

海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为影响研究

崔腾飞¹, 高蒙², 胡建清¹, 刘冲¹, 宋健¹, 刘明²

(1.中国直升机设计研究所 标准材料部, 江西 景德镇 333000;
2.北京航空材料研究院, 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: **目的** 研究螺栓、卡箍等直升机基础产品在海洋大气环境下腐蚀和力学性能随时间的变化规律, 采用结构模拟连接件, 验证直升机防护体系对基础产品的防护效果。**方法** 通过将螺栓、卡箍和连接件在外场暴露不同时间, 在此期间定期对试验件表面状态和力学性能进行测试, 分析海洋环境对直升机基础差的影响和机上防护方法的可靠性。**结果** 经过2 a腐蚀后, 螺栓表面发生了明显的腐蚀, 但是腐蚀深度不大, 抗拉强度维持在18.3 MPa, 剪切强度从27.99 MPa下降到26.52 MPa。卡箍发生了腐蚀, 橡胶材料老化严重, 推出力降低80%, 基本丧失锁紧性能。有涂层保护的典型连接件, 表面厚度为66 mm, 色差为0.3, 光泽度变化1%, 各项参数与未暴露时相比变化不大。**结论** 在海洋大气环境下, 螺栓、卡箍等在未采取防护措施的情况下不建议使用, 机上采用的防护措施有效, 可对基体起到很好的保护作用。

关键词: 直升机; 基础产品; 螺栓; 卡箍; 海洋环境; 腐蚀

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)05-0019-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.004

Effect of Marine Environment on Corrosion Behavior of Helicopter Foundation Products

CUI Teng-fei¹, GAO Meng², HU Jian-qing¹, LIU Chong¹, SONG Jian², LIU Ming²

(1. Standard and Material Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jiangxi Jingdezhen 333000, China; 2. Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection Aviation Materials, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion and mechanical properties of helicopter foundation products such as bolts and clamps under marine and atmospheric environment and verify the protective effect of the helicopter protection system on the basic products through structural simulation connectors. By test of the bolts, clamps and connectors in the outfield for different exposing time, the surface state and mechanical properties of the test pieces were regularly tested during this period to analyze the effect of the marine environment on the poor foundation of the helicopter and the reliability of the on-board protection methods. The results showed that: after 2 years of corrosion, obvious corrosion occurred to the bolt surface, but the corrosion depth was not large, the tensile strength remained at 18.3 MPa, and the shear strength decreased from 27.99 MPa to 26.52 MPa. The clamp was corroded, and the rubber material was seriously aged. The pushing force of clamp was reduced by 80%, and the locking performance was basically lost. For the typical connector with coating protection, the surface thickness was 66 mm, the color difference was 0.3, and the gloss changed by 1%. The parameters had little change compared with the unexposed ones.

收稿日期: 2023-03-05; 修订日期: 2023-04-22

Received: 2023-03-05; Revised: 2023-04-22

作者简介: 崔腾飞(1987—), 男, 博士。

Biography: CUI Teng-fei (1987-), Male, Doctor.

引文格式: 崔腾飞, 高蒙, 胡建清, 等. 海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 019-025.

CUI Teng-fei, GAO Meng, HU Jian-qing, et al. Effect of Marine Environment on Corrosion Behavior of Helicopter Foundation Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 019-025.

Therefore, in the marine atmospheric environment, bolts and clamps are not recommended to be used when protective measures are taken. The protective measures adopted on the helicopter are effective and can play a good role in protecting the substrate.

KEY WORDS: helicopter; basic products; bolt, clamp; marine environment; corrosion

直升机在海上救援、运输、搜索等方面有着广泛的应用,这使其面临十分复杂的使用环境,而环境因素对直升机的安全影响十分显著,尤其是在海洋环境条件下,其使用环境具有“三高、一长”的特点,即高温、高湿和高盐雾环境^[1]。例如,某海域海洋环境气候炎热,持续的高温环境,平均盐度高,到达为41PSU~42PSU,大风、大雾、降雨天数多,空气潮湿,特别是水汽中含有大量的盐分和氯离子,海水经常飞溅到机体表面,再加上直升机在舰船停放和起降时,舰船排出的废气中含有硫、氮氧化物等,排出的废气与盐雾混合,使用环境十分恶劣^[2-3]。直升机长时间随船执行任务,将会面临严重的腐蚀损伤,腐蚀损伤是直升机结构环境损伤的主要形式之一^[4],损伤模式一般以电偶腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀等电化学腐蚀为主^[5-9],对直升机结构安全影响巨大。

在前期调研中发现,直升机出现腐蚀的部位主要集中在机身连接的各种紧固件上。这些紧固件由于所用的材料与连接的材料不同,电偶腐蚀倾向性较大^[10]。再加上活动部位表面的镀层和漆层较容易受到损伤,裸露金属的耐蚀性较差^[11]。另外,这些部位往往较容易积水,在多重因素的作用下,发生了明显的腐蚀。在海洋环境条件下使用的直升机,发生腐蚀的部分主要集中在连接用的铆钉、螺栓、卡箍,由于表面漆层脱落而裸露在外面,在海洋大气环境下,发生了明显的腐蚀。另外,起落架部位在飞行时由于海水的飞溅和本身机构特点,会在部分位置积水,在积水部位的紧固螺栓、管路卡箍容易发生点蚀。在对一些执行海上任务直升机进行腐蚀检查后发现,部分电气接插件发生了严重腐蚀,影响正常工作。机轮、机身底部蒙皮、旋翼导线固定支座、旋翼导线卡箍、前缘缝翼铆钉、探照灯外盖板和观察窗等部位均也发生了严重的腐蚀,有些腐蚀严重的部位仅在机上使用3个月,腐蚀程度相当于内陆1个大修周期10a的腐蚀程度。直升机紧固件腐蚀典型腐蚀形貌如图1所示。

这些连接部位的腐蚀,一方面会造成活动结构卡滞、无法活动^[12],如荷叶腐蚀导致无法打开蒙皮等;另一方面会导致无法正常拆装,影响正常维护^[13],如检查口盖安装螺栓腐蚀导致无法正常打开维护口盖等;而一些连接结构的腐蚀,还会影响结构强度,尤其是疲劳强度,进而影响飞行安全。目前的研究主要集中在单一材料在海洋环境下的腐蚀行为及防护方法方面。如冯驰等^[14]研究了6061铝合金与30CrMnSiA结构钢在模拟工业-海洋大气环境下的电偶腐蚀及防护方法,结果表明,铝合金需采取合理的



图1 直升机紧固件现场腐蚀照片

Fig.1 Actual corrosion photos of helicopter fasteners:
a) landing gear; b) boarding stairway

防护手段,否则会发生严重腐蚀,进而影响其力学性能。杨丽媛等^[15]研究了典型结构钢和不锈钢在海洋环境条件下的耐蚀性,并针对性地提出了提高抗腐蚀能力的防护措施。相关研究对直升机材料、表面防护方法的选择起到了很好的支撑作用,但是针对基础产品本身受环境影响规律的研究较少,大部分涉及典型基础产品的研究,关注的重点在连接结构本身的性能变化规律^[16-17],使得在基础产品选用时缺少相关的数据支撑。

典型基础产品作为结构连接件,是不同结构相互连接的重要手段,是结构完整性的重要组成部分。基础产品本身在海洋环境中的耐蚀性至关重要。摸清基础产品在海洋环境中的腐蚀行为和性能退化规律,为结构设计和强度校核提供设计输入,是关系到直升机连接结构强度和安全的因素。因此,研究海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为的影响是十分必要的。本文通过开展螺栓、卡箍等直升机典型基础产品的外场暴露试验,对其性能进行测试,并采用典型结构件喷涂相应的漆层进行对比。通过试验结果,可为直升机连接结构设计提供基础数据。

1 试验

1.1 材料及尺寸

选择直升机常用的螺栓、卡箍等进行试验,其标

准号件分别为 HB1-101-5×20CdD、Q/16S525LE20B。试验开始及每次进行性能测试前,用无水乙醇清洗各试验件表面,去除灰尘等污物,之后用去离子水冲洗,冷风吹干。

典型结构件如图 2 所示, 2A12-T4 铝合金和复合材料连接, 并用螺栓进行连接。2A12-T4 铝合金表面进行硼硫酸阳极化处理, 复合材料表面不进行表面处理。

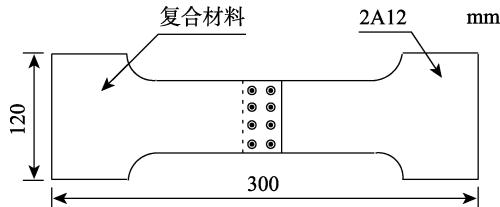


图 2 典型连接件

Fig.2 Schematic diagram of typical connectors

理, 之后在 2 种材料表面喷涂防护漆。试验开始及每次进行性能测试前, 用无水乙醇清洗各试验件表面, 去除灰尘等污物, 之后用去离子水冲洗, 冷风吹干。

1.2 外场暴露试验环境

在万宁大气试验站进行环境暴露试验, 该试验站的环境特征见表 1。利用夹具和支架将试验件朝南固定在海上平台暴露场的试样架上。

1.3 检测方法

紧固件产品经过外场暴露不同时间后, 对其性能进行检测, 其中检测螺栓的抗拉强度、剪切强度, 检测卡箍的推出力, 典型结构件测试试验件表面的厚度、光泽、颜色等。对试验结果进行评价和记录, 具体检测项目及检测方法见表 2。

表 1 万宁试验站大气环境特征

Tab.1 Atmospheric environment characteristics of Wanning Test Station

平均温度/°C	相对湿度/%	湿润时间/(h·a ⁻¹)	降雨量/(mm·a ⁻¹)	Cl ⁻ 沉积率/(mg·100 ⁻¹ ·cm ⁻² ·d ⁻¹)	SO ₂ 沉积率/(mg·100 ⁻¹ ·cm ⁻² ·d ⁻¹)	日照时间/(h·a ⁻¹)	雨水 pH
24.6	86	6 736	1 563	0.387	0.060	2 043	5.00

表 2 检测项目及检测方法

Tab.2 Test items and methods

序号	检测项目	检测方法	适用对象
1	抗拉强度	GJB 715	螺栓
2	剪切力	GJB 715	螺栓
3	推出力	HB 7177	卡箍
4	厚度、光泽度、色差	GB/T 1766	典型结构件

2 试验结果

2.1 螺栓试验结果

螺栓在外场暴露不同时间后, 对其进行抗拉强度测试, 结果如图 3 所示。可以看出, 与试验前对比, 经过外场暴露 0.5、1、2 a 后, 螺栓的抗拉强度变化

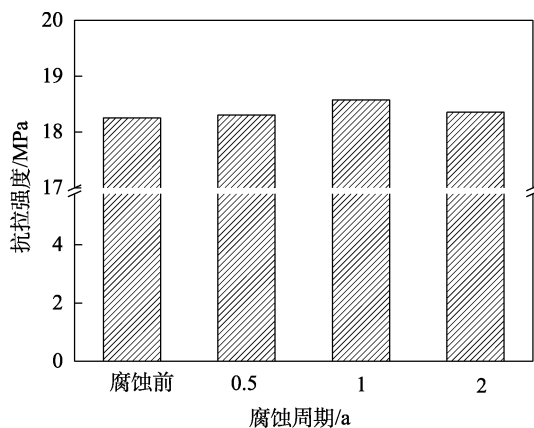


图 3 螺栓抗拉强度随暴露时间的变化

Fig.3 Change of bolts tensile strength with exposure time

不大, 均在 18.3 MPa 左右, 螺栓仍保持较好强度。

螺栓在外场暴露不同时间后, 对其进行剪切强度测试, 结果如图 4 所示。可以看出, 与试验前相比, 经过外场暴露 0.5、1、2 a 后, 螺栓的剪切强度略有下降, 从 27.99 MPa 下降到了 26.52 MPa, 说明腐蚀对螺栓的剪切强度造成了一定的影响。

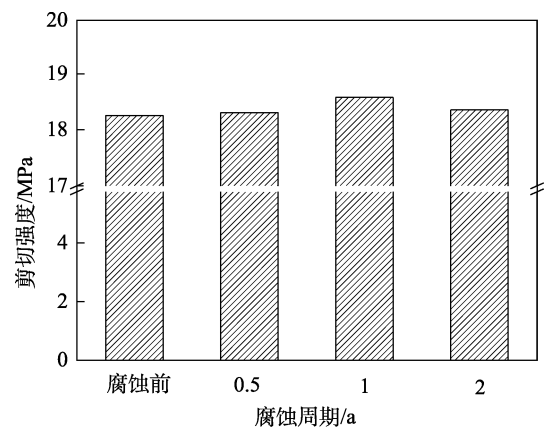


图 4 螺栓剪切强度随暴露时间的变化

Fig.4 Change of bolt shear strength with exposure time

外场暴露 2 a 后, 经抗拉强度和剪切强度测试的螺栓形貌如图 5 所示。可以看出, 螺栓发生了较为明显的腐蚀, 螺栓杆和螺纹部位有红褐色的腐蚀产物覆盖。在断裂位置, 有新鲜的基体露出, 说明腐蚀深度不大, 主要集中在螺栓表面, 未形成较大较深的蚀坑, 这与螺栓强度的变化规律一致。如果随着暴露时间的进一步延长, 腐蚀程度会进一步加深, 螺栓强度将会受到影响。



图5 经抗拉强度和剪切强度测试试验件形貌
Fig.5 Morphology after tensile strength test and shear strength test: a) after tensile strength test; b) after shear strength test

2.2 卡箍试验结果

经过不同时间外场暴露后,卡箍推出力的变化如图6所示。可以看出,经过外场暴露0.5 a后,卡紧性能出现了显著的下降,推出力由49.8 N下降到13.81 N,下降了80%。随着暴露时间的逐步延长,推出力进一步降低。结合卡箍外场暴露2 a后的形貌,可以说明,在未采取有效防护措施的情况下,直接暴露在海洋性大气环境中,卡箍将会很快失效。

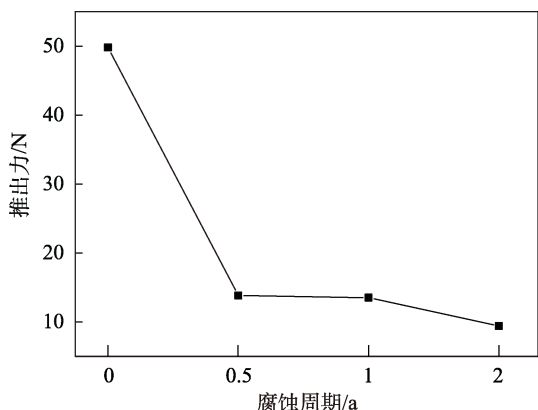


图6 卡箍推出力随暴露周期的变化
Fig.6 Change of clamp pushing force with exposure period

在外场暴露2 a,进行推出力测试后,卡箍的形貌如图7所示。可以看出,卡箍发生了明显的腐蚀,尤其是螺栓连接部位,金属表面基本被红褐色的腐蚀产物覆盖。将卡箍从夹具上推出,发现卡箍内部金属也发生了明显的腐蚀,说明在试验过程中,有腐蚀介质渗入了卡箍与夹具之间,造成了卡箍内部的严重腐蚀。橡胶部分表面有白色的盐沉积出现,且橡胶基本失去弹性。可见,经过外露暴露2 a,卡箍在未采取防护措施的情况下,腐蚀较为严重。



图7 推出力测试前后试验件的形貌
Fig.7 Morphology of parts before (a) and after (b) pushing force test

2.3 典型结构件试验结果

典型连接结构未开展暴露试验时在万宁自然暴露试验2 a后的宏观形貌如图8所示。可以看出,试验件表面平整,漆层整体保持完好,连接处螺栓防护层也未出现破损,整个试验件未出现的明显的腐蚀。



图8 典型结构件未暴露和暴露2 a后的形貌
Fig.8 Morphology of typical structural parts after 2 years of exposure: a) unexposed; b) exposed for 2 a

典型连接结构件试验前和暴露0.5、1、2 a后,表面漆层的厚度如图9所示。可以看出,试验前和暴露0.5、1、2 a后,漆层的厚度分别为66、65、66、66 μm。可见,在外场暴露的2 a时间内,随暴露时间的延长,漆层厚度变化不大,防护层保持完好,基本未发生失效,能对基体材料还能起到很好的防护作用。

典型连接结构件试验前和暴露0.5、1、2 a后,表面的色差如图10所示。可以看出,与未暴露时相比,暴露0.5、1、2 a后,结构件的色差分别为0.3、0.5、0.3。相较于未暴露时,漆层色差并不大,说明漆层未发生失效,整个漆层完整性良好,防护层仍能起到很好的防护作用。

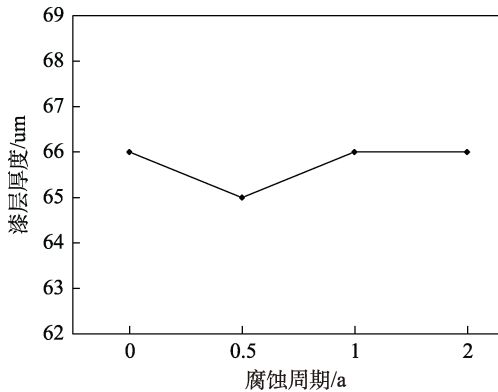


图 9 表面厚度随暴露周期的变化

Fig.9 Change of surface thickness with exposure period

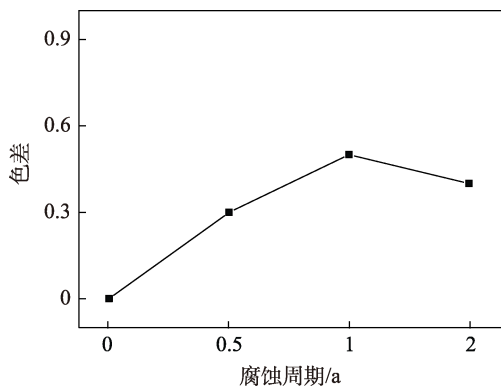


图 10 表面色差随暴露周期的变化

Fig.10 Change of surface color difference with exposure period

典型连接结构件试验前和暴露 0.5、1、2 a 后, 表面的光泽度及失光率如图 11 所示。可以看出, 与未暴露时相比, 暴露 0.5、1、2 a 后, 结构件的光泽度变化分别为 3%、2%、1%。相较于未暴露时, 漆光泽度在暴露的 2 a 时间内变化不大, 整个漆层完整性良好, 表面漆层保持完好。

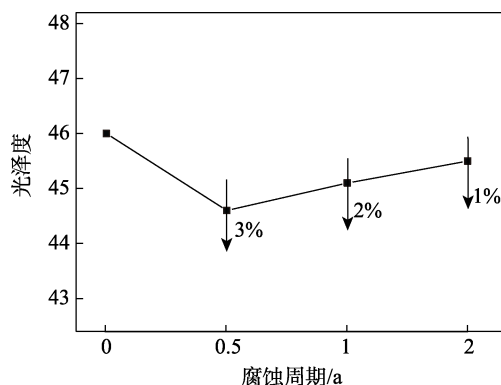


图 11 表面光泽度随暴露周期的变化

Fig.11 Change of surface gloss with exposure period

3 讨论

南宁大气试验站由于靠近海洋, Cl^- 等侵蚀性离

子在大气环境中的含量较高, 相对湿度大, 而且由于有工业排放气体的影响, 还有一定的 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_x 等腐蚀性离子。材料在这些因素的联合作用下, 会发生十分明显的腐蚀破坏^[18]。

连接用螺栓是在结构钢材料表面进行镀镉钝化处理得到的, 由于金属材料本身表面防护层的存在, 使得其在一般的环境中具有良好的耐蚀性, 但是在含有 Cl^- 等侵蚀性离子的环境中, 则会发生较为严重的腐蚀^[19]。主要是因为环境中的 Cl^- 会破坏防护层的完整性, 降低防护层的防护能力, 导致受损部位局部电化学活性升高, 与其他未腐蚀部位形成腐蚀原电池, 加速腐蚀进程, 这与图 5 所示的螺栓腐蚀后的形貌是一致的^[20-21]。但是由于在外场暴露的时间较短, 防护层还未完全失效, 仍能起到一定的防护作用。从图 5 所示的断口处形貌也能看出, 螺栓整体的腐蚀深度不大, 这与拉伸和剪切测试结果相一致。随着暴露时间进一步加长, 力学性能将会进一步降低。卡箍除了金属的电化学腐蚀外, 橡胶材料在高光照、高湿热、高盐雾的环境下, 分子链会大量断裂, 发生了严重的老化, 性能退化严重^[22], 这与图 6 所示的卡箍推出力测试结果相一致。

直升机存在大量的连接结构, 为避免连接处因异种金属接触而发生电化学腐蚀, 一般都会采取喷漆防护的方式, 能大大提高基体防护能力, 尤其是在海洋环境下, 喷漆是一项重要的防护手段^[23]。漆层能阻挡腐蚀介质与基体接触, 从而阻断电化学回路, 避免电偶腐蚀的发生^[24]。从图 8 也可以看到, 在漆层完好的情况下, 基体材料不会发生腐蚀。

4 结论

1) 结构钢螺栓在海洋性大气环境中的会发生明显的腐蚀, 镀铬层能起到一定的防护作用。在 2 a 的暴露时间内, 腐蚀主要集中在表面, 深度不大, 拉伸强度和剪切强度略有降低。

2) 卡箍在海洋性大气环境中性能下降明显, 在 2 a 时间内推出力下降 80%, 基本丧失卡紧功能。主要是因为高温、高湿、高紫外环境的影响下, 橡胶材料性能退化严重。

3) 直升机连接结构需要采用喷漆的方法进行防护。在 2 a 时间内, 漆层保持完好, 未发生开裂、减薄、变色, 性能基本无变化。在漆层保持完好的情况下, 能对内部结构起到很好的防护作用, 避免连接结构发生腐蚀。

参考文献:

- [1] 柳文林, 穆志韬, 段成美. 现役直升机结构腐蚀原因及控制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(5): 358-359.
LIU Wen-lin, MU Zhi-tao, DUAN Cheng-mei. Corrosion

- Control and Causation Analysis for Helicopter Structures in Service[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(5): 358-359.
- [2] DAN Zhen-hua, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 57: 22-29.
- [3] 李宗原, 李健, 石金大, 等. 某型直升机尾减速器从动机匣腐蚀故障分析及预防对策研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 105-109.
LI Zong-yuan, LI Jian, SHI Jin-da, et al. Corrosion Failure Analysis and Preventive Measure of a Type of Helicopter Tail Gearbox Casing Assembly[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 105-109.
- [4] 张晓云, 孙志华, 刘明辉, 等. 环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 354-362.
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, LIU Ming-hui, et al. Influence of Different Environments on Stress Corrosion Cracking of High Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 354-362.
- [5] 崔继红, 蔡建平, 贾成厂. 盐雾环境下高强度铝合金的点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(3): 197-202.
CUI Ji-hong, CAI Jian-ping, JIA Cheng-chang. Pitting Corrosion of High Strength Aluminum Alloys in Salt Spray Test[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(3): 197-202.
- [6] GUILLAUMIN V, MANKOWSKI G. Localized Corrosion of 2024 T351 Aluminium Alloy in Chloride Media[J]. Corrosion Science, 1998, 41(3): 421-438.
- [7] 张晓云, 赵胜华, 汤智慧, 等. 表面处理对 TC21 钛合金与铝合金和钢电偶腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2006, 34(12): 40-45.
ZHANG Xiao-yun, ZHAO Sheng-hua, TANG Zhi-hui, et al. Effect of Surface Treatment on Galvanic Corrosion between TC21 Titanium Alloy and Aluminium Alloys and Steels[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, 34(12): 40-45.
- [8] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 表面涂层破损对 7B04 铝合金点蚀的影响及仿真研究[J]. 航空材料学报, 2016, 36(6): 48-53.
WANG Chen-guang, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Influence and Simulation Study of Surface Coating Damage on Pitting Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(6): 48-53.
- [9] 苏景新, 刘波, 郭英. Q235 钢在模拟海水中的缝隙腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 129-135.
SU Jing-xin, LIU Bo, GUO Ying. Crevice Corrosion of Q235 Steel in Simulated Seawater[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(2): 129-135.
- [10] 冯子峰, 邓明, 赵玉江. 奥氏体不锈钢紧固件电偶腐蚀原因分析与防护[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 10-15.
FENG Zi-feng, DENG Ming, ZHAO Yu-jiang. Analysis and Protection of Galvanic Corrosion on Austenitic Stainless Steel Fasteners[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 10-15.
- [11] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 72-77.
CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian, KANG Xian-hai. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 72-77.
- [12] 罗亮, 魏林. 海训期间直升机腐蚀问题研究[J]. 航天与航空, 2018, 4(2): 124-126.
LUO Liang, WEI Lin. Corrosion Behavior of Helicopter in Marine Environment Training[J]. Space & Aeronautics, 2018, 4(2): 124-126.
- [13] 孙祚东, 王小龙. 经常拆装钢紧固件区域腐蚀防护改进[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 109-113.
SUN Zuo-dong, WANG Xiao-long. Corrosion Prevention Improvement on the Area of Frequently Dismounting Steel Fastener[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 109-113.
- [14] 冯驰, 黄运华, 申玉芳, 等. 6061 铝合金与 30CrMnSiA 结构钢在模拟工业-海洋大气环境下的电偶腐蚀防护[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1417-1427.
FENG Chi, HUANG Yun-hua, SHEN Yu-fang, et al. Galvanic Corrosion and Protection of 6061 Aluminum Alloy Coupled with 30CrMnSiA Steel in Simulative Industry-Marine Atmospheric Environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1417-1427.
- [15] 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性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 9-16.
YANG Li-yuan, ZHAO Chun-ling, DI Shi-xiong, et al. Corrosion Resistance of some Structural Steels and Stainless Steels in Ocean Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 9-16.
- [16] 曹真, 崔腾飞, 徐璐. 舰载直升机雷达罩新型腐蚀防护技术验证研究[J]. 环境技术, 2020, 38(1): 111-117.
CAO Zhen, CUI Teng-fei, XU Lu. A New Type of Corrosion Protection Technology for Radome of Shipboard Helicopter[J]. Environmental Technology, 2020, 38(1): 111-117.
- [17] 骆晨, 李宗原, 孙志华, 等. 直升机蒙皮典型结构有机涂层防护性能在模拟高原大气环境中的变化[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 8-13.
LUO Chen, LI Zong-yuan, SUN Zhi-hua, et al. Degradation of Protective Properties of Organic Coatings on Typical Helicopter Skin Structure in Simulated Plateau Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 8-13.
- [18] 李旭东, 朱武峰, 穆志韬, 等. LD2 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 8-12.

- LI Xu-dong, ZHU Wu-feng, MU Zhi-tao, et al. Corrosion Behavior Investigation of LD2 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 8-12.
- [19] 朱立群, 李敏伟, 刘慧丛, 等. 高强度钢表面镀锌、镉层加速腐蚀试验研究[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 341-346.
ZHU Li-qun, LI Min-wei, LIU Hui-cong, et al. Research of Accelerated Corrosion Test of Zinc, Cadmium Coating on High-Strength Steel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 341-346.
- [20] BARTER S A, MOLENT L. Fatigue Cracking from a Corrosion Pit in an Aircraft Bulkhead[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 39: 155-163.
- [21] 刘慧丛, 朱立群, 杜岩滨. 高强度钢锌、镉镀层加速腐蚀试验方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(12): 1216-1220.
LIU Hui-cong, ZHU Li-qun, DU Yan-bin. Research of Accelerated Corrosion Test Method of Zinc, Cadmium Plating on High-Strength Steel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1216-1220.
- [22] 周堃, 刘杰, 赵宇. 硅橡胶密封件长期贮存老化行为[J]. 材料工程, 2018, 46(8): 163-168.
ZHOU Kun, LIU Jie, ZHAO Yu. Aging Behavior of Silicone Rubber Seals during Long-Term Storage[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(8): 163-168.
- [23] 瞿新辉, 韩志忠, 曹瑶琴. 直升机用环保水性环氧底漆研制[J]. 直升机技术, 2009(4): 51-53.
QU Xin-hui, HAN Zhi-zhong, CAO Yao-qin. Development of Innocuous Water-Solubility Epoxy Primer Used in Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2009(4): 51-53.
- [24] 崔腾飞, 杨丽媛, 彭望舒, 等. 新型防腐涂层对直升机典型结构材料防护性能研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 41-48.
CUI Teng-fei, YANG Li-yuan, PENG Wang-shu, et al. New Corrosion Protection Coating System for Typical Helicopter Structural Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 41-48.

责任编辑: 刘世忠