

# 天然气输气管道的腐蚀及对策

徐 坤 (威海市天然气管网有限公司, 山东 威海 264200)

**摘要:** 天然气输气管道作为能源运输的重要载体, 其安全稳定运行关乎国计民生。然而, 管道腐蚀问题一直是制约天然气输送效率与安全的关键因素。腐蚀不仅会导致管道泄漏, 造成经济损失和环境污染, 还可能引发重大安全事故, 威胁人民生命财产安全。本文以天然气输气管道腐蚀为切入点, 系统分析了内部腐蚀和外部腐蚀的机理, 探讨了环境因素、管道材料与结构、输送介质性质等对腐蚀的影响, 总结了常规检测方法和智能检测技术在腐蚀检测中的应用, 并提出了合理选材与设计、加强施工质量控制、优化管道运行参数、采用阴极保护和涂敷防腐层等防腐蚀对策。本研究旨在为天然气输气管道的安全运行和腐蚀防控提供理论指导和实践参考。

**关键词:** 天然气输气管道; 腐蚀机理; 影响因素; 检测技术; 防腐蚀对策

## 0 引言

天然气作为一种清洁、高效的能源, 在全球能源结构中占据着越来越重要的地位。输气管道是天然气从产地输送到消费地的重要途径, 是连接天然气生产和消费的纽带。然而, 在长期的运行过程中, 输气管道不可避免地会受到腐蚀的侵蚀, 这不仅影响了管道的安全运行, 还可能导致天然气泄漏, 造成重大的经济损失和环境污染。因此, 研究天然气输气管道的腐蚀机理、影响因素以及相应的防腐蚀对策, 对于保障天然气输送的安全性、经济性和环保性具有重要意义。

## 1 天然气输气管道腐蚀机理

### 1.1 内部腐蚀机理

天然气输气管道内部腐蚀是管道失效的主要原因之一, 其腐蚀机理主要包括  $\text{CO}_2$  腐蚀、 $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀以及微生物腐蚀。天然气中的  $\text{CO}_2$  与水发生反应生成碳酸, 碳酸进一步电离产生氢离子, 导致管道内壁的 pH 值降低, 加速了管道的阳极溶解过程, 形成均匀或局部腐蚀<sup>[1]</sup>。

此外, 天然气中微量的  $\text{H}_2\text{S}$  也会引起管道内壁的腐蚀, 其腐蚀产物  $\text{FeS}$  在管道表面形成疏松多孔的沉积层, 导致管道的局部腐蚀加剧。微生物腐蚀则是由管道内部的硫酸盐还原菌等厌氧菌引起的, 这些细菌以管道钢材为基底, 厌氧呼吸产生  $\text{H}_2\text{S}$  等腐蚀性物质, 加速了管道的局部腐蚀过程。综上所述, 天然气输气管道内部腐蚀机理复杂多样, 需要从气体成分、微生物活性等多个角度进行分析和控制。

### 1.2 外部腐蚀机理

天然气输气管道的外部腐蚀机理主要包括土壤腐蚀、大气腐蚀和交流干扰腐蚀。埋地管道长期处于潮

湿的土壤环境中, 土壤中的水分、氧气以及各种离子会加速管道的电化学腐蚀过程。管道表面与土壤接触形成的原电池导致金属溶解, 土壤电阻率越低, 腐蚀电流越大, 腐蚀速度越快<sup>[2]</sup>。此外, 土壤中的微生物也会促进管道的微生物腐蚀。对于裸露在大气中的管道, 空气中的氧气和水分会导致管道表面产生电化学反应, 生成氧化膜或锈蚀产物。当管道跨越交流电力线路时, 感应电流会干扰管道的阴极保护系统, 破坏管道表面钝化膜的稳定性, 最终引发交流干扰腐蚀。

## 2 天然气输气管道腐蚀影响因素

### 2.1 环境因素

天然气输气管道的腐蚀过程是一个复杂的电化学反应, 其影响因素多样且相互交织。诸多环境因素中, 温度、pH 值、湿度以及各类污染物的存在对管道的腐蚀进程有着至关重要的影响<sup>[3]</sup>。温度的升高能够加快腐蚀反应的进行, 而低温环境虽然一定程度上延缓了反应速率, 但温度的骤降也可能引发管道收缩变形, 进而增大腐蚀的风险。土壤或者大气环境中的酸碱度直接关系到管道表面的电化学环境, 酸性条件易使金属发生阳极溶解, 碱性环境则可能导致钝化膜的破坏, 两者都将加速管道的腐蚀。湿度过高不仅为电化学反应提供了必要的水分, 还可能加剧微生物的繁殖, 而某些微生物的新陈代谢会产生腐蚀性物质。大气中的氯离子、硫化物等污染物会显著恶化管道表面的腐蚀环境, 它们或是参与了阴阳极反应, 或是破坏了钝化膜的稳定性, 最终导致了管道的加速腐蚀。

### 2.2 管道材料和结构

天然气输气管道的腐蚀过程是一个复杂的电化学反应, 其影响因素错综复杂, 其中管道自身的材料质

量与结构特点对腐蚀过程有着不容忽视的影响。管道钢材的化学成分、力学性能及金相组织的微观差异，都会导致管道局部电位发生变化，形成电偶腐蚀；同时钢材表面的缺陷、夹杂及残余应力等，亦可成为腐蚀的优先起点。焊接作为管道施工的重要工艺，其接头质量的优劣直接关系到管道的整体性能，焊缝区域往往容易产生气孔、裂纹、夹渣等缺陷，破坏了管道的完整性，为腐蚀提供了攻击通道。此外，管道壁厚作为抵抗腐蚀的屏障，对腐蚀的发展速率有着决定性的作用，管壁越薄，腐蚀穿孔所需时间越短，而过厚的管壁又会增加工程造价。因此，充分认识并控制管道材料和结构因素，对于提高输气管道的抗腐蚀性能、延长其服役寿命至关重要。

### 2.3 输送介质性质

天然气输气管道腐蚀的影响因素中，输送介质的性质扮演着至关重要的角色。天然气的化学组成、含水率以及在管道内的流速等特性，都对管道的腐蚀进程产生复杂而深远的影响。天然气成分的差异，尤其是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  含量的高低，会显著改变管道内部的腐蚀环境。较高浓度的酸性气体，会加剧管道内壁的化学腐蚀，导致局部位置的腐蚀速率远高于其他区域。此外，天然气中的水分含量也与管道腐蚀密切相关。输送过程中，水分与天然气中的酸性组分相互作用，形成具有强腐蚀性的电解质溶液，加速管道材料的损耗。同时，水分的存在还为微生物的生长提供了有利条件，促使管道内部形成难以控制的微生物腐蚀。除了成分和含水率外，天然气在管道内的流速也会对腐蚀过程产生调控作用。较高的流速虽然有助于减少水分和污染物在管壁上的沉积，但过高的流速则可能引发流体加速腐蚀，加剧管道局部位置的材料损伤，最终影响输气管道的安全运行。

## 3 天然气输气管道腐蚀检测技术

### 3.1 常规检测方法

#### 3.1.1 超声波检测

超声波检测技术是基于超声波在传播过程中与介质相互作用而产生的反射、衰减等现象，对管道腐蚀状况进行无损探测的方法。该技术操作简便、灵敏度高，能够有效识别管壁的厚度变化和缺陷位置，适用于各种材质的管道。通过分析超声回波信号的时间和幅度特征，可以准确评估管道的腐蚀程度和残余寿命。超声波检测设备便携轻巧，现场适应性强，已成为天然气输气管道腐蚀检测的常用手段之一。

#### 3.1.2 射线检测

射线检测利用 X 射线或  $\gamma$  射线等高能辐射穿透管道，根据射线强度的变化来判断管壁厚度和缺陷情况。与超声波检测相比，射线检测对管道内外壁的腐蚀都有较好的识别能力，尤其适合检测埋地管道等难以直接接触的部位。数字化射线成像技术的应用，进一步提高了射线检测的灵敏度和分辨率，能够清晰呈现管道腐蚀的形貌和尺寸。射线检测的不足之处在于射线源的辐射危害，需要严格的防护措施和操作规程。

#### 3.1.3 磁粉检测

磁粉检测是一种简单高效的无损检测方法，主要用于识别管道表面和近表面的腐蚀缺陷。通过在管道表面施加磁场，腐蚀区域会形成磁力线的畸变，吸附磁粉形成可见的指示痕迹。磁粉检测对细小的腐蚀点和微裂纹有很高的灵敏度，在现场操作方便快捷。但该方法仅限于铁磁性材料管道，对内壁腐蚀和埋地管道的检测能力有限。此外，管道表面需要除锈清洁，一定程度上影响了检测效率。磁粉检测常与其他检测手段配合使用，以提高腐蚀评估的准确性。

### 3.2 智能检测技术

#### 3.2.1 管道爬行器

管道爬行器是一种集机械、电子、控制等技术于一体的管道内检测设备，它能够在管道内自主运动，对管道内壁进行全方位的扫描和检测。这种设备通常配备有磁漏、涡流等传感器，能够精确地探测管道内部的腐蚀、裂纹等缺陷。管道爬行器的优点在于其灵活性强，能够适应不同管径和弯曲度的管道，检测范围广。同时，管道爬行器能够实时传输检测数据，便于及时分析和处理，大大提高了检测效率。管道爬行器技术的不断发展和完善，为天然气输气管道的腐蚀检测提供了一种高效、智能化的解决方案。

#### 3.2.2 分布式光纤传感

分布式光纤传感技术利用光纤作为传感器，通过测量光纤受到外界环境影响而产生的散射光信号，实现对管道沿线应变、温度等参数的连续监测。这种技术的突出优势在于其测量范围广、分辨率高、抗干扰能力强。通过在管道外壁沿轴向布设光纤传感器，可以实现对管道全线的实时监控，及时发现局部腐蚀、变形等问题。相较于传统的点式传感器，分布式光纤传感能够提供管道状态的全景式信息，有助于全面掌握管道健康状况。随着光纤传感技术的日趋成熟，其在天然气输气管道腐蚀检测领域的应用前景广阔，必

将成为保障管道安全运行的重要技术手段之一。

## 4 天然气输气管道防腐蚀对策

### 4.1 合理选材与设计

天然气输气管道防腐蚀的首要环节在于合理选材与设计。管道钢材的选择需要综合考虑管道所处的地理位置、环境条件、输送介质的特性等因素，选用机械性能优异、耐腐蚀性能良好的钢材至关重要。与此同时，在进行管道设计时，应当充分考虑管道的埋设深度、管壁厚度、焊接工艺等参数，尽可能减少应力集中、焊接缺陷等潜在的腐蚀隐患。此外，管道的内外防腐层设计也不容忽视，科学选择防腐涂料的种类和涂层厚度，确保防腐层与管道基体的良好附着力，才能有效隔绝腐蚀介质，延长管道的使用寿命。只有在选材和设计阶段充分考虑腐蚀因素，并采取针对性的防腐措施，才能从源头上降低管道腐蚀的风险，确保输气系统的安全稳定运行。

### 4.2 加强施工质量控制

施工质量控制在天然气输气管道的防腐蚀工作中举足轻重。严格遵循相关施工规范和标准，优选施工团队和监理单位，强化全过程质量管控势在必行。管道焊接作为施工的关键环节，需采用合格的焊接工艺和材料，严把焊工资质关，确保焊缝质量满足要求。防腐层施工应选用性能优异的防腐材料，合理控制涂层厚度，规范施工操作流程，避免因施工不当造成涂层缺陷。开展施工过程中的现场检验和无损检测，及时发现和处理质量隐患。完善施工质量责任制和奖惩机制，调动各方积极性，形成质量共治的良好局面。只有切实加强施工质量控制，才能从源头上防范管道腐蚀风险，确保输气管道的安全平稳运行。

### 4.3 优化管道运行参数

管道的压力、温度以及流速等运行参数，都会对管道的腐蚀行为产生显著影响。通过对管道输送压力的合理控制，可以有效减缓管道内部的湍流，从而降低湍流加剧腐蚀的风险；同时，适当降低输气温度，有助于抑制管道内的电化学腐蚀反应速率。此外，管道的流速也应严格控制在设计范围内，速度过高易引起流体的剪切作用和冲刷作用，加速管道的磨蚀和减薄，而速度过低则可能导致水和杂质在管道低洼处聚集，诱发局部腐蚀<sup>[4]</sup>。

### 4.4 采用阴极保护

阴极保护是天然气输气管道防腐蚀的有效手段之一。通过在管道外施加一层防腐涂层，并连接外加电

流或牺牲阳极，可以将管道电位降低至免疫区，从而抑制阳极溶解反应的发生<sup>[5]</sup>。在实际应用中，外加电流阴极保护常用于高耐蚀性要求的场合，如海底管道、潮汐区管道等；而牺牲阳极阴极保护则更适用于土壤电阻率较低的区域。不过，阴极保护的有效实施需要综合考虑管道材质、埋设环境、输送介质等诸多因素，并定期监测管道的极化电位、阴极电流密度等参数，以确保防腐效果达到最优。

### 4.5 涂敷防腐层

防腐层材料的选择需根据管道所处环境、输送介质特性及管道材质等因素综合考虑。常用的防腐层材料包括环氧涂料、聚乙烯、聚丙烯等高分子材料以及金属镀层等。防腐层的涂敷工艺也需严格控制，如表面处理、涂层厚度、涂敷条件等，以确保防腐层的致密性和连续性。同时，防腐层在施工和运行过程中可能出现破损或老化失效，因此需定期检测和维修，尤其是在管道受力集中或腐蚀风险较高的部位，如弯头、三通、法兰等。此外，防腐层与阴极保护等其他防腐措施相结合，能够形成更为完善的防腐蚀体系，有效延长管道的使用寿命，保障输气安全。

## 5 结束语

综上所述，天然气输气管道的腐蚀问题一直是困扰管道安全运行的重大挑战。深入研究天然气管道的腐蚀机理，准确把握影响腐蚀的关键因素，采用先进的检测技术，制定有针对性的防腐对策，对于保障天然气管道的安全、高效、长周期运行具有重要意义。今后，我们应加强基础研究，突破关键技术，完善管理体系，推动防腐技术与智能化、信息化深度融合，不断提升天然气管道的本质安全水平，为保障国家能源安全和推动经济社会可持续发展做出新的更大贡献。

### 参考文献：

- [1] 张明. 天然气管道腐蚀主要原因分析与防护措施 [J]. 化工管理, 2024, (10): 119-121.
- [2] 李耀龙, 唐慧, 郭都, 等. 输气管道腐蚀控制措施及评价 [J]. 天津化工, 2022, 36(06): 134-138.
- [3] 张赣润. 长输天然气管道腐蚀因素及防护措施 [J]. 石化技术, 2022, 29(10): 84-86.
- [4] 蔡明. 天然气管道输送过程中管道防腐的研究及防腐策略探析 [J]. 清洗世界, 2022, 38(08): 64-66.
- [5] 李婷. 天然气输送管道的腐蚀及对策 [J]. 科技与创新, 2022, (09): 117-118+122.