

# 船舶轻量化设计方法综述

智广信<sup>1</sup>, 邵宏运<sup>2</sup>, 瞿荣泽<sup>3</sup>

(1. 中国船舶工业综合技术经济研究院, 北京 100000; 2. 广船国际有限公司, 广东 广州 511458; 3. 大连中远海运川崎船舶工程有限公司, 辽宁 大连 116052)

**摘要:** 本文从船舶轻量化理论方法和新兴技术、新型材料应用情况, 及船舶结构优化实践应用三个不同的维度对船舶轻量化设计进行阐述, 为我国船舶设计制造企业轻量化设计提供参考, 为行业的高质量发展开拓思路。

**关键词:** 船舶; 轻量化; 新型材料; 结构优化

## 1 船舶轻量化设计方法

船舶轻量化设计方法主要有应力法、力学拓扑法和增材制造法。其中应力法是传统的常用方法, 也是目前船舶领域轻量化设计的主要使用方法。其衍生出了新型材料的应用、结构形式的优化等手段。目前, 船舶轻量化应力法设计中, 主要从 3 个方面开展研究: 一是调整舱室布置, 优化总体布置, 合理使用轻质高强度材料; 二是对结构进行优化创新, 使结构薄壁化、标准化、临界化、复合化, 基于经验对标先进采用 CAD/CAE 进行拓扑优化和结构轻量化, 并通过 CAM/CAPP 数字化技术和制造技术提高各成组结构的质量; 三是减少结构件数和舾装件数。

随着科技的快速革新和计算机软硬件的发展, 拓扑技术和增材制造技术也渐渐走进了船舶轻量化设计的领域。结合拓扑优化技术对现有结构轻量化优化设计预计是未来船舶制造业要走的新技术路线。在增材制造的应用环境中, 3D 打印通过结构设计层面实现轻量化的主要途径有四种: 中空夹层/薄壁加筋结构、镂空点阵结构、一体化结构实现、异形拓扑优化结构<sup>[1]</sup>。使用 3D 打印可创建铸造使用的模具, 或直接打印原来铸造生产的锚唇、尾框架、挂舵臂、螺旋桨等构件。使用 3D 打印可以使船舶更轻。首先根据

实际的定义好的数量进行无余量制作, 能够实现无损耗材; 通过制作定制化和标准化的零件, 使备件的通用性和流通性更好。具体 3D 打印螺旋桨图片见图 1 展示。



图 1 3D 打印螺旋桨图片展示

## 2 新型材料在船舶轻量化设计中的应用

目前, 新型材料用于船舶和海洋结构建造比以往任何时候都要广泛。从重量角度看, 新型轻量化材料可以有效提高船速, 降低燃料成本。从耐腐蚀角度看, 绝大部分新型材料是抵抗极端温度和海水这些非大气环境的理想选择。像螺旋桨轴、救生圈和灯塔这些海洋装备长时间停留在水中, 容易被腐蚀, 采用新型材料可以确保它们有长久的使用寿命。造船业新型材料应用测试的短期目标是为了设计一款重量轻、坚固、成本低、不会倾覆或因过早被腐蚀增加维修成本的适航船舶<sup>[2]</sup>; 长远的目标是获得数据为进一步完善和改

进船舶设计提供帮助。

### 2.1 船舶领域可用新型材料研究

新型材料在造船中的应用还处在初级阶段,但是应用潮流却在快速发展。新型材料代替传统钢材有很多优势,目前船舶与海洋工程产业只是触碰到复合材料应用的表面。随着时间的推移,严格的测试将证明新型材料是许多船舶和海洋工程一流的材料。

目前在船舶领域应用的新型材料有:超疏水材料,应用在船舶外板表面可以控制和降低阻力,有效地防止污染、腐蚀生锈,使船舶营运在更广泛的航速范围内均有优异的油耗表现;对冰区航行船舶具有很好的抗结冰特性。新型涂料,一类是不含防污剂的防污漆,通过表面的低表面能,防止海生物附着,疏水性强,表面粗糙度低,降低船舶阻力,达到节能的目的;一类是含有防污剂的节能防污漆,该技术通过提高防污漆整个寿命期内持续的防污性能,降低表面粗糙度,且能在整个寿命期内维持比较低的粗糙度,降低船舶阻力,达到节能的目的。耐腐蚀钢,其中含有部分耐腐蚀化微量元素,能在钢板表层形成保护性腐蚀生成物,抑制钢板的腐蚀。国内外各大钢厂均从提高钢板自身的抗腐蚀性出发,正在进行油船货油舱耐腐蚀钢的研究开发。相对于特殊涂装方案而言,耐腐蚀钢增加了船舶的目标寿命,减少了后期的船舶维护保养费用,但会大大增加采购成本。

钛合金材料比重轻,强度高,耐腐蚀,耐压性好。由于经济性的原因,目前仅可应用于船舶海洋装备等关键部位上。泡沫铝材料对减振降噪甚至碰撞吸能都有很好的效果<sup>[3]</sup>。螺旋桨、主机附近吸能减震、居住区降噪是船舶设计建造的一个重要考虑点。铝合金材料具有低密度,高比强度,高韧性,抗腐蚀性,无低温脆性,无磁性,可焊接性特点,与用钢材建造船舶相比重量减轻15%~20%,重心降低,提高航行稳定性。泡沫铝材料易于挤压成型,铸造加工,耐腐蚀,延长使用寿命,目前主要应用于小型、轻量、高速船艇等(快速渡船,水翼艇,双体船,公务船,军辅船,高速巡逻艇),能有效提高船速,最高速度达到35~50节。随着轻量化实现电动动力,更加环保。铝没有磁性,对精密元器件的信号干扰的不良影响很小<sup>[4]</sup>。铝材易于回收利用,再生、再用能耗

成本低。

新型聚酯、尼伦材料主要应用在锚链段,能有效减轻锚链重量,方便收放操作,紧急情况时能提高放锚安全性。GRE管具有优良的耐腐蚀性能、寿命长、重量轻、水动力性能优异、安全可靠。复合材料用在船舶的上层建筑中,减少了船舶重量,这意味着更多的设备可以在不牺牲倾侧稳定性的情况下安装在吃水线上面。较大的上部建筑由复合材料制成,可减少船舶倾覆的风险。

### 2.2 船舶轻量化设计应用案例

玻璃钢管(GRE)是以环氧树脂和连续玻璃纤维为主要原料,采用缠绕工艺,热固化形成的玻璃钢产品,在海洋平台、LNG/FGSS船、油船、化学品船、大型矿砂船上应用广泛。GRE管通常用于压载系统、舱底污水系统、消防系统、生活污水、冷却水系统等。GRE管具有安全环保、耐腐蚀性能好、质量轻、耐疲劳性好、破损安全性好、流阻小、热导率低等特点。具体实物见图2展示。



图2 GRE管实物展示

本文以某VLCC为研究对象,系统开展GRE管在船舶上应用的可行性和优势研究,主要对规范要点、安装工艺、轻量化及重量成本展开研究,重点使用范围以压载管路为例研讨。

#### 1) 规范要点

玻璃钢管在规范上被归类至塑料管部分,各大船级社对其都有相应的使用限制,各厂家所取得的型式证书中也会注明使用条件。例如LR要求SOx Scrubber的海水补给管需要有“L3”的耐火等级要求,油轮压载舱内的压载管如采用玻璃钢管,需具有导电性。

#### 2) 现场安装工艺

玻璃钢管强度相对钢管较低,需要防重物、外力撞击;因为其原材料为树脂和玻璃纤维,其表面需要防火、防焊渣飞溅、防磕碰;由于其采用特殊的管支架,现场调整量增加;由于法兰也是玻璃钢材质,螺栓紧固的方式与次数较钢管复杂,需要现场注意。除了耐火等级、导电性外, GRE 管的性能指标还有内压、外压、介质温度, GRE 管的使用温度一般低于  $93^{\circ}\text{C}$  [5]。

### 3) 对船舶重量以及成本的影响

玻璃钢管的密度约为  $2.0\text{ g/cm}^3$ , 仅为钢材密度的  $1/4$ , 可以有效减少管路系统的总重量。玻璃钢管单价比普通钢材高, 但省去了内部处理的成本以及玻璃钢管工厂处理的成本, 因此对于重量和成本的影响需要综合考虑。GRE 管的材料性能参数与钢材的对比参见表 1。由于钢材是各向同性材料, GRE 是各向异性材料, 因此 GRE 管材料的性能参数也较多。

表 1 GRE 管的材料性能参数与钢材的对比

材料性能参数	GRE 管	钢管
轴向弹性模量	12 000 Mpa	210 000 Mpa
环向弹性模量	22 000 Mpa	—
剪切模量	11 000 Mpa	80 000 Mpa
轴向拉伸强度	70 Mpa	370 Mpa
环向拉伸强度	370 Mpa	
轴向线膨胀系数	$18\text{ }\mu\text{ m/m}\cdot^{\circ}\text{C}$	$12\text{ }\mu\text{ m/m}\cdot^{\circ}\text{C}$
环向线膨胀系数	$13\text{ }\mu\text{ m/m}\cdot^{\circ}\text{C}$	—

金属材料的疲劳破坏是由里向外、突然发展的, 往往事先没有征兆; 而玻璃钢中的纤维与基体的界面能够阻止裂纹扩展, 其疲劳总是从材料的薄弱环节开始, 逐渐扩展, 破坏前有明显的征兆。玻璃钢基体中有大量独立的纤维, 从力学的观点看, 是典型的静不定体系 [6]。当构件超载并有少量的纤维断裂时, 载荷会迅速重新分配在未破坏的纤维上。这样, 在短期内不致于使整个构件丧失承载能力。

### 3 结构优化的经验方法总结

对同时拥有船舶设计和制造能力的大型船舶总装企业来说, 船舶轻量化设计并非理想最轻值就是最优值, 而是要综合考虑得出适合生产营运的值才是工程师追求的完美数字。设计人员应

充分考虑制造便利性、空船重量和构件数量及复杂程度, 培养基于总体综合成本分析的船舶轻量化设计理念。经研究表明, 船舶结构轻量化优化设计过程中, 需平衡近百项边界条件, 各因素间都存在耦合关系, 原则是要保证强度与生产科学性的同时完成船舶结构优化设计, 需要丰富的优化经验和根植的优化理念。

总布置优化阶段要用最少的空间保证速度、油耗、载重量和货舱容积等基本性能。尽可能减小主尺度 (特别是船长), 压缩除了货舱以外的所有空间; 最小化方形系数; 采用高效舵, 尽量缩减舵杆到尾板之间的距离; 通过对船尾系泊布局优化降低尾板处最大宽度; 通过机舱室下部装备的布置优化, 减少机舱室长度, 泵舱长度优化, 最小化双层船壳空间; 简化总布置、增大便利性。

详细设计阶段要尽量多使用船厂生产标准和结构设计指南。船尾、机舱结构设计时要充分考虑振动特性, 避免设计不利于建造的狭小空间; 通过计算决定部件参数, 减少组件数量, 不要为了设计方便, 使用不必要或重复的部件; 所有露天甲板稍微倾斜至正好适合排水的角度; 整体压载容积最小化; 货舱区域的肋骨间距均匀; 另外详细设计的相关改进事项要积极向基本设计端反馈, 形成信息的闭环。

### 参考文献:

- [1] 于永妍. 3D 打印技术在船舶修造中应用的可行性分析 [J]. 青岛远洋船员职业学院学报, 2015, (04).
- [2] 马曙光, 周佳. 铝合金与船舶及海洋工程轻量化设计 [J]. 中国海洋平台, 2017, (01).
- [3] 黄健, 刘金涛, 王小华, 辛宝, 李亚. 某型船用铝-钢复合过渡接头焊接态疲劳性能试验研究 [J]. 材料开发与应用, 2018, (01).
- [4] 施军, 黄卓. 复合材料在海洋船舶中的应用 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2012, (S1).
- [5] 郭梦雪. 泡沫铝的研究现状分析 [A]. 2019 供热工程建设与高效运行研讨会论文集 (下) [C], 2019.
- [6] 郑庆涛, 常彦秋. 玻璃钢管在海洋钻井平台上的应用 [J]. 石油化工建设, 2008, (04).



## Overview of Ship Lightweight Design Methods

ZHI Guang—xin<sup>1</sup>, SHAO Hong—yun<sup>2</sup>, QU Rong—ze<sup>3</sup>

( 1. China Shipbuilding Industry Comprehensive Technology and Economic Research Institute, Beijing100000, China; 2.Guangzhou Shipyard International Company Limited, Guangzhou511458, China; 3. Dalian COSCO Shipping Kawasaki Ship Engineering Co., Ltd., Dalian 116052, China )

**Abstract:** This paper introduces the theory and methods of ship lightweighting and emerging technologies, researches on the application of new materials, and summarizes and analyzes the experience of ship structure optimization. The ship lightweight design is explained from three different dimensions for China's ship design and manufacturing enterprises. Lightweight design provides a reference and opens up ideas for high-quality development of the industry.

**Key words:** ships, lightweight, new materials, structural optimization

( 上接第 42 页 )

## Discussion on the Serious Burning and Melting Accident of Thrust Bearing Caused by Loss of Lubricating Oil in Main Engine

ZHU Ben—yong<sup>1</sup>, LI Cheng—fu<sup>2</sup>

(COSCO Shipping Bulk CO., Ltd, Guangzhou510220, China; 2. Qingdao Ocean Shipping Mariners College, Qingdao266071, China)

**Abstract:**The main engine of a ship is a very important equipment in the engine room. The main engine is as important to the ship as the human heart is to the human. Once the failure may lead to very serious consequences, this paper mainly introduces a major accident caused by the lack of lubricating oil in the main engine. Through this accident introduction and cause analysis, it is expected to provide a reference for ship turbine managers in dealing with the main engine failure, troubleshooting and daily maintenance of the main engine.

**Key words:** main engine; the thrust shaft; main lubricant pump