# 井勇智,金国,李昕瑶,崔秀芳,温鑫,关亚杰

(哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院 超轻材料与表面技术教育部 重点实验室,哈尔滨 150001)

摘要:围绕海洋环境下航空发动机的服役特点,针对发动机叶片在海洋/近岸地区不同气候条件下的工作状况,对发动机冷端叶片在腐蚀-冲蚀联合作用下的失效机制进行了梳理总结。对海洋环境下服役的发动机叶 片防护涂层的相关研究进行了归纳,总结了不同叶片防护涂层的设计理念及其性能表现。对于航空发动机 叶片的防护涂层,目前主要是以一元或多元金属氮化物涂层,和金属相与陶瓷相的键合涂层为主,两类涂 层的设计目的在于通过控制涂层中的相含量来调控涂层的强韧比和耐磨耐蚀性。

关键词:发动机叶片;腐蚀;冲蚀;海域条件;防护涂层

中图分类号: TG172; TG174 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)06-0017-05 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.003

# **Overview of Erosion Damage and Protection of Cold End Blades** of Aircraft Engine under Marine Conditions

JING Yong-zhi, JIN Guo, LI Xin-yao, CUI Xiu-fang, WEN Xin, GUAN Ya-jie

(Key Laboratory of Superlight Material and Surface Technology of Ministry of Education, College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**ABSTRACT:** Based on the service characteristics of aircraft engines in the marine environment, and according to the working conditions of the engine blades under different climatic conditions in the ocean/nearshore area, the failure mechanism of the cold-end blades of the engine under the combined action of corrosion and erosion was summarized. The related research on protective coatings of engine blades in marine environment is generalized and introduced, and the design concepts and performance of different protective coatings of blades are epitomized. The protective coatings of aero-engine blades are mainly one-or

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-03-17

Received: 2021-01-27; Revised: 2021-03-17

**基金项目:**国家自然科学基金(51775127,51975137);黑龙江省自然科学基金(E2018020);船用低速发动机项目-1期(CDGC01-KT0302); 中央高校基本科研业务费专项资金(3072020CF1010)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775127, 51975137), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (E2018020), Marine Low Speed Engine Project (Phase I) (CDGC01-KT0302), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3072020CF1010)

作者简介:井勇智(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为表面工程。

Biography: JING Yong-zhi (1993-), Male, Ph. D candidate, Research focus: surface engineering.

通讯作者:金国(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: JIN Guo (1977-), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering.

**引文格式:** 井勇智, 金国, 李昕瑶, 等. 海洋工况下航空发动机冷端叶片的冲蚀损伤与防护概述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 017-021. JING Yong-zhi, JIN Guo, LI Xin-yao, et al. Overview of erosion damage and protection of cold end blades of aircraft engine under marine conditions[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 017-021.

multi-element metal nitride coatings and bonding coatings of metal phase and ceramic phase now. The two types of coatings are designed to improve the strength-to-toughness ratio and wear and corrosion resistance of the coating by controlling the phase content in the coating.

KEY WORDS: engine blade; corrosion; erosion; sea conditions; protective coating

我国海域辽阔,从南海地区至北部渤海海域,纵 向跨越纬度近 40°。各海域在全年中的气候及盐度, 以及近岸和远岸地区的盐度都会存在一定差异[1-2]。 目前我国海上军事力量在各海域均有布置。军用飞机 在海域地区、低空海域飞行时,必然经受着高盐度大 气的侵蚀,尤其是夏季海域频繁的强降雨天气,具有 一定盐度的雨水对军用飞机造成的雨滴冲刷侵蚀也 会加快装备的冲蚀损伤速率。作为飞机最为关键的发 动机部件,其各级叶片在海洋工况下主要受到湿热盐 气的腐蚀作用<sup>[2-4]</sup>。在近海岸和岛礁起降过程中,虽 然盐气腐蚀浓度可能会有略微降低,但是近岸地带或 岛礁地面的砂尘等颗粒物极易被发动机吞吸,使得发 动机各级叶片受到强烈的冲刷与盐性颗粒沉积的双 重作用,很容易会造成腐蚀-冲蚀联合作用,导致压 气机部件及风扇叶片的冲刷腐蚀,甚至是由于发动机 振动下应力导致的腐蚀开裂和疲劳断裂等<sup>[5]</sup>。因此, 文中围绕航空发动机冷端叶片在海洋(腐蚀性)工况 下的腐蚀-冲蚀问题进行了讨论与分析,以此为开展 叶片的防护提供一定的借鉴意义。

# 1 海洋工况

海洋大气中含有盐分,且湿度大。这些盐分以不同的粒径或形式存在于大气中,气候条件不同,海洋 大气中的盐含量也有所不同。通常温度、风速、湿度 越大,盐含量越高。例如,晴天时,海洋大气中盐的 质量分数为 0.01×10<sup>-6</sup>~0.05×10<sup>-6</sup>,直径小于或等于 5 µm;一般天气下,盐的质量分数为 0.1×10<sup>-6</sup>~0.2× 10<sup>-6</sup>,盐粒直径不大于 20 µm;恶劣天气下,在大风 时,盐的质量分数可达 1×10<sup>-6</sup>。我国海岸类型包括了 除寒带和极地海岸类型外的所有类型,形成了沿海气 温高、湿度大、盐分高、雾区多的特点<sup>[4]</sup>。

海洋环境下容易引起金属材料及零部件的腐蚀, 特别是发动机的冷端部件的腐蚀,腐蚀的产生又会严 重降低零部件的力学性能(如强度、疲劳寿命等)。 军机长期在海域环境服役,不但要经受高温、高热、 高盐气环境,而且还要适应各种气候条件下的起降工 况,首当其冲的关键部件就是发动机及其各级叶片。 因此,海域环境下飞机起降过程或近低空飞行时,发 动机叶片主要受到湿热盐气的腐蚀作用,以及海洋蒸 发形成的盐气微型雾滴冲蚀及空化作用<sup>[5]</sup>。

飞机在沿海及深海岛礁区域起降或悬停过程中, 航空发动机叶片的高速旋转会造成发动机进气口及 其周围产生极大的负压环境,很容易将蒸发的盐气、 砂粒、杂物等混合多介质吞入发动机内。各级叶片在 经受固体物质冲击碰撞的同时,大量盐性气、固粒子 进入发动机通道。在固体介质的全方位撞击下,叶片 的腐蚀过程被加速,大大增加了应力腐蚀-点蚀联合 作用产生裂纹的风险,甚至引发叶片的疲劳断裂。

# 2 海域环境下发动机叶片的冲蚀-腐蚀

#### 2.1 服役叶片的工况

军用飞机在海域起降及低空飞行过程中,发动机 会吸入大量盐气和含盐雾滴。在近岸与岛礁的起降, 还需考虑靠近地面时地表的大量砂尘被连带吸入发 动机内部的情况,这将对发动机各级叶片造成强烈的 冲刷腐蚀效应。与此同时,叶片在高速旋转的情况下, 经历固体颗粒的全方位冲蚀以及高频循环应力的作 用。冲蚀-腐蚀的联合作用,使叶片产生材料损失和 塑性变形,如图 1 所示。因此,在海洋/沿海服役环



图 1 典型叶片轮廓、叶片尾缘的磨损槽和叶片前缘的球 形磨损痕迹<sup>[7]</sup>

Fig.1 (a) Typical blade profile, (b) trailing edge of the blade, shows parallel wear grooves in the same direction of the blade movement, (c) leading edge of the blade with features of globular wear marks<sup>[7]</sup>

境中工作的航空发动机,冷端叶片一般很少因材料或 冶金异常而引起故障,一般叶片失效的案例大都是由 于在波动/循环应力和腐蚀环境的共同作用下发生腐 蚀疲劳开裂而失效。由此可知,海洋环境中,发动机 冷端叶片的失效模式包括环境破坏模式和机械-环境 破坏模式<sup>[6]</sup>。

### 2.2 叶片的冲蚀-腐蚀失效机理

在海洋环境下服役的航空飞机,受到空气中固体 颗粒的侵蚀以及潮湿空气和海盐的腐蚀。与单一因素 的影响相比,侵蚀和腐蚀的结合加速了破坏过程。由 于固体颗粒的侵蚀和腐蚀而造成的损坏,导致发动机 安全性低,维护成本高,战备性差。冲蚀腐蚀坑会 使叶片边缘产生疲劳开裂,也会引起叶片的形状变 形,因而对发动机叶片造成很强的腐蚀和很高的冲 蚀率<sup>[8]</sup>。

1)液滴冲击与腐蚀作用。在海上环境中,冲蚀 和冲击方面与环境有关的因素有很多(如雨水冲击、 风速等),这些因素影响着叶片前缘的性能。研究结 果表明,含盐液滴在叶片上的撞击速度与撞击角之间 存在明显的关系。冲击速度越高,侵蚀越大;在冲击 角较低时,由于液滴的剪切作用,冲蚀程度较高。当 冲击角较大时,由于液滴的变形影响,表面损伤较多, 质量损失较小。多变的运行环境,大大增加了叶片前 缘的侵蚀效应,如雨滴和冰雹等对叶片前缘的侵蚀, 会导致叶片阻力增加。文献[3]表明,对于轻度侵蚀, 叶片阻力会增加 6%左右。

小水滴侵蚀也是海洋环境常见的一种材料失效 模式。当直径为 50~800 µm 的水滴连续加速撞击在活 动叶片的凸面上,形成的水滴直径大于 200 µm,终 端速度大于 250 m/s 时,会导致快速侵蚀。前缘的材 料损失就是水滴撞击造成的。在速度为 300 m/s 时, 800 µm 大液滴的撞击会产生很高的局部应力。因此, 高速水滴的撞击会对高速军用飞机产生严重的腐蚀 问题。一般情况下,腐蚀疲劳伴随点蚀被认为是最常 见的单一因素,而液滴侵蚀导致在叶片关键位置处形 成的腐蚀坑可加重叶片的开裂。其作用主要有 2 个方 面:一种是应力集中导致叶片承受高应力(静态和循 环应力),随着腐蚀的进行,凹坑底部停滞的腐蚀池 浓度会发生改变;另一种情况可能导致较低的 pH 值, 更酸性的环境,这对常规合金叶片的腐蚀疲劳寿命是 有害的<sup>[9]</sup>。

2)颗粒侵蚀与应力作用。在海域环境晴朗天气下,航空发动机叶片在工作中主要受到多种动力(如高离心力和气动力)来源的作用。有时,动力在发动机运行过程中被放大,导致叶片出现疲劳失效的情况,而疲劳断裂也是发动机叶片失效的最常见原因。此外,叶片在含氯化物和硫化物离子的盐气腐蚀环境

中长期运行时,也是最先被损坏的部件。因为大气中 的氯离子会导致叶片表面出现点蚀,加之气流中固体 颗粒物的机械作用和磨蚀引起的腐蚀坑,以及在叶片 表面形成的沉积层,这些都增加了表面裂纹萌生的概 率。这些表面缺陷在循环载荷和应力集中情况下,会 导致叶片平均应力升高,从而影响叶片的疲劳寿命, 因此很容易导致叶片疲劳失效<sup>[10]</sup>。

如果发动机长期工作在腐蚀性环境中,叶片表面 会出现腐蚀坑,在侵蚀和腐蚀的共同作用下,腐蚀坑 的形成可能会加剧。冲蚀也可以增加腐蚀速率,这是 由于冲蚀可以将腐蚀产物从表面去除,再一次使基体 合金暴露在腐蚀环境中。冲蚀也可能通过去除腐蚀表 面产物,引起局部扰动,增加表面粗糙度,增加涂层 表面-腐蚀介质接触区面积,从而对腐蚀产生附加效 应。如果由冲蚀、腐蚀或冲蚀腐蚀机制产生的凹坑位 于叶片的拉应力区,这些凹坑周围的应力水平显著增 加,立即形成初始裂纹。在振动应力作用下,裂纹迅 速扩展到临界尺寸,从而导致叶片断裂。因此,应力 腐蚀开裂和腐蚀疲劳是叶片在静载荷和动载荷腐蚀 环境下工作时最常见的失效形式。其中,表面缺陷(如 夹杂物、凹痕和腐蚀点)对疲劳裂纹的萌生有重要影 响,从而影响叶片的寿命。在疲劳开裂、应力腐蚀开 裂或腐蚀疲劳机制的不同阶段中,裂纹萌生的时间 最长,但这些腐蚀或点蚀坑会显著缩短裂纹萌生的 时间[5]。

# 3 叶片的防护涂层

在某些极端的环境以及在不同的飞行操纵过程 中,空气中的磨蚀性颗粒会被摄入飞机燃气涡轮发动 机的进气口中。随后,摄入的颗粒物(例如灰尘,沙 子,冰块和火山碎屑)会撞击发动机组件。异物撞击 压缩机部件而造成的损坏,大大降低了飞机的飞行效 率和服役性能,并增加了大修的需要。通常发动机空 气颗粒分离器(EAPS)安装在发动机进气口之前, EAPS在清除碎屑方面非常有效,但是它们也会导致 发动机质量增加,发动机入口压力和质量流量降低。 此外,这些分离器通常对小颗粒的分离过滤效果不 佳。因此,对发动机叶片制备防护涂层是必不可少且 行之有效的保护方式。

### 3.1 陶瓷化的金属相涂层

传统的叶片防护涂层多采用单相或两相金属氮 化物作抗腐蚀涂层。TiN 基涂层被应用于发动机叶片 以减轻腐蚀,取得了巨大的成功。但基于发动机设计, TiN 涂层对于某些砂尘环境下运行的飞机发动机而 言,其防护效果并不令人满意。研究表明,发动机吸 收了包含水蒸气或盐雾的空气后,由于电偶腐蚀作 用,TiN 基涂层涂覆在不锈钢部件上时,通常会引发 腐蚀。二元氮化物或纳米(Ti,Cr)N 相可以改善涂层的 性能(如硬度、耐蚀性等)。Cr 含量的增加,导致涂 层中 CrN 相的体积增大,从而导致涂层的耐腐蚀性 能和硬度降低<sup>[11-12]</sup>。

一种具有大量的界面、多层设计和应力吸收层的 Ti/TiN和TiAl/TiAlN纳米多层涂层,其耐腐蚀性几乎 比Ti6Al4V基体高1个量级<sup>[8]</sup>,同时具备很高的耐冲 蚀性能。这主要得益于相邻晶粒晶格结构的取向不 同,位错改变方向,并向相邻晶粒移动需要更多的能 量。对于这类纳米复合涂层,腐蚀性介质可以穿透晶 界,但不能轻易穿透纳米多层膜,因为随着界面数量 的增加,多层膜的耐腐蚀性能提高,超薄层之间存在 大量的尖锐界面,有效地限制了腐蚀的渗透。两层材 料间存在大量不同剪切模量的尖锐界面,限制了裂纹 和腐蚀向基体的渗透<sup>[8]</sup>。此外,多元多层设计涂层具 有增强增韧的作用<sup>[13-14]</sup>、更高的腐蚀电势、更高的点 蚀电势和更宽的钝化范围<sup>[15]</sup>。因此,这种多层耐冲蚀 涂层是一种解决冲蚀-腐蚀问题的有效涂层。

### 3.2 金属-陶瓷复合涂层

叶片在多组分气体环境下工作,叶片涂层的力学 性能会由于冲蚀和腐蚀的共同作用而恶化。涂层经历 严重侵蚀后,材料会有软化的趋势,硬度也随着温度 的升高而降低。Anand 等<sup>[16]</sup>开发的 25% (Cr3C2-25 (Ni20Cr))+75% NiCrAlY 叶片防护涂层是以富镍 FCC 相作为主相。该涂层较好的抗冲蚀性归因于材料的复 合韧脆结构,涂层组织中由韧性合金基体结合的未熔 颗粒促进了复合材料的延性脆性行为。从当前文献报 道来看,这种金属相与陶瓷相键合涂层受到越来越多 的关注。例如 WC-25WB-10Co-5NiCr 与 MoB-25NiCr 复合涂层<sup>[17]</sup>、WC-10Co4Cr复合涂层<sup>[18]</sup>,甚至添加不 同含量 Mo<sub>2</sub>C/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>的 WC-Co-Cr 复合涂层<sup>[19]</sup>, 被作为很有潜力的叶片防护涂层进行了研究报道。它 们所遵循的原则都是在主基体相中添加不同含量的 硬质陶瓷增强相以提高涂层的力学性能、耐腐蚀和耐 磨损性能<sup>[20-21]</sup>。从研究结果来看,这种复合涂层有利 于提高材料的抗气蚀、空蚀、冲蚀,以及海水侵蚀、 腐蚀的能力<sup>[17-21]</sup>。

# 4 结论

海洋或沿海(近岸)环境下发动机冷端叶片的失效模式主要为环境破坏模式和机械-环境破坏模式。循环应力和腐蚀环境的共同作用下叶片容易发生腐蚀疲劳开裂问题。

2)海洋雨雾天气下,叶片主要以水滴侵蚀为主。 液滴侵蚀容易导致叶片关键位置(如叶片前缘)处形 成腐蚀坑,叶片承受高应力(静态应力和循环应力)。 随着腐蚀的进行,凹坑底部的环境会发生改变,或形 成更酸性的环境, 使合金叶片的腐蚀疲劳寿命降低。

3)海域晴朗气候下,叶片受到大气中的氯离子 侵蚀,导致表面出现点蚀,气流中携带的固体颗粒物 也会对叶片造成机械磨蚀和表面沉积,这些会增加表 面裂纹萌生的概率。表面缺陷在循环载荷和应力集中 情况下,叶片的平均应力升高,疲劳寿命被大大缩短, 应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳是其常见的失效形式。

4)对于航空发动机叶片的防护涂层,目前主要 是以一元或二元甚至三元金属氮化物涂层和金属相+ 陶瓷相的键合涂层为主,两类涂层的设计目的都是以 控制相含量来提高涂层的强韧比和耐磨耐蚀性。

#### 参考文献:

- [1] 黄明. 热湿气候风洞内营造南海岛屿含盐大气环境的 技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
   HUAG Ming. Study on technology of creating saline atmospheric environment of south china sea islands in hot and wet climate wind tunnel[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [2] 徐国葆. 我国沿海大气中盐雾含量与分布[J]. 环境技术, 1994(3): 1-7.
  XU Guo-bao. The content and distribution of salt fog in the coastal atmosphere of my country[J]. Environmental Technology, 1994(3): 1-7.
- [3] KIERAN P, GHULAM R, STACK M M. Some thoughts on mapping tribological issues of wind turbine blades due to effects of onshore and offshore raindrop erosion[J]. Journal of bio- and tribo-corrosion, 2018, 4 (3): 50.
- [4] 赵德孜.海洋环境下燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀与防 护[J].装备环境工程, 2011, 8(5): 100-103.
   ZHAO De-zi. Hot corrosion and protection of gas turbine blade in marine environment[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(5): 100-103.
- [5] ESMAEIL P, ALIREZA M N, MOHSEN L, et al. Experimental studies of erosion and corrosion interaction in an axial compressor first stage rotating blade material[J]. Applied physics A, 2018, 124 (9): 629.
- [6] NANDI V, BHAT R R, PRASAD V R. Cracking of erosion strip of main rotor blade of a military helicopter[J]. Journal of failure analysis and prevention, 2019, 19: 36-44.
- [7] AZEVEDO C R F, SINÁTORA A. Erosion-fatigue of steam turbine blades[J]. Engineering failure analysis, 2009, 16(7): 2290-2303.
- [8] BONU V, JEEVITHA M, KUMAR V P, et al. Solid particle erosion and corrosion resistance performance of nanolayered multilayered Ti/TiN and TiAl/TiAlN coatings deposited on Ti6Al4V substrates[J]. Surface & coatings technology, 2020, 387: 125531.
- [9] MANN B S, ARYA V. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam

turbine blades[J]. Wear, 2003, 254 (7-8): 652-667.

- [10] KAZEMPOUR L H, MEHDIZADEH M, AKBARI G M, et al. Corrosion and fatigue failure analysis of a forced draft fan blade[J]. Engineering failure analysis, 2011, 18(4): 1193-1202.
- [11] REEDY M W, EDEN T J, POTTER J K, et al. Erosion performance and characterization of nanolayer (Ti, Cr)N hard coatings for gas turbine engine compressor blade applications[J]. Surface & coatings technology, 2011, 206 (2-3): 464-472.
- [12] CHEN Z Y, LI Z Q, MENG X H. Structure, hardness and corrosion behavior of a gradient  $CrN_x$  thick coating applied to turbine blades[J]. Applied surface science, 2009, 255(16): 7408-7413.
- [13] LEE M K, KIM W W, RHEE C K, et al. Liquid impact erosion mechanism and theoretical impact stress analysis in TiN-coated steam turbine blade materials[J]. Metallurgical and materials transactions A, 1999, 30A: 961-968.
- [14] GU J, LI L, AI M, et al. Improvement of solid particle erosion and corrosion resistance using TiAlSiN/Cr multilayer coatings[J]. Surface and coatings technology, 2020, 402: 126270.
- [15] YANG Q, ZHAO L R, PATNAIK P. Erosion performance, corrosion characteristics and hydrophobicity of nanolayered and multilayered metal nitride coatings[J]. Surface

and coatings technology, 2019, 375: 763-772.

- [16] ANAND B K, JEGADEESWARAN N, NITHIN H S, et al. Studies on solid particle erosion by HVOF sprayed 25% (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25(Ni20Cr))+75% NiCrAIY on Ti-31[J]. Materials today: Proceedings, 2021, 45(1): 246-253.
- [17] DU J, ZHANG J, XU J, et al. Cavitation-corrosion behaviors of HVOF sprayed WC-25WB-10Co-5NiCr and MoB-25NiCr coatings[J]. Ceramics international, 2020, 46(13): 21707-21718.
- [18] LIU X B, KANG J J, YUE W, et al. Cavitation erosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co4Cr cermet coatings in simulated sea water[J]. Ocean engineering, 2019, 190: 106449.
- [19] SINGH J, KUMAR S, MOHAPATRA S K. An erosion and corrosion study on thermally sprayed WC-Co-Cr powder synergized with Mo<sub>2</sub>C/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> feedstock powders[J]. Wear, 2019, 438-439: 102751.
- [20] ZHANG X, LI F, LI Y, et al. Comparison on multi-angle erosion behavior and mechanism of Cr3C2-NiCr coatings sprayed by SPS and HVOF[J]. Surface and coatings technology, 2020, 403: 126366.
- [21] HONG S, WU Y, WU J, et al. Microstructure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed ceramic-metal composite coatings for application in hydro-turbines[J]. Renewable energy, 2021, 164: 1089-1099.