

管道材料在天然气输送中的安全性能与寿命预测

付俊明（北京石油化工工程有限公司，北京 100107）

摘要：文章旨在探讨管道材料在天然气输送过程中的安全性能及其寿命预测。研究的目的在于分析不同管道材料在天然气输送中的应用特性，并评估其长期稳定性和安全性。通过对金属、塑料和复合材料等不同类别管道材料的物理、化学特性进行深入分析，揭示其在面对天然气输送过程中可能出现的腐蚀、应力和温度变化等挑战时的表现和适应能力。此外，文章还讨论了常用的管道安全性能评估指标，如泄漏率和耐压能力，以及这些指标在管道材料选择和运行管理中的重要性。关于管道材料寿命预测，文章综述了基于实验数据和数学模型的预测方法，涵盖加速试验、腐蚀模型和疲劳分析等技术手段，并探讨了利用大数据分析和机器学习技术进行寿命预测的最新进展。

关键词：管道材料；天然气输送；安全性能；寿命预测

1 引言

在现代能源体系中，天然气作为清洁能源的重要组成部分，其安全、高效地输送对于能源供应稳定至关重要。天然气输送管道的选择和材料应用直接关系到输送系统的可靠性和经济性。然而，不同的管道材料在面对天然气输送过程中会受到不同的物理、化学影响，如腐蚀、应力和温度变化，这些因素可能对管道材料的性能和寿命产生深远影响。因此，深入了解管道材料的特性以及其在实际应用中的表现，对于确保输送系统的安全性和持久性至关重要。

2 管道材料的选择与特性分析

2.1 管道材料的主要分类

在天然气输送系统中，管道材料的选择对系统的安全性、经济性和长期可靠性具有重要影响。管道材料主要可以分为金属、塑料和复合材料三大类，每种类别都有其独特的特性和适用场景。首先，金属管道是最传统和常见的选择之一。主要的金属材料包括碳钢、不锈钢等。碳钢因其高强度、耐腐蚀性和相对较低成本而被广泛应用于天然气输送系统中。不锈钢则在需要更高耐腐蚀性的情况下常见，例如在潮湿环境或需要抗化学品侵蚀的地方。铜合金在特定应用中也有其独特的优势，如其优异的导热性和耐腐蚀性，使其在某些特定的输送系统中被选择^[1]。

其次，塑料管道由于其轻质、耐腐蚀、易于安装和低成本而在近年来得到广泛应用。主要的塑料材料包括聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）、聚丙烯（PP）和玻璃钢等。聚乙烯通常被用于低压输送和地下埋设的管道中，具有良好的耐腐蚀性和化学稳定性。聚氯乙烯和聚丙烯则在一些特定的工业应用中有其独特的

优势，例如耐化学腐蚀、抗紫外线辐射等。玻璃钢由玻璃纤维和树脂组成，结构轻便但具有出色的耐腐蚀性和机械强度，适用于特殊环境和高要求的输送系统。第三类是复合材料管道，结合了不同材料的优点以弥补单一材料的不足。复合材料通常由纤维增强材料（如玻璃纤维、碳纤维）和树脂基体组成，具有高强度、轻质、耐腐蚀和耐疲劳等优良特性。它们适用于需要兼顾结构强度和耐久性的应用，如深海和极端温度条件下的天然气输送。

2.2 管道材料的物理与化学特性

碳钢管道由于其卓越的机械性能，成为天然气输送系统中的首选。其高强度、刚性和耐腐蚀性使其能够承受高压和大流量的输送需求，同时具备良好的可塑性和加工性，能够适应复杂的运输和安装过程。在化学上，碳钢管道通过合金设计和表面涂层进一步增强了其抗腐蚀能力。例如，通过添加铬、镍等合金元素，可以有效抵御腐蚀。

此外，环氧树脂或聚乙烯等涂层可以提供额外的保护层，延长管道的使用寿命，尤其是在湿润和高盐度环境下的耐蚀性表现突出^[2]。玻璃钢管道因其由玻璃纤维和树脂复合而成的特性，在需要高强度和耐腐蚀性的环境中特别受到青睐。其优异的强度-重量比使其在动态负荷和变形下表现出色，具备良好的抗震性能和耐疲劳性，适合于长期使用的要求。在化学稳定性方面，玻璃钢管道由于其树脂基体，能够有效抵御酸性和碱性介质的侵蚀，因此广泛应用于化工厂和海洋环境。根据不同的树脂成分选择，玻璃钢管道展现出多样化的应用潜力，能够在不同的化学环境中发挥其优势。

3 天然气输送中的安全性能分析

3.1 天然气对管道材料的影响

天然气对管道材料的影响是一个关键的工程考量,它涉及到管道材料的耐压性、耐腐蚀性以及长期稳定性等多个方面。在选择合适的管道材料时,必须考虑到输送的天然气类型(比如甲烷、乙烷等)、压力、温度以及含有的杂质成分。

首先,天然气的压力对管道材料的选择至关重要。高压天然气要求管道具备优秀的强度和刚性,以抵抗管道内部承受的力学应力,特别是在弯曲或地形起伏较大的情况下。碳钢管道由于其优良的机械性能常被选用,能够在高压环境下保持稳定的输送能力。

其次,天然气中的硫化氢(H_2S)等杂质会显著增加管道的腐蚀风险。特别是在海上油气田的开采中,含有 H_2S 的天然气对管道的腐蚀性能提出了更高的要求。碳钢管道通常通过添加特定的合金元素(如铬、镍等)或采用特殊的内外涂层来提升其抗腐蚀能力,从而延长其使用寿命。此外,天然气的输送温度也对管道材料的选择产生影响。在低温条件下,如北方寒冷地区,管道材料需要具备良好的低温韧性,以防止材料脆裂或塑性变形。聚乙烯管道由于其优异的低温性能常被用于此类应用场合,能够保证在极寒环境下的稳定运输。

最后,天然气的化学性质和含气量也会影响管道材料的选择。不同类型的天然气在化学成分上可能有所不同,对管道的腐蚀性能和材料稳定性提出了不同的要求。玻璃钢管道由于其卓越的耐化学腐蚀性能,被广泛应用于化工厂和海洋环境中,能够有效抵抗多种化学介质的侵蚀,保证长期的安全运行。

3.2 管道安全性能评估指标

管道安全性能评估指标是确保天然气管道系统安全运行的关键工具。在管道工程中,安全性能评估指标涵盖了多个方面,主要目的是评估管道系统在各种操作条件下的安全性能,并采取相应的措施来减少事故发生的可能性和最小化其潜在影响。

首先,管道的机械强度是评估安全性能的重要指标之一。管道必须能够承受设计压力下的内部压力和外部负荷,如地质运动引起的变形或者外部物理损伤造成的影响。评估管道的机械强度包括对管道材料和接头强度的验证,通过工程计算和实地测试来确保其在实际运行中的稳定性和可靠性。

其次,腐蚀和侵蚀评估是管道安全性能评估的另

一个重要方面^[3]。天然气中可能含有硫化氢等腐蚀性成分,长期作用会导致管道材料的腐蚀和金属疲劳,从而降低管道的强度和耐久性。评估腐蚀的程度和速率,采取有效的防腐措施如涂层保护、阴极保护或定期检测检修,是保证管道长期安全运行的关键步骤。

最后,泄漏和漏失的评估同样重要。泄漏可能由于管道损伤、接头松动或操作错误引起,对环境和人员安全构成潜在威胁。安全性能评估需要考虑泄漏的概率、位置和影响范围,设计应急响应措施并实施监测系统以及定期的安全演练来减少事故损失。最后,管道系统的操作和维护管理也是安全性能评估的一部分。包括操作规程的制定、人员培训、设备维护和定期检查等,以确保管道在正常操作条件下的安全性能。管理体系的建立和执行能够提高事故预防能力和应急响应效率,保障管道系统长期稳定运行。

4 管道材料寿命预测技术

4.1 寿命预测方法概述

寿命预测方法在管道工程中是确保管道系统安全运行和可靠性的关键。这一部分将详细讨论不同的寿命预测方法及其在实际应用中的优缺点,从而为管道工程提供科学的依据和方法。

首先,传统的寿命预测方法主要依赖于材料的机械性能和化学稳定性分析。通过对管道材料的化学成分、强度特性以及腐蚀耐久性的测定,可以估计管道在不同工作条件下的寿命。这些方法的优势在于技术成熟,应用广泛,能够提供相对可靠的结果。然而,这些方法通常假设操作条件和环境稳定,难以考虑到实际运行中的复杂变化和不确定性。

其次,基于数学建模和仿真的寿命预测方法逐渐得到应用。通过数学模型描述管道在不同负载和腐蚀条件下的行为,如有限元分析、应力分析和损伤力学等,可以更精确地评估管道的剩余寿命^[4]。这些方法能够考虑到管道的非线性行为和实际工作条件的变化,提高了预测的准确性和可靠性。然而,这些方法需要大量的计算资源和复杂的输入数据,对于数据的准确性和模型的精度要求较高。

此外,基于统计和可靠性分析的寿命预测方法也在管道工程中得到应用。这些方法通过统计数据和可靠性理论,评估管道在一定时间内的可靠性和失效概率,为管道运维提供决策支持。这种方法的优势在于能够综合考虑到管道系统的整体可靠性和安全性,为运营管理提供科学依据。然而,这些方法通常需要大

量的历史数据和经验知识,且对数据的准确性和完整性要求较高。

4.2 基于数学模型的寿命预测

基于数学模型的寿命预测方法在管道工程中具有重要的应用价值,主要通过建立管道系统的数学描述和仿真模型,来评估管道在不同工作条件下的寿命和性能。这种方法的核心是利用数学工具和计算机仿真技术,分析管道在受力、腐蚀等多种因素作用下的响应,以预测其剩余寿命。

首先,数学模型可以利用有限元分析(FEA)来模拟管道结构在不同载荷下的应力分布和变形情况。通过将管道的几何形状、材料特性以及边界条件等输入模型,FEA能够精确地计算出管道各个部位的应力和应变,从而评估管道的结构完整性和承载能力。这种方法不仅可以定量地分析管道的受力状态,还能识别出潜在的应力集中区域和疲劳损伤点,为管道的维护和修复提供依据。

其次,数学模型还可以采用损伤力学理论,来评估管道在腐蚀和磨损等环境影响下的损伤累积过程。通过考虑材料的损伤积累速率和断裂准则,可以预测管道在不同腐蚀率和使用年限下的剩余寿命^[5]。这种方法特别适用于评估老化管道系统的可靠性,帮助运营团队制定有效的维护策略和替换计划。

此外,数学模型还可以结合多物理场耦合分析,考虑温度、压力、介质流动等多种因素对管道的综合影响。例如,通过计算管道在高温高压条件下的热应力分布,可以预测管道在复杂工况下的疲劳寿命和安全性。

4.3 基于数据驱动的寿命预测

基于数据驱动的寿命预测方法是近年来在管道工程领域中备受关注的先进一种技术。这种方法通过收集、分析和利用大量的实际运行数据,来预测管道系统的剩余寿命和性能退化趋势,具有与传统基于物理模型的方法互补的优势。

首先,数据驱动的寿命预测依赖于大数据分析技术和机器学习算法。通过从传感器、监测设备以及现场数据采集系统中获取管道的实时运行数据,如压力、温度、流速以及腐蚀率等关键参数,可以建立数据集并应用机器学习模型进行分析。这些模型可以识别出数据中的模式和趋势,从而预测管道在未来运行中可能出现的性能退化和故障风险。

其次,数据驱动的方法强调实时监测和反馈。通

过实时收集和分析数据,系统能够及时发现管道系统中的异常行为或潜在问题,例如异常压力波动、温度异常变化或者腐蚀加速等。这种实时监测不仅有助于预测管道的寿命,还可以指导运维团队在早期阶段采取预防性维护措施,以减少突发故障和安全风险。此外,数据驱动的寿命预测方法还能够实现个性化和精准化的管道管理。通过分析不同管道段的实际运行数据和历史故障信息,可以为每个管道段制定定制化的维护计划和预测模型。这种个性化管理可以最大程度地延长管道的使用寿命,提高运行效率,并减少维护成本和停工时间。

最后,数据驱动的方法在管道系统规模化和复杂化趋势下尤为重要。随着管道网络的扩展和技术条件的提升,传统的基于物理模型的寿命预测方法面临着数据获取和模型复杂度的挑战。而数据驱动的方法能够利用现代信息技术和大数据分析的优势,有效应对大规模管道系统的管理和预测需求,为工程师和运营团队提供更可靠、实时的决策支持。

5 结论

综上所述,文章探讨了管道材料在天然气输送中的关键问题,从管道材料的选择与特性分析入手,分析了金属、塑料和复合材料在不同工作条件下的应用特性。在安全性能分析方面,详细讨论了天然气对管道材料可能产生的腐蚀和脆化影响,并介绍了常用的安全性能评估指标。针对管道材料寿命预测,综述了基于实验数据和数学模型的多种预测方法,包括加速试验、腐蚀模型以及最新的数据驱动方法。通过这些综合分析,旨在提升管道系统的可靠性和安全性,为相关领域的工程实践和决策提供了有价值的参考依据。

参考文献:

- [1] 邢云颖,赵茜,王修云,等.掺氢天然气输送管道材料适用性的测试方法[J].腐蚀与防护,2023,44(09):51-56+106.
- [2] 周康.高含硫天然气在管道输送中防腐对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(17):40-42.
- [3] 赵建福,董绍华.长距离管道纯氢与天然气掺氢输送技术专题序[J].力学与实践,2023,45(02):227-229.
- [4] 李凤,董绍华,陈林,等.掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展[J].力学与实践,2023,45(02):230-244.
- [5] 陈力波.探析提高天然气长输管道输送效率的方法[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(21):12-14.