

船舶及海洋工程装备

岛礁环境下航空电连接器的腐蚀
及其对信号传输的影响

许振晓, 郁大照, 刘琦

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: **目的** 通过腐蚀加速试验, 研究航空电连接器在某岛礁环境下的腐蚀特点和规律, 并在此基础上, 进一步研究航空电连接器腐蚀后对信号传输的影响。**方法** 根据该岛礁环境特点, 设计腐蚀加速试验环境谱, 基于此环境谱开展腐蚀加速试验, 观察不同试验周期航空电连接器的腐蚀形貌, 测量其接触电阻, 研究腐蚀机理。然后设计电路, 测量方波信号通过不同腐蚀程度电连接器的波形特征, 通过对比分析研究腐蚀对信号传输的影响。**结果** 5个腐蚀循环周期后, 电连接器插针表面开始出现微孔, 接触电阻位于3~11 m Ω ; 10个周期后, 插针表面微孔数量增多, 且坑蚀变深变大, 接触电阻位于7~19 m Ω ; 15个周期后, 插针表面部分镀金层脱落, 接触电阻位于15~36 m Ω 。电连接器腐蚀程度越深, 信号相位差、上升时间和过冲的测量值就越大; 信号频率增加, 这3个测量参数也相应变大。**结论** 盐雾和交变湿热加电应力环境对航空电连接器接触表面腐蚀作用明显。潮湿盐雾侵入电连接器内部是导致接触电阻升高的直接原因。接触电阻并不能完全反映出腐蚀对信号传输的影响。当接触电阻较小时, 电连接器腐蚀程度越大, 信号失真就越明显; 信号频率越高, 信号失真越明显。

关键词: 岛礁环境; 电连接器; 腐蚀; 接触电阻; 电接触模型; 信号传输

中图分类号: TG172.2; V252

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)04-0048-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.007

Corrosion of Avionics Connectors in Reef Environment and Its
Effect on Signal Transmission

XU Zhen-xiao, YU Da-zhao, LIU Qi

(Naval Aviation University, Shandong Yantai 264001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion characteristics and laws of avionics connectors in the reef environment of the South China Sea through the accelerated corrosion test and on this basis, explore the effect of corroded avionics connectors on signal transmission. According to the reef environment characteristics of the South China Sea, the environmental spectrum of accelerated corrosion test was designed. Based on this environmental spectrum, the accelerated corrosion test was carried out to

收稿日期: 2022-08-09; 修订日期: 2022-09-13

Received: 2022-08-09; Revised: 2022-09-13

作者简介: 许振晓(1988—), 男, 硕士。

Biography: XU Zhen-xiao (1988-), Male, Master.

通讯作者: 郁大照(1976—), 男, 博士。

Corresponding author: YU Da-zhao (1976-), Male, Doctor.

引文格式: 许振晓, 郁大照, 刘琦. 岛礁环境下航空电连接器的腐蚀及其对信号传输的影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 048-055.

XU Zhen-xiao, YU Da-zhao, LIU Qi. Corrosion of Avionics Connectors in Reef Environment and Its Effect on Signal Transmission[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 048-055.

observe the corrosion morphology of avionics connectors in different test cycles, measure their contact resistance, and study the corrosion mechanism. Then, the circuit was designed to measure the waveform characteristics of square wave signal passing through avionics connectors with different degrees of corrosion, and the effect of corrosion on signal transmission was studied through comparative analysis. After 5 corrosion cycles, micro holes began to appear on the pin surface of the avionics connectors, and the contact resistance was between 3 and 11 m Ω . After 10 cycles, the number of micro holes on the pin surface and the pit corrosion depth both increased, and the contact resistance was between 7 and 19 m Ω . After 15 cycles, part of the gold coating on the pin surface fell off, and the contact resistance was between 15 and 36 m Ω . The deeper the corrosion degree of the avionics connectors, the greater the measured value of the signal phase difference, rise time and overshoot. As the signal frequency increased, these three measurement parameters also increased correspondingly. Salt spray and alternating damp heat stress environment have obvious corrosion effects on the contact surface of avionics connectors. Wet salt mist invading the interior of the avionics connectors is the direct cause of the increase in contact resistance. Contact resistance cannot fully reflect the effect of corrosion on signal transmission. When the contact resistance is small, the greater the corrosion degree of the avionics connectors, the more obvious the signal distortion and the higher the signal frequency, the more obvious the signal distortion.

KEY WORDS: reef environment; avionics connectors; corrosion; contact resistance; electrical contact model; signal transmission

电连接器是飞机上电气系统的重要连接器件, 据统计, 一架现代歼击机使用的电缆长达 5~10 km, 其配套的电连接器约 800~1 000 多件, 一架大型运输机电缆总长度达 250 km, 其配套的电连接器约 4 500 多件^[1]。对服役在某岛礁环境下的飞机, 其环境极其恶劣, 盐雾质量浓度达到 0.369 4 mg/(100 cm²·d)^[2], 是内陆环境的 100 倍, 全年平均湿度更是达到 87%, 引发航空电连接器较高的故障率。张友兰等^[3]通过 3 年时间的实地跟踪调研发现, 在沿海机场环境服役飞机的电子设备故障率是内陆环境的 2~3 倍。如同种机型的同一批导航设备, 在岛礁环境使用时, 其故障率是沧州使用时的 3 倍, 其中又有 40%是由电连接器的失效而产生的。

国内外学者围绕电连接器腐蚀失效问题展开了大量研究。王玲等^[4]根据不锈钢壳体和铝合金壳体电连接器在热带海洋大气环境下的暴露试验结果, 从环境影响、材料工艺等方面分析了这 2 类电连接器壳体腐蚀和绝缘电阻变化原因。余俊^[5]通过加速退化试验研究了插拔行为对 Y11P-1419 型电连接器接触性能的影响, 发现插拔会造成电连接器接触电阻剧烈变化, 插拔次数越多, 变化幅度越大。申敏敏^[6]研究了该型电连接器在温度应力下性能退化的特点, 并建立了基于布朗运动的接触性能退化模型。Kong 等^[7]通过研究硝酸蒸汽对不同电连接器材料的影响, 发现与其他材料相比, 镀金材料具有更好的耐腐蚀性能, 而且镀金层越厚, 腐蚀程度越低, 腐蚀时间越久, 镀金层孔隙率越高。谭晓明等^[8]在酸性盐雾环境下研究了 P20K9Q 型电连接器在加载电流和不加载电流 2 种情况下的腐蚀行为, 分析发现, 加载电流明显加重了腐蚀程度, 导致接触电阻快速增大。以上研究主要围绕电连接器在各种环境中的失效机制展开, 重点关注腐蚀形貌和接触电阻的变化, 而较少见关于电连接器腐

蚀对信号传输影响的研究。

航空电连接器是飞机电信号传输的桥梁, 其性能参数的变化会影响信号的完整性^[9]。在某岛礁环境下, 除了电接触表面锈蚀, 接触电阻增大致使信号衰减外, 高温、高湿和盐雾引起的壳体腐蚀, 产生漏电通道, 从而导致其绝缘或介电性能下降, 信号的能量损失增加^[10], 会直接影响电连接器的导电和电磁屏蔽等参量的改变, 从而引起信号传输异常。本文基于某岛礁环境数据, 设计了交变湿热加盐雾加电应力加速腐蚀试验环境谱, 开展典型电连接器加速试验, 得到不同腐蚀等级的样本, 然后分别研究这些样本在电路中对信号传输产生的影响。

1 腐蚀加速试验

1.1 试验设计

试验对象选用某厂生产的同一批次的 J599/26KF96PNH 插头和 J599/20KE30PNH 插座各 4 个, 正常连接组成 4 组电连接器样品, 电连接器内部针孔分布如图 1 所示。取出 1 组不参与加速腐蚀试验, 仅作为对比参照, 并标记为样本 1。

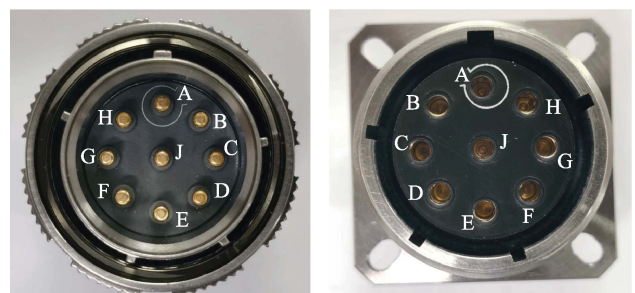


图 1 连接器内部插针和插孔

Fig.1 Physical drawing of internal pins and sockets of connector

热带海洋环境下,电连接器主要受温度变化、潮湿空气、盐雾因素的影响^[11],所以本文所做的腐蚀加速试验主要考虑湿热、盐雾和干湿交替,再加上电应力共4个影响因子。试验方案采用GJB 1217A—2009《电连接器试验方法》中的1001:盐雾试验和1002:交变湿热试验^[12]。盐雾试验用于模拟海洋环境下大气中的盐雾在电连接器表面的沉积。据统计,某岛礁2017年1月至2018年12月期间的最高温度为33.6℃^[13],考虑到飞机电子设备舱的半封闭结构内温度可能偏高,设定盐雾试验温度为35℃,目的是试验电连接器在极端恶劣环境下的腐蚀情况。交变湿热试验用于模拟航空电连接器腐蚀过程中温度变化带来的呼吸作用,使得潮气能够吸附在电连接器表面和渗入电连接器内部。本试验所用到的设备见表1。

表1 试验及检测设备

Tab.1 Test and detection equipment

试验及检测项目	设备型号	备注
盐雾试验	YWX/Q-150 盐雾腐蚀试验箱	用于喷盐雾
交变湿热试验	TH702 型高低温湿热试验箱	用于交变湿热
电应力	HY3005B 直流稳压源	用于施加电应力
形貌观测	KT-8 金相显微镜	用于观测腐蚀形貌
接触电阻测量	AT515 精密电阻仪	用于电气性能测试

按照先盐雾试验、后交变湿热加电应力试验的步骤进行。盐雾加交变湿热与电应力1个循环如图2所示。1个循环周期由盐雾试验24h和交变湿热加电应力试验96h组成,其中交变湿热的施加按图3进行。电应力作用在交变湿热试验阶段,电压设定为24V,作用时间为96h。第5个循环周期后取出1组作为样品2,第10个循环周期后取出1组作为样品3,试验完全结束后取出最后1组作为样品4,最终得到4个

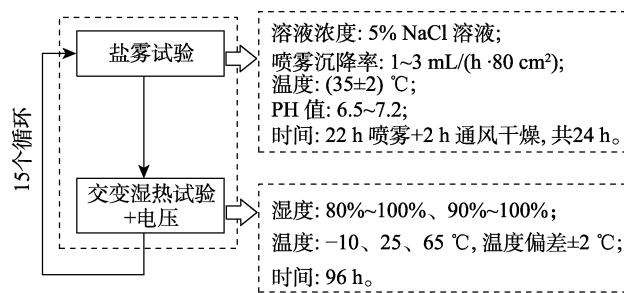


图2 腐蚀加速试验方法

Fig.2 Accelerated corrosion test method

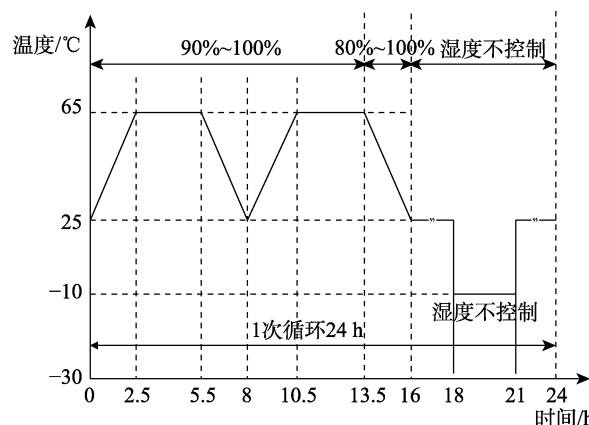


图3 交变湿热试验条件

Fig.3 Schematic diagram of alternating damp heat test conditions

不同腐蚀等级的样品用于后续试验研究。

1.2 电连接器内部腐蚀形貌观察

考虑到主要是电连接器内部插针、插孔的腐蚀对信号传输的影响较大^[14],腐蚀加速试验结束后,只对电连接器插头采用金相显微镜进行微观形貌观察。选取4个样品插头的同一位置的插针,对比分析插针表面镀金层的变化,“J”针位放大200倍的形貌如图4所示。

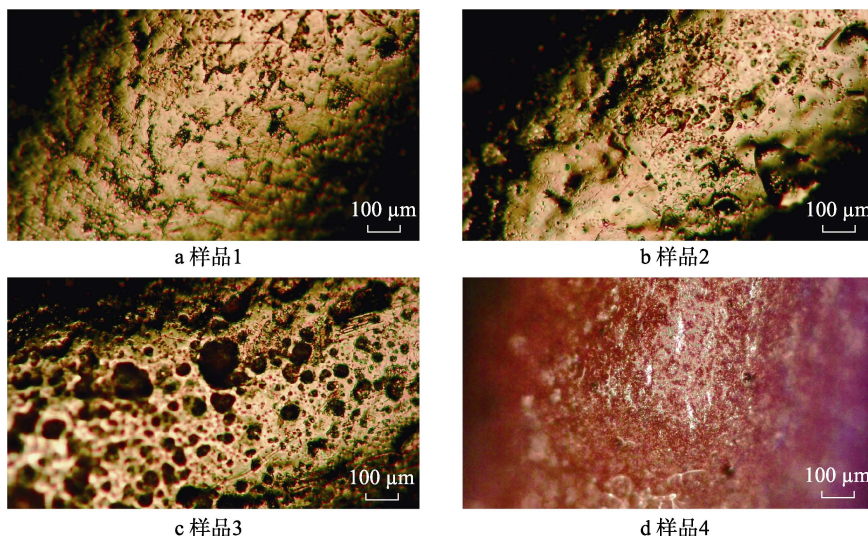


图4 试验样品腐蚀形貌

Fig.4 Corrosion morphology of test sample: a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3; d) sample 4

从图 4a 可以看出, 样品 1 虽然没有参与腐蚀加速试验, 但其镀金层表面也是凹凸不平的。理想情况下, 插针和插孔的两金属表面为完全接触, 电流线垂直接触面^[15], 如图 5 所示。然而实际情况却是 2 个粗糙面相接触, 镀金层表面凸起接触形成导电斑点。当电流流过时, 电流线将产生弯曲, 导致测量电阻比完整导线电阻偏大, 这就是收缩电阻产生的原理^[16], 如图 6 所示。

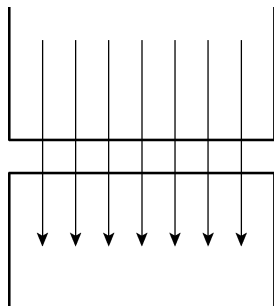


图 5 理想接触表面
Fig.5 Ideal contact surface

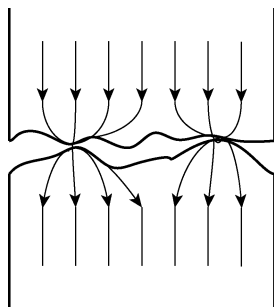


图 6 收缩电阻示意图
Fig.6 Schematic diagram of shrinkage resistance

经过 5 个循环周期的腐蚀试验后, 镀金层表面开始出现少量微孔, 如图 4b 所示。其分布并不均匀, 呈现一定的随机性。微孔的出现为孔隙腐蚀提供了先决条件, 潮湿的腐蚀环境使接触表面形成电解液, 这种浓缩的表面溶液通过表面缺陷在金和镍之间提供了一条低电导率的电解路径^[17]。

腐蚀 10 个循环周期后, 样品 3 的表面形貌如图 4c 所示。可以看出, 微孔数量明显增多, 且部分坑蚀较大。镀金表面的阴极部分比孔底的微小镍点面积大得多。阳极镍被迫提供电子, 腐蚀速率加快。随着坑越来越深, 腐蚀越来越严重, 底部可用的氧气越来越少, 使得腐蚀速率增加, 导致镍层下的铜基体腐蚀。镍层下铜基体的大量下切会导致镀层系统与基板的附着力变差, 从而可能导致镀层脱落。

样品 4 的部分镀层开始脱落, 基体腐蚀的形貌特点如图 4d 所示。经历过 15 个循环周期后, 插针表面部分镀层脱落, 基体表面被氧化形成绝缘或半绝缘的腐蚀产物, 阻止电流流过金属接触表面, 这就是膜层电阻产生的原理^[18], 如图 7 所示。

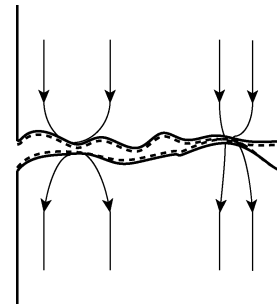


图 7 膜层电阻示意图
Fig.7 Schematic diagram of film resistance

1.3 接触电阻

接触电阻是衡量电连接器信号传输性能的重要指标^[19], 主要由收缩电阻和膜层电阻构成。随着腐蚀程度加重, 接触电阻逐渐变大, 必将对插头和插座直接接触的金属表面传输电流和信号的质量产生影响。采用 AT515 精密电阻仪对 4 个不同腐蚀程度的样品进行测试, 得到每个样品每组接触件的接触电阻, 每组接触件测 3 次取平均值, 最后算出每个样品所有插针的平均值。测量结果见表 2。

表 2 接触电阻测量结果
Tab.2 Contact resistance measurement results

插针编号	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
A	1.677 8	8.272 7	7.572 1	35.595 4
B	1.426 3	3.325 6	18.592 4	26.648 9
C	1.775 6	6.175 4	15.314 5	27.113 4
D	2.553 4	9.543 1	16.984 4	19.236 2
E	1.638 8	8.724 9	9.361 4	26.4170
F	1.610 5	5.951 3	15.687 2	23.428 5
G	1.505 1	10.521 4	15.485 2	15.582 1
H	1.536 8	8.761 6	16.935 7	26.370 9
J	2.348 1	9.497 4	16.917 4	26.926 8
均值	1.785 8	7.863 7	14.761 1	25.257 6

样品 1 没有参与腐蚀加速试验, 接触电阻值相对稳定, 且阻值较小, 均小于 3 mΩ。样品 2 的接触电阻分布在 3~11 mΩ, 分布较为分散。样品 3 的接触电阻分布在 7~19 mΩ, 也呈现一定的随机性。样品 4 的接触电阻分布在 15~36 mΩ, 分布更为广泛。样品 2、3、4 经历了不同循环次数的腐蚀加速试验, 它们的接触电阻值总体上呈现递增的趋势。与样品 1 接触电阻均值相比, 样品 2 增加了 3.4 倍, 样品 3 增加了 7.2 倍, 样品 4 增加了 13 倍。谭晓明等^[8]做过同类型试验, 测量了酸性盐雾条件下加载电流的电连接器的接触电阻, 试验时间为 336 h, 接触电阻从 0.4 mΩ 增加到 4.8 mΩ, 增加了 11 倍。各样品接触电阻的均值基本上能反映出其腐蚀程度, 与 1.2 节形貌观测的结果相对应。

2 腐蚀对信号传输的影响

如果只考虑接触电阻,就使得触点退化对信号传输的影响仅仅表现为能量或信号的衰减。但是电连接器退化后,由于接触面凹凸不平、表面劣化(表面腐蚀、氧化、水膜等)、触点结构形式等因素,触点并不是一个理想电阻^[20]。另外,接触电阻是在不大于100 mV的直流电压下测得的,与电连接器实际工作电压相差较大,因此电连接器的接触电阻并不能完全反映出其退化后对信号传输的影响,有必要作进一步的分析研究。

2.1 电接触模型

腐蚀退化后的接触表面分为3种区域^[21],如图8所示。第1种是金属直接接触区域,如位置(1)所示,该区域可以看成是霍姆接触模型,电流在接触点处发生收缩,使得电流线弯曲,传输路径延长,产生了收缩电阻。第2种是金属-腐蚀膜-金属接触区域,为半导体区,该区域中接触表面被氧化膜层所覆盖,其中一部分为氧化膜极薄时通过隧道导电的触点,产生了位置(2)的膜层电阻;另一部分为完全绝缘膜,将金属分隔开,从而产生了位置(3)的膜层电容。第3种是金属-空隙-金属接触区域,该区域中金属之间无直接接触,为绝缘区,如位置(4)所示,该区域产生了非接触电容。

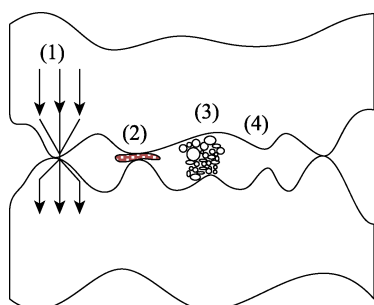


图8 电接触模型
Fig.8 Electrical contact model

这3种区域并不是单独存在的,它们共同位于腐蚀样品的接触表面,腐蚀退化后的接触表面就可以等效成电阻和电容并联组成的电路模型,如图9所示。因此,在信号电路中不能忽视电容的影响,下面通过试验研究腐蚀的电连接器接触表面对信号

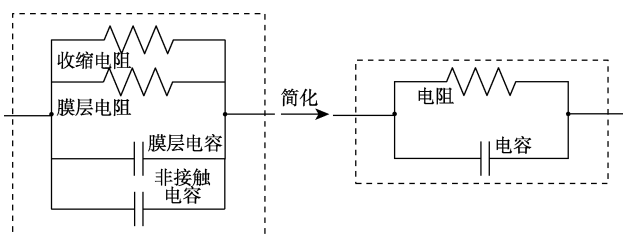


图9 等效电路模型
Fig.9 Equivalent circuit model

波形的影响。

2.2 试验设计

本节试验用到的仪器包括信号发生器和示波器,将之前的试验样品“J”针位接触件串联到两仪器之间,如图10所示。信号发生器产生一组方波信号,幅值为3 V,频率分别为2、10、100 kHz。信号分成2路同时等距传输给样品1和样品2,2路信号再等距传输到示波器用于显示测量和比较分析。然后分别用样品3和样品4代替样品2做相同的试验。以样品1的波形为基准,将其余3个样品的波形与其进行对比。测量的参数包括相位差、上升时间和过冲。



图10 试验方法
Fig.10 Schematic diagram of test method

相位差就是相位失真。相位差的产生是由于电容和电感对交流信号(电压或电流)具有延迟作用。当一个交流信号经过电容、电感和电阻的时候,总会有一个充放电的过程,这会导致这个交流信号的幅度变化时间“向后”推迟一段时间^[22],如图11所示。本试验所研究的相位差指的是样品2、3、4分别与样品1比较得到的相位差。

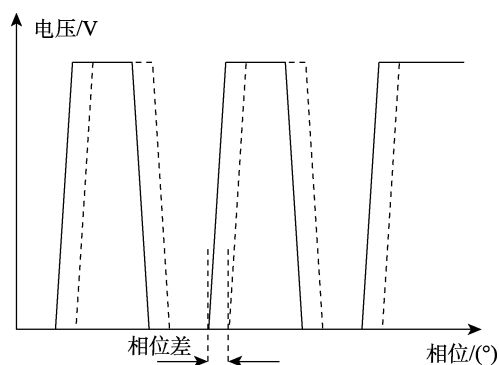


图11 相位差
Fig.11 Schematic diagram of phase difference

信号的上升时间是指脉冲瞬时值最初到达规定下限和规定上限的两瞬时之间的间隔。一般下限和上限分别定为脉冲峰值幅度的10%和90%^[23]。对于飞机控制信号,通常是方波信号,其上升沿非常陡峭。过冲就是第一个峰值或谷值超过设定电压,对于上升沿是指最高电压,而对于下降沿是指最低电压,如图12所示。过高的过冲能够引起假的时钟或数据错误,甚至能够导致电路元器件过早地失效^[24]。过冲的计算公式为:

$$\frac{V_a - V_b}{V_b} \times 100\%$$

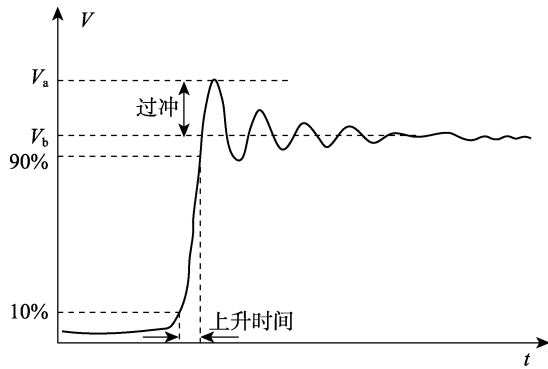


图12 上升时间和过冲

Fig.12 Schematic diagram of rise time and overshoot

2.3 测量结果分析

3组测量结果见表3—5。所测方波信号的幅值几乎一样,因此未在结果中展现。这也说明本试验所用样品的接触电阻较小,造成的能量损失也较少。

表3 $f=2$ kHz 时的测量结果
Tab.3 Measurement results at $f=2$ kHz

样品编号	相位差/(°)	上升时间/ns	过冲/%
1	0	60	2.611
2	0.150	70	2.623
3	0.327	95	2.632
4	0.584	165	2.689

表4 $f=10$ kHz 时的测量结果
Tab.4 Measurement results at $f=10$ kHz

样品编号	相位差/(°)	上升时间/ns	过冲/%
1	0	60	2.862
2	0.748	85	3.912
3	0.917	115	4.632
4	1.286	170	4.950

表5 $f=100$ kHz 时的测量结果
Tab.5 Measurement results at $f=100$ kHz

样品编号	相位差/(°)	上升时间/ns	过冲/%
1	0	60	2.889
2	1.440	100	3.451
3	1.880	130	3.873
4	1.913	185	4.574

从表3—5中可以看出,相位差、上升时间和过冲的变化趋势基本一致,所有频率下,3个测量参数都随腐蚀程度的增加而增加。当信号频率升高时,所有样品的3个测量参数也会相应增加。

电连接器的接触表面可以看成电阻与电容并联的结构。当电连接器的腐蚀程度增加时,电阻和电容都有不同程度的增加,主要是电容的影响造成信号相位差、上升时间和过冲变大。电连接器的信号传输性

能不仅与腐蚀程度有关,而且与频率相关^[25]。当频率较小时,电容处于断路状态,信号主要通过电阻传输,则信号的相位差较小,上升时间和过冲增加也较少。随着频率的增大,容抗值减小,信号通过电容的分量增大,电容对信号的影响作用凸显,造成信号的相位差增大,信号的上升时间和过冲增加的幅度也变大。

3 结论

1) 盐雾和交变湿热加电应力环境对航空电连接器接触表面腐蚀作用明显,随着腐蚀周期的增加,插孔表面蚀坑越来越多,面积越来越大,直至部分镀层脱落。基体金属暴露在盐雾和交变湿热环境下极易形成腐蚀膜层。

2) 潮湿盐雾侵入电连接器内部是导致接触电阻升高的直接原因。接触电阻在加速试验的5个循环之后,已经有较大变化,后期增加更为明显。变化的主要原因在于潮湿盐雾在毛细作用和呼吸作用下,渗入电连接器壳体螺纹口、定位槽等部位,从而进入电连接器内部,造成部分环境下的水分和氯离子等腐蚀介质含量持续增加。

3) 接触电阻虽然是衡量电连接器接触性能的重要指标,但并不能完全反映出腐蚀对信号传输的影响。当接触电阻较小时,电连接器的信号传输性能主要与接触面间的电容有关,并且与信号频率相关。电连接器腐蚀越严重,信号波形失真就越明显。信号频率越高,信号波形失真越显著。

参考文献:

- [1] 杨奋为. 军用电连接器创新发展研讨[J]. 机电元件, 2012, 32(4): 52-61.
YANG Fen-wei. Discussion on the Innovative Development of Military Electrical Connectors[J]. Electromechanical Components, 2012, 32(4): 52-61.
- [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): 101-107.
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): 101-107.
- [3] 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: 中国电子学会电子制造与封装技术分会, 1998.
ZHANG You-lan, LI Shu-hua. The Impact of Marine Environmental Conditions on Airborne Electronic Equipment[C]//1998 Proceedings of the Symposium on Electronic Product Protection Technology. Lushan: Electronic

- Manufacturing and Packaging Technology Branch of China Electronics Society, 1998.
- [4] 王玲, 杨万均, 张世艳, 等. 热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 5-9.
WANG Ling, YANG Wan-jun, ZHANG Shi-yan, et al. Environmental Worthiness Analyses of Electrical Connectors in Tropic Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 5-9.
- [5] 余俊. 插拔对电连接器接触性能退化规律影响的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
YU Jun. Study on the Influence of Plug-in on the Contact Performance Degradation of Electrical Connectors[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [6] 申敏敏. 电连接器恒定应力加速退化建模与验证[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
SHEN Min-min. Modeling and Verification of Constant Stress Accelerated Degradation of Electrical Connectors[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [7] KONG Zhi-gang, XU Liang-jun. Morphology and Electrical Contact Properties of Electrical Connection Materials in Corrosive Atmosphere[J]. Rare Metals, 2013, 32(2): 174-178.
- [8] 谭晓明, 张丹峰, 王德, 等. 海洋环境下航空电连接器腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 56-60.
TAN Xiao-ming, ZHANG Dan-feng, WANG De, et al. Corrosion Behavior of Aviation Electrical Connector in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 56-60.
- [9] TIMSIT R S. High Speed Electronic Connectors: A Review of Electrical Contact Properties[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2005(8): 1532-1545.
- [10] 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(6): 46-51.
LU Yuan-shu, ZUO Wei. The Influence of Southeast Coastal Atmospheric Environment on Electronic Equipment and the Countermeasure for Improving Environmental Adaptability[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(6): 46-51.
- [11] 刘琦, 郁大照, 王琳, 等. 航空电连接器海洋环境加速试验与腐蚀仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 18-27.
LIU Qi, YU Da-zhao, WANG Lin, et al. Acceleration Test and Corrosion Simulation of Aviation Electrical Connectors in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 18-27.
- [12] GJB 1626A—2009, 电连接器试验方法[S].
GJB 1626A—2009, Test Methods for Electrical Connectors[S].
- [13] 张梦龙, 赵志敏. 东南海域岛礁环境对武器装备的影响及对策研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 20-25.
ZHANG Meng-long, ZHAO Zhi-min. The Influence and Countermeasures Study of Weapon Equipment Influenced by Island-Reef Environment in the Southeastern Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 20-25.
- [14] 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.
- [15] GRATON O, FOUVRY S, ENQUEBECQ R, et al. Effect of Lubrication on DC and RF Electrical Endurance of Gold Plated Contacts Subjected to Fretting Wear[C]//2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque: IEEE, 2019.
- [16] MEYYAPPAN K, MCALLISTER A, VASUDEVAN V, et al. Impact of Corrosive Environment on Contact Resistance of Infrequently Mated Connectors[C]//2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). San Diego: IEEE, 2015.
- [17] 朱蒙. 酸性盐雾环境下连接器接触件腐蚀行为研究[J]. 机电元件, 2019, 39(5): 40-44.
ZHU Meng. Study on Corrosion Behaviour of Connector Contacts in Acidic Salt Spray Environment[J]. Electro-mechanical Components, 2019, 39(5): 40-44.
- [18] MEYYAPPAN K, MURTAGIAN G, KURELLA A, et al. Corrosion Studies on Gold-Plated Electrical Contacts[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14(3): 869-877.
- [19] 郁大照, 刘琦, 冯利军, 等. 电连接器微动腐蚀损伤行为与机理研究综述[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 233-245.
YU Da-zhao, LIU Qi, FENG Li-jun, et al. Review on the Behavior and Mechanism of Fretting Corrosion Damage of Electrical Connectors[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 233-245.
- [20] SUN A C, MOFFAT H K, ENOS D G, et al. Pore Corrosion Model for Gold-Plated Copper Contacts[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(4): 796-804.
- [21] 李雪清, 章继高. 镀金表面微孔腐蚀的电接触特点[J]. 电工技术学报, 2004, 19(9): 51-56.
LI Xue-qing, ZHANG Ji-gao. The Electric Contact Properties of Pore Corrosion on Gold Plated Surface[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004,

- 19(9): 51-56.
- [22] 丁凯, 陈晓光, 温源. 电缆分布电容对航天器低频交流信号传输的影响分析[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 554-556.
- DING Kai, CHEN Xiao-guang, WEN Yuan. Analysis of Influence of Cable Distributed Capacitance on Low Frequency AC Signal Transmission of Spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 554-556.
- [23] LI Qing-ya, GAO Jin-chun, FLOWERS G T, et al. Modeling and Analysis of Radio Frequency Connector Degradation Using Time Domain Reflectometry Technique[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(8): 35-42.
- [24] JI Rui, GAO Jin-chun, XIE Gang. Modeling and Analysis of the Effects of Electrical Contact Degradation on High-Speed Signal Transmission[J]. IEICE Electronics Express, 2018, 15(8): 20180243.
- [25] MALUCCI R D, PANELLA A P. Wave Propagation and High Frequency Signal Transmission across Contact Interfaces[C]//Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Montreal: IEEE, 2007.
- 责任编辑: 刘世忠