如，在管道的焊接部位、法兰连接处等，由于存在缝隙，容易积聚电解质溶液，并且氧浓度分布不均匀，从而引发点蚀和缝隙腐蚀。

1.3 微生物腐蚀(MIC)

某些微生物，如硫酸盐还原菌(SRB)，在厌氧环境中能够通过代谢活动产生H₂S，这会进一步促进电化学腐蚀的发生。微生物腐蚀常见于埋地管道，这些微生物附着在管道表面，形成生物膜，改变了管道表面的化学和电化学环境。研究表明，在含有硫酸盐还原菌的环境中，管道的腐蚀速率可比正常情况提高数倍。微生物腐蚀具有隐蔽性强、不易察觉的特点，

一旦发现，往往已经对管道造成了较为严重的损害。

2 影响燃气管道腐蚀的主要因素

2.1 环境因素

2.1.1 土壤特性

土壤的电阻率、pH 值、含水量、Cl⁻、SO₄₂₋ 含量等都会对燃气管道的腐蚀产生影响。低电阻率的土壤会加速电化学腐蚀的进行；酸性土壤（低 pH 值）会增加氢离子浓度，促进金属的溶解；含水量过高会使土壤成为良好的电解质溶液，有利于腐蚀的发生；而 Cl⁻、SO₄₂₋ 等阴离子会破坏金属表面的保护膜，加速腐蚀进程。

2.1.2 大气环境

大气中的湿度、酸雨以及工业污染物，如 SO₂、NO_x 等，都会对燃气管道产生腐蚀作用。高湿度环境会在管道表面形成水膜，为电化学腐蚀提供条件；酸雨会直接与金属发生化学反应，加速腐蚀；SO₂、NO_x 等污染物在大气中会转化为酸性物质，进一步加剧腐蚀。

2.1.3 输送介质

燃气中的 H₂S、CO₂、水分含量是影响管道腐蚀的重要因素。H₂S 和 CO₂ 在有水存在的情况下，会形成酸性溶液，对管道造成腐蚀。水分的存在则是电化学腐蚀发生的必要条件，它能够促进离子的迁移和反应的进行。

2.2 材料因素

碳钢管道由于其成本较低、强度较高，在燃气输配系统中应用广泛，但碳钢的耐腐蚀性较差，容易受到腐蚀的侵害。相比之下，不锈钢、耐蚀合金等材料具有更强的抗腐蚀性，但其成本较高，限制了其大规模应用。

焊接接头、弯头等部位由于在加工过程中产生了残余应力，导致这些部位的金属组织结构发生变化，从而更容易发生腐蚀。此外，焊接过程中如果焊接质量不佳，存在气孔、夹渣等缺陷，也会加速腐蚀的发生。

2.3 运行因素

输送压力、流速、温度的变化都会对腐蚀速率产生影响。较高的输送压力会使管道承受更大的应力，从而加速腐蚀；流速过快会冲刷管道内壁，破坏金属表面的保护膜，促进腐蚀；温度升高会加快化学反应速率，从而增加腐蚀速率。

维护不足，如未能及时对管道进行检测、修复涂层破损等，都会导致腐蚀加速。涂层破损后，管道金属直接暴露在腐蚀环境中，会迅速发生腐蚀，因此及时维护涂层的完整性对于防止管道腐蚀至关重要。

3. 燃气管道腐蚀防护技术

3.1 涂层防护技术

3.1.1 环氧煤沥青涂层

具有良好的耐水、耐化学腐蚀性能，价格相对较低，因此被广泛应用于埋地管道的防护。其成膜物质主要是环氧树脂和煤沥青，通过固化反应形成坚韧的保护膜，能够有效隔离管道与腐蚀介质的接触。

3.1.2 聚乙烯（PE）3 层结构

这种结构由底层环氧粉末、中间胶粘剂和外层 PE 组成。底层环氧粉末能够与金属表面形成化学键，提供良好的附着力；中间胶粘剂起到连接环氧粉末和外层 PE 的作用；外层 PE 具有优异的抗机械损伤和抗腐蚀性能。这种结构综合了多种材料的优点，抗腐蚀性强，广泛应用于长输管道。

3.1.3 聚氨酯涂层

具有良好的柔韧性、耐磨性和耐候性，适用于高寒、高湿环境。在低温环境下，聚氨酯涂层不会变脆，依然能够保持良好的防护性能；在高湿环境中，其防水性能能够有效防止水分对管道的侵蚀。

3.2 阴极保护技术

3.2.1 牺牲阳极法

采用 Mg、Zn、Al 合金作为阳极，这些金属的电位比钢管更负，在电解质溶液中会优先失去电子，从而保护钢管不被腐蚀。牺牲阳极法具有安装简单、维护方便等优点，适用于小范围、分散的管道保护。

3.2.2 外加电流法

通过整流器将交流电转换为直流电，为管道提供阴极电流，使管道成为阴极而得到保护。这种方法适用于长距离、大口径的管道，能够提供较大的保护电流，但需要专业的设备和人员进行维护管理。

3.3 缓蚀剂技术

在燃气中添加缓蚀剂，如胺类、磷酸盐等，能够抑制金属表面的电化学反应。缓蚀剂的作用机理主要是通过在金属表面吸附，形成一层保护膜，阻止腐蚀介质与金属的接触；或者通过改变金属表面的电极电位，降低腐蚀反应的驱动力。缓蚀剂技术适用于无法采用涂层防护或阴极保护的场合，如燃气输送过程中的内腐蚀防护。

3.4 新型防护材料

3.4.1 纳米涂层

以石墨烯改性涂层为代表的纳米涂层具有超高的耐蚀性。石墨烯具有优异的力学性能、电学性能和化学稳定性，将其添加到涂层中，能够显著提高涂层的阻隔性能，有效阻止腐蚀介质的渗透。例如，石墨烯改性的环氧涂层，其耐腐蚀性能比普通环氧涂层提高

表 1

材料类型	优点	缺点	适用场景
碳钢 + 涂层	成本低、强度高	需配合防腐措施	大多数输气管道，在腐蚀环境相对较轻的地区，通过涂层防护能够满足管道的使用寿命要求
不锈钢	耐腐蚀性强	成本高	关键管段、高腐蚀环境，如穿越河流、湖泊等腐蚀性较强的地段，以及对安全性要求极高的燃气储备站等场所
PE 管	耐腐蚀、柔韧性好	承压能力较低	中低压燃气输送，常用于城市居民小区的燃气入户管道，以及一些对压力要求不高的工业用气输送
复合材料	轻量化、抗腐蚀	价格昂贵	特殊环境（海洋、化工区），如海上油气田的集输管道，以及化工园区内输送腐蚀性介质的管道

了数倍。

3.4.2 复合材料管道

如玻璃钢(FRP)管道，具有耐腐蚀、轻量化等优点。FRP 管道由玻璃纤维和树脂组成，通过纤维增强作用，使其具有较高的强度；同时，树脂基体提供了良好的耐腐蚀性。这种管道适用于特殊环境，如海洋、化工区等对耐腐蚀性能要求较高的场合。

4 耐腐蚀材料的选择（详见表 1）

5 未来发展趋势

5.1 智能化监测

结合物联网(IoT)技术，实时监测管道腐蚀状态。通过在管道上安装各种传感器，如腐蚀电位传感器、应力传感器、温度传感器等，将采集到的数据通过无线传输技术发送到监控中心。利用大数据分析和人工智能算法，对数据进行处理和分析，能够及时准确地判断管道的腐蚀情况，预测腐蚀发展趋势，为管道的维护和管理提供科学依据。

5.2 绿色防腐技术

开发环保型涂层和缓蚀剂。随着环保意识的不断提高，传统的含有重金属、挥发性有机化合物(VOCs)的防腐材料逐渐受到限制。未来，应致力于研发无毒、无污染、可降解的环保型防腐材料。例如，水性涂料作为一种环保型涂层材料，以水为溶剂，减少了 VOCs 的排放；绿色缓蚀剂，如植物提取物缓蚀剂，具有天然、无毒、可生物降解等优点，具有广阔的应用前景。

5.3 高性能材料

纳米材料、自修复涂层的应用将成为未来的发展方向。纳米材料由于其独特的尺寸效应和表面效应，能够显著提高材料的性能。自修复涂层能够在涂层受到损伤时，自动进行修复，恢复其防护性能。例如，

含有微胶囊的自修复涂层，当涂层出现裂纹时，微胶囊破裂，释放出修复剂，与催化剂反应，填充裂纹，实现自修复。这些高性能材料的应用将进一步提升燃气管道的耐腐蚀性能和使用寿命。

6 结论

燃气管道腐蚀防护是保障燃气输配系统安全稳定运行的关键环节。目前，涂层防护与阴极保护相结合的技术仍是主流的腐蚀防护手段，在实际工程中发挥了重要作用。然而，随着科技的不断进步和对管道安全要求的日益提高，新型材料和智能监测技术的发展为燃气管道腐蚀防护带来了新的机遇和挑战。未来，应加强多学科交叉研究，充分融合材料科学、电化学、信息技术等领域的最新成果，推动燃气管道腐蚀防护向高效、环保、智能化方向发展。通过不断创新和优化防护技术与材料，提高管道的耐腐蚀性能和安全性，确保燃气输配系统能够可靠地为社会提供能源保障，为城市的发展和人民的生活创造良好的条件。

参考文献：

- [1] 吴垠. 基于 DCVG 技术的燃气管道泄漏检测预警技术研究 [J]. 化学工程与装备, 2025,(01):130-132.
- [2] 陈志光, 吴聪, 张静思, 秦朝葵. 建筑防潮设备对埋地钢质燃气管道的腐蚀风险 [J]. 煤气与热力, 2024,44(12):7-14.
- [3] 陈国培, 伏喜斌, 范成龙, 庄鹏辉, 林迪. 埋地钢质燃气管道跨越段外腐蚀分析及防护 [J]. 中国特种设备安全, 2024,40(11):88-93.
- [4] 彭壮. 城市燃气输配系统的腐蚀与防护 [J]. 产业与科技论坛, 2013(2):2.
- [5] 田永淑, 朱靖, 刘永新. 煤气输配管道及设备 [M]. 化学工业出版社, 2007.