

# 燃气长输管道运行中的应力腐蚀开裂问题及控制措施研究

张 腾（潍坊滨海金捷能源技术开发有限公司，山东 潍坊 261200）

辛 凯（山东嘉航燃气能源有限公司，山东 潍坊 261200）

**摘要：**本文围绕燃气长输管道运行中应力腐蚀开裂问题展开研究，分析了应力腐蚀开裂的形成机理、影响因素以及典型破坏形式。环境介质的腐蚀性、管材的选择与加工质量、以及燃气长输管道运行工况等因素是引发应力腐蚀开裂的关键原因。针对燃气长输管道运行中的应力腐蚀开裂问题，本文提出了多层次的控制与预防措施，包括耐腐蚀材料的选择、残余应力控制工艺的优化以及运行压力的科学管理，此外，还探讨了先进检测与监测技术在燃气长输管道运行中应力腐蚀开裂早期识别中的应用效果。通过本文的研究，可以为燃气长输管道的安全运行提供系统的技术方案与创新策略，从而助力我国能源输送网络的安全保障与绿色发展。

**关键词：**燃气长输管道运行；应力腐蚀开裂问题；控制措施

## 0 引言

燃气长输管道是能源运输网络的核心组成部分，为各类生产生活提供了稳定的能源供给。随着工业化和城市化的快速发展，长距离、高压力输气管道的应用需求不断增加。然而，由于其长期暴露在复杂的运行环境中，管道结构的安全性面临诸多挑战。其中，应力腐蚀开裂已成为威胁燃气长输管道完整性和安全性的关键问题之一。因此，对应力腐蚀开裂的形成机理、影响因素及控制措施进行深入研究，不仅有助于提升燃气管道的安全运行水平，也能为能源基础设施的高效运营提供技术支撑，具有重要的理论价值与工程实践意义。

## 1 燃气长输管道应力腐蚀开裂的机理分析

### 1.1 燃气长输管道应力腐蚀开裂的定义与特征

燃气长输管道在长期使用过程中，在特殊的腐蚀介质及拉应力等因素的影响下，产生的一种破坏形式。这些损伤以细小裂纹的出现、发展为特征，最后引起了材料的断裂。

燃气长输管道使用过程中，应力腐蚀开裂的形成需要腐蚀环境和拉应力的存在两个必要条件，二者相互影响，既可发生简单的腐蚀破坏，也可诱发裂纹的快速发展。燃气长输管道的应力腐蚀开裂多表现为在材料表面产生极小的裂纹，早期不易察觉，随后迅速扩散，导致突发破坏，隐患很大。在燃气长输管道中，应力腐蚀开裂一般仅在特殊的金属材料与特定介质组合下发生，比如，碳钢在高碳酸盐岩中会出现应力腐蚀开裂，而不锈钢在含氯环境中会出现应力腐蚀裂纹。燃气长输管道应力腐蚀开裂是由钝化膜破裂、电化学

反应、应力集中和裂纹尖端腐蚀等多个环节共同引起的，是一个典型的多因素协同破坏过程。

### 1.2 燃气长输管道应力腐蚀开裂的形成条件

在外界环境方面，燃气长输管道的高湿环境为长输管道的腐蚀液膜创造了有利的条件，液膜介质中的腐蚀性离子可加快管道内部的钝化膜损伤，从而促使管道的应力腐蚀开裂。研究表明，在一定条件下，不同的温度对合金的应力腐蚀行为有不同程度的影响。但在一定的条件下，材料的应力腐蚀存在一个临界温度范围，当其超出或小于这个区间时，材料的腐蚀灵敏度就会下降。在介质成分中，氯离子、碳酸根离子等腐蚀性离子对各种金属都有很大的腐蚀性，pH太高或太低都会增加应力腐蚀。

在燃气长输管道中的材料晶粒分布、晶界性质等因素对其应力腐蚀开裂的敏感程度有着重要的作用，比如晶粒尺寸较小且分布均一的合金，其耐蚀性能往往会有所提高。合金元素的含量和杂质含量和金属表面氧化膜的质量都会对金属的抗腐蚀能力有一定的影响。焊接和热处理等处理过程会在合金中产生残余应力或使其内部组织结构发生变化，从而增大了开裂的产生几率。就燃气长输管道的应力状况来看，其主要包括管道运行压力、地质变形、安装误差等因素造成的机械载荷和焊接、冷加工等工序所造成的内应力。此外，管道表面缺陷和不连续焊缝造成的高应力区常常是应力腐蚀裂纹萌生点。

### 1.3 燃气长输管道运行中的开裂形式与破坏机理分析

晶间开裂是燃气长输管道裂纹沿金属材料晶界扩展的一种开裂形式，其主要破坏机理包括晶界区域的

元素偏析、晶界脆性相的析出以及晶界区域的腐蚀加剧。其裂纹路径不规则，沿晶界延伸，其成因是燃气长输管道材料组织不均匀、杂质富集、热处理不当等会导致晶间区域的脆化现象。穿晶开裂是燃气长输管道裂纹穿过晶粒内部扩展的破坏形式，其形成机制包括金属内部微观结构的断裂、腐蚀反应诱导以及应力集中作用。其裂纹路径较为平直，直接穿越晶粒，高应力、腐蚀介质的侵蚀及材料脆性缺陷等因素促进了燃气长输管道裂纹的直接扩展。

燃气长输管道中环向裂纹沿管道周向分布，与管道轴线垂直，其原因是纵向应力和应力腐蚀。在燃气长输管道中，由于裂纹的存在，会造成局部的强度下降，从而引起截面的不稳定甚至断裂。在燃气长输管道中，纵向裂纹沿管道轴线扩展。这是由环向应力与腐蚀因素联合引起的。一般情况下，纵向裂纹较大，蔓延迅速，易于发生大面积泄漏。

## 2 燃气长输管道应力腐蚀开裂的控制与预防措施

### 2.1 耐腐蚀高强度材料的应用

低合金钢是在普通碳钢中加入微量元素如钒、钛等进行强化，以提升其综合性能，这些微量元素能够通过细化晶粒、析出强化等机制有效改善材料的力学性能及耐腐蚀性。钒、钛、铌等微量元素的作用形成碳化物和氮化物，可以显著提高材料的强度与抗裂性。铬、镍等元素的作用增强了低合金钢的耐腐蚀性能，特别是在潮湿环境或含酸介质条件下。为了减少低合金钢在大气中的腐蚀，采用涂层技术是一种常用和有效的方法。该涂料具有良好的抗化学腐蚀性能，适用于燃气长输管道，适用于潮湿、强酸、强碱性的燃气长输管道。该涂料具有良好的耐磨损和耐候性能，适合于长时间暴露的输气长输地上管道。

不锈钢由于含有较高比例的铬，能够在表面形成一层致密的钝化膜，显著提高材料的抗腐蚀能力。奥氏体不锈钢，如304、316型，抗腐蚀性能优异，适用于燃气长输管道高腐蚀性环境。双相不锈钢兼具奥氏体和铁素体不锈钢的特性，表现出优异的机械强度和抗应力腐蚀性能。由于其双相组织结构，能够有效抑制燃气长输管道裂纹的扩展，适合高压环境下的燃气长输管道关键部件。

复合材料是指将两个或两个以上不同特性的材料结合在一起，使其发挥重量轻、强度高、抗腐蚀等优点。玻璃纤维、碳纤维等纤维增复合材料，其优良的抗腐蚀性及机械强度，是一种理想的新型材料。以环氧基复合材料为代表的聚合物基复合材料具有优异的耐磨

损、耐环境腐蚀等性能。采用复合材料技术，在燃气长输管道中，例如弯头、接头等高应力部位，提高局部抗裂能力。

### 2.2 燃气长输管道运行中的应力控制措施

#### 2.2.1 降低残余应力技术

在燃气长输管道焊接后，通过热处理工艺，如退火和正火，消除焊接过程中产生的残余应力，进而降低燃气长输管道应力腐蚀开裂的风险。退火通过高温加热并缓慢冷却，使金属晶粒得到再结晶，降低燃气长输管道材料内部的残余应力，改善其塑性和韧性。正火通过加热到一定温度后快速冷却，获得更加均匀的组织结构，减少燃气长输管道材料内的非均匀应力分布。热处理工艺能显著改善材料的整体力学性能，提高抗裂能力和耐腐蚀性，适用于燃气长输管道高强度材料和焊接接头区域，特别是在高温、高压运行的燃气管道中。

在燃气长输管道中，焊缝是产生残留应力的重要因素。通过对焊接过程进行合理的设计，可以降低焊缝表面的应力集中和残余应力。采用多道、多层次焊接方法解决了燃气长输管道焊接过程中由于单道焊接温差较大引起的应力集中问题，降低了焊缝的残余应力。采用高精密自动焊工艺，实现了对焊缝内部温度分布和焊缝速度的准确控制，降低了由于人为造成的应力波动。为保证燃气长输管道焊缝部位的温度场均匀化，消除了焊缝的应力集中，采用了局部加热方法。在大直径燃气长输管道上，利用多道焊缝自动焊和多道焊接工艺可以有效地降低焊缝的残余应力，从而使管道的耐腐蚀性能得到明显改善。

#### 2.2.2 运行压力控制策略

燃气长输管道在运行过程中，如果承受大幅度的压力波动，会导致材料的疲劳累积，进而增加裂纹的产生与扩展的风险。通过精确控制设备启停时间与运行模式，减少瞬时的压力波动。通过调节压缩设备的工作状态，保持燃气长输管道内压力平稳变化，避免过度的波动。

在燃气长输管道段和弯头等应力较大的部位，设置压力缓冲器，可以有效地减小瞬时荷载对管道的影响。气压缓冲装置是一种以空气或气体为缓冲介质，以降低管道内液体的压力变化，使管道中的压力波动趋于平缓。利用液体的不可压缩性质，对管道内的压力波动进行了缓冲，降低了波动的振幅。在城市燃气长输管网中，利用压力缓冲装置可以减少快速开关阀门时的水击，防止对管道带来不应有的压力冲击。

在燃气长输管道的运行过程中，通过安装动态压力调控系统可以实现压力的实时监测与调节，保持管道内压力的均衡运行。安装高精度压力传感器与自动调节阀，可以确保燃气长输管道内压力始终处于设定的安全范围内，避免高压区间。通过布设多点压力传感器，实时收集数据并反馈给中央控制系统，自动调节运行参数，保证燃气长输管道运行的稳定性。

## 2.3 监测与维护技术

### 2.3.1 燃气长输管道智能监测系统的布局与应用

在燃气长输管道的关键位置，如弯头、接头、焊接区域、压力波动较大的管段等，布设多种类型的传感器节点，实时采集管道的运行数据。声发射传感器用于监测燃气长输管道内部裂纹的产生和扩展，裂纹或破坏的形成会释放声波信号，声发射传感器可以实时捕捉到这些信号，帮助早期发现潜在的裂纹问题。温湿度传感器监测燃气长输管道周围环境的温湿度变化，尤其是在湿度较高或温度极端的环境中，有助于识别导致腐蚀的环境因素。应变传感器用于实时检测燃气长输管道的变形和应力分布，尤其是管道运行时受到的外力或内力变化，能够及时反映管道是否处于超负荷或应力集中状态。在燃气长输管道中通过合理选择传感器的位置，并通过无线传输网络将数据实时反馈至监控中心。

利用云平台对其进行大数据的处理与储存，以达到对燃气长输管道运行状况的全天候监控。利用大数据与人工智能等技术，对管道运行过程中的监控数据做出发展趋势预报，并对管道内部存在的腐蚀、裂纹等隐患进行判定，并提出相应的预警，防止重大事件的产生。

### 2.3.2 燃气长输管道定期检测与预防性维护

超声波检测技术通过发射超声波并分析反射回波的信号，能够精准地识别燃气长输管道内部的裂纹、气孔及其他缺陷。其优势是可以高效识别燃气长输管道运行中裂纹的具体位置和深度，适用于厚壁管道的检测。该检测技术常用于定期检查管道焊接接头、弯头等易发生裂纹的部位。漏磁检测通过将磁场引入燃气长输管道并检测磁场的泄漏变化，从而识别管道内部的裂纹、腐蚀点或其他缺陷。其适用于大范围快速筛查铁磁性材料中的缺陷，尤其适用于大直径燃气长输管道的全面检查。

通过分析天然气长输管道的运行环境，结合以往的检测数据和管道的使用时间，确定了一个较为合理的检修周期。针对燃气长输管道的特点，结合现场实

际情况，制订维修方案，对有强烈腐蚀或高压变化的地区，加大维修频率，以保证燃气长输管道的安全稳定。通过对燃气长输管道检测数据和历史维修记录的分析，对可能发生危险的管道进行危险评估，并对其进行重点治理。在燃气长输管道中，对已出现腐蚀和裂缝的部位进行了材料升级和部分替换。对强腐蚀部位，可选用双相不锈钢或镍基合金等耐蚀材料，并对其进行部分替换，以改善其防腐性能。在燃气长输管道中，易发生力学应力与腐蚀综合影响的部位，可以采取外封闭结构或加装防护涂层等方法来提高其使用寿命。根据腐蚀速度，压力波动等影响，对长距离天然气管道进行经常性的检测，并在必要时对其进行部分更换。

## 3 结论

综上所述，燃气长输管道在长期运行过程中，受到内外部因素的共同作用，特别是应力腐蚀开裂对管道的安全性构成了重大威胁。应力腐蚀开裂的发生受多种因素的影响，包括管道材料的选择、外部环境条件、管道内应力状态等。通过合理的材料选择、优化的焊接工艺以及应力控制措施，可以显著降低应力腐蚀开裂的发生几率，并增强管道的耐久性。同时，智能监测系统在燃气长输管道安全管理中的应用展现出巨大的潜力。通过传感器网络与物联网技术，实时采集并分析管道运行数据，可以提前识别出应力腐蚀开裂的早期征兆，实现早期预警与预防性维护。这种动态监测与反馈机制大大提升了管道管理的智能化水平和预防性效果。

## 参考文献：

- [1] 于芳蕾,吉彦彬.长输燃气管道的防腐控制技术研究[J].山东化工,2023,52(15):167-169.
- [2] 郭安娜.天然气长输管道的腐蚀与防护措施[J].化工设计通讯,2023,49(07):148-150.
- [3] 黎志昌.长输燃气管道的防腐控制技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(16):37-38.
- [4] 江永强.天然气长输管道防腐及运输风险防控措施[J].化工设计通讯,2021,47(05):42-43.
- [5] 刘冬.长输燃气管道的防腐控制技术探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(21):186-188.
- [6] 刘玉杰,王楷,马雨廷.长输天然气燃气管道泄漏的主要原因及防范措施[J].化工管理,2020,(25):107-108.
- [7] 赵忠旺.天然气长输管道阴极保护防腐技术的应用[J].化工设计通讯,2019,45(12):134+145.