

# 天然气管道腐蚀的形成与防腐管理措施研究

王若琪 李 腾 裴志钢

(国家管网集团北京管道有限公司石家庄输油气分公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 天然气管道作为现代能源传输体系中不可或缺的重要基础设施, 其安全性和使用寿命直接关系到能源供应的稳定性和可靠性。然而, 天然气管道腐蚀问题长期以来一直是影响这一基础设施安全性和使用寿命的潜在性威胁。本文的目的在于探讨当前天然气管道腐蚀的形成原因, 并以此提出其防腐管理措施。文章从内部腐蚀和外部腐蚀两方面详细分析了天然气管道腐蚀的形成原因, 本文详细阐述了当前广泛应用的防腐技术, 包括传统的涂层防腐技术和阴极保护技术。本文还前瞻性地介绍了纳米涂层和智能防腐涂层等新型防腐技术的应用前景。同时探讨了纳米涂层和智能防腐涂层等新型防腐技术的应用。并基于此提出以初期建设和日常维护管理措施的实施, 来有效防止天然气管道腐蚀, 增强管道长期稳定运行能力。

**关键词:** 天然气管道; 腐蚀; 防腐管理; 清洁能源

## 0 引言

21世纪以来, 在追求“人类命运共同体”和“全球治理观”的新时代中, 全球能源结构面临着深度转型的迫切需求, 作为能源转型中具有广大前景的清洁能源—天然气, 面临的是如何以高效的利用实现能源的可持续发展。而随着全球对天然气需求的不断增长, 天然气管道运输作为这一能源的主要输送方式, 其安全性和可靠性受到越来越多的关注。现实使用中, 由于天然气管道长时间暴露在各种复杂的环境中, 管道腐蚀问题日益突出。这一问题的存在关系到能源的安全稳定输送, 也直接影响到公众的生命财产安全和环境保护。加强对天然气管道腐蚀的研究, 优化防腐技术和管理措施, 有助于延长管道的使用寿命, 降低维护成本, 减少安全隐患。

因此, 深入研究天然气管道的腐蚀机理及其防腐管理措施对于现代能源的发展中具有着重要的价值。而且此研究的成果也将为其他类型的管道防护提供参考, 对提升整个能源输送系统的安全性和可靠性都能够建立坚实的基础。

## 1 天然气管道腐蚀的形成原因

天然气管道是将天然气从开采地或处理工厂运输至城市配气中心或工、企、家用户的输气管道, 其具有运输成本低、占地少、运输量大且运输损耗小的优势, 但由于天然气管道一般铺设在地下且是一项长期的工程, 地下复杂的环境很容易使其受到腐蚀影响。当前天然气管道的腐蚀一般可归类为内部腐蚀和外部腐蚀两种, 见图1。

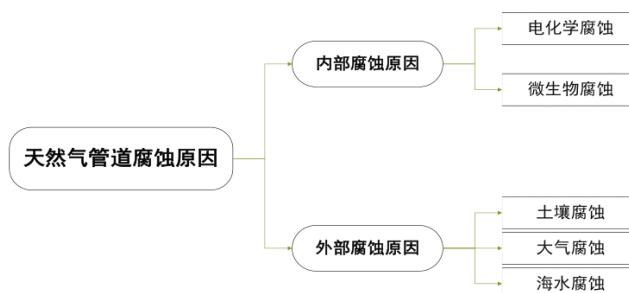


图1 天然气管道原因分析

### 1.1 内部腐蚀原因

①电化学腐蚀: 电化学腐蚀是天然气管道内部腐蚀的主要形式之一。天然气中所含有的硫化氢和二氧化碳等化学成本会在管道内壁与水分结合形成弱酸性溶液。这些溶液在电化学反应的条件下, 会对管道金属表面发生腐蚀。而硫化氢与管道金属发生反应, 生成硫化物沉积物, 二氧化碳溶于水形成碳酸, 将进一步加速金属的溶解和腐蚀; ②微生物腐蚀: 微生物腐蚀是由于微生物的活动而导致的腐蚀现象, 主要分为生物腐蚀和微生物产酸腐蚀。管道内部的微生物, 以硫酸盐还原菌为例, 其代谢活动所产生的硫化氢将进一步与管道金属发生反应, 导致腐蚀。而且微生物在管道表面形成的生物膜也会改变管道内部的局部环境, 使腐蚀更加复杂且严重。

### 1.2 外部腐蚀原因

①土壤腐蚀: 土壤腐蚀是当前埋地管道面临的主要腐蚀形式之一, 其在天然气管道的腐蚀情况中占据较大的比例。土壤中的如酸性物质、盐分和有机物等化学成分在长久的埋设中会与管道外壁发生反应, 导

致腐蚀。加之土壤湿度、温度和通气性等因素的促进作用，也会一定程度上增强腐蚀的速度和程度。而长期与腐蚀性土壤接触，管道的外壁在防腐层损坏的情况下，就会发生明显的腐蚀现象；②大气腐蚀：大气腐蚀是指管道暴露在大气环境中受到氧气、水分、硫化物、氯化物等物质的作用，导致管道表面发生腐蚀的过程。大气中的氧气和水分与管道表面形成电化学反应，导致金属表面氧化，逐渐侵蚀管道的强度和完整性，造成管道的泄露问题。此外，在当前的大气环境中，污染物和工业排放物等具有较强破坏性的工业产物也会加剧管道的腐蚀效果；③海水腐蚀：天然气管道的铺设有时无可避免的要于海洋中进行铺设，然而海水中含有高浓度的盐分、溶解氧和微生物，这些因素的共同作用同样也会在管道金属表面发生严重的电化学腐蚀和微生物腐蚀。海水的潮汐运动和海洋微生物的附着，就加速腐蚀的进程。使得海底管道特别容易受到海水腐蚀的影响。

## 2 天然气管道的防腐技术

### 2.1 涂层防腐技术

涂层防腐技术是目前最广泛应用于天然气管道防腐的一种方法，其原理在于在管道表面涂覆防腐材料，形成保护层，做到将管道金属与腐蚀介质的接触进行隔离，从其腐蚀原理上达到防腐的目的。该技术常用的涂层材料包括，见表 1 所示：

表 1 涂层防腐技术常用涂层材料类型

序号	材料类型	特性
1	环氧树脂 (Epoxy epoxide, EP)	具有优异的附着力和机械性能，耐化学腐蚀性能强，常用于管道内外壁防腐
2	聚乙烯 (Polyethylene, PE)	耐腐蚀性和耐磨性良好，应用广泛，特别适用于埋地管道的防腐
3	聚丙烯 (Polypropylene, PP)	耐热性和耐化学腐蚀性能优越，适用于高温高压环境下的管道防腐，但成本较高

涂层的应用过程主要包括四个步骤，即表面处理 - 底漆涂覆 - 主涂层涂覆 - 涂层固化。

在涂覆防腐涂层之前，必须对管道表面进行清洁和预处理，进行除锈、除油、打磨等处理工序，这些工序可以提高涂层与管道表面的良好结合性。在表面处理完成后，先涂覆一层底漆，增加涂层的附着力和防腐性能。底漆干燥后，开始涂覆主要的防腐涂层。根据需要，可能需要涂覆多层，这样可以保证涂层具

有足够的厚度和防护效果。涂层完成后，需要进行固化处理，使涂层完全干燥和硬化。然后，对涂层进行检查，检查标准为涂层均匀、无气泡、无裂纹。

### 2.2 阴极保护技术

阴极保护技术可以被归类为是电化学方法，其原理是利用电流将运输管道处于一种能够减缓腐蚀的被动状态，该保护技术包括两种类型，一种是牺牲阳极的阴极保护，另一种是外加电流的阴极保护。

其中牺牲阳极的阴极保护的原理在于将还原性较强的金属作为保护极，与被保护金属相连构成原电池。当牺牲阳极被氧化时，产生的电子通过外部电路流向受保护金属，使其成为阴极，从而减缓受保护金属的腐蚀速度。这样，牺牲阳极不断被腐蚀，而受保护金属得到保护。该方法不需要外部电源，特别适合土壤电阻率较低的区域、短距离管道或局部防护场合，其优点是系统简单、维护成本低，但需要定期更换消耗的阳极，且难以在较大规模上控制保护电流强度。而外加电流阴极保护则是由外部直流电源的阳极直接向被保护的管道施加阴极电流，不断提供电子，进而在管道表面富集电子，使管道发生阴极极化从而防止腐蚀的目的。在施加外部电源的条件下，施加合适的恒定电流，就能使管道表面保持在一个负电位，从而防止腐蚀在管道上发生。外加电流阴极保护系统相对复杂，需要稳定的电源和定期维护，但其保护效果稳定且适用范围广泛。

### 2.3 新型防腐技术

随着技术的不断进步，更多新型的防腐技术不断涌现，并逐渐在新铺设的天然气管道中应用，本文以纳米涂层和智能防腐涂层两个方法为例进行阐述。其中纳米涂层技术是近年来发展起来的一种新型防腐技术。该技术的主要技术核心在于其材料所具有的特殊物理化学性质，如高表面积、强附着力和优异的耐腐蚀性能，这使其在管道防腐中显示出了巨大的应用潜力。常用的纳米涂层材料包括纳米氧化铝、纳米二氧化硅和纳米钛等，这些材料能够在管道表面形成致密的保护层，有效阻止腐蚀介质的渗透。智能防腐涂层技术则是利用智能材料的自修复、自适应和自调节功能，在管道表面形成动态防护层。当涂层受到损伤或环境变化时，智能材料能够自动修复涂层或调整其防腐性能，给予管道的长期防护。这种技术在提高管道防腐效果、延长使用寿命和降低维护成本方面具有广阔的应用前景。

### 3 天然气管道防腐管理措施

#### 3.1 初期建设防腐措施

##### 3.1.1 选择抗腐蚀材料

在天然气管道的初期建设阶段，可以选择合适的抗腐蚀材料。这一阶段需要考虑的是环境条件、管道的使用寿命、施工成本等多种因素。其中高合金钢和耐腐蚀合金是当前常见的选择，它们的共性在于均具有优异的耐腐蚀性能，能够在高温高压环境下保持稳定。而且非金属材料如聚乙烯、聚氯乙烯和聚丙烯也被广泛应用于防腐蚀工程中。这些材料在具有耐腐蚀性强特性的同时，在化学介质中也能够表现出优异的稳定性，这使其特别适用于特殊环境下的管道防腐需求。而且选择材料时，还需考虑其与环境介质的相容性，要以材料在长期使用中不会发生不良反应为基准，从设计之初就进行合理的计划保障管道的长期稳定运行。

##### 3.1.2 表面处理和涂层保护

在管道安装前，为了增加防腐涂层的有效附着和耐久性，必须要进行严格且标准的表面处理。表面处理包括机械打磨、化学清洗和喷砂处理等工序。机械打磨去除管道表面的锈迹和污垢，提高涂层的附着力；化学清洗则利用化学药剂溶解金属表面的氧化物和油脂，进一步增强表面洁净度；喷砂处理利用高速砂粒打击金属表面，在表面形成适当的粗糙度，帮助涂层的附着强度。完成表面处理后，立即涂覆底漆，防止二次污染和氧化。底漆的主要作用是增加防腐涂层的附着力，提供初步防护。随后涂覆具有优异的耐化学腐蚀性能和机械强度的如环氧树脂、聚乙烯或聚丙烯等主要防腐涂层，增强防腐效果，且要确保涂层的厚度和均匀性，以最好的状态应对复杂多变的腐蚀环境。

#### 3.2 日常维护管理

##### 3.2.1 定期检查和维护

天然气管道的日常维护管理在保障管道的长期安全运行方面具有着关键性的价值，在科学的维护上，天然气管道的使用寿命能够得到大幅的提升。而其中所涉及的定期检查包括对管道外观进行视觉检查、涂层厚度测量和腐蚀监测等内容。视觉检查主要是以目视观察管道表面是否有涂层剥落、裂缝、气泡等缺陷，经过此过程将能够及时修复发现的问题。涂层厚度测量可以利用超声波测厚仪等专业仪器进行检测，涂层厚度符合设计要求是非常关键的部分，足够厚度的涂层能够防止腐蚀介质直接接触金属表面。而腐蚀的监测可以采用腐蚀探针、电化学监测仪等设备，这些设备能够做到实时监测管道的腐蚀速率和防腐效果。对

于定期检查和维护的频率而言，需要根据管道的运行环境、材料特性和历史数据来具体确定，一般建议每年进行一次全面检查。对于易受腐蚀的部位，管道接头、焊缝和支撑点等部位则应具有更高的检查频次和维护力度，强化对这些关键部位的防腐效果。

##### 3.2.2 清洗和防水防潮

管道表面的定期清洗可以去除管道表面附着的尘土、污垢和化学物质，防止这些杂质对防腐涂层的侵蚀。清洗方法一般包括高压水洗、化学清洗和机械清洗等，具体的使用要根据管道的实际情况选择合适的方法。对于埋地管道，特别是一些处于潮湿或地下水位较高区域的管道，应重点防止地下水和潮湿环境对防腐涂层的侵蚀。可以在管道周围设置排水系统，提高周围环境的干燥和通风效果。另外使用防水材料或添加防潮剂，也可以有效增强防腐涂层的防水性能。对于某些暴露在大气中的管道，需采取措施防止雨水、雪水和空气中的湿气对管道的影响，并且要加强对防水涂层完整性和防水效果的定期检查。

#### 4 结语

天然气作为一种清洁、高效的能源在当今时代的重要价值也是其运输管道的安全运行的重要性越发提高。虽然面对酸性环境、以及电化学腐蚀等问题，天然气管道尚未能够完全克服。但基于天然气管道腐蚀的腐蚀机理，现如今已有一些有效的防腐措施，初期建设过程中，可以选择合适的抗腐蚀材料和科学的表面处理方法，这可以提高管道的防腐效果。而在日常维护中，定期检查、清洗、防水防潮等措施的落实，也可以有效延缓管道的腐蚀过程，保障其长期安全运行。未来，随着技术的不断进步，更多新型防腐技术和管理方法也将被开发和应用。在持续的优化和改进防腐策略的基础上，天然气管道的安全性和可靠性将有效提高，为能源的稳定供应提供坚实保障。

#### 参考文献：

- [1] 周莹,叶嘉乐,于姗,等.“双碳”目标下天然气分布式能源发展现状及机遇[J].天然气工业,2024,44(2):23-29.
- [2] 赵良.天然气集输管道内腐蚀影响因素及防护措施研究[J].能源化工,2024,45(2):60-64.
- [3] 高芸,王蓓,胡迤丹,高钰杰,胡奥林.2023年中国天然气发展述评及2024年展望[J].天然气工业,2024,44(2):166-177.

#### 作者简介：

王若琪（1998-），女，汉族，河北石家庄人，硕士研究生，助理工程师，现主要从事管道管理工作。