美军装甲铝合金表面防护体系海洋大气环境试验

文邦伟，李颖，张燕
（中国兵器工业第五九研究所，重庆 400039）

摘要：介绍了多种不同表面防护工艺的2519，5083和7039共3种装甲铝合金分别在海滨进行户外暴露试验、实验室加速腐蚀试验及电化学阻抗测试的情况。试验结果表明，铬酸盐防护工艺是保护样品边缘以及预防划线腐蚀蔓延的最好选择；户外暴露的失效模式明显不同于在加速腐蚀试验箱中所观察到的典型情况；不管腐蚀性能如何，所有样品都保持较好的附着力；化学预处理后的样品比没有化学预处理更易保持附着力。

关键词：装甲铝合金；环境试验；海洋大气暴露；腐蚀
DOI：10.7643/issn.1672-9242.2013.03.017
中图分类号：TG172.3；TG174.4　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2013)03－0066－06

Marine Exposure Test of Aluminum Armor Alloys Surface Protection System of U. S. Army

WEN Bang-wei, *LI Ying*, *ZHANG Yan*
(No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

Abstract: The outdoor exposure test, lab accelerated corrosion test and EIS test of three kinds of aluminum armor alloys, 2519, 5083, and 7039 with various surface protection technologies were introduced. The test results showed that chromate protection technology is the best at protecting the edges of samples as well as guarding against attack at the scribe; the failure modes in outdoor exposure test are distinctly different from the typical modes observed in lab accelerated corrosion test; All samples maintained good adhesion (above 1500 psi), regardless of corrosion performance; Samples with a chemical pretreatment tended to maintain adhesion better than those without a chemical pretreatment.

Key words: aluminum armor alloy; environmental test; marine atmospheric exposure; corrosion

铝合金5083-H131(以下简称5083)和7039-T64(以下简称7039)通常被用作轻型装甲材料。目前应用最广泛的装甲铝合金是5083-H131，它具有高延展性和耐应力腐蚀开裂性能，例如应用于两栖突击车(AAV)和布拉德利战斗车辆。铝合金7039-T64具有较高强度，能够提供更好的弹道保护，但由于其

收稿日期：2013-01-08
作者简介：文邦伟(1967—)，男，四川万源人，研究员级高级工程师，主要研究方向为环境试验及防腐技术。

更易应力腐蚀开裂而较少在海洋/热带环境中用作结构材料。近年来,铝合金2519–T87(以下简称2519)在某些应用上已考虑替代铝合金5083–H131,它在提供较好弹道保护的同时,出众的弹道性能和高强度/质量比也有助于减轻质量,已被选用在先进两栖突击车(AAAV)上。由于对点蚀敏感,铝合金2519–T87在海洋环境中应用时必须慎重。

目前对铝合金腐蚀预防最有效的方法是采用铬酸盐制剂进行表面处理。由于铬酸盐有毒,所以应用受到限制。虽然目前市场上有大量无铬酸盐表面处理制剂可供选择,但效果都不如铬酸盐制剂。美国陆军研究试验室在国防部关键环境研发计划资助下,进行了几种市售无铬酸盐转化涂层工艺对2519,5083和7039装甲铝合金的保护效果研究。

1　试验

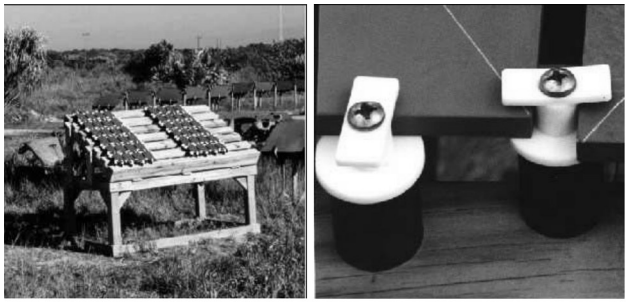
2519,5083和7039装甲铝合金基材表面防护体系概况见表1。

表1　装甲铝合金基材表面防护体系概况

Table 1　Survey of aluminum armor alloys substrates

试板代号	组别	合金元素	合金代号	预处理类型
A	a/b	Cu	2519	喷砂无转化层
B	a/b	Mg	5083	喷砂无转化层
C	a/b	Mg,Zn	7039	喷砂无转化层
D	a/b	Cu	2519	Alodine 1200(Alodine,铬酸盐型)
E	a/b	Mg	5083	Alodine 1200(Alodine,铬酸盐型)
F	a/b	Mg,Zn	7039	Alodine 1200(Alodine,铬酸盐型)
G	a/b	Mg,Zn	7039	Brent Chemcoat L497260A(Chemcoat,无铬酸盐型)
H	a/b	Mg	5083	Brent Chemcoat L497260A(Chemcoat,无铬酸盐型)
I	a/b	Cu	2519	Brent Chemcoat L497260A(Chemcoat,无铬酸盐型)
J	a/b	Mg	5083	Turcoat Alcoat 6787(Turcoat,无铬酸盐型)
K	a/b	Mg,Zn	7039	Turcoat Alcoat 6787(Turcoat,无铬酸盐型)
L	a/b	Cu	2519	Turcoat Alcoat 6787(Turcoat,无铬酸盐型)
M	a/b	Mg	5083	Patclin 1910A(Patclin 1,无铬酸盐型)
N	a	Mg,Zn	7039	Patclin 1910A(Patclin 1,无铬酸盐型)
	b	Cu	2519	Patclin 1910A(Patclin 1,无铬酸盐型)
O	a/b	Cu	2519	Patclin 1910A(Patclin 1,无铬酸盐型)
P	a/b	Mg,Zn	7039	Patclin 1910B(Patclin 2,无铬酸盐型)
Q	a	Mg	5083	Patclin 1910B(Patclin 2,无铬酸盐型)
	b	Cu	2519	Patclin 1910B(Patclin 2,无铬酸盐型)
R	a/b	Cu	2519	Patclin 1910B(Patclin 2,无铬酸盐型)
S	a/b	Mg	5083	Patclin 1910C(Patclin 3,无铬酸盐型)
T	a/b	Mg,Zn	7039	Patclin 1910C(Patclin 3,无铬酸盐型)
U	a/b	Cu	2519	Patclin 1910C(Patclin 3,无铬酸盐型)
V	a/b	Cu	2519	Bulk Chemical E–CLPS 923(Bulk Chem,无铬酸盐型)
W	a/b	Mg,Zn	7039	Bulk Chemical E–CLPS 923(Bulk Chem,无铬酸盐型)
X	a/b	Mg	5083	Bulk Chemical E–CLPS 923(Bulk Chem,无铬酸盐型)
化学防锈面漆				化学防锈涂料
底漆				环氧底漆

试板共有12组，5组涂环氧底漆和化学防锈面漆，3组只涂环氧底漆，4组保持预处理转化膜。从5组涂覆环氧底漆和化学防锈面漆试板中，选择两组（共48块样）进行户外暴露。样品用5 kg静载荷划“×”线，试板边缘钻孔，并穿上螺栓作为阻抗测试的“工作电极”导线。试板放置在Cape Canaveral空军基地的海滨进行户外暴露试验，试板与水平呈30°角，试验架朝海，距海岸线约92 m，如图1所示。其余7组试板进行实验室加速试验和电化学阻抗（EIS）测试。



a 场地　　b 试板摆放

图1　在Cape Canaveral海滩的暴露试验

Fig. 1　Exposure test at Cape Canaveral

户外暴露试验48个月后，按ASTM D 1654–79A对试板遭受腐蚀性环境影响进行评定，等级标准见表2。

表2　ASTM D 1654–79A评定等级

Table 2　Evaluated grade according to ASTM D 2654–79A

等级	程序A	程序B
	腐蚀扩展距离/mm	缺陷比例/%
10	>0	无缺陷
9	0~0.5	0~1
8	0.5~1.0	2~3
7	1.0~2.0	4~6
6	2.0~3.0	7~10
5	3.0~5.0	11~20
4	5.0~7.0	21~30
3	7.0~10.0	31~40
2	10.0~13.0	41~55
1	13.0~16.0	56~75
0	>16.0	>75
备注	用于评定从划线处向外围扩展的等级	用于非划线部位的评级

EIS用来监测涂层随时间的变化情况。便携式EIS仪设计用于在偏远站点现场测量，由一台Schlumberger 1280联合频率响应分析仪（FRA）/稳压器、一个12V DC与120V AC功率变换器（用12 V电池）以及日本东芝小型电脑组成。电池装入25 mL的0.5 N NaCl溶液，平衡至少2 h再测试。软件包Zplot用于数据采集，Zview用于数据分析。测试超出0.01 Hz ~ 100 kHz频率范围的样品发生腐蚀的可能性。利用单正弦法，施加80 mV电压，对EIS数据作图并用Bode和Nyquist格式进行评价。试样户外暴露6，9，19和48个月时测试。

暴露后的涂层附着力测试采用HATE Mark VII涂层附着力测试仪，按ASTM D 4541进行。采用氰基丙烯酸盐粘合剂粘结，在实验室条件下粘结24 h（见表3）。

表3　附着力测试实验室条件

Table 3　Laboratory conditions for pull–off adhesion test

粘合剂类型	氰基丙烯酸盐粘合剂
固化时间/h	24
温度/℃	25
相对湿度/%	31
基材	2519/5083/7039铝合金
涂层类型	53022/53039A化学防锈涂料
涂层厚度/mm	0.1

2　试验结果

2.1　外观变化

所有试板在户外暴露试验9个月后都明显褪色，在B，J，O，P等4种试板的a组和A，I，L，O，Q，R等6种试板的b组边缘明显可见腐蚀。户外暴露试验37个月后，P（7039/Patclin 2）和L（2519/Turcoat）这两组试样因过度腐蚀而下架。其余样品都完成了48个月户外暴露试验。

户外暴露48个月试验结束时，所有样品都进行外观检查，如图2所示。各种试样的两组试板平均缺陷面积结果如图3所示。该评价结果不同于依据ASTM D 1654–79A进行的评价（如图4所示）。这些数据表征了试样表面的全部状况，并考虑了边缘和

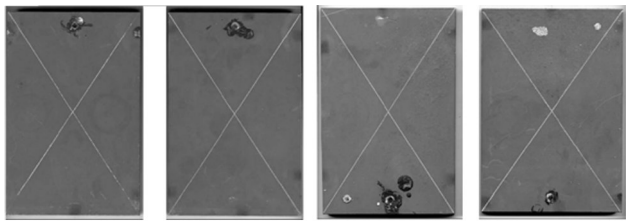


图2　喷砂2519/7039铝合金海洋大气环境户外暴露试验48个月

Fig. 2　Grit-blasted 2519 and 7039 aluminum alloys after 48 months of marine atmospheric exposure

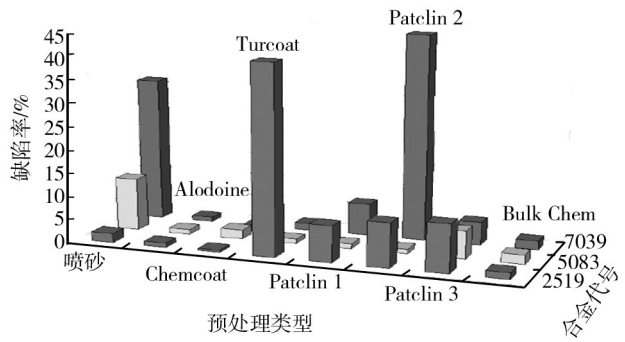
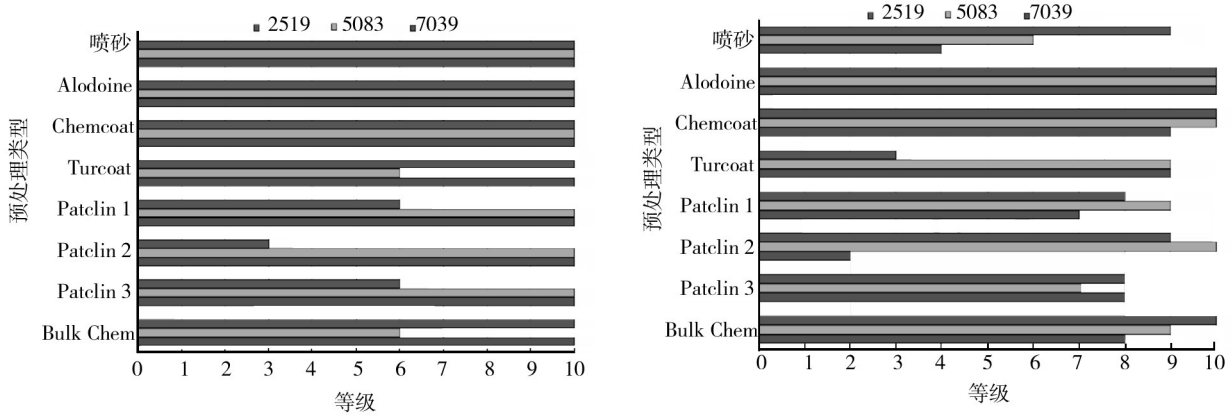


图3　户外暴露48个月的两组试板平均缺陷面积

Fig. 3　Average area failed of both sets of panels after 48 months of outdoor exposure



a 程序A（从划线区向外扩展）　　b 程序B（非划线区）

图4　按ASTM D 1654-79A评定户外暴露等级

Fig. 4　Ratings of panels in outdoor exposure according to ASTM D 1654-79A

沿划线附近的腐蚀状况。

2.2　电化学阻抗谱

在户外暴露48个月的试验中对每个试样进行电化学阻抗谱测试4次,结果如图5所示。

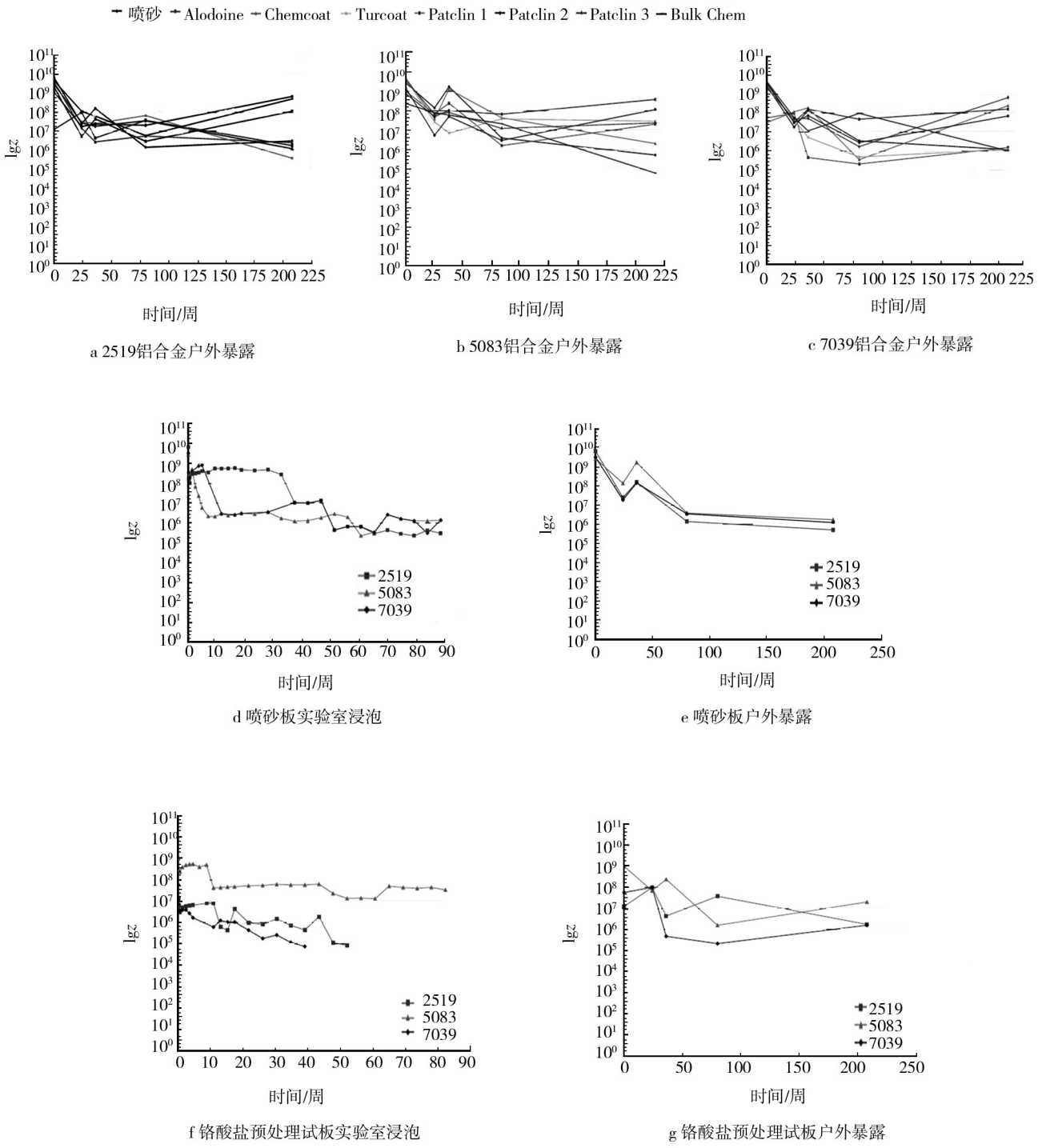
2.3　涂层附着力

暴露后的试板涂层平均附着力数据测试结果如图6所示。

3　讨论

试验研究的2519,5083和7039装甲铝合金有不同的腐蚀性能。2519总体上易遭受点蚀,一般认为由于在合金微观结构中含沉淀和组成粒子的铜而难以预处理。5083是最常用的装甲铝,甚至“裸样”也很耐点蚀。7039比较易遭受点蚀,也会遭受应力腐蚀开裂。试验研究的目的是对市售无铬酸盐型转化层与六价铬酸盐(Alodine 1200)型转化层的防护性能进行对比考核和评价。

尽管5083总体上是耐蚀的,对其难以进行预处理,如图4所示,大多数的合金/涂层表现出对划线扩展不显著,但Turcoat和Bulk Chemical预处理的5083铝合金都向划线后蔓延。图5给出了对非划线区域的ASTM评价等级,5083铝合金又表现出经Patclin 3和喷砂两种预处理后性能显著下降。综合而言,有几种型号的无铬酸盐型转化涂层在5083铝合金上的耐蚀性能良好,相当于铬酸盐型Alodine 1200预处



a 2519铝合金户外暴露　b 5083铝合金户外暴露　c 7039铝合金户外暴露

d 喷砂板实验室浸泡　e 喷砂板户外暴露

f 铬酸盐预处理试板实验室浸泡　g 铬酸盐预处理试板户外暴露

图5 各试样(底漆和面漆防护)电化学阻抗谱测试结果

Fig. 5 EIS test results of the panels with coating

理的防护效果。

一般情况下高含铜的2000系列铝合金预处理困难。尽管如此,几种无铬酸盐预处理和铬酸盐型Alodine 1200预处理在与有机涂层系统协同的户外暴露试验中仍然表现良好。5种预处理从划线处没有向外蔓延,5种预处理对非划线区的ASTM等级为9或10级,喷砂板未进行预处理也在其中,且与铬酸盐对比组相比非常优秀。如图2所示,喷砂的2519

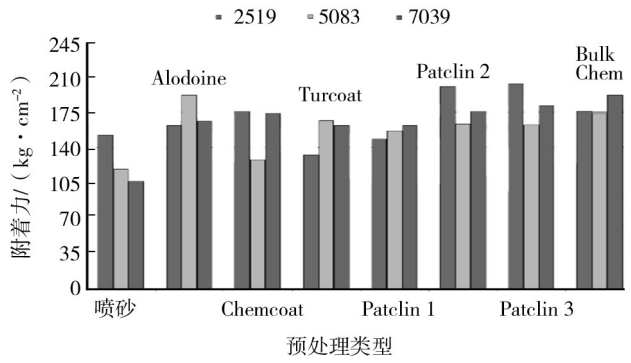


图6　暴露后的试板涂层平均附着力数据

Fig. 6　Averaged post exposure pull-off coating adhesion strength data

板户外暴露48个月后外观显示没有任何蔓延。唯一的可见缺陷是一个小泡,使其等级评价为9。

对这些无铬酸盐转化层的初始评价是依据ASTM B117盐雾试验和GM 9540P加速腐蚀试验数据进行的。

依据GM 9540P试验100个循环后,7039铝合金在划线附近仅有两个鼓泡,是3种铝合金中最少的。对7039铝合金进行的所有预处理都与铬酸盐预处理进行了相对充分的比较,结果表明7039铝合金的无铬酸盐转化层是最好的。在户外暴露中,7039样品从划线开始未出现可测的腐蚀,也是3种合金中腐蚀最弱的。Chemcote比在户外暴露其它无铬酸盐预处理的7039板耐边缘腐蚀性稍好,但未出现比铬酸盐预处理后耐边缘淘蚀(undercutting)更好的样品。

加速腐蚀试验证实无铬酸盐转化涂层对2519板很不利。全部失效表明对2519板的所有3种表面处理——喷砂、铬酸盐和Chemcote,铬酸盐的性能最好。然而,2519样品在户外暴露表现更好,喷砂的2519板未经预处理的耐蚀性也很出色,这与加速腐蚀结果并不矛盾。在早期的工作中,对2519板喷砂处理是依据GM 9540P试验100周期后未遭受"全部失效"的3种工艺之一,这也与2519板Chemcote处理后表现出较好的腐蚀性能一致。对2519板的Turcoat和全部Patclin处理未令人满意,也与先前的工作一致。

加速腐蚀试验结果中,5083板优异的综合耐蚀性是明显的。总体上,5083板是预处理的3种合金中性能最好的。然而,当5083板喷砂或无预处理时,就会出现相当数量的鼓泡。对5083板采用Alodine 1200预处理后,其加速腐蚀和户外暴露性能都为最优。如果无沿板边缘的腐蚀,则Chemcote和Patclin 2预处理在户外暴露中的表现应为最优。

在户外暴露中,划线处的腐蚀蔓延相对不多,这与加速腐蚀试验结果差异明显。24种预处理/合金的组合中有5种出现可测量的划线腐蚀蔓延。大多数被观察到的腐蚀都是从试样边缘开始的。在户外暴露中,板的边缘和底端比顶端表面被润湿的时间更长。通常"边缘效应"(残余应力和涂料稀薄)外加紫外线辐射有助于边缘侵袭而使涂层变脆,而在加速腐蚀试验箱内则不典型。

图5中,在总阻抗和预处理腐蚀性能之间没有实际的相关性。在户外暴露与在实验室浸泡对比样品阻抗测量值的比较中,两组数据表现出相同的趋势,特别是喷砂样品最后稳定在大约105 Ω。户外暴露和实验室的铬酸盐预处理工艺测试数据明显有更多噪声,可能铬酸盐的抑制特性是一个直接原因。尽管如此,该对照试验仍然提供了验证户外暴露对照样品劣化趋势的手段。

4　结论

1) 户外暴露的失效模式明显不同于在加速腐蚀试验箱中所观察到的典型情况。在户外暴露中,边缘腐蚀是普遍的,划线扩展蔓延很少。

2) 不管腐蚀性能如何,所有样品都保持了较好的附着力。在给定的表面处理样品中,暴露后的试验样品附着力和腐蚀性能之间几乎没有相关性。

3) 暴露后的试验样品附着是表面处理的功能之一,并不取决于合金种类。化学预处理的样品比没有化学预处理的更易保持附着力(喷砂的2519样品例外,它暴露后的附着力与其它的样品相当,包括铬酸盐处理)。

4) 喷砂的2519铝合金没有预处理,但出乎意料具有好的耐蚀性能,为所有未经预处理样品中最好的,几乎与铬酸盐处理相当。

5) 由于出众的阻止淘蚀和抑制腐蚀的能力,铬酸盐工艺是保护样品边缘以及预防划线腐蚀蔓延最

(下转第99页)

指传统意义上的硬件故障,在强化试验条件下,通过标准的试验程序能很大程度上将薄弱环节暴露出来。硬件故障的定位、分析对于不同的产品来说也有相应比较成熟的方法,发现此类故障也是强化试验的重要目的。

3.2　RET在暴露软件故障中的应用

在众多机电产品中有各自内嵌的软件系统,通常来讲,RET所施加的强化环境应力及工作应力主要是针对产品的组成结构而言,即为了暴露产品本身结构的潜在缺陷或设计不足,就目的而言不包括提高软件的可靠性。实际情况下,RET有助于提高软件可靠性。通常软件的可靠性测试有标准的测试程序,测试方法也比较成熟。即使在做完全部的标准测试,测试用例覆盖了所有的路径,代码编写无误,在强化试验条件下,产品也会暴露出与软件相关的故障。在2.3.2节中可知,软件的编写、逻辑都正确,在常温及高温下运行,显示结果正常;低温时,发生故障。分析可知,产品的硬件与软件本身不存在设计上的缺陷,而问题出在软件与硬件系统的配合使用上。软件的运行离不开硬件的支持,软件的输入条件却直接影响到运行结果。由于软件设置的错误出在对硬件温度范围的设置上,在RET强化条件下,硬件受试条件的响应输出达到了软件输入的范围之外,因而引起软件的非正常工作。在单一环境条件(如常温)下,无论对软件系统进行多么严谨、标准的测试都不可能发现软件所有的潜在缺陷,最终仍有可能导致故障发生。

4　结论

产品缺陷、薄弱环节不仅仅独立存在于软件或硬件的设计中,在产品的运行过程中,环境及工作条件是一个非常大的变量。由于软件的开发设计及测试通常没有考虑到硬件性能会随着环境及工作条件的变化而改变这一事实,因此常规的软件测试无法全面发现潜在缺陷。然而,可靠性强化试验可以通过改变环境条件来影响硬件性能,从而改变产品软件的运行环境条件,以此来考核软件在不同于开发设计环境条件下的可靠性,有助于全面提高产品的可靠性。

5　展望

现在比较成熟的RET在暴露产品硬件故障中已得到较好应用,也收到了不错的效果,今后应不断地改进试验方案以期获得更佳的试验效果。

对于软件的潜在缺陷问题,一方面独立的软件测试必不可少,另一方面随着产品功能、结构的日益复杂化,独立的软件测试对于许多产品已不能满足可靠性要求。今后软件硬件结合的RET应成为一个比较新的发展方向。在充分考虑产品硬件是软件运行的基础、硬件的工作需要软件指导这一前提后,来制定新RET试验方案帮助暴露产品在软硬件结合时随着环境应力变化而引起的故障,全面提高产品的可靠性。

参考文献:

[1] 祝耀昌,王宇宏. 高加速应力试验及其与传统试验的比较[J]. 装备环境工程,2006,3(4):6—9.

[2] 温熙森,陈循,张春华. 可靠性强化试验理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2007:4—6.

[3] 马杰. 可靠性强化试验技术及方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2003.

[4] 邝志礼. 应用可靠性强化试验技术提高产品的可靠性[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2002(6):1—5.

(上接第71页)

好的技术手段。

6) 排除户外暴露观察到的失效模式,则加速腐蚀试验与户外暴露的性能结果是一致的。在两种试验中,Brent Chemcote处理后的样品性能是3种合金无铬酸盐预处理中表现最好的。

参考文献:

[1] KELLY J V, PLACZANKIS B E. Outdoor Exposure Results for Pretreated and Topcoated Aluminum Armor Alloys 2519, 5083, 7039[R]. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Weapons and Materials Research Directorate, 2004.