

航母设计选材及腐蚀控制需求

朱英富, 孙九霄, 杨雄辉, 高新华

(中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430063)

摘要: 航母作为人类有史以来最大的军事装备, 是一项复杂的巨系统工程, 使用的材料种类繁多, 工作环境复杂。针对航母使用的苛刻环境条件, 介绍了航母用材的通用选材原则, 并且对船体结构材料、管路及附件材料的特殊选材要求分别进行了阐述。介绍了航母用材的腐蚀特点: 一是腐蚀环境多样, 防护要求高, 防腐设计难度大; 二是系统组成复杂, 设备数量多, 腐蚀故障影响大; 三是舱室结构复杂, 施工空间小, 防腐修理难度大。针对腐蚀特点提出了航母用材的腐蚀控制需求, 从腐蚀控制技术体系、腐蚀控制手段、材料防腐性能3个方面阐述了航母用材的不足和差距, 并针对性地提出了航母用材腐蚀控制的建议和对策。

关键词: 航母; 设计; 选材; 腐蚀控制

中图分类号: TB337 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2014)07-0394-04

Materials Selection and Requirement of Corrosion Control in Aircraft Carrier Design

ZHU Yingfu, SUN Jiuxiao, YANG Xionghui, GAO Xinhua
(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430063, China)

Abstract: As the greatest military platform in human history, aircraft carrier is a complicated giant system with a great variety of materials and complex operating environment. This paper presents the general principles in material selection for aircraft carrier operated in severe conditions, and elaborates on the special material requirements on the hull construction, the pipeline and accessories as well as nonmetal materials. The article introduces the characteristics of material corrosion on aircraft carrier. The first characteristic comes from the various corrosion environment, the high standard protection requirements and the difficulty in corrosion design. The second one comes from the complication in system composition, the great amount of equipment and powerful influence of corrosion malfunction. The last one comes from the intricate cabin structure, the shortage of construction space and the difficulty in anticorrosion. Based on the corrosion characteristics of aircraft carrier materials, the paper expresses the control requirements of corrosion and elaborates on deficiency in selecting aircraft carrier materials based on investigation in corrosion control management, methods of corrosion control and capability of anticorrosion materials, and a series of pertinent advices and countermeasures in corrosion control has been provided.

Key words: aircraft carrier; design; materials selection; corrosion control

1 前言

航母作为人类有史以来最大的军事装备, 是一项复杂的巨系统工程, 所使用的材料种类繁多, 工作环境复杂。航母用材料既包括金属材料, 也包含大量的非金属材料, 从使用功能上分为船体结构材料、管系材料、覆盖层及涂层材料、阻尼及减震降噪材料等。航母用材种类多、品种规格复杂, 不同种类和规格的金属材料、非金属材料总计达几千种。

材料的性能水平高低很大程度上影响各个系统的功能, 进而决定了航母的性能水平。作为最重要的基础平台, 各种材料能否在超过40年的服役期内保持优良的性能, 决定了航母的生命力以及技战术水平, 因此在航母设计时, 选材极为重要。选材既要保证材料的安全可靠, 满足航母各部位使用要求, 又要综合考虑材料经济性、稳定性、维修性、耐久性等众多因素。

在诸多影响材料长期性能的因素中, 腐蚀对材料的耐久性影响最大。对于航母来说, 腐蚀控制是一个复杂的系统工程。为解决这一问题, 必须立足于航母的总体设计要求和规划, 从系统设计、设备设计和制造、施工建造等各方面进行充分考虑, 严格控制制造、建造全过程中的施工工艺, 同时在后使用、维修和管理等方面

收稿日期: 2014-04-20

第一作者及通讯作者: 朱英富, 男, 1941年生, 中国工程院院士, 博士生导师, Email: zhu712yf@hotmail.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.02

严格规范，才能较好地解决腐蚀的防护和控制问题。

2 航母服役环境特点

航母要在多种苛刻环境下工作，其环境特点如下：

风高浪大，海况险恶 航母要在全球无限海区航行，须适应高海况环境。以9级海况为例，风速超过32 m/s，浪高超过14 m。在此环境下，船体结构承受大的应力，对船体材料(包括焊缝)的综合性能要求甚高。

海洋环境温度差大、高湿、干湿交替、高盐雾 航母工作在高温(或高寒)、高湿、高盐雾环境中，其中正常工作温度低至-30℃，高至70℃，湿度最大可达

100%，同时还有包括强太阳辐射、霉菌、盐雾、浸渍、干湿交替等环境因素作用，这些因素加速了材料(尤其是非金属材料)的老化、腐蚀进程。

腐蚀介质种类多，水、液、气、海生物共同作用 船体外部腐蚀介质包括海浪飞溅冲击、海水冲刷、泥沙、油污；船体内部腐蚀介质包括压载海水、污水、燃油、润滑油、液压油、污油、蒸汽、高温烟气、高压空气、氮气、氧气、酸、碱、辐照等。同时，海水的电化学腐蚀和海洋生物的附着污损，一直是危及舰船安全性的两大因素，舰船受不同介质腐蚀的照片见图1。



图1 舰船受不同介质腐蚀的宏观照片：(a)海水腐蚀，(b)电化学腐蚀，(c)海洋生物附着污损

Fig. 1 Macrographs of warships corroded by several different corrosion mediums: (a) seawater corrosion, (b) electrochemistry corrosion and (c) attachment defile by halobios

冲击振动环境，多种载荷共同作用 包括海浪冲击、舰载机作业产生的瞬态冲击、以及各种机械设备运转产生长期交变载荷等对航母造成的各种冲击。

3 航母设计选材原则

航母选材时优先选用成熟材料，通常应遵照以下几项基本原则：①所选材料必须符合现行标准，应经过定型鉴定并经海军订货部门或其委托验收单位的批准。②所选材料的力学性能、物理性能以及规格应符合产品的战术、技术性能要求。对有特殊要求者，除常规力学性能外，所选材料还应满足相应特定的性能要求，如阻尼性能、防弹性能、防磁性能、透声性能、吸波性能、抗辐照性能、耐光辐射性能、高温性能、低温性能等，并使结构重量尽可能小。③所选材料必须品种规格及配套材料齐全。尽可能采用通用化程度高的材料，简化材料的种类、牌号、品种和规格；所使用的材料必须可靠性、稳定性、安全性、工艺性、适修性、经济性好。④积极推广应用新材料。在确保材料各项性能得到检测验证且满足使用需求的前提下，选材时积极应用新材料，提高舰船用材性能指标。

除上述通用选材原则外，几种常用航母材料还有特殊的要求。

3.1 船体材料选材原则

目前，各海军强国均建立了较完整的结构钢体系，并依据舰船发展需求仍在不断研发、完善、提高^[1-3]。美国海军于2007~2010年开展了“HSLA-115高性能钢的评价和实施第Ⅱ阶段”项目的研究，对HSLA钢在CVN78航母上的应用进行验证^[4-5]。复合材料等船体结构新材料越来越受到各海军强国的高度重视^[6-9]。

船体结构材料研发、考核环节众多，周期较长，其材料必须经过以下3个阶段才能确定能否应用于实际型号产品：①材料研制阶段。根据总体设计需要的材料性能要求，开展材料成分及工艺路线设计、工业试制、综合性能评价等，并制定生产技术规程。②应用研究阶段。对材料各项应用性能进行研究，分析材料研制中存在的问题，同时对新材料作出确切评价，为型号设计选材提供技术支撑。对用量最大的结构用钢材，确定钢及配套材料的成分及工艺路线，制订材料的供货验收技术条件，满足生产与供货，并制订钢的冷热加工及焊接工艺。③模型考核阶段。选取实船典型结构进行模拟建造及解剖实验，并选择在冬季等恶劣环境下施工，全方位考核材料的各项性能，考核所制定工艺的正确性与可操作性，形成完整技术文件，完成新材料性能考核及工艺验证，从而确定其能否用于型号产品。图2所示为船体

结构用钢板及球扁钢。

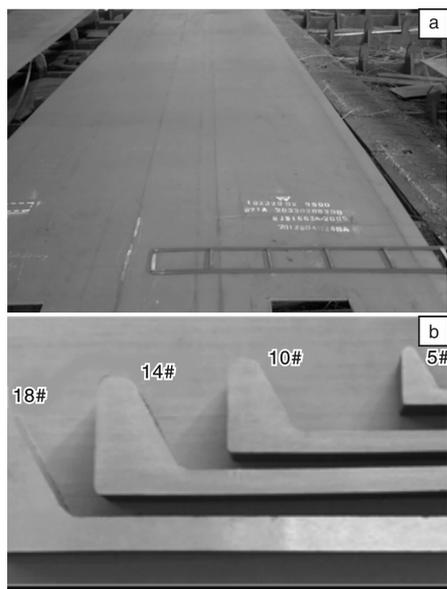


图2 船体结构用钢材的照片: (a) 钢板, (b) 球扁钢
Fig. 2 Photos of steel in hull structure: (a) steel plate and (b) bulb bar

航母船体结构材料在选材时除满足上述通用选材要求外,还应当要求材料具有优良的耐腐蚀性能、焊接性能、冷/热加工性能、低温韧性水平、抗爆抗冲击水平。

3.2 管路及附件材料选材原则

航母的动力、保障系统中大部分由设备和管路构成。管路由管子、阀件和附件组成。管子、阀件及附件材料选材要根据管内介质的种类、性质、压力和温度等使用条件,并结合管路的安装位置、安装环境和敷设方式等多项因素,进行经济性分析后选取,除通用选材要求外应遵照以下几项基本原则:①所选管子、阀件及附件材料的设计压力、设计温度、流体介质特性等性能应符合系统的技术性能要求;②同一系统的阀件和管路附件材料应与管材相匹配,同一系统尽可能减少管系材料、阀件和管路附件的种类;③海水管系中阀件和管路附件材料电位高于管材(大阳极小阴极)。

3.3 非金属材料选材原则

非金属材料的选用主要考虑功能性,即防火、隔热、装饰、吸波、阻尼、吸声等等,同时满足各使用环境的腐蚀、高低温、冲击、振动、磨损及相应的介质条件,其次是安全性,即满足舰船规定的毒性、烟密度、阻燃性或低播焰性等性能。另外必须兼顾配套性、可靠性、稳定性、工艺性、适修性、经济性。

航母飞行甲板涂料需具有好的防腐性能,摩擦系数满足飞机作业要求,耐高温高速气流冲击、耐磨损,具有较好的施工性和修补性^[10]。使用寿命不小于 3 a,能

承受飞机起降 1 万架次轮胎冲击。防腐防污涂料需具有良好的配套性和施工性,分别满足各部位腐蚀环境,其防腐、防污期效满足规定的等级修理周期要求。

4 航母材料腐蚀防护及控制特点

航母巨系统工程所使用的各种材料(包括金属和非金属材料)的腐蚀防护和控制,因航母结构的复杂性而导致其工艺技术的高难度。

4.1 腐蚀环境多样,防护要求高,防腐设计难度大

航母在全球范围航行,各海域腐蚀介质多样,环境作用苛刻;船体内部腐蚀介质复杂^[11-14]。航母使用寿命长达 40~50 a,为保证其安全使用,对腐蚀防护提出了更高的要求,舰船上许多材料传统可实施的腐蚀防护技术面临瓶颈。

4.2 系统组成复杂,设备数量多,腐蚀故障影响大

航母由船体结构、船舶装置、动力、电力、船舶保障、航空保障、作战等多个一级系统和几十个二级系统组成,设备数量达数十万件。腐蚀严重的水管系就有主机海水冷却系统管系、电站海水冷却系统管系、水灭火系统管系、日用海水冷却系统管系、舱底疏水系统管系等。

我国水面舰船装备故障大部分是由腐蚀引起,而航母由于系统组成复杂,多个系统中的电子电气设备可能因腐蚀环境恶劣而降低可靠性,一个系统的腐蚀故障有可能影响作战使用甚至波及全舰功能的发挥,后果影响重大。

4.3 舱室结构复杂,防腐施工空间小,修理难度大

因航母结构极其复杂致使腐蚀防护与控制异常繁杂和困难,这是因为:①航母主甲板下有十几层,几千个舱室,由于各种系统交错布置,底部舱室结构异常复杂,施工空间狭小;②由于系统复杂,大量设备要在分段合拢后安装,分段上涂装的涂料需要在后期进行大量的修补,严重影响涂料的防护效果;③机舱、电站、冷站、泵舱的舱底部位腐蚀环境苛刻,但由于设备管路布置紧凑,且在底部区域施工困难,一旦出现腐蚀,修理难度大。

5 航母材料腐蚀防护与控制的建议及对策

美国拥有最先进的航母腐蚀控制技术,我国在这方面刚刚起步。为我国航母事业的建设和实现跨越式发展,提出以下建议和对策。

对航母腐蚀控制工艺技术进行深入研究 ①结合航母内、外部腐蚀环境和各系统材料特性和运行条件,对重点部位诱发腐蚀的内因、外因进行全面分析和必要的试验,掌握主要腐蚀因素及其变化规律;②加强材料在

使用环境下的腐蚀特性研究, 结合前期水面舰船的腐蚀情况, 检查和清理出现的新问题, 重点开展多因素环境条件下的材料腐蚀规律研究、多材料耦合条件下的异种金属电化学腐蚀行为研究、航母海水管系污损及腐蚀机理研究。

开展防腐技术顶层规划 ①立足于航母特点, 从使用需求出发, 进行顶层规划, 构建航母腐蚀防护控制体系。②按解决当前急需、突破型号研制瓶颈、形成未来技术储备进行分类, 分阶段从总体设计、施工控制、仿真计算、试验验证、监测^[15]与评估、材料研制等方面全方位进行防腐专项技术规划, 全面提高腐蚀控制技术水平。

开展航母腐蚀控制技术方案的方案研究 ①根据航母寿命剖面及使用需求, 研究并提出腐蚀防护设计、建造、管理的定量和定性要求; ②根据航母材料腐蚀环境和特性, 研究各种腐蚀控制技术的适用性及效果, 明确从设计到修理各阶段的腐蚀控制应对措施。

编制航母材料腐蚀控制指南及相关管理文件 ①编制航母腐蚀控制设计、建造、维护修理指南, 以及舰载设备腐蚀控制指南, 指导各系统设计师、制造工程师、维修工程师、舰员开展腐蚀控制工作; ②编制并下发相关管理文件, 落实航母材料腐蚀控制指南的实施、验收和检查。

6 结 语

我国目前材料腐蚀控制技术体系还不完善, 主要体现在: ①相关规范和标准不够, 顶层定性规定较多, 在执行时存在一定的随意性; ②基础研究不足, 信息跟踪、收集、发布机制不够健全, 缺少足够的腐蚀控制数据; ③缺乏完备的腐蚀控制组织机构来统筹防腐研究工作, 构建完善的腐蚀控制技术体系。

当前, 腐蚀控制设计主要按照规范以经验设计为主^[16], 缺乏定量的评估和检验方法; 阴极保护设计缺少定量仿真。对腐蚀控制设计的效果评审缺少系统、定量的评估。必须尽快实现从经验设计、经验管理到仿真计算、试验验证、在线监测、定量评估、科学管理的转变。

虽然我国研制了多种型号的舰船结构钢、管路合金材料、密封材料、防腐涂料, 但整体有效服役寿命与航母的要求还有较大差距。因此, 要加大新材料的研发力度, 提高结构材料、管路材料的防腐性能; 研发长效防腐防污涂料、高性能飞行甲板涂料; 加强海水系统腐

蚀、污损规律及控制技术研究; 全面提高材料腐蚀、老化机制评价手段及匹配设计技术。

参考文献 References

- [1] Wang Qihong(王其红), Liu Jiaju(刘家驹). 舰船材料发展研究[J]. *Ship Science and Technology*(舰船科学技术), 2001(2): 12-15.
- [2] Murray R C. Current Welding Practices for High-Yield Steels Marine Application[J]. *Canadian Welding Association*, 2006(6): 45-47.
- [3] Gordon M. Build Submarine Components from Duplex Stainless Steels[J]. *Welding*, 2006, 85(11): 32-33.
- [4] HSL-115 Evaluation and Implementation Phase II [R]. Project Number: S2171, 2010.
- [5] HSLA-115 Procured for Fabrication of CVN78: Will Reduce Top-Side Weight/Lower Center of Gravity [R]. 2011-01-7.
- [6] Li Jiangtao(李江涛), Luo Kai(罗凯), Cao Mingfa(曹明法). 复合材料及其在舰船中应用的最新进展[J]. *Ship & Boat*(船舶), 2013, 24(1): 10-16.
- [7] An Zhenguo(安振国), Zhang Jingye(张敬业), Song Guangzhi(宋广智). 聚合物基减振降噪复合材料[J]. *Advanced Materials Industry*(新材料产业), 2012(8): 24-31.
- [8] Alvelida M, Enelund M. Modelling of Constrained Thin Rubber Layer with Emphasis on Damping[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 300(3-5): 662-675.
- [9] Liu Tuguang(刘土光). 复合材料在舰船上的应用展望[J]. *Ship Science and Technology*(舰船科学技术), 2005, 27(3): 9-11.
- [10] Deng Qi(邓琦). 舰船甲板防滑涂料技术现状及发展趋势[J]. *Chinese Journal of Ship Research*(中国舰船研究), 2013(2): 111-113.
- [11] Chen Guangzhang(陈光章), Wu Jianhua(吴建华), Xu Likun(许立坤), et al. 舰船腐蚀与防护[J]. *Ship Science and Technology*(舰船科学技术), 2001(2): 38-43.
- [12] Shen Hong(沈宏), Gao Feng(高峰). 舰船海水管系选材及防腐对策[J]. *Ship Engineering*(船舶工程), 2002, (4): 43-47.
- [13] Butler G, Ison H. *Proceedings of 1st International Congress on Metallic Corrosion*[C]. London: Butterworths, 1961.
- [14] Xu Likun(许立坤), Wang Tingyong(王廷勇). 船舶外加电流阴极保护用辅助阳极组件[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2001, 16(2): 35-38.
- [15] Yang Fei(杨飞). 腐蚀防护监测检测技术研究的进展[J]. *Total Corrosion Control*(全面腐蚀控制), 2009, 11: 46.
- [16] Xu Zheng(徐政). 舰船腐蚀防护存在的问题及建议[J]. *Ship & Ocean Engineering*(船海工程), 2012(4): 79-81.