

电子设备缓蚀剂对电子设备防护的应用研究

张昊, 姜国杰, 孙志华, 史晓南

(中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: **目的** 研究 DZ-1 电子设备缓蚀剂用于电子设备防护的有效性。**方法** 参照 MIL-PRF-81309G、MIL-L-87177A 和 Q/AVIC 03018 中的试验方法, 对自主研发的 DZ-1 电子设备缓蚀剂的性能进行全面评价。**结果** DZ-1 电子设备缓蚀剂没有闪点, 在运输、储藏及使用过程中非常安全, 使用性能良好, 很容易去除, 能够去除材料表面的水分, 具有良好的缓蚀性能。膜层厚度小于 5 μm , 不会影响电子元件的电学性能, 不会对电子设备中的材料造成腐蚀。**结论** DZ-1 电子设备缓蚀剂满足电子设备的防腐蚀要求, 可以用于电子设备的腐蚀防护。

关键词: 电子设备; 缓蚀剂; 腐蚀防护

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0063-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.010

Application Research of Electron Equipment Corrosion Inhibitor for Electron Equipment Protection

ZHANG Hao, JIANG Guo-jie, SUN Zhi-hua, SHI Xiao-nan

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The purpose is to study the effectiveness of DZ-1 electron equipment corrosion inhibitor for protection of electron equipment. With reference to the test methods of the US military standard MIL-PRF-81309G, MIL-L-87177A and the domestic standard Q/AVIC 03018, the performance of the self-developed DZ-1 electron equipment corrosion inhibitor have been comprehensively evaluated. The DZ-1 corrosion inhibitor for electron equipment has no flash point and is very safe during transportation, storage and use; it has good performance and is easy to remove. It can remove the moisture on the surface of the materials, and has good corrosion inhibition performance. The film thickness is less than 5 μm , which will not affect the electrical performance of electron equipment; it will not cause corrosion to materials in electronic equipment. DZ-1 electron equipment corrosion inhibitor meets the anti-corrosion requirements of electron equipment and can be used for corrosion protection of electron equipment.

KEY WORDS: electron equipment; corrosion inhibitor; corrosion prevention

收稿日期: 2021-02-28; 修订日期: 2021-03-22

Received: 2021-02-28; Revised: 2021-03-22

作者简介: 张昊 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Hao (1995—), Male, Master graduate student, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 姜国杰 (1985—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为清洗剂、缓蚀剂及表面防护等。

Corresponding author: JIANG Guo-jie (1985—), Male, Ph. D, Professor, Research focus: cleaning agent, corrosion inhibitor and surface protection.

引文格式: 张昊, 姜国杰, 孙志华, 等. 电子设备缓蚀剂对电子设备防护的应用研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 063-070.

ZHANG Hao, JIANG Guo-jie, SUN Zhi-hua, et al. Application Research of Electron Equipment Corrosion Inhibitor for Electron Equipment Protection[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 063-070.

电子设备的可靠性、安全性和使用寿命对于各种现代化设备和系统来说非常重要。海洋大气环境具有高温、高湿、高盐雾的“三高”特点,使电子设备的腐蚀速率成倍增加,进而出现腐蚀故障^[1-5]。国外对于电子设备的腐蚀防护非常重视,在电子设备腐蚀防护与控制方面投入了大量经费进行研究,在电子设备腐蚀防护与控制方面积累了丰富的经验^[6]。提高电子设备抗腐蚀能力的方法有很多,包括合理选材和结构设计、部件与线路密封、结构材料表面防腐、除湿干燥和使用电子设备缓蚀剂等^[7-12]。由于电子设备缓蚀剂有不需要特殊设备、操作简便、通用性强等优点,使其在各种电子设备腐蚀防护方法中占据了重要的地位。电子设备缓蚀剂主要用于电子设备上已有涂层或镀层表面的附加防护,通过防止腐蚀性物质接触裸露的材料表面来保护电子设备^[13-16]。目前国外可用于电子设备的缓蚀剂有 MIL-PRF-81309G 中的Ⅲ型缓蚀剂以及 MIL-L-87177A 中的 B 级缓蚀剂。这 2 种缓蚀剂在室温下均为液体,可通过刷涂、喷涂、浸渍的方式使用,具有水置换能力,可用于电子设备内部及电连接器、电插头等部位,并且不会影响电子元件的电学性能。

我国在电子设备缓蚀剂方面的研究较少,缺少高性能的缓蚀剂产品。随着对电子设备腐蚀防护要求的提高,针对电子设备附加防护的需求,参照国外电子设备缓蚀剂的技术指标,自主研制了 DZ-1 电子设备

缓蚀剂。该缓蚀剂由多种防锈剂、成膜剂、溶剂和助剂组成,室温下为浅黄色透明液体。缓蚀剂涂覆在材料表面后,防锈剂会吸附在材料表面,形成吸附膜,阻止腐蚀,并且由于缓蚀剂中有多种防锈剂,每种防锈剂所具有的功能基团不完全相同,所以会对多种材料都有缓蚀作用。成膜剂能在金属表面形成一层粘附性强、致密完整的保护膜,增强防锈剂在金属表面上的吸附能力,同时屏蔽有害物质的侵蚀,增强防锈剂的防腐蚀效果。溶剂主要起到载体作用,使各种功能性添加剂在其中均匀分散,确保缓蚀剂在储存、运输及使用中性状稳定。助剂是为了使缓蚀剂能满足不同腐蚀防护对象、不同使用工艺及贮存等需要,而加入的一些特殊的添加剂,如消泡剂、助溶剂、防霉剂等。为检验该缓蚀剂对电子设备防护的有效性,参照 MIL-PRF-81309G^[17]、MIL-L-87177A^[18]及 Q/AVIC 03018^[19]中的试验方法,对 DZ-1 电子设备缓蚀剂的性能进行了全面的测试和评价。

1 实验

1.1 材料

按表 1 中的材料种类、规格及处理方法,准备电子设备缓蚀剂性能测试所需的材料。

表 1 实验材料
Tab.1 Experimental materials

测试项目	试样材料	试样规格	表面处理及准备	
膜层厚度	2A12-T4 铝合金裸材	25 mm×50 mm×3 mm	试样去除所有锐边和毛刺，并用 240 号砂纸打磨至表面粗糙度 0.8 μm，之后用无水乙醇清洗并热风吹干，放入干燥箱中待用，不允许裸手接触处理过的试样。	
可喷涂性		50 mm×100 mm×2.8 mm		
膜层透明性		50 mm×150 mm×2.8 mm		
膜层可鉴别性				
膜层可去除性				
人造海水置换性	45 钢	50 mm×100 mm×3 mm		
耐中性盐雾	2A12-T4 铝合金裸材	50 mm×100 mm×2.8 mm		
	H62 黄铜	50 mm×50 mm×5 mm		
耐酸性盐雾	2A12-T4 铝合金裸材	50 mm×100 mm×2.8 mm		
	H62 黄铜	50 mm×50 mm×5 mm		
金属腐蚀性	ZM5 镁合金，Zn-3 锌，Cd-3 镉，2A12-T4 铝合金裸材，T2 铜，H62 黄铜	25 mm×50 mm×(2~6) mm		
材料相容性	T2 铜，H62 黄铜	25 mm×50 mm×5.5 mm	镀银	
	2A12-T4 铝合金裸材	25 mm×50 mm×2.4 mm	黑色微弧氧化 硬质阳极氧化	
	1Cr18Ni9Ti 不锈钢	25 mm×50 mm×3.6 mm	钝化	
	TC4 钛合金	25 mm×50 mm×2.9 mm	—	
	2A97 铝合金裸材	50 mm×100 mm×1.2 mm	喷涂 QH-15 底漆 喷涂 QH-15 底漆+QFS-15 面漆 喷涂 TB06-9 底漆	
	300M 钢	50 mm×150 mm×3 mm	镀镉钛+喷涂 H06-1011H 底漆	
	AC531/CF8611 试板	80 mm×150 mm×1.6 mm	喷涂 H01-101H 清漆+H06-1371 底漆	

1.2 方法

采用喷涂或浸涂的方式制备 DZ-1 电子设备缓蚀剂的膜层试样, 试样经喷涂或浸涂一层缓蚀剂后, 在室温环境中垂直悬挂干燥。由于目前国内没有针对电子设备缓蚀剂的性能测试标准, 因此参照 MIL-PRF-81309G 和 MIL-L-87177A 对 DZ-1 电子设备缓蚀剂进行性能测试, 膜层透明性、膜层可鉴别性和膜层可去除性的测试方法按照 Q/AVIC 03018 进行。

1.2.1 外观及基本使用性能

1) 闭口闪点。按照 GB/T 261—2008^[20]规定的试验流程, 使用宾斯基-马丁闭口闪点试验仪测定 DZ-1 电子设备缓蚀剂溶液的闭口闪点。

2) 膜层厚度。参照 MIL-PRF-81309G, 测定试样上涂覆的缓蚀剂膜层的平均厚度。按照式(1)计算膜层的厚度 d (μm)。

$$d = \frac{m_2 - m_1}{\rho \cdot A} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 为试样涂覆缓蚀剂前、后的质量, g; ρ 为缓蚀剂膜层密度, g/cm^3 ; A 为试样上涂覆缓蚀剂的面积, cm^2 。

3) 可喷涂性。参照 MIL-PRF-81309G, 将缓蚀剂样品在 4°C 的冷藏室中放置 20 h 之后取出, 采用喷涂的方法涂覆在试样表面, 之后放在室温下水平放置干燥 24 h, 检查膜层是否连续无缺陷。

4) 膜层透明性。参照 Q/AVIC 03018, 在 2 个分别喷涂了 H06-0371 绿色底漆和 S04-0396 灰色底漆的铝合金试样表面, 用 S04-0396F 白色面漆在试样近中心的部分作 2 个 $\phi 4 \text{ mm}$ 、相距 13 mm 的模拟腐蚀点, 之后将试样的 2/3 部分浸入缓蚀剂溶液中。将试样从缓蚀剂中取出, 并在室温环境下垂直悬挂约 24 h, 用肉眼检查试样, 并确定是否能看到试样表面的模拟腐蚀点。

5) 膜层可鉴别性。参照 Q/AVIC 03018, 在铝合金试样上喷涂缓蚀剂, 并在可见光下目视检查试样上涂覆了缓蚀剂的部分与未涂覆部分的分界线。

6) 膜层可去除性。参照 Q/AVIC 03018, 用纱布蘸 120#汽油或 200#溶剂汽油, 以及 RJ-1 溶剂型清洗剂擦洗涂覆了缓蚀剂的金属试样, 在可见光下目视检查是否有残留的缓蚀剂。

1.2.2 人造海水置换性

参照 MIL-PRF-81309G, 准备 3 个 45 钢试样进行人造海水置换性试验。将 45 钢试样倾斜放置, 使一个 50 mm 的边比水平面高出 25 mm。将人造海水喷到试样表面, 并形成细小的水滴, 然后沿试样较高的一边倾倒 1 mL 缓蚀剂, 使之完全覆盖试样表面。1 min 后, 再倾倒 1 mL 缓蚀剂, 再过 1 min 后, 将试样垂直放置 1 min。随后将试样水平放置在盛有蒸馏

水的 40°C 密闭干燥器中 (涂覆有缓蚀剂的一侧朝上)。4 h 后取出试样, 用汽油洗去缓蚀剂膜层, 检查试样是否存在可见锈蚀。

1.2.3 金属腐蚀性

参照 MIL-L-87177A 进行金属腐蚀性试验。将准备好的各类金属试样浸涂一层缓蚀剂, 并在室温下放置 1 h。之后将试样放置在 55°C 、相对湿度为 75% 的环境中, 168 h 后取出试样, 用丙酮清洗, 并去除试样表面的涂覆物和疏松的腐蚀产物, 热风吹干后, 进行称量 (精确至 0.1 mg)。计算试验前后试样的质量变化。

1.2.4 耐中性盐雾和耐酸性盐雾

1) 耐中性盐雾。将 2A12-T4 铝合金试样和 H62 黄铜试样用胶带封闭边缘后, 用浸涂的方式涂覆一层缓蚀剂, 在室温环境中垂直悬挂 24 h。之后按 GB/T 10125—2012^[21]放入盐雾箱中进行中性盐雾试验, 记录试样表面出现腐蚀点的时间。

2) 耐酸性盐雾。将 2A12-T4 铝合金试样和 H62 黄铜试样用胶带封闭边缘后, 用浸涂的方式涂覆一层缓蚀剂, 在室温环境中垂直悬挂 24 h。之后放入盐雾试验箱中, 按 GJB 150.11A^[22]中的试验条件进行耐酸性盐雾测试 (将试验溶液 pH 值调整为 3.5 ± 0.5), 记录试样表面腐蚀点出现的试验时间。

1.2.5 对电子元件电学性能的影响

参照 MIL-PRF-81309G 测试缓蚀剂对电子元件电学性能的影响。测试使用的电连接器为中航光电的 JY3112E16-26PNL 圆形卡口插座和 JY3116F-26SNL 圆形卡口插头 (如图 1 所示), 插头和插座分别有 26 个接触件。测试时, 先将插头插入插座中, 从插针和插孔的接线端测量每对插针和插孔之间的接触电阻值。之后将插头和插座分离, 分别浸入缓蚀剂样品中 3 次, 每次间隔 2 h, 之后在室温下放置 24 h。放置 24 h 后, 再将插头插入插座中, 测量每对插针和插孔之间的接触电阻值, 并计算涂覆缓蚀剂前后电阻的变化量。

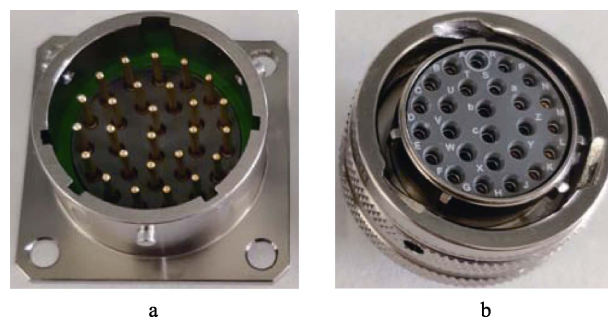


图 1 JY3112E16-26PNL 圆形卡口插座和 JY3116F-26SNL 圆形卡口插头

Fig.1 JY3112E16-26PNL circular bayonet socket and JY3116F-26SNL circular bayonet plug

1.2.6 材料适应性研究

1) 金属材料相容性。在已准备好的试样表面刷涂一层缓蚀剂,并在室温下放置 1 h。之后按照 MIL-L-87177A 中金属腐蚀性试验的试验条件进行湿热试验。

2) 非金属材料相容性。在准备好的涂漆试样表面,一半刷涂缓蚀剂,静置 30 min 后,将缓蚀剂膜层去除。参照 GB/T 6793—2006^[23]分别测量两部分的铅笔硬度,并进行对比,检验漆膜的铅笔硬度是否会受到缓蚀剂的影响。

2 结果与分析

2.1 外观及基本使用性能

在室温下,DZ-1 电子设备缓蚀剂溶液为均匀透明的浅黄色液体,有轻微的刺激气味,放置一段时间后,液体中会出现少量的絮状物,搅拌后可恢复原状。

1) 闭口闪点。经测试,DZ-1 电子设备缓蚀剂没有闪点,在使用、运输、储藏过程中的安全性高于有闪点的缓蚀剂。

2) 膜层厚度。DZ-1 电子设备缓蚀剂在试样表面形成的膜层,厚度为 4~5 μm ,属于超薄膜型缓蚀剂。较薄的膜层很容易去除,便于对材料表面进行喷漆等操作。

3) 可喷涂性。在 4 $^{\circ}\text{C}$ 的环境中放置 24 h,不影响 DZ-1 电子设备缓蚀剂的可喷涂性。如图 2 所示,用喷枪喷涂后,可在试样表面形成均匀、无缺陷的膜层。



图 2 涂覆电子设备缓蚀剂的铝合金试样

Fig.2 Aluminum alloy sample coated with electron equipment corrosion inhibitor

4) 膜层透明性。如图 3 所示,可以清晰地看到试样表面白色的模拟腐蚀点。由于 DZ-1 电子设备缓蚀剂的液体为浅黄色透明溶液,形成的膜层厚度小于 5 μm ,因此有很好的透明性,方便维护人员发现材料表面产生的腐蚀点,并进行处理。

5) 膜层可鉴别性。如图 4 所示,可以清晰地看到试样表面涂覆缓蚀剂的部分与未涂覆部分的分界线,在施工时可以轻易区分已涂覆缓蚀剂的区域和未涂覆区域,确保没有遗漏。

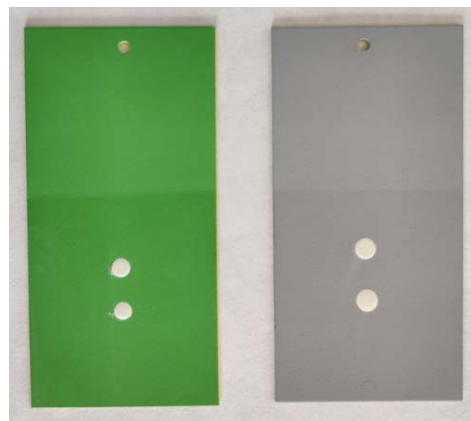


图 3 缓蚀剂膜层下铝合金表面的模拟腐蚀点

Fig.3 Simulated corrosion points on aluminum alloy surface under corrosion inhibitor film

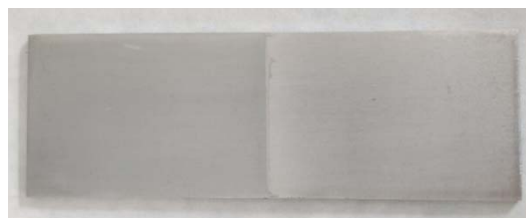


图 4 一半涂覆有电子设备缓蚀剂的铝合金试样

Fig.4 Aluminum alloy specimens half coated with corrosion inhibitor film

6) 膜层可去除性。缓蚀剂膜层可以用纱布蘸 120#汽油或 200#溶剂汽油,以及 RJ-1 溶剂型清洗剂擦洗去除,日光下目视检查无残留。

2.2 人造海水置换性

如图 5 所示,DZ-1 电子设备缓蚀剂可以完全去除 45 钢试样表面的人造海水。试验结束后,45 钢试样没有出现任何腐蚀。海洋大气环境具有高温、高湿、高盐雾的特点,容易在电子设备表面形成含盐的水膜。DZ-1 电子设备缓蚀剂可以很好地去除材料表面的水膜和盐分,并且溶剂可以快速挥发,使缓蚀剂迅速成膜,防止水汽、盐分等腐蚀性介质接触材料表面,起到防腐蚀的作用。



图 5 人造海水置换性试验后的试样外观

Fig.5 Appearance of the sample after the artificial seawater replacement test

2.3 金属腐蚀性

缓蚀剂的金属腐蚀性试验结果见表 2。镁合金在电子设备中主要用作机架、支架；铝合金主要用作电子设备的外壳、底盘；铜和黄铜主要用作电子设备的触点和导线；锌主要用作钢材和钢结构件的表面镀层（如镀锌钢板）；镉主要被用作螺栓、螺母、垫圈等的保护性镀层。试验结果表明，DZ-1 电子设备缓蚀剂对镁合金、铝合金、铜、黄铜、锌和镉具有良好的缓蚀作用，试验中测得的缓蚀剂对这 6 种金属材料的腐蚀性远低于技术指标值，不会对电子设备中常用的材料以及零部件的保护性镀层造成腐蚀。

2.4 耐中性盐雾和耐酸性盐雾

经试验，DZ-1 电子设备缓蚀剂达到了耐中性盐雾 168 h 和耐酸性盐雾 96 h 无锈蚀的要求。在中性盐雾试验过程中，涂覆有 DZ-1 电子设备缓蚀剂的 2A12-T4 铝合金试样，168 h 后无可见腐蚀，试样表

面形貌如图 6 所示。
涂覆有 DZ-1 电子设备缓蚀剂的黄铜试样在中性盐雾试验过程中，168 h 后无可见腐蚀，试样表面情况如图 7 所示。

表 2 电子设备中常用金属材料的腐蚀性试验结果和技术指标
Tab.2 Corrosion test results and technical indicators of commonly used metal materials in electron equipment

试验项目	试样材料	试验结果（质量变化）/(mg·cm ⁻²)	MIL-L-87177A 规定技术指标/(mg·cm ⁻²)
金属腐蚀性	镁合金 ZM5	0.01	≤0.5
	锌 Zn-3	0.02	≤0.5
	镉 Cd-3	0.04	≤0.5
	铝合金 2A12-T4	0.01	≤0.2
	铜 T2	0.02	≤0.2
	黄铜 H62	0.03	≤0.2

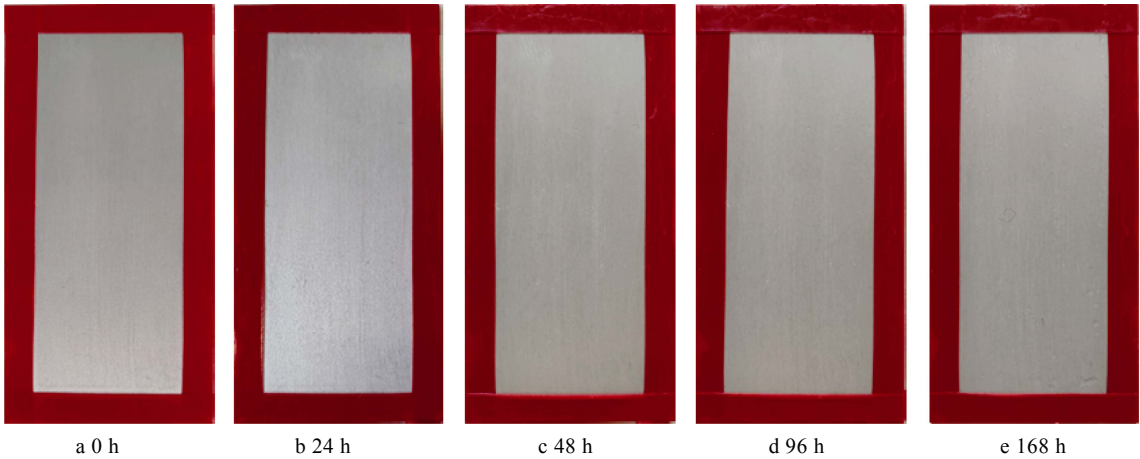


图 6 铝合金试样在耐中性盐雾试验中的外观
Fig.6 Appearance of the aluminum alloy sample in the neutral salt spray test

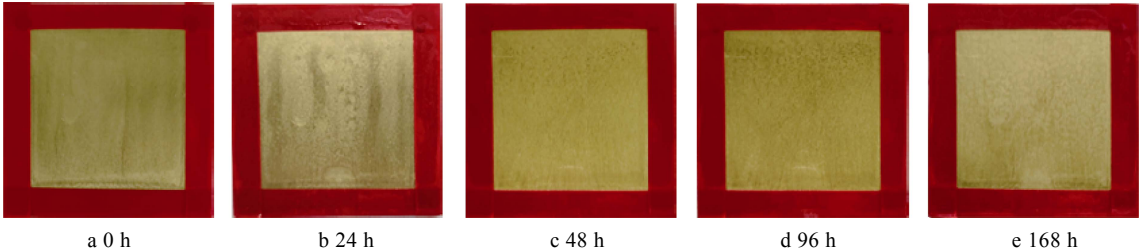


图 7 黄铜试样在耐中性盐雾试验中的外观
Fig.7 Appearance of the brass sample in the neutral salt spray test

涂覆有 DZ-1 电子设备缓蚀剂的铝合金试样在酸性盐雾试验过程中，96 h 后无可见腐蚀，试样的表面形貌如图 8 所示。
涂覆有 DZ-1 电子设备缓蚀剂的 H62 黄铜试样在酸性盐雾试验过程中，96 h 后无可见腐蚀，试样的表面形貌如图 9 所示。

2.5 对电子元件电学性能的影响

由于电子设备中有很多电连接器和电子元件，因此需要测试 DZ-1 电子设备缓蚀剂对电子元件电学性能的影响。试验结果见表 3，DZ-1 电子设备缓蚀剂满足了涂覆缓蚀剂前后电连接器接触电阻的变化不大

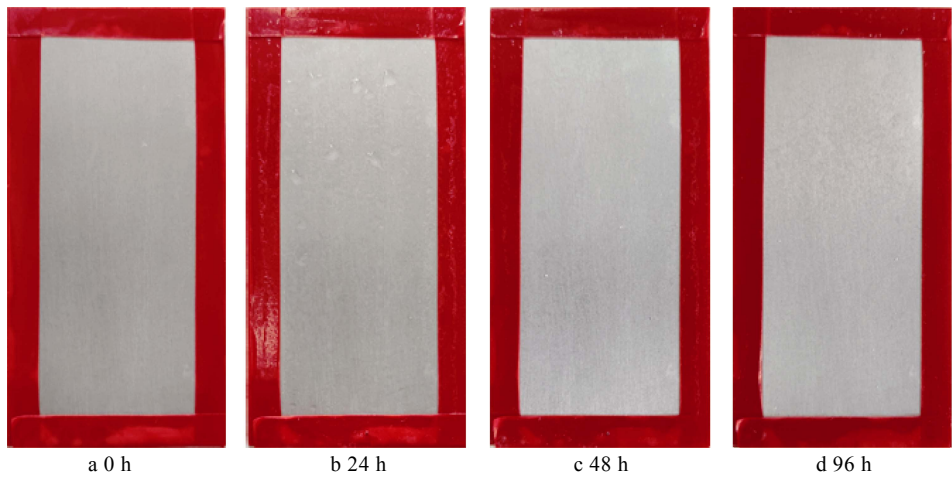


图 8 铝合金试样耐酸性盐雾试验中试样外观
Fig.8 Appearance of the aluminum alloy sample in the acid salt spray test

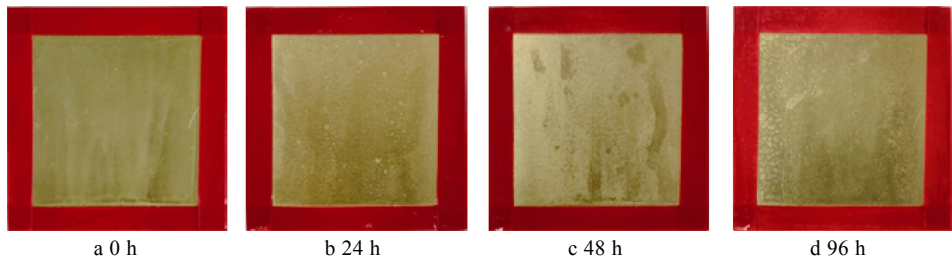


图 9 黄铜试样耐酸性盐雾试验中试样外观
Fig.9 Appearance of the brass sample in the acid salt spray test

表 3 缓蚀剂对电子元件电学性能的影响
Tab.3 The effect of inhibitor on the electrical properties of electron equipment

装针 编号	初始接触 电阻/mΩ	涂覆缓蚀剂 后的接触电阻/mΩ	接触电阻 变化/mΩ	装针 编号	初始接触 电阻/mΩ	涂覆缓蚀剂 后的接触电阻/mΩ	接触电阻 变化/mΩ
A	2.14	2.29	0.15	P	2.14	2.21	0.07
B	2.21	2.30	0.09	R	2.18	2.39	0.21
C	2.32	2.34	0.02	S	2.26	2.37	0.11
D	2.21	2.22	0.01	T	2.21	2.28	0.07
E	2.20	2.24	0.04	U	2.16	2.28	0.12
F	2.08	2.14	0.06	V	2.21	2.33	0.12
G	2.13	2.16	0.03	W	2.16	2.31	0.15
H	2.16	2.22	0.06	X	2.15	2.23	0.08
J	2.24	2.31	0.07	Y	2.20	2.22	0.02
K	2.14	2.25	0.11	Z	2.15	2.25	0.10
L	2.18	2.24	0.06	a	2.15	2.27	0.12
M	2.25	2.28	0.03	b	2.15	2.26	0.11
N	2.30	2.42	0.12	c	2.15	2.18	0.03

于 5 mΩ 的技术指标要求，对电连接器和电子元件的电学性能影响很小。

在具有良好抗腐蚀性能的同时，不影响电子元件的电学性能是电子设备缓蚀剂研制的难点。通过多种防锈剂复配，调整缓蚀剂中不同组分的添加量，使缓蚀剂形成 5 μm 以下的超薄软膜，满足技术指标的要求。

2.6 材料适应性研究

DZ-1 电子设备缓蚀剂主要用于电子设备上已有涂层或镀层的表面以及表面涂层、镀层已损坏或被移除的区域的防护。电子设备内部结构复杂，使用的材料种类多，为确保缓蚀剂对电子设备中使用的材料没有危害，需要进行材料适应性研究，确定缓蚀剂是否

会腐蚀裸材和经过电镀、阳极氧化等处理后的材料表面，以及对材料表面漆膜性能是否有影响。

湿热试验后的金属试样的表面形貌如图 10 所示。

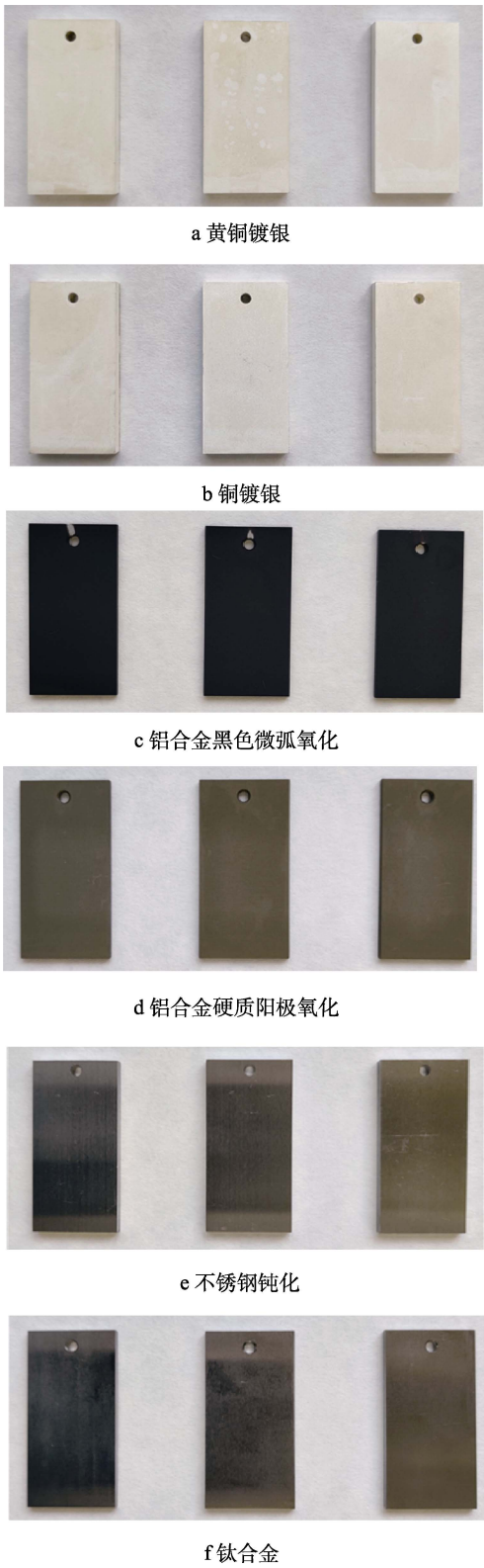


图 10 湿热试验后的试样表面

Fig.10 Sample surface after damp heat test: a) silver plating on brass; b) silver plating on copper; c) black micro arc oxidation of aluminum alloy; d) hard anodizing of aluminum alloy; e) passivation of stainless steel; f) titanium alloy

H62 镀银和 T2 镀银的试样表面，部分区域有轻微的变色，没有出现腐蚀。2A12-T4 铝合金黑色微弧氧化、2A12-T4 铝合金硬质阳极氧化、1Cr18Ni9Ti 不锈钢钝化及 TC4 钛合金试样的表面均没有变色和腐蚀。说明缓蚀剂对电子设备中常用的材料表面处理工艺有良好的相容性，不会腐蚀裸材和经过电镀、阳极氧化及钝化处理后的材料表面。

DZ-1 电子设备缓蚀剂对漆膜的铅笔硬度的影响试验结果见表 4。2A97 铝合金、300M 不锈钢及 AC531/CF8611 复合材料试样表面漆膜的铅笔硬度没有受到缓蚀剂的影响，测得的铅笔硬度均为 4H，说明 DZ-1 电子设备缓蚀剂不会影响电子设备外壳、机箱等部件表面漆膜的性能。

表 4 缓蚀剂对漆膜的铅笔硬度的影响

Tab.4 The effect of inhibitor on the pencil hardness of paint film

底材及喷涂的油漆的牌号		涂覆缓蚀剂部分的漆膜的铅笔硬度	未涂覆缓蚀剂部分的漆膜的铅笔硬度
2A97	QH-15 底漆	4H	4H
	QH-15 底漆+QFS-15 面漆	4H	4H
	TB06-9 底漆	4H	4H
300M	镀锡钛	4H	4H
	+H06-1011H 底漆	4H	4H
AC531/CF8611 试板	H01-101H 清漆+H06-1371 底漆	4H	4H

3 结论

1) DZ-1 电子设备缓蚀剂没有闪点，在使用、运输及贮存过程中具有很高的安全性。

2) DZ-1 电子设备缓蚀剂基本使用性能良好，能够快速在材料表面形成透明度高、均匀、无缺陷的薄膜。

3) DZ-1 电子设备缓蚀剂对电子设备中常用的金属材料有良好的缓蚀剂性能，对不同的表面处理工艺及漆膜有良好的相容性。

4) DZ-1 电子设备缓蚀剂具有较强的水置换能力，可以去除电子设备表面及内部的水分，并且不会影响电子设备中插头、连接器等电子元件的电学性能。

参考文献：

[1] 陈群志, 鞠明, 余文波, 等. 严酷环境下飞机外场腐蚀防护对策与措施[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 1-7.
CHEN Qun-zhi, JYU Ming, YU Wen-bo, et al. Counter-

- measures for aircraft field corrosion protection under the severe environment condition[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(3): 1-7.
- [2] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive corrosion control of naval aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [3] 姜海勋, 姜国杰, 孙志华, 等. 航空装备腐蚀维护维修新材料研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 22-27.
JIANG Hai-xun, JIANG Guo-jie, SUN Zhi-hua, et al. Research progress of new corrosion maintenance or repair materials for aviation equipments[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(12): 22-27.
- [4] 郁大照, 温德宏, 王琳, 等. 飞机电气线路互联系统海洋环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 46-50.
YU Da-zhao, WEN De-hong, WANG Lin, et al. Marine climate environmental adaptability of aircraft electrical wiring interconnection system[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(4): 46-50.
- [5] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 72-77.
CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian, KANG Xian-hai. Methods for military aircraft field corrosion prevention and control[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(2): 72-77.
- [6] US Air Force. Corrosion prevention and control, cleaning, painting, and marking of USAF support equipment (SE)[R]. Georgia: Robins Air Force Base, 2014.
- [7] 任召, 焦超锋, 张丰华. 机载电子设备三防设计[J]. 中国新通信, 2019, 21(13): 153.
REN Zhao, JIAO Chao-feng, ZHANG Hua-feng. Three-proof design of airborne electronic equipment[J]. China new telecommunications, 2019, 21(13): 153.
- [8] 张友兰, 李树华. 海洋环境条件对机载电子设备的影响[C]// 1998 电子产品防护技术研讨会论文集. 庐山, 1998. (余不详)
ZHANG You-lan, LI Shu-hua. Effect of marine environmental conditions on airborne electron equipment[C]// 1998 Symposium on electronic product protection technology. Lushan: [s. n.], 1998.
- [9] 鲁远曙, 左卫. 东南沿海气候条件对电子设备的影响及环境适应性对策[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 46-51.
LU Shu-yuan, ZUO Wei. Effect of climate conditions on electron equipment in southeast coastal areas and countermeasures for environmental adaptability[J]. Equipment environmental engineering, 2004, 1(3): 46-51.
- [10] 姜国杰, 杨勇进, 王强, 等. YTF-3 飞机硬膜缓蚀剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 19-23.
JIANG Guo-jie, YANG Yong-jin, WANG Qiang, et al. Application research on YTF-3 aircraft corrosion inhibitor with hard film[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(1): 19-23.
- [11] 姜国杰, 杨勇进, 孙志华, 等. RJ-1 溶剂型飞机清洗剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 142-145.
JIANG Guo-jie, YANG Yong-jin, SUN Zhi-hua, et al. Application research on RJ-1 non-aqueous aircraft cleaner[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(4): 142-145.
- [12] 王国立, 姜国杰, 孙志华. ECI-1 油膜缓蚀剂对发动机及附件防护的应用研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 6-12.
WANG Guo-li, JIANG Guo-jie, SUN Zhi-hua. Application of ECI-1 oil film corrosion inhibitor for engine and accessory protection[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(2): 6-12.
- [13] US Air Force. Cleaning and corrosion prevention and control, aerospace and non-aerospace equipment[R]. Georgia: Robins Air Force Base, 2003.
- [14] FAA AC 43-206, Inspection, prevention, control, and repair of corrosion on avionics equipment[S].
- [15] 李哈晔. 铜基电镀银层防变色的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
LI Han-ye. Study on preventing silver film plated on copper from tarnishing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [16] 张喆. 镀铜层电接触润滑保护剂的研究与制备[J]. 价值工程, 2011, 30(17): 29-30.
ZHANG Zhe. Research and preparation of copper plate electrical contact protective lubricant agent[J]. Value engineering, 2011, 30(17): 29-30.
- [17] MIL-PRF-81309G, Corrosion preventive compounds, water displacing, ultra-thin film[S].
- [18] MIL-L-87177A, Lubricants, water displacing, synthetic[S].
- [19] Q/AVIC 03018, 飞机硬膜脱水防锈剂规范[S].
Q/AVIC 03018—2014, Machine epidural dewatering rust inhibitor specification[S].
- [20] GB/T 261—2008, 闪点的测定宾斯基-马丁闭口杯法[S].
GB/T 261—2008, Determination of flash point—Pensky-Martens closed cup method[S].
- [21] GB/T 10125—2012, 人造气氛腐蚀试验盐雾试验[S].
GB/T 10125—2012, Corrosion tests in artificial atmosphere—Salt spray tests[S].
- [22] GJB 150.11A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾试验[S].
GJB 150.11A—2009, Laboratory environment test methods for military material Part 11: Salt fog test[S].
- [23] GB/T 6739—2006, 色漆和清漆铅笔法测定漆膜硬度[S].
GB/T 6739—2006, Paints and varnishes—Determination of film hardness by pencil test[S].