

典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究

刘元海, 任三元

(中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

摘要:以典型海洋大气环境谱为基础,采用当量折算法,给出了各环境块参数的确定方法及加速谱与外场暴露环境的当量关系,编制了由紫外照射和周期浸润2个环境块构成的典型海洋大气环境加速试验环境谱。该谱的提出为水上飞机/水陆两栖飞机的选材和结构日历寿命评定提供了重要依据。

关键词:海洋大气环境;环境谱;当量;加速

中图分类号: TB304 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0048-05

Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere

LIU Yuan-hai, REN San-yuan

(China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

Abstract: An accelerated corrosion environment spectrum was presented by using of equivalent conversion method based on typical marine atmospheric environment spectrum. The spectrum was composed of ultraviolet radiation and periodic soakage. The determination method of the parameters of every process and the equivalent relation between the accelerated spectrum and the actual use environment were presented. The purpose was to provide foundation for material selection and calendar life evaluation of floatplane and amphibian.

Key words: marine atmospheric environment; environment spectrum; equivalent; acceleration

目前,我军大多数机种的年均飞行强度仅为日历时间年的1%~3%,飞机在地面停放时间一般占到服役时间的97%以上,地面停放环境是导致飞机结构腐蚀损伤的主要因素。飞机地面停放环境谱描述了飞机在整个日历寿命期间停放所经历的真实自然

环境历程,采用该环境谱来开展飞机结构服役环境的腐蚀试验,在时间、经费和技术条件上都是难以实现的。为正确确定真实自然环境对飞机结构的腐蚀影响,需建立地面停放环境谱与实验室加速环境谱的当量关系,从而在较短时间内获得飞机材料、结

收稿日期: 2010-07-28

作者简介: 刘元海(1981—),男,湖北黄石人,工程师,主要从事飞机结构腐蚀防护和控制工作。

构、防护体系在真实地面停放环境下飞机的腐蚀损伤规律,为实现飞机结构日历寿命评定工程化提供背景数据与设计输入^[1]。

1 加速环境谱的当量原则

飞机地面停放环境谱当量为地面停放加速试验环境谱,应遵循以下2个原则:

- 1) 实验室加速试验环境谱对飞机材料、结构、防护体系的腐蚀效应与飞机的真实服役环境所造成的腐蚀效应相当;
- 2) 当量腐蚀环境加速谱应尽量简化,以保证试验环境易于实现。

2 当量折算实施方法^[2-3]

工程上通常是测定不同温度、湿度下典型金属材料腐蚀电流来建立不同组合对应的当量折算系数。对应折算系数 α_1 见表1,同时测量不同浓度的盐、酸溶液与水介质下的腐蚀电流,建立当量折算系数,对应折算系数 α_2 , α_3 见表2和表3。

当量折算法的实施步骤如下:

- 1) 编制地面停放环境谱,选定加速试验环境谱;
- 2) 将每年地面环境谱的作用时间折算为 $\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, RH为90%的标准潮湿空气的作用时间 t_1 ;
- 3) 将每小时加速试验环境谱的作用时间折算为 $\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, RH为90%的标准潮湿空气的作用时间 t_2 ;
- 4) t_1/t_2 为当量加速关系 β ,即加速试验环境谱作用 β 相当于实际环境中使用1 a。

表1 潮湿空气与标准潮湿空气的折算系数

Table 1 Conversion coefficient between moist air and standard moist air

材 料	相对湿度/%	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
		20	25	30	35	40
铝 合 金	70	0.163 80	0.244 40	0.325 00	0.625 26	0.925 52
	80	0.167 07	0.290 53	0.426 00	0.731 77	1.037 53
	90	0.110 45	0.207 00	0.299 95	0.649 97	1.000 00
钢	70	0.098 36	0.145 40	0.170 77	0.241 43	0.552 12
	80	0.089 34	0.100 57	0.316 08	0.423 64	0.730 48
	90	0.058 37	0.229 19	0.406 47	0.709 59	1.000 00

表2 不同质量分数的NaCl溶液与水介质的折算系数

Table 2 Conversion coefficient between different mass fraction NaCl solution and water

NaCl 质量分数/%	铝合金	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	0.096 9	0.310

表3 不同质量浓度酸与水介质的折算系数

Table 3 Conversion coefficient between different concentration acid and water

材料	酸的质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	HNO_3	HCl	H_2SO_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
钢	0.1	0.571		
	1.0	0.467	0.368	0.467
	2.0	0.233	0.292	

3 典型海洋大气环境谱

表4、表5为国防科技工业自然环境试验研究中心在统计、分析沿海某试验站近10 a环境数据的基础上编制的雨、雾、湿度累积年谱(低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的雨、雾、湿度作用时间均按 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 考虑)及大气环境年谱。

表4 沿海某试验站雨、雾和湿度累积年谱

Table 4 Rain, fog and humidity accumulative spectrum of certain marine exposure station

温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	25	30	35
雨谱/h	9.0	78.6	261.3	—
雾谱/h	86.1	284.9	337.6	—
RH为70%				
湿度谱/h	RH为80%	449.4	1 304.6	3 536.9
RH为90%				

4 海洋大气环境加速试验环境谱

4.1 海洋大气腐蚀因素分析

海洋大气的一个主要特点是空气中含有以盐粒

表5 沿海某试验站大气环境谱(1 a)

Table 5 Atmospheric environment spectrum of certain marine exposure station(one year)

	雾	雨	盐雾	潮湿空气
时间比例/%	8.08	4.39	27.12	60.4
作用时间/h	708.6	384.9	2 375.7	5 290.8
作用次数	113	122		
pH	5.3	5.3		
紫外辐射量/(MJ·m ⁻²)			259.6	
$\rho(\text{SO}_2)/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			0.121	
$\rho(\text{NO}_x)/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			0.012 2	
$\rho(\text{降尘})/(\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot 30 \text{ d})^{-1})$			5.82	
$\rho(\text{CO})/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			-	
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			0.028 2	
雨量/mm		1 805.2		
盐雾质量浓度/(mg·m ⁻³)			0.48	

或饱和盐水水滴形态存在的氯化物,含量受温度、海浪、海风等多种因素的影响,易变性很大。一方面,由于海洋大气中盐水的存在,相对湿度较高,易在表面凝结成较厚的液膜,溶解更多的氧和其他腐蚀性物质,从而加速腐蚀。同时,若氯化物沉降在机体金属表面,由于它具有吸湿性及增大表面液膜的电导作用,Cl⁻又具有很强的侵蚀性,因而加重了机体结构腐蚀。太阳辐射是影响腐蚀行为的另一因素,它促使金属表面的光能腐蚀反应及真菌之类生物的活动,进而有利于腐蚀性盐尘/盐雾在金属表面的沉积。

4.2 海洋大气环境加速试验环境谱

通过以上海洋大气腐蚀环境因素分析,采用紫外照射和周期浸润两个子试验构成的循环加速试验环境谱模拟光照、温度、湿度以及海洋大气环境中氯离子的影响。

1) 紫外照射子试验。为有效缩短试验周期,同时考虑到常规紫外照射(老化)试验箱的技术指标,确定试验箱紫外线辐射强度 $Q=(60 \pm 10) \text{ W/m}^2$,紫外照射时环境温度依据文献[4],取为 $\theta=(55 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。

2) 周期浸润子试验。海洋大气环境中盐雾的作用采用质量分数为5%的NaCl溶液(添加少量稀硫酸调节pH=4)作为腐蚀溶液来模拟。潮湿空气和雾/凝露作用采用温湿环境下表面溶液的烘烤过程来模拟,烘烤条件:温度 $\theta=40^\circ\text{C}$,相对湿度取95%。浸润周期为30 min,其中试件在溶液中浸润7.5 min,在

溶液外烘烤22.5 min。

5 典型海洋大气环境当量加速谱

5.1 紫外照射子试验作用时间的确定

根据文献[2],1个周期紫外照射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 a接受的紫外辐射量。当试验箱紫外线辐射强度为 K ,外场真实环境的年均紫外辐射量为 Q_z 时,每个周期所需的紫外线照射时间可表示为:

$$t = \frac{Q_z' \times 10^6}{(K \times 3600)}$$

由表5可知,典型海洋大气环境谱中的年均紫外辐射量 $Q=259.6 \text{ MJ/m}^2$,计算得紫外照射子试验作用时间为1 200 h。

5.2 周期浸润子试验作用时间的确定

周期浸润作用时间参照典型海洋环境年谱(见表4,5),按以下当量折算法确定。

5.2.1 典型海洋大气环境谱与标准潮湿空气的当量折算

5.2.1.1 潮湿空气作用时间的当量折算

根据表4中的环境和表1的折算系数,计算潮湿空气相当于 $\theta=40^\circ\text{C}$ (低于 20°C 时一律按 20°C 计算),RH为90%的标准潮湿空气的作用时间:

$$t_{\text{a 铝合金}} = 1\ 960.8 \text{ h}$$

$$t_{\text{a 钢}} = 1\ 289.3 \text{ h}$$

5.2.1.2 环境介质的影响分析

1) SO_2 的影响。 SO_2 的质量浓度为 0.121 mg/m^3 , SO_2 与大气中的氧气作用形成 SO_3 (无粉尘催化时只有体积分数为1%的 SO_2 生成 SO_3 ,有粉尘催化时只有体积分数为5%的 SO_2 生成 SO_3), SO_3 与大气中的水作用形成 H_2SO_4 ,计算得 0.121 mg/m^3 的 SO_2 可生成 $9.26 \times 10^{-6} \text{ mg/L}$ 的 H_2SO_4 。由表3可见, SO_2 的影响可以忽略不计。

2) NO_x 的影响。 NO_x 的质量浓度为 $0.012 2 \text{ mg/m}^3$,假设均能产生腐蚀能力较强的 HNO_3 和 NO ,根据累积化学反应可知 1 mol/L 的 NO_2 能产生 $8/9 \text{ mol/L}$ 的 HNO_3 ,计算得 $0.012 2 \text{ mg/m}^3$ 的 NO_x 可生成质量浓度为 $1.49 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$ 的 HNO_3 。由表3可见, NO_x 的影响

可以忽略不计。

3) Cl^- 的影响。雨及雾中 Cl^- 的质量浓度为 $0.028\ 2\ \text{mg}/\text{m}^3$, 可生成 $2.9 \times 10^{-3}\ \text{mg}/\text{L}$ 的 HCl 。由表 3 可见, Cl^- 的影响可忽略不计。

4) CO 的影响。 CO 和 O_2 反应产生 CO_2 , 再与水反应产生碳酸。碳酸酸性极低, 其影响忽略不计。

5) 盐雾的影响。盐雾质量浓度为 $0.48\ \text{mg}/\text{m}^3$, 质量浓度极低, 其影响亦忽略不计。

6) pH 值的影响。雨、雾作用时的 pH 值为 5.3, 故雨、雾作用时考虑 pH 值的影响。考虑到酸雨的主要成分为硫酸, 因此, pH 值为 5.3 的雨、雾相当于 $0.245\ \text{mg}/\text{L}$ 的 H_2SO_4 。对于铝合金对应的折算系数为 0.589; 对于钢对应的折算系数为 0.869。

5.2.1.3 雾作用时间的当量折算

根据表 4 中的环境和表 1 的折算系数, 将雾作用小时数折算为 $\theta=40\ ^\circ\text{C}$ (低于 $20\ ^\circ\text{C}$ 时一律按 $20\ ^\circ\text{C}$ 计算), RH 为 90% 的标准潮湿空气的作用时间为:

$$t_b'_{\text{铝合金}} = 169.7\ \text{h}$$

$$t_b'_{\text{钢}} = 207.5\ \text{h}$$

考虑 pH 值的影响, 则雾相当于标准潮湿空气的作用时间为:

$$t_b'_{\text{铝合金}} = 288.1\ \text{h}$$

$$t_b'_{\text{钢}} = 238.2\ \text{h}$$

5.2.1.4 降雨作用时间的当量折算

根据表 4 中的环境和表 1 的折算系数, 将降雨作用小时数折算为 $\theta=40\ ^\circ\text{C}$ (低于 $20\ ^\circ\text{C}$ 时一律按 $20\ ^\circ\text{C}$ 计算, 相对湿度按 90% 考虑), RH 为 90% 的标准潮湿空气的作用时间为:

$$t_c'_{\text{铝合金}} = 95.6\ \text{h}$$

$$t_c'_{\text{钢}} = 124.8\ \text{h}$$

考虑 pH 值的影响, 则降雨相当于标准潮湿空气的作用时间为:

$$t_c'_{\text{铝合金}} = 95.6/0.589 = 162.3\ \text{h}$$

$$t_c'_{\text{钢}} = 124.8/0.869 = 143.6\ \text{h}$$

5.2.1.5 典型海洋大气环境谱每年相当于标准潮湿空气作用时间为:

$$t_1'_{\text{铝合金}} = t_a'_{\text{铝合金}} + t_b'_{\text{铝合金}} + t_c'_{\text{铝合金}} = 2\ 411.2\ \text{h}$$

$$t_1'_{\text{钢}} = t_a'_{\text{钢}} + t_b'_{\text{钢}} + t_c'_{\text{钢}} = 1\ 671.1\ \text{h}$$

5.2.2 周期浸润加速试验环境谱与水(标准潮湿空气)的当量折算

由于加速腐蚀环境谱周期浸润子试验的温度是

$40\ ^\circ\text{C}$, 因此, 周期浸润加速试验环境谱与标准潮湿空气的当量折算中只考虑环境对水介质的折算。

1) NaCl 溶液的折算系数。

由表 4 可知, 铝合金和钢对质量分数为 3.5% 和 7% 的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数 $\alpha_{\text{铝合金}}$ 为 0.121 和 0.096 9, $\alpha_{\text{钢}}$ 为 0.320 和 0.310, 采用插值法可得质量分数为 5% 的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数 $\alpha_{1\text{铝合金}} = 0.106\ 6$; $\alpha_{1\text{钢}} = 0.314$ 。

2) pH=4 的稀硫酸的折算系数。

对 pH=4 的稀硫酸而言, $c(\text{H}^+) = 0.000\ 1\ \text{mol}/\text{L}$, 则 H_2SO_4 对应的浓度为 $0.5 \times 0.000\ 1\ \text{mol}/\text{L}$, 故硫酸质量浓度为 $4.904\ \text{mg}/\text{L}$ 。

由表 5 可知, 铝合金和钢对质量浓度为 $1\ \text{mg}/\text{L}$ 和 $2\ \text{mg}/\text{L}$ 酸与水介质的折算系数 $\alpha_{\text{铝合金}}$ 为 0.348 和 0.302, $\alpha_{\text{钢}}$ 为 0.467 和 0.233, 采用插值法可得 $4.904\ \text{mg}/\text{L}$ 酸浓度对应的折算系数 $\alpha_{2\text{铝合金}} = 0.2732$; $\alpha_{2\text{钢}} = 0.152$ 。

3) 周期浸润加速试验环境谱的综合折算系数。

周期浸润加速试验环境谱的综合折算系数 β^* 满足:

$$\frac{1}{\beta^*} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$$

可得: $\beta^*_{\text{铝合金}} = 0.076\ 68$, $\beta^*_{\text{钢}} = 0.102\ 4$ 。即对铝合金而言, 加速腐蚀环境谱作用 $1\ \text{h}$ 相当于 $\theta = 40\ ^\circ\text{C}$, RH 为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 $t_2'_{\text{铝合金}} = 13.04\ \text{h}$; 对钢而言, 加速腐蚀环境谱作用 $1\ \text{h}$ 相当于 $\theta = 40\ ^\circ\text{C}$, RH 为 90% 的标准潮湿空气的作用时间 $t_2'_{\text{钢}} = 9.8\ \text{h}$ 。

5.2.3 周期浸润加速试验环境谱与海洋大气环境谱的当量加速关系

由以上海洋大气环境谱和周期浸润加速试验环境谱的当量折算, 当量加速关系为:

$$\beta_{\text{铝合金}} = t_1'_{\text{铝合金}}/t_2'_{\text{铝合金}} = 184.9\ \text{h/a}$$

$$\beta_{\text{钢}} = t_1'_{\text{钢}}/t_2'_{\text{钢}} = 170.5\ \text{h/a}$$

因此, 对铝合金和结构钢, 周期浸润的作用时间拟定为 $180\ \text{min}$, 该时间大约相当于外场实际暴露 $1\ \text{a}$ 。

综上所述, 铝合金和钢结构件典型海洋大气环境当量加速腐蚀环境谱的组成及实施流程如图 1 所示, 该谱块作用 1 个周期, 约相当于外场实际暴露 $1\ \text{a}$ 。

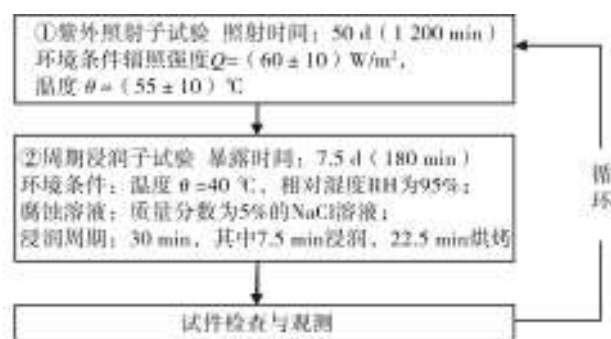


图1 海洋大气环境当量加速腐蚀环境谱

Fig. 1 Accelerated corrosion environment spectrum of marine environment

6 结论

1) 海洋大气环境加速腐蚀可选用由“紫外照射”和“周期浸润”2个环境块模拟。

2) 在具备真实典型海洋大气环境谱数据、自然环境与加速环境对标准潮湿空气折算关系基础上,建立加速试验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腐蚀环境谱及当量关系可用于飞机(尤其是海军飞机/舰载飞机)的结构选材或/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. 直升机结构疲劳[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 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,2004:75.
- [3] 穆志韬. 飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2007,22(3):301—304.
- [4] MILLER Robert N, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft in Various Environments[J]. Corrosion, 1989(8):12—21.

(上接第47页)

和维修/翻新费用等影响。

ACES预测算法将采用专家知识、课程学习、现场检查数据、实验室和现场模拟ACDT数据来校准。选定FMTV, MTRV, HMMWV和LVSR(后勤车辆系统替代型)等4种陆军和海军陆战队车辆用作校准和验证。

6 结论

美军基于模拟仿真的加速腐蚀系统是基于人工智能技术的统计架构,其中包括采用学习算法使ACES随时间的推移而成长并变得更加准确的知识获取程序,输出结果则是预计的腐蚀和车辆随时间而劣化的概率。目前,美军仍在持续进行研发以完善该技术,近期计划在2010年底发布测试第2版。未来的计划则包括对评估车辆结构完整性所需的金

属损失和裂纹萌生位置的联合预测。美军期望在10 a之内,将利用较多的知识将ACES发展进化成为永不退休的专家工具。

美军开发的可与车辆实际加速腐蚀耐久性试验数据高度相关的模拟仿真加速腐蚀试验技术,能够对车辆耐腐蚀设计提供直接反馈,将取代许多实际的腐蚀试验,减少对冗长和成本昂贵的车辆腐蚀试验的要求。该技术在装备腐蚀控制设计上的广泛应用,不仅能够提高装备的装备完好性、安全性,而且能够大幅缩短装备研制与鉴定试验时间、节省试验经费以及降低装备全寿命周期费用。

参考文献:

- [1] SAVELL C Thomas, HANDSY I Carl, AULT Pete, et al. Accelerated Corrosion Expert Simulator (ACES) [C/OL]// DoD Corrosion Conference 2009[2009-08-14]. <http://events.nace.org/conferences/dod2009/index.asp>. 余不详