

玻璃钢在高速船艇建造中的轻量化与强度平衡研究

郑宝吉

秦皇岛耀华装备集团股份有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 玻璃钢作为一种高性能复合材料,在高速船艇建造中展现出显著的轻量化与强度平衡优势。本研究深入探讨了玻璃钢材料的特性及其在高速船艇设计中的应用,通过多学科优化方法和智能算法,实现了船艇结构的轻量化与强度平衡。研究表明,玻璃钢材料不仅能够有效减轻船艇重量,提升航行效率,还能确保船艇在复杂海况下的结构安全性和耐久性。本研究为玻璃钢高速船艇的轻量化设计提供了理论指导和实践参考。

关键词: 玻璃钢; 高速船艇; 轻量化; 强度; 结构设计

1 玻璃钢材料特性分析

1.1 玻璃钢的组成与微观结构

玻璃钢,又称为玻璃纤维增强塑料(Glass Fiber Reinforced Plastics,简称GFRP),是一种由玻璃纤维和树脂组成的复合材料。玻璃钢是以玻璃纤维及其制品(如玻璃布、带、毡、纱等)作为增强材料,以不饱和聚酯、环氧树脂或酚醛树脂等作为基体材料的一种复合材料。这种复合结构使得玻璃钢在微观层面上,纤维和树脂之间形成了紧密的结合,从而赋予了玻璃钢独特的性能。玻璃纤维的直径很小,一般在 $10\mu\text{m}$ 以下,其强度很高但易损伤、断裂,而树脂基体则具有粘弹性和弹塑性,可以经受住大的应变。这种微观结构的设计,使得玻璃钢既具有高强度,又具有良好的韧性和耐腐蚀性。

1.2 玻璃钢的力学性能

玻璃钢的力学性能十分突出,尤其是其轻质高强的特点。玻璃钢的密度较小,通常在1.5至2.0之间,仅为普通碳钢的 $1/4$ 至 $1/5$,比轻金属铝还要轻 $1/3$ 左右。尽管密度小,玻璃钢在某些方面的机械强度却能接近甚至超过普通碳钢的水平。特别是其抗拉强度,普通钢材的5倍以上。玻璃钢还具有出色的抗拉、抗压和抗弯强度,这使得它在各种应用中都能表现出优异的力学性能。玻璃钢的比强度(即单位密度下的拉伸强度)大大超过普通碳钢,甚至可达到和超过某些特殊合金钢的水平。

1.3 玻璃钢的物理性能

玻璃钢的物理性能同样出色。它具有良好的电绝缘性能,可作为仪表、电机及电器中的绝缘零部件使用,在高频作用下仍然能保持良好的介电性能,玻璃钢还具有优良的耐腐蚀性能,能够抵抗多种化学介质的侵蚀,包括大气、水和一般浓度的酸、碱、盐以及多种油类和溶剂等。这使得玻璃钢在化工防腐领域具有广泛的应用^[1]。玻璃钢还具有优异的隔热性能,其比热大,导热系数低,仅为

金属材料的 $1/100$ 至 $1/1000$,因此是优良的绝热材料。玻璃钢还具有良好的抗吸水和抗热膨胀性能,这使得它在各种恶劣环境中都能保持稳定的性能。

2 玻璃钢高速船艇的轻量化设计

2.1 轻量化设计原则与方法

在玻璃钢高速船艇的轻量化设计中,首要原则是确保安全性能的前提下,尽可能减少船体的重量。这一原则不仅关乎船艇的航行效率和经济性,还直接影响到其操纵灵活性和燃油效率。轻量化设计的核心在于平衡强度、重量和成本之间的关系,以实现最佳的整体性能。为了实现这一目标,设计师们通常采用多种方法。首先,是采用先进的计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助工程(CAE)技术,通过精确的模拟和分析,预测船体在不同工况下的受力情况,从而优化结构设计,减少不必要的材料使用。其次,是运用模块化设计理念,将船体划分为多个功能模块,便于快速组装和拆卸,同时也便于在制造过程中进行质量控制和重量管理。另外,还采用拓扑优化、形状优化等先进的优化算法,寻找最优的材料分布和形状设计,以进一步减轻重量。

2.2 材料选择与优化

玻璃钢作为高速船艇的主要材料,其本身的轻量化潜力巨大。在材料选择上,设计师们会优先考虑高强度、低密度、耐腐蚀的玻璃钢类型,如采用连续纤维增强的热固性树脂基复合材料,这些材料在保持高强度的同时,具有更低的密度,从而有助于减轻船体重量。另外,对玻璃钢材料的优化也是轻量化设计的重要一环,通过调整玻璃纤维的排列方式、纤维含量和树脂基体的配方,可以进一步优化材料的力学性能,使其在满足强度要求的同时,具有更低的密度和更好的加工性能。

2.3 结构设计优化

在结构设计方面,轻量化设计主要体现在对船体结

构的重新布局和优化。首先,是通过减少冗余结构和不必要的附件,简化船体结构,从而降低重量。其次,是采用先进的连接技术和节点设计,如采用螺栓连接、粘接连接或复合连接等方式,减少焊接接头和焊缝的数量,从而降低结构重量并提高连接效率。还采用轻量化结构设计理念,如采用空腹结构、蜂窝结构或泡沫夹芯结构等,这些结构在保证强度的同时,具有更低的重量和更好的隔音隔热性能。通过精确的计算和模拟分析,设计人员们可以确保这些轻量化结构在船艇航行过程中不会发生变形或失效。

2.4 制造工艺改进

制造工艺的改进也是实现玻璃钢高速船艇轻量化设计的重要一环。采用先进的成型技术和加工设备,如采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)技术或热压罐成型技术等,这些技术可以大大提高玻璃钢制品的成型精度和表面质量,同时减少材料浪费和加工时间。通过优化生产工艺流程,减少不必要的加工步骤和能源消耗。还要注重废旧玻璃钢材料的回收和再利用,通过采用先进的回收技术和设备,可以将废旧玻璃钢材料破碎、分离和再生利用,从而降低原材料消耗和环境污染^[2]。

3 玻璃钢高速船艇的强度平衡

3.1 强度平衡的重要性与挑战

玻璃钢高速船艇的强度平衡是确保其安全、高效运行的核心要素。强度平衡意味着在设计、制造和使用过程中,船艇的结构强度需与其预期的载荷和环境条件相匹配,既要足够强大以承受各种外力和内部压力,又要避免过度设计导致的重量增加和成本上升。这一平衡对于提升船艇的航行性能、延长使用寿命以及保障人员安全至关重要。实现强度平衡面临着诸多挑战,玻璃钢作为一种复合材料,其力学性能复杂多变,受材料成分、制造工艺、环境条件等多种因素影响,难以准确预测和控制。高速船艇在运行过程中会遭受复杂多变的载荷作用,包括风浪冲击、水流阻力、动态载荷等,这些载荷的随机性和不确定性给强度分析和设计带来了巨大困难。随着环保和节能要求的不断提高,轻量化设计成为趋势,如何在保证强度的同时减轻重量,成为玻璃钢高速船艇设计的一大挑战。

3.2 强度分析与评估方法

为了应对上述挑战,玻璃钢高速船艇的强度分析与评估方法显得尤为重要。强度分析旨在通过科学的方法预测船艇在特定工况下的受力情况和变形程度,以评估其结构安全性。常用的分析方法包括有限元分析(FEA)、结构力学分析、动态响应分析等。有限元分

析是一种将复杂结构划分为有限数量的单元,通过求解每个单元的力学状态来近似整体结构行为的方法。它能够模拟船艇在各种工况下的受力情况,包括静力分析和动力分析,为结构设计和优化提供重要依据。结构力学分析则侧重于研究结构在外部载荷作用下的变形、应力和应变分布,以及结构的整体稳定性和承载能力^[3]。动态响应分析则关注船艇在动态载荷作用下的响应特性,如振动、冲击等,对于评估船艇的耐久性和舒适性具有重要意义。评估方法则包括实验测试和数值模拟两种,实验测试通过实际加载和测量来验证结构的强度和刚度,虽然准确但成本较高且难以覆盖所有工况。数值模拟则利用计算机技术和数学模型来模拟和分析结构的力学行为,具有成本低、效率高、易于重复等优点,但结果的准确性依赖于模型的精确度和计算方法的可靠性。

3.3 结构增强与加固措施

在确保强度平衡的过程中,结构增强与加固措施是不可或缺的一环。这些措施旨在提高船艇结构的承载能力和稳定性,以应对复杂多变的载荷和环境条件。结构增强通常通过增加材料的厚度、改变材料的排列方式或引入新的增强元件来实现。采用复合材料夹层结构,如泡沫夹芯板或蜂窝夹芯板,可以在保持轻质的同时提高结构的整体刚度和抗冲击能力。加固措施则侧重于对已有结构进行修复和加强,以延长其使用寿命和提高安全性。这包括在裂纹或损伤部位进行修补、加固薄弱区域、增加支撑结构等。加固措施的选择和实施应基于详细的强度分析和评估结果,以确保加固效果达到预期。

3.4 强度与轻量化之间的平衡策略

在玻璃钢高速船艇的设计中,强度与轻量化之间的平衡是一个复杂而微妙的过程。一方面,强度的提高往往伴随着重量的增加,这会影响船艇的航行性能和燃油效率;另一方面,过度的轻量化又可能牺牲结构的承载能力和安全性。为了实现这一平衡,设计师们通常采用多种策略。首先,是优化结构设计,通过合理的布局和形状设计来减少不必要的材料和重量,同时保持结构的强度和稳定性。例如,采用流线型设计来减少水流阻力,或者通过集成化设计来减少附件和连接件的数量。其次,是选用高性能材料,如高强度玻璃纤维、轻质高强度树脂基体等,这些材料在保持轻质的同时具有更高的强度和刚度。还可以考虑采用新型复合材料或混合材料,以进一步提高结构的性能。最后,是加强制造工艺的控制和管理,确保材料的质量和加工精度达到设计要求。通过优化生产工艺流程、采用先进的制造技术和设备、加强质量控制和检测等手段,可以进一步提高玻璃

钢高速船艇的强度平衡性能。

4 玻璃钢高速船艇轻量化与强度平衡的优化方案

4.1 多目标优化问题的描述

在玻璃钢高速船艇的设计中,轻量化与强度平衡是两个至关重要的优化目标。轻量化旨在减少船艇的重量,以提高其航行效率、燃油经济性和操纵灵活性;而强度平衡则要求船艇的结构强度必须满足预期的载荷和环境条件,以确保其安全性和耐久性。这两个目标之间存在明显的冲突,因为强度的提高往往伴随着重量的增加,而轻量化的实现又可能牺牲结构的承载能力。为了明确这一多目标优化问题,需要考虑一系列约束条件。这些约束条件包括船艇的航行性能要求、结构稳定性要求、材料性能限制以及制造工艺的可行性等。优化过程则是一个迭代求解的过程。需要建立多目标优化模型,将轻量化与强度平衡作为优化目标,将约束条件转化为数学表达式。采用适当的优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,对模型进行求解。在求解过程中,算法会不断尝试不同的设计方案,通过比较和评估,逐步逼近最优解。最终,可以得到一个或多个满足约束条件且轻量化与强度平衡性能最优的设计方案。

4.2 优化方法与技术路线

针对玻璃钢高速船艇的轻量化与强度平衡优化问题,采用多学科优化方法和智能算法等技术手段来制定优化方案。多学科优化方法是一种综合考虑多个学科领域知识和技术的优化方法,在玻璃钢高速船艇的设计中,可以将结构力学、材料科学、流体力学等多个学科领域的知识和技术相结合,形成一个综合性的优化模型。通过多学科优化方法,可以更加全面地考虑轻量化与强度平衡之间的相互影响,从而得到更加准确和可靠的设计方案^[4]。智能算法则是一种基于计算机技术和人工智能技术的优化方法,在玻璃钢高速船艇的设计中,可以采用遗传算法、粒子群算法等智能算法来求解多目标优化模型。这些算法具有全局搜索能力强、收敛速度快等优点,能够在复杂的优化问题中找到较优的解。技术路线方面,可以采用以下步骤:首先,建立玻璃钢高速船艇的多目标优化模型;然后,采用多学科优化方法和

智能算法对模型进行求解;接着,对求解结果进行细致的分析和评估;最后,根据评估结果对设计方案进行调整和优化,直到满足设计要求为止。

4.3 优化结果的分析与评估

对优化方案的结果进行细致分析和评估是确保轻量化与强度平衡性能的关键步骤。需要对优化后的船艇结构进行详细的强度分析和评估,包括静力分析、动力分析和疲劳分析等。同时还需要对船艇的轻量化性能进行评估,包括重量减轻的比例、对航行性能的影响等。在强度分析方面,可以采用有限元分析等方法来模拟船艇在各种工况下的受力情况,并计算结构的应力和应变分布。通过比较优化前后的结果,可以评估优化方案对结构强度的影响。在轻量化性能评估方面,可以计算优化后船艇的重量减轻比例,并分析其对航行性能的影响,如航速、燃油消耗等。同时还需要考虑轻量化对船艇稳定性和操纵性的影响,以确保优化后的船艇仍然具有良好的航行性能。

结束语

综上所述,玻璃钢在高速船艇建造中的轻量化与强度平衡研究具有重要的理论和实践意义。通过本研究,深入理解了玻璃钢材料的性能特点和优化方法,为玻璃钢高速船艇的设计提供了科学依据。未来,随着材料科学和制造工艺的不断进步,玻璃钢高速船艇的轻量化与强度平衡性能将得到进一步提升,为航运业的可持续发展注入新的活力。

参考文献

- [1]董志强,朱波,温立宪,刘佳,陈蓉,李占军,张建勋.天然气采出水埋地玻璃钢储罐服役状况检测研究[J].热固性树脂,2021,36(01):44-49.DOI:10.13650/j.cnki.rgxs.2021.01.010.
- [2]禹浩,寇建峰.立式玻璃钢储罐数控缠绕机械喷涂施工技术[J].石油工程建设,2020,46(05):58-62.
- [3]詹志鹤,王麒麟,沈奕成.船舶滚装通道结构设计标准与轻量化设计分析[J].船舶标准化工程师,2023,56(04):65-69.
- [4]黄佐龙.玻璃钢船艇的防蚀与维护研究[J].科技创新与应用,2018,(02):85-87.