

长输天然气管道防腐技术

郭金铭（山西天然气有限公司，山西 太原 030032）

摘要：本文聚焦长输天然气管道防腐技术，深入剖析土壤环境、输送介质、微生物及应力等引发的腐蚀机理。详细阐述外防腐如三层PE/PP等技术，内防腐涵盖内涂层、内衬管等手段。通过实际案例论证为提升管道防腐性能、保障安全输送提供理论与实践依据。

关键词：长输天然气管道；腐蚀机理；外防腐技术；内防腐技术

中图分类号：TE988.2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)019-0087-03

Anti corrosion technology for long-distance natural gas pipelines

Guo Jinming (Shanxi Natural Gas Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030032, China)

Abstract: This article focuses on the anti-corrosion technology of long-distance natural gas pipelines, and deeply analyzes the corrosion mechanisms caused by soil environment, transportation medium, microorganisms, and stress. Elaborate on external anti-corrosion techniques such as three-layer PE/PP, while internal anti-corrosion includes methods such as internal coating and lining. Provide theoretical and practical basis for improving pipeline anti-corrosion performance and ensuring safe transportation through practical case studies.

Keywords: long-distance natural gas pipeline; Corrosion mechanism; External anti-corrosion technology; Internal anti-corrosion technology

长输天然气管道作为能源输送的“生命线”，其安全稳定运行至关重要。然而，各类腐蚀因素严重威胁管道寿命与输送安全。本文深入探讨其腐蚀机理，系统研究防腐技术，力求为行业提供有力支撑。

1 长输天然气管道的腐蚀机理分析

1.1 土壤环境对管道腐蚀的影响

土壤中的酸碱度、含盐量及含水量等化学性质差异显著，在酸性土壤中氢离子浓度较高，易与管道金属发生置换反应加速腐蚀进程，而在高含盐量土壤里氯离子具有很强的穿透性，能够破坏管道表面的钝化膜引发点蚀。此外土壤中氧气分布不均匀，会形成氧浓差电池致使管道局部发生腐蚀。比如在土壤透气性良好与较差区域的交界处，管道易出现腐蚀现象。

1.2 管道输送介质对内腐蚀的影响

天然气输送介质中含有的酸性气体，如硫化氢(H_2S)和二氧化碳(CO_2)是引发管道内腐蚀的重要因素。 H_2S 在有水存在的情况下会与铁发生化学反应，生成硫化亚铁破坏管道内壁的完整性。 CO_2 溶于水形成碳酸降低介质pH值，加速金属溶解。并且天然气中携带的游离水、粉尘及其他杂质，不仅会为酸性气体腐蚀创造条件还可能在管道内壁形成垢下腐蚀。

1.3 微生物腐蚀的作用机制

微生物广泛存在于土壤及输送介质中对管道腐蚀影响重大，以硫酸盐还原菌为例，在厌氧环境下，其利用硫酸盐代谢产生硫化物与管道金属反应生成硫化铁，引发腐蚀。微生物在管道表面附着形成生物膜改

变管道表面微环境，促进腐蚀反应。微生物代谢产生的有机酸降低局部pH值，进一步加速金属溶解对管道造成持续且隐蔽的损害，往往在检测时才发现严重腐蚀问题。

1.4 应力腐蚀开裂(SCC)的形成及影响

管道在制造、安装及运行过程中会产生残余应力，同时输送压力也会对管道施加额外应力。当管道处于含有特定腐蚀介质(如含硫化氢的天然气)的环境中，在应力集中区域，金属原子的活性增加腐蚀速率加快。随着时间推移微裂纹逐渐萌生并扩展最终导致管道开裂。SCC具有隐蔽性初期不易察觉，但一旦发生会严重影响管道的结构完整性，可能引发天然气泄漏等重大安全事故对生命财产安全和生态环境构成巨大威胁。

2 高长输天然气管道外防腐技术

2.1 三层PE/PP防腐层的应用及性能特点

三层PE/PP防腐层结构独特，由底层环氧粉末涂层、中间层胶粘剂和外层聚乙烯或聚丙烯层组成。底层环氧粉末凭借其分子结构中的环氧基团，与钢管表面的金属原子形成化学键提供强大的附着力，同时具备出色的耐化学腐蚀性，能有效抵御土壤中各类酸碱盐的侵蚀。中间层胶粘剂则起到桥梁作用，其一端与环氧粉末牢固结合，另一端与外层的聚乙烯或聚丙烯相互缠绕，确保整个防腐层的结构稳定性。外层的聚乙烯或聚丙烯具有优异的机械性能，如高抗冲击强度、良好的耐磨性以及卓越的耐候性，能够在复杂的外部

环境中为管道提供可靠的物理防护，阻挡土壤颗粒的摩擦、动植物根系的穿刺以及紫外线的照射^[1]。

在实际应用中三层 PE/PP 防腐层广泛用于陆地长输天然气管道项目，例如某条贯穿多个省份的大型长输天然气管道工程，途经多种不同地质条件的区域，包括盐碱地、山区以及农田等。在该项目中全线采用了三层 PE 防腐层。

在盐碱地地段由于土壤中盐分含量高腐蚀性强，三层 PE 防腐层的底层环氧粉末有效抵抗了盐分的化学侵蚀，中间层胶粘剂保证了各层间的紧密连接，外层聚乙烯则凭借其高韧性和耐磨性防止了土壤中尖锐颗粒对管道的划伤，成功保护管道多年未出现明显的腐蚀迹象大大延长了管道的使用寿命降低了维护成本。

2.2 FBE（熔结环氧粉末）涂层的技术原理及应用

将经过严格表面预处理的钢管置于静电场中，环氧粉末在高压静电作用下均匀吸附在钢管表面。随后钢管进入加热炉，在高温环境下环氧粉末迅速熔化并流平，经过固化反应形成一层连续、致密且坚硬的涂层。环氧粉末的分子结构中含有大量的羟基和环氧基，这些活性基团在固化过程中相互交联形成三维网状结构，赋予涂层卓越的性能。FBE 涂层具有极高的耐化学腐蚀性，能够耐受多种强酸、强碱以及有机溶剂的侵蚀。同时其硬度高、耐磨性强，能够有效抵抗管道在运输、安装过程中以及运行期间受到的机械损伤。

FBE 涂层在长输天然气管道领域有着广泛的应用，尤其适用于对防腐性能要求极高且环境条件较为恶劣的区域。比如在某沙漠地区的长输天然气管道建设中该地区昼夜温差大风沙侵蚀严重，且土壤中含有一定量的腐蚀性物质。在这种环境下 FBE 涂层展现出了其独特的优势。由于其良好的热稳定性能够适应沙漠地区大幅度的温度变化，不会因温度波动而出现涂层开裂或脱落的现象。其高硬度和耐磨性有效抵御了风沙的冲刷保证了涂层的完整性，从而为管道提供了可靠的防腐保护，使得该管道在恶劣的沙漠环境中能够安全稳定运行多年。

2.3 复合涂层（双层 FBE/PE）的优势与适用场景

复合涂层（双层 FBE/PE）融合了 FBE 涂层和 PE 涂层的优点，形成了一种性能更为卓越的防腐体系。该复合涂层的内层为 FBE 涂层，继承了 FBE 涂层良好的附着力、优异的耐化学腐蚀性以及高硬度等特性，能够紧密附着在钢管表面为管道提供第一道防线，有效抵御输送介质和土壤中化学物质的侵蚀。外层的 PE 涂层则发挥其机械性能优势，具有高抗冲击强度、良好的柔韧性和耐候性能够在复杂的外部环境中为管道

提供可靠的物理防护，防止管道受到外力撞击、划伤以及紫外线老化等损害。

复合涂层（双层 FBE/PE）适用于多种复杂环境下的长输天然气管道，例如在沿海地区的长输天然气管道建设中，管道不仅要面临海水、海风带来的高盐分腐蚀环境，还要承受频繁的台风等自然灾害可能造成的外力冲击。

在该地区的管道项目中采用双层 FBE/PE 复合涂层，内层 FBE 涂层有效抵抗了海水中氯离子等腐蚀性物质的渗透防止管道发生化学腐蚀。外层的 PE 涂层凭借其高抗冲击性能，成功抵御了台风中夹杂的杂物对管道的撞击，同时其良好的耐候性也能适应沿海地区潮湿、高紫外线的环境避免涂层老化^[2]。

2.4 机械保护层（混凝土、玻璃钢包覆）技术

机械保护层技术，旨在通过在管道外包裹高强度材料为管道提供机械防护。混凝土包覆是常见方式，将特定配合比的混凝土浇筑于管道四周，形成坚固外壳。它抗压强度高，能承受土壤压力与车辆荷载，避免管道因外力挤压变形、损坏。而且，混凝土化学稳定性良好，可隔离土壤中腐蚀性物质与管道接触。

玻璃钢包覆也被广泛应用。其利用玻璃纤维增强塑料特性保护管道，具备重量轻、强度高、耐腐蚀等优势。内部玻璃纤维提供高强度支撑，抵抗外力冲击，防止管道划伤、撞击；外层树脂基体赋予耐化学腐蚀性，抵御土壤中酸碱盐侵蚀。玻璃钢包覆施工简便，能按管道形状、尺寸定制，确保紧密贴合。

例如，某城市长输天然气管道改造项目中，部分管道位于交通繁忙主干道下，常受重型车辆碾压，遂采用混凝土包覆技术。先检测、修复原有管道，再支模浇筑，形成合适厚度保护层，经运行监测，管道结构完整。

在山区长输天然气管道工程里，因地形复杂、岩石多，管道易受刮擦、石块撞击，采用玻璃钢包覆技术，定制玻璃钢套管现场安装，成功抵御机械损伤，保障天然气正常输送。

3 高长输天然气管道内防腐技术

3.1 内涂层防腐技术（环氧树脂、聚氨酯等）

内涂层防腐技术通过在管道内壁涂特定涂料，形成连续、致密保护膜，阻隔输送介质与金属接触，抑制腐蚀。其中，环氧树脂内涂层因分子结构中的环氧基团，能与金属表面活性位点反应，附着力强。固化后，它耐化学腐蚀，可抵御天然气中酸性气体与水分形成的腐蚀性介质，且耐磨性佳，天然气含少量固体颗粒时，也能维持涂层完整。

例如在某大型长输天然气管道工程中，部分管段

输送的天然气含硫量较高，在这些管段内壁采用环氧树脂内涂层。施工时先对管道内壁进行严格的喷砂除锈处理，确保表面清洁度与粗糙度达到标准，随后采用高压无气喷涂工艺均匀涂覆环氧树脂涂料经固化后形成约 $300 \mu\text{m}$ 厚的涂层。

聚氨酯内涂层则以其高弹性和卓越的抗冲击性能著称，聚氨酯分子链中的氨基甲酸酯基团赋予涂层良好的柔韧性，使其能在管道因温度变化或输送压力波动而产生微小变形时依然保持涂层的完整性，避免出现开裂现象。同时聚氨酯对多种化学物质具有较强的耐受性，在含有复杂成分的天然气输送环境中表现出良好的防腐性能。在一些存在频繁压力脉动的天然气集输管道中，聚氨酯内涂层得到广泛应用。

3.2 内衬管技术的应用与适用性分析

常见的内衬管材料有高密度聚乙烯（HDPE）、玻璃钢管等。HDPE 内衬管具有优良的化学稳定性，对天然气中的各类腐蚀性成分几乎不发生化学反应。其表面光滑能有效降低天然气输送过程中的摩擦阻力，提高输送效率。例如在某老旧长输天然气管道改造项目中，原管道因长期服役内壁腐蚀严重。采用 HDPE 内衬管技术进行修复，首先对原管道进行清管作业去除内部污垢与腐蚀产物，然后通过牵引法将定制的 HDPE 内衬管拉入原管道内。HDPE 管在拉入过程中利用自身的柔韧性适应原管道的弯曲与变形到达指定位置后，通过加压使其紧密贴合原管道内壁。经改造后管道内腐蚀问题得到有效解决，输送能力也得到一定提升。

玻璃钢管内衬则凭借其高强度、耐腐蚀和耐温性能，适用于更为复杂的工况。玻璃纤维增强的树脂基体赋予其出色的机械强度，可承受一定的输送压力与外力作用。同时其耐化学腐蚀性强，在高温、高腐蚀性天然气输送环境中优势明显。在一些地热资源丰富地区的长输天然气管道，由于输送介质温度较高且含有特殊腐蚀性成分采用玻璃钢管内衬技术。在安装过程中根据原管道尺寸定制玻璃钢管段，通过现场拼接、粘结的方式将其安装于原管道内部，形成可靠的内防腐结构保障了管道在特殊工况下的安全稳定运行^[3]。

3.3 气液相腐蚀抑制剂的选择与优化

气液相腐蚀抑制剂是通过添加特定化学物质，在管道内壁形成一层保护膜或改变腐蚀反应动力学从而抑制天然气输送过程中的内腐蚀。在选择腐蚀抑制剂时需综合考虑天然气成分、输送工况以及管道材质等因素。对于含硫化氢的天然气，有机胺类抑制剂较为常用。有机胺分子中的氮原子具有孤对电子，能与硫化氢中的氢离子结合，中和酸性，同时在金属表面形

成一层吸附膜阻碍腐蚀反应进行。例如在某天然气净化厂至长输管道首站的管段，天然气中硫化氢含量较高通过在管道入口处注入适量的有机胺类抑制剂，并根据输送流量与硫化氢浓度实时调整注入量。定期对管道内壁进行检测结果显示腐蚀速率明显降低，有效保障了管道的安全运行。当天然气中同时存在二氧化碳和水分时，咪唑啉类抑制剂表现出良好的抑制效果。咪唑啉分子能在金属表面发生吸附和聚合反应，形成一层致密的保护膜阻止二氧化碳与水对金属的腐蚀。在实际应用中为优化抑制剂效果需对其浓度、注入方式等进行精确控制。

3.4 动态流动条件下的腐蚀控制

高速流动的天然气携带的液滴或固体颗粒会对管道内壁产生冲刷作用，加速腐蚀进程。同时流动状态的不均匀性会导致局部区域出现湍流，使腐蚀介质在管道内壁的分布与传质过程发生改变，进一步加剧腐蚀。为控制动态流动条件下的腐蚀首先需优化管道设计。通过合理设计管道管径、弯头曲率半径以及内部结构，减少流动死区与湍流区域降低冲刷腐蚀风险^[4]。例如在某天然气集输管网中对部分易出现冲刷腐蚀的弯头部位，采用大曲率半径弯头设计并在弯头内壁增加耐磨衬里。经实际运行监测该部位的腐蚀速率大幅降低。

此外采用抗冲刷涂层也是有效的控制手段，一些特殊的陶瓷涂层或金属陶瓷复合涂层具有高硬度、良好的耐磨性与耐腐蚀性，能够在动态流动环境下为管道内壁提供可靠防护。在施工时通过热喷涂等工艺将涂层材料均匀涂覆于管道内壁，形成一层坚固的防护层。

4 结语

综上，本研究明晰了长输天然气管道腐蚀机理，剖析多种内外防腐技术的效能。这些成果为保障管道安全运行、降低维护成本提供有力支撑。未来应持续探索新型高效防腐技术，以应对更复杂工况推动行业稳健发展。

参考文献：

- [1] 倪苏杭, 刘丹丹. 长输天然气管道防腐层及阴极保护技术研究 [J]. 工业 A, 2025(01):2-7.
- [2] 胡彦华, 张兴水. 长输石油天然气管道的防腐技术分析 [J]. 工程技术, 2024(12):12-26.
- [3] 单庆伟. 长输天然气管道防腐层及阴极保护技术分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(08):128-129.
- [4] 杜冬冬, 穆俊, 朱蓓. 天然气长输管道内外腐蚀及防腐技术研讨 [J]. 工程技术, 2023(12):27.