

某型直升机机体结构关键件涂层耐久性评估

李健^{1,2}, 刘帅帅², 吴云章¹, 李宗原¹

(1. 陆军航空兵研究所, 北京 101121; 2. 陆军航空兵学院, 北京 101121)

摘要: **目的** 评估某型直升机机体典型结构关键件涂层在内陆温和地区的耐久性, 支撑机体总日历寿命延寿工作。**方法** 对某型直升机大修周期机体结构关键件涂层进行目视检查、涂层光泽度检查和电化学交流阻抗检测, 对比分析检测数据, 分析机体结构关键件涂层耐久性的影响因素, 判定涂层的耐久性。**结果** 某型直升机机体结构关键件涂层的耐久性较好。失光率检测中, 平均失光率为 37.8%, 整体失光率较小。电化学阻抗检测中, 平均电化学阻抗模值为 $5.58 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 未失效, 涂层能够有效保护机体结构关键件免于腐蚀环境破坏。**结论** 大修周期内, 某型直升机机体结构关键件涂层的耐久性好, 少数区域涂层因光照、磕碰等, 耐久性部分程度受到影响, 机体结构关键件涂层受温度、湿度、盐雾浓度等的影响较小。

关键词: 直升机; 机体结构; 涂层; 耐久性; 腐蚀

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0049-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.007

Durability Evaluation of Coating for Key Components of Helicopter Fuselage Structure

LI Jian^{1,2}, LIU Shuai-shuai², WU Yun-zhang¹, LI Zong-yuan¹

(1. Army Aviation Research Institute, Beijing 101121, China; 2. Army Aviation Academy, Beijing 101121, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the durability of the coating for key components of the typical helicopter fuselage structure in the mild inland areas, and support the total calendar life extension of the fuselage. Visual inspection, coating gloss inspection and electrochemical AC impedance detection were carried out on the coating for key components of the fuselage structure during the overhaul cycle of the helicopter, and the detection data were comparatively analyzed to investigate the factors affecting the coating durability of the key components of the fuselage structure, and the durability of the coating was determined. The coating durability of the key components of the helicopter fuselage structure was better, the average light loss rate detected was 37.8% and the overall light loss rate was small. The average electrochemical impedance modulus value determined by the electrochemical impedance detection was $5.58 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, above the failure criterion, so the coating could effectively protect the key components of the fuselage structure from corrosive environment damage. During the overhaul cycle, the coating durability of the key components of the helicopter fuselage structure is good, and the durability of the coating in several areas is affected by the light and bumps, but the coating of the key components of the fuselage structure is less affected by temperature, humidity, salt spray concentration, etc.

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-10-24

Received: 2022-07-10; Revised: 2022-10-24

作者简介: 李健 (1974—), 男, 硕士。

Biography: LI Jian (1974-), Male, Master.

通讯作者: 刘帅帅 (1987—), 男, 硕士。

Corresponding author: LIU Shuai-shuai (1987-), Male, Master.

引文格式: 李健, 刘帅帅, 吴云章, 等. 某型直升机机体结构关键件涂层耐久性评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 049-055.

LI Jian, LIU Shuai-shuai, WU Yun-zhang, et al. Durability Evaluation of Coating for Key Components of Helicopter Fuselage Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 049-055.

KEY WORDS: helicopter; fuselage structure; coating; durability; corrosion

直升机在内陆湿热和沿海地区等腐蚀较严重环境下服役期间,机体结构某些部位会发生腐蚀损伤,严重影响直升机的正常飞行^[1]。这些腐蚀关键部位的损伤是决定直升机结构腐蚀修理间隔及日历寿命的重要依据,而其腐蚀损伤的出现主要是由于机体结构表面涂层失效,从而必须研究直升机机体结构关键件涂层的耐久性,为后续涂层维护、直升机腐蚀防护和日历寿命延寿提供理论支撑^[2-6]。

有机涂层是直升机普遍采用的腐蚀防护手段。在直升机实际服役过程中(如飞行或露天停放时),有机涂层不可避免地遭受太阳辐射、降水等的作用,其防护性能往往由于自然环境因素的影响而发生退化^[7-12]。此外,实际工程经验表明,在力学因素与环境因素叠加的服役状态下,涂层的失效过程变得更明显^[13-17]。例如,由于结合力的存在,涂层的内部应力一般是平行于合金基体表面的,但是连接部位的应力情况比较复杂,几何构型变化导致涂层在各种结构连接部位和边角上容易发生早期裂纹。

涂层在使用过程中,由于受到内外因素的综合影响,逐步失去原有的优良性能,以致最后丧失使用价值,这个过程是涂层的老化^[18-23]。影响涂层老化的因素主要有热作用、光作用、氧化作用、微生物的作用和日光(紫外线)因素等。一般认为,老化过程主要是游离基的反应过程。当涂层受到大气中的氧、光、热等作用时,使涂层中主要成膜物质的分子链断裂,形成非常活泼的游离基,这些游离基能进一步引起整个主要成膜物质分子链的分解,最后导致涂层老化变质。

某型直升机在内陆温和地区服役至总日历期消耗殆尽,总疲劳寿命使用不足30%,日历寿命与疲劳寿命不匹配问题突出。文中检查的3架次直升机担负的主要任务为空中运输,均已经过4次翻修期,疲劳寿命使用不足22%,而日历寿命均已到寿,该型直升机进行日历寿命延寿成为亟待解决的问题。目前,国标中对于涂层评估的依据主要是变色、粉化、起泡、开裂等单项老化损伤程度。此类评估主要针对涂层局部部位,无法给出涂层整体的耐久性。采用电化学阻抗法,通过测量涂层阻抗值,评估涂层的老化程度,成为目前涂层耐久性评估的主要方法。本文就某型直升机机体结构关键件涂层开展目视检查、光泽度测试和电化学阻抗测试,通过与对照涂层对比涂层光泽度和电阻抗模值等数据,分析该型直升机机体结构关键件涂层耐久性的影响因素,得出涂层耐久性较好,能够有效阻止腐蚀环境对机体结构关键件损伤的结论。

1 机体结构关键件和涂层

直升机主要由旋翼系统、机身、机身框架、尾桨

系统、传动系统、动力装置和起落架等组成,机身主要由主体结构和尾部结构组成。机体结构主要为直升机的骨架,用于支撑直升机主体,承载机载结构,如起落架、主承力框、主承力梁等部位。某型直升机机体结构关键件为起落架、7框、10框和13框等部位。起落架为机体外露部位,漆层破损容易观测,主要为疲劳裂纹对其的影响,外场和大修过程中无该类故障。机体内部主框主梁等关键件涂层底漆为锌黄环氧H06-2,面漆为醇酸漆C04-2,且受装修遮挡,避免了大量外部维修的碰撞和光老化等因素的影响。

2 试验方法

评估机体结构涂层耐久性主要包括目视检查、光泽度测试和涂层电化学阻抗测试。对某型直升机机体结构重要承力部件防护涂层进行目视检查,对涂层开裂、起泡、脱落等情况进行拍照分析。

参考GB/T 9754—2007《色漆和面漆 不含金属颜料的色漆之20°、60°、85°镜面光泽的测定》,检测涂层老化前后光泽度的变化,试验仪器为micro-TRI-gloss三角度光泽仪,测量角度为60°。利用式(1)计算涂层的失光率:

$$G = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中:G为涂层失光率;A、B为老化前后的光泽度值。

采用便携式电化学现场评测装置,对带有机涂层的金属部件进行局部阻抗谱评测。首先,选取待测试部位,并根据待测试部位材料和位置的特点选取探头类型;然后,固定探头及电极材料,用导线将其与便携式电化学现场评测装置连接,构成三电极体系;最后,启动便携式电化学现场评测装置,测试时间为10~20 min。

3 结果与讨论

3.1 目视检查结果

在目视检查中,未发现大面积腐蚀损伤,防护涂层表面大部分完整、光亮,部分涂层有开裂和起泡现象,面积较小。与处于新修复状态的机身内部框梁防护涂层相比,涂层颜色无明显差异。机身内部承力结构防护涂层的典型外观如图1所示。

机身内部其他部位防护涂层存在腐蚀损伤现象,腐蚀损伤的主要形貌包括以下几种:

1) 7号框与机身顶部的连接部位出现防护涂层开裂的现象,且开裂较多出现在密封胶厚度不均匀的



图 1 机身内部承力结构防护涂层的典型外观照片
Fig.1 Typical appearance of the protective coating of the internal load-bearing structure of the fuselage

区域,在开裂的防护涂层附近,还有少量发动机滑油积存。由于该连接部位上方的机身外部为发动机承载部位,经咨询机组,发动机在使用过程中存在滑油渗漏情况。因此,防护涂层开裂是由渗漏的发动机滑油通过结构缝隙向下渗透,对密封胶和防护涂层造成破坏导致的。机身内部 7 号框与机身顶部的连接部位防护涂层开裂的典型外观照片如图 2 所示。

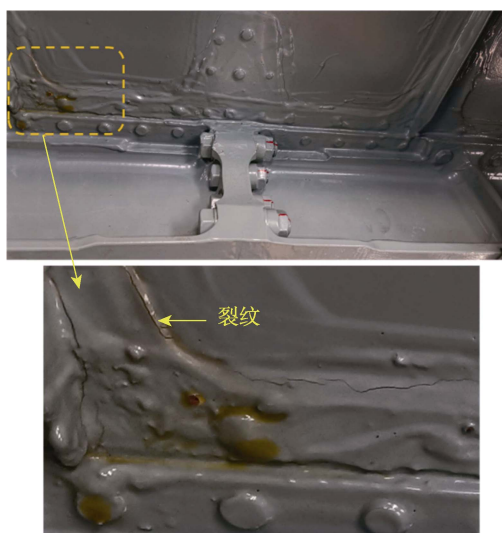


图 2 7 号框与机身顶部的连接部位防护涂层开裂的典型外观照片
Fig.2 Typical appearance of cracked protective coating between frame 7 and top of the fuselage

2) 机身蒙皮与机身外部结构铆钉连接区域出现防护涂层起泡、开裂现象,部分铆钉位置出现红锈。推测这是由于钢质铆钉与铝合金蒙皮之间发生了电偶腐蚀,腐蚀产物在铆钉附近有机涂层与合金板材之间的界面形成,然后沿连接部位的缝隙发展、堆积,最后防护涂层由于应力过高而发生破裂,腐蚀产物暴露在漆膜表面。机身蒙皮与机身外部结构铆钉连接区域的防护涂层腐蚀损伤典型外观照片如图 3 所示。

3) 6 号框与机身蒙皮的连接部位出现防护涂层起泡的现象,一些位置防护涂层已经破损,露出白色腐蚀产物。推测初始状态下 6 号框与机身蒙皮连接部位的防护涂层覆盖不完整或存在缺陷,在降水、凝露的作用下,有机涂层下铝合金基体发生局部腐蚀后生成腐蚀产物,并在有机涂层与合金板材之间的界面堆积,导致涂层鼓起。腐蚀沿着漆膜结合力较弱的方向

发展,并相互连接,形成片状区域。机身内部 6 号框与机身蒙皮连接部位防护涂层起泡的典型外观照片如图 4 所示。



图 3 机身蒙皮与机身外部结构铆钉连接区域防护涂层腐蚀损伤典型外观照片
Fig.3 Typical appearance of corrosion damage of protective coating in rivet connection between fuselage skin and external structure of fuselage



图 4 6 号框与机身蒙皮的连接部位防护涂层起泡的典型外观照片
Fig.4 Typical appearance of protective coating blistering at the connection between frame 6 and fuselage skin

4) 非重要承力框梁的防护涂层出现表层起皮现象,部分起皮区域的涂层已经剥落,但下方仍有涂层保护铝合金基体。发生表层起皮剥落的区域比较随机,未发现与结构部位、构型明显相关。由于机身结构在历次维修过程中都需要打磨、重新喷漆,而此时漆膜表面的状态直接影响新涂层的结合强度。因此,推测防护涂层表层的起皮剥落是由于新防护涂层施工前对原有防护涂层的打磨不彻底,从而与原有防护涂层之间结合力较弱。机身内部 9 号框防护涂层表层起皮的典型外观照片如图 5 所示。

上述通过目视检查发现的机身内部重要承力部件防护涂层腐蚀损伤均存在于外露部位。这类腐蚀损伤可在直升机机体结构修理过程中通过打磨、重新喷漆得到修复。机体结构关键件涂层耐久性评估不能仅依赖目视检查,还需通过测定涂层光泽度及电化学阻抗谱等定量化的检测技术,进行涂层性能评估。



图5 非重要承力框梁的防护涂层表层起皮的典型外观照片

Fig.5 Typical appearance of protective coating surface peeling of non-essential load-bearing frame beams

3.2 光泽度测试结果

对直升机机体结构防护涂层的光泽度进行测量,测量位置主要为7、10号框的顶部侧面、顶部下端面,以及7号框右部的下侧、中间、上侧,如图6所示。以2021年12月新完成大修出厂的直升机7号框、10号框防护涂层的光泽数据作为原始比对数据,计算各位置防护涂层的失光率。涂层60°光泽度测试,在同一部位分别取3处不同位置测试后取平均值,各部位60°光泽度平均值和失光率平均值见表1。



图6 7号框顶部防护涂层的光泽测试照片

Fig.6 Gloss test of top protective coating on frame 7

从机体结构有机涂层失光率检测发现,失光率检测14处,平均失光率为37.8%,整体失光率较小,普遍在50%以内。7号框顶部防护涂层的失光率在35.0%~65.1%(3架次7号框光泽度和失光率见图7),明显高于10号框顶部防护涂层的失光率(7.0%~26.9%),2架次10号框光泽度和失光率见图8。7号框右侧中间、下侧防护涂层的失光率分别为46.4%、71.5%,也明显高于10号框防护涂层的失光率,只有7号框右侧上侧的失光率(12.5%)较低。3架次直升机相同测试点失光率相差不大,机身内部除部分框架在窗口附近,整体受光照的影响较小。

整体看,7号框的平均失光率为47.03%,10号

表1 各位置防护涂层光泽度和失光率
Tab.1 Protective coating gloss and gloss loss rate at different positions

测量部位	60°平均值	失光率平均值/%
A架次7号框顶部侧面	23.1	65.1
A架次7号框顶部下端面	33.0	43.4
A架次10号框顶部侧面	37.1	19.4
A架次10号框顶部下端面	48.2	16.8
B架次7号框顶部侧面	34.8	47.4
B架次7号框顶部下端面	35.9	38.3
B架次10号框顶部侧面	42.8	7.0
B架次10号框顶部下端面	42.3	26.9
C架次7号框右下	16.6	71.5
C架次7号框右上	50.9	12.5
C架次7号框右中	31.2	46.4
C架次7号框顶部侧面	43.1	35.0
C架次7号框顶部下端面	21.1	63.7
C架次6号框附近蒙皮	37.0	36.4
D架次7号框顶部侧面	66.3	对照组
D架次7号框顶部下端面	58.2	
D架次10号框顶部侧面	46.0	
D架次10号框顶部下端面	57.9	

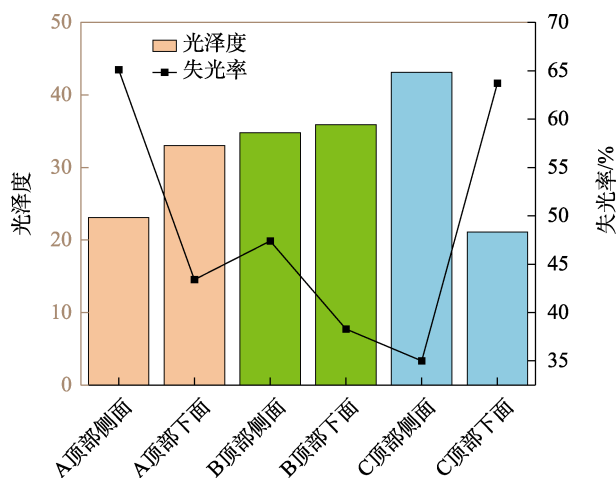


图7 7号框光泽度和失光率对比

Fig.7 Comparison of gloss and gloss loss rate of frame 7

框的平均失光率为17.53%,7号框失光率明显大于10号框。这是因为7号框处于直升机窗口附近,外部光线能够直接对涂层产生损伤影响。在紫外线的作用下,防护涂层的树脂高分子链发生光引发链增长、链终结等系列反应,最后分子链发生断裂,分子链降解产物如小分子醇、醚等挥发离开有机涂层。随着老化降解,有机涂层防护性能逐渐退化,在宏观上表现为光泽度的下降。光的化学分解老化起主要作用,其中紫外线影响是涂层光失效的主要部分。

3.3 电化学交流阻抗测试结果

电化学阻抗谱可以给出丰富的有机涂层老化信息,

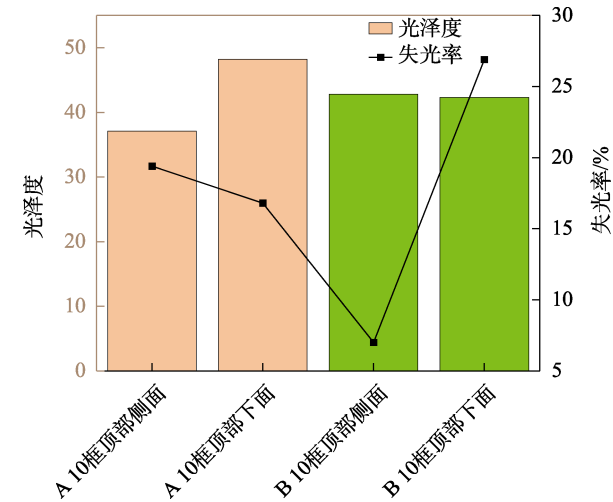


图 8 10 号框光泽度和失光率对比
Fig.8 Comparison of gloss and gloss loss rate of frame 10

能够支撑有机涂层防护性能的评估,测试充分利用电化学原位测试手段评估有机涂层的退化。对 3 架次某型直升机 7 号框、10 号框防护涂层的电化学阻抗谱进行了测量,测量位置主要为 7、10 号框的顶部侧面、顶部下端面,以及 7 号框右部的下侧、中间、上侧,部分测量见图 9、10。由于电化学阻抗谱的详细解析比较复杂,通常采用电化学阻抗谱中低频部分的阻抗模值作为检测有机涂层防护性能变化的指标。

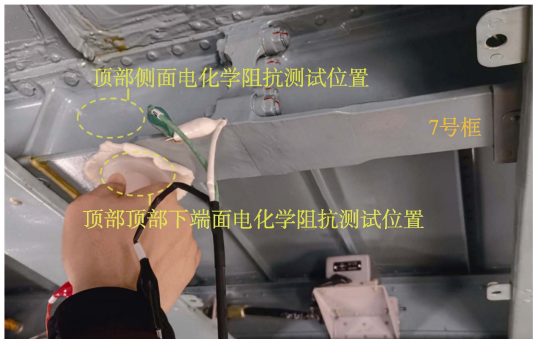


图 9 7 号框顶部防护涂层的电化学阻抗谱测试照片
Fig.9 Electrochemical impedance spectroscopy test of the protective coating on the top of frame 7



图 10 6 号框附近蒙皮防护涂层起泡区域的电化学阻抗谱测试照片
Fig.10 Electrochemical impedance spectroscopy test of the blistered area of the skin protective coating near frame 6

3 架次某型直升机 7、10 号框各位置防护涂层的特定频率电化学阻抗模值见表 2。由于现场无法对新

大修出厂的防护涂层进行电化学阻抗谱测试,以典型航空用底漆 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯的特定频率电化学阻抗模值作为对比依据。7B04 铝合金、硫酸阳极化和 TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆试样的 $|Z|_{f=0.1\text{ Hz}}$ 约为 $5\times 10^8\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

表 2 各位置防护涂层的特定频率电化学阻抗模值 ($ Z _{f=0.1\text{ Hz}}$)	
Tab.2 Specific frequency electrochemical impedance modulus value of the protective coating at different positions ($ Z _{f=0.1\text{ Hz}}$)	
测量部位	$ Z _{f=0.1\text{ Hz}}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
A 架次 7 框顶部侧面	1.5×10^7
A 架次 7 框顶部下端面	4.3×10^7
A 架次 10 框顶部侧面	7.3×10^7
A 架次 10 框顶部下端面	8.4×10^7
B 架次 7 框顶部侧面	4.3×10^7
B 架次 7 框顶部下端面	9.3×10^7
B 架次 10 框顶部侧面	8.4×10^7
B 架次 10 框顶部下端面	3.4×10^7
C 架次 7 框右下	6.6×10^7
C 架次 7 框右上	9.0×10^7
C 架次 7 框右中	2.1×10^7
C 架次 7 框顶部侧面	1.4×10^7
C 架次 7 框顶部下端面	1.2×10^8
C 架次 6 框附近蒙皮	8.3×10^5

从机体结构有机涂层电化学阻抗检测发现,电化学阻抗检测 14 处,平均电化学阻抗模值 $|Z|_{f=0.1\text{ Hz}}$ 为 $5.58\times 10^7\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,在失效判据以上。7、10 号框顶部侧面、下端面防护涂层的电化学阻抗模值与这一数值基本持平或微微下降, $|Z|_{f=0.1\text{ Hz}}$ 最多下降了 1 个数量级。这说明经过 1 个大修周期的服役后,7、10 号框等重要承力部件的防护涂层都还具有阻挡腐蚀介质的作用,使铝合金基体免于腐蚀破坏。文献[24-25]给出涂层失效判据的研究结果为平均电化学阻抗模值大于 $3\times 10^6\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,涂层整体有效性和耐久性较好。7 号框的电化学阻抗模值平均值为 $4.29\times 10^7\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,10 号框为 $6.875\times 10^7\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,二者相差不大。6 号框附近涂层起泡区域电化学阻抗模值为 $8.3\times 10^5\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,小于 $3\times 10^6\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,认定涂层的有效性较差,需对此处涂层进行修复。

4 结论

1) 机体涂层的耐久性受温度、湿度、光照等因素的影响,受该型直升机服役环境、机身局部环境的影响,涂层的耐久性较好,能够有效保护金属基体。部分涂层受机窗外光照直射影响,有起泡现象,防护作用下降明显,建议在大修中进行更换。

2) 涂层耐久性检查评估中,目视检查为定性检

查手段,涂层光泽度测试和电化学交流阻抗测试能够给出涂层耐久性相关数据,能够更好地支撑涂层耐久评估。

3) 某型直升机7号框失的光率均值为47.03%,10号框的失光率均值为17.53%,3架次直升机涂层整体的失光率均值为37.84%,7号框的失光率大于10号框。

4) 某型直升机7号框的交流阻抗平均膜值为 $4.29 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,10号框的交流阻抗平均膜值为 $6.875 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,二者相差不大。6号框附近涂层起泡区域的电化学阻抗模值为 $8.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,涂层有效性较差,需进行修复。

参考文献:

- [1] 刘文琰,李玉海,陈群志,等.飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(1):109-112.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112.
- [2] 张福泽.飞机结构日历寿命预计[C]//第十四届全国疲劳与断裂学术会议论文集.吉安:中国航空学会,2008.
ZHANG Fu-ze. Prediction of the Aircraft Structure Calendar Life[C]// Proceedings of the 14th National Conference on Fatigue and Fracture. Ji'an: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] 欧阳绍修,廖圣智.海军特种飞机结构腐蚀维护和修理指南[M].北京:航空工业出版社,2019:103-104.
OUYANG Shao-xiu, LIAO Sheng-zhi. Guide of Corrosion Maintenance and Repair for Navy Special Aircraft Structure[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019: 103-104.
- [4] 黄烯望,姜新华,李长春,等.涂层寿命预测与可靠性评价的研究进展[J].材料保护,2018,51(7):110-114.
HUANG Xi-wang, JIANG Xin-hua, LI Chang-chun, et al. Research Progress of Coating Life Prediction and Reliability Evaluation[J]. Materials Protection, 2018, 51(7): 110-114.
- [5] 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.
- [6] 张蕾,陈群志,宋恩鹏.军机某疲劳关键部位加速腐蚀当量关系研究[J].强度与环境,2009,36(2):45-50.
ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, SONG En-peng. Research on Accelerated Corrosion Equivalent Relationship for the Fatigue Critical Component of Military Aircraft[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(2): 45-50.
- [7] 何宇廷.飞机结构寿命控制原理与技术[M].北京:国防工业出版社,2017:225-228.
HE Yu-ting. Principle and Technology of Aircraft Structure Life Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 225-228.
- [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] MILLS G, ELASSON J. Factors Influencing Early Crack Development in Marine Cargo and Ballast Tank Coatings[J]. Journal of Protective Coatings & Linings, 2006, 23(2): 10-21.
- [10] 李健,吴云章,李伯舒,等.基于电化学阻抗的直升机涂层日历寿命评估方法[J].装备环境工程,2017,14(7):79-82.
LI Jian, WU Yun-zhang, LI Bo-shu, et al. Estimate Method for Calendar Life of Helicopter's Coating Based on Electrochemical Impedance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(7): 79-82.
- [11] 吕耀辉,刘玉欣,何东昱,等.电化学阻抗技术在金属腐蚀及涂层防护中的研究进展[J].电镀与精饰,2018,40(6):22-28.
LYU Yao-hui, LIU Yu-xin, HE Dong-yu, et al. Development on Electrochemical Impedance Spectroscopy Technology in Metal Corrosion and Coating Anticorrosion[J]. Plating & Finishing, 2018, 40(6): 22-28.
- [12] 魏骏逸,刘福成,徐安桃,等.基于阻抗模值比率的军用车辆有机涂层防护性能研究[J].军事交通学院学报,2019,21(3):85-89.
WEI Jun-yi, LIU Fu-cheng, XU An-tao, et al. Research on Protective Performance of Organic Coating on Military Vehicle Based on Impedance Modulus Ratio[J]. Journal of Military Transportation University, 2019, 21(3): 85-89.
- [13] 罗海林,刘敏.飞机涂层失效特征的研究与分析[J].失效分析与预防,2021,16(6):420-425.
LUO Hai-lin, LIU Min. Research on Failure Characteristics of Aircraft Coatings[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(6): 420-425.
- [14] 周如东.飞机蒙皮表面处理和涂层选择及涂装工艺[J].涂层与防护,2018,39(6):51-54.
ZHOU Ru-dong. Surface Treatment and Coating Process of Aircraft Skin[J]. Coating and Protection, 2018, 39(6): 51-54.
- [15] 李世平,魏广平.飞机涂层老化模式及日历寿命预测[J].环境技术,2017,35(1):24-26.
LI Shi-ping, WEI Guang-ping. A Model of Aging and

- Review of Calendar Life for Aircraft Coating[J]. Environmental Technology, 2017, 35(1): 24-26.
- [16] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 45-49.
ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, WANG Yu-ya, et al. Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 45-49.
- [17] 刘志, 郭年华, 宋庆功, 等. 飞机蒙皮涂层发展概述[J]. 中国涂料, 2010, 25(2): 17-20.
LIU Zhi, GUO Nian-hua, SONG Qing-gong, et al. Summary on the Development of Aircraft Dope[J]. China Coatings, 2010, 25(2): 17-20.
- [18] 王迪, 徐元铭. 腐蚀环境下飞机结构涂层防护体系损伤评估研究[J]. 飞机设计, 2017, 37(4): 22-27.
WANG Di, XU Yuan-ming. Research about Damage Assessment of Protection System of Aircraft Structures under Corrosion Environments[J]. Aircraft Design, 2017, 37(4): 22-27.
- [19] 舒畅, 苏艳, 吴龙益. 飞机蒙皮防护涂层对海洋大气环境的适应性研究[J]. 材料保护, 2010, 43(12): 56-58.
SHU Chang, SU Yan, WU Long-yi. Adaptability of Protective Coating of Plane Skin to Marine Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2010, 43(12): 56-58.
- [20] 李焱. 防腐蚀涂层的失效分析[J]. 上海涂料, 2008, 46(9): 36-39.
LI Yan. Failure Analysis of Anti-Corrosive Coats[J]. Shanghai Coatings, 2008, 46(9): 36-39.
- [21] 范金娟, 常振东, 陶春虎. 环境障涂层失效机理研究进展[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(6): 386-391.
FAN Jin-juan, CHANG Zhen-dong, TAO Chun-hu. Research Progress of Failure Analysis of EBCs[J]. Failure Analysis and Prevention, 2017, 12(6): 386-391.
- [22] 钟岳钦. 飞机涂层的发展与应用[J]. 上海涂料, 2000, 38(1): 39-42.
ZHONG Yue-qin. Development and Application of Aircraft Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2000, 38(1): 39-42.
- [23] 赵金榜. 航空涂料及其今后发展[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(5): 26-30.
ZHAO Jin-bang. Aerospace Coatings and Its Future Development[J]. Modern Paint & Finishing, 2011, 14(5): 26-30.
- [24] 骆晨, 蔡健平, 许广兴, 等. 航空有机涂层在户内加速试验与户外暴露中的损伤等效关系[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1750-1758.
LUO Chen, CAI Jian-ping, XU Guang-xing, et al. Equivalent Degradation of Aviation Organic Coating during Indoor Accelerated Testing and Outdoor Exposure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1750-1758.
- [25] 孙志华, 章妮, 蔡健平, 等. 7B04 铝合金的一种阳极化膜层电化性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 281-284.
SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, et al. Electrochemical Behavior of an Anodic Oxidation Film on Aluminum Alloy 7B04[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(3): 281-284.

责任编辑: 刘世忠