

碳纤维船体结构轻量化效果的环境影响分析

卞慧¹, 夏佳伟¹, 韩志强^{1*}, 龚希武¹, 刘呈伟²

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江舟山 316022; 2. 舟山长宏国际船舶修造有限公司, 浙江舟山 316054)

摘要: [目的]为揭示碳纤维船体结构轻量化效果对环境负荷的影响, [方法]以 11 m 碳纤维增强复合材料高速艇为例, 采用全生命周期评估方法进行环境影响评估, 评价指标是大气污染相关的全球变暖潜力 (GWP) 和臭氧层破坏潜力 (ODP)。[结果]结果表明: 基于纤维含量调节的碳纤维船体结构轻量化设计方法, 通过增加纤维用量、减少树脂用量, 当纤维含量为 55% 时, 能够在满足结构安全的同时实现质量最优, 对比设计原案 (纤维含量为 40%) 船体结构减重 12.5%。但碳纤维在制造阶段环境负荷远远高于树脂的, 导致生产阶段的 GWP 与 ODP 分别上升 10.24% 和 14.37%。相反, 运营阶段因船体轻量化, 25 a 内节油 323.98 t, GWP 与 ODP 分别下降 4.13% 和 4.19%。[结论] 营运阶段的周期远远长于制造阶段, 轻量化效果对营运阶段的正面影响可覆盖生产阶段的负面影响。研究可为绿色船舶设计与航运业碳中和提供参考。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 船体结构; 轻量化设计; 环境影响评价

中图分类号: U662 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.06

Analysis of Environmental Impact Assessment for Lightweighting Effects of CFRP Hull Structures

BIAN Hui¹, XIA Jiawei¹, HAN Zhiqiang^{1*}, GONG Xiwu¹, LIU Chengwei²

(1. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China; 2. Zhoushan Changhong International Ship Repair Co., Ltd., Zhoushan 316054, Zhejiang, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) hull lightweighting effect on the environmental impact, [Method] Life cycle assessment on an 11 m CFRP high-speed vessel is conducted, focusing on atmospheric pollution indicators: global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP). [Result] The results demonstrate that the fiber content adjustment-based lightweight design algorithm can achieve a 12.5% reduction of hull structure mass while maintaining structural safety by increasing fiber content from 40% (original case) to 55% (lightweight design case) approximately. However, due to the significantly higher environmental burden of carbon fiber production compared to resin, the manufacturing phase saw increases of 10.24% in GWP and 14.37% in ODP. Conversely, the operational phase benefited from reduced fuel consumption due to lightweighting, saving 323.98 t of fuel over 25 years, which decreased GWP and ODP by 4.13% and 4.19%, respectively. [Conclusion] The operational phase ultimately offset the negative environmental impacts of the manufacturing phase. Critical insights for green ship design and maritime industry decarbonization strategies is provided.

Key words: carbon fiber-reinforced polymer; hull structure; lightweight design; life cycle assessment

收稿日期: 2025-02-22; 修回日期: 2025-05-11

基金项目: 舟山市重大产业科技攻关项目 (2024C03003); 国家自然科学基金委青年科学基金项目 (52501405); 国家级大学生创新创业训练计划立项资助项目 (202310340002)。

作者简介: 卞慧 (2004—), 女, 大学本科。研究方向: 船舶与海洋工程。

通信作者: 韩志强 (1991—), 男, 博士、讲师。研究方向: 海洋复合材料, 船舶设计制造。E-mail: hzq910413@zjou.edu.cn

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有相对密度低、优秀的比强度特性,用于开发结构物相较于其他材料具有更好的轻量化效果,其使用阶段性能更加优越。CFRP材料在汽车、航空和竞技自行车等领域备受欢迎,在特殊目的船舶、豪华游艇和竞技船艇等船舶领域也开始有了应用。国外比较有名的典型案例如瑞典的维斯比级轻型护卫舰、美国的短剑快艇。我国也有碳纤维高速艇的示范,如中国科学院联合上海联亚游艇、汕头扬帆海天游艇等公司联合制造的中科·联亚号等,这些船身几乎全部采用了CFRP材料。本文也进行了CFRP船体结构设计优化的相关研究。HAN等^[1]采用CFRP材料,开发了一艘11 m左右的高速艇,与同尺度的铝合金高速艇相比,其轻量化效果达40%。DAEKYUN等^[2]提出了碳纤维船体结构轻量化设计方法,并将此方法应用于11 m CFRP高速艇,对其进行了轻量化设计,在满足标准规范结构安全性的前提下,船体结构总共减重12.5%。吴大均等^[3]和韩志强等^[4]基于材料试验的方法,验证了碳纤维复合材料船体结构轻量化方法的可行性。

随着船舶行业的碳排放等环境污染等问题越来越受到人们的关注,不只是国际航行的大型商船,小型船舶领域也开始注重环保问题。以小型船舶为研究对象,用于量化评价小型船舶环保性能的研究逐渐增多,在设计开发初期,确定其在使用阶段的环保性能显得越来越重要。然而,尽管已进行了满足结构安全的碳纤维船体结构的轻量化研究,但碳纤维船体结构轻量化对其全生命周期的环境影响较少涉及。综合考虑材料特性、结构优化与环境影响,有助于改进碳纤维结构设计技术,以符合日益严格的环境法规要求。为此,利用广泛使用的环境影响评估方法—全生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA),对结构轻量化引起的CFRP原材料用量变化以及轻量化后引起的排水量、燃油消耗变化对环境的影响进行比较分析;同时,对比本文结果与先行研究结果,分析传统的玻璃钢材料以及碳纤维复合材料的原材料用量对比对船舶产品环境负荷的影响,以供设计人员参考。

1 研究方法

HAN等^[1]设计开发一艘11 m的CFRP高速艇,DAEKYUN等^[2]以该高速艇为对象,利用基于碳纤维船体结构的轻量化设计方法,进行了船体轻量化设计模拟研究。本文以先行研究为基础,以该高速艇的设计原案以及轻量化设计方案为对象,采用LCA方法进行环境影响评价分析。LCA是一种评估从原材料获取(Raw Material)、生产(In Production)、

运输(Transport)、使用(In Use)到废弃与回收(Disposal and Reuse)全过程环境影响的方法,其范围和对象可根据研究目的进行调整。本文重点考虑船舶的生产阶段和运营阶段,即将生产阶段(In Production)与运营阶段(In Use)作为分析对象^[5-6]。

LCA方法是基于“排放因子乘以活动数据的规则”进行环境影响评价。关于排放因子,已有全球主流且可信度高的数据库作为参考依据,所以本文需要考虑活动数据^[7-9]。在生产阶段,计算CFRP高速艇的原设计和轻量化设计方案中船体结构制造所需的碳纤维布和树脂的质量,并对其环境影响进行了比较分析。在满足标准规范的前提下,利用基于先行研究方法的轻量化设计方法,重新设计了船体结构外板,并使用三维计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)模型估算了各结构构件和原材料的质量。在运营阶段,重新估算了轻量化设计方案的阻力和所需功率,并在与设计原案相同的运营条件下,估算了燃料消耗量,并基于此进行了环境影响分析。

2 碳纤维复合材料船体结构轻量化设计

2.1 碳纤维复合材料船体结构轻量化设计方法

本文提出了玻璃钢、碳纤维复合材料船体结构层压板轻量化设计方法。在满足国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的标准和意大利船级社(Registro Italiano Navale, RINA)等标准规范的要求下,该方法主要通过调节复合材料积层板中纤维质量的占比/纤维含量(Glass Fiber Content, G_C),使得复合材料的比强度特性达到最大化,从而实现船体结构减重的材料性能优化。吴大均等^[3]、韩志强等^[4]通过随纤维含量变化的复合材料强度测试,验证了该方法的可行性。在设计原案的基础上,CFRP高速艇的轻量化设计以船体外板为对象,基于RINA设计规范,重新定义轻量化设计流程,完成轻量化设计方案开发。

2.2 CFRP SURC 轻量化设计方案

本文选取的示例船舶是一艘11 m的小型高速舰艇(Small Unit Riverine Craft, SURC),图1为高速艇的三维模型。SURC是一种小型高速艇,主要用于浅水航道环境(如河流区域或近岸海域)的巡逻、侦察以及快速部署任务。这类高速艇需具备高机动性以适应复杂的水文条件以及轻量化的船体结构,以提升航速与续航能力。该高速艇的主尺度见表1。对于船体结构设计,设计原案的纤维含量为40%,基于RINA规范完成,采用的原材料见表2,碳纤维布选择了日本东丽公司T700的正交方格布。在进行轻量化设计时,以船体外板为对象,不改变船型、结构布置等议案船舶设计参数,应用2.1节中轻量化

设计流程, 导出最优的纤维含量, 重新设计的CFRP SURC的船底板和船侧板, 设计原案与轻量化设计

方案的最优纤维含量及设计见图2。

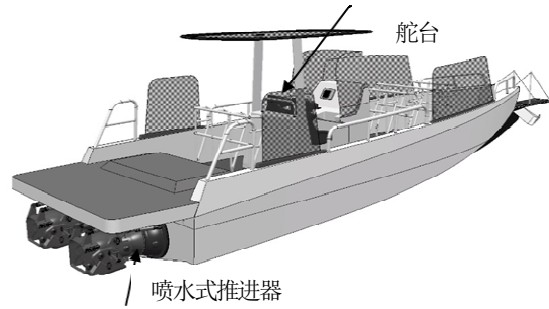
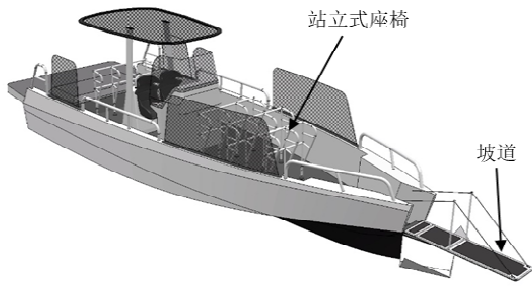


图1 CFRP SURC 的三维模型

Fig. 1 3D Model of CFRP SURC

表1 CFRP SURC 主尺度信息

Tab. 1 Principal Particular of CFRP SURC

参数	数值
总长/m	10.8
垂线间长/m	9
型宽/m	2.823
型深/m	0.7
吃水/m	0.514
方形系数	0.404
排水量/t	5.401
速度/kn	50

表2 CFRP SURC 船体结构设计所用原材料

Tab. 2 Raw Material Information for Hull Structure of CFRP SURC

T 700 碳纤维增强材料	参数	数值
	单位面积质量/(g/m ²)	400
密度/(g/cm ³)	1.80	
拉伸强度/MPa	4 789	
拉伸模量/GPa	242	
KINETIX R118 树脂基体	相对密度	1.11

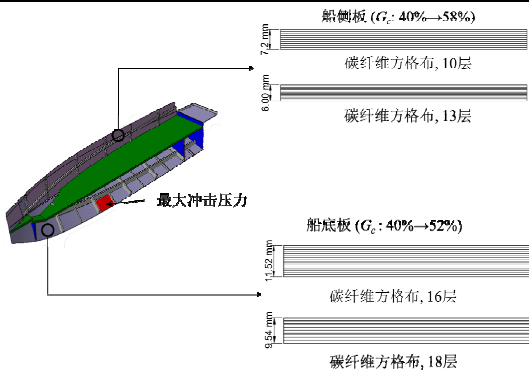


图2 对比方案的最优纤维含量及设计

Fig. 2 Optimum Fiber Content and Design Results of Comparison Plan

按照轻量化设计流程, 重新计算船侧板和船底板各结构的最佳纤维含量, 船底板和船侧板的最佳纤维含量分别为52%和58%。船底板和舷侧板的最佳纤维含量存在一定差异, 这是由于受材料种类、壳体形状等的影响, 针对CFRP SURC的外板, 最优纤维含量为55%。采用导出的各结构的最佳纤维含量, 重新设计船体结构的层板。轻量化设计使得外板减薄, 导致船体中横剖面模数减小, 为了确认结构安全性, 按照RINA规范^[10], 对设计原案和轻量化设计方案进行了总纵强度校核, 结果见图3。由于外板厚度减薄, 最大弯曲应力从0.83 MPa上升至0.84 MPa, 同时纤维含量的上升, 使得材料的许用应力值也上升, 由47.52 MPa上升至67.25 MPa, 安全余量反而有所上升, 因此轻量化设计方案满足结构安全。

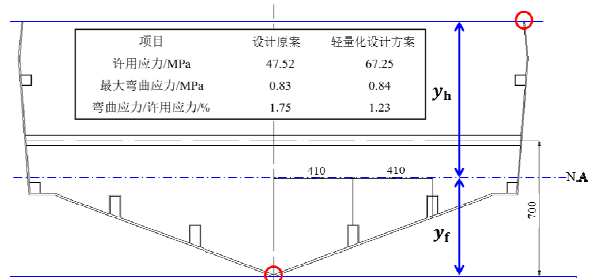


图3 原案与轻量化设计方案总纵强度校核结果比较

Fig. 3 Comparison of Longitudinal Strength Evaluation Results of Original Design and Lightweight Design Case

2.3 CFRP SURC 轻量化效果分析

利用SURC的CAD模型对重新设计的轻量化设计方案的船体质量进行了重新推定, 并整理船体结构的质量变化, 见表3。船底板作为关键的承力结构, 绝对减质量达56.17 kg, 减质量效果为13.1%, 船侧板绝对减质量为16.06 kg, 减质量效果为10.7%, 轻量化设计共减质量77.8 kg, 占比12.5%。

表3 CFRP SURC 的轻量化效果
Tab. 3 Hull Structure Lightweight Effects of CFRP SURC

船体结构	质量/kg		减重效果/%
	设计原案	优化设计方案	
船底板	428.00	371.83	13.1
船侧板	149.65	133.59	10.7
小计	577.65	505.42	12.5

轻量化的总质量减少, 设计原案与轻量化设计方案原材料用量变化对比见图4。但由于整体上各结构最佳纤维含量的上升, 碳纤维布的质量增加了39.77 kg, 增长了17.21%。随着材料强度的增加, 树脂质量从346.59 kg下降为234.59 kg, 下降了32.31%。这表明碳纤维船舶轻量化设计导致纤维的使用量及强度性能增加, 在保证结构强度的同时, 其减少了树脂的用量, 从而减少了船体的总质量。

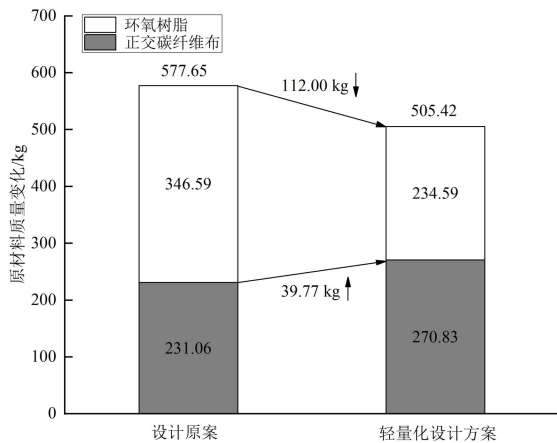


图4 设计原案与轻量化设计方案原材料用量变化对比
Fig. 4 Comparison of Raw Material Changes Between the Original Design and Lightweight Design Case

3 CFRP SURC 设计原案与轻量化设计方案的 LCA 评价

3.1 LCA 环境影响评价方法概述

基于LCA方法判断构成产品的原材料对环境的影响在电子电器、车辆、农业和航空等领域应用十分广泛。近年来, 在小型船体结构设计建造中使用较为广泛的复合材料。本文为判断CFRP SURC船体结构轻量化前后对环境影响, 采用LCA方法进行环境影响评价。LCA定义ISO 14040-ISO 14044的整体系统和原理^[11-15], 并分4个阶段执行。

1) 目的及研究范围的定义阶段, 在此步骤中需选择产品, 确定目的及前提条件。本文选定船舶建造生产阶段 (In Production)、营运阶段 (In Use) 作为分析阶段。对于生产阶段的活动数据, 碳纤维与树脂等原材料用量及船体结构制造阶段消耗的电

力是最主要的活动数据清单, 但由于未建造CFRP SURC, 所以简化模型, 从设计角度出发, 仅考虑原材料的使用量。设计原案与轻量化设计方案的原材料质量变化见图4。对于营运阶段, 涉及最主要的活动数据是燃油消耗。本文基于巡逻艇的典型运行条件, 并利用搭载主机的油耗曲线, 根据船体结构轻量化前后, 分析排水量变化对航行阻力和主机负载的影响, 从而计算燃油消耗量。

2) 目录分析阶段, 此阶段是定量估算产品对环境负荷设定项目的消耗量或排放量的评价过程, 是LCA中最重要的一步。此过程中, 应建立一个收集和计算数据的数据库, 以量化输入和输出。本文将积层板建造时投入的碳纤维增强材料与树脂基体定义为功能单位, 使用数据库ECO Impact Calculator for Composites^[16]。

3) 影响评估阶段, 此阶段是通过从目录分析中获得的结果对自然环境、人类健康及资源环境的影响与环境影响的项目关联化, 量化环境负荷的过程。本文选择与大气污染相关的全球变暖指数 (Global Warming Index) 和臭氧层破坏指数 (Ozone Layer Depletion Index) 作为量化指标, 使用国际参考生命周期数据系统 (International Reference Life Cycle Data Systems, ILCD) 2011 Midpoint作为分析方法。

4) 结果分析阶段, 此阶段分析导出结果与研究目的是否一致。本文分析碳纤维船体结构轻量化对大气污染的影响。

3.2 营运阶段燃油消耗量估算

为估算CFRP SURC设计原案和轻量化设计方案的燃料使用量, 须假设2艘船在相同的条件下及相同的操作场景中使用。设计原案中使用的发动机—沃尔沃 (Volvo Penta) 公司的2组发动机D6-370, 在轻量化设计中同样应用。对于巡逻艇的全生命周期的营运条件, 根据文献[17], 巡逻艇每年巡航1 000次, 每次巡航5 h。在这1 000次中, 300次巡航为主机负载100%, 主机功率最大; 500次巡航为主机负载50%, 200次巡航为主机负载10%。该巡逻艇的寿命拟定为25 a。

为估算轻量化设计方案SURC所需的功率, 改变设计原案的排水量, 重新估算船舶的阻力与功率, 并使用Maxsurf Resistance软件, 基于Savitsky方法进行阻力和功率估算。设计原案与轻量化设计方案在同等航速下所需要的功率见图5, 图5中: 1 hp = 0.735 498 78 kW。为估算与所需马力相应的D6-370发动机的燃料使用量, 根据沃尔沃公司提供的D6-370主机的性能报告中随转速变化的主机功率和随转速变化的燃油消耗曲线进行估算 (见图6)。基于拟定的SURC营运条件, 分别估算了设计原案和轻量化设计方案在1 a~25 a燃油消耗的结果, 估算

结果见表4。将该结果作为CFRP SURC轻量化设计前后的主要活动数据，以进行营运阶段的环境影响评价。

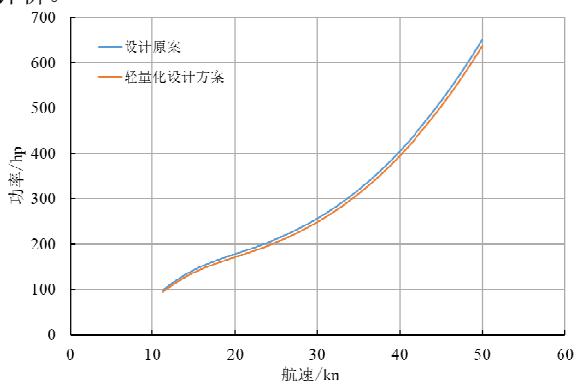


图5 设计原案与轻量化设计方案随航速变化的功率估算结果

Fig. 5 Power Estimation Results of the Original Design and the Lightweight Design Case

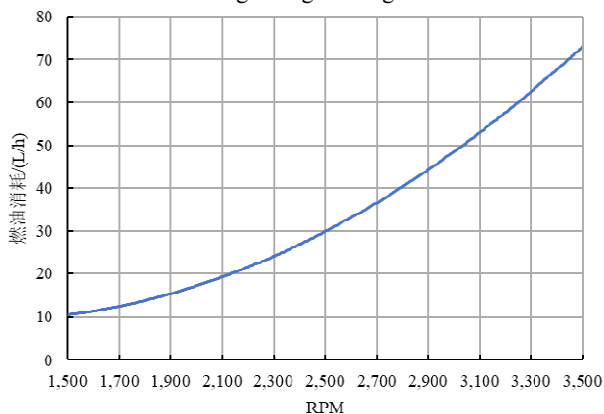


图6 随RPM变化的燃油消耗曲线

Fig. 6 Fuel Oil Consumption Curve by RPM of the Main Engine

表4 燃油消耗估算结果(油耗: a)

Tab. 4 Fuel Oil Consumption Estimations (Fuel Oil Consumption: a)

时间/a	设计原案	轻量化设计方案
1	313.28	300.36
25	7 832.05	7 509.07

3.3 环境影响评价结果

3.3.1 生产阶段

生产阶段的大气污染相关LCA评价结果见图7和图8。通过调节树脂与纤维量的比例，适当地增加纤维的用量，虽实现了船体结构轻量化，但全球变暖指数和臭氧层破坏指数有所上升，全球变暖指数从11 697.41 kg CO₂ eq增加至12 895.55 kg CO₂ eq，增加了10.24%，臭氧层破坏指数从0.004 43 kg CFC-11 eq增至0.005 07 kg CFC-11 eq，增加了14.37%。这意味基于提升纤维含量的碳纤维船体结

构轻量化设计方法在制造阶段对大气污染存在负面影响。同时，本文结合设计原案与轻量化设计方案，分析不同纤维含量下单位质量的碳纤维层板制造阶段对全球变暖和臭氧层破坏的影响，并发现纤维含量越高，对全球变暖和臭氧层破坏的负面影响越大(见表5)。这一现象的原因在后文详细讨论分析。

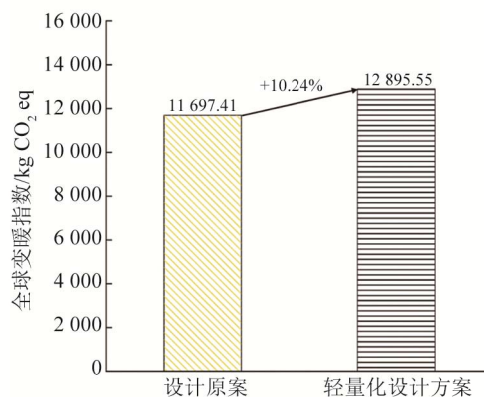


图7 生产阶段全球变暖指数变化

Fig. 7 Change of GWP Indicator in Production Phase

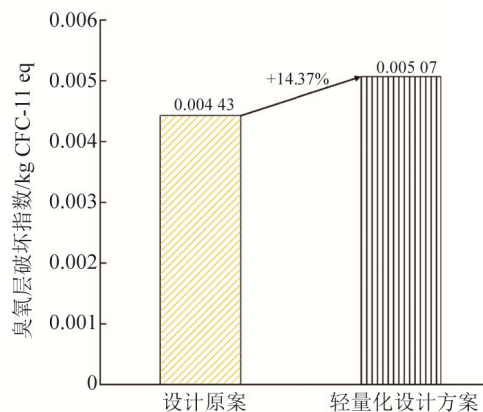


图8 生产阶段臭氧层破坏指数变化

Fig. 8 Changes of ODP Indicator in Production Phase

表5 设计原案及船体部位的环境影响指数比较

Tab. 5 Comparison of the Environmental Impact Index of the Original Design Plan and the Hull Parts

影响类别	设计原案 (1 kg)	船底板 (1 kg)	船舷板 (1 kg)
纤维含量/%	40	52	58
全球变暖/ (kg CO ₂ eq)	20.25	24.90	27.23
臭氧层破坏/ (kg CFC-11 eq)	7.67×10 ⁻⁶	9.76×10 ⁻⁶	1.08×10 ⁻⁵

3.3.2 营运阶段

营运阶段的大气污染相关LCA评价结果见图9和图10。营运阶段与生产阶段的趋势有所不同，轻量化设计后，CFRP SURC对全球变暖指数降低和臭

氧层破坏减少均存在正面影响。具体来说, 全球变暖指数减少了4.13%, 臭氧层破坏指数降低了4.19%。这是由于碳纤维船舶轻量化后, 在其航行过程中所需的燃料消耗也相应减少, 从而减少了大气污染。

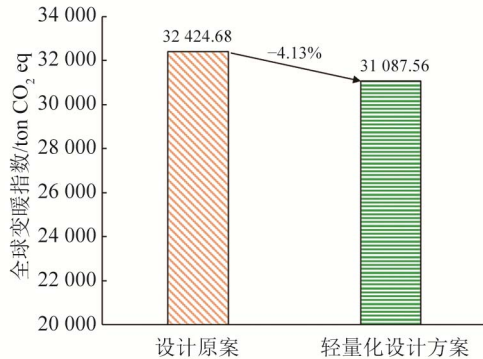


图9 营运阶段全球变暖类别指数轻量化变化

Fig. 9 Change of GWP Indicator in Operational Phase

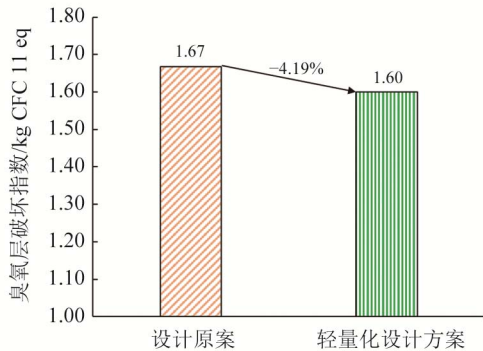


图10 营运阶段臭氧层破坏指数轻量化变化

Fig. 10 Changes of ODP Indicator in Operational Phase

结合3.3.1内容综合分析可得, 在制造阶段, 轻量化设计后虽减少了原材料的使用量, 但加剧了大气污染, 全球变暖潜力指标增加量为1 198.14 kg CO₂ eq。营运阶段25 a间可减少1 337.12 t CO₂ eq, 每年减少53.48 t CO₂ eq。由于船舶营运周期远远长于制造阶段, 碳纤维船体结构轻量化设计后, 对营运阶段的正面影响远远高于制造阶段的负面影响。

3.4 复合材料船体结构不同原材料的环境负荷分析

本文以玻璃钢船舶为研究对象, 进行了基于LCA方法的环境影响评价, 同时OH等^[5]以玻璃钢游艇为研究对象, 分析了玻璃钢船体结构轻量化方法对大气污染的环境影响。该研究显示在保证结构安全的前提下, 玻璃纤维含量从40%提升到64%, 船体结构减重10.40%; 环境影响评价结果显示, 不仅在营运阶段, 在船舶建造阶段也对环境负荷存在正面影响。对玻璃钢和碳纤维复合材料的环境影响进行综合分析, 具体见表6。表6中, 对于玻璃钢材料, 船体结构轻量化设计方法对船体制造阶段和营运阶段的环境负荷降低都存在正面影响。这是因为基于

纤维含量提升的结构轻量化设计方法是适当地提升纤维含量, 减少树脂的质量, 而每千克玻璃纤维的环境负荷低于树脂的, 所以增加玻璃纤维的用量, 减少树脂的用量在制造阶段对于环境负荷也有正面影响。但碳纤维材料与玻璃钢材料不同。碳纤维在制造阶段的特殊方式消耗了大量能源, 并排放大量的CO₂等气体, 导致碳纤维材料相较于树脂排放的碳更高。因此, 提升纤维含量, 增加碳纤维布用量, 减少树脂用量, 使得船体结构轻量化设计后在制造阶段反而加重环境负荷。但碳纤维材料本身较高的强度性能以及纤维含量增加后强度性能进一步增加, 使得船体结构减重, 减少了耗油量, 大幅降低了营运阶段的环境负荷。

表6 单位质量的原材料对全球变暖和臭氧层破坏的影响程度

Tab. 6 Magnitude of the Impact of Raw Materials Per Unit Mass on Global Warming and Ozone Layer Destruction

材料	全球变暖指数/ (kg CO ₂ eq)	臭氧层破坏指数/ (kg CFC-11 eq)
碳纤维	43.5	1.81×10 ⁻⁵
玻璃纤维	1.67	8.73×10 ⁻⁸
环氧树脂	4.75	7.19×10 ⁻⁷

4 结论

本文以一艘碳纤维复合材料高速艇为对象, 分析了基于纤维含量调节的碳纤维船体结构轻量化设计方法在减重效果和环境影响上的综合效应。针对示例船舶, 在满足标准规范的前提下, 碳纤维含量从设计原案中的40%提升至优化后方案的55%, 此时材料的比强度特性达到最优, 船体结构成功减重77.8 kg, 减重率为12.5%。纤维含量的提升, 提高了材料的许用应力, 保障了结构安全性。

基于LCA方法的环境影响评价结果显示, 碳纤维船体结构轻量化设计对船舶制造阶段和营运阶段的环境影响存在矛盾。生产阶段因碳纤维制造的高能耗特性, 全球变暖指数与臭氧层破坏指数分别上升10.24%和14.37%; 而使用阶段因船体减重降低燃油消耗, 25 a运营周期内累计节油323.98 t, 与此对应的全球变暖指数与臭氧层破坏指数分别下降4.13%和4.19%, 其长期环境效益显著抵消生产阶段的负面影响。

与先行研究对比表明, 碳纤维轻量化远远高于树脂的碳排放导致其生产阶段环境负荷增加, 而基于纤维含量提升的玻璃钢船体结构轻量化则可实现制造阶段与营运阶段环境影响同步优化。结果显示, 应从全生命周期视角权衡材料性能与环保属性, 未来应聚焦碳纤维生产工艺革新, 并拓展尾气排放等评估维度, 构建更完善的船舶绿色设计体系, 推动

航运业可持续发展。

参考文献:

- [1] HAN Z Q, CHOI J K, HWANG I, et al. Basic Design of High-Speed Riverine Craft Made of Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 2020, 57(4): 241-253.
- [2] DAEKYUN O, 韩志强, JACKYOU N. 基于复合材料层板轻量化方法的 11 m CFRP 高速艇最优设计[J]. 造船技术, 2018, 46(5): 77-84.
DAEKYUN O, HAN Z Q, JACKYOU N. Light-Weight Design of 11 m-CFRP High Speed Craft Using Laminates Weight Optimization Method for Composite Ship Structures[J]. Marine Technology, 2018, 46(5): 77-84.
- [3] 吴大均, 韩志强, 卢载奎. 随碳纤维含量变化的 CFRP 船体结构积层板的材料特性[J]. 船海工程, 2019, 48(1): 85-88.
WU D J, HAN Z Q, LU Z K. Study on Mechanical Properties of CFRP Multi-Layered Composite for Ship Structure in Change with Carbon Fiber Weight Fraction[J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(1): 85-88.
- [4] 韩志强, JAEWON J, KYUNGHWAN L, 等. 考虑玻璃钢强度性能的渔船船体结构轻量化设计[J]. 中国造船, 2021, 62(2): 132-144.
HAN Z Q, JAEWON J, KYUNGHWAN L, et al. Lightweight-Laminate Design of Fishing Boat Considering Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer[J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(2): 132-144.
- [5] DAEKYUN O, LEE D K, JEONG S. Environmental Impact Evaluation on Lightweight Structure Design of a Composite Ship by LCA (Life Cycle Assessment)[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2019, 36(9): 875-881.
- [6] 韩志强, JAEWON J, DAEKYUN O. 韩国玻璃钢渔船船体结构设计余量及其环境负荷分析[J]. 中国造船, 2020, 61(1): 90-100.
HAN Z Q, JAEWON J, DAEKYUN O. Design Margin of Composite Structures of Korean Fishing Vessel and Assessment of its Environmental Impact[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 90-100.
- [7] 蔡薇, 万淑乔, 梅梦磊, 等. 基于 LCA 的船舶能效模型构建及基线拟合[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(5): 805-810.
CAI W, WAN S Q, MEI M L, et al. Construction of Ship Energy Efficiency Model and Baseline Fitting Based on LCA[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(5): 805-810.
- [8] 周春锋. 基于 LCA 的船舶环境影响评价方法研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
ZHOU C F. Research and Application of Ship Environmental Impact Assessment Method Based on LCA[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [9] 蔡薇, 龚宏中, 刘中凯, 等. 基于实用 LCA 的绿色江海直达船型环境负荷分析与方案比选[J]. 船舶工程, 2017, 39(8): 5-9.
CAI W, GONG H Z, LIU Z K, et al. Environmental Load Analysis and Scheme Optimization of Green Sea-River-Through Ship Based on Practical LCA[J]. Ship Engineering, 2017, 39(8): 5-9.
- [10] RINA. Rules for the Classification of Pleasure Yacht Part B Hull and Stability[S]. 2019.
- [11] ISO. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework: ISO 14040 [S]. 2006.
- [12] KLÜPPEL H. ISO 14041: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Goal and Scope Definition-Inventory Analysis[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2021, 3: 301.
- [13] RYDING S O. ISO 14042 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Life Cycle Impact Assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4(6): 307.
- [14] ISO. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Life Cycle Interpretation: ISO 14044[S]. 2000.
- [15] ISO. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines: ISO 14044 [S]. 2006.
- [16] ECIA Association. EuCIA Eco Impact Calculator [EB/OL]. [2019-05-28]. <https://ecocalculator.eucia.eu>.
- [17] STENIUS I, ROSÉN A, KUTTENKEULER J. On Structural Design of Energy Efficient Small High-Speed Craft[J]. Marine Structures, 2011, 24(1): 43-59.