

模拟舰载环境对 2124 铝合金耐蚀及疲劳性能的影响

詹中伟, 孙志华, 葛玉麟

中国航发北京航空材料研究院, 中国航空发动机集团航空材料先进腐蚀与防护重点实验室, 北京 100095

摘要 采用酸性盐雾试验模拟舰载环境, 研究了舰载环境对典型航空铝合金 2124 铬酸阳极氧化、硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化耐蚀和疲劳性能的影响, 采用电化学阻抗谱 (EIS) 分析了膜层结构的变化规律, 采用轴向疲劳检测不同腐蚀时间后的疲劳寿命, 并对疲劳断口进行分析。结果显示, 阳极氧化处理能够有效提高其耐蚀性能, 铬酸阳极氧化试样经过 4 个循环酸性盐雾后出现腐蚀, 硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化从第 6 周期开始出现腐蚀; 阳极氧化试样的疲劳寿命随酸性盐雾循环次数而衰减, 衰减趋势与出现腐蚀的规律相吻合; 苹果酸硫酸阳极氧化试样的疲劳寿命衰减最为缓慢。

关键词 舰载环境; 2124 铝合金; 阳极氧化; 耐蚀; 疲劳性能

随着中国舰载航空装备逐渐增多, 恶劣的海洋气候条件和舰面局部气氛对航空装备的服役性能提出了严峻的考验。海洋气候条件一般表现为高温、高湿、高盐雾; 舰面局部气氛主要是由航母动力装置排放的燃烧废气以及舰载机起降时排放的尾气造成的酸性气氛。美国海军相关报告显示, 舰面的机械废气中多含有 SO_2 、 NO_2 等污染物质, 停放在甲板上的飞机表面凝露、湿气普遍呈现较低的 pH 值, 约在 2.4~4.0^[1]。酸性气氛与高盐雾海洋大气混合形成了独特的舰载环境, 与传统的内陆偏中性的

服役环境相比, 其对航空装备材料的腐蚀性大幅度增加^[2-4]。2124 铝合金是航空领域最常用的铝合金材料之一, 常用于飞机蒙皮等外露部件, 直接承受着海洋大气和舰面酸性气氛的考验, 因此在恶劣舰载环境下保持良好的耐蚀性和疲劳性能就成为 2124 铝合金使用的关键。

近年来, 国内外对海洋及舰载环境对材料性能的影响进行了深入研究, 从环境、载荷等多个方面考察了不同因素对材料腐蚀、力学性能衰减的影响, 获得了可喜成果。孙志华、詹中伟等^[5-7]系统研

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2021-11-20

作者简介: 詹中伟, 高级工程师, 研究方向为航空材料先进表面处理技术, 电子信箱: espz-z-wei@163.com

引用格式: 詹中伟, 孙志华, 葛玉麟. 模拟舰载环境对 2124 铝合金耐蚀及疲劳性能的影响[J]. 科技导报, 2022, 40(5): 69-77; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.05.008

究了高强度钢表面新型铝基涂层的防护作用,结果表明在海洋环境下铝基涂层显示出优越的耐蚀性。刘明等^[8]研究了7B04铝合金在不同海域的腐蚀行为,从腐蚀失重和电化学模拟多个角度深入研究了7B04铝合金的腐蚀行为。航空铝合金很少以裸材形式直接使用,一般进行阳极氧化或化学氧化处理,更进一步地,骆晨等^[9]研究了硼酸-硫酸阳极氧化2A97 Al-Cu-Li合金在热带海洋大气环境中的初期腐蚀行为,探讨了腐蚀萌生、扩展过程与合金相之间的关系。陈跃良、谭晓明等^[10-12]系统研究了海洋环境、疲劳载荷等因素对航空铝合金材料腐蚀行为、疲劳断裂机理的影响,将腐蚀形成的损伤与疲劳裂纹关联起来,运用断裂力学理论和方法进行分析,为腐蚀引起的寿命模拟预测提供了有益借鉴。Li等^[13]系统研究了2A70-T6铝合金在模拟自然环境下腐蚀对于低周疲劳性能的影响,结果表明预腐蚀在铝合金表面产生的深度点蚀坑会导致疲劳多源起始,并明显降低疲劳寿命。Arriscorreta等^[14]在总结了多起因腐蚀导致的航空铝合金零部件疲劳失效案例后,研究发现腐蚀导致疲劳的机理涉及亚表面点蚀、亚表面开裂及晶间腐蚀等过程,同时指出应力因素对疲劳寿命的影响大于腐蚀时间。Co等^[15-16]系统研究了浅层点蚀、深层点蚀、深裂纹以及一般腐蚀对7050铝合金疲劳性能的影响,结果发现不同腐蚀形貌对疲劳源起始寿命平台均接近,严重的大尺寸腐蚀缺陷并不会与疲劳裂纹

起始特定地关联起来,而微观腐蚀特征及其亚层微观组织则与疲劳裂纹起始密切相关。近年来,随着中国海军航空装备的增多,舰载环境对航空铝合金材料的腐蚀影响日益明显,已经引起了广泛重视。区别于以往中性盐雾试验^[17],海军航空装备多采用酸性盐雾试验模拟舰载环境^[18],即在GJB 150.11A基础上调节pH值到 3.5 ± 0.5 。目前这种酸性盐雾试验方法已经显示出比中性盐雾更强的腐蚀性,尤其对于金属及涂层的效果更加明显。

然而,航空铝合金在舰载环境下的腐蚀行为、疲劳等关键力学性能的衰减规律等,目前尚缺乏系统研究,无法支撑航空铝合金实际使用的设计需求。本文针对航空铝合金2124-T851,采用酸性盐雾试验模拟舰载环境,评估铬酸阳极氧化、硼硫酸阳极氧化和苹果酸-硫酸阳极氧化在酸性盐雾环境下的耐蚀性能,研究铝合金疲劳性能的衰减规律,并分析疲劳性能与腐蚀损伤演化之间的对应关系。

1 实验材料及方法

1.1 试验材料及阳极氧化处理

试验材料为2124-T851铝合金,化学成分见表1。腐蚀试验的平板试样规格为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,疲劳试验的试棒为单截面光滑轴向应力疲劳试棒(应力集中系数 $K_t=1$),如图1所示。

表1 2124-T851铝合金化学成分质量分数

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.2	0.3	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	—	0.25	0.15	余量

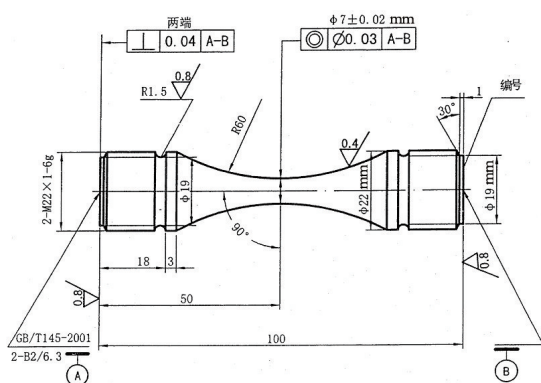


图1 轴向疲劳试棒示意

铬酸阳极氧化(CAA)按照HB/Z 118^[19]的规定进行处理,硼硫酸阳极氧化(BSAA)按照AMS-A-8625 Type IIB^[20]规定进行处理。苹果酸硫酸阳极氧化(MSAA)按照Q/6SZ 2881-2012^[21]规定进行处理。所有试样阳极氧化处理后,均采用稀铬酸进行封闭处理。

1.2 试验和表征

腐蚀试验采用酸性盐雾试验,在GJB 150.11A基础上,采用化学纯的 H_2SO_4 或 NaOH 调节溶液pH值为 3.5 ± 0.5 ;单个周期包括24 h喷雾和24 h干燥。

盐雾试验的周期均为8周期(384 h),在初始,第2、4、6、8周期分别取出平板试样和疲劳试棒,平板试样进行腐蚀形貌观察、电化学阻抗检测等,疲劳试棒进行疲劳寿命试验。

腐蚀的微观形貌采用扫描电镜观察。疲劳试验按照 HB 5287—1996^[22]的规定,试验条件为室温,应力比 $R=0.1$,频率120 Hz,应力值为260 MPa,检测试样的疲劳周次,并计算相应的对数中值疲劳寿命。

阳极氧化膜层的电化学阻抗测试采用 PAR-STAT 2273 电化学工作站检测,测试溶液为质量分数3.5% NaCl 溶液;采用三电极体系,其中辅助电极选用铂电极,参比电极为饱和甘汞电极,试样侵入在电解质中的面积为 1 cm^2 ;电化学阻抗谱(EIS)的测试频率为 $10^5\sim 10^{-2}\text{ Hz}$ 。

2 结果与分析

2.1 酸性盐雾对阳极氧化2124铝合金耐蚀性影响

图2所示为2124铝合金3种阳极氧化试样的表面宏观、表面微观和断面微观形貌。

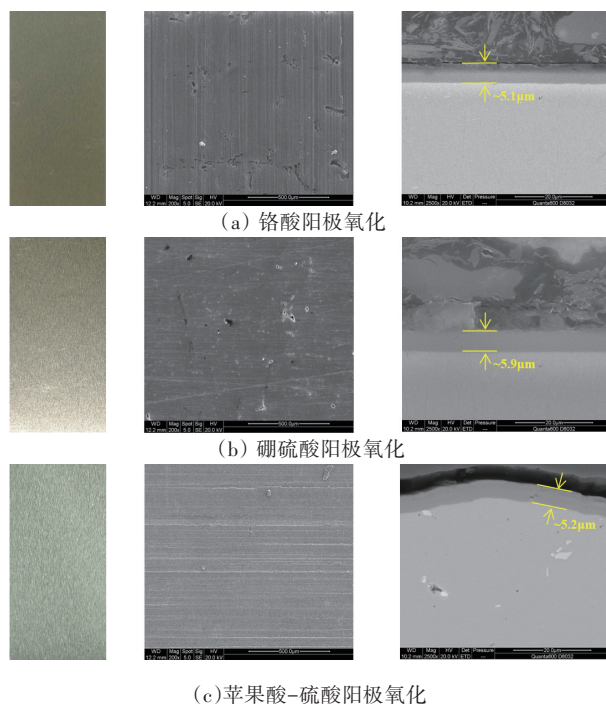


图2 2124铝合金3种阳极氧化膜层表面宏观、表面微观及断面微观形貌

从表面宏观形貌可以发现,3种阳极氧化膜层均致密均匀,无明显缺陷;无明显孔洞、裂纹等缺陷。铬酸阳极氧化膜层颜色略暗;硼硫酸、苹果酸硫酸阳极氧化膜层颜色均较浅,略带光泽。从表面微观形貌可以发现,铬酸阳极氧化膜层表面存在明显的孔洞组织,随机分布在膜层表面;硼硫酸阳极氧化膜层表面的孔洞较少,而苹果酸硫酸阳极氧化膜层的孔洞数量进一步降低。这与相关研究成果^[23-25]基本一致,即硼酸地加入,不会改变氧化膜阻挡层的结构,但会显著影响氧化膜多孔层的结构形式,提升膜层整体致密性,进而获得更好的耐蚀性。苹果酸的作用与硼酸类似,同样能够达到提高致密度的作用。从断面微观形貌可以发现,3种阳极氧化膜层厚度较为均匀,都保持在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右,其中铬酸阳极氧化膜层表面局部存在微小凹陷,可能与表面微观形貌的孔洞结构有关。

2124铝合金铬酸阳极化平板试样经过酸性盐雾4周期后,表面出现了多个点蚀,如图3(a)所示,并且点蚀部位出现较多明显的白色腐蚀产物,显示铝合金基体已经发生了腐蚀。经过8周期后,点蚀逐渐增多,如图3(b)所示。硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化平板试样经过酸性盐雾6周期后,才开始出现零星腐蚀点,如图3(c)和图3(e)所示;经过8周期后,点蚀部位略有增加,如图3(d)和图3(f)所示。疲劳试棒表面的腐蚀发展情况与平板试样基本相同。

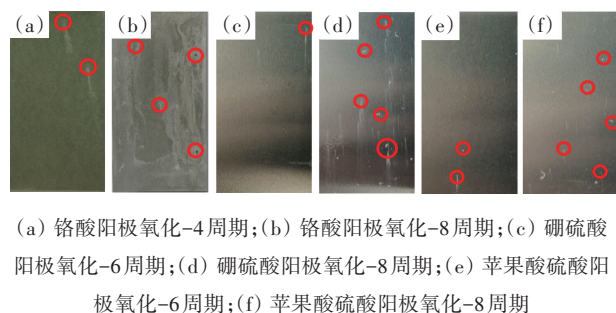


图3 2124铝合金阳极氧化试样酸性盐雾腐蚀情况外观

2.2 酸性盐雾对2124铝合金阳极氧化膜层结构影响

阳极氧化膜层在酸性盐雾过程中出现破损,造成膜层结构特性变化,影响其防护性能;电化学阻

抗谱技术能够准确检测膜层界面及内部结构的变化,对于研究阳极氧化膜的腐蚀行为非常有效。在酸性盐雾不同周期后,对3种阳极氧化膜层进行电化学阻抗检测,研究其膜层结构特征参数的变化,并与酸性盐雾的腐蚀结果相对照。

图4为3种阳极氧化试样在酸性盐雾不同周期后的电化学阻抗曲线。可以发现,3种阳极氧化膜

层的初始阻抗值都比较高,即低频端(0.1 Hz)的阻抗值,铬酸阳极氧化膜层的阻抗值约为 $2.60 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$,硼硫酸阳极氧化达到 $8.58 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$,苹果酸硫酸阳极氧化约为 $3.07 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。3种阳极氧化膜层阻抗最大值都处于可比的同一数量级,这表明,在完整状态下,3种膜层都具有较好的完整性和致密性。

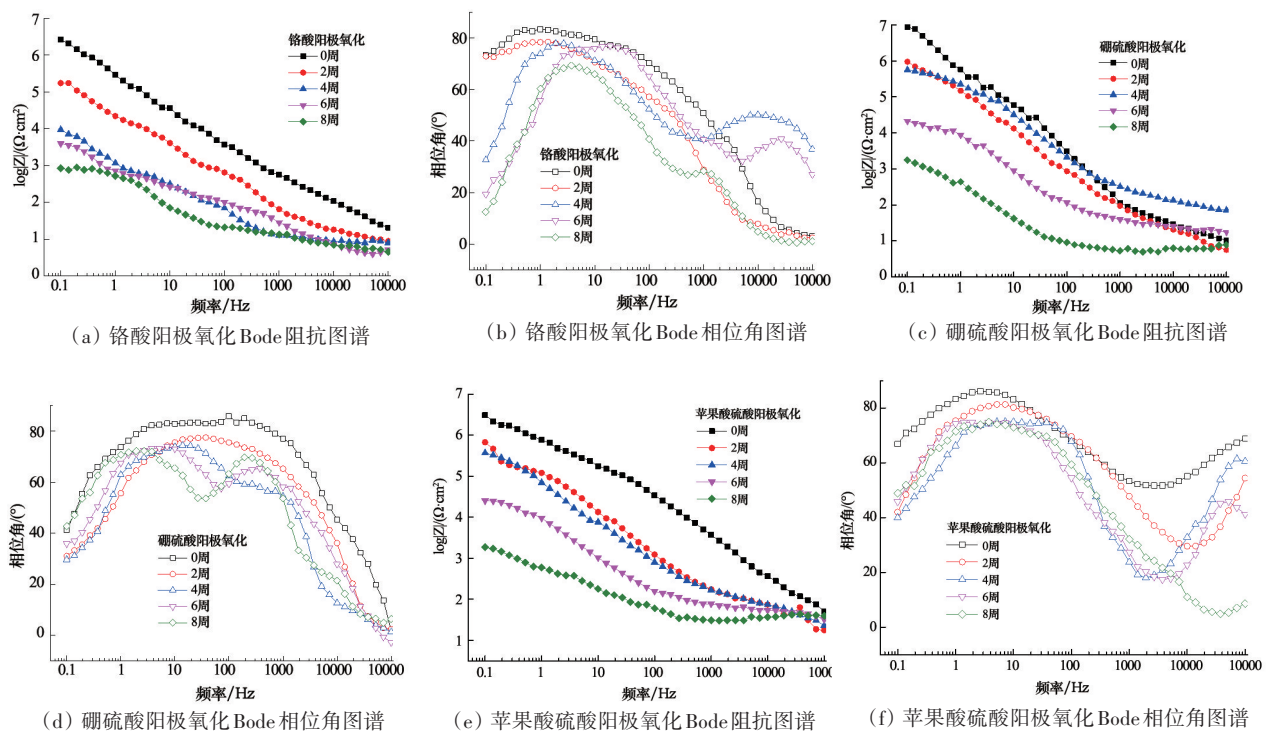


图4 2124铝合金阳极氧化试样酸性盐雾不同周期后电化学阻抗曲线

随着酸性盐雾试验的进行,铬酸阳极氧化膜层在第4个周期出现了明显的白色腐蚀产物,表明氧化膜层已经出现破损,铝合金基体出现了腐蚀。在电化学阻抗谱上,可以发现铬酸阳极氧化膜层在第4个周期后的阻抗值大幅度下降,降低幅度约为2个数量级。之后,铬酸阳极氧化膜层的阻抗值继续下降,显示基体的腐蚀情况持续严重。在酸性盐雾8个周期后,最大阻抗值降低至 $8.37 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$,基本已丧失防护能力;这与阳极氧化膜层外观相一致。

而硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化膜层在前4个周期后,并未出现明显的腐蚀痕迹,膜层结构基本保持了完整;电化学阻抗数据也显示第4个周期后,2种膜层的最大阻抗值虽然有所降低,

但降幅小于1个数量级。这可能是由于长期处于盐雾环境中,水分逐渐向氧化膜结构渗透,一定程度造成了膜层结构的疏松。在酸性盐雾第6个周期后,2种阳极氧化膜层上开始出现白色腐蚀产物,表明膜层损伤,腐蚀介质到达基体界面;相对应地,最大阻抗值也发生较大幅度降低,维持在 10^4 数量级。第8个周期后,最大阻抗值进一步降低至 10^3 数量级。

等效电路方法能够对EIS图谱数据进行拟合,从而获得代表阳极氧化膜结构的特征元件参数,有助于深入了解膜层结构随盐雾时间的变化。采用图5所示的等效电路分别模拟基体无腐蚀和有腐蚀时的膜层结构,其中 R_s 代表溶液电阻, C_w 代表多

孔结构孔壁电容, Q_p 和 R_p 分别代表孔内封闭填充物质的电容和阻抗, Q_b 和 R_b 分别代表阳极氧化膜壁垒层的电容和阻抗; 当基体发生腐蚀时, 在基体/膜层界面处发生腐蚀反应, Q_{cl} 和 R_{cl} 分别代表腐蚀反应的双电层电容和电荷转移电阻。

根据图 5 所示的等效电路模型及其代表的膜层结构, 采用图 5(a) 拟合阳极氧化试样未发生腐蚀的电化学阻抗数据, 即铬酸阳极氧化试样第 4 周期之前、硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化试样第 6 周期之前的数据; 采用图 5(b) 拟合阳极氧化试样基体发生腐蚀的电化学阻抗数据。表 2 和图 6 给出了直接表征阳极氧化膜结构特征的 4 个参数

R_p 、 Q_p 、 R_b 和 Q_b 。3 种涂层的初始 R_p 和 R_b 都非常高, 这显示出阳极氧化膜的致密性和完整性较好, 其中硼硫酸阳极氧化膜的数据最高。随着酸性盐雾试验进行, 第 4 个周期后, 铬酸阳极氧化膜层的大幅下降, 而硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化膜层在第 6 个周期后出现大幅下降。这与酸性盐雾试验中白色腐蚀产物出现的时间相一致。腐蚀的出现, 意味着阳极氧化膜层壁垒层被突破, 基体被腐蚀; 随后基体/膜层界面发生的腐蚀反应逐渐加强。腐蚀反应所产生的腐蚀产物逐渐在界面堆积外溢, 进一步造成阳极氧化膜层腐蚀缺陷的扩大, 相关阻抗值急剧降低, 基本丧失防护能力。

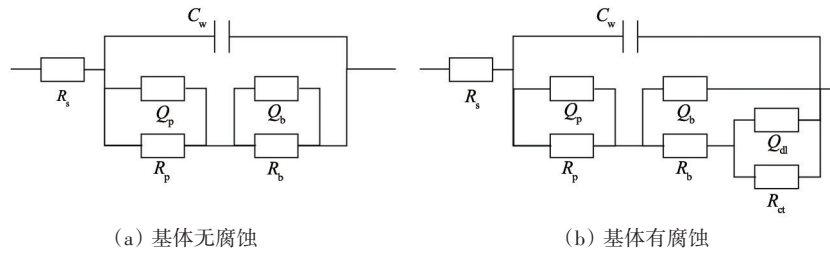


图 5 阳极氧化膜结构等效电路

表 2 3 种阳极氧化试样 EIS 等效电路拟合结果

阳极氧化类型	酸性盐雾周期	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_p/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_b/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_b/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$
CAA	0	192554	52	2408957	44
	2	76666	91	97398	107
	4	1126	327	3371	893
	6	766	540	245	882
	8	87	871	208	1236
BSAA	0	721288	66	7863284	16
	2	179985	582	765328	19
	4	88491	442	473629	771
	6	1288	837	10672	1149
	8	529	1107	335	1032
MSAA	0	698846	11	2366199	22
	2	162415	98	508231	57
	4	91276	668	278490	542
	6	7333	942	7763	1085
	8	545	339	425	983

2.3 酸性盐雾对阳极氧化 2124 铝合金疲劳性能影响

大量研究表明, 腐蚀会对铝合金基体的疲劳性能产生影响^[10-11,26], 其主要原因在于腐蚀产生的表

面缺陷, 极易成为疲劳裂纹源, 进而引发疲劳断裂。本项目在 2124 铝合金上制备了 3 种阳极氧化膜层, 对其开展酸性盐雾试验, 并在不同循环周期取出, 检测其疲劳寿命。

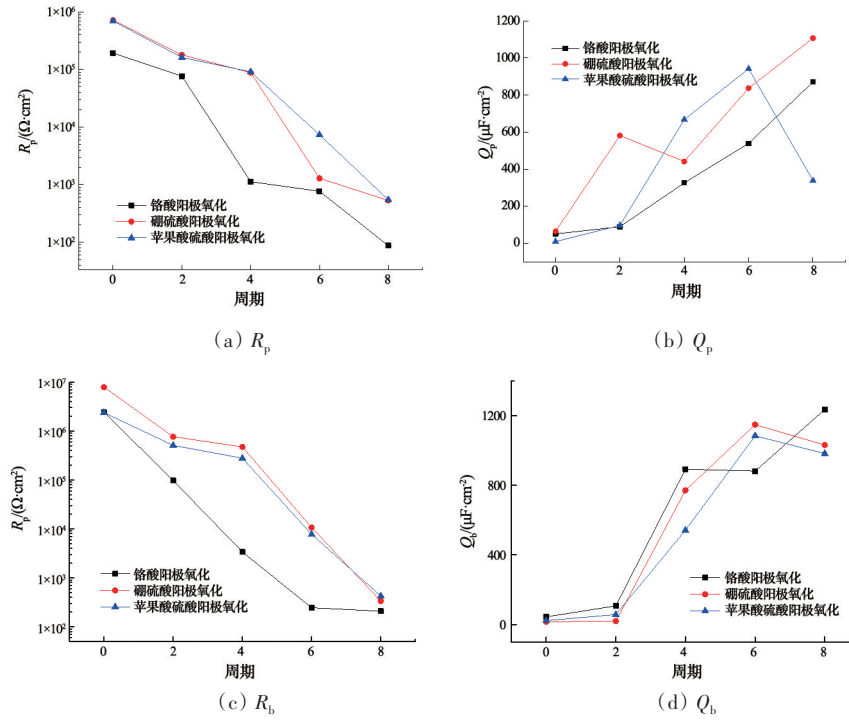


图6 3种阳极氧化试样等效电路特征参数变化曲线

表3和图7所示为3种阳极氧化试棒在酸性盐雾不同周期后的疲劳寿命数据。疲劳测试的应力水平定为260 MPa。需要指出的是,每个周期后的测试样本数量均有所不同,这是因为随着酸性盐雾试验的进行,疲劳试棒发生的腐蚀情况逐渐增多,尤其是基体出现腐蚀后,造成疲劳数据的分散性增

大。为了达到尽可能高的置信度,第6、8周期后均规划了较多的试棒数量。铬酸阳极氧化第6、8周期后,以及硼硫酸阳极氧化第8周期后的疲劳数据达到90%置信度。其他周期后的疲劳数据达到95%置信度。

初始的疲劳数据显示,硼硫酸阳极氧化的疲劳

表3 3种阳极氧化试样疲劳寿命

阳极氧化类型	酸性盐雾周期	样本数	平均对数疲劳寿命 \bar{X}	标准偏差 s	中值疲劳寿命 $N50$	变异系数 C_v
CAA	0	7	4.909	0.034	8.11×10^4	0.007
	2	5	4.868	0.024	7.38×10^4	0.005
	4	6	4.567	0.065	3.69×10^4	0.014
	6	8	4.060	0.251	1.15×10^4	0.062
	8	7	3.842	0.266	6.94×10^3	0.069
BSAA	0	7	5.068	0.063	1.17×10^5	0.012
	2	5	4.959	0.033	9.10×10^4	0.007
	4	5	4.888	0.024	7.72×10^4	0.005
	6	8	4.779	0.134	6.01×10^4	0.028
	8	10	4.598	0.347	3.96×10^4	0.076
MSAA	0	6	5.011	0.027	1.03×10^5	0.005
	2	7	4.945	0.065	8.81×10^4	0.013
	4	4	4.882	0.027	7.62×10^4	0.005
	6	8	4.859	0.043	7.23×10^4	0.009
	8	10	4.821	0.066	6.62×10^4	0.014

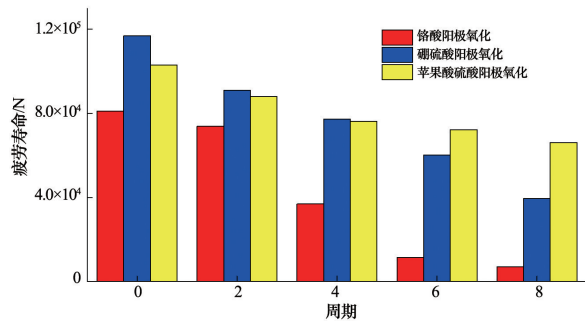


图7 3种阳极氧化试棒疲劳寿命

寿命最高,达到了 1.17×10^5 次,其次为苹果酸硫酸阳极氧化,而铬酸阳极氧化对 2124 铝合金疲劳寿命的降低程度最大。随着酸性盐雾试验的进行,3 种阳极氧化试棒的疲劳寿命总体趋势都是逐渐降低。铬酸阳极氧化试棒的降低幅度最为明显,在第 4 周期出现腐蚀后,疲劳寿命大幅降低了 54.5%; 经过 8 个周期后,疲劳寿命衰减至 6.94×10^3 次。对第 8 周期后疲劳试棒的断口进行观察,可以明显发现,腐蚀坑已穿透阳极氧化膜,深入铝合金基体,而疲劳裂纹正是从腐蚀部位起源。

硼硫酸阳极氧化试棒疲劳寿命呈现均匀降低的趋势。苹果酸硫酸阳极氧化试棒的疲劳寿命同样逐渐降低,但是在第 4 个周期后,降低幅度十分平缓,并且第 6、8 周期后的寿命还超过了硼硫酸阳极氧化。这显示出苹果酸硫酸阳极氧化在保持 2124 铝合金基体疲劳性能方面优于硼硫酸阳极氧化。

3 讨论

舰载环境是装备面临的最为恶劣的服役环境之一,对金属材料的腐蚀效应尤其明显。富含 SO_2 的海水盐雾中, SO_4^{2-} 与 Cl^- 会产生协同效应,明显加速金属材料的腐蚀。铝合金阳极氧化膜层在酸性盐雾试验过程中,完整状态下能够有效抵御腐蚀介质。尽管进行了封闭处理,但是阳极氧化膜层自身的多孔结构仍然极易成为受到腐蚀介质的侵入,尤其是水分子和小尺寸 Cl^- 等。当氧化膜在持续渗透下被损伤后,腐蚀介质到达铝合金基体/氧化膜界面,此时酸性介质就显示出比中性更强的腐蚀性。

3 种阳极氧化工艺所制备的膜层结构在致密

性、膜层结构方面存在一定差异。通过 3 种膜层的表面及断面微观形貌可以发现,铬酸阳极氧化膜层相对较为疏松,其表面的孔洞结构极易积聚腐蚀介质。在酸性盐雾试验的喷雾阶段,孔洞区域积累腐蚀溶液;在干燥阶段,孔洞中溶液的水分挥发,残留下盐分。在下一周期喷雾阶段,孔洞充满腐蚀溶液后,盐浓度变大,腐蚀性增强;干燥阶段,水分挥发,残留更多盐分。如此多个周期试验后,孔洞内的盐分显著增大,尤其是 Cl^- 浓度大幅增加,对阳极氧化膜的腐蚀性增强,从而更快引起膜层被腐蚀穿透。而硼硫酸阳极氧化、苹果酸硫酸阳极氧化中所使用的硼酸、苹果酸等能够有效提升膜层致密性,减少孔洞,从而提高耐蚀性。这也是酸性盐雾中硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化耐蚀性较好的主要原因。从腐蚀外观和膜层结构的电化学表征结果可以发现,硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化膜层的致密结构,能够抵抗酸性盐雾 6 个周期,而铬酸阳极氧化在 4 个周期后即出现腐蚀现象。在中性盐雾试验中,硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化同样表现出优于铬酸阳极氧化的耐蚀性。

当铝合金基体出现腐蚀后,腐蚀产生的缺陷就极易成为疲劳裂纹源,如图 8 所示。一般而言,腐蚀程度越大,腐蚀产物越多,缺陷越深,那么在疲劳试验的循环加载过程中就越容易产生应力集中,从而造成疲劳性能的大幅度衰减。因此,从图 3 展示的第 8 周期后试样的腐蚀形貌可发现,铬酸阳极氧化试样整个表面均出现腐蚀,程度最严重,其次为硼硫酸阳极氧化,再次为苹果酸硫酸阳极氧化。这也与图 7 展示的疲劳寿命的衰减趋势相吻合。

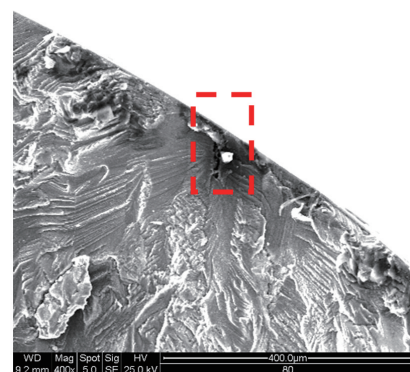


图8 8个周期后铬酸阳极氧化疲劳试棒断口

4 结论

1) 酸性盐雾下, 硼硫酸阳极氧化和苹果酸硫酸阳极氧化对 2124 铝合金的防护效果最好; 铬酸阳极氧化最差, 经过 4 个周期后即出现基体腐蚀。

2) 酸性盐雾会造成 2124 铝合金阳极氧化试样疲劳寿命的衰减。其中, 铬酸阳极氧化衰减速度最快, 程度最大; 其次为硼硫酸阳极氧化; 苹果酸硫酸阳极氧化疲劳性能衰减程度最为平缓。

参考文献(References)

- [1] Ketcham S J. Accelerated laboratory corrosion test for materials and finishes used in naval aircraft[R]. Naval Air Systems Command Report, 1977.
- [2] 王素华, 王秀霞, 樊庆和. 舰载直升机的腐蚀与防护[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19: 343-345.
- [3] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
- [4] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
- [5] 孙志华, 刘明, 张晓云, 等. 高强度钢代镉铝基涂层耐海洋环境腐蚀性能评价[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 71-76.
- [6] 詹中伟, 孙志华, 汤智慧, 等. 离子镀铝与离子液体电镀铝涂层性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 74-81.
- [7] 詹中伟, 孙志华, 汤智慧, 等. 后处理对离子液体电镀铝合金涂层耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(11): 1-6.
- [8] 刘明, 蔡健平, 孙志华, 等. 7B04 铝合金海洋性大气腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 163-166.
- [9] 骆晨, Albu S P, 孙志华, 等. 硼酸-硫酸阳极氧化 2A97 Al-Cu-Li 合金在热带海洋大气环境中的初期腐蚀机理[J]. 材料工程, 2016, 44(9): 8-15.
- [10] 陈跃良, 卞贵学, 衣林, 等. 腐蚀和疲劳交替作用下飞机铝合金疲劳性能及断裂机理研究[J]. 机械工程学报, 2010, 48(20): 70-76.
- [11] 谭晓明, 张丹峰, 卞贵学, 等. 腐蚀对新型高强度铝合金疲劳裂纹萌生机制及扩展行为的作用研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 76-83.
- [12] 谭晓明, 张丹峰, 陈跃良. 基于微观结构的 2B06 铝合金全寿命概率模拟[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1434-1439.
- [13] Li H, Fu L, Lin L, et al. Low-cycle fatigue behavior and corrosion mechanism of pre-corroded 2A70-T6 aluminum alloy[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(2): 228-239.
- [14] Arriscorreta C A, Hoepfner D W. Effects of prior corrosion and stress in corrosion fatigue of aluminum alloy 7075-T6[J]. Corrosion, 2012, 68(10): 950-960.
- [15] Co N E C, Burns J T. Effects of macro-scale corrosion damage feature on fatigue crack initiation and fatigue behavior[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 234-247.
- [16] Co N E C, Burns J T. Effects of micro-scale corrosion damage features and local microstructure on fatigue crack initiation location [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 150: 1-8.
- [17] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 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[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- [18] 张令波, 程从高. 酸性盐雾对航空材料及结构件腐蚀影响研究[J]. 航空标准化与质量, 2015, 5: 43-47.
- [19] 航空工业部 621 所. HB/Z 118—1987 铝及铝合金铬酸阳极氧化工艺[S]. 北京: 航空工业部, 1987.
- [20] SAE Aerospace. Anodic coatings for aluminum and aluminum Alloys: AMSA8625—2000[S]. USA: SAE International, 2000.
- [21] 中国航空工业集团公司北京航空材料研究院. Q/6SZ 2881—2012 铝合金苹果酸-硫酸阳极氧化工艺及质量检验[S]. 北京: 中国航空工业集团公司北京航空材料研究院, 2012.
- [22] 中国航空工业总公司六二一研究所. HB 5287—1996 金属材料轴向加载疲劳试验方法[S]. 北京: 中国航空工业总公司第三〇一研究所, 1996.
- [23] Du N, Wang S X, Zhao Q, et al. Effects of boric acid on microstructure and corrosion resistance of boric/sulfuric acid anodic film on 7050 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012(22): 1655-1660.
- [24] 许旋, 罗一帆. 添加剂对铝合金阳极氧化膜形成的影响[J]. 应用化学, 2002, 19(4): 356-359.
- [25] 刘佑厚, 井玉兰. 铝合金硼酸-硫酸阳极氧化工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2000, 22(6): 8-11.
- [26] 陈跃良, 吴省均, 张勇, 等. 不同表面状态 2024-T3 铝合金腐蚀行为及 DFR 退化规律[J]. 装备环境工程, 2020, 17(6): 44-50.

Effect of shipborne environment on corrosion resistance and fatigue property of 2124 aluminum alloy

ZHAN Zhongwei, SUN Zhihua, GE Yulin

Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing
Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract Shipborne environment is the main service circumstance of aircraft equipment in the future, which combines features of high temperature, high relative humidity, high salinity from marine environment and acidic gas from shipborne equipment. Aluminum alloys suffer severe corrosion in such an environment. In this study acidic salt spray test is used to simulate the shipborne environment and applied to 2124 aluminum alloys with three different anodic oxidations, i.e., chromic acid anodization (CAA), boric-sulfuric acid anodization (BSAA) and malic-sulfuric acid anodization (MSAA). The corrosion resistance and fatigue property of anodized 2124 alloys are evaluated at different cycles of the test. The structure evolution of anode oxide films is characterized by electrochemical impedance spectroscopy(EIS). The axial fatigue life of anodized samples is measured after different cycles of the test. The fracture morphology is also studied. The results suggests that anodic oxidation can significantly enhance the corrosion resistance of 2124 alloy. BSAA and MSAA samples exhibit better corrosion resistance than CAA samples. Corrosion signs of the substrate of CAA appear after 4 cycles of the test, while after 6 cycles for BSAA and MSAA. The fatigue life generally declines with salt spray test cycles, which is consistent with the corrosion resistance performance. However, MSAA has the highest residual fatigue life.

Keywords shipborne environment; 2124 aluminum alloy; anodic oxidation; corrosion resistance; fatigue property ●



(责任编辑 祝叶华)