

新型复合材料在海洋油气平台结构中的经济性评估研究

孔 飞 高园园 (中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300450)

摘要: 海洋油气平台长期受高腐蚀海洋环境制约, 传统钢结构的持续维护与寿命限制逐渐成为开发效益的瓶颈。新型复合材料凭借轻量化、耐腐蚀性等特性, 为平台结构升级提供了方向, 但其经济性需立足全生命周期框架综合评估。本文从应用场景适配、全周期成本维度、海域场景差异及瓶颈优化等方面, 系统分析其相对传统结构的长期优势, 提出切实可行的推广路径, 为平台材料选型与行业效益提升提供支撑。

关键词: 新型复合材料; 海洋油气平台结构; 经济性评估

中图分类号: TE95; TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0038-03

Economic Evaluation of New Composite Materials in Offshore Oil and Gas Platform Structures

Kong Fei, Gao Yuanyuan (CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Marine oil and gas platforms have long been constrained by highly corrosive marine environments, and the continuous maintenance and limited lifespan of traditional steel structures have gradually become bottlenecks in development efficiency. The new composite materials provide direction for the upgrading of platform structures due to their lightweight and corrosion resistance characteristics, but their economic viability needs to be comprehensively evaluated based on the entire lifecycle framework. This article systematically analyzes its long-term advantages over traditional structures from the perspectives of application scenario adaptation, full cycle cost dimension, differences in marine scenarios, and bottleneck optimization, and proposes practical and feasible promotion paths to provide support for platform material selection and industry efficiency improvement.

Keywords: New composite materials; Structure of offshore oil and gas platforms; Economic evaluation

作为深海能源开采的重要载体, 海洋油气等深海能源开采面临着高盐雾、交变波浪和高温度变化等复杂多变的工况, 对其耐久性和维修方便性等方面有着苛刻的要求。传统的钢铁结构是目前最主要的平台形式, 然而, 在运行期间, 需要对防腐处理、部件维修和替换等环节进行不断的投资, 不但耗费了巨大的人力和物力, 而且由于构件损坏而导致生产停滞, 给企业带来了巨大的经济和安全压力。

为此, 从全生命周期角度对其进行系统评价, 明晰其优势和不足, 并提出相应的优化途径, 对于促进我国海工装备材料技术水平的提升和开采效益的提高, 均有重要的实际价值。

1 新型复合材料在海洋油气平台结构中的应用场景与特性适配

海洋油气平台结构由导管架、甲板、管道和系泊等组成, 其服役条件和工作要求各不相同, 而新材料的特点能够与之实现精确匹配, 随着使用场合的不断深化, 其使用价值也逐步显现出来。

1.1 导管架: 支撑结构的腐蚀与疲劳缓解

导管架是海洋工程中的重要组成部分, 既要承担海洋环境荷载, 又要承担平台上部结构重量。常规的管道结构在长期的交替荷载与恶劣的服役条件下易发

生局部损伤, 需要频繁地进行维修或更换破损构件。这种做法不但造成了巨大的物料及人工费用, 而且由于维修作业占用大量作业时间, 造成了生产过程的间断。新型复合材料导管架可在无附加防护的情况下, 实现对混凝土构件的直接抗蚀, 降低构件的疲劳破坏速率, 降低构件的长期维修要求。此外, 由于其重量较轻, 无需依靠大型吊装机械即可完成, 可以极大地减少建造过程中的工作量^[1]。

1.2 甲板: 作业承载与环境耐受的双重适配

甲板结构作为海上工程装备的重要组成部分, 不仅需要承担重型装备运动所产生的荷载需求, 还需要能够承受长时间的海上服役。常规海洋油气平台上的防腐涂料需进行周期性修补, 但由于工作负荷较大, 涂装后易发生破损、脱落, 且维修过程中需对工作场地进行清理, 严重降低了船舶的工作效率。该新型复合材料板在不需要附加涂料保护的情况下, 可实现对其进行长周期的抗磨损与结构稳定, 这既降低了维修所需要的人力与时间费用, 又可以防止由于维修而导致的生产停顿, 从而保证工作的持续进行。

1.3 管线系统: 输送效率与安全的双向保障

管线担负着石油与天然气的运输重任, 而常规钢材管道由于腐蚀而存在渗漏风险, 且管道内壁极易结

垢,造成管道运行效率降低,因此必须对其进行常规的监测与清洗。这种作业不但消耗了很多的能源,而且由于管道的关闭,会对石油和天然气的产量产生很大的影响。该新型复合材料管道具有良好的防腐性能,管道内壁平滑,无污垢,可在较长时间内维持平稳的传输,减少检测、清洗及更换;由于管道中液体的流动阻力较小,可以减少管道中的能量消耗,从而间接提高开采中的能量利用率。

1.4 系泊系统: 交变载荷下的稳定性维持

系泊系统连接平台与海底基础的关键结构,其长期承受交变载荷,传统系泊结构存在结构稳定性不足、使用寿命较短的问题。这一环节既要使用专用的船只,又要使用专用的装备,不但费用昂贵,时间也十分漫长。该新型复合材料系泊结构具有耐疲劳能力强、可长时间保持结构稳定、减少替换次数及安全性隐患等优点,且其轻质特点可简化施工及维修流程,减少作业复杂性及相应费用^[2]。

2 经济性评估的核心维度: 全生命周期框架

复合材料的经济性并非单一环节的成本对比,需立足全生命周期视角,覆盖从结构生产到废弃处置的全部环节,同时纳入性能增益带来的间接价值,才能客观反映其真实经济价值。

2.1 初期投资: 多环节成本的平衡

行业对复合材料的初期成本认知多聚焦于原材料采购,但实际初期投资涵盖采购、加工、运输与安装多个环节。复合材料原材料成本虽高于普通钢材,但模块化加工可减少零部件数量,降低装配环节的人工成本——部分部件可提前完成预制,现场仅需拼接,无需复杂焊接作业;同时轻量化特性使其运输无需依赖超大型船舶,安装过程无需调用巨型起重设备,可节约大量设备租赁与时间成本。更重要的是,复合材料的施工对现场团队的专业技能要求更加灵活,无需额外培训高价的防腐作业人员,进一步压缩了初期隐性成本,最终初期总投资可与传统结构持平甚至略低。这种多环节的成本平衡,打破了“复合材料初期成本更高”的单一认知。

2.2 运营维护: 长期成本的核心优势

这是复合材料相对传统结构的核心优势环节。传统结构需定期进行防腐处理、部件检测与更换,过程中不仅消耗材料与人工,更可能因施工中断生产,形成直接成本与间接效益损失的叠加。而复合材料结构无需额外防腐措施,损伤速率显著降低,维护周期可延长数倍,且维护多为局部轻微处理——比如表面磨损仅需简单打磨修复,无需清空作业区域,可在常规生产间隙完成。同时,传统结构需储备大量易腐蚀部

件的备件,占用仓储空间与资金,复合材料备件种类少、更换频率低,可大幅减轻库存压力。长期积累下,不仅节约了大量维护资源,更保障了生产的连续性,避免了效益损失^[3]。

2.3 废弃处置: 环保与成本的双重优化

平台报废后的处理是一个很难被忽略的费用链。常规的钢结构拆卸不仅耗能巨大,还会产生有毒有害物质污染周围环境,加大了处理过程中的环保费用及合规风险。通过热解和机械破碎等方法,可以使复合材料的分解能量更小,从而达到回收再用的目的,这既可以减少直接处理费用,又可以满足环境保护的需要,又可以提高资源的使用效益。

2.4 间接收益: 特性带来的附加价值

复合材料的性能优势还能带来诸多间接收益。其轻量化特性可降低地基承载要求,简化设计与建造流程,节省地基施工及连接成本;同时,其上层结构更加具有弹性,可以增大装置容量,提高单个平台的原油和天然气加工能力。其长寿特征可在较大程度上分散前期投入,减少平均运营费用,并支撑其延迟退役,获得更多的生产效益。提高系统的稳定与可靠度,可以有效地降低系统的安全风险,防止系统因意外而造成的巨大经济损失与信誉冲击,还可以减少系统的保险成本。尽管这种间接利益并不能在经济上得到直观的反映,但它对发展的整体利益有明显的促进作用^[4]。

3 不同海域场景下的经济性差异

近海海域的大部分平台都靠近海边,在搬运和装配时,对装备的需求比较松散,但由于海水中的盐分含量高,常规的钢铁结构腐蚀维修更为频繁,维修导致的生产中断对收益的影响也更加明显^[5]。此外,由于近海多为群集式布局,常规的维修方式不但耗费了单一平台的人力、物力,而且也影响到了该地区的维修工作,造成了集群内部的维修队伍,从而造成了大量的作业中断。在该应用环境中,降低单一平台维修要求、节约维修成本、提高总体运行效率,具有较强的长期经济效益。

深海作业平台距离近海较远,需要依靠大型船只及装备进行作业,费用高昂。而深海极端气候条件下,常规维修方式通常要等到海情窗口,否则将错失最好维修时机,或面临高海情投入较大的风险。该应用中,复合材料的轻量化特征突出,可有效降低其在搬运、装配等过程中对装备的要求,并降低该部分的费用比重;同时,它的长期维修特点无需对具体的窗口期进行调整,可在正常工作间隔内进行,不仅可以减少操作风险,还可以规避因等候窗而造成的浪费,从而将其优点发挥到极致。

4 实际场景中的经济性对比

以某近海集群平台中的一座为例,传统钢结构每年夏季需进行为期两周的防腐涂层修复,而夏季正是该区域油气产出的旺季,单周停产损失即可覆盖小半年度维护成本,连续十年累计的停产损失已接近初期投资的30%。且每次维护需协调区域内的防腐作业团队,常因资源紧张延迟1-2周开工,进一步放大效益损耗。而相邻的复合材料结构平台,投用后仅在第五年进行过一次局部表面磨损处理,操作在作业间隙完成,未中断生产,十年内的维护成本不足传统结构的20%,且无任何停产损失。再看某深远海平台,传统钢结构每三年需动用专业维护船舶进行杆件检测,受海况限制,每次检测需等待1-2个月的窗口期,船舶租赁与人员待命成本占检测总费用的40%,且检测过程中需暂停部分生产作业。而复合材料平台的检测周期延长至十年,且可通过远程应力监测替代部分现场检测,不仅节约了检测成本,更避免了窗口期等待的资源消耗与生产影响。

若考虑平台中期升级,传统钢结构需拆除原有部件并重新焊接,改造周期长达一个月,其间平台完全停产;复合材料结构则可通过模块化替换完成升级,周期缩短至一周,且改造过程仅需隔离局部区域,不影响其他区域作业,进一步保障了生产连续性,间接提升了年度收益。

5 经济性瓶颈与优化路径

5.1 初期成本认知偏差

大部分企业的成本核算主要聚焦于工程短期预算,而未考虑到长期维护的人工和停产造成的损失,这就造成了初始购买成本大。为此,应促使产业机构开发包含不同类型海域和不同平台类型的造价指标的全周期费用计算方法,以便于企业迅速计算出不同海域和不同类型的工程造价。并在此基础上,提出了在工程评价中引入工程费用的方法,指导项目组从长远利益出发,突破单项造价认识上的误区。

5.2 加工规模化不足

我国复合材料制造多以小批量定制为主,其制造效率低下,并且造成了产业链上的分散支持,使得零件采购周期长,成本高,并且很难保证产品的一致性。最优途径是以龙头企业为龙头,构建标准化的制造工厂,在原料规范和制造过程上达成一致,以达到量产的目的。与此同时,促进供应链企业与标准化的零件生产线相匹配,建立起从原料到成品的大规模供应系统,减少生产和购买费用,提高交货速度和品质的稳定性。

5.3 回收体系不完善

我国复合材料废旧产品的资源化利用水平普遍偏

低,产品增值率不高,无法弥补其资源化利用的费用;同时,由于产业间缺少一个可供利用的公共资源,使得废旧物资的处理难度很大。为此,本项目提出了利用可再生材料进行高增值利用的途径,例如利用可再生材料在平台附属结构、锚碇构件等非功能性构件中进行循环利用,提高其市场价值。在此基础上,成立产业再生合作组织,实现对再生资源的规范和流通,减少再生资源的流通和处置费用,实现“制造—应用—再生—再生”的良好循环。

5.4 行业应用经验不足

企业中的工程人员大多对建筑和维修的熟练程度较高,对其工艺需求和检测方法缺乏足够的认识,从而加大了其在工程中的使用风险。为此,我们提出了“大学—企业”合作办学的“复合型”船舶设计、施工和维修专业技术人员;并构建产业共用的工程建设工艺、维修案例等资料,供企业查阅和借鉴,迅速提高其应用水平;另外,还可以培养出一批专业的第三方维修队伍,对企业进行建设和维修,加快其规模应用。

6 结语

基于整个寿命周期理论,对海上石油工程中使用的新材料的经济性进行评价。由于其在运营维护、废弃处理和间接收入等方面的优点,使得该建筑的远期综合造价明显比常规钢材要低得多,并可适应浅海、深海和边际油田等多种使用场合,具有较高的实用价值。目前,基于成本理念的推广,行业标准的制定,回收产业链的完善和经验的分享,将会逐渐解决该问题。随着海上石油勘探向深海延伸和产业对全寿命周期费用认识的不断深入,海上工程结构中的复合材料将逐步由试验性转向大规模,是提高开发效益和保证结构安全的一种有效途径。

参考文献:

- [1] 杨宏茹.高性能热塑性复合材料在海洋环境水下结构中的应用研究进展[J].复合材料学报,2025(01):1-16.
- [2] 陈晓彦,初星澎,段立志,等.海洋工程中复合材料防护结构的安装研究[J].中国水运,2025(05):119-121.
- [3] 肖冬梅.耐海洋腐蚀的双层稀土掺杂铁氧体/聚氨酯吸波复合材料[J].表面技术,2024,53(22):161-170.
- [4] 赵亚梅.超疏水材料的制备及其在海洋领域中应用的研究进展[J].化工新型材料,2022,50(01):34-38.
- [5] 石锦坤.复合材料水下防护结构在海洋油气开发的应用[J].复合材料科学与工程,2021(12):78-81+128.

作者简介:

孔飞(1992-),男,汉族,本科,海洋工程中级工程师,研究方向:石油工程。