

# 柔性机械管线在海洋环境下的力学性能研究与分析

任晓芳 韩俊强

海洋石油工程股份有限公司 天津 300457

**摘要:** 本文针对柔性机械管线在海洋环境下的力学性能进行了深入研究与分析。分析了柔性机械管线的基本特性与要求, 以及其在海洋环境中的应用和重要性。从材料与结构设计的角度, 探讨了其对管线力学性能的影响。随后重点分析了海洋环境因素如海水压力、温度、海浪、潮流、生物与化学腐蚀等对管线性能的影响。在此基础上, 通过实验研究与模拟分析, 对柔性机械管线的力学性能进行了全面的评估。此外还结合实际应用案例, 进一步验证了其在海洋环境中的性能表现。对当前研究的局限性与挑战进行了总结展望提出了建议。

**关键词:** 柔性机械管线; 海洋环境; 力学性能; 实验研究; 模拟分析

## 1 引言

随着海洋资源的不断开发与利用, 柔性机械管线在海洋工程领域的应用越来越广泛。由于海洋环境的复杂性和多变性, 对柔性机械管线的力学性能提出了更高的要求。对柔性机械管线在海洋环境下的力学性能进行深入研究与分析, 具有重要的理论意义和实际应用价值。本文从多个方面对柔性机械管线在海洋环境下的力学性能进行了系统性的研究。探讨了材料与结构设计对管线力学性能的影响, 为后续的性能评估提供了基础。分析了海洋环境因素对管线性能的影响, 为实际应用提供了指导。通过实验研究与模拟分析, 对柔性机械管线的力学性能进行了全面的评估, 进一步验证了其在海洋环境中的性能表现。

### 1.1 柔性机械管线在海洋环境中的应用和重要性

在海洋领域, 可弯曲的机械管线被广泛应用并且扮演着重要角色。无论是连接海底井口与浮式生产设施、深海探测、海洋科学研究还是深海矿产资源的开发, 它们都发挥着关键作用。特别是在海洋油气开发中, 这种柔性设备能够承受深海环境的压力, 并且具备出色的耐腐蚀和抗磨损性能, 保障了油气长期稳定的输送。由于其灵活性, 它们可以适应复杂的海洋地形和动态环境, 为海洋工程提供了可靠保障<sup>[1]</sup>。而在深海矿产资源开发中, 柔性机械管线同样扮演着重要的角色, 为深海采矿设备提供动力和物质输送, 确保采矿作业的高效进行, 并且具备很高的可靠性和安全性。

### 1.2 力学性能研究的必要性

海洋环境的特殊性和复杂性对柔性机械管线提出了极高的要求。深海的压力、温度的波动、海浪和潮流的冲击, 以及生物和化学腐蚀等因素, 都对管线的性能提出了严峻的挑战。因此, 对管线力学性能的研究是确保

其在海洋环境中稳定、安全运行的关键。随着海洋资源的不断开发, 柔性机械管线的设计和制造技术也在不断发展。对力学性能的研究不仅有助于了解管线的性能表现, 更能指导新材料的研发、新工艺的改进, 推动相关技术的进步<sup>[2]</sup>。

## 2 柔性机械管线的基本特性与要求

柔性管道是连接深海油气井、深海勘探、矿产开采的关键装备。它具有优异的耐压力、耐腐蚀、耐磨等性能, 并能灵活地适用于复杂的地形与动态的海洋环境。与此同时, 对柔性机械管道的需求也越来越高, 既要有良好的工作特性, 又要保证长时间的安全、可靠地输送石油天然气。随着我国对海洋资源的开采, 深海柔性管道的设计与制备也越来越迫切, 不仅要提高其耐压、耐腐蚀等综合性能, 而且还要保证其在极端海洋环境中的长期稳定运行<sup>[3]</sup>。

### 2.1 定义与分类

柔性机械管线是一种用于海洋工程的特殊管道系统, 具有较高的弯曲和变形能力。根据其结构和功能, 可以分为刚性绳架式柔性管线和流体介质输送柔性管线两种主要类型。刚性绳架式柔性管线通常由钢丝绳网、防层、压力层和保护层组成, 用于连接海底井口与浮式生产设施。而流体介质输送柔性管线则广泛应用于海洋石油和天然气开采中, 用于输送油气和水。

### 2.2 材料选择及其特性

柔性机械管线的材料选择至关重要, 通常采用耐腐蚀、高强度和良好可塑性的特种材料, 如高强度钢丝、聚合物等。钢丝具有优异的抗拉强度和耐腐蚀性能, 适用于刚性绳架式柔性管线的支撑结构。此外, 聚合物材料也被广泛应用于管道的防护层和压力层, 其轻质、耐腐蚀、耐磨损等特性使其成为理想的材料选择。聚合物

材料还能够提供良好的柔韧性和变形能力,符合柔性机械管线在海洋工程中的特殊需求<sup>[4]</sup>。除了材料本身的特性外,对材料的工艺处理和加工质量也有着严格的要求,以确保管线在恶劣海洋环境下的稳定运行和安全可靠。对于柔性机械管线的材料选择和特性需进行深入研究和精心把控,以满足其在复杂海洋工程中的各项功能要求。

### 2.3 海洋环境对管线的基本要求

在海洋环境中,管道对其性能的要求越来越高,其中最重要的是抗压、耐腐蚀、耐磨。在海洋环境中,压力大,温差大,海水腐蚀严重,这对管道的材质与结构的要求非常高。另外,波浪和潮流等动力因素也给管道的稳定与可靠带来了挑战。为满足上述需求,对管道材料提出了高强度、高韧性、耐腐蚀的要求。柔性机械管道还必须具备灵活多变的特性,才能更好地适应复杂多变的海洋环境。管线的材料需要具备较高的强度和韧性,并且要具有良好的耐蚀性能。柔性机械管线需要具备良好的柔韧性和变形能力,以适应复杂的海底地形和动态海洋环境<sup>[5]</sup>。

### 2.4 材料与结构设计的影响

在柔性管道中,材料与结构的设计对管道的力学性能起着决定性的作用。为了保证管道的工作性能,选用适当的材质和结构是非常关键的,柔性管道的材质对其使用性能有很大的影响<sup>[6]</sup>。常用材料有金属、塑料、橡胶等,它们各有各的特点和应用领域。比如,不锈钢、碳素钢等金属材料,其强度高、抗压性能好,适合在深海、高压条件下使用;而塑胶、橡胶等材质,由于其抗腐蚀能力强,重量轻,适合在浅海及普通环境中使用。

### 2.5 结构设计原理与实践

在挠性机械管道的生产过程中,结构设计是一个非常关键的问题,它与管道的形状、尺寸和连接方式有关。该结构的首要目的是保证管道在受到外力作用时仍能维持其稳定性,避免产生过大的变形及应力集中。在工程实践中,常用的结构设计方法有多层结构管线的布置、加强筋的设计、节点的加固等。

### 2.6 材料与结构对力学性能的贡献

柔性管道的受力特性受材料与结构设计的综合影响。一方面,管道的抗压强度、抗拉强度等主要受材料性质的影响;另外,管道的结构设计直接影响管道在各种荷载作用下的弯曲和变形行为。

## 3 海洋环境因素对管线性质的影响

海水对管道的腐蚀作用,对管道材料的防腐能力提出了更高的要求。由于海底地形的起伏和起伏,管道会

承受挤压、拉伸、弯曲等多重受力效应。在海洋环境下,波浪、海流等动力作用对管道的磨损及疲劳失效也是一个重要的问题。

### 3.1 海水压力与温度效应

海水压力、水温等环境因子对管道的工作性能有显著影响。在深水环境下,随水深增加,管道承受的静压越来越大。此外,当水温随水深下降时,水温也会随之下降,对管道材料的使用也有很大的影响。高压、低温等因素会引起管道材料的形变、脆性等损伤,因而在管道材料的设计与选型中必须充分考虑到这些因素的影响。

### 3.2 海浪、潮流与地震的影响

海浪和潮流所带来的动态载荷会对管线产生波动力,造成管线的振动和应力集中,甚至引发疲劳裂纹和损伤<sup>[7]</sup>。在管线设计时需要考虑到海洋动力环境的复杂性,采取合适的减振措施和结构加强手段,以提高管线的抗风浪和抗潮流能力,确保其在动态水下环境中具备稳定的运行性能。地震在海底地质中可能引发地质灾害,如滑坡和地震涌浪等,对管线的稳定性和完整性构成威胁。

### 3.3 生物与化学腐蚀因素

海水中有大量的微生物、藻类、海洋生物等,这些微生物会粘附于管道表面,形成生物膜,促进管道的腐蚀与退化<sup>[8]</sup>。以硫酸根还原菌为代表的微生物对金属具有强烈的腐蚀性,导致管道内的金属受到侵蚀,同时,氯离子等化学物也会引起金属的腐蚀,从而加速管道材料的老化及疲劳开裂。

## 4 力学性能的实验研究与模拟分析

深海环境下,柔性管道面临高压、变温、腐蚀、波浪、潮流等多种复杂苛刻条件。为保证此类管道的使用性能与安全,对其力学特性的研究显得尤为重要。利用实验与数值模拟相结合的方法,对柔性管道的力学特性进行评价与预测。

### 4.1 实验设备与方法介绍

水工模型试验可以模拟海洋环境中管线受力情况,通过在实验室内建立缩尺模型来模拟真实海洋环境,并观测和测试柔性机械管线在各种力学载荷下的响应。在进行水工模型试验时,需要配备大型水槽设备以模拟海床地形,波浪发生器和风压模拟器用于模拟海浪和风力作用,以及高精度传感器和测量仪器用于监测管线位移、应变、受力等参数。还需要考虑海水动力学参数、海床特征等因素,确保实验结果能够准确反映实际海洋环境中管线的受力情况<sup>[9]</sup>。在模拟分析方面,有限元分析等计算方法被广泛应用于柔性机械管线的力学性能研

究。有限元分析软件可以建立包括海床特征、海水动力学参数、管线结构特性等方面的数值模型,并进行静力和动力响应的数值模拟分析。这种模拟分析方法可以有效地预测管线在海洋环境中的受力行为,为设计和运行提供参考依据。综合考虑实验研究和模拟分析的结果,可以全面了解柔性机械管线在海洋环境中的受力情况。实验室通常需要配备水槽试验台、波浪模拟装置、高精度测力传感器、应变片等实验设备,以开展柔性机械管线在海洋环境下的力学性能研究与分析<sup>[10]</sup>。

压力测试设备能够模拟深海的高压环境,以测试管线的抗压性能。常用的设备包括压力釜和压力容器。通过逐渐增加压力,观察管线的变形和破裂情况,并记录相关数据。弯曲测试装置用于模拟管线在海洋中受到的弯曲载荷。通常,管线的一端固定,另一端施加弯曲力,以评估其弯曲刚度和耐久性。由于海洋环境中的波浪和潮流会导致管线承受周期性载荷,因此需要进行疲劳测试<sup>[11]</sup>。疲劳测试系统可以模拟不同频率和幅度的载荷,以评估管线在不同循环次数下的性能退化。

#### 4.2 压力、弯曲、疲劳等测试结果分析

分析管线在不同压力下的变形和应力分布,了解其抗压性能。将实验数据与理论模型进行对比,验证模型的准确性。此外,观察管线在高压下的微观结构变化,有助于理解其材料特性与力学性能之间的关系<sup>[12]</sup>。应力和应变数据评估其弯曲刚度和耐久性;观察管线的表面裂纹和内部损伤,了解其在弯曲过程中的行为和潜在的失效模式。

#### 4.3 模拟分析在研究中的应用与验证

除试验研究外,仿真分析也是评价柔性机械管道力学特性的一个重要手段。本文提出了一种新的管道结构设计方法,即利用该方法对管道的受力性能进行了预测与分析。通过本项目的研究,可以加深对复杂海洋环境下管道的工作性能的认识,为管道的优化设计提供理论依据。有限元法可以用来计算管道的应力分布、变形及稳定性等。利用有限元分析方法,对管道在各种荷载、环境等因素作用下的受力性能进行分析,并对其进行安全评价。通过与试验数据的比较,验证有限元分析方法的精度和可靠性。

## 5 结论

在海洋环境下,海底管道将受到高压、温差、腐蚀等诸多因素的影响。本文采用试验与数值计算相结合的方法,对各种因素对管道工作特性的影响进行了较为深入的研究。通过对试验数据的对比分析,证明了仿真计算的可靠性。在此基础上,对其结构进行了进一步的研究,为其在工程中的应用奠定了基础。本项目的实施将为深海环境中柔性机器管道的安全运行提供重要的理论基础与技术支持。在今后的工作中,还需要对其进行更多的研究,并对其进行更多的试验与仿真,以进一步提高其性能与安全。

## 参考文献

- [1]吉玲康,孙国民,贾书君等.L485高应变海洋管线管开发和应用技术研究进展[J].石油管材与仪器,2022,8(06):1-14.
- [2]马亚光,宋旭光,于有亮等.海洋石油平台工艺管线材料质量控制浅析[J].石油和化工设备,2022,25(07):58-60.
- [3]韩羽.海洋石油平台工艺管线防腐技术的发展[J].石化技术,2022,29(02):100-101.
- [4]迟海明,赵国宾,王鑫.海洋平台工艺管线的压力试验[J].化工管理,2021,(33):107-108.
- [5]房树锋,李福春,肖峻峰.海洋平台管线振动控制研究[J].机械工程师,2020,(12):73-74+78.
- [6]裴艳斐.试析海洋石油平台工艺管线防腐技术的发展[J].化工管理,2019,(31):70-72.
- [7]田中旭,汪俊,程敏杰等.海洋管线涡激振动流体力数据查询研究[J].机械设计,2019,36(07):42-45.
- [8]张琪.海洋桩基及管线周围海床的局部冲刷问题研究[D].上海交通大学,2019.
- [9]李硕存,刘吉飞,郝孟江等.海洋石油平台栈桥管线布置分析[J].石化技术,2019,26(06):343+342.
- [10]尚丽军.海洋柔性管线防弯器的优化设计研究[D].中国石油大学(北京),2019.
- [11]赵海坤.海洋柔性管线扭转失稳及可靠性研究[D].中国石油大学(北京),2019.
- [12]高玉凤.海洋石油平台常用非金属管线材料介绍[J].辽宁化工,2019,48(04):380-381.