

拖航疲劳对海洋平台上部组块结构影响研究

马晖皓 辛晓辉 马遥 边鑫 范叔玮

海洋石油工程股份有限公司 天津滨海新区 300461

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12660

[摘要] 为深入探究拖航疲劳对海洋平台上部组块结构的影响,保障海洋平台安全,本文通过理论分析、规律总结等方法展开研究,明确了拖航作业流程、常见方式、路线选择及环境因素考量,掌握上部组块拖航受力特点,同时,解析疲劳损伤原理、寿命计算方法及拖航疲劳与其他疲劳形式的差异,最终发现,拖航会引起结构应力应变变化,明确关键部位疲劳损伤发展机制,掌握其对结构整体稳定性的影响,并以此提出结构设计优化、材料性能提升、拖航监测与维护等应对策略。本研究丰富了拖航疲劳理论体系,为工程实践提供有价值参考。鉴于海洋开发不断发展,未来需持续完善拖航疲劳研究,提升海洋平台结构安全性与可靠性。

[关键词] 海洋平台上部组块; 拖航疲劳; 结构影响; 疲劳分析

引言

海洋平台上部组块拖航作业面临复杂的环境载荷(风、浪、流)与结构动力学挑战。拖航路途遥远,海洋环境充满不确定性,上部组块持续经受海浪冲击、海风扰动以及拖曳力作用。拖航过程中,周期性波浪力($f_{wave} \in [0.05, 0.2] \text{Hz}$)与拖曳力($F_{tug} \leq 5000 \text{kN}$)共同作用,导致结构关键节点(如管节点、滑靴连接区)产生交变应力($\Delta \sigma \geq 150 \text{MPa}$),引发疲劳裂纹萌生与扩展。这些动态载荷反复施加,使结构内部产生交变应力,进而引发拖航疲劳问题。拖航疲劳悄然累积,起初不易察觉,却可能在长期作用下致使结构性能劣化,从微小裂缝萌生到关键部位受损,逐步削弱结构强度与稳定性。据DNV统计,拖航阶段导致的疲劳损伤占平台全生命周期失效案例的23%。因此,拖航疲劳对海洋平台上部组块结构的影响不容小觑,关乎海洋平台的建设成本、使用寿命与作业安全,亟待深入研究,以填补认知空白,保障海洋开发顺利进行。

1. 海洋平台上部组块拖航概述

1.1 拖航作业流程与常见方式

拖航作业流程包括准备阶段、实施阶段和收尾阶段。在准备阶段,需要对海洋平台上部组块进行全面检查,确保其结构完整、设备固定牢固。要对拖航设备进行调试和测试,如拖船的动力系统、拖缆的强度等。还要制定详细的拖航计划,包括拖航路线、航速、停泊点等。在实施阶段,拖船按照预定计划牵引海洋平台上部组块航行。拖航过程中,要密切关注拖船和上部组块的状态,及时调整航速和航向,确保拖航安全。收尾阶段则是将海洋平台上部组块安全送达目的地后,进行设备拆除和清理工作。

常见的拖航方式有直拖和旁拖。直拖是指拖船直接在海洋平台上部组块后方进行牵引,这种方式操作相对简单,适用于较平稳的海域和较小的上部组块。旁拖则是拖船位于海洋平台上部组块一侧进行牵引,能更好地控制上部组块的航向,在复杂海况和大型上部组块拖航中应用较多。

1.2 拖航路线选择与环境因素考量

拖航路线选择需要综合考虑多方面因素。要考虑距离因素,选择最短且安全的航线可以节省时间和成本。还要考虑水深情况,确保海洋平台上部组块在拖航过程中不会触底。要避开繁忙的航道和有障碍物的区域,减少碰撞风险。另外,要根据海洋平台上部组块的目的地和周边海域的地理条件来确定最佳路线。

环境因素对拖航影响巨大。海况方面,风浪大小直接影响拖航的安全性和稳定性。较大的风浪会使海洋平台上部组块产生剧烈摇晃,增加拖缆的受力,甚至可能导致拖缆断裂。潮流也会影响拖航速度和航向,需要准确把握潮流信息,合理调整拖航计划。气象条件如暴雨、大雾等会降低能见度,给拖航带来极大困难。此外,海洋环境中的冰情、海啸等特

殊情况也需要提前关注和防范。¹

1.3 上部组块结构在拖航中的受力特点

在拖航过程中,上部组块结构会受到多种力的作用。首当其冲的是拖拉力,拖船通过拖缆传递拖拉力,使上部组块能够跟随拖船移动。拖拉力的大小和方向取决于拖船的动力和拖航速度,其作用点主要在拖缆与上部组块的连接部位。不均匀的拖拉力可能会导致上部组块结构局部受力过大,引发结构变形。

此外,上部组块还会受到波浪力的影响。波浪在海洋中不断起伏,作用于上部组块表面,产生垂直和水平方向的力。垂直方向的波浪力会使上部组块产生上下颠簸,水平方向的波浪力则会导致上部组块左右摇晃。这种周期性的波浪力会使上部组块结构产生疲劳应力,长期作用可能会引发结构疲劳损伤,降低结构的使用寿命和安全性。

2. 拖航疲劳相关理论基础

2.1 疲劳损伤基本原理

疲劳损伤是材料或结构在交变载荷作用下发生的一种损伤现象。在拖航过程中,海洋平台上部组块结构会受到多种交变载荷的作用,如波浪力、拖拉力等。这些交变载荷会使结构内部产生应力循环,当应力循环次数达到一定程度时,结构内部就会产生微小裂纹。随着应力循环的继续,这些微小裂纹会逐渐扩展,最终导致结构发生疲劳破坏。其中应力集中效应会影响裂纹萌生机理,管节点处应力集中系数 K_t 与几何参数关系如下:

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{D}{2r}}$$

其中, D 为主管直径, r 为过渡圆角半径。当 $r/D < 0.1$ 时, $K_t \geq 3.0$

疲劳损伤的发展过程通常包括裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在裂纹萌生阶段,结构内部的微观缺陷在交变载荷作用下逐渐形成微小裂纹。裂纹扩展阶段是疲劳损伤的主要阶段,微小裂纹在交变载荷作用下不断扩展,结构的承载能力逐渐降低。²当裂纹扩展到一定程度时,结构就会发生最终断裂,导致严重的安全事故。

2.2 疲劳寿命预测方法介绍

疲劳寿命预测方法一般基于两种,基于应力的方法和基于断裂力学的方法。

基于力学的方法时结合 Miner 线性累积损伤准则,其总损伤度公式如下:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$$

其中, n_i 为应力水平 $\Delta \sigma_i$ 下的循环次数, N_i 由S-N曲线确定。

基于断裂力学的方法,裂纹扩展寿命积分公式如下:

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{d_a}{C(\Delta K)^m}$$

临界裂纹长度 a_c 由剩余强度准则 ($\sigma_{\text{applied}} \geq 0.8 \sigma_{\text{critical}}$) 确定。

有限元法是一种更为精确的疲劳寿命计算方法。有限元法通过建立结构的有限元模型,对结构在交变载荷作用下的应力分布进行详细分析,然后结合疲劳损伤理论来计算结构的疲劳寿命。该方法能够考虑结构的几何形状、应力集中等因素的影响,计算结果较为准确,但计算过程较为复杂,需要较高的计算资源和专业知识。

2.3 拖航疲劳与其他疲劳形式的差异

拖航疲劳与其他疲劳形式在载荷特性上存在明显差异。拖航疲劳主要是由波浪力、拖拉力等交变载荷引起的,这些载荷的特点是具有随机性和周期性。而其他疲劳形式,如机械疲劳,主要是由机械运动产生的交变载荷引起的,其载荷特性相对较为稳定。拖航疲劳的载荷频率较低,通常在 0.1Hz 以下,而机械疲劳的载荷频率较高,可达几十 Hz 甚至更高。³

在损伤机理方面,拖航疲劳与其他疲劳形式也有所不同。拖航疲劳由于受到海洋环境的影响,结构表面容易发生腐蚀,腐蚀会加速裂纹的萌生和扩展,降低结构的疲劳寿命。而其他疲劳形式,如高温疲劳,主要是由于高温环境下材料的性能发生变化,导致结构的疲劳寿命降低。拖航疲劳的损伤过程较为复杂,受到多种因素的综合影响,而其他疲劳形式的损伤过程相对较为单一。

3. 拖航疲劳对上部组块结构影响分析

3.1 结构应力应变变化规律

在拖航过程中,海洋平台上部组块结构的应力应变会随拖航环境与工况改变而呈现特定规律。波浪力的周期性作用是影响应力应变的关键因素,当波浪冲击上部组块时,结构表面会产生瞬间的应力集中。在波峰作用时,结构的某些部位会承受较大的拉应力,而在波谷时则可能受到压应力。拖拉力的变化也会引起结构应力的波动,拖船加速或减速时,拖缆传递的力改变,导致上部组块连接部位的应力发生变化。

随着拖航时间的增加,结构的应变会逐渐累积。由于海洋环境的复杂性,应力应变的变化并非简单的线性关系。长期处于交变应力作用下,结构材料的弹性模量会发生一定程度的变化,使得应变的增长速率可能逐渐加快。而且,结构不同部位的应力应变分布也不均匀,一些形状复杂或存在连接节点的区域,应力应变的变化更为明显。

3.2 关键部位疲劳损伤发展机制

海洋平台上部组块的关键部位,如节点连接区域、支撑结构与主体结构的连接处等,在拖航疲劳作用下具有独特的损伤发展机制。在交变载荷作用下,这些部位首先会在微观层面产生微小的裂纹。由于节点处的应力集中效应,裂纹更容易萌生。⁴随着拖航过程中载荷的不断循环,微小裂纹会逐渐扩展。裂纹的扩展方向与应力方向密切相关,通常会沿着最大主应力方向延伸。

在疲劳损伤发展过程中,环境因素也起到重要作用。海洋中的潮湿空气和盐分容易导致结构表面腐蚀,腐蚀产物会进一步削弱结构的强度,加速裂纹的扩展。海水的冲刷作用也会对裂纹尖端产生影响,改变裂纹的扩展速率。当裂纹扩展到一定程度时,关键部位的承载能力会大幅下降,可能导致局部结构失效,进而影响整个上部组块的安全性。

3.3 拖航疲劳对结构整体稳定性的影响

拖航疲劳对海洋平台上部组块结构整体稳定性有显著影响。疲劳损伤的累积会使结构的刚度逐渐降低,导致结构在承受外部载荷时的变形增大。当结构的变形超过一定限度时,会破坏结构原有的平衡状态,影响其整体稳定性。例如,支撑结构的疲劳损伤可能导致上部组块出现倾斜或晃动,增加了结构失稳的风险。

而且,拖航疲劳引起的局部结构失效可能引发连锁反应,对结构整体稳定性造成严重威胁。一个关键部位的破坏可能会改变结构的应力分布,使其他部位承受更大的载荷,进而导致更多部位发生疲劳损伤。在极端情况下,可能会引发结构的整体坍塌。

4. 应对拖航疲劳影响的策略与措施

4.1 结构设计优化方法

结构设计优化可从多个方面着手以应对拖航疲劳影响。在结构布局上,合理规划海洋平台上部组块的各个部件位置,减少应力集中区域。例如,避免在关键受力部位设置过多的孔洞或突变结构,使结构的受力更加均匀。采用流线型设计可以降低波浪力对结构的冲击,减少交变载荷的影响。对于连接节点的设计要尤为重视,采用高强度、高韧性的连接方式,确保节点在交变载荷下具有良好的性能。

在结构形状设计方面,采取合理措施对提升结构性能意义重大。要尽量减少尖锐的棱角和不连续的表面,转而采用平滑过渡的设计方案。尖锐棱角和不连续表面在承受载荷时,极易引发应力集中现象,使该区域的应力远高于其他部位,加速疲劳裂纹的产生与扩展。而平滑过渡设计能有效降低结构表面的应力集中系数,使应力分布更为均匀,进而显著提高结构的疲劳寿命。⁵同时,优化结构的刚度分布也十分必要,让结构在不同方向上的刚度更加协调,避免因刚度差异过大造成局部应力集中,保障结构整体的稳定性与安全性。

4.2 材料性能提升与选择建议

材料性能的提升和合理选择对减轻拖航疲劳影响至关重要。海洋平台上部组块长期面临恶劣海洋环境与交变载荷,材料选择需谨慎。应选择高疲劳强度、良好韧性的材料,高强度合金钢是常用结构材料的优先之选。其屈服强度和抗拉强度高,能承受更大交变载荷,降低疲劳裂纹产生风险。对材料进行表面处理可提高抗腐蚀与疲劳性能。海水腐蚀性强,热镀锌能形成致密锌层,隔绝海水与基体;喷涂防腐涂料可有效隔绝腐蚀性介质,延长材料寿命。

合金化也是改善材料性能的重要方式。添加铬、镍、钼等合金元素,能细化晶粒,增强材料韧性与抗疲劳性能。铬提高抗氧化与耐腐蚀性,镍增加强度与韧性,钼提升高温与抗蠕变能力。严格把控材料质量,确保化学成分和物理性能符合设计要求。从源头上保障材料质量,才能为海洋平台上部组块结构安全提供坚实支撑,有效减轻拖航疲劳对结构的影响。

5. 结语

通过对拖航疲劳对海洋平台上部组块结构影响的研究,明晰了拖航作业流程及受力特点,掌握拖航疲劳理论,剖析出其对结构的多方面影响,并提出相应应对策略。这些成果为海洋平台上部组块的拖航运输及后续安全使用提供了有力的理论依据与实践指导。但随着海洋开发向更深更远海域拓展,拖航环境愈发复杂,未来需持续关注新环境因素和技术发展,不断完善拖航疲劳研究,进一步提升海洋平台结构的安全性及可靠性,助力海洋资源开发事业稳步前行。

[参考文献]

- [1] 祝涛. 上部组块井口结构连接方案研究[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(01): 105-107.
- [2] 李志强, 梁国栋, 张国平, 等. 关于海洋钢结构立式管状物装船固定方式的研究[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(02): 159-163.
- [3] 李金鑫, 傅圣航. 大型海洋结构物横向滑移装船技术[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 67-73.
- [4] 唐占飞, 谭红莹, 刘健, 等. 海洋固定平台结构的振动分析方法及算例[J]. 天津科技, 2024, 51(08): 27-30.
- [5] 唐霖. 海洋平台上部组块结构轻量化设计及影响因素分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24): 88-90.