

不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究

刘成臣¹, 王浩伟¹, 杨晓华²

(1. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035; 2. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 自然环境加速试验是飞机结构日历寿命评定的重要方法, 加速环境谱的编制则是开展加速试验的前提。以某海域海洋大气环境谱为基础, 选取了金属裸材、复合材料裸材、带涂层结构三种飞机常用材料为研究对象, 针对不同材料腐蚀机理的差别, 给出了不同材料加速环境试验模块参数的确定方法及加速环境谱与服役环境的当量关系, 编制了分别适合金属裸材、复合材料、带涂层结构的典型海洋大气环境加速环境谱。

关键词: 金属; 复合材料; 涂层; 环境谱; 当量; 加速

中图分类号: V216.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)02-0018-07

Study of Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Different Materials in Marine Atmospheric Environment

LIU Cheng-chen¹, WANG Hao-wei¹, YANG Xiao-hua²

(1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

Abstract: Accelerated testing of natural environment is an important method of aircraft structure calendar life assessment. Accelerated environment spectrum is the key to carry out the accelerated test. Bare metal, composites, and structure with coating were selected as the research objects. According to the differences of corrosion mechanism, different testing module parameters and equivalent were determined. Atmospheric environment spectrums were established for metal, composites, and coating respectively.

Key words: metal; composite; coating; environment spectrum; equivalent; accelerated

海军飞机不同于陆基飞机, 其服役环境相对恶劣, 如护航直升机在护航期间一直处于高温、高湿、高盐分的海洋环境下; 部分结构遭受盐雾、飞溅海水以及干/湿交替循环侵蚀, 腐蚀问题非常严重, 极大地影响了飞机的结构寿命^[1-2]。由于自然老化试

验周期太长, 为快速确定自然环境对飞机结构的腐蚀影响, 需建立自然环境谱与实验室加速环境谱的当量关系^[3-4], 从而在较短时间内获得飞机材料、防护体系在飞机停放环境下的腐蚀损伤规律。由于不同的结构/材料对环境的敏感性不同, 需建立相

收稿日期: 2012-11-15

作者简介: 刘成臣(1985—), 男, 湖北钟祥人, 工程师, 硕士, 主要从事飞机结构腐蚀防护和控制工作。

对应的加速环境谱分析其在典型海洋环境下的腐蚀规律。为此,笔者综合分析了某典型海洋大气环境,建立了针对飞机常用结构/材料和涂层体系的加速环境谱,为实现飞机结构日历寿命评定工程化提供了背景数据。

1 某海域环境谱

表1、表2为海军航空工程学院通过卫星反演技术获得的某海域14年间的年均温湿度谱。实测数

表1 某海域年均温-湿度谱

Table 1 Average annual temperature-humidity spectrum in certain sea area

温度/ ℃	不同湿度的作用时间比						
	< 65%	65%~70%	70%~75%	75%~80%	80%~85%	85%~90%	> 90%
< 20	3.11876×10^{-4}	4.4712×10^{-6}	7.3455×10^{-6}	3.0340×10^{-6}	0	0	0
20~25	0.04370	0.02431	0.015205	0.005141	0.00166	3.3869×10^{-4}	2.2356×10^{-5}
25~30	0.150724	0.108339	0.116751	0.068655	0.026509	0.005392	8.3499×10^{-4}
30~35	0.25691	0.063212	0.043885	0.0165678	0.003848	4.6691×10^{-4}	3.8803×10^{-5}
35~40	0.0471531	1.6288×10^{-5}	0	0	0	0	0
> 40	1.5969×10^{-5}	0	0	0	0	0	0

表2 某海域年均盐雾谱

Table 2 Average annual salt fog spectrum in certain sea area

温度/℃	20~25	25~30	30~35	35~40	>40
作用时间/%	2.2356×10^{-5}	8.3499×10^{-4}	3.8803×10^{-5}	0	0

据显示该海域年均太阳总辐射量为 $Q=4687 \text{ MJ/m}^2$, 其中紫外线含量为 6.53%, 故紫外辐射量为 $Q_{\text{uv}}=306 \text{ MJ/m}^2$, 据统计飞机结构表面温度低于大气温度、相对湿度 $\geq 65\%$ 时, 在达到结构露点温度差的条件下, 结构的表面会产生凝露。据某海域实测统计, 每天在飞机结构表面有 5~6 h 空气湿润程度达到饱和状态, 由此可假设每次凝露从形成开始在飞机表面停留的作用时间为 5.5 h。根据中国兵器工业第五九研究所在埃及贝尔贝斯空军飞行学院的检测结果, 该海域年均发生凝露的次数为 320 次。

2 加速环境谱的编制原则

飞机加速环境谱的编制应遵循以下两个原则:

1) 加速环境谱中环境模块的选取应考虑不同材料对环境要素敏感性的差别, 以保证实验室加速腐蚀试验结果与自然环境引起的腐蚀损伤在形式及特征上具有可比性; 2) 实验室加速环境谱的环境模块应视情

进行简化, 以便缩短实际环境下腐蚀历程的时间, 使加速腐蚀试验周期和费用减少到可接受的范围。

3 加速环境谱的编制

考虑材料和表面状态对腐蚀效应敏感性的差异, 共建立金属裸材、复合材料裸材和涂层三类试验环境谱, 金属材料又分铝合金和钢两种。

3.1 金属裸材加速环境谱

3.1.1 环境要素的筛选

1) 湿热。湿热对金属的腐蚀具有重大的影响, 铝合金和合金钢对应的相对湿度临界值为 65%, 当相对湿度达到临界值时腐蚀速率突然增加。其中, 当相对湿度 $< 65\%$ 时可视为干燥空气环境, 在加速环境谱中可忽略。

2) 凝露。结构表面产生凝露时, 会形成水膜, 水膜的覆盖会使金属表面产生电化学腐蚀, 若凝露中含有一定浓度的 H^+ , 将加速电化学腐蚀。雨水的作用类似凝露。

3) 盐雾。盐雾中的 Cl^- 是强侵蚀性离子, 促使金属产生电化学腐蚀。

综合以上分析, 金属裸材的腐蚀主要是电化学腐蚀, 使金属产生电化学腐蚀的主要环境要素有温

湿度、凝露、雨水和盐雾。

3.1.2 加速环境谱参数的确定

通过某海域腐蚀环境因素分析,采用下述周期浸润方法进行循环加速试验。

1) 腐蚀溶液:5% (质量分数,后同)NaCl 溶液,加少量稀 H₂SO₄,使 pH 为 4~4.5;温度 $\theta=(40 \pm 2)^\circ\text{C}$, $RH=95\% \pm 5\%$;

2) 用烘烤灯照射试件,调节烘烤灯照射强度,使试件在临近浸入溶液前被烘干。

加速环境谱如图 1 所示。其中 $t_{\text{泡}}$ 为在腐蚀溶液中的浸泡时间; $t_{\text{烘}}$ 为在溶液外烘干时间。

3.1.3 当量折算法

当量折算法是工程上常用的利用金属腐蚀电流来建立加速关系的方法,实施步骤如下^[5]:

1) 将使用环境谱的作用时间折算为 $\theta=40^\circ\text{C}$, $RH=90\%$ 的标准潮湿空气的作用小时数 t_1 ,铝合金和合金钢材料在不同潮湿空气下对应的折算系数见表 3;

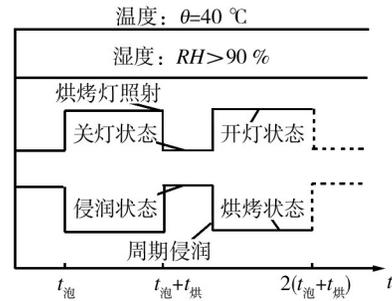


图 1 金属裸材加速环境谱

Fig. 1 Accelerated environment spectrum of bare metal

2) 将加速环境谱作用时间折算为水介质的作用小时数 t_2 ,铝合金和合金钢在不同浓度 NaCl 溶液中、不同浓度酸性溶液中与水介质的当量折算系数分别见表 4,5;

3) t_1/t_2 为当量加速关系 α ,即加速环境谱作用 α 个循环周期相当于使用环境谱的 1 个周期。

对于加速环境谱中采用酸性溶液应结合表 4,5

表 3 潮湿空气与标准潮湿空气的折算系数

Table 3 Conversion coefficient between damp air and standard damp air

材料	相对湿度/%	温度/°C				
		20	25	30	35	40
铝合金	70	0.1638	0.2444	0.3250	0.6252	0.9255
	80	0.1670	0.2905	0.4260	0.7317	1.0375
	90	0.1104	0.2070	0.2999	0.6499	1.0000
合金钢	70	0.0983	0.1454	0.1707	0.2414	0.5521
	80	0.0893	0.1005	0.3160	0.4236	0.7304
	90	0.0583	0.2291	0.4064	0.7095	1.0000

表 4 不同浓度 NaCl 溶液与水介质的折算系数

Table 4 Conversion coefficient of NaCl solution to water

NaCl 质量分数/%	铝合金	合金钢
0.35	0.643	0.558
0.50	0.612	0.485
1.72	0.335	0.417
3.5	0.121	0.320
7.0	0.0969	0.310

表 5 不同浓度酸与水介质的折算系数

Table 5 Conversion coefficient of acid solution to water

材料	酸的质量浓度/(mg·L ⁻¹)	HNO ₃	HCl	H ₂ SO ₄
铝合金	0.1	0.267	0.454	0.635
	1.0	0.318	0.235	0.348
	2.0	0.353	0.110	0.302
合金钢	0.1	0.571	—	—
	1.0	0.467	0.368	0.467
	2.0	0.233	0.292	0.233

综合折算。综合折算系数 β 为:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \quad (1)$$

式中: β_1, β_2 分别为 NaCl 和酸的浓度对水的折算系数。

3.1.4 某海域环境谱与标准潮湿空气的当量折算

3.1.4.1 温湿度作用时间折算

根据表1中的环境因子和表3的折算系数,计算年均潮湿空气相当于 $\theta=40\text{ }^\circ\text{C}$ (低于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时一律按 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 计算), $RH=90\%$ 的标准潮湿空气的作用小时数:

$$t_{1\text{铝合金}}=2293\text{ h}$$

$$t_{1\text{钢}}=1397\text{ h}$$

3.1.4.2 盐雾作用时间折算

盐雾的作用过程可等效为相对湿度大于90%的潮湿空气,根据表2中的环境和表3的折算系数,计算每年的盐雾作用时间相当于标准潮湿空气的作用小时数:

$$t_{2\text{铝合金}}=5.76\text{ h}$$

$$t_{2\text{钢}}=7.494\text{ h}$$

3.1.4.3 凝露作用时间折算

凝露每次作用5.5 h,每年320次,平均温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。凝露折算到 $\theta=40\text{ }^\circ\text{C}$, $RH=90\%$ 环境下的作用时间为:

$$t_{3\text{铝合金}}=355.2\text{ h}$$

$$t_{3\text{钢}}=393.3\text{ h}$$

3.1.5 周期浸润加速环境谱与标准潮湿空气的当量折算

由于加速环境谱周期浸润的温度是 $40\text{ }^\circ\text{C}$,与标准潮湿空气的温度是相同的,因此,周期浸润加速环境谱与标准空气的当量折算中只考虑环境对水介质的折算。

由表4可知,采用插值法可得5% NaCl相对水介质的折算系数 $\alpha_{1\text{钢}}=0.1066$; $\alpha_{1\text{铝}}=0.314$ 。

由表5可知, $\text{pH}=4$ 的稀硫酸对应的折算系数 $\alpha_{2\text{钢}}=0.2732$; $\alpha_{2\text{铝}}=0.152$ 。

在烘干过程中,可认为试件表面仍保留着溶液介质,利用式(1)计算得到铝合金和合金钢的综合折算系数 $\beta_{\text{钢}}=0.07668$, $\beta_{\text{铝}}=0.10287$ 。

加速环境谱中溶液外的高温高湿的烘烤模拟自然环境谱中温湿度作用,溶液浸泡模拟使用环境谱中雨雾和凝露作用,因此,烘烤时间由温湿度作用时间折算,溶液浸泡时间由雨雾和凝露作用时间折算。由于雨雾作用时间短,按每月1次计算,每年可作为12次干湿交替,凝露每年发生320次,因此,1 a时间对应的加速环境谱中干湿交替次数为 $(320+12)=332$ 次。另外温湿度环境数据统计中包含了凝

露和雨雾环境下的时间统计,折合烘烤时间应将此部分去除。

单个循环周期内铝合金材料烘烤时间 $t_{\text{铝烘}}$ 为 27.435 min ,取整为 28 min 。

单个循环周期内铝合金材料浸泡时间 $t_{\text{铝泡}}$ 为 5.126 min ,取整为 6 min 。

单个循环周期内合金钢材料烘烤时间 $t_{\text{钢烘}}$ 为 18.98 min ,取整为 19 min 。

单个循环周期内铝合金材料浸泡时间 $t_{\text{钢泡}}$ 为 7.635 min ,取整为 8 min 。

因此,铝合金裸材试件的加速环境谱见图2。

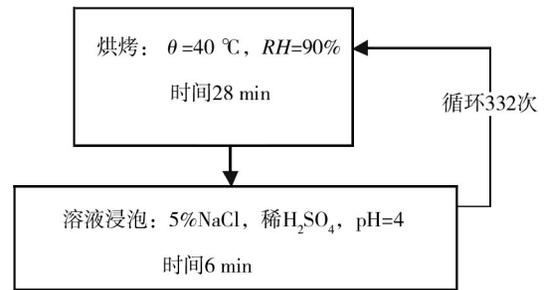


图2 铝合金裸材加速环境谱

Fig. 2 Accelerated environment spectrum of aluminum alloy

合金钢裸材试件的加速环境谱见图3。

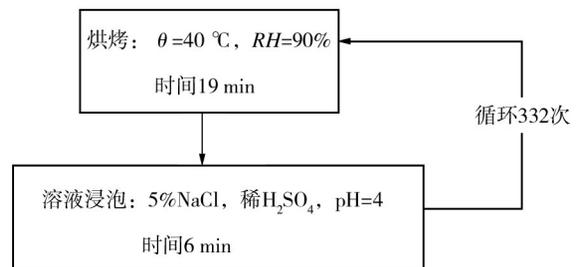


图3 钢裸材加速环境谱

Fig. 3 Accelerated environment spectrum of steel

3.1.6 周期浸润加速环境谱当量结果

周期浸润加速环境谱的当量关系可由图2和3计算得出,铝合金每次循环时间为 34 min ,其中烘烤 28 min ,浸泡 6 min ,每次循环相当于经历1次干湿交替,332次循环可模拟在某海域环境服役1 a,总循环时间约 188.1 h 。同理可推出合金钢在环境谱下作用 149.4 h 相当于在某海域环境服役1 a。

3.2 复合材料裸材加速环境谱

3.2.1 加速环境谱构成

由于影响复合材料老化的因素众多,并且其老化不是基于电化学反应,故适合于金属基材的当量折算法不再适合于复合材料的加速环境谱编制。根据自然环境下复合材料的失效形式和机理分析可知,影响复合材料老化主要有湿度、温度和光照这三个环境因素^[6-8]。为了研究温度和湿度对复合材料老化的影响,通常进行湿热加速老化试验。为了考虑光照对复合材料的老化影响,采用紫外照射试验加速老化。

3.2.2 加速环境谱条件确定

1) 温湿老化试验环境条件。由于聚合物高分子的质量下降主要因其吸湿后的水解作用,根据加速老化原则和加速原理应选择高温、高湿环境。结合以往研究成果,选择湿热加速老化环境:温度 $\theta = 60\text{ }^\circ\text{C}$; 溶液为蒸馏水; 试验设备为 H1200C 温湿交变试验箱。

2) 紫外照射试验环境条件。紫外线照射试验采用 UR2600 紫外老化试验箱,试验箱中紫外线辐射强度为 60 W/m^2 , 温度为 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 。根据某海域日照情况及其紫外线年辐射量即可得到紫外照射加速试验的时间。

3.2.3 加速试验环境当量计算方法

3.2.3.1 湿热老化试验

根据不同湿热环境下的吸湿扩散速率或不同湿热环境下的湿热效应试验给出加速吸湿(老化)的经验工程公式^[9]来计算折算系数,即:

$$K = \frac{t_2}{t_1} = \frac{e^{-C/(\theta_1\varphi_1)}}{e^{-C/(\theta_2\varphi_2)}} \quad (2)$$

式中: K 为时间折算系数; $\theta_1\varphi_1$ 为实际暴露的温度和湿度; $\theta_2\varphi_2$ 为加速试验的温度和湿度; $\theta_2 \leq 60\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $C=46.1$ 。

试验采用 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸馏水浸泡,可认为 θ_2 为 $60\text{ }^\circ\text{C}$, φ_2 为 100% , 可获不同温湿度下的折算系数,见表 6。

根据表 1 的数据和表 6 中的折算系数,将不同温度和湿度的作用时间等效为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸馏水浸泡的时间,见表 2。

1 年中, θ 分别为 $25, 30, 35, 40\text{ }^\circ\text{C}$ 时对应的浸泡时间 $t_1=72.2\text{ h}, t_2=804\text{ h}, t_3=400\text{ h}, t_4=0.6\text{ h}$ 。

表 6 不同温-湿度与加速试验的折算系数

Table 6 Conversion coefficient between different temperature-humidity and the accelerated test

RH/%	温度/ $^\circ\text{C}$			
	25	30	35	40
70	0.1547	0.24	0.3274	0.4155
75	0.1845	0.2780	0.3724	0.4638
80	0.2150	0.3158	0.4156	0.5105
85	0.2466	0.3536	0.4578	0.5557
90	0.2780	0.3910	0.4989	0.5991
>90	0.3410	0.4638	0.5776	0.681

浸泡时间 $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 1276.8\text{ h}$

3.2.3.2 紫外照射试验

1 个周期紫外作用时间取决于紫外试验箱中试验件表面上的紫外辐射强度和外场真实环境中 1 个暴露周期接受的紫外辐射量。当试验箱紫外线辐射强度为 60 W/m^2 , 外场真实环境的暴露周期平均紫外辐射量为 Q'_z 时, 每个试验周期所需的紫外线照射时间为:

$$t = \frac{Q'_z \times 10^6}{(60 \times 3600)} \quad (3)$$

某海域年均紫外总辐射量为 306 MJ/m^2 , 可得:

$$t = \frac{Q'_z \times 10^6}{(60 \times 3600)} = 1417\text{ h}$$

即紫外照射子试验作用时间为 1417 h 。

3.2.4 加速试验环境当量结果

复合材料裸材的加速环境谱如图 4 所示。由于每个模块试验时间较长,为便于开展试验及观测,在每个试验模块时间上都乘以了 $0.083\ 33$ (即 $1/12$) 的因子,故加速环境谱 12 个循环相当于在某海域服役 1 a 。

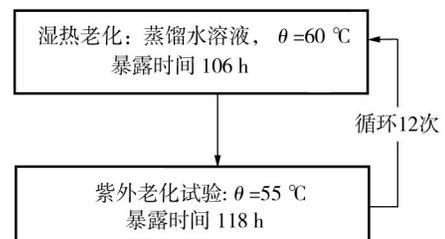


图 4 复合材料加速环境谱

Fig. 4 Accelerated test environment spectrum of composite materials

3.3 涂层试样加速环境谱

3.3.1 加速环境谱构成

针对某海域服役环境特点,同时借鉴 CASS 谱基本构成,对涂层失效产生影响的主要环境因素有海洋大气环境中的盐雾、高温高湿环境以及阳光中的紫外线,故其加速环境谱由三个谱块构成,即温湿暴露试验、紫外照射试验和盐雾试验。

3.3.2 加速环境谱参数确定

3.3.2.1 温湿暴露试验环境条件

湿热环境基本取决于气候条件。由于某海域其温度、湿度环境与美国舰载机服役的海洋环境类似,故采用美国舰载机的加速环境谱中温湿度谱块的试验条件,即:温度为 43 °C,相对湿度为 95%~100%,试验设备为 H1200C 温湿交变试验箱。

3.3.2.2 紫外照射试验环境条件

紫外线照射试验采用 UR2600 紫外老化试验箱,试验箱中紫外线辐射强度:60 W/m²;根据某海域日照情况及其紫外线年辐射量即可得到紫外照射加速试验的时间。

3.3.2.3 盐雾试验环境条件

参考 CASS 谱盐雾试验条件,结合我国某型机服役使用环境特点将盐雾试验调整为酸性盐雾,模拟某海域环境下酸雨、废气和雾等环境条件。其环境参数如下:盐雾溶液为 5%NaCl 酸性(pH 为 3.5~4.5)溶液,pH 值由加入 H₂SO₄量控制;温度 $\theta=35$ °C;试验设备为 DCTD1200P 盐雾腐蚀试验箱。

3.3.3 加速试验环境当量计算方法

1) 温湿暴露试验。参考 CASS 谱湿热暴露时间(CASS 谱湿热试验 7 d 相当于自然环境老化 1 a),确定温湿加速试验时间为 7 d。

2) 紫外照射试验。紫外照射时间的计算与 3.2.3.2 节相同,为 1417 h。

3) 盐雾试验环境条件。根据表 2 统计的自然环境盐雾谱可以看出,盐雾总作用时间很短,可以忽略盐雾对涂层结构的影响,因此实验室加速环境谱取消盐雾谱块。

3.3.4 加速试验环境当量结果

加速环境谱如图 5 所示。在每个试验模块时间上都乘以了 1/12 的因子,故加速环境谱 1 个循环相当于飞机在某海域服役 1 个月,12 个循环相当于 1 a。

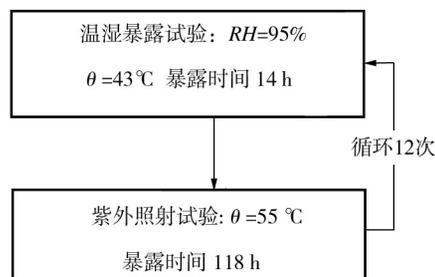


图5 涂层加速环境谱

Fig. 5 The accelerated test environment spectrum of coating

4 结论

1) 金属裸材在海洋大气环境的加速腐蚀可选用“周期浸润”单个环境块模拟;复合材料在海洋大气环境的加速腐蚀可选用“紫外照射”和“湿热老化”两个环境块模拟;涂层试样在海洋大气环境的加速腐蚀可选用“紫外照射”、“湿热暴露”两个环境块模拟,并依据环境数据确定各模块作用时间。

2) 针对不同材料腐蚀机理不同建立了加速环境谱与典型海洋大气环境谱的当量加速关系,其方法简便、可行。

3) 文中确定的海洋大气当量加速环境谱及当量关系可用于飞机(尤其是海军飞机/舰载飞机)的结构选材和防护体系、腐蚀关键结构日历寿命试验研究与验证、设计与评定。

参考文献:

- [1] 穆志韬,曾本银,金平,等.直升机结构疲劳[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 郭敏骁,封志华,徐伟,等.环境因素与飞机结构寿命[J].装备环境工程,2004,1(2):73—77.
- [3] 刘元海,任三元.典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J].装备环境工程,2011,8(1):48—52
- [4] 杨晓华,金平.飞机使用环境谱的编制[J].装备环境工程,2010,7(6):99—102
- [5] 刘文珽,李玉海.飞机结构日历寿命体系评定技术[M].北京:航空科学出版社,2004.
- [6] 刘海燕,李喜明,王红斌.航空有机玻璃加速老化试验技术研究[J].装备环境工程,2011,8(6):83—86.
- [7] 许凤和,李晓骏,陈新文.复合材料老化寿命预测技术中大气环境当量的确定[J].复合材料学报,2001,18(2):

93—96.

术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

- [8] 陈跃良,刘旭. 环境作用下的聚合物基复合材料性能研究进展及主要问题[J]. 飞机设计,2010,30(4):49—56.
- [9] 刘文琰,贺小帆. 飞机结构腐蚀/老化控制与日历延寿技

(上接第3页)

通过对以上腐蚀数据的回归处理,建立了铜及铜镍合金腐蚀规律数学模型,各合金的腐蚀速率与时间关系及其相应的置信度见表3。表3中,A为腐

蚀速率($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), t 为试验暴露时间(d)。

根据建立的关系式外推,预测3种材料在厦门试验站3个区带的腐蚀条件下第16年的腐蚀速率见表3。

表3 材料腐蚀速率与时间关系

Table 3 Relation between corrosion rates and time for TUP, B10 and B30

材质	腐蚀规律	置信度	第16年腐蚀速率预测/ $(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$
TUP纯铜(全浸)	$A=13.9t^{-4.605}+6.2$	0.993	6.20
TUP纯铜(潮差)	$A=12.34t^{-1.01}+5.24$	0.989	5.99
TUP纯铜(飞溅)	$A=1.93t^{-0.289}+1.83$	0.996	2.70
B10(全浸)	$A=8.25t^{-0.634}+0.90$	0.935	2.32
B10(潮差)	$A=3.68t^{-0.956}+1.67$	0.997	1.93
B10(飞溅)	$A=1.749t^{-1.02}+2.35$	0.984	2.63
B30(全浸)	$A=14t^{-0.893}+0.91$	0.962	2.09
B30(潮差)	$A=3.89t^{-0.916}+1.09$	0.980	1.40
B30(飞溅)	$A=5.3t^{-0.233}$	0.919	2.86

3 结论

1) 铜及铜镍合金在厦门海域海洋环境中以均匀腐蚀为主。随暴露时间增加,平均腐蚀速率降低,全浸区下降速度最快,潮差区居中,飞溅区较慢。

2) TUP纯铜潮差区的腐蚀速率最大,全浸区居中,而飞溅区的腐蚀速率最小; B10全浸区的腐蚀速率最大,潮差区与飞溅区腐蚀速率相近; B30飞溅区的腐蚀在2 a内最轻,4 a后开始转为最重,全浸区比潮差区腐蚀速率大。

3) 在全浸区和潮差区,TUP纯铜腐蚀最为严重, B10腐蚀速率在2 a内比B30小,之后则比B30略大; 飞溅区B30腐蚀速率最大,TUP纯铜则较小且较为稳定。

4) 对腐蚀数据回归处理后,发现3种材质的腐蚀符合幂函数规律,并对第16年的腐蚀情况做了预测。

参考文献:

- [1] SCHUMACHER M. Seawater Corrosion Handbook[M]. New Jersey: Park Ridge, 1979: 89.
- [2] GLOVER T J. Copper-nickel Alloy for the Construction of Ship and Boat Hulls[J]. British Corrosion Journal, 1982, 17(4): 155.
- [3] LIN Le-yun, LIU Shao-feng, LIU Zeng-cai. Surface and Interface Characteristics of Cu-Ni Alloy Corroded in Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999, 11(1): 37—43.
- [4] ODNEVAILL Hew, NDERI Wall, LEYGREF C A. Laboratory Study of Copper and Zinc Runoff during First Flush and Steady-state Condition[J]. Corrosion Science, 2001, 43(1): 127—146.
- [5] PEHKONEN S O, PALIT A, ZHANG X. Effect of Specific Water Quality Parameters on Copper Corrosion[J]. Corrosion, 2002, 58(2): 156—165.
- [6] EFIRD K D. Potential-pH Diagrams for 90-10 and 70-30 Cu-Ni in Seawater[J]. Corrosion, 1975, 31(3): 77.