

# 高含硫天然气长输管道腐蚀控制与耐蚀材料应用研究

刘鑫磊 王 宁 (国家石油天然气管网集团有限公司甘肃分公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**高含硫天然气在长距离输送过程中,其所含硫化氢( $H_2S$ )等成分对管道构成强腐蚀风险,威胁运行安全。为应对高温高压与复杂腐蚀介质条件,需采用系统化防护策略。本文围绕腐蚀机理分析,梳理阴极保护、涂层技术、腐蚀抑制剂等控制手段,重点探讨不锈钢、合金钢、复合材料等耐蚀材料的应用性能与适配场景,并引入智能监测机制以实现精准防控。研究发现,集成多元防护体系与材料优化路径,能显著提升管道使用寿命与输送安全性。

**关键词:**高含硫天然气;长输管道;腐蚀控制;耐蚀材料;应用研究

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)022-0073-03

## Research on Corrosion Control and Application of Corrosion-resistant Materials for Long-Distance Pipelines of High-Sulfur Natural Gas

Liu Xinlei, Wang Ning (Gansu Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Corporation Limited, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** During the long-distance transportation of high-sulfur natural gas, components such as hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) it contains pose a strong corrosion risk to the pipeline, threatening operational safety. To cope with high temperature, high pressure and complex corrosive medium conditions, systematic protection strategies need to be adopted. This article focuses on the analysis of corrosion mechanisms, sorts out control measures such as cathodic protection, coating technology, and corrosion inhibitors, and mainly discusses the application performance and suitable scenarios of corrosion-resistant materials such as stainless steel, alloy steel, and composite materials. It also introduces an intelligent monitoring mechanism to achieve precise prevention and control. Research has found that integrating multiple protection systems and material optimization paths can significantly enhance the service life of pipelines and the safety of transportation.

**Key words:** High-sulfur natural gas; Long-distance pipeline; Corrosion control; Corrosion-resistant materials; Applied research

高含硫天然气因其能源利用的高效性和环保优势,已成为全球能源供应的重要组成部分。然而,天然气在运输过程中,尤其是通过长输管道输送时,高含硫气体中的硫化氢( $H_2S$ )等化学成分对管道材料产生腐蚀,严重影响管道的稳定性与安全性。腐蚀问题不仅会增加管道的维护成本,还可能引发环境污染或安全事故。因此,研究有效的腐蚀控制技术和耐蚀材料显得尤为重要。传统的腐蚀防护措施如阴极保护和涂层技术在一定程度上能够减缓腐蚀,但面对高含硫环境的挑战,这些技术的效果有限。因此,开发和应用新型耐蚀材料及智能监控手段,成为了当前研究的重点。这些新技术的推广和应用,有望显著提升高含硫天然气长输管道的使用寿命和安全性。

### 1 腐蚀控制的基础理论与方法

#### 1.1 腐蚀机理

高含硫天然气中常含有硫化氢( $H_2S$ ),它是导致管道腐蚀的主要成分之一。硫化氢与管道材料(如碳钢、不锈钢等)反应时,会生成氢气和硫化铁等腐蚀产物。硫化氢的溶解度较高,能够加速这种腐蚀反应的发生,尤其在高温高压环境下更加明显。除了

硫化氢,天然气中还可能含有二氧化碳( $CO_2$ ),它通过形成碳酸与金属表面反应,破坏金属表面的钝化膜,导致金属腐蚀。二者往往同时作用,加剧管道的腐蚀损害。另外,高含硫天然气的运输环境中常常伴随应力腐蚀开裂(SCC),尤其是在高温高压条件下,管道材料在应力和腐蚀的双重作用下容易发生裂纹扩展,特别是在焊接部位和接头区域。微生物腐蚀也是一个不可忽视的因素,硫还原菌等微生物在高含硫环境中活跃,能够通过代谢产生硫化物,进一步加速腐蚀过程。

#### 1.2 腐蚀控制技术

为了防止腐蚀对高含硫天然气长输管道造成结构损伤和运行故障,必须采取系统化、科学化的腐蚀控制技术。由于该类管道通常运行于高压、高温、埋地或穿越复杂地质区域的环境中,同时面对硫化氢( $H_2S$ )、二氧化碳( $CO_2$ )等强腐蚀性介质的长期侵蚀,单一的防护手段往往难以满足实际需求。因此,当前工程实践中通常采用多种腐蚀控制技术协同应用的方式,主要包括阴极保护、涂层技术、腐蚀抑制剂注入以及智能化腐蚀监测系统。这些技术各具特点,

需根据运行环境、土壤特性、介质成分和经济条件进行合理配置与动态调整。在地势起伏明显或含硫地层突变区域，应优先采用管道避让、加设护套或局部材料加强等方式，在工程初期预防腐蚀风险扩散。此外，合理控制埋深、避免管道穿越低洼积水区，也能显著减缓电解质积聚对涂层和阴极保护系统的干扰，从源头优化腐蚀控制效果。

阴极保护技术是一种广泛应用于地下及水下金属结构的电化学腐蚀防护手段，其核心原理是将管道表面电位降低至腐蚀电流趋于最小，从而实现对金属基体的保护<sup>[1]</sup>。该技术分为牺牲阳极保护和外加电流保护两种基本形式。牺牲阳极保护通过布设电位更负的金属（如镁、锌、铝合金）与管道相连接，利用阳极自我溶解释放电子，维持管道阴极状态，从而达到腐蚀抑制目的。该方法结构简单、运行成本低，适用于电阻率中等或低的土壤环境，常见于中低压短输管道。外加电流保护则通过直流电源施加恒定外电流，使整个管道表面处于负电位状态，适合于土壤电阻率高或跨越区域广、流动电流不稳定的大型长输干线。该方法虽然初期建设成本较高，但保护范围广、调控灵活，特别适合高含硫气体长期输送系统。在实际工程中，常将两种阴极保护方式结合使用，以提高复杂场景下的腐蚀防护效率。为保证阴极保护系统的长期有效性，还应结合恒电位仪、测试桩、参比电极等设备进行状态监测与周期校验，防止过度保护或电流不足<sup>[2]</sup>。

天然气长输管道中一种常用的保护方法为防腐涂层，通过在金属表面形成隔绝层，阻断腐蚀介质与管体的直接接触，从而有效延缓电化学腐蚀过程。外涂层系统常用材料包括熔结环氧粉末（FBE）、聚乙烯（PE）、聚氨酯（PU）及三层复合结构涂层（3PE、3PP）等。其中，FBE涂层因其良好的耐化学性和热稳定性被广泛用于高温区段管道，3PE涂层则以其结构层次清晰、整体性能优越，成为现代长输管道防腐主流。该系统以FBE为底层，聚烯烃粘结层为中间过渡，最外层为高密度聚乙烯保护层，可兼顾电绝缘性、防水性与耐冲击性。对于管道内防腐，液体环氧涂料、环氧煤沥青及酚醛涂层等材料也有广泛应用。这类涂层不仅能抵御介质腐蚀，还可提升内壁光洁度，降低湍流阻力，间接提升输气效率。在涂层系统施工过程中，喷涂厚度均匀性、表面清洁度、固化程度及施工环境温湿条件均对最终防腐性能产生直接影响，因此需配置专业施工队伍及现场质量控制流程，确保防护效果达到设计标准<sup>[3]</sup>。

腐蚀抑制剂的使用是一种在输送系统内部常用的化学防腐技术，尤其适用于管道已投入运行、难以进

行大范围改造的场景。其主要原理是在介质中引入具有高吸附性和钝化能力的化学分子，这些抑制剂可在金属表面形成保护膜，减少H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>等腐蚀性组分与金属的直接反应，降低腐蚀速率。当前高含硫环境中常用的抑制剂包括有机胺类、钼酸盐、磷酸盐、硅酸盐等多种类型，需根据管道介质组分、温压条件与流速特性进行选型匹配。腐蚀抑制剂的有效性不仅取决于其分子结构，还需配套建设精确的动态注入系统，通过连续监测系统中压力、流量及pH值等指标，实时调整制剂浓度，避免因过量投加带来二次污染或沉积堵塞风险。在大型输气工程中，腐蚀抑制剂系统还应结合SCADA系统实现集中控制与远程报警机制，提升运行效率与应急响应能力。

智能传感器监测技术是近年来在管道完整性管理中迅速发展的高精度腐蚀监测手段。其通过部署多类型传感器（如电阻式、电化学式、超声波式等）于管道高风险部位，实时采集金属腐蚀速率、电位变化、湿度、温度、压力、气体成分等多维数据，并通过无线或光纤方式传送至数据分析平台。通过算法分析和趋势建模，技术人员可在腐蚀初发阶段实现预警，及时调整管道运行参数或防护策略，避免事故扩大。

### 1.3 耐蚀材料的选择

耐蚀材料的选择是腐蚀控制中的重要环节。常见的耐蚀材料包括不锈钢、合金钢以及复合材料。不锈钢具有优异的耐腐蚀性能，尤其在含有硫化氢和二氧化硫的环境下，能够有效抵抗腐蚀。因此，不锈钢管道在高含硫天然气的输送过程中表现出较好的耐久性。合金钢材料通过与其他元素（如铬、镍、钼等）合金化，提升了钢材的耐腐蚀性，特别是在高温高压环境下，合金钢能够提供较强的抗腐蚀性能，常用于长输管道中。技术人员对油气储运管道进行施工时若选择的材料质量较差，防腐性能不佳，会加快管道腐蚀速度，加大管道腐蚀的严重程度。

## 2 耐蚀材料在长输管道中的应用

### 2.1 耐蚀钢材料

耐蚀钢材料因其兼具良好的结构强度和抗介质腐蚀能力，常作为天然气主干输送管线的首选材料。不锈钢是最常用的耐蚀钢之一，尤其适用于硫化氢浓度较高的环境。其抗蚀原理在于其表层能形成一层稳定的钝化膜，阻断腐蚀性气体与金属本体接触，从而延缓腐蚀速率。304型不锈钢广泛应用于一般工况环境，而316型不锈钢因其含钼量较高，在抵御点蚀、缝隙腐蚀、氯离子腐蚀方面表现更为优越，特别适用于沿海地区、高盐地层及硫化氢含量偏高的输气系统<sup>[4]</sup>。近年来，随着高强度钢研发的不断推进，X70、X80、

X100等高钢级合金钢也被广泛用于大口径、超长距离输气工程。这些钢材通过添加铬、镍、钼、钒等合金元素，赋予其更强的抗氢脆性、耐应力腐蚀开裂和抗高压性能，满足复杂地形和特殊气体条件下的运行要求。部分工程还配合采用热处理（如调质处理）、表面激光熔覆、渗硅处理等强化技术，有效提升其微观结构的均匀性和界面稳定性，增强其在极端环境下的服役适应性。此外，针对沿线环境差异明显的长输管道，部分项目还采用分区用材策略，在易腐蚀段、特殊地段或交叉复杂区域使用高等级不锈钢与合金钢，其余段则以成本较低的高强度碳钢为主，通过整体优化管道材料布设，兼顾防护效果与经济效率。在某些极端条件下，如海底管道或含酸性水的交汇段，还会通过内衬双相不锈钢或复合钢板进一步提升结构耐蚀能力，体现出复合设计理念的优势。

## 2.2 耐蚀涂层的应用

防腐涂层是油气管道最经济且普适性最强的表面防护技术之一，其核心功能是提供隔离作用，阻止外部腐蚀介质（如水分、氧气、Cl<sup>-</sup>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S等）渗透到金属表面，防止电化学反应的发生。在外防腐体系中，熔结环氧粉末（FBE）以其成膜致密性、耐高温及耐化学腐蚀性能成为主流涂层选项。FBE通过静电喷涂工艺施加于管道外壁，快速固化形成坚硬、无缝的防护层，尤其适用于高温埋地管线或穿越高腐蚀性区域。三层结构聚乙烯（3PE）涂层结合了FBE底层的附着力、热塑粘结层的延展性及聚乙烯外护层的机械强度，为长输管道提供了优异的整体防护性能<sup>[5]</sup>。此外，在管道内防腐方面，液体环氧涂料、环氧煤沥青涂层等也被广泛应用，其作用不仅在于防腐，还可优化内壁光滑度，降低输气摩阻，提高系统输送效率。近年来，在复杂地质区段及高寒环境中，新型涂层如纳米涂层、自修复型涂层等也逐渐进入工程应用视野。这些涂层通过引入高分子改性物质或微胶囊技术，实现了涂层微裂纹自愈、吸附屏障层再生等功能，显著提升了涂层的服役稳定性。施工过程中，应同步进行无损检测、剥离测试与现场补涂工艺，保障涂层连续性和覆盖密实性。针对管道穿越部位、焊接接头、支架固定点等易受力失效区域，还需采用涂层加强带、机械保护层等形式进行局部加固，确保整个系统的完整封闭性和长期可靠性。

## 2.3 复合材料的应用

复合材料的出现为传统防腐体系提供了更加多元化的解决方案，特别是在腐蚀极端、高负荷不规则地段，其优势愈发明显。碳纤维增强复合材料（CFRP）因其高模量、高强度、耐疲劳和耐化学腐蚀特性，被

广泛用于压力容器、管道补强和结构加固等场景。其高比强度特性使其在不增加管道直径或重量的前提下，有效提升了整体结构强度和耐久性。玻璃纤维增强复合材料（GFRP）则因其材料成本较低、成型工艺成熟，在耐盐碱性、抗渗透性方面优势突出，特别适用于土壤腐蚀性较强或盐渍地带地下输送工程<sup>[6]</sup>。此外，针对天然气输送的特殊工况需求，复合材料可通过树脂基体的个性化选择（如环氧树脂、乙烯基酯树脂等）与增强纤维的协同设计，实现耐高温、耐高压或耐特定气体腐蚀性能的定向强化。随着行业标准的不断完善，复合材料在油气输送中的应用边界也在不断拓展。例如，一些新型柔性复合管不仅具备抗内压能力，还能够适应地质形变和沉降差异，特别适合地质灾害易发区、边远山区等难以开展大修的场景。同时，配套的快速连接结构、耐压密封圈与复合管支撑装置也在逐步研发中，为其在大规模应用中提供了坚实的技术保障。在特殊场景下，如高原缺氧、沙漠高热或冻土区施工，复合材料还展现出良好的施工适应性和运输便利性，尤其适合野外难接入电源或机械设备的区域工程。这些优势正在推动其从辅助结构向主输管材的转型应用。

## 3 结语

在高含硫天然气长输管道系统中，腐蚀控制不仅关乎运行安全，更体现着全生命周期管理的系统性与前瞻性。随着材料技术与智能监测手段的持续进步，防腐已从单一应对转向多策略协同与动态调控。要实现更高水平的防护效果，需统筹材料选型、结构优化与实时监控，构建高效、经济、可持续的防护体系。未来，防腐理念将更加智能化与绿色化，助力天然气输送系统向更高安全性与可持续性目标迈进。

## 参考文献：

- [1] 张昆宇.长输天然气管道腐蚀的形成与防腐保护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(01):31-33.
- [2] 贾正东.天然气管道腐蚀控制措施研究[J].山西化工,2024,44(11):191-192+199.
- [3] 韩超,王路远.油气储运中长输天然气管道防腐工艺研究[J].化学工程与装备,2024(07):37-40.
- [4] 安志强.基于天然气长输管道的防腐与防护策略分析[J].石化技术,2023,30(12):91-93.
- [5] 薛吉明,戴联双,张安妮,等.含CO<sub>2</sub>湿天然气长输管道内腐蚀原因及其防控措施[J].腐蚀与防护,2023,44(09):113-117.
- [6] 苏志丽,栾保华.天然气集输管道内腐蚀特点及防腐措施研究[J].当代化工,2023,52(07):1544-1548+1553.