

电子设备灌封材料西沙环境试验与实验室环境 试验相关性研究

刘成臣¹, 张洪彬², 赵连红¹, 金涛¹, 王浩伟¹

(1.中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035;

2.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 440106)

摘要: **目的** 研究 267 有机硅、DC160 有机硅、112FR 环氧树脂、8836 聚氨酯 4 种灌封材料西沙海洋大气环境与实验室环境试验的相关性。**方法** 在西沙海域环境开展 267 有机硅等 4 种灌封材料的棚下暴露试验, 暴晒试验时间为 3 年。同时在实验室开展湿热试验, 分别通过测试表面电阻、体积电阻、介电常数、损耗角正切研究两种试验环境的相关性。**结果** 将以体积电阻、表面电阻、介电强度、损耗角正切为基准相关性评价结果进行平均, 得出灌封材料实验室加速试验和自然暴露试验的秩相关系数为 0.66, 为强相关。4 种灌封材料的加速系数分别是 6.6, 4.9, 4.5, 8.3。**结论** 建立了灌封材料在西沙海洋环境试验和实验室湿热环境试验的相关性, 可为后续西沙环境试验的加速处理提供依据。

关键词: 灌封材料; 暴露试验; 加速试验; 相关性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.013

中图分类号: TJ07; TG174.461

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)01-0058-08

Correlation between Xisha Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Electronic Equipment Potting Material

LIU Cheng-chen¹, ZHANG Hong-bin², ZHAO Lian-hong¹, JIN Tao¹, WANG Hao-wei¹

(1.China Special Vehicle Research Institute, Aviation Key Laboratory of Science and
Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, Jingmen 448035, China;

2.China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Institute, Guangzhou 440106, China)

ABSTRACT: Objective To study on the correlation between potting materials such as 267 silicone, DC160 silicone, 112FR epoxy resin and 8836 polyurethane in Xisha ocean atmospheric environment and laboratory environmental test. **Methods** Exposure test under shed was carried for 267 silicone, etc four potting materials in Xisha sea environment for 3 years, while damp heat test was carried out in the laboratory. The relevance of the two test environments was studied through testing surface resistance, volume resistance, dielectric constant, loss tangenty. **Results** The rank correlation coefficient between the laboratory accelerated test and the natural exposure test was 0.66, which was the average correlation between the volume resistance, the surface resistance, the dielectric strength and the loss tangent. They were strongly correlated. The accelerating coefficients of the four potting materials were 6.6, 4.9, 4.5 and 8.3 respectively. **Conclusion** The correlation between the potting materials and the hot and humid environment tests in the Xisha environment is established by the rank correlation coefficient method, which can provide basis for accelerated and simplified treatment of

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-08-28

作者简介: 刘成臣 (1984—), 男, 湖北荆门人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机结构抗腐蚀设计。

subsequent Xisha environmental test.

KEY WORDS: potting material; exposure test; accelerated test; correlation

飞机在海洋环境下服役时恶劣环境会对机载电子设备产生很大的影响,湿度大会加速产品表面的化学和电化学反应,加速金属的腐蚀和非金属涂层的破坏,还会影响电子设备的可靠性^[1-5]。有机硅、环氧树脂和聚氨酯作为飞机机载电子设备常用的绝缘灌封材料对于阻止湿气进入和绝缘具有很大的作用,但灌封材料本身也易受环境的作用而性能退化^[6]。例如水易导致灌封材料中的可溶性溶剂水解、高温和辐射易导致降解和交联、灌封材料易产生霉菌等。飞机寿命一般在 30 年左右,在自然环境下评估灌封材料的环境适应性需要很长的周期,无法满足工程研制需求,因此必须采用加速试验的方法,以期在短时间内达到评估飞机服役若干年后灌封材料的性能,而建立加速试验和自然环境试验之间的相关性是评估的重要前提^[7-10]。

文中在西沙海域环境开展了 267 有机硅等 4 种飞

机机载电子设备常用灌封材料的棚下暴露试验和实验室湿热试验,通过表面电阻、体积电阻、介电常数、损耗角正切参数测试结果,研究了两种试验环境的相关性。

1 试验件

灌封材料试验件采用圆形胶片试样,试验件尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times (2 \sim 3) \text{ mm}$ (见图 1),其组分见表 1。



图 1 灌封材料试验件

表 1 灌封材料试验件清单

试件编号	试件材料	材料特性	组分
E1	267有机硅灌封材料	具有极高的可修复性、流动性好,使用操作时间适中,固化后具有收缩率小、阻燃性好、导热性好、高温下密闭使用时抗硫化还原性好和良好的介电性能等特点	A组分: B组分=1: 1
E2	DC160有机硅灌封胶	不含溶剂、气味少、性能对温度不敏感,与塑料陶瓷等具有良好的相容性	A组分: B组分=1: 1
E3	112FR环氧灌封材料	高流动性、高绝缘性的环氧材料,具有低黏度、高稳定性、高导热性和高粘接性	A组分: B组分=5: 1
E4	8836聚氨酯灌封胶	具有优越的导热性和阻燃性、较高的硬度、优良的耐冲击特性、稳定的电性能	A组分: B组分=5: 1

2 自然环境试验

西沙永兴岛自然暴露试验站,属于典型的热带海洋性气候,具有高温、高湿、强辐射且日照时间长、

高盐雾的气候特点,较适用于各类机载设备灌封材料对海洋环境适应性的考核,环境数据见表 2。采用棚下暴露的方式,检测周期为 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36 个月,每次 3 件,检测数据见表 3。

表 2 西沙年均环境数据

项目	月份												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
太阳辐射量	45°角总辐射曝辐量/(MJ·m ⁻²)	523.5	680.5	664.1	674.7	532.0	378.4	401.8	509.3	470.6	521.2	524.7	307.3
	紫外辐射曝辐量/(MJ·m ⁻²)	25.6	28.4	30.2	33.0	33.4	24.1	24.5	25.2	22.5	20.8	16.9	15.3
	温度月平均值/°C	24.1	24.9	26.4	28.5	29.9	29.9	29.3	29.1	28.7	26.6	26.6	24.3
	相对湿度月平均值/%	72	78	77	78	79	79	79	82	82	76	82	77
	盐雾沉降率/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	1.815	2.120	0.667	0.634	0.630	2.505	1.251	3.041	1.871	3.444	4.801	3.629

表3 暴露试验样品性能检测数据

样品编号	试验周期/月	性能测试				
		外观	表面电阻/ Ω	体积电阻/ $(\Omega \cdot m)$	介电常数	损耗角正切
E1	初始	无异常	1.676×10^{16}	4.095×10^{15}	2.66	0.012
	6	表面无明显变化	1.648×10^{16}	2.024×10^{15}	2.69	0.013
	12	表面无明显变化	1.665×10^{15}	9.140×10^{14}	2.75	0.014
	18	表面无明显变化	1.849×10^{15}	6.362×10^{14}	3.58	0.015
	24	表面无明显变化	1.843×10^{15}	6.611×10^{14}	3.19	0.018
	30	表面无明显变化	4.872×10^{15}	2.308×10^{14}	3.31	0.017
	36	表面无明显变化	1.280×10^{15}	5.187×10^{14}	2.81	0.015
E2	初始	无异常	9.465×10^{15}	5.607×10^{16}	2.58	0.002
	6	表面无明显变化	4.852×10^{15}	1.289×10^{15}	2.28	0.001
	12	表面无明显变化	3.951×10^{15}	2.810×10^{15}	2.40	0.001
	18	表面无明显变化	2.107×10^{15}	1.427×10^{15}	3.03	0.002
	24	表面无明显变化	2.247×10^{15}	1.541×10^{15}	3.02	0.002
	30	表面无明显变化	4.297×10^{15}	7.778×10^{15}	2.65	0.001
	36	表面无明显变化	2.449×10^{14}	1.154×10^{14}	2.48	0.001
E3	初始	无异常	2.194×10^{14}	4.284×10^{14}	5.84	0.138
	6	表面无明显变化	1.348×10^{14}	2.961×10^{14}	4.33	0.026
	12	表面无明显变化	1.221×10^{13}	5.004×10^{12}	4.24	0.031
	18	表面轻微失光、变色	1.097×10^{13}	2.115×10^{13}	3.35	0.019
	24	表面轻微失光、变色	1.754×10^{13}	2.147×10^{13}	3.78	0.030
	30	表面轻微失光、变色	3.106×10^{12}	1.757×10^{12}	3.75	0.034
	36	表面轻微失光、变色	6.704×10^{12}	2.265×10^{12}	3.54	0.034
E4	初始	表面发黏	1.470×10^{13}	2.142×10^{11}	8.03	0.161
	6	表面发黏	2.400×10^{12}	6.851×10^{11}	5.77	0.145
	12	表面发黏	2.911×10^{11}	4.780×10^{10}	4.31	0.161
	18	表面出现针孔气泡	2.484×10^{11}	4.508×10^{10}	6.09	0.154
	24	表面有针孔气泡	2.170×10^{10}	1.778×10^{10}	6.55	0.268
	30	表面有针孔气泡	2.772×10^9	1.888×10^{10}	7.69	0.218
	36	表面有针孔气泡	7.793×10^{10}	2.641×10^{10}	7.00	0.237

3 实验室加速试验

影响灌封材料的主要环境因素主要有太阳光、温度、湿度等,基于灌封材料的使用环境,文中的自然环境试验方式为棚下暴露试验,试验过程中无太阳光的影响,因此制定实验室加速腐蚀试验可将其剔除。

文中灌封材料主要用于机载设备灌封,故试验条件参考 GJB 150.9—86《军用设备环境试验方法湿热试验》中的地面和机载电子设备湿热试验条件,其试验条件:高温为 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$,低温为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $95\% \pm 2\%$,高温保持时间为6 h,低温保持时间为8 h,升温时间为2 h,降温时间为8 h,24 h为一个循环周期。检测数据见表4。

表 4 加速试验样品性能检测数据

样品编号	试验周期/d	性能测试				
		外观	表面电阻/ Ω	体积电阻/ $(\Omega \cdot \text{cm})$	介电常数	损耗角正切
E1	初始	无异常	2.168×10^{16}	2.174×10^{15}	2.44	0.012
	10	表面无明显变化	4.380×10^{15}	1.422×10^{15}	2.54	0.012
	20	表面无明显变化	3.375×10^{15}	1.586×10^{15}	2.62	0.013
	30	表面无明显变化	1.494×10^{15}	1.194×10^{15}	2.59	0.013
	40	表面无明显变化	2.075×10^{15}	1.254×10^{15}	2.62	0.013
	50	表面无明显变化	5.17×10^{15}	7.056×10^{15}	2.94	0.017
	60	表面无明显变化	1.008×10^{15}	1.349×10^{15}	2.64	0.013
E2	初始	无异常	1.187×10^{16}	2.156×10^{15}	2.45	0.001
	10	表面无明显变化	5.841×10^{15}	1.301×10^{15}	2.52	0.001
	20	表面无明显变化	4.351×10^{15}	1.904×10^{15}	2.52	0.001
	30	表面无明显变化	6.780×10^{15}	1.374×10^{15}	2.51	0.001
	40	表面无明显变化	5.576×10^{15}	1.074×10^{15}	2.54	0.002
	50	表面无明显变化	3.634×10^{15}	1.281×10^{15}	2.56	0.001
	60	表面无明显变化	4.478×10^{15}	5.741×10^{14}	2.62	0.001
E3	初始	无异常	2.254×10^{14}	2.339×10^{14}	5.70	0.079
	10	无异常	8.623×10^{13}	9.049×10^{13}	4.06	0.057
	20	表面轻微失光、变色	7.971×10^{13}	6.941×10^{13}	5.05	0.075
	30	表面轻微失光、变色	7.029×10^{13}	9.683×10^{12}	5.15	0.071
	40	表面轻微失光、变色	3.415×10^{13}	1.541×10^{13}	4.68	0.063
	50	表面轻微失光、变色	4.173×10^{13}	3.995×10^{13}	4.89	0.062
	60	表面轻微失光、变色	6.969×10^{13}	5.002×10^{13}	4.02	0.052
E4	初始	表面发黏	2.267×10^{13}	3.079×10^{11}	7.95	0.086
	10	表面发黏	4.02×10^{12}	1.590×10^{11}	6.94	0.095
	20	表面发黏	2.601×10^{12}	1.247×10^{11}	6.30	0.074
	30	表面发黏	1.943×10^{12}	1.178×10^{11}	6.96	0.095
	40	表面发黏	2.785×10^{12}	1.047×10^{11}	7.02	0.103
	50	表面发黏	3.187×10^{12}	9.285×10^{10}	6.09	0.065
	60	表面发黏	5.777×10^{11}	2.715×10^{10}	5.57	0.134

4 相关性评价

为了准确获知两种环境的相关性,从相关度和加速性两个方面进行表征,其中相关度采用了秩相关系数法。秩相关系数 R 越接近 1, 相关度越好, 即两种试验方法对材料的影响规律是基本一致的, 相关度的判断见表 5。加速性以体积电阻、表面电阻、介电常数、损耗角正切作的变化量为指标。

表 5 相关度的判断

相关系数	相关强度
0.8~1.0	极强相关
0.6~0.8	强相关
0.4~0.6	中等程度相关
0.2~0.4	弱相关
0~0.2	极弱相关或无相关

4.1 以体积电阻为基准

以体积电阻为基准,灌封材料样品实验室加速试验和自然暴露试验的相关度计算见表 6。

由表 6 可看出, E1、E2、E3 样品的相关系数均大于 0.6, 均为强相关, E4 样品的秩相关系数为 0.40, 为中等强度相关。四类样品秩相关系数的平均值为 0.65, 说明以体积电阻为评价基准实验室加速试验和自然暴露试验相关强度为强相关。

4.2 以表面电阻为基准

以表面电阻为基准,灌封材料样品实验室加速试验和自然暴露试验的相关度计算见表 7。

由表 7 可看出, 四类样品的相关系数均大于 0.6, 均为强相关。四类样品秩相关系数的平均值为 0.78, 说明以表面电阻为评价基准实验室加速试验和自然暴露试验相关强度为强相关。

表6 以体积电阻为基准的相关度评价

样品 编号	实验室加速试验			自然暴露试验			秩差	秩相关系数
	试验时间/d	体积电阻/($\Omega \cdot \text{cm}$)	秩	试验时间/月	体积电阻/($\Omega \cdot \text{cm}$)	秩		
E1	初始	2.174×10^{15}	1	初始	4.095×10^{15}	1	0	0.90
	10	1.422×10^{15}	3	6	2.024×10^{15}	2	-1	
	20	1.586×10^{15}	2	12	9.140×10^{14}	3	1	
	40	1.254×10^{15}	5	18	6.362×10^{14}	5	0	
	60	1.349×10^{15}	4	24	6.611×10^{14}	4	0	
E2	初始	2.156×10^{15}	1	初始	5.607×10^{16}	1	0	0.60
	10	1.301×10^{15}	3	6	1.289×10^{15}	5	2	
	20	1.904×10^{15}	2	12	2.810×10^{15}	2	0	
	40	1.074×10^{15}	4	18	1.427×10^{15}	4	0	
	60	5.741×10^{14}	5	24	1.541×10^{15}	3	-2	
E3	初始	2.339×10^{14}	1	初始	4.284×10^{14}	1	0	0.70
	10	9.049×10^{13}	2	6	2.961×10^{14}	2	0	
	20	6.941×10^{13}	3	12	5.004×10^{12}	5	2	
	40	1.541×10^{13}	5	18	2.115×10^{13}	4	-1	
	60	5.002×10^{13}	4	24	2.147×10^{13}	3	-1	
E4	初始	3.079×10^{11}	1	初始	2.142×10^{11}	1	0	0.40
	10	1.590×10^{11}	2	6	6.851×10^{11}	5	3	
	20	1.247×10^{11}	3	12	4.780×10^{10}	2	-1	
	40	1.047×10^{11}	4	18	4.508×10^{10}	3	-1	
	60	2.715×10^{10}	5	24	1.778×10^{10}	4	-1	
平均秩相关系数								0.65

表7 以表面电阻为基准的相关度评价

样品 编号	实验室加速试验			自然暴露试验			秩差	秩相关系数
	试验时间/d	表面电阻/ Ω	秩	试验时间/月	表面电阻/ Ω	秩		
E1	初始	2.168×10^{16}	1	初始	1.676×10^{16}	1	0	0.70
	10	4.3803×10^{15}	2	6	1.648×10^{16}	2	0	
	20	3.3753×10^{15}	3	12	1.665×10^{15}	5	2	
	40	2.0745×10^{15}	4	18	1.849×10^{15}	3	-1	
	60	1.008×10^{15}	5	24	1.843×10^{15}	4	-1	
E2	初始	1.187×10^{16}	1	初始	9.465×10^{15}	1	0	0.60
	10	5.841×10^{15}	2	6	4.852×10^{15}	2	0	
	20	4.351×10^{15}	5	12	3.951×10^{15}	3	-2	
	40	5.576×10^{15}	3	18	2.107×10^{15}	5	2	
	60	4.478×10^{15}	4	24	2.247×10^{15}	4	0	
E3	初始	2.254×10^{14}	1	初始	2.194×10^{14}	1	0	0.90
	10	8.623×10^{13}	2	6	1.348×10^{14}	2	0	
	20	7.971×10^{13}	3	12	1.221×10^{13}	4	1	
	40	3.415×10^{13}	5	18	1.097×10^{13}	5	0	
	60	6.969×10^{13}	4	24	1.754×10^{13}	3	-1	
E4	初始	2.267×10^{13}	1	初始	1.470×10^{13}	1	0	0.90
	10	4.020×10^{12}	2	6	2.400×10^{12}	2	0	
	20	2.601×10^{12}	4	12	2.911×10^{11}	3	-1	
	40	2.785×10^{12}	3	18	2.484×10^{11}	4	1	
	60	5.777×10^{11}	5	24	2.170×10^{10}	5	0	
平均秩相关系数								0.78

4.3 以介电常数为基准

以介电常数为基准，灌封材料样品实验室加速试验和自然暴露试验的相关度计算见表 8。

由表 8 可看出，E1 样品的相关系数为 0.83，

为极强相关。E2、E3、E4 的秩相关系数在 0.4 至 0.6 之间，为中等程度相关。四类样品秩相关系数的平均值为 0.58，说明以介电常数为评价基准实验室加速试验和自然暴露试验相关强度为中等程度相关。

表 8 以介电常数为基准的相关度评价

样品 编号	实验室加速试验			自然暴露试验			秩差	秩相关 系数
	试验时间/d	介电常数	秩	试验时间/月	介电常数	秩		
E1	初始	2.44	5	初始	2.66	5	0	0.83
	10	2.54	4	6	2.69	4	0	
	20	2.62	2.5	12	2.75	3	0.5	
	40	2.62	2.5	18	3.58	1	-1.5	
	60	2.64	1	24	3.19	2	1	
E2	初始	2.45	5	初始	2.58	3	-2	0.58
	10	2.52	3.5	6	2.28	5	1.5	
	20	2.52	3.5	12	2.4	4	0.5	
	40	2.54	2	18	3.03	1	-1	
	60	2.62	1	24	3.02	2	1	
E3	初始	5.70	1	初始	5.84	1	0	0.50
	10	4.06	4	6	4.33	2	-2	
	20	5.05	2	12	4.24	3	-1	
	40	4.68	3	18	3.35	5	2	
	60	4.02	5	24	3.78	4	-1	
E4	初始	7.95	1	初始	8.03	1	0	0.40
	10	6.94	3	6	5.77	4	1	
	20	6.30	4	12	4.31	5	1	
	40	7.02	2	18	6.09	3	1	
	60	5.57	5	24	6.55	2	-3	
平均秩相关系数								0.58

4.4 以损耗角正切为基准

以损耗角正切为基准，灌封材料样品实验室加速试验和自然暴露试验的相关度计算见表 9。

由表 9 可看出，E1 样品的秩相关系数为 0.88，为极强相关；E2、E3 的秩相关系数均大于 0.6，为强相关；E4 的秩相关系数为 0.18，相关度较低。四类样品秩相关系数的平均值为 0.57，说明以损耗角正切为评价基准实验室加速试验和自然暴露试验相关强度为中等程度相关。

将以体积电阻、表面电阻、介电强度、损耗角正切为基准相关度评价结果进行平均，得出灌封材料实验室加速试验和自然暴露试验的秩相关系数为 0.66，

为强相关。

4.5 加速性评价

本项目以体积电阻、表面电阻、介电强度和损耗角正切为基准进行加速性评价，评价结果见表 10、表 11。

由表 10、表 11 可知，以体积电阻变化量为基准，四种样品的加速系数在 1.3~12 之间；以表面电阻变化量为基准，四种样品的加速系数在 3.5~12 之间；以介电常数变化量为基准，四种样品的加速系数在 6.5~8 之间；以损耗角正切为基准，E2、E3 样品无加速性，E1、E4 样品的加速系数分别为 9 和 10.5。

将灌封材料以体积电阻、表面电阻和介电常数为

表 9 以损耗角正切为基准的相关度评价

样品 编号	实验室加速试验			自然暴露试验			秩差	秩相关 系数
	试验时间/d	损耗角正切	秩	试验时间/月	损耗角正切	秩		
E1	初始	0.012	4.5	初始	0.012	5	0.5	0.88
	10	0.012	4.5	6	0.013	4	-0.5	
	20	0.013	2	12	0.014	3	1	
	40	0.013	2	18	0.015	2	0	
	60	0.013	2	24	0.018	1	-1	
E2	初始	0.001	3.5	初始	0.002	2	-1.5	0.63
	10	0.001	3.5	6	0.001	4.5	1	
	20	0.001	3.5	12	0.001	4.5	1	
	40	0.002	1	18	0.002	2	1	
	60	0.001	3.5	24	0.002	2	-1.5	
E3	初始	0.079	1	初始	0.138	1	0	0.60
	10	0.057	4	6	0.026	4	0	
	20	0.075	2	12	0.031	2	0	
	40	0.063	3	18	0.019	5	2	
	60	0.052	5	24	0.03	3	-2	
E4	初始	0.086	4	初始	0.161	2.5	-1.5	0.18
	10	0.095	3	6	0.145	5	2	
	20	0.074	5	12	0.161	2.5	-2.5	
	40	0.103	2	18	0.154	4	2	
	60	0.134	1	24	0.268	1	0	
平均秩相关系数								0.57

表 10 以体积电阻、表面电阻评价加速性

样品 编号	体积电阻变 化数量级	实验室加速 试验时间/d	自然暴露试 验时间/d	加速倍 数AF ₁	表面电阻变 化数量级	实验室加速 试验时间/d	自然暴露试 验时间/d	加速倍 数AF ₂
E1	0.1	60	75	1.3	1	60	720	12
E2	0.5	60	75	1.3	0.5	60	360	6
E3	0.6	60	240	4	0.4	60	210	3.5
E4	0.9	60	720	12	1.5	60	300	5

表 11 以介电常数、损耗角正切评价加速性

样品 编号	介电常数 变化量	实验室加速 试验时间/d	自然暴露试 验时间/d	加速倍 数AF ₃	损耗角正 切变化量	实验室加速试 验时间/d	自然暴露试 验时间/d	加速倍 数AF ₄
E1	-0.20	60	390	6.5	0.001	20	180	9
E2	-0.17	60	450	7.5	0.001	/	/	/
E3	1.68	60	360	6	0.027	60	45	0.75
E4	2.38	60	480	8	-0.048	60	630	10.5

基准评价得出的加速系数结果进行平均，得出 E1—E4 样品的加速系数分别为 6.6, 4.9, 4.5, 8.3, 说明该类实验室加速试验方法对 4 类样品的加速效果排序为 E4>E1>E2>E3。

5 结论

1) 通过秩相关系数法说明了电子设备灌封材料西沙环境试验与实验室环境试验两者之间的强相关性。

2) 以体积电阻、表面电阻、介电常数和损耗角正切的变化程度为基准评价得出实验室加速试验方法对 4 类样品的加速效果排序为 E4>E1>E2>E3。可为后续西沙环境试验的加速处理提供依据。

参考文献：

[1] 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(5): 73-77.

- [2] 孙海龙, 王晓慧. 舰载电子设备三防密封设计技术综述[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 49-52.
- [3] 孙世或, 李高原. 高分子材料的气候老化试验技术[J]. 塑料工业, 2006(9): 36-39.
- [4] 张仁群, 岳涛. 大型电子系统显示控制台环境适应性设计[J]. 环境技术, 2011, 35(4): 22-24
- [5] 乔红云, 寇开昌, 颜录科, 等. 有机硅灌封材料的研究进展[J]. 材料科学与工程, 2006(2): 321-324
- [6] 黄恩, 刘丽红. 灌封材料与环境适应性[J]. 环境技术, 2003, 27(6): 32-34.
- [7] 刘文珽, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.
- [8] 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.
- [9] 刘文珽, 贺小帆. 飞机结构腐蚀/老化控制与日历延寿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [10] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 18-24.