

基于海上环境的航空发动机叶片腐蚀损伤成因及防护研究

孟庆骁, 袁嘉伟

91331部队, 辽宁 葫芦岛

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

海上环境下的航空发动机叶片腐蚀是全球飞机面临的重要课题, 而优异的涂层材料技术和科学的腐蚀损伤管理可在源头和过程中起到有效防护。针对航空发动机叶片腐蚀损伤带来的危害, 本文在腐蚀损伤的类型和形成原因基础上, 重点研究高熵合金、冷喷涂技术在涂层制备上的综合运用, 通过全寿命腐蚀损伤修理信息库辅助地面人员进行精准维护。

关键词

航空发动机叶片, 涂层, 高熵合金, 全寿命腐蚀损伤修理信息库

Research on Corrosion Damage Causes and Protection of Aero-Engine Blades in Marine Environment

Qingxiao Meng, Jiawei Yuan

Unit 91331, Huludao Liaoning

Received: October 23, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 26, 2025

Abstract

Corrosion of aero-engine blades in marine environments is a significant challenge for aircraft manufacturers worldwide. Excellent coating materials and scientific corrosion damage management can provide effective protection at the source and during the process. This paper focuses on the comprehensive application of high-entropy alloys and cold spraying technology in coating preparation, based on the types and causes of corrosion damage. A full-life corrosion damage repair

information database assists ground personnel in precise maintenance.

Keywords

Aero-Engine Blade, Coating, High-Entropy Alloy, Full-Life Corrosion Damage Repair Information Database

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 航空发动机叶片腐蚀损伤的形势

飞机执行海上飞行任务时, 其使用环境与陆地环境有很大区别。除了发动机工作环境本身就至少处于 1000℃ 以上, 海上高温、高湿、高盐的使用环境更是加重了航空发动机叶片的腐蚀程度, 给维护和使用带来很大困难, 导致飞机海上腐蚀损伤比陆地上更为严重, 可见, 在规定的使用周期内, 相较于陆地使用的飞机而言, 海上使用的发动机叶片的腐蚀损伤更为突出如图 1 所示。相对优异的表面涂层和科学的腐蚀损伤管理是有效缓解这些关键部位腐蚀损伤的重要措施。因此, 针对航空发动机叶片腐蚀损伤问题的危害, 本文将从腐蚀损伤类型、成因及防护措施进行研究, 其中重点分析总结表面涂层制备中高熵合金、冷喷涂技术的研究与运用, 同时初步构想建立全寿命腐蚀损伤修理信息库, 来辅助地面人员加强飞机腐蚀监控防护。

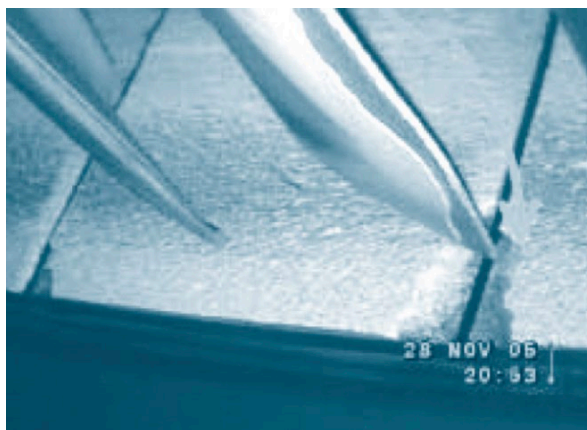


Figure 1. Coating peeling, blade bending, and edge chipping

图 1. 涂层脱落, 叶片弯曲, 边缘掉块

2. 航空发动机叶片腐蚀损伤的类型

航空发动机叶片发生的腐蚀类型多种多样, 使用维护中常见的腐蚀类型有高温氧化腐蚀、晶间腐蚀、点状腐蚀等类型。

2.1. 高温氧化腐蚀

高温氧化腐蚀是航空发动机叶片表面涂层被海洋大气中的硫化物、氯化物与其他污染物进行高温热化学反应形成的熔盐长期腐蚀, 造成表面涂层溶解、开裂, 最终导致叶片基体加速腐蚀。

2.2. 晶间腐蚀

晶间腐蚀通常从叶片表面开始, 沿着晶界向内部蔓延, 直至形成大面积开裂, 引起叶片结构强度崩坏, 一般铝合金叶片在海洋大气中都会发生此类腐蚀。

2.3. 点状腐蚀

点状腐蚀, 作为一种金属局部表面腐蚀状态, 其表现形式多为点状、小孔状, 也称为孔腐蚀, 俗名“麻坑”。点状腐蚀一般出现在金属表面保护膜或涂层受损处, 当金属表面保护膜或涂层受损后, 该腐蚀最易出现在晶粒边界、夹杂物或缺陷部位处。通常, 飞机发动机燃烧室内的工作温度高, 本身的防护体系损伤速度快, 尤其是连续在海上或船上机库停放的环境下, 更会加剧此类现象。

3. 航空发动机叶片腐蚀损伤的成因

根据上述腐蚀损伤类型, 可将成因分为两点: 一是环境因素, 即客观原因。二是人为设计制造因素, 存在腐蚀条件, 即主观原因。

3.1. 环境因素

潮湿空气是航空发动机叶片腐蚀损伤的重要原因之一。除此之外, 空气中富含腐蚀性气体, 在这些污染物中, 酸性气体对金属的腐蚀性最强。在飞机航行阶段, 由于地面和高空存在较大温差, 飞机机身内部及表面会生成冷凝水, 且其中氯离子、硫酸根离子含量较高, 对涂层有严重腐蚀作用[1]。飞行过程中, 海上恶劣天气也时有发生, 这些因素易使飞机表面涂层受损, 进而引发各类腐蚀现象。

3.2. 人为设计制造因素

在飞机设计阶段, 鉴于对飞机轻量化与高承载能力的双重要求, 铝合金被广泛应用于结构材料中。然而, 在对强度和耐磨性有特殊要求的部位, 不得不采用钢件或铜件, 由此引发异种金属连接问题, 进而导致不同金属形成电位差与导电通路。在部附件组装过程中, 各部附件间的缝隙易留积水和杂质, 形成电解质。某些结构因受力需求, 长期处于高应力状态, 构成了应力腐蚀的潜在因素。同时, 生产人员的工艺失当, 诸如保护性涂层施工欠佳、施工条件不严格, 皆可能引发腐蚀隐患。

4. 航空发动机叶片腐蚀损伤的防护

针对腐蚀损伤类型和成因的研究旨在实现对航空发动机叶片腐蚀损伤更为有效的防护。这里主要分为以下三类:

4.1. 提升防腐蚀专项技术水平

从飞机设计制造之初, 就考虑飞机预期的使用环境和功能要求, 进行全方面的腐蚀防护方案设计。在涂层材料选择方面, 优选耐腐蚀性能优良的合金材料, 并对材料表面进行特殊处理, 如综合性防霉除霉技术、高熵合金、冷喷涂修复技术等, 增强其抗腐蚀能力[2]。在结构设计上, 采用合理的结构布局与排水设计, 防止水分积累和腐蚀介质残留。其中高熵合金和冷喷涂技术作为新世纪以来极具创新性的材料和技术, 在表面涂层防腐蚀方面具有广阔应用空间。

4.1.1. 高熵合金具有良好的防腐蚀性能

涂层材料在增强航空发动机部件性能、延长其使用寿命方面发挥着不可或缺的作用。高熵合金自 2004 年被提出以来就备受研究者的关注[3][4], 其体系中包含了一些具有钝化特性的元素, 如 Al、Cr、Mo 等,

可在高温下形成氧化层, 展示出与传统合金相同甚至更好的耐腐蚀性能, 可用于制备耐腐蚀、耐磨及抗高温氧化专用涂层, 在特定工况中实现对航空发动机的有效保护。H.S. Grewal 等人[5]将 $\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金, 与常用钢、传统合金及各类涂层的抗氧化性能在 1173 K 条件下展开对比研究, 如图 2 所示。结果表明, 该高熵合金因表面形成了 Cr_2O_3 保护膜, 且这层保护膜, 使其展现出更为优异的高温抗氧化性能。

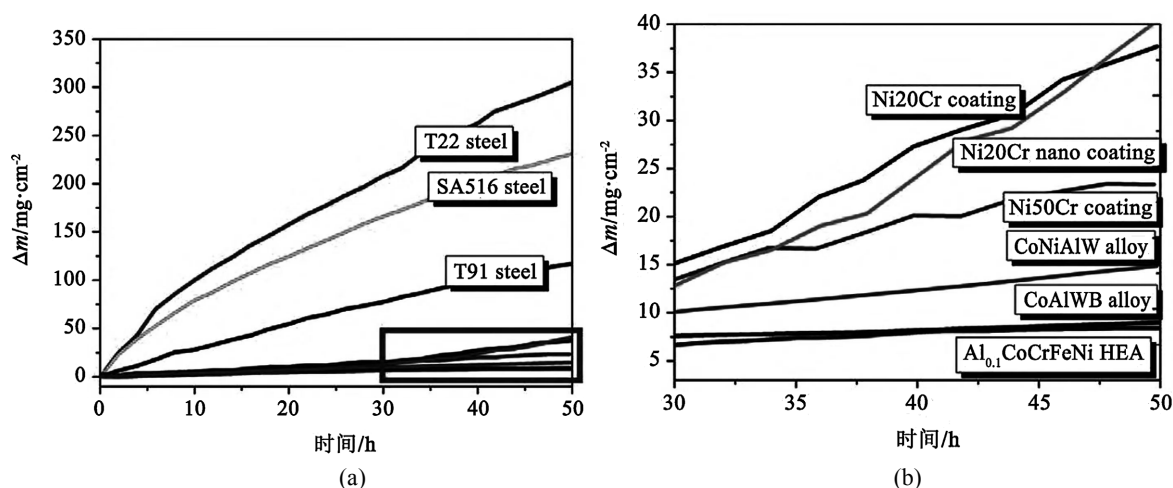


Figure 2. (a) Antioxidant curve; (b) enlarged view of the rectangular area marked in Figure 2(a)

图 2. (a) 抗氧化曲线; (b) a 图中矩形标识区域放大图

4.1.2. 冷喷涂工艺参数在涂层制备中的应用

与传统热喷涂技术不同, 冷喷涂技术以超音速喷涂原理为基础, 通过收敛-扩散型拉瓦尔喷枪形成超音速气流, 将预热处理后的固态颗粒喷出, 高速撞击基体表面形成均匀涂层。冷喷涂涂层的形成过程被认为包括四个阶段[5]:

- 1) 颗粒撞击基体形成涂层第一层;
- 2) 后续的颗粒撞击该层涂层, 颗粒变形并重新排列;
- 3) 颗粒之间黏结, 孔隙减少;
- 4) 持续的颗粒撞击引发进一步变形, 并伴随加工硬化。该过程如图 3 所示。

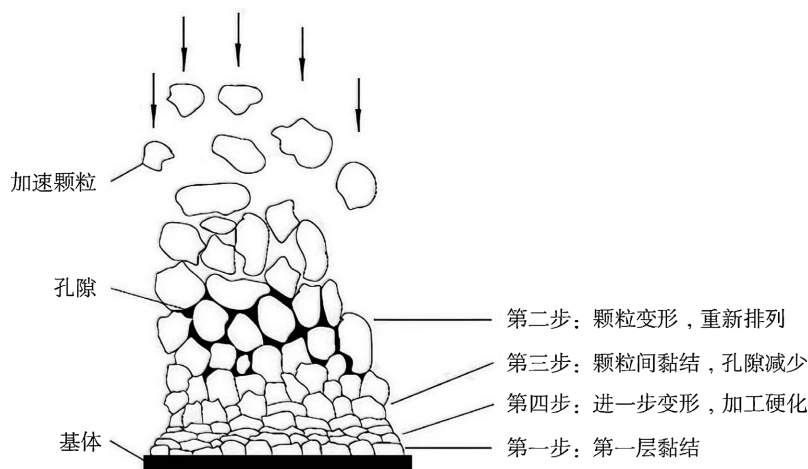


Figure 3. Flowchart of cold spraying technology

图 3. 冷喷涂技术流程图

收敛-扩散型拉瓦尔喷枪如图4所示。图5为采用雾化铜粉为原料在316 L钢管表面制备的厚铜涂层情况,其中图5(a)为冷喷涂用商用雾化铜粉($-48\text{ }\mu\text{m}$)的SEM形貌照片($\times 500$);图5(b)为涂层外观照片。

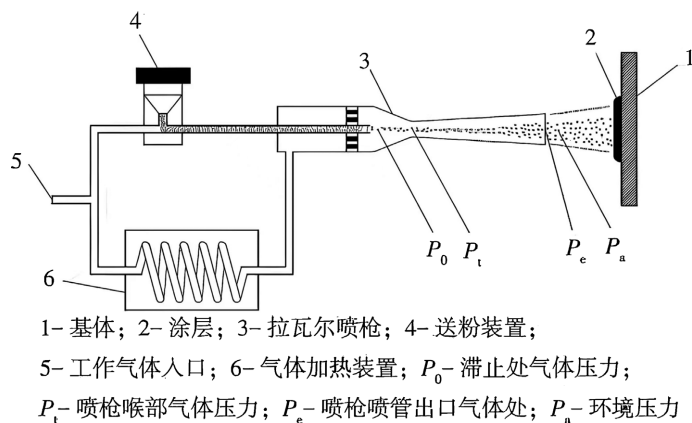


Figure 4. Converging-diffusion type Laval spray gun

图4. 收敛-扩散型拉瓦尔喷枪

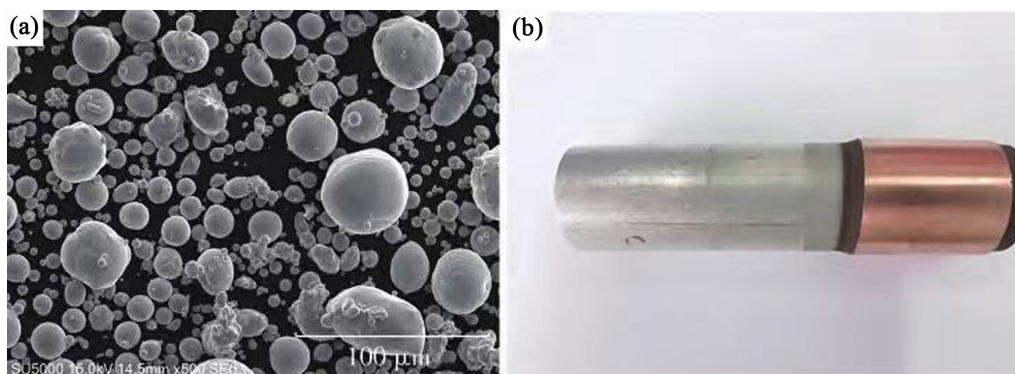


Figure 5. Cold sprayed copper coating on the surface of 316 L steel pipe

图5. 316 L 钢管表面冷喷涂铜涂层

(a) 喷涂用雾化铜粉($-48\text{ }\mu\text{m}$) SEM 形貌照片

(b) 铜涂层外观照片

对于冷喷涂工艺,影响涂层质量的主要因素为颗粒粒度和撞击基体前的飞行速度,除此以外还受其他因素影响。结合前人试验,为获得较好涂层质量的工艺参数为[6]:

1) 粉末粒度,对于多数金属材料,最优粒径区间为 $20\sim 60\text{ }\mu\text{m}$;而铝、锌等低密度金属因密度低、惯性小,粒径上限可放宽至 $100\text{ }\mu\text{m}$ [7]。

2) 喷涂气体类型,冷喷涂气体主要有三种:氮气、氦气和空气。对于气体速度(u):

$$u = M_a \sqrt{\gamma RT} \quad (1)$$

式中, M_a 为马赫数, γ 为比热比, R 为气体常数, T 为气体温度。氮气和空气的 γ 为 1.40, 氦气的 γ 为 1.66。可见,采用氦气作为驱动气体可获得更高的颗粒速度,有利于粉末的沉积和获得更致密的涂层。但氦气价格比氮气昂贵,因此更多选用氮气充当冷喷涂气体。

3) 气体速度,通常,冷喷涂气体的速度越高,颗粒速度越高,制备的涂层质量越致密。

4) 气体压力,冷喷涂工艺一般选择在 $1\sim 4\text{ MPa}$ 的压力下工作。

5) 喷涂距离, 冷喷涂工艺中使用的喷涂距离不宜超过 50 mm, 不论冷喷涂材料性能如何, 喷涂距离不断增加, 涂层制备效率就会下降。

6) 喷涂粉末的成分与结构, 铝、铜等具有面心立方体结构(FCC)的金属更容易发生塑性变形, 如很容易通过冷喷涂获得沉积层。其次, 合金元素会使临界速度升高, 粉末颗粒的含氧量, 同样会对喷涂的临界速度产生影响, 即含氧量越低(粉末越纯), 所需临界速度越低。

7) 基体表面处理, KROMER 等[8]采用激光纹理化方法来改善沉积物的黏附行为, 他们将冷喷涂过程中使用两个疏密不同的半球形坑洞矩阵纹理表面产生的结果与喷砂后的表面获得的结果进行了比较, 发现当使用纹理表面时, 黏粘结强度显著增加, 且密集矩阵纹理表面获得的涂层结合强度更好。

8) 气体温度, 温度是冷喷涂技术的重要参数之一。温度每增加 100℃可以使颗粒的临界速度降低 14 m/s [9], 同时, 还需关注喷涂材料对温度的适应性, 以及颗粒表面氧化对涂层的制备产生的不利影响, 通常温度需不超出 50℃, 从而减少高温影响基体的物理特性。

冷喷涂技术作为一种典型的低温固态沉积工艺, 已成功实现对多种金属及其合金、聚合物等类型材料的有效沉积, 该技术所制备的高熵合金涂层或块体材料, 能够完整保留原料颗粒的初始微观结构与化学特性, 可避免热喷涂等“熔化-凝固”型技术在材料成形过程中产生的晶粒膨胀、相结构转变、化学性质改变、热应力积聚等冶金缺陷。

同时, 超音速粒子沉积过程中伴生的剧烈塑性变形, 可进一步诱发动态再结晶现象。该过程促使冷喷涂沉积材料的局部区域形成数微米级超细晶粒与位错增殖等特征性微观组织结构, 最终显著优化沉积涂层的力学性能。Ahn 等[10]采用冷喷涂技术制备的 FeCoNiCrMn 高熵合金, 其纳米压痕硬度实测值达 10.9 GPa, 相较于传统铸态同成分高熵合金提升约 3 倍。

冷喷涂制备的 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层, 经 1100℃、25 h 恒温氧化处理后, 其表面形成连续致密的 Al₂O₃ 氧化层。这种氧化行为不仅发生于涂层表面, 在涂层内部亦存在明显的氧化现象。以单一沉积颗粒为研究对象, 氧化过程始于晶界区域, 随后沿颗粒间界面逐步扩散延伸, 最终在颗粒内部及涂层表面生成 Al₂O₃, 从而抑制基体的进一步氧化, 实现对基体材料的长效防护[11]。通过后续对冷喷涂工艺参数的调控与优化, AlCoCrFeNi 高熵合金涂层有望发展成为新一代高性能耐高温抗氧化防护涂层。

4.2. 统一规范防腐蚀检查方法

在日常维护工作中, 工作人员主要借助照明灯、反光镜、放大镜和内窥镜等工具, 通过目视、手摸等手段对航空发动机进行目视检查。对目视检查无法确认有无故障(裂纹、腐蚀)的部位, 则需进一步检查判断。如先除去表面漆层、用煤油或洗涤剂清洗后, 再用放大镜仔细观察; 若仍不能确定, 则采用无损检测方法(渗透检测或磁粉检测等)以确定损伤程度。

4.3. 建立全寿命腐蚀损伤修理信息库

在航空发动机叶片的出厂与维护过程中, 建立完善的全寿命腐蚀损伤修理信息库。定期监测飞机停放与运行环境的温湿度、盐分含量等参数, 依据监测结果调整维护方案。加强全寿命腐蚀损伤修理信息的收集和管理, 该信息库具备腐蚀数据采集、查询、分析、多用户共享等功能。其大量的腐蚀损伤及环境数据, 为航空发动机叶片设计改型、维修决策与修理方法改进提供科学依据, 使航空发动机叶片在全寿命周期内的腐蚀防护更具针对性。

系统整体架构如图 6 所示, 从系统整体上可分为数据源层、数据采集层、数据分析层、数据处理层、数据服务层, 通过操作系统, 应用及存储服务器、数据库等软硬件设备, 依据腐蚀工业流程, 提供包括腐蚀工艺卡片、腐蚀评估、腐蚀预测等支持, 并设计开发多种数据接口, 通过数据导入、导出方式实现

与第三方系统的数据交互, 通过数据的不断积累, 支持辅助决策、业务优化等工作。

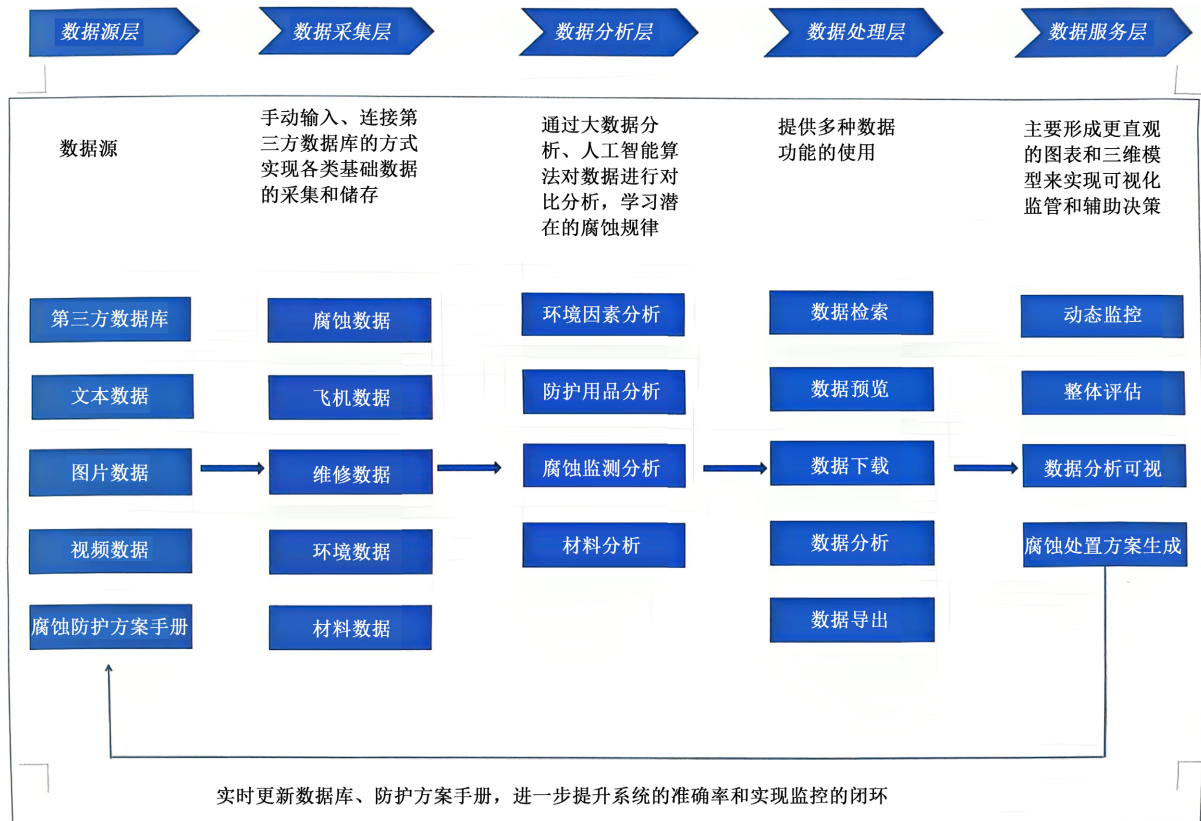


Figure 6. System overall architecture
图 6. 系统整体构架

腐蚀数据量庞大, 质量参差不齐, 可采用人工智能算法和大数据分析来完成数据的预处理。数据预处理是数据挖掘和机器学习的第一步, 包括数据清洗、数据集成、数据变换和数据规约等过程。数据清洗可以去除数据中的噪声和异常值, 数据集成可以将多个数据源的数据进行整合, 数据变换可以将原始数据转换为适合挖掘的形式, 数据规约可以减少数据集的大小。通过对现有的海量腐蚀数据进行数据预处理和建模分析后, 发现数据中的规律和关系, 再通过各种不同智能算法, 包括贝叶斯方法、支持向量机算法、聚类算法、人工神经网络等对腐蚀发展进行预测和业务工作的决策支持; 最后通过大数据可视化, 即利用图形化的方式, 以更加直观形象的形式表达数据信息, 以便维护人员更好地理解数据和发现其中的规律。

5. 总结

海上航空发动机叶片防护是一项积累周期长的基础性工作, 高熵合金具有高熵效应、晶格畸变效应、缓慢扩散效应等特点, 相比传统合金, 展示出更为出色的耐腐蚀性和抗高温氧化性; 冷喷涂技术作为一种固态沉积工艺, 在高熵合金涂层的制备领域展现出独特优势, 所制备的高熵合金涂层具有致密化程度高、无明显裂纹缺陷的特征, 且能最大程度保留原始粉末的化学组成与晶体结构完整性。此外, 冷喷涂制备的高熵合金涂层兼具高硬度特性与优异的耐磨性能、抗高温氧化性能, 降低飞机腐蚀损伤的风险。新型表面涂层材料、技术的研究应用在飞机设计制造初期提供坚实基础, 基于大数据分析、人工智能算

法的全寿命腐蚀损伤修理信息库帮助地面人员在日常维护中精准高效地开展维修保养工作, 两者在航空发动机叶片腐蚀损伤源头和维护过程协同发展, 共同促进飞机的安全航行。

参考文献

- [1] 杜博. 民用飞机结构的防腐蚀设计与研究[J]. 中国新通信, 2018(13): 226-227.
- [2] 马红星, 刘成臣, 刘元海, 何卫平. 关于海洋环境下飞机腐蚀防护与控制体系的思考[J]. 环境技术, 2022, 40(1): 7-11.
- [3] Cantor, B., Chang, I.T.H., Knight, P. and Vincent, A.J.B. (2004) Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **375**, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- [4] Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., *et al.* (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [5] Grewal, H.S., Sanjiv, R.M., Arora, H.S., Kumar, R., Ayyagari, A., Mukherjee, S., *et al.* (2017) Activation Energy and High Temperature Oxidation Behavior of Multi-Principal Element Alloy. *Advanced Engineering Materials*, **19**, Article ID: 1700182. <https://doi.org/10.1002/adem.201700182>
- [6] 刘海飞, 侯玉柏, 夏春阳, 等. 冷喷涂技术[J]. 热喷涂技术, 2025, 17(2): 65-86.
- [7] Van Steenkiste, T.H., Smith, J.R. and Teets, R.E. (2002) Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles. *Surface and Coatings Technology*, **154**, 237-252. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00018-x](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00018-x)
- [8] Kromer, R., Costil, S., Verdy, C., Gojon, S. and Liao, H. (2018) Laser Surface Texturing to Enhance Adhesion Bond Strength of Spray Coatings—Cold Spraying, Wire-Arc Spraying, and Atmospheric Plasma Spraying. *Surface and Coatings Technology*, **352**, 642-653. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.007>
- [9] Assadi, H., Schmidt, T., Richter, H., Kliemann, J., Binder, K., Gärtner, F., *et al.* (2011) On Parameter Selection in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, **20**, 1161-1176. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9662-9>
- [10] Ahn, J., Kim, Y., Yoon, S. and Lee, K. (2020) Tuning the Microstructure and Mechanical Properties of Cold Sprayed Equiatomic CoCr-FeMnNi High-Entropy Alloy Coating Layer. *Metals and Materials International*, **27**, 2406-2415. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00886-4>
- [11] Anupam, A., Kumar, S., Chavan, N.M., Murty, B.S. and Kottada, R.S. (2019) First Report on Cold-Sprayed AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy and Its Isothermal Oxidation. *Journal of Materials Research*, **34**, 796-806. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.38>