

油气储运中管道的防腐问题研究

李家宁 王舒扬（中国石油工程建设有限公司北京分公司，北京 100085）

摘要：在油气储运过程中，管道腐蚀问题对管道安全、运输效率和运营成本产生重大影响。本文详细介绍管道材料的特性和腐蚀行为，探讨影响管道腐蚀的环境、材料、操作和维护以及设计和施工等因素。同时提出针对这些因素的防腐对策，包括防腐材料的选择、防腐技术的应用、防腐保护措施、管道设计的优化以及定期检测和维护。最后展望未来防腐策略和方向，尤其是创新防腐技术的发展和规范化、标准化的推进。

关键词：油气储运；管道腐蚀；防腐蚀策略；管道材料；防腐技术

0 引言

油气储运过程中的管道腐蚀问题一直是业界关注的焦点。由于管道在复杂且多变的环境条件下工作，受到各种物理、化学、生物等因素的影响，管道腐蚀问题层出不穷。管道腐蚀不仅威胁到管道的安全运行，降低运输效率，而且可能导致环境污染，并增加运营成本。因此，研究和解决管道腐蚀问题，以延长管道使用寿命，减少维护成本，保障安全和环保，具有重要的实际意义。

本文就管道材料与腐蚀行为、影响管道腐蚀的因素以及防腐蚀对策进行深入研究，并对未来防腐蚀策略及展望做出预测和探讨。

1 管道材料与腐蚀行为

1.1 常用管道材料的特性

在油气储运系统中，广泛使用的管道材料包括碳钢、不锈钢和复合材料。碳钢的机械性能优秀且成本低廉，使其成为最常见的管道材料，然而碳钢对氧化腐蚀和酸性物质的抵抗力较弱，需要辅以防腐措施^[1]。不锈钢拥有出色的耐腐蚀性和机械性能，是优质的油气储运管道材料，其耐腐蚀性主要归功于表面形成的钝化膜。然而不锈钢的成本相比碳钢较高，并且在特定环境下可能出现应力腐蚀开裂现象，复合材料，如玻璃钢、塑料等，作为新型材料在油气管道中的应用越来越广泛，其拥有良好的耐腐蚀性和相对较低的成本，但机械性能较差，更适合于中低压油气管道。

1.2 不同材料的腐蚀行为

在特定环境下不同的管道材料表现出各自独特的腐蚀行为，碳钢的腐蚀行为主要为均匀腐蚀和点蚀，均匀腐蚀会导致金属表面均匀减薄，而点蚀会在局部区域形成穿孔。另外碳钢在特定条件下还可能出现应力腐蚀和氢脆，不锈钢的腐蚀行为主要为点蚀和应力腐蚀开裂，尽管其耐腐蚀性能良好，但在含氯离子的

环境中可能出现点蚀。

在应力和腐蚀介质共同作用下，可能会出现应力腐蚀开裂，复合材料的腐蚀行为主要为氧化腐蚀和光降解，长期暴露于环境中可能出现氧化腐蚀，导致材料性能降低。在紫外线照射下，可能会出现光降解，导致材料机械性能降低，理解各种材料的腐蚀行为，以及它们的产生条件，对于选择合适的防腐措施具有重要指导作用。

2 油气储运中管道腐蚀的影响因素

2.1 环境因素

环境因素对管道腐蚀行为的影响极其重要，土壤类型、温度、湿度、土壤电导率、pH 值、含氧量以及微生物活性都对管道腐蚀的形式和速度产生深远影响。

首先土壤类型直接影响其湿度和电导率，从而影响对管道的腐蚀性，粘质土壤因含水量高、导电性强，其腐蚀性强于砂质土壤。其次环境温度和湿度对腐蚀反应的速率产生直接影响，高温和湿度通常会加速腐蚀反应。此外 pH 值决定了腐蚀介质的活性，低 pH 值的酸性环境更可能加速腐蚀反应，含氧量也是关键因素，因为大多数腐蚀反应都需要氧的参与。最后土壤中的微生物活性可以引发微生物腐蚀，这是一种常见而且严重的腐蚀形式，因为微生物能产生各种腐蚀介质，如硫酸盐、硫酸、硫化氢等。

2.2 材料因素

不同的管道材料有不同的化学成分、晶粒结构、硬度、韧性和电化学性质，这些性质决定了材料对特定腐蚀介质的抵抗力，例如碳钢因其较低的抗腐蚀性，经常会在含硫环境中发生硫化物腐蚀，而不锈钢的抗腐蚀性则强得多。此外钛合金和铝合金对于海水等含氯环境具有较高的耐腐蚀性，材料的晶粒结构也对腐蚀有影响，细小的晶粒能提高材料的硬度和韧性，从

而提高抗腐蚀性。同时硬度高的材料能抵抗腐蚀产生的应力，而韧性好的材料能够承受腐蚀产生的疲劳^[2]。

2.3 操作和维护因素

操作和维护因素对管道腐蚀的影响也非常显著，运行条件，如工作压力、流速、流体性质等，都会影响腐蚀速度和类型。例如高压和高速流动可以加速腐蚀，而油气中的硫化氢和二氧化碳会引发酸性腐蚀，设备的维护程度，如防腐涂层的完整性、阴极保护的实施情况、检测和维护的频率等，都是影响管道腐蚀的重要因素。防腐涂层的破损或剥落会使管道材料直接暴露在腐蚀环境中，而不完善的阴极保护可能导致保护电流不足，无法阻止腐蚀的发生。

2.4 设计和施工因素

设计和施工因素是影响管道腐蚀的重要方面，优秀的设计包括选用适当的材料、实施有效的防腐措施、做好结构设计等，这些都能直接提高管道的耐腐蚀性能。在施工过程中，焊接、弯曲等操作可能会引发应力腐蚀和腐蚀疲劳。焊缝是腐蚀的重点关注区域，因为焊接过程会改变材料的微观结构和性质，降低抗腐蚀性。弯曲操作也可能在材料中产生内应力，增加腐蚀的可能性。此外，施工过程中的机械损伤也可能导致防腐涂层的破损，增加腐蚀的风险。

3 管道防腐蚀的对策

在面对管道腐蚀问题时，一套综合的防腐对策是必要的，包括防腐材料的选择、防腐技术的应用、防腐保护措施、管道设计的优化以及定期检测和维护，每一项措施都是构成整体防腐系统的关键环节，它们共同合作，形成了对管道的全方位保护。

3.1 防腐材料的选择

防腐材料的选择是基于各种因素的综合考虑，包括管道所处的环境、运输介质、温度和压力等，材料的选择必须基于这些条件，以确定最佳的防腐材料。如对于海底或湿度较高的地下环境，通常选择耐海水腐蚀的材料，如钛合金或超级不锈钢。而对于含硫或含碱性物质的环境，可以选择耐硫化或耐碱腐蚀的特种钢材。除了管道本身的材料，防腐涂层和包覆层的材料也极为重要，涂层材料通常包括环氧树脂、聚乙烯、聚丙烯等，包覆层通常采用玻璃纤维、石墨、橡胶等。这些材料能有效阻隔腐蚀介质对管道材料的直接侵蚀^[3]。

3.2 防腐技术的应用

防腐技术的应用涉及涂装、阴极保护、热喷涂、

镀层等多种技术，涂装技术是在管道外表面施加防腐涂层，起到物理隔离的作用。阴极保护是通过在管道周围安装牺牲阳极或施加外加电流，将管道作为电路的阴极，从而抑制管道的阳极腐蚀反应。热喷涂技术则是通过将防腐材料加热至熔融状态，以高速射出的形式喷涂到管道表面，形成均匀、密实、附着力强的防腐层，而镀层技术则是在管道表面形成一层金属或合金镀层，提高管道的耐腐蚀性。

3.3 防腐保护措施

在对油气储运中管道的防腐策略进行研究时，必须关注防腐保护措施的多源性。这些措施是通过减缓腐蚀反应，改变管道的运行条件，或避免处于有利于腐蚀的环境中，从而对管道进行有效保护。阴极保护是一种广泛应用的防腐技术，它通过牺牲阳极或外加电流的方式，把管道作为阴极，消耗掉可能引发腐蚀的电子，达到防止或减少金属腐蚀的目的。阴极保护既可以应用于海底管道，也可应用于土壤中或水下的管道。使用防腐添加剂是另一种有效的保护措施。这些添加剂能够通过腐蚀介质反应，生成保护膜，降低或抑制腐蚀速度。防腐添加剂的种类众多，包括膜成型、吸附型、离子捕获型等。加强管道保温可以减少温差引起的腐蚀，特别是对于输送温度波动较大的介质，如蒸汽或高温油品的管道。保温材料可以选择具有良好热稳定性和抗腐蚀性的材料，如石棉、硅酸盐纤维、玻璃纤维等^[4]。控制流体流速和压力也是防腐保护的重要措施。适当的流速和压力可以防止流动腐蚀和蚀穿，同时也有利于防止介质在管道内部产生湍流，降低沉积物和微生物腐蚀的风险。

3.4 管道设计的优化

优化管道设计是实现高效防腐策略的一个重要环节，设计阶段的决策直接影响到后期的运营成本和维护难度，这一阶段需重点考虑的问题包括简化结构、降低焊接数量、避免死角和优化布局。

首先结构的简化是基于这样的理念：减少系统的复杂度，减轻运维负担，降低腐蚀风险。过于复杂的管道结构可能会产生许多难以预见的问题，比如应力集中、液体滞留、局部环境条件恶劣等，这些都会加大腐蚀的风险。设计阶段，应力分析和流体动力学分析是必不可少的步骤，只有这样，才能设计出结构简洁、运行平稳的管道。其次焊接是一个在制造过程中不可避免的工艺环节，但焊接过程往往会带来许多腐蚀难题。例如，焊缝地区的金属组织和性能常常与基

材有较大差异,造成这里的腐蚀电位和腐蚀速度不同。再者,焊缝往往伴随应力集中,易发生应力腐蚀。因此设计阶段应尽量降低焊接数量,如采用弯管替代焊接弯头,或者采用机械连接方式替代焊接连接。死角是指管道中的局部区域,由于其特殊的几何形状,导致介质在此处滞留,容易引发严重的局部腐蚀,如点蚀或孔蚀。在设计时,我们需要尽量避免死角的存在,如采用全通径的阀门替代传统阀门,避免阀门内的死角;或者改变管道走向,减少直角弯头的使用。最后,优化布局是从整体出发,考虑管道系统在运行和维护过程中的便捷性。一个优秀的布局设计应使得管道易于检查、清洁和维护,而不是隐藏在角落,无法接近。在设计时,还需考虑到检测设备的尺寸和操作空间,留足够的空间进行后续的检测和维护工作。

3.5 定期检测和维护

对于任何一个管道系统,无论防腐设计多么完备,都需要通过定期检测和维护来保证其有效性,这是因为管道的使用环境和条件是复杂多变的,很难完全避免腐蚀的发生。而定期检测和维护则可以在问题初期及时发现,防止问题的扩大。检测方法主要包括非破坏性检测,如超声波测厚、电磁感应、射线探伤等,这些方法可以在不影响管道正常运行的前提下,发现内部和外部的腐蚀。对于检测出的腐蚀问题,应及时进行修复或更换,使用焊补、涂层修复、阴极保护等方法来防止腐蚀的扩大。在维护方面,应做好记录和追踪,定期检查防腐设施的工作状态,如牺牲阳极的消耗情况、防腐涂层的破损情况等。同时,还应定期进行清洁,清除管道内外的污染物,减少腐蚀源。

4 未来防腐蚀策略及展望

4.1 创新防腐技术的发展

面对持续的油气储运管道腐蚀问题,以及相应的经济和环境挑战,全球有大量的研究正在探索新的防腐技术。这些研究不仅集中在新材料和新技术的开发上,而且在于对现有防腐技术的持续改进和优化。

在新材料研究方面,已经有一些新的合金和复合材料正在被开发用于防腐,这些新材料具有较高的耐腐蚀性,且在某些情况下,它们的成本和易用性都优于传统的防腐材料。例如一些新的钢种,如耐酸钢、超低碳钢等,已经展现出在某些具有挑战性的环境下良好的防腐性能。在新技术研究方面,有许多新兴技术正在被开发和应用。例如超声波防腐技术、纳米技术、电化学防腐技术等。其中超声波防腐技术通过在

管道表面产生微小的振动,可以有效防止腐蚀物质的堆积;纳米技术则通过开发纳米级别的防腐涂层,提高涂层的密封性和耐腐蚀性;电化学防腐技术则是通过控制管道材料的电化学性质,如电位、电阻等,从而达到防腐的目的。尽管新的防腐技术持续在发展,但仍然存在许多挑战,例如技术成熟度、成本、可行性等。因此,持续的研究和试验是必要的,以确保新技术能够实现其预期的防腐效果,并且在实际应用中具有经济和操作上的可行性。

4.2 规范化和标准化的未来

规范化和标准化是提高管道防腐效果的重要方向,通过建立一系列的防腐规范和标准,可以确保所有的设计、施工和维护活动都符合良好的防腐实践。这包括材料选择、设计要求、施工规范、检测和维护要求等。这些规范和标准不仅可以提供一致的防腐要求,而且还可以提供一种衡量防腐效果的标准。例如防腐材料的性能要求、防腐技术的应用规程、腐蚀评估和检测的方法等。这些标准化的要求和规程可以确保防腐活动的有效性,并且可以防止由于差异化的防腐实践导致的问题。此外通过规范化和标准化,还可以推动防腐技术的发展和应用。例如一些新的防腐技术,如纳米防腐技术、电化学防腐技术等,它们的发展和应用需要有相应的标准和规范来指导,以确保这些新技术在实际应用中的安全性和有效性。

5 结论

综上所述,针对油气储运中管道的防腐问题,需要综合考虑管道材料、环境因素、设计优化、防腐保护措施和定期维护等方面,采取多层次、多角度的综合防腐策略,以确保管道的安全运行和延长使用寿命。未来的研究应该继续关注创新防腐技术的发展,并推动规范化和标准化的进程,以进一步提升油气储运中管道的防腐效果和可持续发展能力。

参考文献:

- [1] 张涛,孙洁.油气储运中的管道防腐问题[J].石化技术,2020,27(10):218-219.
- [2] 刘新.油气储运中的管道防腐问题[J].化工设计通讯,2020,46(05):100-101.
- [3] 王娟.油气储运管道的防腐问题与对策[J].化工设计通讯,2020,46(01):196-197.
- [4] 王浩天.油气储运中的管道防腐问题研究[J].云南化工,2020,47(01):176-177.