

环境因素对船舶结构长期耐久性的影响研究

郭栋栋

海军装备部驻上海地区第一军事代表室，上海 201913

摘 要： 本文旨在探讨环境因素对船舶结构长期耐久性的影响，通过分析不同环境因素（如腐蚀、温度波动、海生物附着等）对船舶材料性能、结构完整性和使用寿命的潜在作用机制，提出相应的防护措施和改进建议。研究采用实验测试、数值模拟与现场调研相结合的方法，综合评估了环境因素对船舶结构安全性的长期影响，为船舶设计与维护提供了科学依据。

关 键 词： 船舶结构；环境因素；长期耐久性；腐蚀

Effect of Environmental Factors on the Long-term Durability of Ship Structure

Guo Dongdong

The First Military Representative Office in Shanghai, Shanghai 201913

Abstract： This paper aims to explore the influence of environmental factors on the long-term durability of ship structure, analyze the potential mechanism of different environmental factors (such as corrosion, temperature fluctuation, Marine biological attachment, etc.) on the material performance, structural integrity and service life of ships, and put forward the corresponding protective measures and improvement suggestions. Experimental test, numerical simulation and field investigation are used to comprehensively evaluate the long-term impact of environmental factors on ship structural safety, which provides a scientific basis for ship design and maintenance.

Keywords： ship structure; environmental factors; long-term durability; corrosion

随着全球贸易的增长和海洋资源的开发，船舶作为海上运输和作业的重要工具，其结构安全性和长期耐久性日益受到关注。船舶长期暴露于复杂的海洋环境中，遭受着多种环境因素的侵蚀，这些因素直接或间接地影响着船舶结构的稳定性和使用寿命。因此，深入研究环境因素对船舶结构的影响，对于保障航行安全、延长船舶使用寿命具有重要意义。

一、环境因素概述及其对船舶结构的直接影响

（一）腐蚀作用船舶结构的隐形威胁

在浩瀚的海洋中，船舶的金属结构时刻遭受着海水的侵蚀。海水中的盐分含量极高，这为电化学腐蚀提供了丰富的电解质环境。同时，溶解在海水中的氧气与金属结构形成原电池，加速了腐蚀进程。此外，海水中的微生物活动也不容忽视，它们通过附着在金属表面、分泌腐蚀性物质等方式，进一步加剧了船舶结构的腐蚀。这种电化学腐蚀作用不仅导致船舶材料逐渐劣化，还严重影响了结构的整体强度，给船舶的安全航行带来了巨大隐患。因此，腐蚀作用是船舶结构维护中必须高度重视的问题，需要采取有效的防腐措施来延长船舶的使用寿命^[1]。

（二）温度波动船舶结构的隐形考验

在广阔的海洋环境中，船舶不仅要面对海水的腐蚀，还要应对极端温差带来的挑战。由于海洋环境的复杂性，船舶在航行过程中可能会经历从炎热的赤道海域到寒冷的极地海域的巨大温差

变化。这种极端的温度变化会导致船舶结构材料发生热胀冷缩效应。热胀冷缩是物体在温度变化时的一种自然现象，对于船舶结构来说，这种效应可能会引发一系列问题。特别是在结构连接处、焊缝等关键部位，由于材料热胀冷缩系数的不同，以及结构设计的局限性，温差变化可能导致这些区域产生额外的应力集中。长期以往，这种应力集中不仅会加速材料的疲劳损伤，还可能成为裂纹萌生的温床，严重威胁到船舶的结构完整性和航行安全。因此，温度波动是船舶结构设计和维护中不可忽视的重要因素^[2]。工程师们需要在设计阶段就充分考虑到这一点，通过选用合适的材料、优化结构设计等措施，来降低热胀冷缩效应对船舶结构的影响，确保船舶在各种极端温差条件下都能保持稳定的性能。

（三）海生物附着船舶性能的隐形负担

在船舶长期的海上航行中，贝类、藻类等海洋生物往往会选择船体表面作为它们的栖息地。这些生物的附着看似微不足道，实则对船舶性能产生了显著影响。

首先，海生物的附着增加了船体的粗糙度，从而提升了航行时的阻力。这不仅导致船舶燃油消耗量的增加，降低了航行效率，还可能因为需要额外的动力来克服阻力，而加速了发动机的磨损，缩短了设备的使用寿命。更为严重的是，这些附着在船体表面的生物还可能通过其生命活动，如分泌腐蚀性物质，加速船体的腐蚀过程。特别是对于一些金属结构，生物腐蚀与电化学腐蚀相互作用，使得船体材料的劣化速度大大加快，严重威胁到船舶的结构安全。因此，海生物附着是船舶维护中必须认真对待的问题^[3]。定期的船体清洁和防污处理，不仅是保持船舶良好性能的需要，更是确保航行安全的重要举措。

二、环境因素对船舶材料性能的影响

（一）材料强度下降

长期的海水腐蚀是导致船舶材料强度下降的主要原因之一。海水中的盐分、溶解氧以及微生物活动，会不断地侵蚀船体表面的金属材料，导致其厚度逐渐减薄。这种厚度的减薄不仅影响了材料的外观，更重要的是，它降低了材料的抗拉、抗压强度，使得船体结构在承受外力作用时，更容易发生形变甚至破裂。材料强度的下降，意味着船舶整体结构的承载能力受到了削弱。这不仅降低了船舶的航行性能，更在无形中增加了航行过程中的安全风险。因此，对于船舶材料的腐蚀防护，必须给予足够的重视，以确保船舶在恶劣的海洋环境中仍能保持良好的性能状态^[4]。

（二）疲劳寿命缩短

船舶在海洋环境中航行，持续的环境因素作用，如海浪的冲击、盐雾的腐蚀等，对船舶材料的疲劳寿命构成了严峻挑战。这些因素不仅加剧了材料的自然老化过程，更在应力集中区域，如焊缝、结构连接点等关键部位，加速了疲劳裂纹的萌生和扩展。疲劳裂纹是材料在反复应力作用下逐渐形成的微小裂缝，它们一旦产生，就会迅速扩展，最终导致材料的断裂。在船舶结构中，这种断裂往往意味着结构的失效，严重时甚至可能导致船舶沉没。而环境因素的持续作用，无疑加速了这一进程，使得船舶材料的疲劳寿命大大缩短。因此，对于船舶材料的疲劳寿命管理，必须采取积极有效的措施，如优化结构设计、选用抗疲劳性能优异的材料、加强维护保养等，以确保船舶在长期的航行过程中，仍能保持良好的耐久性和安全性^[5]。

（三）脆性增加

在特定的环境条件下，如低温海域航行时，船舶材料可能会面临脆性增加的严峻挑战。低温环境会导致材料内部的分子链段运动减缓，从而使得材料的韧性显著下降。这种韧性的降低，使得材料在受到外力作用时，更难以通过塑性变形来吸收能量，因此更容易发生脆性断裂。脆性断裂是一种灾难性的失效模式，它往往在没有明显预兆的情况下突然发生，给船舶的安全航行带来极大威胁。在低温环境中，船舶的关键结构部件，如船体、甲板、舱壁等，如果材料的脆性增加，一旦发生断裂，后果将不堪设想。因此，对于在低温海域航行的船舶，必须特别关注材料的

脆性问题。通过选用低温韧性好的材料、加强结构的保温措施、限制航行速度以降低结构应力等措施，可以有效降低脆性断裂的风险，确保船舶在恶劣环境中的航行安全。

三、环境因素对船舶结构完整性的挑战

（一）结构变形

船舶在浩瀚的海洋中航行，其结构完整性时刻面临着环境因素的严峻考验。其中，结构变形是一个尤为突出的问题。长期承受来自环境的各种荷载，是船体结构发生变形的主要原因。波浪的冲击，如同无数巨锤不断敲击着船体，使其承受着巨大的动态压力。而海流的拖拽，则像无形的大手，时刻拉扯着船体，使其处于持续的应力状态^[6]。这些环境荷载的长期作用，使得船体结构逐渐发生形变，从微小的弹性变形到不可逆转的塑性变形，甚至可能导致结构失效。结构变形不仅影响了船舶的美观和航行性能，更重要的是，它降低了船舶的结构强度，使其在应对极端天气和海况时更加脆弱。一旦变形超过一定限度，就可能引发结构破裂、漏水等严重问题，对船舶的航行安全构成巨大威胁。因此，船舶结构变形是一个不容忽视的问题，需要深入研究和有效应对。

（二）焊缝失效

在船舶结构中，焊缝作为连接各个部件的关键环节，其性能直接影响着整个结构的稳定性和安全性。然而，焊缝也是结构中最为薄弱的环节之一，极易受到环境因素的侵蚀和应力集中的影响。海水中的盐分、溶解氧等腐蚀性物质，会不断侵蚀焊缝处的金属材料，导致焊缝区域出现腐蚀现象。这种腐蚀不仅削弱了焊缝的机械性能，还可能成为裂纹萌生的温床。同时，由于焊缝处的几何形状和尺寸变化，往往会造成应力集中，使得焊缝在承受外力作用时更容易发生断裂。焊缝失效的形式多种多样，包括裂纹、断裂等，这些失效模式一旦发生，将对船舶的结构完整性造成不可逆转的损害。因此，焊缝失效是船舶结构维护中必须高度重视的问题，需要密切关注焊缝的状态，及时发现并处理潜在的失效风险。

（三）密封性丧失

船舶的密封性是保障其正常航行和货物安全的重要基础。然而，舱壁、甲板等关键部位的腐蚀和老化，却成为了威胁这一基础的重要因素。随着时间的推移，这些部位长期暴露在恶劣的海洋环境中，受到海水的侵蚀和氧化作用，金属材料的性能逐渐下降。腐蚀不仅破坏了材料的表面结构，还可能导致材料厚度减薄，进而影响到舱壁和甲板的密封性能。同时，老化现象也使得这些部位的密封材料逐渐失去弹性，无法有效阻挡水分和气体的渗透。一旦密封性丧失，船舶的水密性和气密性将受到严重影响。这不仅可能导致货物受潮、变质，还可能引发船舶进水、沉没等严重后果^[7]。因此，密封性丧失是船舶维护中必须密切关注的问题，需要定期检查和维修舱壁、甲板等部位的密封性能，确保船舶的安全航行。

四、应对策略与防护措施

（一）防腐涂层应用

在应对船舶腐蚀问题上，防腐涂层的应用显得尤为重要。高性能防腐涂料，以其卓越的耐腐蚀性、附着力和耐候性，成为保护船舶免受海水侵蚀的关键手段。这些涂料通常由特殊的树脂、颜料和添加剂组成，能够在金属表面形成一层致密的防护膜，有效隔离海水和腐蚀介质对金属基材的侵蚀。通过定期维护和更新防腐涂层，可以确保船舶在长期的海洋航行中，保持其结构的完整性和稳定性。同时，高性能防腐涂料还具有施工方便、成本效益高等优点。它们不仅能够延长船舶的使用寿命，减少因腐蚀导致的维修和更换成本，还能提升船舶的航行性能和安全性。因此，在船舶维护和保养中，选用并正确应用高性能防腐涂料，是确保船舶长期安全航行的关键措施之一^[8]。

（二）结构优化设计

为了提升船舶在恶劣海洋环境中的耐久性，结构优化设计成为了不可或缺的一环。在材料选择上，采用耐腐蚀性能优异的合金钢、不锈钢或复合材料，能够有效抵抗海水的侵蚀，延长船舶的使用寿命。同时，优化结构设计也是提高船舶耐久性的关键。通过合理布局结构部件，减少不必要的应力集中点，可以降低结构在受力时的损伤风险。例如，采用圆滑过渡的边角设计，避免尖锐边角造成的应力集中；在焊缝设计上，采用合理的坡口形状和焊接工艺，减少焊接缺陷，提高焊缝的强度和韧性^[9]。此外，结构优化设计还包括对船舶整体结构的评估和改进，以确保其在长

期航行中能够保持良好的稳定性和安全性。通过综合考虑材料、设计和工艺等因素，结构优化设计为船舶的耐久性和安全性提供了坚实的保障。

（三）定期检测与维护

为确保船舶在海洋环境中的长期安全运行，建立完善的船舶检测体系至关重要。这一体系涵盖了从日常巡检到定期全面检测的各个环节，旨在利用先进的无损检测技术，及时发现并修复潜在的缺陷和损伤。无损检测技术，如超声波检测、磁粉检测和射线检测等，能够在不破坏材料结构的前提下，对船舶的关键部位进行深入的检测和分析。这些技术能够精确识别出材料内部的裂纹、腐蚀、夹杂物等缺陷，为维修和更换提供了准确的依据^[10]。通过定期的检测与维护，不仅可以及时修复船舶的潜在缺陷，防止其进一步恶化，还能延长船舶的使用寿命，提高航行的安全性和经济性。

五、结论

环境因素对船舶结构的长期耐久性构成显著挑战，但通过科学的防腐措施、结构优化设计以及定期的维护检测，可以有效减缓环境因素的不利影响，保障船舶的安全运行和延长使用寿命。未来，随着材料科学和监测技术的进步，将进一步推动船舶结构耐久性研究的发展，为构建更加安全、环保的海洋运输体系贡献力量。

参考文献

- [1] 谢孟华. 船舶动力定位系统及其控制分析研究 [J]. 珠江水运, 2024, (13): 147-149. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2024.13.043.
- [2] 李九. 考虑环境因素船舶到港时间预测及可视化研究 [D]. 大连海事大学, 2024.
- [3] 詹建辉. 港口船舶引航风险与控制措施 [J]. 珠江水运, 2023, (24): 100-102. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2023.24.034.
- [4] 张文君. 智能船舶航行风险评价与管控策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023. DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.000081.
- [5] 刘超. 基于贝叶斯定理的船舶交通事故环境因素分析 [J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(03): 162-166.
- [6] 罗意. 多因素耦合影响下的船舶运动建模与仿真研究 [D]. 重庆交通大学, 2023. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.001058.
- [7] 金洪禹. 船舶系统声学性能影响因素研究 [J]. 电声技术, 2023, 47(01): 12-16. DOI: 10.16311/j.audioe.2023.01.004.
- [8] 毕芳文. 港口水域碰撞风险的环境因素影响研究 [D]. 大连海事大学, 2022. DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2022.001804.
- [9] 梅佳雪. 腐蚀环境下船舶结构极限承载力及可靠性研究 [D]. 天津大学, 2022. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.000881.
- [10] 潘伟, 董其林, 许小卫, 等. 考虑通航环境因素的智能船舶航线规划 [J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(03): 76-84. DOI: 10.13340/j.jsmu.2021.03.013.