海洋环境服役发动机腐蚀损伤分析及防护能力提升建议

骆晨，孙志华，杨丽媛，詹中伟
（中国航发北京航空材料研究院 中国航空发动机集团航空材料先进腐蚀与防护重点实验室，北京 100095）

摘要：通过我国航空发动机海洋环境服役过程中腐蚀情况的调研，结合文献资料，分析腐蚀防护与控制技术的应用现状，提出未来工作建议。目前海洋环境服役航空发动机的腐蚀防护与控制缺少贯穿方案论证、设计研制、使用维修等全寿命周期各阶段的综合考虑，制约解决腐蚀问题的关键技术没有突破，研制生产过程中，存在耐腐蚀性能评估不合理的问题。应开展腐蚀智能监测、识别、模拟仿真等技术的研发与应用，实现海洋环境服役发动机的腐蚀损伤监控与预警，构建发动机腐蚀环境适应性试验评价技术体系，满足新体制下装备试验鉴定工作要求。急需开展长寿命防护涂层技术、维护技术专项研究，以适应严酷海洋大气环境和航空动力装置高可靠性研制要求。

关键词：试验鉴定；寿命；发动机；腐蚀防护；海洋环境；环境适应性
中图分类号：TG172 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-9242(2024)05-0050-07
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2024.05.006

Analysis on Corrosion Damage of Aero Engine Servicing in Marine Environment and Suggestions for Protection Improvement

LUO Chen, *SUN Zhihua*, *YANG Liyuan*, *ZHAN Zhongwei*
(AECC Key Laboratory on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Based on the investigation of corrosion during the service of aero engines in marine environments, combined with literature review, the current application status of corrosion protection and control technology was analyzed, and future work suggestions were proposed. The corrosion protection and control of engines serving in marine environments currently lack comprehensive consideration throughout the entire life cycle, including scheme demonstration, design and development, and use and maintenance. Key technologies that restrict the solution of corrosion problems have not been breakthrough, and evaluation of corrosion performance in the engine development and production is not fully rationalized. Research and application of smart corrosion monitoring, identification, simulation technologies, et al. should be carried out to achieve early corrosion damage warning of engines in marine environments. Technical systems for testing & evaluating the adaptability of engine to corrosion environments should be built to meet the new requirements of equipment testing and identification. It is urgent to conduct re-

收稿日期：2024-04-21；**修订日期：**2024-05-13
Received：2024-04-21；**Revised：**2024-05-13
引文格式：骆晨，孙志华，杨丽媛，等. 海洋环境服役发动机腐蚀损伤分析及防护能力提升建议[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 50-56.
LUO Chen, SUN Zhihua, YANG Liyuan, et al. Analysis on Corrosion Damage of Aero Engine Servicing in Marine Environment and Suggestions for Protection Improvement[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 50-56.

search on long-life protective coatings and maintenance technology to adapt to the harsh marine atmospheric environment and requirements for the development of aviation power devices with high reliability.

KEY WORDS: experimental identification; lifespan; engine; corrosion protection; marine environment; environmental adaptability

随着我国深远海战略的实施，飞机、直升机等航空装备逐步向海洋环境挺进，服役地点由内陆转变为沿海、驻舰、驻岛、海外护航基地等，与之配套的发动机经受海洋大气环境的考验日益严苛。海洋大气环境的特点为“三高一强”，即高温、高湿、高盐雾、强太阳辐照。当发动机存放于近海机库内时，内部潮湿空气易于滋生各种微生物；在海岸或舰船平台上起飞、降落、停放时，主要面临海水及海洋大气的腐蚀[1-3]，并受到设备排放废气和热量的作用[4-6]；在岛礁机场起降时，还要遭遇珊瑚沙的冲蚀。上述因素对发动机有着重要影响[7]，多型发动机的主要部件由此出现了不同程度的腐蚀。腐蚀制约发动机性能的充分发挥，造成安全隐患，已经成为影响航空装备战斗力和出动率的突出问题。海洋环境对发动机性能的影响成为航空装备设计、研制以及服役时必须考虑的因素。

针对航空发动机的腐蚀性能、防护能力及其对海洋环境的适应性，国内主机厂所、科研院所、高校开展了大量工作，相关腐蚀防护与控制技术陆续装机应用。与此同时，腐蚀监测[8]与识别[9]、材料腐蚀集成计算、腐蚀仿真[10]、基于试验数据深度学习的智能选材技术近年来逐渐成为腐蚀防护、环境适应性研究领域的热点，应用前景广阔。

本文调研了我国航空发动机海洋环境服役过程中的典型腐蚀情况，结合文献资料，开展海洋环境服役的航空发动机腐蚀防护与控制技术应用现状分析，并提出腐蚀防护与控制工作的建议。

1　航空发动机关键部位腐蚀损伤及防护技术应用现状

1.1　关键部位腐蚀损伤

对现役海洋环境服役航空发动机损伤进行调研发现，不同部位的选材、腐蚀损伤原因、腐蚀形式明显不同。

1）冷端部件。风扇、压气机、外部管路、机匣等冷端部件（工作温度范围一般为–55~170 ℃）主要受到海洋环境大气的腐蚀、砂粒的冲击，材料主要有马氏体不锈钢、铝合金、镁合金等，主要发生的是点蚀、冲蚀、晶间腐蚀以及有机涂层的脱落。二代、三代发动机普遍采用马氏体不锈钢，发生腐蚀的情况最多，基本占到 50%左右。

2）热端部件。高压压气机叶片、涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室等热端部件（工作温度最高达 1 700 ℃）主要受到高温燃气、氯化物等盐类的影响，材料主要为高温合金，主要发生的是高温热腐蚀、热氧化、熔盐热腐蚀。当发动机处于停放状态时，还受到海洋大气环境高湿、高盐雾等因素侵蚀，并与前者交互叠加，加速了材料和防护涂层体系的腐蚀失效。

3）成附件。电子控制器、起动发电机等成附件主要的腐蚀损伤是外露表面/壳体的腐蚀，电子接插件的腐蚀，以及需要兼顾导电、耐磨、封严等功能材料的腐蚀。另外，除了使用过程中的腐蚀外，作为备品备件的成附件还可能在贮存环节出现腐蚀。

总体来说，在役发动机由于大部分在设计之初并没有考虑海洋服役环境，主要应用的材料及防护涂层的耐腐蚀能力较差，腐蚀现象比较明显。随着对在研海洋环境服役航空发动机环境适应性的重视，已经在选材上进行了提升。如采用高耐蚀沉淀硬化不锈钢、钛合金、高温合金等，将大大提高其抗腐蚀性。

关于发动机关键部位腐蚀损伤机理，石瑶等[11]、杨丽媛等[12]针对 ZL114A、TC4、0Cr18Ni9、0Cr17Ni4Cu4Nb、40CrNiMoA、3Cr131Cr17Ni7 等航空发动机常用金属材料及防腐涂层开展了多个循环的盐雾、湿热、酸性大气、自然大气环境暴露试验研究，通过腐蚀前后宏观形貌对比、腐蚀速率、腐蚀类型、腐蚀产物，分析腐蚀机理，提出不锈钢应采取钝化处理提高其耐腐蚀性能，而结构钢和铬含量较低的不锈钢可采取涂覆无机铝涂层的方式，通过牺牲阳极作用有效保护基体免受侵蚀。

刘正发等[13]、刘治国等[14-15]进行了某型压气机叶片材料及表面 TiN 涂层的模拟盐雾实验、仿真加速腐蚀试验、预腐蚀后的振动疲劳试验，并利用电化学和质量损失测试得到试样的腐蚀程度及速率，确定压气机叶片能够满足 6~8 a 首翻期的要求，并建立了基于腐蚀影响系数曲线的振动疲劳寿命关系式。姜涛等[16]研究发现，空气中的 S、Cl 元素会导致压气机叶片进气边产生严重的腐蚀损伤，对疲劳裂纹的萌生起着重要的作用，探讨了腐蚀的产生机理和对发动机零部件造成的影响，指出氯和硫等离子的存在是发动机寿命缩短的主要原因。

宋佳等[17]介绍了航空发动机用热喷涂可磨耗封严涂层的海洋气氛电化学腐蚀机理，以及相应涂层结构与材料设计方法，提出了未来航空发动机用耐海洋腐蚀热喷涂封严涂层的发展方向。刘建雄等[18]选取 40CrNiMoA、GH2132、GH738、GH4169、0Cr18Ni9

等材料的螺栓、螺母、管路连接件和典连接件接进行了盐雾、湿热和酸性大气试验，分析了现有发动机常用紧固件的腐蚀防护能力，发现材料、表面质量、表面防护、安装等对紧固件的腐蚀有较大影响。

在盐雾组分和盐雾沉积率对热腐蚀速率的影响方面，Sumner 等[19]研究发现，Na_2SO_4/K_2SO_4 和 $Na_2SO_4/NaCl$ 对 CMSX-4 镍基单晶高温合金试件造成的损伤类似，且盐的沉积率越高，热腐蚀造成的合金质量损失越大。Ahluwala 等[20]将沉积盐浓度与高压涡轮叶片间隙变化联系起来，当 Na 的体积比从 4.0×10^{-8} 增加到 2.0×10^{-7} 时，高压涡轮叶片的叶尖磨损从 20 000 h/mm 减少到 5 000 h/mm。在低温热腐蚀方面，Nicholls 等[21]、Encinas-Oropesa[22]建立了低温和高温热腐蚀的数值模型，针对 CMSX4 合金实验结果进行了拟合，并建立了金属损失量与腐蚀性气体 SO_x 和 HCl 分压的关系。

在热腐蚀环境下疲劳寿命的影响因素方面，Rosier 等[23]着重强调了盐沉积量、应力水平和载荷谱的影响，发现盐的沉积量与寿命并非线性关系，反而存在一个中间沉积量区间，使疲劳寿命的减少程度最大。淳道勇等[24]采用拉伸测试和旋转弯曲疲劳测试检测了 GH909 合金热盐腐蚀不同时间的力学性能，分析了疲劳断口，发现热盐腐蚀对合金在室温及 650 ℃高温拉伸性能的影响不明显，对高温旋转弯曲疲劳寿命有一定降低。Li 等[25]针对于盐沉积量对疲劳寿命的影响研究深入到了微观层次，探究了裂纹的萌生原因。研究发现，当没有盐雾沉积时，疲劳裂纹萌生于靠近试件表面的内部缺陷，并向内部发展；当盐雾沉积率较高时，裂纹萌生于试件表面被热腐蚀破坏处。另外，黄兴隆[26]基于公开的大气数据建立了随着高度变化的海盐气溶胶模型，并结合反应势能和冷凝假设，计算了叶片上硫酸钠的沉积率。根据 IN 738LC 镍基合金腐蚀试验数据，建立的不同涂层的腐蚀模型，能较好反映沉积率与腐蚀率的定量关联趋势。

综上所述，目前研究中关于热端部件在服役过程中承受的燃气热腐蚀、高温熔盐腐蚀等已有不少报道，而对停放期间海洋大气环境对冷端部件、热端部件、成附件的腐蚀作用考虑得较少。此外，相较于飞机、直升机平台研制中近年来逐步推进模拟加速试验评价、腐蚀仿真、腐蚀监检测技术的应用，航空发动机研制时缺乏适用的腐蚀基础数据库、模拟加速评价、腐蚀模拟仿真、腐蚀监检测等技术。耐腐蚀性能考核试验项目也有待深入研究，考核标准、腐蚀分级标准与外场实际使用寿命的相关性亟待验证。存在的各类腐蚀现象也表明，装备在研制生产过程中，存在耐腐蚀性能评估不合理的问题。

1）耐腐蚀性能考核试验项目针对性不强。国内各型海洋环境服役发动机的腐蚀防护试验项目和合格判据主要从飞机、直升机平台输入而来，一般包括酸性盐雾、酸性大气、湿热、霉菌试验等。上述项目考察的重点是基于电化学原理的低温腐蚀，适用于飞机、直升机平台的材料和防护涂层体系，未涉及高温腐蚀，造成试验项目无法反映发动机热端部件耐海洋环境和高温工况耦合作用的性能。

2）合格判据设置不尽合理。对于多数发动机材料、涂层体系，合格判据能够较好评估耐海洋环境性能，但是存在例外。以酸性盐雾、酸性大气试验为例，合格判据中，防护涂层的腐蚀面积不应超过 10%。某些封严涂层本身材质较为疏松，目的是在使用过程中被刮削形成沟槽，达到动密封效果。材料组织特点造成其在酸性盐雾、酸性大气试验中易发生腐蚀，影响结果的合理评估。

3）个别材料试验结果背离使用情况。在个别发动机型号的腐蚀试验和外场服役结果对比中，出现了试验结果与使用情况相背离的情况。一些牌号的不锈钢在酸性盐雾试验中出现严重腐蚀，无法通过考核，而该牌号不锈钢零件随发动机海洋环境服役后，并未出现影响功能的腐蚀，表明目前的指标体系过于单一，未充分考虑连接件/组件的装配、连接等原因造成的影响和差异。因此，有必要在现有指标体系基础上进一步细化，补充“腐蚀损伤容限”概念，研究不同材料、部位允许的腐蚀极限，形成具有包容性的指标体系，为材料和防护体系选择提供更为广阔的空间。

1.2 腐蚀防护技术发展及应用现状

针对现役海洋环境服役发动机高性能防护涂层技术、先进维护技术应用情况的调研显示，当前型号重点应用的防护涂层包括抗氧化涂层、热障涂层、环境障涂层、热防护涂层、特殊功能涂层等。国内外研究的热点包括具有优异的抗氧化、耐腐蚀及力学性能，采用物理气相沉积、低压等离子喷涂或者超音速火焰喷涂方法制备的包覆型 MCrAlY 高温抗氧化涂层（应用于压气机叶片、低压涡轮叶片）[27-28]；稀土锆酸盐涂层、六铝酸盐型涂层、钙钛矿结构涂层等新型热障涂层（应用于高温合金涡轮叶片）[29-30]；无镉、代镉等新型环保耐蚀涂层（应用于直接接触海洋大气环境的发动机零部件）[31-33]；抗冲刷腐蚀性能提高 2~5 倍、与美国直升机 T58 涡轴发动机采用的 ER7 涂层相当的多元复合涂层（应用于压气机叶片）[34]；面层以稀土硅酸盐为主、面向 1 300 ℃以上使用温度的新一代环境障涂层（应用于陶瓷基复合材料结构）[35-36]。

航空发动机在使用过程中的维护工作对腐蚀控制至关重要。近年来，对标国外先进产品，国内陆续开发了发动机进气道清洗剂、积碳去除剂等清洗剂产品，性能指标优于国外对比样品，正在开展海洋环境下发动机清洗剂材料清洗周期、频率的相关研究，以解决喷嘴、叶片等部位的结焦积碳问题[37-38]。开发了

相应的缓蚀剂产品，性能指标达到了国外同类产品的性能水平，正在开展相关型号的验证工作，以实现临时防护，有效防止非工作状态下的腐蚀[39]。

总体来说，在发动机腐蚀防护与控制技术领域，国内相关技术基本跟随了国外的发展方向，但在应用程度、前沿技术水平等方面仍存在一定差距。中低温部件防护技术较为薄弱，基本仍沿用成熟的工艺，而这些工艺已被证明在发动机特有工况（如温度循环、强烈振动等）下难以提供有效防护。不锈钢防护、连接部位防护、特殊功能涂层技术应用等方面存在薄弱环节，耐海洋环境热障涂层的研发亟待加强。

国外发展了系列的清洗剂、缓蚀剂产品，制定了相应标准，形成了较为完整的技术体系，并规范了发动机的制造过程防锈方法、清洗后防护方法、封存方法、维护维修方法等，应用广泛。国内仅有与国外同等性能水平的清洗剂材料，清洗后防护技术仍欠缺。缺乏针对海洋环境服役发动机的高效封存技术，包括封存包装材料及封存周期的研究等，易造成发动机在封存时候的腐蚀问题。

1.3　管理工作现状

航空发动机全寿命周期腐蚀防护与控制的理念需要进一步加强，缺乏完善的管理机制、腐蚀控制文件体系以及标准体系。腐蚀信息的收集、分析、处理、评估及反馈等方面脱节，没有形成良好的腐蚀信息闭环管理模式[40-42]。维护阶段的防腐蚀工作系统性不强，防腐用品和设备不能满足外场需求，缺少外场条件下的腐蚀修理技术标准和合理的清洗维护周期[43]。

2　发展重点和发展建议

对于航空发动机腐蚀防护与控制这一复杂的系统工程，只有提出明确指标要求，设计部门牵头，设计、制造、使用、维护中管理人员全方位、全过程、全员参与，才能够真正使航空发动机腐蚀问题得到控制。发展重点和发展建议主要有以下几方面。

1）加强全寿命周期腐蚀防护与控制的管理。科学合理制定全寿命周期的腐蚀防控方案、计划、大纲、手册等文件，明确型号全寿命周期各阶段腐蚀防控的工作内容和管理要求，确保腐蚀防控工作有效落实。定期举办腐蚀培训班，全面提高腐蚀防护设计、制造和维修人员的理论水平和实操技能。技术研究与全寿命期腐蚀维护管理工作相结合，注重与装备研制决策部门需求、实际使用维护需求联动，实现技术手段迭代更新。

2）腐蚀防护与控制系列标准研究。调研现有腐蚀防护与控制标准，特别是装备全寿命周期顶层策划要求、使用维护及评价标准，开展腐蚀防护与控制系列标准研究，建立标准体系。

3）先进腐蚀防护与控制技术研究。围绕型号需求，对于现役海洋环境服役航空发动机，继续梳理腐蚀防护与控制方面存在的问题，开展专项研究，解决用户急需。对于在研和新研发动机，确定其腐蚀防护与控制的特殊要求，系统开展环保、高性能腐蚀防护与维护维修技术研究，建立涵盖低中高温段的腐蚀防护与控制技术体系。具体来说，应从装备整体全寿命期腐蚀防护的角度出发，兼顾高性能防护和耐海洋环境长效防护 2 个重点，突破中低温长寿命环保型防护和耐海洋环境热障涂层关键技术，为新一代发动机的设计提供充分的选择空间。针对海洋服役发动机维护工作体系化的需求，重点开展清洗及清洗后防护、发动机通用腐蚀维护维修方法等研究和应用推广工作。对标国外腐蚀维护维修产品体系，进一步细化和完善腐蚀维护维修产品系列，如水基缓蚀剂、去胶剂等，气相防锈材料、免清洗防锈油等，提高航空发动机的维护能力。

4）腐蚀基础数据库构建与应用研究。整合海洋环境服役航空发动机腐蚀研究数据，分步推进，服务各型号，建立海洋环境服役航空发动机腐蚀防护与控制基础数据库，研发数据深度应用及专家决策系统。

5）腐蚀智能检测及评估技术研发。开展海洋环境服役航空发动机腐蚀智能监测、识别、模拟仿真等技术研发与应用，实现海洋环境服役航空发动机的腐蚀健康监控与预警。另外，基于调研情况，完善装备研制生产过程中的耐腐蚀性能评估试验体系是我国发动机腐蚀防护的发展重点，对验证试验类型进行区分，明确按照材料/零件—组件/部件—整机等层级进行试验，并形成多层级、体系化的试验项目簇。

材料/零件级试验主要检验材料、涂镀层本身的耐蚀性能，是选材的重要依据。对于无法通过腐蚀试验的材料，应首先考虑增加防护层，并进行验证试验。确需更换材料的，在完成可行性分析后，还应开展验证试验。材料/零件级试验应至少开展 2 轮，包括摸底试验、改进验证试验等。同时，开展自然环境暴露试验，并与室内试验结果对照，为实际服役环境适应性的考察提供基础数据。

连接件/组件级试验主要验证连接结构的抗腐蚀性能，旨在暴露结构设计上的腐蚀薄弱环节，如接触腐蚀、积水部位等，为结构设计改进提供建议。应选择具有代表性的连接结构，包括焊接、螺接、铆接等形式，一般应包含多种材料及涂层。为了进一步考核关键零部件的使用性能，还应开展环境和工况耦合条件下的模拟加速试验。如针对压气机叶片、涡轮叶片等，综合考核服役环境（盐雾、湿度等）和工况（温度、载荷等）对关键零部件性能衰减的影响规律。

整机试验主要依据 GJB 241A、GJB 242A 等航空发动机规范的要求，开展整机抗腐蚀性能试验，并拆解、检查检测发动机性能等。该试验是目前唯一针对

发动机的标准化腐蚀试验，试验条件和流程清晰，对试验后发动机主要性能的判据基本明确。因此，可以通过对整机抗腐蚀性试验中出现的腐蚀损伤进行分析，将其结果作为评价材料、连接件级试验方法合理性的依据。

3 结论

1）我国海洋环境服役航空发动机的腐蚀防护与控制在管理和技术层面都存在不足，尤其对于现役装备，在方案论证、设计研制、使用维修等全寿命周期的各阶段，缺少对腐蚀防护与控制全系统、全流程、全要素的综合考虑，制约腐蚀问题得到根本解决的关键技术没有突破。

2）基于发动机腐蚀防护与控制正向设计需求，应开展腐蚀智能监测、识别、模拟仿真等技术研发与应用，实现海洋环境服役发动机的腐蚀健康监控与预警。发展满足新体制下装备试验鉴定工作要求的发动机耐腐蚀环境适应性评价技术，构建适用于全寿命周期的试验评价技术体系。

3）作为实施海洋环境服役发动机腐蚀控制工作的技术基础，防护涂层技术、维护技术水平有待提高，急需决策部门提供政策支持，加大经费投入，开展全寿命周期腐蚀防护控制技术专项研究，探索新材料体系、新工艺原理，以适应严酷海洋大气环境和航空装备长寿命研制要求。

参考文献：

[1] KETCHAM S. Accelerated Laboratory Corrosion Test for Materials and Finishes Used in Naval Aircraft[R]. Warminster: Naval Air Development Center Report, 1977.

[2] TANKINS E, KOZOI J, LEE E. Shipboard Exposure Testing of Aircraft Materials Aboard USS Ranger[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1994, 47(9): 17-22.

[3] 王素华, 王秀霞, 樊庆和. 舰载直升机的腐蚀与防护[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(3): 343-345.
WANG S H, WANG X X, FAN Q H. Corrosion and Protection of the Shipboard-Helicopter[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2004, 19(3): 343-345.

[4] TANKINS E, KOZOL J, LEE E W. The Shipboard Exposure Testing of Aircraft Materials[J]. JOM, 1995, 47(9): 40-44.

[5] LEE E, ABOURIALY N, KOZOL J. Aircraft Carrier Exposure Testing of Aircraft Materials[R]. Patuxent River: Naval Air Warfare Center Report, 2004.

[6] MORRIS A W. Corrosion Control Test Method for Avionic Components[R]. Warminster: Naval Air Development Center Report, 1981.

[7] 霍武军, 孙护国. 海航发动机压气机叶片腐蚀与防护措施[J]. 航空工程与维修, 2002(6): 39-41.
HUO W J, SUN H G. Corrosion and Precaution for Blades of Aero-Engine Compressor in the Navy Air Arm[J]. Aviation Engineerging & Maintenance, 2002(6): 39-41.

[8] XIA D H, DENG C M, MACDONALD D, et al. Electrochemical Measurements Used for Assessment of Corrosion and Protection of Metallic Materials in the Field: A Critical Review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 151-183.

[9] XIA D H, SONG S Z, TAO L, et al. Review-Material Degradation Assessed by Digital Image Processing: Fundamentals, Progresses, and Challenges[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53: 146-162.

[10] 夏大海, 邓成满, 陈子光, 等. 金属材料局部腐蚀损伤过程的近场动力学模拟: 进展与挑战[J]. 金属学报, 2022, 58(9): 1093-1107.
XIA D H, DENG C M, CHEN Z G, et al. Modeling Localized Corrosion Propagation of Metallic Materials by Peridynamics: Progresses and Challenges[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(9): 1093-1107.

[11] 石瑶, 黄子琳, 袁珂. 三种航空发动机常用金属材料盐雾腐蚀试验研究[J]. 航空标准化与质量, 2020(3): 52-56.
SHI Y, HUANG Z L, YUAN K. Study on Salt Fog Test of Three Metallic Material Used in Aeroengine[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2020(3): 52-56.

[12] 杨丽媛, 赵春玲, 邸士雄, 等. 几种结构钢和不锈钢的耐海洋大气腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 9-16.
YANG L Y, ZHAO C L, DI S X, et al. Corrosion Resistance of some Structural Steels and Stainless Steels in Ocean Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 9-16.

[13] 刘正发, 徐哲, 张春梅. 某型压气机叶片防护层耐蚀性研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 490-494.
LIU Z F, XU Z, ZHANG C M. A Study of the Corrosion-Resistant Characteristics of the Blades of a Compressor and Their Protective Coatings[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(5): 490-494.

[14] 刘治国, 查小晖, 李宇涛, 等. 某新型航空发动机压气机叶片服役环境适应性研究初探[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 1-8.
LIU Z G, ZHA X H, LI Y T, et al. Study on Environmental Adaptability of the Blade of a New Aero-Engine Gas Compressor[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 1-8.

[15] 张安琴, 孔光明, 刘治国, 等. 压气机叶片腐蚀条件下振动疲劳寿命分析[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(4): 215-219.
ZHANG A Q, KONG G M, LIU Z G, et al. Vibration Fatigue Life Analysis of Compressor Blade under Corrosion Conditions[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022,

17(4): 215-219.

[16] 姜涛, 李春光, 张兵. 发动机压气机转子叶片断裂失效分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 18-22.
JIANG T, LI C G, ZHANG B. Fracture Analysis of Compressor Rotor Blade in Engine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 18-22.

[17] 宋佳, 王璐, 袁福河, 等. 耐海洋环境腐蚀的航空发动机封严涂层技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 37-40.
SONG J, WANG L, YUAN F H, et al. Technology and Development of Aero Engine Sealing Coating Resistant to Marine Environment Corrosion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(14): 37-40.

[18] 刘建雄, 黄南, 袁伯雅, 等. 改型发动机紧固件防腐蚀研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(6): 54-60.
LIU J X, HUANG N, YUAN B Y, et al. Study on Corrosion Prevention of the Fastener in Improved Engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(6): 54-60.

[19] SUMNER J, ENCINAS-OROPESA A, SIMMS N J, et al. Type II Hot Corrosion: Kinetics Studies of CMSX-4[J]. Oxidation of Metals, 2013, 80(5): 553-563.

[20] AHLUWALIA R, IM K. Correlation between Sodium Sulfate Mass Transfer and Low-Temperature Hot Corrosion[R]. New York: ASME, 1988.

[21] NICHOLLS J R, SIMMS N J, ENCINAS-OROPESA A. Modelling Hot Corrosion in Industrial Gas Turbines[J]. Materials at High Temperatures, 2007, 24(3): 149-162.

[22] ADRIANA E O. Study of Hot Corrosion of Single Crystal Superalloys and Platinum-Aluminide Coatings[D]. Cranfield: Cranfield University, 2005

[23] ROSIER H, PERKINS K, GIRLING A, et al. Factors Affecting the Corrosion Fatigue Life in Nickel Based Superalloys for Disc Applications[J]. MATEC Web of Conferences, 2014, 14: 03001.

[24] 淳道勇, 詹中伟, 葛玉麟, 等. GH909 合金热盐腐蚀行为及力学性能衰减研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(12): 11-16.
CHUN D Y, ZHAN Z W, GE Y L, et al. Hot Salt Corrosion Behavior and Mechanical Property Reduction of GH909 Alloy[J]. Plating and Finishing, 2022, 44(12): 11-16.

[25] LI S L, YANG X G, XU G Q, et al. Influence of the Different Salt Deposits on the Fatigue Behavior of a Directionally Solidified Nickel-Based Superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 84: 91-96.

[26] 黄兴隆. 海洋环境下叶片腐蚀预测分析[J]. 中国科技纵横, 2020(9): 102-104.
HUANG X L. China Science & Technology Panorama Magazine, 2020(9): 102-104.

[27] 蔡妍, 李建平, 牟仁德, 等. 电弧离子镀 HY11 涂层的 1200 ℃高温氧化行为研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 35-40.
CAI Y, LI J P, MU R D, et al. Oxidation Behaviour of HY11 Coating Deposited by AIP at 1200 ℃[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(1): 35-40.

[28] 任维鹏, 李青, 黄强, 等. 定向凝固镍基高温合金 DZ466 表面 CoAl 涂层的氧化及组织演变[J]. 金属学报, 2018, 54(4): 566-574.
REN W P, LI Q, HUANG Q, et al. Oxidation and Microstructure Evolution of CoAl Coating on Directionally Solidified Ni-Based Superalloys DZ466[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(4): 566-574.

[29] 戴建伟, 牟仁德, 王鑫, 等. ZrO_2 掺杂对 $La_2Ce_2O_7$ 力学和热物理性能影响的研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(10): 21-26.
DAI J W, MU R D, WANG X, et al. Effects of ZrO_2 Doping on Mechanical and Thermo-Physical Properties of $La_2Ce_2O_7$ Ceramics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(10): 21-26.

[30] 贺文燮, 甄真, 王鑫, 等. 铂铝黏结层体系 EB-PVD 热障涂层的热循环行为[J]. 航空材料学报, 2023, 43(4): 17-24.
HE W X, ZHEN Z, WANG X, et al. Thermal Cycling Behavior of EB-PVD TBCS with Pt Modified Aluminide Bond Coat[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(4): 17-24.

[31] 张安琴, 詹中伟, 张骐, 等. 17-4PH 不锈钢无氰镀银封闭处理的耐腐蚀及抗微动磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(13): 36-44.
ZHANG A Q, ZHAN Z W, ZHANG Q, et al. Corrosion and Fretting Wear Resistance of Cyanide-Free Silver Coating Electroplated on 17-4PH Stainless Steel after Sealing[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(13): 36-44.

[32] 孙志华, 刘明, 张晓云, 等. 高强度钢代镉铝基涂层耐海洋环境腐蚀性能评价[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 71-76.
SUN Z H, LIU M, ZHANG X Y, et al. Corrosion Property at Marine Atmosphere of Al Based Coatings Replacing Cd on High Strength Steels[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 71-76.

[33] 秦锐, 张骐, 骆晨, 等. 酸性锌镍合金电镀工艺参数对镀层镍含量的影响[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(1): 11-13.
QIN R, ZHANG Q, LUO C, et al. Effects of Process Parameters on Ni Content of Zn-Ni Coating Electroplated in an Acidic Bath[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(1): 11-13.

[34] 关振威, 李静, 张玉忠, 等. 压气机叶片用耐冲刷防腐有机涂层的制备及性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 36-41.
GUAN Z W, LI J, ZHANG Y Z, et al. Fabrication and Evaluation of an Organic Coating for Anti-Scouring and Anti-Corrosion Application on Compressor Blades[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 36-41.

[35] 崔永静, 洪智亮, 郭孟秋, 等. 热处理对等离子喷涂 BSAS 环境障涂层性能影响[J]. 材料工程, 2023, 51(3): 59-66.

CUI Y J, HONG Z L, GUO M Q, et al. Effect of Heat Treatment on Properties of Plasma-Sprayed BSAS Environmental Barrier Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(3): 59-66.

[36] 洪智亮, 崔永静, 郭洪宝, 等. 等离子喷涂 BSAS 环境障涂层 SiC_f/SiC 复合材料扇形燃烧室环境损伤行为[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 110-116.
HONG Z L, CUI Y J, GUO H B, et al. Damage Behavior of SiC_f/SiC Composites with BSAS Environmental Barrier Coating by Plasma Spraying during Sector Combustor Test[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 110-116.

[37] 任智勇, 李志鹏, 王俊琦. 湿热盐雾对涡轴发动机性能的影响分析[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(4): 27-29.
REN Z Y, LI Z P, WANG J Q. Analysis on Effect of Hot Moisture and Salt Spray on the Performance of Turboshaft Engine[J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(4): 27-29.

[38] 肖雪萍, 韩云利. 某型发动机高压涡轮叶片进排气边积炭去除工艺研究[J]. 航空维修与工程, 2018(8): 57-59.
XIAO X P, HAN Y L. Research on Carbon Deposit Removal of High Pressure Turbine Blade Leading and Trailing Edge Surface for a Certain Type of Engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(8): 57-59.

[39] 王国立, 姜国杰, 孙志华. ECI-1 油膜缓蚀剂对发动机及附件防护的应用研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 6-12.
WANG G L, JIANG G J, SUN Z H. Application of ECI-1 Oil Film Corrosion Inhibitor for Engine and Accessory Protection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 6-12.

[40] 柳文林, 徐可君, 段成美. 军用航空发动机的腐蚀及腐蚀控制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(2): 116-118.
LIU W L, XU K J, DUAN C M. Corrosion and Corrosion Control for Aeroengine Used for Military Plane[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(2): 116-118.

[41] 叶远珩. 航空发动机腐蚀防护与控制[J]. 军民两用技术与产品, 2017(2): 52.
YE Y H. Corrosion Protection and Control of Aircraft Engines[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(2): 52.

[42] 金帅, 张振兴. 海军用航空发动机的腐蚀与防护[J]. 内燃机与配件, 2019(2): 121-122.
JIN S, ZHANG Z X. Corrosion and Protection of Naval Aviation Engines[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(2): 121-122.

[43] 姜海勋, 姜国杰, 孙志华, 等. 航空装备腐蚀维护维修新材料研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 22-27.
JIANG H X, JIANG G J, SUN Z H, et al. Research Progress of New Corrosion Maintenance or Repair Materials for Aviation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 22-27.