

航空航天装备

腐蚀环境下典型“钛-铝”复合耳片腐蚀防护性能研究

冯成慧¹, 王继普¹, 赵连红², 李金亮¹, 赵伟², 刘元海², 王乾平¹(1.航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089; 2.中国特种飞行器研究所,
结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究腐蚀环境下典型“钛-铝”复合耳片的腐蚀防护性能。**方法** 开展典型“钛-铝”双耳两层结构的加速腐蚀环境试验, 共10个周期。采用扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析结构的腐蚀形貌、腐蚀产物, 研究“钛-铝”复合耳片结构的腐蚀防护性能。**结果** 在腐蚀环境下, “钛-铝”复合耳片结构中衬套周围异种金属连接部位的电偶腐蚀敏感性高, 其他部位防护体系的耐蚀性较好。经过10个周期的加速试验, 衬套周围铝合金结构发生较为严重的点蚀, 各蚀坑扩展相连, 形成较大蚀坑。在第10周期, 典型“钛-铝”复合耳片铜衬套周围铝合金蚀坑处出现裂纹扩展, 并发生腐蚀疲劳破坏。**结论** 增强典型“钛-铝”复合耳片结构的腐蚀防护措施, 加强典型“钛-铝”复合耳片异种金属接触部位的日常维护, 能有效提高结构的腐蚀防护能力。

关键词: 典型“钛-铝”复合耳片; 腐蚀环境; 腐蚀防护性能; 电偶腐蚀

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0050-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.008

Corrosion Protection Performance of Typical “Titanium-Aluminum”
Composite Lugs in Corrosive EnvironmentFENG Cheng-hui¹, WANG Ji-pu¹, ZHAO Lian-hong², LI Jin-liang¹,
ZHAO Wei², LIU Yuan-hai², WANG Qian-ping¹(1. The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Xi'an 710089, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Protection and Control,
China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to study the corrosion protection performance of the typical “titanium-aluminum” composite lugs in the corrosive environment. The accelerated corrosion environment test of the typical “titanium-aluminum” composite lugs is carried out. The accelerated corrosion environment test has a total of 10 cycles. The scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) are used to analyze the corrosion morphology and corrosion products of the structure and to study the corrosion protection performance of the typical “titanium-aluminum” composite lugs. The results

收稿日期: 2021-10-01; 修订日期: 2021-11-29

Received: 2021-10-01; Revised: 2021-11-29

作者简介: 冯成慧(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机结构设计。

Biography: FENG Cheng-hui (1982-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: aircraft structure design.

通讯作者: 赵连红(1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀环境航空航天材料损伤行为。

Corresponding author: ZHAO Lian-hong (1988-), Male, Senior engineer, Research focus: research on damage behavior of aerospace materials in corrosive environment.

引文格式: 冯成慧, 王继普, 赵连红, 等. 腐蚀环境下典型“钛-铝”复合耳片腐蚀防护性能研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 050-058.
FENG Cheng-hui, WANG Ji-pu, ZHAO Lian-hong, et al. Corrosion Protection Performance of Typical “Titanium-Aluminum” Composite Lugs in Corrosive Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 050-058.

show that the joints of dissimilar metals around the bushing in the typical “titanium-aluminum” composite lugs is highly sensitive to galvanic corrosion. The protection system of other parts has better corrosion resistance. After 10 cycles of accelerated test, the aluminum alloy structure around the bushing is seriously pitted, and the etch pits are expanded and connected to form large etch pits. At the 10th cycle, crack propagation occurred at the etch pit of aluminum alloy around copper bushing, and corrosion fatigue failure occurred. To reinforce the corrosion protection measures of the typical “titanium-aluminum” composite lugs, and strengthen the daily maintenance of the contact parts of the typical “titanium-aluminum” compound lugs with dissimilar metals, can effectively improve the corrosion protection capability of the structure.

KEY WORDS: typical “titanium-aluminum” composite lugs; corrosive environment; corrosion protection performance; galvanic corrosion

钛及钛合金是比强度高、耐高温、耐蚀性好的金属材料,得到航空领域的广泛应用。飞机普遍提高了钛合金的用量^[1-4],其中空中客车钛用量从第三代客机 A320 的 4.5%增至第四代客机 A340 的 6%,A380 客机的钛合金用量增至 10%。钛合金零件具有较好的可焊接和机械加工性能,逐渐在航空装备的紧固件(螺钉、螺栓、螺母)、结构件(机身、引擎机舱、机翼、外壳板、骨架、纵梁、隔板、肋骨、飞机蒙皮、隔框和飞机起落架)上应用^[5-8]。随着飞机在腐蚀介质环境下服役机会的逐渐增多,长期面临高盐雾、高湿热等严酷腐蚀环境,易导致钛合金使用部位发生腐蚀,特别是对于钛合金-铝合金混杂结构而言(比如 A380 襟翼的典型“钛-铝”复合耳片结构,如图 1 所示),异种金属接触导致电偶腐蚀敏感性高,混杂结构易产生电偶腐蚀,导致钛合金-铝合金混杂结构快速腐蚀破坏,直接影响飞机结构的安全和可靠性^[9-24]。

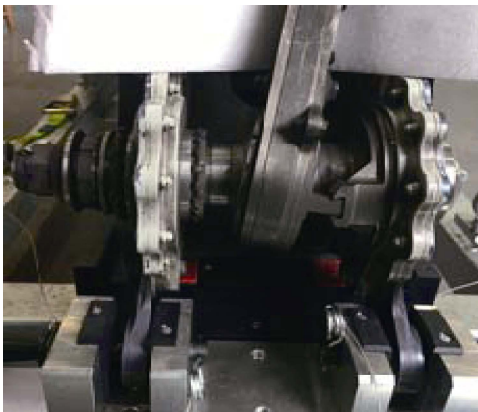


图 1 A380 襟翼“钛-铝”复合耳片结构
Fig.1 A380 flap “titanium-aluminum” composite lug structure

针对典型“钛-铝”复合耳片结构形式,开展腐蚀环境下的腐蚀行为特征和规律,目的在于研究现有防护状态下典型“钛-铝”复合耳片结构的耐腐蚀性能,为“钛-铝”复合耳片结构在腐蚀环境下应用提供依据。

1 试验

1.1 试样

试验件为“钛-铝”复合耳片+铜衬套的结构形式,主体材料采用 7050 铝合金和 Ti-6Al-4V 钛合金,按照现有典型“钛-铝”混杂结构的现有腐蚀防护措施。试验件 7050 铝合金的防护体系为硼硫酸阳极化+XXX 环氧底漆,Ti-6Al-4V 钛合金为溶胶-凝胶处理+XXX 环氧底漆。钛合金和铝合金之间采用贴合面密封,试验件的铜衬套钝化,钛合金螺栓为离子镀铝。试验件的腐蚀防护状态见表 1。典型“钛-铝”复合耳片结构试验件为 5 件,试验件如图 2 所示。

表 1 典型“钛-铝”混杂结构试验件腐蚀防护状态
Tab.1 Corrosion protection state of test piece of typical “titanium-aluminum” composite lugs

试验件组成	防护状态
7050 铝合金	硼硫酸阳极化+ XXX 环氧底漆
Ti-6Al-4V 钛合金	溶胶-凝胶处理+XXX 环氧底漆
贴合面密封处理	1 型 C 类 8 级/AMMS2401 密封
填角密封	2 型 B 类 2 级/AMMS2401 密封胶剂进行填角密封
衬套	铜衬套钝化
钛合金螺栓	离子镀铝
螺栓装配方式	2 型 A 类 2 级/AMMS2401 密封胶剂湿安装+封包
衬套安装后	I 型 MIL-P-23827 润滑脂
装配后处理	喷涂 AMMS2508 缓蚀剂

1.2 试验环境

腐蚀环境中的高湿热、高盐雾腐蚀环境对典型“钛-铝”复合耳片结构的腐蚀影响最为严重,试验重点考虑湿热和盐雾环境对结构的腐蚀影响^[25],同时考虑低温疲劳对“钛-铝”复合耳片受载变形影响导致的防护体系破坏。综合以上因素,参考 CASS 谱的试验模块组成,由于结构不受紫外线作用和热冲击

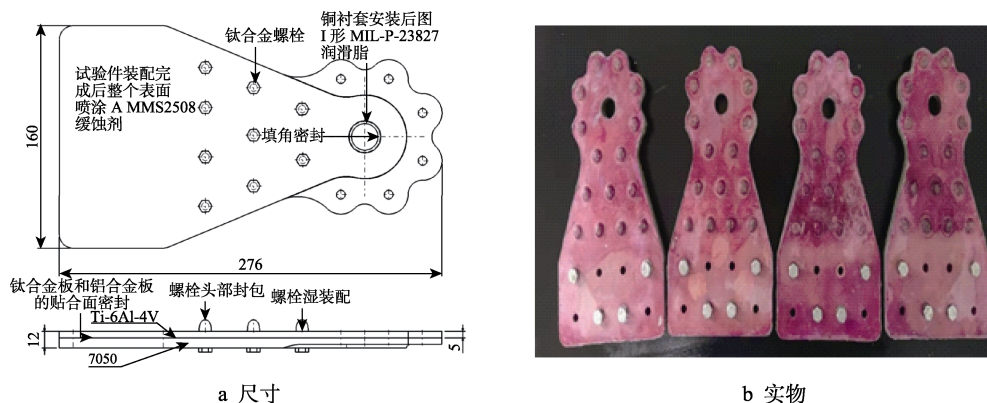


图2 典型“钛-铝”复合耳片试验件

Fig.2 Test piece diagram of typical “titanium-aluminum” composite lugs

作用,裁剪去掉紫外模块和热冲击2个试验模块,最终形成湿热暴露试验-低温疲劳试验-盐雾试验3个模块。其中,湿热暴露试验模块参考刘文斑等^[26]提出的典型内部结构涂层加速腐蚀环境谱来确定;低温疲劳模块结合试验件结构应力水平为80 MPa,温度为 -53°C ,同时统计试验件结构1a的疲劳载荷作用次数约为3000次,试验应力比取0.06,频率为50 Hz;定中性盐雾为4 d、酸性盐雾为3 d的盐雾试验条件。最后形成典型“钛-铝”复合耳片腐蚀防护性能试验环境谱,即试验周期时间约为336 h,包括168 h 湿热试验、72 h 酸性盐雾试验、96 h 中性盐雾试验和10 min 的低温疲劳试验,试验共10个周期。试验的加速试验环境谱如图3所示。

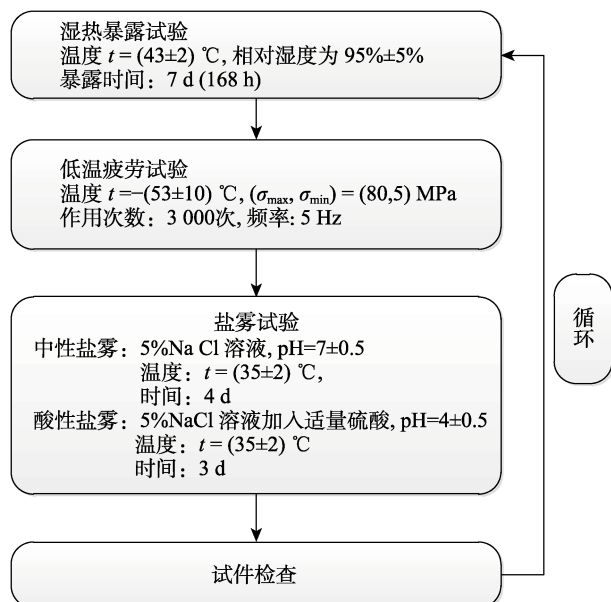


图3 加速试验环境谱

Fig.3 Accelerated testing environment spectrum

1.3 方法

按照如图3所示的加速试验环境谱,开展典型

“钛-铝”复合耳片结构试验件实验室加速腐蚀环境试验,试验周期为10个循环。严格按照试验程序开展环境试验,每个循环依次为试验件清洗、初始检测、周期性加速腐蚀试验、周期性取样检测分析等程序。在加速试验中,参照 GJB 150.9A—2009《军用装备实验室环境试验方法第9部分:湿热试验》的试验步骤和要求开展湿热试验。低温疲劳试验按照 HB 5287—1996《金属材料轴向加载疲劳试验方法》第6节试验程序开展,低温环境采用与疲劳试验机配套的低温环境试验箱协同实施,低温疲劳试验如图4所示。参照 GJB 150.11A—2009《军用装备实验室环境试验方法第11部分:盐雾试验》开展盐雾试验。每个周期试验结束后,参照 GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》,采取目视或10×放大镜检查所有试验件涂层表面是否存在起泡、锈蚀、剥落、开裂缺陷。按 GB/T 9754《色漆和清漆不含金属颜料的色漆漆膜的20°、60°和85°镜面光泽的确定》第10部分测定老化前后的光泽,计算失光率。按 GB/T 11186《漆膜颜色的测量方法》第2部分颜色测量和第3部分色差计算,采用便携式分光测色计测量和计算涂层试验前后的色差值(L值、A值和B值)。在试验件腐蚀疲劳破坏后,通过扫描电镜(SEM,德国Zeiss EVO 10)分析平行面的形貌、腐蚀产物的成分,用能谱(EDS)半定量分析元素的含量。利用SEM的背散射功能观察元素分布,二次电子功能观察形貌,分析典型“钛-铝”复合耳片断口及腐蚀疲劳断裂机理。

2 结果与讨论

2.1 试验数据分析

在典型“钛-铝”复合耳片结构试验件10个周期的加速腐蚀试验过程中,每个周期试验结束后,检测试验件涂层腐蚀和破坏情况。试验件涂层(除铜衬套附近区域)随着试验的开展有颜色变化,防护涂层无鼓泡、剥落、开裂等现象。在试验件的铜衬套附近,

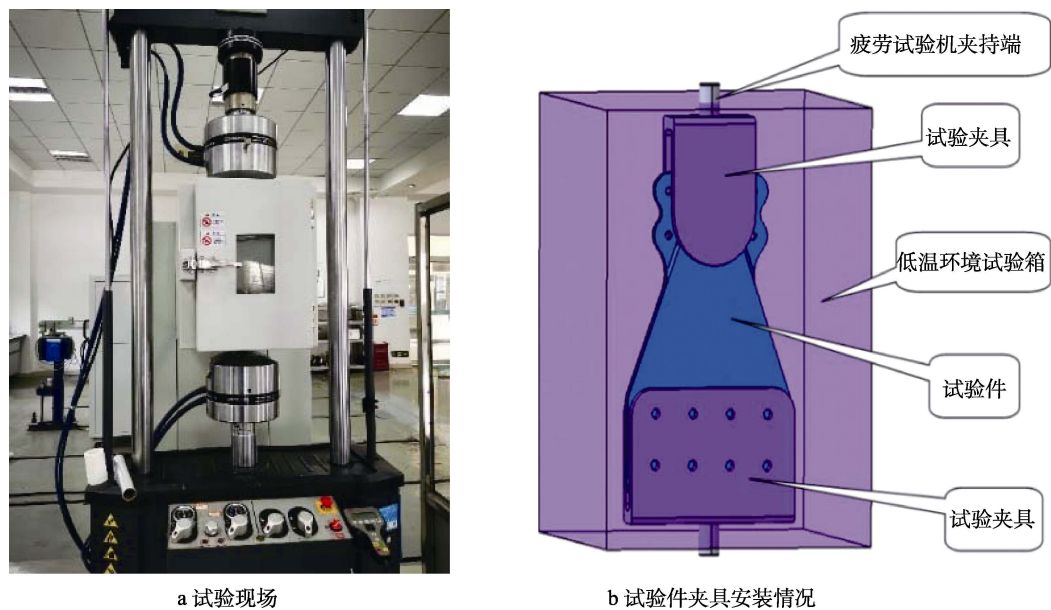


图 4 低温疲劳试验
Fig.4 Low temperature fatigue test: a) test site; b) fixture installation of test piece

铝合金板基材出现的腐蚀较为严重。在试验初期,铜衬套附近区域出现零星腐蚀。随着试验的开展,在第 2 周期,铜衬套上面的密封胶出现少量剥离。到试验中期,试验件涂层出现起泡和鼓包现象,在铜衬套与铝合金接触部位出现涂层开裂破坏,少部分铝合金基材出现点蚀。随着试验的开展,到第 5 周期、试验件铜衬套上的密封胶已经完全脱落,试验件铜衬套周围铝合金基材腐蚀坑的数量增多,腐蚀面积增大(第 3 周期的单个蚀坑面积小于 1 mm^2 ,腐蚀深度小于 0.1 mm ;第 10 周期的单个蚀坑面积大于 2 cm^2 ,腐蚀深度大于 1.5 mm),并伴有腐蚀微裂纹现象。到第 8 周期,试验件的铜衬套与铝合金接触

部位出现较为严重的腐蚀坑,且腐蚀坑沿裂纹方向发展。在第 10 周期,“钛-铝”复合耳片结构试验件出现腐蚀疲劳断裂。对第 1—10 周期试验件涂层光泽、色差和铜衬套周围的腐蚀坑数量进行了检测统计,其中涂层光泽见表 2,涂层色差见表 3,铜衬套周围的腐蚀坑数量详表 4。

由表 2 和表 3 可以看出,“钛-铝”复合耳片结构涂层(除铜衬套附近区域)的光泽和色差在试验前期变化大,试验后期变化小。光泽度由第 1 周期 35.64 降低到第 10 周期的 7.62。色变值变化相对较小,整个试验过程中未出现涂层的粉化、脱落和开裂现象。经过 10 个周期的试验,涂层的综合评级小于 3 级,

表 2 第 1—10 周期试验件涂层光泽值
Tab.2 Coating gloss value of the test piece from the 1st cycle to the 10th cycle

试验件	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期	第 7 周期	第 8 周期	第 9 周期	第 10 周期
试验件 1	38.7	22.3	16.8	13.1	10.9	10.3	8.8	7.9	7.4	6.8
试验件 2	36.1	19.9	16.3	13.3	12.9	10.4	9.9	8.6	7.8	6.7
试验件 3	29.6	19.6	13.9	13.5	13.4	12.7	11.7	10.7	9.1	8.3
试验件 4	36.5	18.3	13.6	11.9	11.4	10.1	9.7	9.3	8.9	8.4
试验件 5	37.3	19.3	16.8	16.2	15.5	12.7	10.5	8.9	8.6	7.9

表 3 第 1—10 周期试验件涂层光泽值色差值
Tab.3 Color difference of the coating gloss value of the test piece from the 1st cycle to the 10th cycle

试验件	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期	第 7 周期	第 8 周期	第 9 周期	第 10 周期
试验件 1	50.1	51.4	52.2	52.7	53.0	53.9	54.2	54.7	55.1	55.7
试验件 2	51.1	51.8	52.8	53.0	53.2	53.7	53.8	54.0	55.0	55.9
试验件 3	51.7	52.3	52.1	52.7	52.8	53.0	54.1	54.7	55.8	57.2
试验件 4	50.6	51.8	52.5	52.6	53.4	54.3	54.5	55.6	56.4	58.0
试验件 5	52.3	52.5	52.7	53.3	53.5	54.2	55.0	55.3	55.5	56.8

表 4 第 1—10 周期试验件铜衬套周围的腐蚀坑数量

Tab.4 Number of etch pits around the copper bushing of the test piece from the 1st cycle to the 10th cycle

试验件	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期	第 7 周期	第 8 周期	第 9 周期	第 10 周期
试验件 1	0	0	1	2	9	10	10	8	8	8
试验件 2	0	0	0	3	8	10	10	9	9	9
试验件 3	0	0	2	3	8	11	11	7	7	7
试验件 4	0	0	1	3	7	9	10	8	8	8
试验件 5	0	0	1	4	7	7	9	9	9	8

符合结构涂层的正常老化发展规律。铜衬套附近区域腐蚀相对严重,在第 2 周期试验后,防护涂层综合评级大于 5 级,涂层出现了脱落、开裂和粉化现象。试验到第 3 周期,铜衬套附近铝合金基材就出现了蚀坑。到第 7 周期,试验件腐蚀坑数量达到了 11 处之多。随后各蚀坑随着腐蚀扩展,数量有所减少,但腐蚀面积增大,腐蚀程度加重,说明典型“钛-铝”复合耳片结构异种金属连接部位电偶腐蚀敏感性高,易腐蚀,需要加强日常维护,才能降低腐蚀破坏概率。

腐蚀加速试验到第 10 个周期,试验件的铝合金试板发生了腐蚀疲劳断裂,其中在第 8 周期,腐蚀疲劳裂纹就以典型“钛-铝”复合耳片结构铜衬套周围铝合金基体腐蚀坑为起点,沿着微裂纹往前扩展,试验件腐蚀情况详见图 5 b。随着实验室加速腐蚀试验的进一步开展,腐蚀介质进一步作用铝合金基体裂纹尖端部位,腐蚀裂纹尖端,在腐蚀介质和疲劳载荷的耦合作用下,试验件的铝合金基体出现了腐蚀疲劳断裂,断裂照片见图 5 d。



a 点蚀形成

b 裂纹扩展

c 腐蚀疲劳断裂

d 试验件断口

图 5 试验件的腐蚀疲劳断裂

Fig.5 Corrosion fatigue fracture diagram of test piece: a) pitting formation; b) crack propagation; c) corrosion fatigue fracture; d) fracture of test piece

2.2 试验结果分析

针对典型“钛-铝”复合耳片结构试验件的腐蚀疲劳断裂情况,采用扫描电镜 (SEM) 和能谱 (EDS),开展结构腐蚀疲劳部位断口腐蚀形貌、腐蚀产物分析,在显微镜下观察样品的断口形貌,包括腐蚀产物、裂纹、断裂模式等。将断裂的样品按照图 6 方式切割,用金刚石慢速切割机从图 6 中虚线方框的位置切割样品,将平行面抛光至 $1\mu\text{m}$ 。通过扫描电镜 (SEM, 德国 Zeiss EVO 10) 分析平行面的形貌、腐蚀产物的成分,用能谱 (EDS) 半定量分析元素含量。利用 SEM 的背散射功能观察元素分布,二次电子功能观察形貌。

通过扫描电镜 (SEM) 和能谱 (EDS) 分析,典型“钛-铝”复合耳片结构试验件在开展实验室加速腐蚀试验过程中,由于铜衬套上面的密封胶不断脱落

(从第 2 周开始脱落),导致腐蚀环境介质进入到铜衬套与铝合金和钛合金之间的缝隙,形成电偶腐蚀,从而试验件铜衬套周围的铝合金基体受到电偶腐蚀和疲劳载荷的双重作用,导致铝合金防护涂层破坏,进而腐蚀铝合金基体,致使铜衬套孔周边的铝合金出现碎片状脱落,其形貌如图 7a 所示。这是铝合金材料经过“湿热→疲劳→盐雾→湿热……”的腐蚀加速循环试验形成腐蚀碎片不断累积产生的现象。检测铝合金腐蚀疲劳断口,为新鲜的铝合金断裂面,且比较整齐,属于脆性断裂典型特征。靠近铜衬套孔的断口部位,有一些白色的腐蚀产物,说明试验件的铝合金基体腐蚀形成腐蚀坑后,在疲劳载荷的作用下,在腐蚀坑周边产生了一些微裂纹,从而导致试验过程中盐雾进入微裂纹。腐蚀介质沿着裂纹进入基体内部,腐蚀铝合金基体,断口的形貌如图 7b 所示。通过扫描电镜 (SEM) 分析 (见图 8),在距离铜衬套孔较远

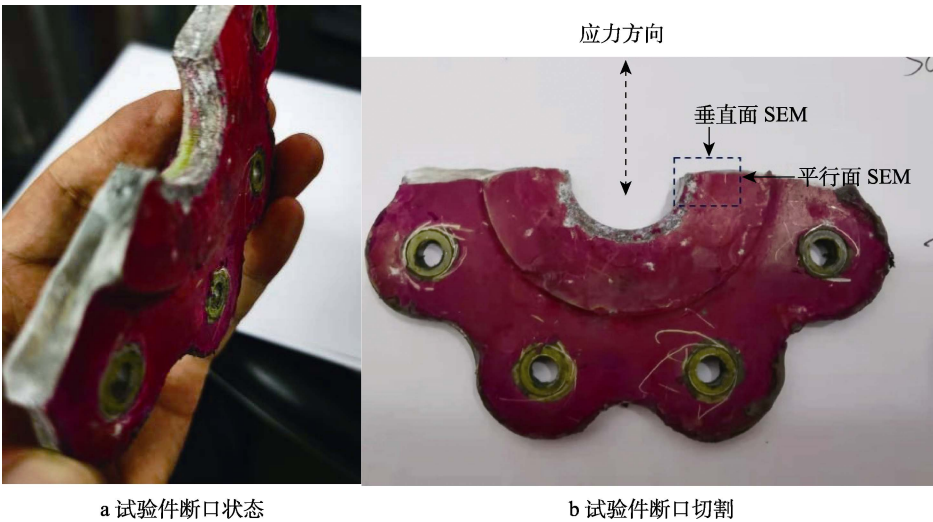


图 6 典型“钛-铝”双耳两层结构试验件断口分析取样方式
Fig.6 Fracture analysis and sampling method of typical “titanium-aluminum”
double-lug two-layer structure test piece: a) fracture state of test piece; b) fracture cutting of test piece

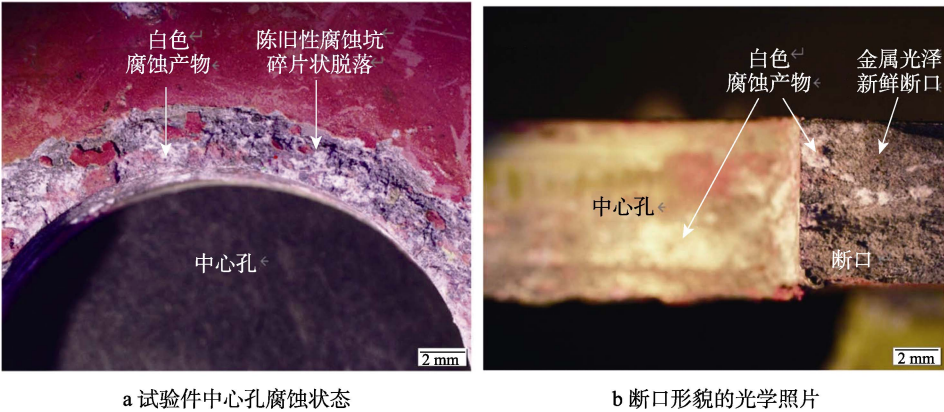


图 7 试验件中心孔腐蚀状态分析
Fig.7 Analysis diagram of the corrosion state of the center hole of the test piece: a)
corrosion state of central hole of test piece; b) optical photos of fracture morphology

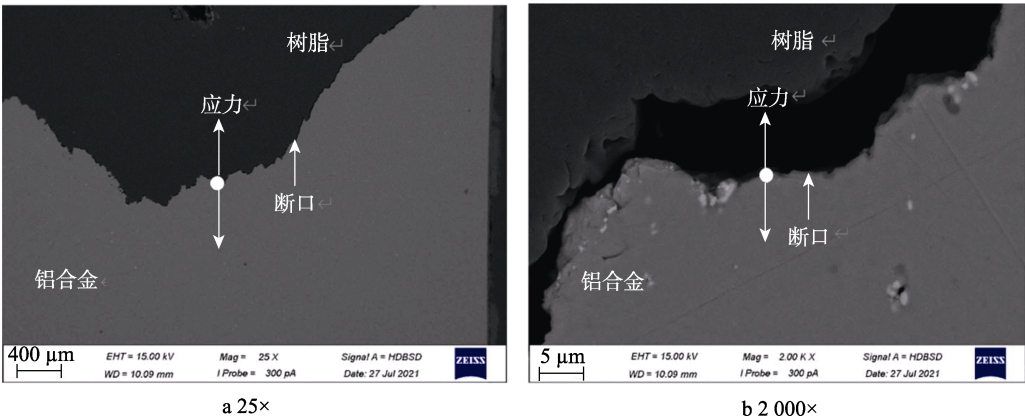


图 8 试验件中心孔应力平行面的背散射 SEM 形貌
Fig.8 Backscattered SEM image of the stress parallel surface of the center hole of the test piece

的断口，腐蚀疲劳断口比较整齐，说明在试验件腐蚀疲劳断裂前，铝合金材料发生了脆断。同时对靠近铜衬套孔的断面进行分析，将图片放大到 2 000×倍，可

以看到断口有一些颜色比较浅的颗粒。经过 EDS 分析证明，这些颗粒主要成分是 CuFe 合金（见图 9）。这些 CuFe 合金颗粒是在熔炼铝合金时作为原料添

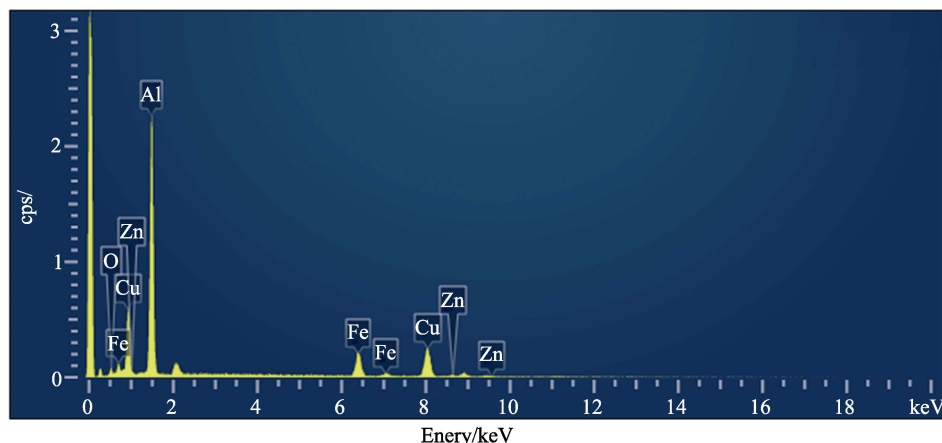


图9 铝合金断口浅色颗粒的 EDS 分析

Fig.9 EDS analysis of light-colored particles in the fracture of aluminum alloy

加进去而没有形成铝合金的残留颗粒, 试验件铝合金材料受到腐蚀介质作用形成腐蚀坑后, 铝合金内部分基材暴露在腐蚀介质环境中。当 CuFe 合金遇到腐蚀介质, 发生微型电化学反应, 在载荷的作用下, 成为裂纹的发源地, 进而导致试验件发生腐蚀疲劳断裂。

通过实验室模拟加速环境试验, 发现了典型“钛-铝”复合耳片结构腐蚀的薄弱环节——与铜衬套、钛合金和铝合金连接区域。当铜衬套的防护措施被破坏后(缓蚀剂失效和密封隔离措施破坏), 腐蚀介质通过缝隙进入铜衬套与铝合金缝隙, 形成微型原电池, 发生电化学腐蚀, 并形成腐蚀裂纹源, 在疲劳载荷作用下, 发展形成腐蚀疲劳微裂纹, 最终导致结构的破坏断裂。为了预防电偶腐蚀以及进一步的疲劳断裂等失效的发生, 从理论上分析, 应定期做缓蚀防护和日常清洗等工作。采用缓蚀剂防护能置换试验件结构表面的水分, 阻断腐蚀介质进入内部结构。通过定期清洗, 及时清洗试验件表面的腐蚀介质, 减少“钛-铝”复合耳片结构异种金属连接部位与腐蚀介质的接触机会, 降低结构电偶腐蚀破坏概率, 从而提高典型“钛-铝”复合耳片结构的使用寿命。因此, 本文研究内容对典型“钛-铝”复合耳片结构的腐蚀防护设计与应用有重要意义。

3 结论

通过腐蚀环境下典型“钛-铝”复合耳片腐蚀防护性能研究, 得到以下结论。

1) 典型“钛-铝”复合耳片结构其他区域(除铜衬套附近区域)防护性能满足 10 个周期的防护要求。

2) 通过实验室模拟加速环境试验, 发现了典型“钛-铝”复合耳片结构腐蚀的薄弱环节——与铜衬套、钛合金和铝合金连接区域, 为了预防电偶腐蚀以及进一步的疲劳断裂等失效的发生, 采取缓蚀剂防护和日常清洗等腐蚀维护和保养措施会更好。

参考文献:

- [1] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.
HUANG Zhang-hong, QU Heng-lei, DENG Chao, et al. Development and Application of Aerial Titanium and Its Alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107.
- [2] 李重河, 朱明, 王宁, 等. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 84-91.
LI Chong-he, ZHU Ming, WANG Ning, et al. Application of Titanium Alloy in Airplane[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 84-91.
- [3] 杨健. 钛合金在飞机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006, 49(11): 41-43.
YANG Jian. Application of Titanium Alloy in Aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(11): 41-43.
- [4] 彭艳萍, 曾凡昌, 王俊杰, 章怡宁, 夏绍玉. 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析[J]. 材料工程, 1997, 25(10): 3-6.
PENG Yan-ping, ZENG Fan-chang, WANG Jun-jie, et al. Development, Application and Feature of Titanium Alloys in Foreign Aviation Industry[J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(10): 3-6.
- [5] 郝凤元. 大型钛合金构件及其制造工艺在先进飞机上的应用[J]. 航空制造工程, 1998(5): 9-11.
HAO Feng-yuan. Application of Large Ti Alloy Part and Fabrication Process to Advanced Aircraft[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1998(5): 9-11.
- [6] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 储俊鹏, 马济民. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20(S1): 90-94.
LI Xing-wu, SHA Ai-xue, ZHANG Wang-feng, et al. TA15 Titanium Alloy and Its Applying Prospects on Airframe[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(S1): 90-94.
- [7] 吕冬兰. 钛合金在民用飞机上的应用及发展趋势[J]. 世界有色金属, 2018(5): 230-231.

- LV Dong-lan. Application and Development Trend of Titanium Alloy in Civil Aircraft[J]. World Nonferrous Metals, 2018(5): 230-231.
- [8] 张宝柱, 孙洁琼. 钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用现状[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 275-280.
ZHANG Bao-zhu, SUN Jie-qiong. Recent Applications of Titanium Alloys in Typical Commercial Aircraft Fuselage Structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 275-280.
- [9] 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.
- [10] 苏艳, 朱玉琴, 康凤. Ti8LC 钛合金与主要结构材料的电偶腐蚀及防护研究[J]. 表面技术, 2010, 39(5): 39-41.
SU Yan, ZHU Yu-qin, KANG Feng. The Study on Galvanic Corrosion and Surface Protection between Ti8LC Titanium Alloy and Central Structural Material[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 39-41.
- [11] 杨勇进, 张晓云, 刘明辉. TC4-DT 钛合金与异种材料接触腐蚀与防护研究[J]. 材料工程, 2012, 40(12): 55-60.
YANG Yong-jin, ZHANG Xiao-yun, LIU Ming-hui. Contact Corrosion and Protection between TC4-DT Titanium Alloy and Dissimilar Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 40(12): 55-60.
- [12] 张晓云, 孙志华, 汤智慧, 刘明辉, 李斌. TA15 钛合金与铝合金和结构钢接触腐蚀与防护研究[J]. 材料工程, 2004, 32(2): 26-28.
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, et al. Study on Galvanic Corrosion and Protection between TA15 Titanium Alloy and Aluminum Alloys or Structural Steels[J]. Journal of Materials Engineering, 2004, 32(2): 26-28.
- [13] 史洪微, 崔常京, 韦涛, 等. 严酷环境下飞机典型结构异种材料电偶腐蚀特点与防护对策[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 52-57.
SHI Hong-wei, CUI Chang-jing, WEI Tao, et al. Behaviours and Protective Measures of Galvanic Corrosion on Dissimilar Materials of Typical Aircraft Structure in Harsh Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 52-57.
- [14] 张晓云, 汤智慧, 孙志华, 等. $0\text{Cr}_{13}\text{Ni}_8\text{Mo}_2\text{Al}$ 钢与铝合金和钛合金接触腐蚀与防护研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(10): 423-426.
ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, SUN Zhi-hua, et al. GALVANIC CORROSION AND PROTECTION OF $0\text{Cr}_{13}\text{Ni}_8\text{Mo}_2\text{Al}$ STAINLESS STEEL COUPLED WITH ALUMINUM ALLOY AND TITANIUM ALLOY[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(10): 423-426.
- [15] 王绍明, 陈立庄, 赵勇. TA2 钛合金与 5083 铝合金电偶腐蚀行为和连接工艺的研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(2): 133-136.
WANG Shao-ming, CHEN Li-zhuang, ZHAO Yong. Study on Galvanic Corrosion Behaviors of TA2 Titanium Alloy & 5083 Aluminum Alloys and Connection Technology[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(2): 133-136.
- [16] 上官晓峰, 杜志杰. 7475 铝合金与 TC18 钛合金接触腐蚀研究[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(5): 470-473.
SHANGGUAN Xiao-feng, DU Zhi-jie. A Study on Galvanic Corrosion between 7475 Aluminum Alloy and TC18 Titanium Alloy[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010, 30(5): 470-473.
- [17] 吴松林, 刘明辉, 易俊兰, 等. 不同表面处理工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金漆层结合力和电偶腐蚀性能影响[J]. 材料工程, 2013, 41(1): 6-11.
WU Song-lin, LIU Ming-hui, YI Jun-lan, et al. Effect of Different Surface Treatments on Painting Adhesion and Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(1): 6-11.
- [18] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 谢志宾. 高强合金与钛合金的电偶腐蚀行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 124-127.
LIU Jian-hua, WU Hao, LI Song-mei, et al. Galvanic Corrosion Behavior between Titanium Alloy and High-Strength Alloys[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 124-127.
- [19] 张晓云, 汤智慧, 李斌, 等. TB8 钛合金电偶腐蚀与防护研究[J]. 材料工程, 2000(增刊): 171-173.
ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, LI Bin, et al. Study on Couple Corrosion and Protection for TB8 Titanium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2000 (Supplement): 171-173.
- [20] 沈文雁, 徐福源. Ti-15-3 钛合金电偶腐蚀与防护研究[J]. 表面技术, 1997, 26(1): 20-22.
SHEN Wen-yan, XU Fu-yuan. Study on Galvanic Corrosion and Protection of Ti-15-3 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 1997, 26(1): 20-22.
- [21] 刘双梅, 刘道新, 樊国福. TA7 钛合金耐热不锈钢电偶腐蚀敏感性研究[J]. 材料工程, 2000, 28(1): 17-19, 30.
LIU Shuang-mei, LIU Dao-xin, FAN Guo-fu. Investigation on Galvanic Corrosion Susceptibility of Heat Resistant Stainless Steel Contacted with TA7 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 28(1): 17-19, 30.
- [22] 王曰义. 钛及其合金在流动海水中的腐蚀及对其他金属材料的电偶腐蚀作用[J]. 金属学报, 2002(S1): 623-625.
WANG Yue-yi. Corrosion Resistance of Titanium Alloys to Flowing Seawater and Galvanic Couple Corrosion Effect on other Metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002(S1): 623-625.

- [23] 黄桂桥. 铝合金在海水中的耐蚀性与腐蚀电位的关系[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(3): 150-154.
HUANG Gui-qiao. Relationship between Corrosion Resistance and Corrosion Potential of Aluminium Alloys in Seawater[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 1998, 10(3): 150-154.
- [24] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 谢志斌. 表面处理对 TC2 钛合金电偶腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(1): 13-17.
LIU Jian-hua, WU Hao, LI Song-mei, et al. Effect of Surface Treatments on Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Alloy TC2 Coupled with Aluminum Alloys and Steels[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2003, 15(1): 13-17.
- [25] 赵连红, 张红飞, 刘成臣, 等. 35Cr₂Ni₄MoA 材料防腐蚀性能验证研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 61-65.
ZHAO Lian-hong, ZHANG Hong-fei, LIU Cheng-chen, et al. Verification Research on Corrosion Resistance of 35Cr₂Ni₄MoA Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(7): 61-65.
- [26] 刘文琰, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Evaluation Technology of Aircraft Structure Calendar Life System[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004.

责任编辑: 刘世忠