

装备通用质量特性及寿命评估

CF8611/AC531 复合材料的实验室
加速老化行为研究

张勇, 王安东, 陈跃良, 樊伟杰, 马瑞民

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 获得 CFRP 的老化行为规律, 研究紫外辐照、温度和湿度等环境因素的影响, **方法** 以湿热效应和光氧老化的等量、等效损伤为原则, 确定实验室加速老化环境谱编制方法。以 CF8611/AC531 复合材料为对象, 依据确定的加速老化试验方案, 开展加速老化试验, 观察其微观形貌, 并测量开路电位和动电位极化曲线。**结果** 老化前, CFRP 表面完整无裂纹, 碳纤维/树脂界面结合良好; 老化后, 树脂基体出现裂纹和孔洞, 同时界面遭到破坏。极化曲线随着老化时间的增长会向右下方移动, 自腐蚀电位微降, 幅度为 0.0326 V, 自腐蚀电流密度增长了近 1621 倍。**结论** 加速老化导致表面碳纤维裸露面积不断增大, 时间越长, 破坏作用越明显, 实际使用中应防止其与金属直接接触。

关键词: 复合材料; 加速老化行为; 湿热效应; 光氧老化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.019

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0116-06

Laboratory Accelerated Aging Behavior of CF8611/AC531 Composite

ZHANG Yong, WANG An-dong, CHEN Yue-liang, FAN Wei-jie, MA Rui-min

(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao Shandong 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain the law of the aging behavior of CFRP and study the influence of environmental factors such as ultraviolet radiation, temperature and humidity. Based on the principle of equivalent damage of wet-heat effect and photooxidation aging, the method of compiling accelerated aging environmental spectrum in laboratory was determined; CF8611/AC531 composite was taken as the study object, and the accelerated aging test was carried out according to the determined accelerated aging test scheme. The micro-morphology was observed and the open-circuit potential and potentiodynamic polarization curves were measured. Before aging, there were no cracks on the surface of CFRP, and the carbon fiber/resin interface bonded well. After aging, cracks and holes appeared in the resin matrix, and the interface was destroyed at the same time. The polarization curve moved downward to the right with the increase of aging time. The self-corrosion potential decreased slightly by 0.0326 V. The self-corrosion current density increased by nearly 1621 times. Accelerated aging results in the increasing exposed area of carbon fibers on the surface. The longer the time, the more obvious the damage effect. It is necessary to prevent it from coming into direct contact with metals in practical use.

收稿日期: 2000-00-00; 修订日期: 2000-00-00

Received: 2000-00-00; Revised: 2000-00-00

基金项目: 山东省高等学校“青创科技计划”资助项目 (2020KJA014)

Fund: “Green Innovation Science and Technology Plan” of Colleges and Universities in Shandong Province (2020KJA014)

作者简介: 张勇 (1981—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为飞机结构的腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Yong(1981—), Male, Master, associate professor, Research focus: corrosion and protection of aircraft structure.

KEY WORDS: composite; accelerated aging behavior; wet-heat effect; photooxidation aging

碳纤维增强树脂基复合材料（简称 CFRP）因具有比强度高、比模量高、耐腐蚀和耐热性能好等优点而受到航空、航天等尖端技术行业的重点关注^[1]。近年来，CFRP 在飞机上的应用越来越广泛，其与金属材料的相接也更加普遍。由于 CFRP 具有良好的阴极性质，当防护涂层失效时，将会大大增加机体结构罹患电偶腐蚀的风险。研究表明，CFRP 在高温、高湿、强紫外环境下老化较快，极大影响了 CFRP 的使用性能，继而影响机体结构的使用寿命^[2-3]。目前，关于上述环境因素对 CFRP 之力学性能影响的研究较多，而鲜见对其电化学性能影响的研究，相关机理也尚不明确。

基于此，以飞机结构中常用的 CF8611/AC531 复合材料为研究对象，通过编制 CFRP 加速老化试验环境谱，使用紫外加速老化试验机、电化学工作站等设备，开展其加速老化试验和动电位极化试验。同时，借助光学显微镜和扫描电镜（SEM）等仪器，观测 CFRP 表面的老化形貌变化规律。结合试验结果和观测结果，分析紫外辐照对 CFRP 电化学性能的影响，从电化学角度探讨其老化失效机理，为 CFRP 在飞机上的进一步安全应用和机体结构的不断轻量化打下了坚实基础。

1 CFRP 加速老化环境谱的编制

1.1 紫外加速谱

紫外辐照、温度和湿度是影响 CFRP 老化行为的三个重要因素^[4-5]。其中，紫外辐照谱的加速方法是基于紫外辐照总量相等而定的。为进一步缩短试验时间，试验过程中将试件置于接近灯管（德国原装进口的 PHILIPS UVA 紫外线灯管）位置，并认为辐照强度为 70 W/m²，那么，在实验室加速老化试验中，模拟某海域 1 a 的紫外辐照谱所需的时间为：

$$T_{\text{紫外}} = \frac{1}{2} T'_{\text{紫外}} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{Q' \times 10^6}{70 \times 3600} \right) \tag{1}$$

式中：Q'表示该海域全年紫外辐射总量。具体数值参照表 1 的某海域环境总谱。那么，模拟该海域自然暴露试验 1 a 所需的紫外辐照加速时间为 T_{紫外}，

表 1 某海域环境总谱

Tab.1 Environmental spectrum of a sea area

环境要素	作用时间/h	作用量	作用次数	时间比例/%
雨	905.4	1241.9 mm	99	10.33
潮湿空气	6727.08	—	—	76.79
紫外辐射	3015.7	5382.72 MJ/m ²	—	34.4

辐照温度为 60 ℃。

1.2 温湿度加速谱

CFRP 自然老化与金属腐蚀不同，其间并无腐蚀电流产生，因此对于温湿度谱的加速无法像金属那样通过增大腐蚀电流来实现^[4]。研究表明，湿热环境对 CFRP 的老化作用更多地体现在树脂基体的降质，即由于树脂在吸湿后的水解作用导致了材料“肉身”损伤，从而影响其使用寿命^[4]。水分在树脂基体中的吸湿扩散满足 Fick 第二定律：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial^2 h} \tag{2}$$

式中：t 为吸湿时间；h 为 CFRP 板材的厚度；c 为扩散浓度；D 为扩散系数。对式（2）进行积分有：

$$C_t = G(C_m - C_0) + C_0 \tag{3}$$

式中：C₀ 表示 CFRP 板材的初始吸湿率；C_m 表示 CFRP 板材的平衡吸湿率；G 为关于时间 t 的函数。

假设当温度和吸湿扩散率等不变时，CFRP 板材的吸湿效应仅发生于其面积较大的上下表面，而面积较小的侧面均无吸湿现象。那么，吸湿过程导致的 CFRP 板材相对质量变化可以表示为：

$$G = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\exp \left[- (2j+1)^2 \pi \left(\frac{Dt}{b^2} \right) \right]}{(2j+1)^2} \approx 1 - \exp \left[-0.73 \left(\frac{Dt}{b^2} \right)^{0.75} \right] \tag{4}$$

默认初始含水量 C₀=0，联合式（2）和式（3），则吸湿率为：

$$C_t = C_m \left\{ 1 - \exp \left[-0.73 \left(\frac{Dt}{b^2} \right)^{0.75} \right] \right\} \tag{5}$$

基于 CFRP 水分吸湿扩散初期呈线性单调递增这一试验事实，可由吸湿曲线初期数值变化率求得扩散系数：

$$D = \pi \left(\frac{b}{4C_m} \right)^2 \left(\frac{C_2 - C_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \tag{6}$$

国内外专家学者通过总结归纳大量的吸湿试验结果^[5]，得出了 CFRP 在不同湿热环境下的吸湿扩散速率，结合不同湿热环境下 CFRP 湿热效应试验（含力学性能试验），推出了加速湿热老化公式：

$$K = \frac{t_2}{t_1} = \frac{e^{\frac{-c}{\theta_2 \varphi_2}}}{e^{\frac{-c}{\theta_1 \varphi_1}}} \tag{7}$$

式中：K 为折算（加速）系数；t₁、θ₁、φ₁ 和 t₂、θ₂、φ₂ 分别表示实际和加速的暴露时间、温度和湿度；

C 为参数, 当 $\theta_2 \leq 60^\circ\text{C}$ 时, $C=46.1$ 。一般选择加速条件为温度 60°C , 相对湿度 100% 的蒸馏水浸泡法^[6-7]。根据式 (7) 可求得折算系数 K 值, 见表 1。

表 2 CFRP 试验条件对应温湿度折算系数
Tab.2 Conversion coefficient for CFRP between temperature-humidity and test conditions

Relative humidity/%	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
70	0.155	0.240	0.327	0.416
80	0.215	0.316	0.416	0.511
90	0.278	0.391	0.499	0.599
≥ 90	0.341	0.464	0.578	0.681

结合某海域温湿度谱, 当加速条件为 $\theta_2=60^\circ\text{C}$ 、 $\phi_2=100\%$ 时, 求得实验室加速老化试验模拟 1 a 的总时长为:

$$T_{\text{温湿度}} = \frac{1}{2} T'_{\text{温湿度}} \quad (8)$$

1.3 CFRP 加速老化环境谱

综上所述, 实验室加速老化试验模拟在南中国海某海域自然老化试验 1 a 需用 60°C 蒸馏水浸泡 $T_{\text{温湿度}}$ 、紫外辐照 $T_{\text{紫外}}$ 。设定程序 A 为紫外照射, 程序 B 为喷淋和冷凝 (用以模拟浸泡试验), 则可采取 A-B 循环的加速试验方法, 如图 1 所示。每 A-B 完整循环 8 次, 即相当于自然老化 1 a 时间。

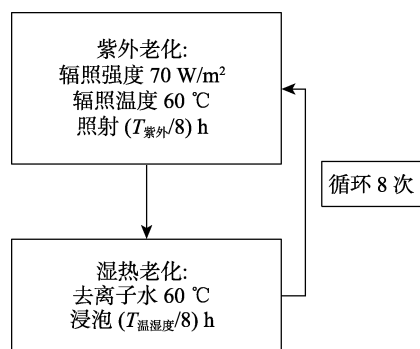


图 1 CFRP 加速老化的循环试验方案

Fig.1 Cyclic test scheme for accelerated aging of CFRP

2 试验

2.1 材料及试件

CF8611/AC531 复合材料由中国航发北京航空材料研究院最新研制, CF8611 为碳纤维增强体, 主要化学成分 (质量分数, 下同) 为: C 95~98%, N 2~5%, 碱金属 $2 \times 10^{-5}\%$ ~ $3 \times 10^{-5}\%$, 电阻率为 $9.6 \mu\Omega/\text{m}$ 。AC531 为高韧性环氧树脂基体, 板材厚度为 2 mm。CF8611/AC531 复合材料的电化学试件如图 2 所示, 制作方法参照文献[6]。预留的工作面应为原始状态, 应未受到机械损伤或密封树脂黏附。

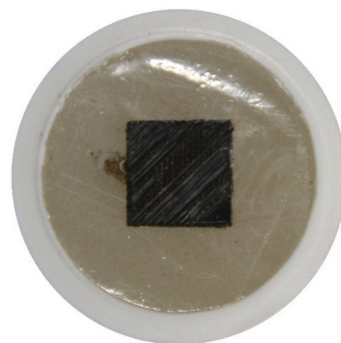


图 2 CF8611/AC531 复合材料的电化学试件

Fig.2 Electrochemical specimen of CF8611/AC531 composite

2.2 实验室加速老化

为防止强紫外等恶劣试验条件对密封树脂的密封性能产生影响^[7-8], 应在加速老化试验前对电化学试件做如下预处理: 裁剪水砂纸与 PVC 管同直径, 并根据 CFRP 的位置给出预留孔, 使用双面胶将带有预留孔的水砂纸牢牢贴在电化学试件上面, 保证 CFRP 工作面完全露出。预处理后的试件如图 3 所示。

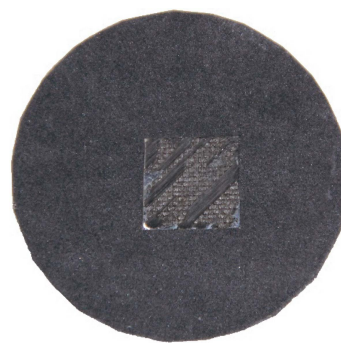


图 3 预处理后的 CFRP 电化学试件

Fig.3 Pretreated CFRP electrochemical specimen

根据第 1 节方法, 结合某海域自然环境统计数据, 确定加速环境: 温度为 60°C , 相对湿度为 100%。以 12 h 为 1 周期, 其中紫外 (波长为 340 nm, 强度为 $70 \text{ W}/\text{m}^2$) 光照 8 h, 喷淋 0.25 h, 冷凝 3.75 h, 喷淋和冷凝均使用去离子水。将预处理过的电化学试件依次放入完成参数设置的 QUV/Spray 紫外加速老化试验箱中, 按照 ASTM G154-16 中的要求进行试验。试验时长为 0、96、192、288 h 四个阶段。

2.3 微观形貌观察

在 0、96、192、288 h 的每个时间节点上, 可根据需要对 CF8611/AC531 复合材料开展微观形貌观察, 主要设备为 KH-7700 体视显微镜和 S-3400N 扫描电镜 (SEM)。使用 SEM 观察时的加速电压一般为 2 kV。

2.4 电化学测量

在上述每个时间节点上取 2~3 个试件开展电化

学测量, 主要设备为 PARSTAT 4000 电化学工作站, 采用经典三电极体系。电解液为 3.5%NaCl 溶液, 并使用 HH-2 数显水浴锅保持恒温 35 ℃。开路电位 (OCP) 的测量时长为 1800 s, 采点间隔为 10 s。动电位 (vs. Ref, 下同) 极化区间为 -0.8~0.3 V, 扫描速率为 1 mV/s。

3 结果及分析

3.1 微观形貌

CF8611/AC531 复合材料老化前和老化 288 h 后的光学显微形貌如图 4 所示。可见, 老化前, 试件表

面树脂上有模具在压制时形成的印痕, 以下称其为“交织”结构^[9], 表面虽不很平整, 但较完整, 无明显裂纹。老化 288 h 后, 试件表面原有的印痕变得模糊, 取而代之的是龟裂的树脂, 试件的局部表面已暴露出碳纤维, 而且出现了大量的蚀坑, 表明试件表面树脂已开始剥落。

为进一步了解加速老化对 CF8611/AC531 复合材料的破坏, 老化前后试件的表面及断面 SEM 显微形貌如图 5 所示。可见, 老化前, 无论是横向或纵向截面, 树脂均较为完整, 纤维与树脂结合完好; 老化后, 树脂基体上发生龟裂, 出现大量裂纹和孔洞, 部分纤维/树脂界面也出现裂纹, 导致了界面破坏。

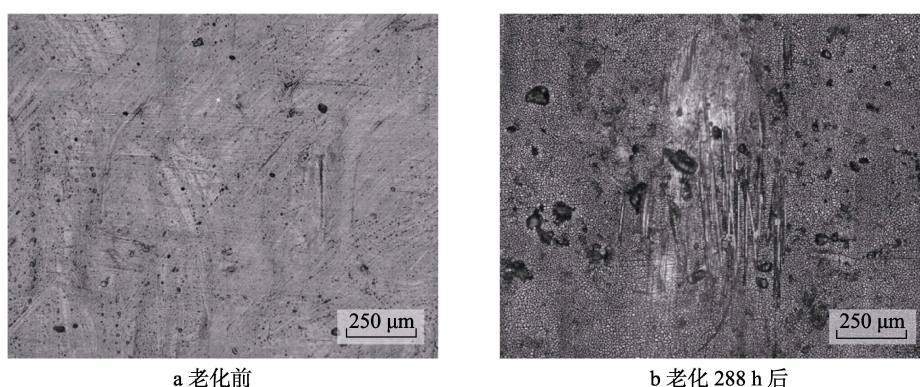


图 4 CF8611/AC531 复合材料的光学显微形貌

Fig.4 Optical microscopic morphology of CF8611/AC531 composite: a) before aging; b) after aging for 288 h

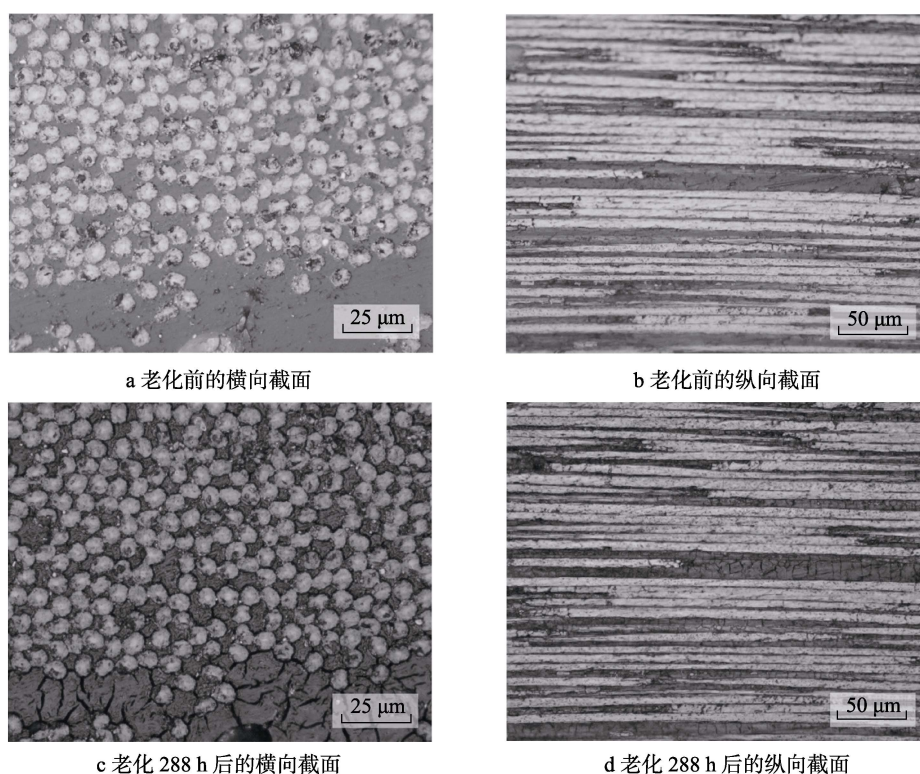


图 5 CF8611/AC531 复合材料的 SEM 显微形貌

Fig.5 SEM microstructure of CF8611/AC531 composite: a) cross section before aging; b) longitudinal section before aging; c) cross section after 288 h aging; d) longitudinal section after 288 h aging

树脂基体老化是紫外辐照与水分子综合作用的结果^[10-12]。首先,紫外灯光中的紫外线使环氧树脂基体表面薄层的化学组织发生改变,大分子链断裂,从而生成裂纹,并最终发生龟裂。随后,在喷淋和冷凝过程中,表面腐蚀产物剥落,进入溶液,露出下层的新鲜表面,在下一轮的紫外辐照中继续被腐蚀。这种循环将使树脂基体受到显著腐蚀。同时,树脂基体内吸收的水分子会促进光氧化反应,加速基体破坏。

3.2 电化学性质

不同老化时长下,CF8611/AC531 复合材料的开路电位如图 6 所示。可见,测量过程中,空白试件(老化 0 h)的 OCP 值在逐渐下降,初始值为 0.256 V,经 1800 s 后,降至 0.209 V,降幅为 0.047 V。老化 96 h 后,试件的 OCP 值微升,初始值为 0.191 V,经 1800 s 后,升高至 0.203 V,升幅为 0.012 V。在整个测量过程中,老化 192 h、288 h 试件的 OCP 值变化不大,曲线相对平稳。对不同老化时长下 CF8611/AC531 复合材料试件的 OCP 求均值,结果依次为 0.224、0.197、0.198、0.219 V,基本围绕 0.2 V 上下波动,变化幅度很小。表明实验室加速老化对该型复合材料的 OCP 影响并不明显。

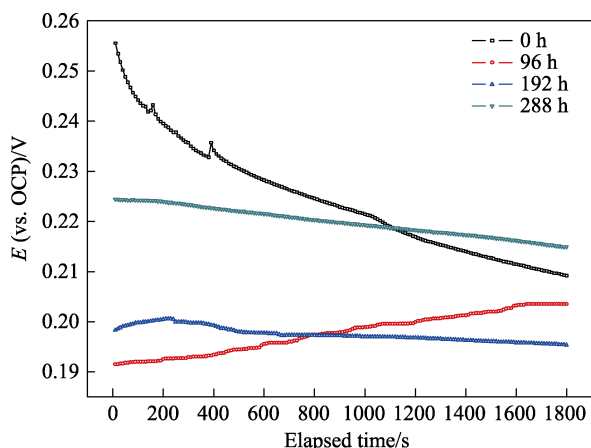


图 6 不同老化时长下 CF8611/AC531 复合材料的开路电位

Fig.6 OCP of CF8611/AC531 composite under different aging time

不同老化时长下,CF8611/AC531 复合材料的动电位极化曲线如图 7 所示。可见,在不同的老化时间下,极化曲线的形状相近,但随着老化时间的增长,曲线往右下移动。CFRP 的阴极性质良好,但曲线中仍存在明显阳极区,应是碳纤维中的 Na 杂质导致的。在由 CF8611/AC531 复合材料作为工作电极的三电极体系的极化过程中,CFRP 中的裸露碳纤维是电子导电相,渗入 CFRP 的电解质为离子导电相。电荷的转移发生在碳纤维表面,分别为吸氧反应(式(9))和析氢反应(式(10))。两种反应分别导致极化曲线中存在明显的浓差极化区和活化极化区。在浓差极化区

中,占主导地位的是吸氧反应,电流密度变化率随极化电位的降低而减小,可知溶解氧的扩散过程控制阴极的反应速率。在活化极化区中,占主导地位的是析氢反应,阴极电流密度随着极化电位的进一步升高而增大,电流密度变化率也随之逐步变大,溶解氧的扩散控制作用也随之减弱,可知活化过程控制反应速率。

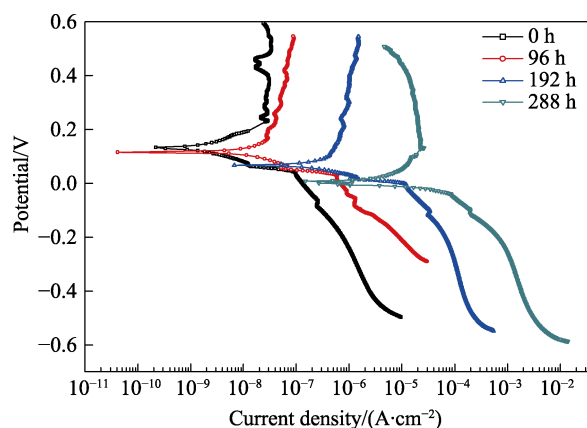


图 7 不同老化时长下 CF8611/AC531 复合材料的动电位极化曲线

Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of CF8611/AC531 composite under different aging time

使用 Cview 软件对极化曲线进行拟合,结果见表 3。其中, E_{corr} 为自腐蚀电位, J_{corr} 为自腐蚀电流密度。结合图 7 可知,随着加速老化时间的增加,曲线整体向右下方移动, J_{corr} 明显变大。在老化 288 h 后,相比 0 h 时, J_{corr} 增长高达 1621 倍, E_{corr} 略微变小,降低 0.0326 V。这表明加速老化导致 CF8611/AC531 复合材料表面还原反应增强,电化学活性增加。CFRP 的表面为绝缘树脂层,对发生在表面的电子交换过程起阻碍作用。在紫外老化的过程中,包裹碳纤维的树脂不断老化脱落,导致碳纤维裸露。图 4 和图 5 表明,老化时间越长,树脂老化脱落导致裸露程度越高,具有极高电导率的碳纤维为极化反应中的电子交换过程提供了充足的场地, O_2 由电解质运送到阴极,因此被离子化的速率越快。

表 3 拟合极化曲线得到的电化学参数

Tab.3 Electrochemical parameters obtained by fitting polarization curves

Specimen	Ultraviolet irradiation time/h	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	E_{corr}/V
1	0	9.81×10^{-9}	0.1187
2	96	7.27×10^{-8}	0.1063
3	192	8.72×10^{-7}	0.0954
4	288	1.59×10^{-5}	0.0861

4 结论

1) 以湿热效应、光氧化对 CFRP 的等量和等

效损伤为原则,确定了 CFRP 实验室加速老化环境谱的编制方法。以南中国海某海域的光照谱和湿热谱为基础,编制了加速老化环境谱,并给出了加速试验方案。

2) 依据加速试验方案,开展了 CF8611/AC531 复合材料的实验室加速老化试验,并对其微观形貌进行了观察。初始状态的 CFRP 表面完整无裂纹,碳纤维/树脂界面结合良好;经老化后,树脂基体上龟裂,出现裂纹和孔洞,纤维/树脂界面也遭到裂纹破坏。老化时间越长,破坏作用也就越明显。

3) CF8611/AC531 复合材料的开路电位在老化过程中无明显变化。极化曲线存在浓差极化区和活化极化区,二者分别由吸氧反应和析氢反应所致,曲线随老化时间逐渐向右下方移动,原因是老化导致其表面碳纤维裸露面积不断增大。其中,自腐蚀电位轻微降低,降幅为 0.0326 V。自腐蚀电流密度增长显著,老化 288 h 后,增长了近 1621 倍。因此,实际使用中应防止其与金属直接接触。

参考文献:

- [1] 陈跃良,王安东,卞贵学,等. 海洋环境下 G827/3234 复合材料老化机制及当量加速关系[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3304-3312.
CHEN Yue-liang, WANG An-dong, BIAN Gui-xue, et al. Aging Mechanism and Equivalent Acceleration Relationship of G827/3234 Composite in the Marine Environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3304-3312.
- [2] 袁应立,王继辉. 两种玻璃纤维增强复合材料体系的湿热老化研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 79-84.
YUAN Ying-li, WANG Ji-hui. Study on Hydrothermal Aging of Two Kinds of Glass Fiber Reinforced Composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(10): 79-84.
- [3] 黄志超,何俊华,冯佳. 玻璃纤维增强树脂基复合材料 碾铆-粘接接头老化和腐蚀性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(11): 51-56.
HUANG Zhi-chao, HE Jun-hua, FENG Jia. Aging and Corrosion Property of GFRP with Rolling Riveting and Bonding Joints[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(11): 51-56.
- [4] 卞贵学,王安东,张勇,等. 直升机复合材料环境谱及加速谱编制研究[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(2): 73-77.
BIAN Gui-xue, WANG An-dong, ZHANG Yong, et al. Study on Compilation of Environment Spectrum and Acceleration Spectrum for Composite of a Helicopter[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(2): 73-77.
- [5] 刘治国,贾明明,王晓刚,等. 某型复合材料加速腐蚀与大气腐蚀当量关系分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 66-69.
LIU Zhi-guo, JIA Ming-ming, WANG Xiao-gang, et al. Equivalent Relation between Accelerated Corrosion and Atmospheric Corrosion of Composite Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(1): 66-69.
- [6] 乔琨,朱波,高学平,等. 紫外老化对碳纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(21): 2989-2992.
QIAO Kun, ZHU Bo, GAO Xue-ping, et al. Influence of Artificial Accelerating UV Aging on Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(21): 2989-2992.
- [7] 王国建,孙耀宁,蒋万乐. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料在温湿和紫外辐照环境中的老化行为[J]. 机械工程材料, 2018, 42(9): 15-19.
WANG Guo-jian, SUN Yao-ning, JIANG Wan-le. Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite in Warm-Wet and Ultraviolet Irradiation Environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(9): 15-19.
- [8] 陈跃良,王安东,卞贵学,等. CF8611/AC531 复合材料的电化学特性及其与 7B04-T74 铝合金的电偶腐蚀仿真[J]. 材料导报, 2018, 32(16): 184-191.
CHEN Yue-liang, WANG An-dong, BIAN Gui-xue, et al. Electrochemical Characteristic of CF8611/AC531 Composite and the Galvanic Corrosion Simulation when Coupled with 7B04-T74 Aluminum Alloy[J]. Materials Review, 2018, 32(16): 184-191.
- [9] 郭健,张天翼. 海军航空器用树脂基复合材料海洋环境老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 102-108.
GUO Jian, ZHANG Tian-yi. Research Overview on Aging Behaviours of Resin Matrix Composites for Naval Aircrafts in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 102-108.
- [10] 许燕杰,肇研,汤冰洁,等. UVA 紫外辐射对室内碳纤维增强环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 63-69.
XU Yan-jie, ZHAO Yan, TANG Bing-jie, et al. Effects of UVA Irradiation on Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites Indoor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 63-69.
- [11] 张婷. 复合材料的耐腐蚀、耐老化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
ZHANG Ting. The Study on the Corrosion Resistance and Aging of the Composite Material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [12] 杨曙兰,刘伟庆,方园. 复合材料型材在紫外-凝露和自然环境下老化机制[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 101-107.
YANG Shu-lan, LIU Wei-qing, FANG Yuan. Ageing Mechanism of Composite Pultruded Profiles in UV-condensation and Nature Ageing Environments[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2017, 39(5): 101-107.
- [13] 尚琪冬,侯锐钢,姚楠. 不同纤维织物/乙烯基酯复合材料的湿热老化[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(5): 762-767.
SHANG Qi-dong, HOU Rui-gang, YAO Nan. Hydrothermal Ageing of Different Fiber Fabrics/Vinylester Composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(5): 762-767.