

海洋环境下航空电连接器腐蚀行为规律研究

谭晓明, 张丹峰, 王德, 钱昂, 战贵盼

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 研究电子设备中电连接器的腐蚀问题。**方法** 以军用飞机典型电连接器为研究对象, 在实验室条件下模拟军用飞机服役的海洋环境条件, 开展加速腐蚀试验。得到电连接器宏观、微观腐蚀形貌, 接触电阻和绝缘电阻的变化规律, 分析加载电流和未加载电流对电连接器腐蚀行为的影响规律。**结果** 在腐蚀试验的前3个周期, 绝缘电阻值在1500~0 MΩ之间剧烈变化, 到第4个周期降到0 MΩ, 完全丧失绝缘性能。**结论** 加载电流明显加重了电连接器的腐蚀程度, 导致接触电阻快速增大, 腐蚀明显劣化了电连接器的导电性能。

关键词: 海洋环境; 电连接器; 加速腐蚀试验; 接触电阻; 绝缘电阻

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.009

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)02-0056-05

Corrosion Behavior of Aviation Electrical Connector in Marine Environment

TAN Xiao-ming, ZHANG Dan-feng, WANG De, QIAN Ang, ZHAN Gui-pan
(Qingdao Branch of Navy Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the corrosion problems of electrical connector in electronic equipment. Taking typical electrical connectors of military aircraft as the research object, the accelerated corrosion test was carried out under laboratory conditions to simulate the marine environment conditions of military aircraft in service. The macroscopical and microscopic corrosion morphology, the change laws of contact resistance and insulation resistance of electrical connectors were obtained, and the effects of loaded current and unloaded current on corrosion behavior of electric connectors were analyzed. In the first three cycles of the corrosion test, the insulation resistance varied drastically between 1500-0 MΩ and dropped to 0MΩ by the fourth cycle, completely lost the insulation properties. The results show that the load current significantly aggravates the corrosion of the electrical connector; leading rapid increase of the contact resistance. The corrosion remarkably deteriorates the electrical conductivity of the electrical connector.

KEY WORDS: marine environment; electrical connector; accelerated corrosion test; contact resistance; insulation resistance

腐蚀是导致航空电气系统及设备失效的主要因素之一, 军用飞机 30%~40%的航空电子设备失效的直接原因是腐蚀^[1-3]。海军飞机服役于高温、高湿、高盐雾的严酷海洋环境条件, 更是对航空电子设备的战技性能和可靠性构成严重挑战, 甚至引起飞行安全

事故。

美军资料表明, 50%以上的军用飞机机载电子设备故障是由腐蚀引起的, 其中以温度、湿度、盐雾、腐蚀性气体和霉菌引起的腐蚀故障最多, 占90%以上^[4-5]。2008年2月28日, 美军价值达十亿美

收稿日期: 2019-07-20; 修订日期: 2019-09-06

Received: 2019-07-20; Revised: 2019-09-06

作者简介: 谭晓明(1975—), 男, 博士, 主要研究方向为飞机腐蚀防护与控制。

Biography: TAN Xiao-ming (1975—), Male, Ph. D., Research focus: corrosion prevention and control of aircraft.

元的 B-2 战略轰炸机在关岛安德森空军基地坠毁，其直接原因就是由于潮湿空气导致电子设备信号故障，引起飞行员误操纵而失速坠毁。

根据统计表明，现代军用飞机上的电缆铺开长度可长达十公里，需要用到的电连接器约 800~1000 个^[6-7]。随着装备的发展，这个数量还会增加。同时相关数据显示，电连接器失效概率约占组成系统电子元器件失效案例总数的 40%~50%。系统中任何一个电连接器中的任何一个接点失效，往往就能造成整个设备系统的瘫痪、失效和重大的事故发生^[8-11]。

经腐蚀普查发现，海军飞机长期服役于恶劣的海洋气候环境下，其高温、高湿、空气中的腐蚀性物质、盐雾和各种霉菌对电子设备具有极大的破坏性，直接影响了机载设备的导电、磁导、电感、电容、电子发射和电磁屏蔽等参量的改变，从而引起设备故障，降低完好率。高湿环境使得海军飞机电子设备频率发生漂移，轻者导致噪声干扰影响通信质量，重者导致通信不畅，甚至联系中断，设备无法正常工作。例如，经常执行海上超低空飞行任务的某型直升机，电插件壳体腐蚀烂透，插针锈蚀严重甚至粉化^[12]。

以军用飞机 P20K9Q 型电连接器为研究对象，在实验室条件下模拟海军飞机服役的盐雾条件，开展酸性盐雾试验，分析加载电流和未加载电流对电连接器腐蚀行为的影响规律。

1 试验

1.1 试验件

试验的电连接器型号为 P20K9Q，共 4 个试验件，分别标记为 C、F、G 和 H。电连接器试验件制备过程中，用剥线钳截取相同长度的耐高温绝缘航空导线，并且在两端准备好适当长度的线头。接着在靠近另一端处套上打印好标记的热缩管，并进行热缩处理。最后在工作台上用电烙铁将导线另一端与插针插孔的接线端进行焊接处理，完成试验件的制备工作。其中，C 号件和 G 号电连接器不加载电流，F 号件和 H 号电连接器加载 10A 直流电流载荷。

1.2 盐雾试验

参考 GJB 150.11A—2009《军用装备实验室环境试验方法》^[13]，确定盐雾试验条件：试验箱温度为 40℃，喷雾溶液是 NaCl 质量分数为 5%、pH=3 的冰醋酸 NaCl 溶液；盐雾沉降量为 1~2 mL/(cm²·h)。

1.3 试验周期

每个盐雾试验周期为 24 h，每隔一个周期暂停盐雾试验，并对电连接器进行宏观、微观腐蚀形貌观察和分析，测量接触电阻和绝缘电阻，分析腐蚀行为规律，研究加载电流的影响。盐雾试验 14 个周期，总

共 336 h。

2 结果与分析

2.1 宏观腐蚀形貌

经过 14 个周期的酸性盐雾试验后，电连接器壳体表面涂层变色、龟裂、脱落和白色粉状腐蚀产物堆积。未腐蚀和腐蚀 14 个周期的电连接器和电连接器母头的宏观形貌分别如图 1 和图 2 所示。

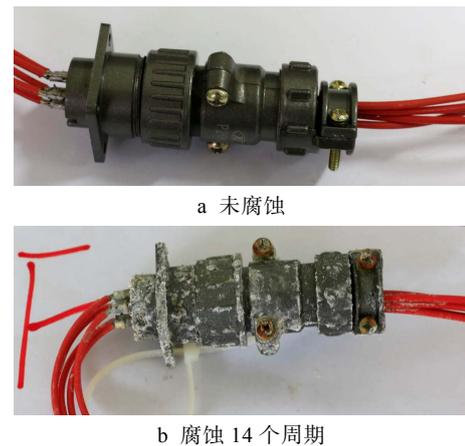


图 1 电连接器的宏观形貌

Fig.1 Morphology of electric connector: a) no corrosion; b) corrosion of 14 cycles



图 2 电连接器母头的宏观形貌（腐蚀 14 个周期）

Fig.2 Morphology of electric connector master: a) no corrosion; b) corrosion of 14 cycles

根据试验结果可知,电连接器的腐蚀重点部位为壳体、母头和紧固件。电连接器壳体的宏观腐蚀形貌为漆料层变色、龟裂、脱落和腐蚀产物堆积;电连接器母头的宏观腐蚀形貌为漆料严重变质、大量脱落,腐蚀产物大量堆积;电连接器紧固件的宏观腐蚀形貌为严重锈蚀、锈蚀产物大量堆积,甚至失去紧固功能。

2.2 微观腐蚀形貌

采用XX型扫描电镜对电连接器插针进行微观形貌观察,对比分析了未腐蚀、腐蚀未加载电流、腐蚀加载电流条件下电连接器插针微观形貌的区别。未腐蚀条件下、未加载电流和加载10 A电流条件下电连接器插针的微观腐蚀形貌如图3所示。可见,不加载电流条件下,腐蚀14个周期后,电连接器插针腐蚀较轻,表面只有少量的腐蚀微孔,除了个别微孔直径达到50 μm外,其他微孔直径均小于10 μm,如图3b所示。加载10 A电流条件下,电连接器插针表面布

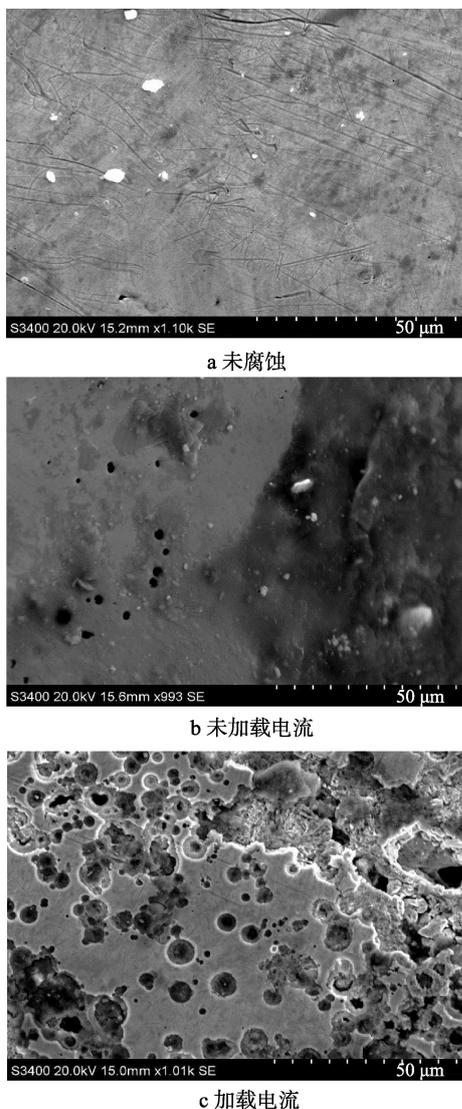


图3 电连接器插针微观形貌

Fig.3 Micromorphology of electrical connector pins: a) no corrosion; b) unloaded current; c) loaded current

满腐蚀产物,腐蚀微孔尺寸大,而且致密,有的微孔直径达到100 μm,如图3c所示。

对比分析加载与不加载电流情况下电连接器插针的微观腐蚀形貌可知,加载电流荷载大大加速了电连接器插针的腐蚀程度。电连接器微观腐蚀形貌变化过程为:先出现腐蚀起泡现象,后腐蚀泡破裂,出现腐蚀孔,接着腐蚀孔深度和范围不断扩大,后连成一片出现腐蚀沟,最后表面材料出现变质,出现大范围的腐蚀风化现象。

2.3 接触电阻变化规律

航空电连接器的接触电阻是指两个接触导体在接触部分产生的电阻,主要是指插针与插孔连接处造成的电阻。接触电阻的测量一般采用接触电阻-毫伏法,借助毫欧计对电连接器进行接触电阻测量。在试验中对电连接器进行了接触电阻阻值测量,四组试验件都焊接有导线,并且每一个电连接器导线的型号和长度保持一致。在测量时,保证导线的平直,确保测量夹子夹持到位。每一次测量3组数据,取平均值作为有效值,测量结果如图4所示。

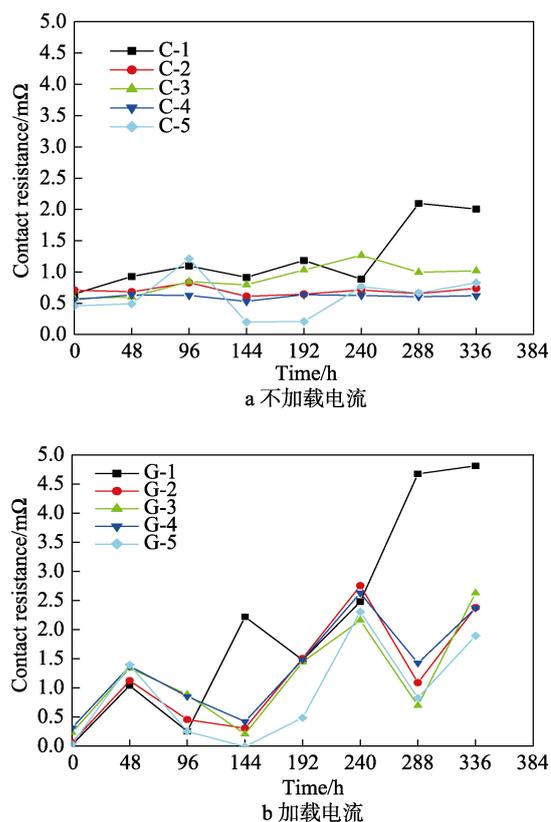


图4 酸性盐雾条件下电连接器插针接触电阻变化规律
Fig.4 Change law of contact resistance of electric connector plug under acid salt fog conditions: a) unloaded current; b) loaded current

酸性盐雾条件下,未加载电流的电连接器接触电阻变化缓慢,如图4a所示。加载电流引起电连接器接触电阻变化剧烈,接触电阻最大值增大到5 MΩ。

因此,加载电流明显增大了电连接器接触电阻的上升速率,进一步破坏了试验件的电气性能。

2.4 绝缘电阻变化规律

航空电连接器的绝缘电阻是指在电连接器的绝缘部分施加一定大小的电压,导致该部分的绝缘破坏,从而在表面或内部产生泄露电流而呈现出的电阻值。绝缘电阻是衡量电连接器电气性能的一个重要指标。绝缘电阻值低,则表示泄漏电流大,而过大的泄漏电流将会产生大量的热和直电解,最终造成绝缘性能的破坏或使电连接器的电性能变差。温度、湿度、酸性、污损等因素都能够造成绝缘材料的破坏,从而引起绝缘电阻的降低^[14]。

采用绝缘电阻测试仪对电连接器进行绝缘电阻测量,试验中对第三组和第五组试验件进行了绝缘电阻值的测量。两组电连接器都焊接有导线,并且每一个试验件导线的型号和长度保持一致。在测量

时,将导线连接到接线端子上,在连接导线的 U 型端子和公头支座上确定好测量点,在接下来的测量中,每一次都在确定好的位置测量,最大程度上减小测量误差。每一次测量 3 组数据,最终取平均值作为有效值。

对 F 号电连接器加载电流载荷, G 号电连接器不加载电流载荷,在酸性盐雾环境中进行加速腐蚀试验, H 号电连接器在正常外界环境中加载电流载荷。通过对比试验,讨论酸性盐雾环境条件下加载电流载荷与不加载电流对电连接器绝缘电阻变化规律的影响。

在第 1 个试验周期内,酸性盐雾环境下的电连接器接触件与壳体之间绝缘电阻均遭到严重破坏,绝缘电阻值由 1500 MΩ 迅速下降到 0。第 2~3 个周期,绝缘电阻在短时间内迅速恢复到 1500 MΩ。到第 4 个试验周期,绝缘电阻又下降到 0,完全丧失绝缘性能,如图 5 所示。

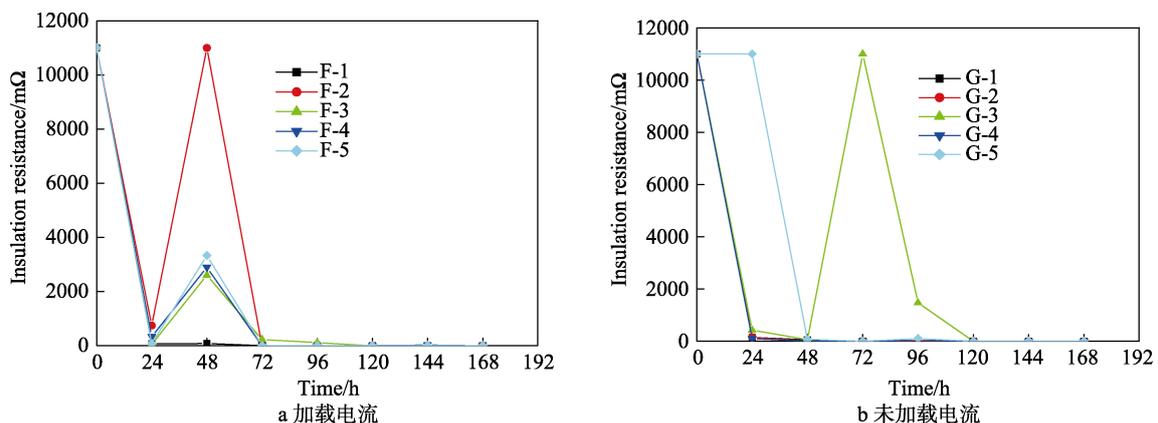


图 5 接触件与壳体间绝缘电阻变化规律

Fig.5 Change law of insulation resistance between the contactor and the shell: a) loaded current; b) unloaded current

3 结论

在实验室条件下模拟了军用飞机服役的海洋环境,针对 P20K9Q 型电连接器开展了酸性盐雾试验,分别从插针宏观、微观腐蚀形貌、接触电阻和绝缘电阻等四个方面分析了电连接器腐蚀行为规律,得到如下几个方面结论。

1) 酸性盐雾条件下,电连接器壳体的宏观腐蚀形貌为漆料层变色、龟裂、脱落和腐蚀产物堆积。电连接器母头的宏观腐蚀形貌为漆料严重变质、大量脱落,腐蚀产物大量堆积。

2) 未加载电流的电连接器插针表面腐蚀微孔数量较少,尺寸较小。加载电流条件的电连接器插针腐蚀微孔数量大大增多,尺寸明显增大,加载电流载荷大大加重了电连接器插针的腐蚀程度。

3) 酸性盐雾条件下,未加载电流的电连接器接触电阻变化平稳,基本在 0.5~1.5 MΩ 的范围内变化。

加载电流引起电连接器接触电阻变化剧烈,快速增大,最大值达到 5 MΩ,明显劣化了电连接器的导电性能。

4) 第 1 个试验周期,绝缘电阻由 1500 MΩ 迅速下降到 0。在第 2~3 周期,绝缘性能得到短时间恢复。第 4 个周期以后,绝缘性能完全丧失。

参考文献:

- [1] 易智全. 当前航空电子设备腐蚀现状与控制[J]. 科技资讯, 2010(6): 45.
YI Zhi-quan. Current Avionics Corrosion Status and Control[J]. Science & Technology, 2010, 17(6): 45.
- [2] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 102-105.
LUO Chen, LI Ming, SUN Zhi-hua, et al. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in

- Marine Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 102-105.
- [3] 王贵琴, 周顺先, 王凡胜. 电子设备的“三防”设计[J]. 北华航天工业学院学报, 2007, 17(6): 25-26.
WANG Gui-qin, ZHOU Shun-xian, WANG Fan-sheng. Anti-corrosion Design for Electric installation[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2007, 17(6): 25-26.
- [4] 谢义水. 舰载电子设备的三防设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 83-86.
XIE Yi-shui. Three-proofing Design of Shipborne Electronic Equipment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 83-86.
- [5] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 60-62.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 60-62.
- [6] 吕战鹏, 黄德伦, 杨武. 磁场对 Cu/NaCl 体系表现 Tafel 区阳极溶解的作用[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(3): 95-97.
LYU Zhan-peng, HUANG De-lun, YANG Wu. Effect of Magnetic Field on Anodic Dissolution of Copper in Sodium Chloride Solution in Apparent Tafel Range[J]. Corrosion & Protection, 2001, 22(3): 95-97.
- [7] 宇文涛, 冯皓, 赵钺. 印刷电路板在复合环境下的腐蚀[J]. 环境技术, 2010(12): 31-32.
YU WEN-tao, FENG Hao, ZHAO Yue. Corrosion of Printed Circuit Board in Compound Environment[J]. Environmental Adaptability&Reliability, 2010(12): 31-32.
- [8] 肖葵, 李晓刚, 董超芳, 等. 电子元器件环境腐蚀研究进展[J]. 金属世界, 2012(2): 23-25.
XIAO Kui, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Development on Environmental Corrosion of Electronic Components[J]. Metal World, 2012(2): 23-25.
- [9] 李金桂. 腐蚀控制系统工程学概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
LI Jin-gui. An Introduction to System Engineering Science for Corrosion Control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [10] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业出版社, 2005.
LIU Dao-xin. Corrosion and Protection of Materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [11] 朱敏波, 曹艳荣, 田锦. 电子设备可靠性工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
ZHU Ming-bo, CAO Yan-rong, TIAN Jin. Reliability Engineering of Electronic Equipment[M]. Xian: Xi Dian University Press, 2016.
- [12] 孙旭朋, 白桦, 阳辉, 等. 连接器和继电器自然暴露和盐雾试验腐蚀效应分析[J]. 环境技术, 2019, 37(3): 20-25.
SUN Xu-peng, BAI Hua, YANG Hui, et al. Analysis of Corrosion Effect of Natural Exposure and Salt Spray Test on Connectors and Relays[J]. Environmental Technology, 2019, 37(3): 20-25.
- [13] GJB 150. 11A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
GJB 150. 11A—2009, Laboratory Test Method for Military Equipment[S].
- [14] 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, JU Ming, YU Wen-bo, et al. Countermeasures for Aircraft Field Corrosion Protection under the Severe Environment Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 1-7.