典型海洋环境当量加速试验环境谱研究

左 卫, 刘元海

(1.海军驻荆州地区通信军事代表室,荆州 434000;2.中国特种飞行器研究所,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,编制了由紫外照射和周期浸润 2 个环境块构成的典型 海洋环境加速试验环境谱,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。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:海洋环境;环境谱;当量;加速

中图分类号: TJ765.4⁺2; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2011)23-0133-04

Research on Equivalent Accelerated Test Environmental Spectrum of Typical Marine Environment

ZUO Wei, LIU Yuan-hai

(1. Navy Communication Military Representative Office in Jingzhou, Jinzhou 434000, China; 2. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

Abstract: Accelerated test environmental spectrum of the typical marine environment composed of two environmental lumps, named UV irradiation and periodic soakage was compiled using equivalent conversion method based on typical marine atmosphere spectrum. The determination methods of parameters of environmental lumps and the equivalent relationship between accelerated spectrum and field exposure environment were presented. The purpose was to provide foundation for the assessment of suitable materials selection, structure, calendar and life-span of hydroplane and amphibious plane.

Key words: marine environment; environmental spectrum; equivalent; accelerated

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 飞机在整个日历停放期间所遭受到的真实自然环境, 采用该环境谱来模拟飞机服役环境而进行长期的腐 蚀试验,从时间、经费和技术条件上都是难以实现的。 为使飞机的环境谱能够有效地应用于工程实践,需建 立在试验中可行的当量加速腐蚀折算关系,将飞机停 放环境中的腐蚀损伤等当量地折算成在实验室内能 再现的当量加速环境谱。

1 当量腐蚀环境谱的折算原则

飞机地面停放环境谱的组成十分复杂,模拟真实

环境试验的时间极其漫长,因此,编制当量加速腐蚀 环境试验谱时,应以飞机地面停放环境为基础加以简 化与加速,使之能在实验室内得以实现。在编制当量 环境谱折算时应遵循以下几个原则。

 与飞机的真实服役环境保持严格的腐蚀损伤 等当量关系。

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

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 a1 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

收稿日期: 2011-07-08

作者简介: 左卫(1971-), 男, 江西人, 海军驻荆州地区通信军事代表室工程师, 主要研究方向为装备通信技术与腐蚀防护工程。

折算系数 α_2, α_3 , 见表 2-3。

表 1 潮湿空气与标准潮湿空气的折算系数

Tab.1 Conversion coefficient of wet air to standard wet air

材料	RH	温度/℃					
	/ %	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	0.17077	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 不同浓度 NaCl 溶液与水介质的折算系数

Tab.2 Conversion coefficient of different concentration

NaCl浓度/%	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	0.0969	0.310

NaCl solution to water medium

表 3 不同浓度酸与水介质的折算系数

Tab.3 Conversion coefficient of different

concentration	acid	to water	medium
CONCEINTATION	aciu	to water	meanum

** *3	酸浓度	HNO	HCI	11 80	
1/1 /1-1	$/(mg \cdot L^{-1})$	ΠNO_3	nei	112 004	
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		

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折算为温度 40 ℃, 相对湿度 90%的标准潮湿空气的作用时间 t₁。

3) 将每小时加速试验环境谱的作用折算为温度 40 ℃,相对湿度 90%的标准潮湿空气的作用时间 t₂, 加速试验环境谱折算时应考虑温度、湿度、盐浓度和 酸浓度等因素。

4) t₁/t₂ 为当量加速关系 β,即加速试验环境谱作
 用 β 小时,相当于实际环境中使用 1 年。

3 典型海洋大气环境谱

国内某研究所在统计沿海某试验站近 10 年的环 境数据的基础上编制的典型沿海/海洋环境区的雨、 雾、湿度累积谱(低于 20 ℃的雨、雾、湿度作用时间均 按 20 ℃考虑)及大气环境谱,见表 4-5。

表 4 沿海某试验站雨、雾和湿度累积谱

Tab.4 Accumulation spectrum of rain, mist,

and humidity of certain marine station

温度/℃		20	25	30	35	次数
雨谱/h		9	78.6	261.3		122
雾谱/h		86.1	284.9	337.6		113
湿度谱 /h	RH=70% RH=80% RH=90%	449.4	1 304.6	3 536.9		

表 5 某沿海某试验站大气环境谱

Tab.5 Atmospheric environment spectrum

of certain marine test station

	雾及凝露	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		
pН	5.3	5.3		
紫外辐射/(MJ•m ⁻²)		25	9.6	
$SO_2/(mg \cdot m^{-3})$		0.	121	
$NO_x/(mg \cdot m^{-3})$		0.0	12 2	
降尘/(mg • m ⁻² • (30d) ⁻¹)		5.	82	
$CO/(mg \cdot m^{-3})$			/	
$\mathrm{Cl}^{-}/(\mathrm{mg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$		0.0	28 2	
雨量/mm		1 805.2	2	
盐雾浓度/(mg•m ⁻³)			0.48	

4 海洋环境加速试验环境谱

4.1 海洋大气腐蚀因素分析

影响海洋大气腐蚀的因素主要包括盐尘/盐雾、 太阳辐射、温度、湿度等。

1) 盐尘/盐雾是海洋大气环境中的最主要腐蚀
 因素,它们混积在金属表面产生吸湿潮解作用,使金属表面液膜的电导增大,加之氯离子本身具有很强的
 侵蚀性,因而加速腐蚀。

2)太阳辐射是影响腐蚀行为的另一因素,它促 进有机涂层的老化,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。 3)受海风及温度的影响,海洋大气相对较高。 空气相对湿度愈大,空气中的水汽凝结愈多,愈易在 表面凝结形成较厚的液膜,溶解更多的氧和其他腐蚀 性物质,从而加速腐蚀。潮湿环境会使非金属材料、 涂层系统体积膨胀、组织疏松、强度降低,甚至起泡、 破裂和老化,同时引起金属材料的氧化、腐蚀。

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2个子试验构成的循环加速试验环 境谱,模拟光照、温度以及海洋环境中氯离子的影响。

1) 紫外照射子试验。

根据参考文献[1],首先确定试验箱紫外线辐射 强度 $Q=60 \text{ W/m}^2$,照射温度取 55 ℃,照射时间由上 述典型海洋大气环境谱中的年均紫外辐射量 Q'=259.6 MJ/m² 及公式 $t=(Q' \times 10^6)/(60 \times 3 600)$ 确 定,计算结果为 1 200 h(50 d)。

2) 周期浸润子试验。

海洋环境中盐雾的作用采用 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 40 ℃,相对湿度取 95%;浸润周期为 30 min,其中 7.5 min 试件在溶液 中浸润,22.5 min 试件在溶液外烘烤。

5 典型海洋环境当量加速谱

5.1 典型海洋大气环境谱与标准潮湿空气的当量折算

5.1.1 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 空气相当于温度 40 ℃(低于 20 ℃时一律按 20 ℃计 算),相对湿度 90%的标准潮湿空气的作用时间:

 $t_{a(Bcde)} = 449.4 \times 0.167\ 07 + 1\ 304.6 \times 0.290\ 53$ +3 536.9 × 0.426 = 1 960.8 (h)

 $t_{a(\overline{M})} = 449.4 \times 0.08934 + 1304.6 \times 0.10057 + 3536.9 \times 0.31608 = 1289.3$ (h)

5.1.2 环境介质的影响分析

1) SO₂ 的影响。

 SO_2 的含量为 0.121 mg/m³, SO_2 与大气中的氧 气作用而形成 SO_3 (无粉尘催化时只有 1%的 SO_2 生 成 SO_3 ,有粉尘催化时只有 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/m³ 的 SO_2 可生成 9.26×10⁻⁶ ppm 的 H_2SO_4 。 由表 3 可见, SO_2 的影响可以忽略不计。 NO_x 的含量为 0.012 2 mg/m³,假设均能产生腐 蚀能力较强的 HNO₃ 和 NO,根据累积化学反应可知 1 mol 的 NO₂ 能产生 8/9 mol 的 HNO₃,计算得 0.012 2 mg/m³ 的 NO_x 的可生成 1.49×10⁻⁵ ppm 的 HNO₃。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⁻的含量为 0.028 2 mg/m³,可生成 0.028 2×36.5/35.5=2.9×10⁻³ ppm 的 HCl。由表 3 可见,Cl⁻的影响可忽略不计。

4) CO 的影响。

CO和O₂反应产生CO₂,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。

盐雾浓度为 0.48 mg/m³,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 mg/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。

5.1.3 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,将雾作用时间折算为温度40℃(低于20℃时一律按20℃计算),相对湿度90%的标准潮湿空气的作用时间(h):

 $t_{b(\Re \oplus \widehat{\varpi})} = 86.1 \times 0.11045 + 284.9 \times 0.207 + 337.6 \times 0.29995 = 169.7$

 $t_{\rm b(fi)} = 86.1 \times 0.05837 + 284.9 \times 0.22919 + 337.6 \times 0.40647 = 207.5$

考虑 pH 值的影响,则雾相当于标准潮湿空气的 作用时间:

 $t_{b(\Re \oplus 2)} = 169.7/0.589 = 288.1$ (h)

 $t_{\rm b(M)} = 207.5/0.869 = 238.2$ (h)

5.1.4 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 用时间折算为温度40℃(低于20℃时一律按20℃ 计算,相对湿度按90%考虑),相对湿度90%的标准 潮湿空气的作用时间(h):

 $t_{c(12622)} = 9 \times 0.11045 + 78.6 \times 0.207 + 261.3 \times 0.29995 = 95.6$ (h)

 $t_{c(\overline{M})} = 9 \times 0.058 \ 37 + 78.6 \times 0.229 \ 19 + 261.3 \times 0.406 \ 47 = 124.8 \ (h)$

考虑 pH 值的影响,则降雨相当于标准潮湿空气的作用时间。

 $t_{c(\oplus \oplus \oplus)} = 95.6/0.589 = 162.3$ (h)

 $t_{c(\{M\})} = 124.8/0.869 = 143.6$ (h)

典型海洋大气环境谱每年相当于标准潮湿空气 作用时间:

 $t_{1(\text{He}2)} = t_{a(\text{He}2)} + t_{b(\text{He}2)} + t_{c(\text{He}2)} = 1$ 960.8+ 288.1+162.3=2 411.2 (h)

 $t_{1(\overline{M})} = t_{a(\overline{M})} + t_{b(\overline{M})} + t_{c(\overline{M})} =$

1 289.3 + 238.2 + 143.6 = 1 671.1 (h)

5.2 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℃,因此加速腐蚀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)5%的 NaCl 溶液的折算系数。

由表 4 可知,3.5%和 7%的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数 $\alpha_{(ਬcc)} = 0.121$ 和 0.096 9, $\alpha_{(W)} = 0.320$ 和 0.310,采用插值法可得 5%的 NaCl 相对潮湿空气的折算系数:

α_{1(铝合金)}=0.106 6

 $\alpha_{1(\overline{M})} = 0.314$

2)pH=4的稀硫酸的折算系数。

对 pH=4 的稀硫酸而言,[H⁺]=0.000 1 mol/ L,则 H₂SO₄ 对应的浓度为 0.5×0.000 1 mol/L,其 相对分子质量为 98.08,故硫酸含量为:

98.08×0.5×0.000 1=4.904 mg/L

由表 5 可知,1 mg/L 和 2 mg/L 酸浓度与水介 质的折算系数 $\alpha_{(86\pm)} = 0.348$ 和 0.302, $\alpha_{(8)} = 0.467$ 和 0.233,采用插值法可得 4.904 mg/L 酸浓度对应 的折算系数 $\alpha_{2(86\pm)} = 0.273$ 2; $\alpha_{2(80)} = 0.152$ 。

3)加速腐蚀环境谱的综合折算系数。

加速腐蚀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 $\beta_{(Bfach)}^{*}=0.076$ 68, $\beta_{(W)}^{*}=0.102$ 4。即对铝 合金而言,加速腐蚀环境谱作用 1 h 相当于 40 ℃,相 对湿度 90% 的标准潮湿空气下作用13.04 h;对钢而 言,加速腐蚀环境谱作用 1 h 相当于 40 ℃,相对湿度 90% 的标准潮湿空气下作用 9.8 h。

5.3 海洋环境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加速腐蚀环境谱的当

量折算、当量加速关系:

 $\beta_{(铝合金)} = t_{1(铝合金)} / t_{2(铝合金)} = 184.9(小时/年)$

β_(钢)=t_{1(钢)}/t_{2(钢)}=170.5(小时/年)

因此,对铝合金和结构钢,周期浸润作用时间拟 定180 h,该时间约相当于外场实际暴露1年。

综上所述,铝合金和钢结构件典型海洋环境当量加速腐蚀环境谱的组成及实施流程见图1,该谱块作



Fig. 1 Equivalent accelerated corrosion environment spectrum of marine environment

用1个周期,约相当于外场实际暴露1年。

6 结论

 1)以环境调研数据为基础,编制了沿海某试验 站雨、雾露和湿度累积谱,以及典型海洋大气环境谱。

2) 在海洋大气腐蚀环境因素分析的基础上,给 出了由"紫外照射"和"周期浸润"2 个环境块构成的 典型海洋环境加速试验环境谱。

3)采用当量折算法,建立了"周期浸润"环境块 参数的确定方法以及加速试验环境谱与典型海洋大 气环境谱的当量关系;最终给出了铝合金和钢结构件 典型海洋环境当量加速试验环境谱。该谱作用一个 周期,约相当于外场实际暴露1年。

参考文献:

- [1] 刘文珽,李玉海.飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
- [2] 穆志韬,曾本银.直升机结构疲劳[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [3] 蒋祖国.飞机结构腐蚀疲劳[M].北京:航空工业出版社, 1992.
- [4] 穆志韬,柳文林,于战樵.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.
- [5] 海南某气象台站.典型海洋大气环境数据.