

燃气管道非开挖修复内衬结构力学分析

王政 亓慧超

山东新奥能源发展有限公司 山东 济南 250000

摘要: 本文聚焦燃气管道非开挖修复内衬结构力学分析。介绍了非开挖修复技术及内衬结构类型、作用, 阐述力学分析理论基础, 包括材料力学、结构力学和接触力学理论。分析了内衬结构在内压、外部荷载、温度变化下的力学性能及影响因素。最后提出材料改性、结构创新设计、施工工艺改进等提升内衬结构力学性能的技术, 为燃气管道非开挖修复内衬结构优化提供参考。

关键词: 燃气管道; 非开挖修复; 内衬结构力学; 提升技术

1 燃气管道非开挖修复内衬结构概述

1.1 非开挖修复技术简介

非开挖修复技术是一种在不破坏地面或仅开挖少量工作坑的情况下, 对地下燃气管道进行修复的先进技术。相较于传统的开挖修复方式, 非开挖修复技术具有施工周期短、对交通和环境影响小、成本效益高等显著优势。随着城市地下管网的日益复杂和对施工环保要求的不断提高, 非开挖修复技术在燃气管道修复领域得到了广泛应用。据统计, 在欧美等发达国家, 非开挖修复技术在燃气管道修复中的应用比例已超过70%。以美国为例, 每年约有5000公里的燃气管道采用非开挖修复技术进行修复, 节省了大量的人力、物力和时间成本。在我国, 近年来非开挖修复技术也发展迅速, 北京、上海、广州等一线城市每年非开挖修复燃气管道的长度以20%-30%的速度增长, 2023年全国采用非开挖技术修复的燃气管道总长度已达到约2000公里。非开挖修复技术主要包括原位固化法、穿插内衬法、螺旋缠绕法等多种工艺。原位固化法是将浸渍树脂的软管在原有管道内进行翻转或牵引就位, 通过加热或常温固化形成新的内衬管; 穿插内衬法是将外径略小于原管道内径的高密度聚乙烯(HDPE)管插入原管道内, 形成复合结构; 螺旋缠绕法是利用螺旋缠绕机将带状型材在原管道内缠绕成新的内衬管道。这些工艺各有特点, 适用于不同的管道修复场景。

1.2 内衬结构类型与特点

燃气管道非开挖修复内衬结构主要有软管内衬结构、HDPE内衬结构、螺旋缠绕内衬结构等类型。软管内衬结构通常采用聚酯纤维、玻璃纤维等材料制成的软管, 浸渍树脂后在原管道内固化形成内衬。这种内衬结构具有良好的柔韧性和密封性, 能够适应各种复杂的管道形状和变形情况。例如, 聚酯纤维软管内衬的拉伸强度可达150-200MPa, 断裂伸长率在10%-15%之间, 能够

有效防止燃气泄漏。HDPE内衬结构具有高强度、耐腐蚀、耐磨损等特点^[1]。HDPE管的密度一般在0.941-0.965g/cm³, 拉伸强度为20-35MPa, 长期使用温度可达60°C。其与原管道紧密贴合, 形成复合结构, 能够显著提高管道的承载能力。HDPE内衬结构适用于管径较大、输送压力较高的燃气管道修复。螺旋缠绕内衬结构是通过将带状型材螺旋缠绕在原管道内形成内衬。这种结构具有施工速度快、成本低的优势, 能够在短时间内完成长距离管道的修复。其型材的厚度一般在3-8mm之间, 缠绕形成的内衬管道环刚度可达8kN/m²以上, 能够承受一定的外部荷载。

1.3 内衬结构在燃气管道修复中的作用

内衬结构在燃气管道修复中发挥着至关重要的作用。首先, 它能够有效修复管道的破损、腐蚀等缺陷, 恢复管道的完整性和密封性, 防止燃气泄漏, 保障城市燃气供应的安全。研究表明, 采用内衬修复后的燃气管道, 泄漏率可降低95%以上。其次, 内衬结构可以提高管道的承载能力, 延长管道的使用寿命。通过与原管道形成复合结构, 内衬能够分担一部分内压和外部荷载, 减少原管道的应力集中, 延缓管道的老化和损坏。一般情况下, 内衬修复后的燃气管道使用寿命可延长20-30年。另外, 内衬结构还具有一定的防腐性能, 能够有效抵御土壤、地下水等环境介质对管道的腐蚀, 降低管道维护成本。例如, 玻璃纤维内衬浸渍的树脂具有良好的耐腐蚀性能, 可在酸性、碱性等恶劣环境下长期使用。

2 燃气管道非开挖修复内衬结构力学分析理论基础

2.1 材料力学基本原理

材料力学作为力学领域的重要分支, 专注于探究材料在各类外力作用下所展现出的应变、应力、强度、刚度、稳定性以及导致材料破坏的极限等特性。在燃气管道非开挖修复内衬结构的力学分析体系中, 材料力学的

基本理论如同基石,为后续的性能研究与结构设计提供了不可或缺的理论支撑^[2]。材料的弹性模量是衡量其抵抗弹性变形能力的关键指标,它直接影响着内衬结构在荷载作用下的变形程度。以软管内衬结构常用的聚酯纤维材料为例,其弹性模量通常处于7-10GPa的范围,这使得聚酯纤维软管在一定程度上能够保持结构的稳定性,抵御弹性变形。而HDPE材料的弹性模量相对较低,一般在0.8-1.2GPa,这决定了其在受力时的变形特性与聚酯纤维有所不同。材料的强度指标,如抗拉强度、抗压强度等,也是评估材料性能的重要依据。像玻璃纤维,其抗拉强度极高,可达1500-2000MPa,这一特性使其在增强内衬结构的承载能力方面发挥着重要作用。胡克定律($\sigma = E\varepsilon$)作为材料力学中的核心公式,建立了应力(σ)与应变(ε)之间的线性关系,其中E为弹性模量。在实际分析中,通过测量内衬结构的应变,结合材料的弹性模量,便可依据胡克定律准确计算出其受力时的应力大小。例如,在分析某段采用聚酯纤维内衬的燃气管道时,通过应变传感器获取到其在特定荷载下的应变数据,利用胡克定律计算出相应的应力,从而清晰了解该内衬结构在不同荷载作用下的变形情况,为后续的结构优化和安全评估提供精确的数据支持。

2.2 结构力学相关理论

结构力学以研究工程结构在外力作用下的强度、刚度和稳定性为核心内容,在燃气管道非开挖修复内衬结构的分析中占据着关键地位。在实际分析过程中,梁理论、板壳理论等结构力学理论被广泛应用于内衬结构的力学分析。对于燃气管道内衬结构,为了便于进行力学分析,常常将其简化为梁或板壳模型。当需要分析内衬在管道轴向的受力情况时,可将其视为梁结构。以一段长度较长的燃气管道为例,在受到轴向荷载时,其内衬结构类似于一根梁,通过梁理论可以计算出该内衬在轴向荷载作用下的弯矩、剪力和轴力分布情况,从而评估其在轴向方向上的承载能力和稳定性。而在分析内衬在管道径向的受力时,则采用板壳理论更为合适。管道的径向受力情况复杂,涉及到内压、外部土壤压力等多种荷载,将内衬视为板壳结构,运用板壳理论能够准确计算出内衬在径向荷载作用下的应力和变形分布,进而为内衬结构在径向方向的设计和优化提供理论指导^[3]。通过结构力学的方法,对不同荷载组合下内衬结构的内力分布进行精确计算,不仅能够深入了解内衬结构的受力特性,还可以为内衬结构的设计提供科学依据。例如,在设计一种新型燃气管道内衬结构时,依据结构力学理论计算出其在各种可能荷载组合下的内力分布,从而优化

内衬的结构尺寸和材料选择,确保其在实际运行过程中能够满足强度、刚度和稳定性的要求。

2.3 接触力学理论

接触力学主要致力于研究相互接触物体之间的力学行为,涵盖接触应力、接触变形等多个关键方面。在燃气管道非开挖修复内衬结构的研究中,内衬与原管道之间的接触关系对其力学性能有着不可忽视的重要影响。内衬与原管道之间的接触压力分布往往呈现出不均匀的状态,这种不均匀性受到多种因素的综合作用。内衬的安装工艺对接触压力分布有着直接影响,例如在采用穿插内衬法时,安装过程中的操作精度和力度控制会导致内衬与原管道之间的贴合程度不同,进而影响接触压力的分布。材料性能也起着重要作用,不同材料的弹性模量、泊松比等参数差异会导致在相同荷载作用下接触压力的分布不同。管道的变形情况同样会改变接触压力的分布,当原管道存在一定程度的变形时,内衬与原管道之间的接触状态会发生变化,接触压力也会相应调整。借助接触力学理论,能够建立起内衬与原管道之间的接触模型,通过该模型可以深入分析接触压力的分布规律。研究接触界面的摩擦特性对力学性能的影响也至关重要。例如,当内衬与原管道之间的摩擦系数处于0.2-0.3的范围时,二者之间能够实现有效的荷载传递,使得内衬与原管道形成一个协同工作的复合结构,从而显著提高复合结构的整体性能。通过对接触力学理论的深入研究和应用,能够更好地优化内衬结构的设计和施工工艺,确保燃气管道修复后的安全性和可靠性。

3 燃气管道非开挖修复内衬结构力学性能分析

3.1 受力分析

3.1.1 内压作用下的力学性能

燃气管道在运行过程中,内部燃气压力是主要荷载之一。在内压作用下,内衬结构会产生环向和轴向应力。通过理论计算和有限元分析可知,对于直径为300mm、壁厚为5mm的HDPE内衬,当内部燃气压力为0.4MPa时,环向应力约为12MPa,轴向应力约为6MPa。随着内压的增加,环向应力增长速度较快,是导致内衬破坏的主要因素之一。

3.1.2 外部荷载作用下的力学性能

外部荷载包括土壤压力、地面交通荷载等。在土壤压力作用下,内衬结构主要承受径向压力。以埋深为2m的燃气管道为例,土壤压力约为20kPa,此时内衬结构会产生一定的径向变形。通过实验测试发现,在外部荷载作用下,螺旋缠绕内衬结构的环刚度优势明显,能够有效抵抗外部压力,其径向变形量比软管内衬结构小30%-

40%。

3.1.3 温度变化引起的力学效应

燃气管道在运行过程中,温度会发生变化,这会导致内衬结构产生热胀冷缩变形,进而产生热应力。当温度变化范围为-20°C-40°C时,对于长度为100m的内衬管道,热膨胀量约为12-18mm。如果内衬与原管道之间的约束较强,会产生较大的热应力,可能导致内衬结构破坏^[4]。

3.2 影响内衬结构力学性能的因素

3.2.1 材料性能的影响

材料的弹性模量、强度、韧性等性能指标直接影响内衬结构的力学性能。例如,提高聚酯纤维材料的弹性模量,可降低内衬在荷载作用下的变形量;增强HDPE材料的抗冲击性能,能够提高内衬抵抗外部荷载的能力。实验表明,将玻璃纤维的含量从20%提高到30%,软管内衬的拉伸强度可提高20%-30%。

3.2.2 结构尺寸与形状的影响

内衬的壁厚、管径等尺寸参数对其力学性能有显著影响。增加内衬壁厚可以提高其承载能力,但会增加施工成本和难度。通过有限元分析发现,当HDPE内衬壁厚从4mm增加到6mm时,其环向应力降低约25%。此外,内衬结构的形状也会影响其受力分布,例如螺旋缠绕内衬的螺旋形状能够有效分散外部荷载。

3.2.3 施工工艺的影响

施工工艺对内衬结构的力学性能也至关重要。例如,在原位固化法施工中,树脂的固化程度直接影响内衬的强度和刚度;在穿插内衬法施工中,内衬与原管道的贴合程度会影响荷载传递效率。研究表明,当树脂固化度达到95%以上时,软管内衬的力学性能能够得到充分发挥;而内衬与原管道之间的间隙每增加1mm,复合结构的承载能力下降5%-8%。

4 燃气管道非开挖修复内衬结构力学性能提升技术

4.1 材料改性技术

材料改性技术是提升内衬结构力学性能的重要手段之一。通过添加增强纤维、纳米材料等方式,可以改善材料的性能。例如,在HDPE材料中添加5%-10%的碳纤维,可使其拉伸强度提高30%-40%,弹性模量提高20%-

30%。在聚酯纤维软管内衬中添加纳米二氧化硅,能够提高树脂的耐磨性和耐腐蚀性,延长内衬的使用寿命。

4.2 结构创新设计

结构创新设计可以优化内衬结构的受力性能。例如,采用多层复合结构,将不同性能的材料组合在一起,发挥各自的优势。将高强度的玻璃纤维层与柔韧性好的橡胶层复合,既能够提高内衬的承载能力,又能增强其抗变形能力^[5]。设计特殊的几何形状,如波纹状内衬结构,能够有效分散应力,提高内衬结构的稳定性。

4.3 施工工艺改进

改进施工工艺可以提高内衬结构的质量和力学性能。在原位固化法施工中,采用紫外线固化技术代替传统的热或蒸汽固化技术,能够缩短固化时间,提高固化质量,使内衬的强度和刚度提高10%-15%。在穿插内衬法施工中,采用预应力穿插技术,使内衬在安装过程中产生一定的预拉应力,能够提高内衬与原管道的贴合程度,增强复合结构的整体性能。

结束语

燃气管道非开挖修复内衬结构力学分析对保障燃气管道安全运行意义重大。通过深入探究其力学性能及相关影响因素,并借助材料改性、结构创新设计与施工工艺改进等技术手段,能有效提升内衬结构的力学性能。未来,随着技术的不断发展,燃气管道非开挖修复内衬结构将朝着更高效、更可靠的方向迈进,为城市燃气供应安全提供更坚实的保障。

参考文献

- [1]崔英魁.燃气管道非开挖改造工艺措施和应用探讨[J].建筑工程技术与设计,2021,(20):143-145.
- [2]贾雷,李静涛.定向钻法长距离穿越岩石山体难点分析及应用[J].城市燃气,2022,(04):4-9.
- [3]闫喜彬.水平定向钻穿越施工技术在城市燃气管道工程中的应用[J].居业,2023,(05):10-12.
- [4]陈昊.燃气管道修复技术发展及应用现状[J].管道工程技术,2024(2):45-50.
- [5]张志强.非开挖修复技术在燃气管道工程中的应用[J].建筑科技,2023(5):56-60.