航空电连接器海洋环境加速试验与 腐蚀仿真研究

刘琦^{1,2},郁大照¹,王琳¹,许振晓¹,程贤斌¹

(1.海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264000; 2.92279 部队, 山东 烟台 264000)

摘要:目的 通过加速试验和有限元仿真,研究航空电连接器在南海岛礁服役条件下的失效行为和腐蚀机理。 方法 根据典型航空装备南海服役环境数据,设计海洋环境加速腐蚀试验环境谱,基于此环境谱开展航空电 连接器在实验室加速试验条件下的外观腐蚀、接触电阻、绝缘电阻和耐压强度的变化行为和机理研究。重 点分析接触电阻变化原因,并基于水平集方法,建立插针插孔结合处的 COMSOL 有限元腐蚀仿真模型,模 拟和验证接触件的腐蚀行为和机理。结果 3 种规格的电连接器均发生壳体腐蚀,但程度不同,其中不锈钢 壳体电连接器壳体腐蚀最轻,但壳体内部金属卡圈腐蚀最严重,其接触电阻波动最大。所有电连接器的耐 压强度和绝缘电阻均有明显减小。结论 导致接触电阻增加的直接原因是插针和插孔结合处的毛细区内发生 了严重腐蚀。有限元模型复现了腐蚀界面发展和腐蚀产物沉积过程。 关键词:电连接器;海洋环境;加速试验;腐蚀仿真;接触电阻;COMSOL 中图分类号: V252; TG172.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)11-0018-10

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.11.003

Acceleration Test and Corrosion Simulation of Aviation Electrical Connectors in Marine Environment

LIU Qi^{1,2}, YU Da-zhao¹, WANG Lin¹, XU Zhen-xiao¹, CHENG Xian-bin¹

School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aeronautical University, Yantai 264000, China;
 Unit 92279 of the PLA, Yantai 264000, China)

ABSTRACT: This paper studied the failure behavior and corrosion mechanism of aviation electrical connectors in the islands and reefs in South China Sea under conditions of service by accelerated test and finite element simulation. An environmental spectrum of accelerated corrosion test in marine environment was developed according to environmental data of typical aviation equipment in service in South China Sea, based on this environmental spectrum, the change behavior and mechanism of appearance corrosion, contact resistance, insulation resistance and voltage strength of aviation electrical connectors were re-

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-08-30

Received: 2021-07-20; Revised: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51375490)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51375490)

作者简介:刘琦(1990-),男,硕士,主要研究方向为海洋环境与舰载飞行器使用维修工程。

Biography: LIU Qi (1990—), Male, Master, Research focus: marine environment and carrier aircraft maintenance engineering.

通讯作者: 郁大照(1976-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀防护与控制。

Corresponding author: YU Da-zhao (1976-), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion protection and control.

引文格式:刘琦,郝大照,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):018-027.

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): 018-027.

searched under laboratory accelerated test conditions. The reasons of the change of contact resistance were analyzed, and a COMSOL finite element corrosion simulation model of the joint of the pin and socket was built to simulate and verify the corrosion behavior and mechanism of contacts. The results showed that the corrosion degree of the three types of electrical connectors was different. The appearance corrosion degree of the connectors with stainless steel shell was the lightest, but the corrosion degree of the inner metal clamps was the most serious, and the contact resistance fluctuated the most. The voltage strength and insulation resistance of all electrical connectors were obviously reduced. The direct cause of the increase of contact resistance was the serious corrosion in the capillary area at the junction of the pin and jack. The finite element model reproduced the process of corrosion interface development and corrosion product deposition.

KEY WORDS: electrical connector; marine environment; acceleration test; corrosion simulation; contact resistance; COMSOL

飞机在海上或沿海基地服役时,必须要面对高 温、高湿和高盐雾的环境气氛带来的腐蚀问题。电连 接器在飞机上广泛用于配电或传输信号,在这样的环 境中,如果发生壳体腐蚀、绝缘性能下降、导通电阻 增加甚至断路等问题,将有可能直接威胁飞行安全^[1]。 特别是接触件发生腐蚀时,将直接导致接触电阻增 加,对电力和信号传输产生不利影响。

Pradeep Lall 等^[2-4]建立了电极表面污染物扩散与 腐蚀动力学模型,提出了基于电化学极化计算温度/ 湿度环境下 Cu-Al 丝结合界面微电偶腐蚀速率的方 法,并将测得的开路电位和极化曲线斜率等 Tafel 参 数应用于腐蚀仿真模型当中。Li Chentao 等^[5]利用 COMSOL 模拟了室外典型变电站设备的大气腐蚀行 为,讨论了温度、相对湿度、pH 值、O₂浓度、液膜盐 度和泄漏电流强度等因素的影响。Kong Zhigang 等^[6] 研究了 HNO3 蒸汽对不同电连接器材料的影响,发现 镀金试样与其他试样相比,具有更好的耐腐蚀性能, 其腐蚀程度随镀金层厚度的增加而降低,镀金层孔隙 率随腐蚀时间的增加而增加。李云双等[7]研究发现, Au/Ni/Cu 薄膜失效的主要方式是表面金膜破裂,下方 Ni 和 Cu 发生腐蚀,并扩散到 Au 表面。笔者团队^[8-11]、 朱蒙^[12]、林雪燕^[13]、谭晓明和张丹峰等^[14-15]也开展 了不同环境对电连接器腐蚀影响的加速试验和仿真 研究。目前报道的航空电连接器加速腐蚀试验大多是 基于实验室单一环境变量开展的研究,不能反映真实 飞机服役环境下电连接器的失效行为和规律,而这对 于电连接器的寿命预测、故障分析以及机务维护工作 都是十分必要的。

本研究根据典型航空装备南海服役环境数据,设

计了盐雾加交变湿热加速腐蚀试验环境谱,开展了航空电连接加速试验和分析,并构建了 COMSOL 有限 元模型,用以模拟和分析电接触腐蚀失效机理。

1 加速试验

本海洋环境加速试验选取的试验对象为航空常用的 J599 型电连接器,采用的试样样品分别为 117 厂和 158 厂生产的 J599 型不同规格器件,具体规格和材料工艺见表 1。

航空电连接器工作于航空装备内部的半封闭环 境,不接受太阳辐射和雨水的直接作用,主要受潮湿 空气、盐雾、温度变化影响,故环境因子主要考虑湿 热、盐雾和干湿交替作用的影响。选用 GJB 1217A 电连接器试验方法中的"1001:盐雾试验"和"1002: 交变湿热试验",按照先盐雾试验、后交变湿热试验 的步骤进行。其中 1 个循环周期由 24 h 盐雾试验和 96 h 交变湿热试验组成。每 2 个循环周期后,对试样 做一次性能检测,试验共进行 14 个循环,总计 1680 h, 加速试验的循环如图 1 所示。

 1)盐雾试验。盐雾试验用于模拟自然环境下空 气中盐雾在电连接器表面的沉积。根据南沙岛礁实测 的最高温度设置盐雾试验的温度,基于南沙某岛礁
 2017 年 1 月至 2018 年 12 月的温度时值,统计出的 温度极值为 33.6 ℃,并考虑电连接器安装的内部半 封闭结构内传热的影响,设置盐雾试验温度为 35 ℃。 其他条件参见图 1。

2)交变湿热试验。交变湿热试验用于模拟航空 装备使用中温度变化带来的腐蚀过程的呼吸作用,形

| Tab.1 Specifications and materials of electrical connector test samples | | | | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------|-------|------|--|--|--|
| 序号 | 型号/规格 | 壳体材料及工艺 | 生产厂家 | 数量/件 | | | |
| 1 | J599/20WD97PN J599/26WD97SN | 铝合金壳体镀镉军绿色 (文中称为铝合金镀军绿镉电连接器) | 117 厂 | 4 | | | |
| 2 | J599/20MKF-32PN J599/26MKF-32SN | 不锈钢钝化 (文中称为不锈钢电连接器) | 158 厂 | 4 | | | |
| 3 | J599/20MWE-35SN J599/26MWE-35PN | 铝合金壳体镀镉军绿色 (文中称为铝合金镀层电连接器) | 158 厂 | 4 | | | |

表 1 电连接器试验样品规格和材料

成潮气在电连接器表面吸附和渗透的作用力,使得潮气 部分渗入密封的电连接器内部,试验条件如图2所示。





Fig.1 Methods of accelerated test for Marine environment



图 2 交变湿热试验条件

Fig.2 Schematic diagram of alternating humidity and heat test conditions

2 试验结果

2.1 外观腐蚀

加速试验结束后,3种试验样品外观腐蚀形貌如 图3所示。铝合金镀军绿镉电连接器试验1680h后, 壳体腐蚀严重,腐蚀现象以白霜、起泡、剥落为主, 集中于安装法兰盘处。试验480h后,其插头插座不 能正常打开。铝合金镀层电连接器试验1680h后, 壳体腐蚀中度,腐蚀现象以白色腐蚀产物、起泡、剥 落为主,腐蚀情况较铝合金镀军绿镉电连接器轻微。 不锈钢电连接器试验1680h后,外部壳体腐蚀轻微, 以点蚀现象为主,腐蚀情况较前两种电连接器轻微, 但壳体内部表面腐蚀情况较外部严重。

在相同试验条件和试验时间,不锈钢壳体外表面腐蚀程度相对较轻,而两种铝合金壳体腐蚀相对严重,特别是镀军绿镉壳体电连接器,壳体外表面腐蚀尤为明显。不锈钢壳体表现出良好的耐蚀性,主要原因在于不锈钢材质表面具有富 Cr 层,与 O₂反应生成致密的 Cr₂O₃和 CrO₃保护膜,可以从物理上阻隔腐蚀介质与内部 Fe 原子接触,而且钝化膜遭到磨损破坏时还具有一定的自修复功能。对于铝合金壳体的电连接器,其壳体表面的镀隔层属于阴极性镀层,完整的镀层可以从物理上阻隔腐蚀介质直接接触铝合金基体,从而达到保护目的,但如果镀层完整性遭到破坏,反而会导致基体腐蚀速率加快。试验中,2种铝合金电连接器壳体材料的腐蚀存在差异,这主要与镀层结构特征、表面质量、元素含量、厚度等相关。

2.2 接触电阻

为对比分析试验前后的电性能,对铝合金镀军绿 镉、铝合金镀层和不锈钢电连接器分别选取并固定了 12、18和16个芯线,测试其接触电阻,其接触电阻 变化情况如图4所示。当试验进行到960h时,电连 接器的接触电阻显著增大。试验1200h后,接触电 阻起伏波动尤其明显。截止试验结束,铝合金镀军绿 镉电连接器的平均接触电阻阻值由原始值22.225mΩ 增至34.058mΩ,增幅为53.24%;铝合金镀层电连接 器由原始值28.232mΩ增至35.877mΩ,增幅为 27.08%;不锈钢电连接器由原始值17.460mΩ增至 31.737mΩ,增幅为81.77%。接触电阻在一定范围内 波动,引起波动的原因之一是每次进行性能检测时, 需要对电连接器进行一次插拔,观察内部腐蚀情况。 但阻值整体呈现出增大趋势,插拔不是主要影响因素。

不锈钢电连接器壳体腐蚀最轻,但接触电阻波动 幅度最大。对比其内外的腐蚀情况可以看出,在 1680h的盐雾和交变湿热试验条件下,尽管壳体外部 不锈钢尚未发生明显腐蚀,但其内部金属卡圈、插孔 边缘等已出现盐颗粒沉积,并发生腐蚀(见图 5)。 以上现象表明,盐雾、水汽等通过电连接器壳体螺纹 口、定位槽等部位侵入壳体内部,加之试验温度变化 引起内部水汽等冷凝且不断累积,难以从壳体内部排



a 铝合金镀军绿镉电连接器

b 铝合金镀层电连接器



图 3 试验样品 1680 h 外观腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphology of the shell of test samples at 1680 h: a) aluminum alloy plated military green cadmium electrical connector; b) aluminum alloy plated electrical connector; c) stainless steel electrical connector





除,造成壳体内部局部环境的水分、Cl⁻等腐蚀介质 含量持续增加,局部腐蚀环境严酷程度加剧。

接触件以铜合金为基材,在基材上依次镀镍和 金。铜合金具有良好的电气和力学性能,但对大气污 染敏感,理论上能够在各种环境中发生腐蚀。金元素 难以氧化,镀金层既有良好的导电性,又可以保护铜 避免发生腐蚀。当镀金层厚度低于 5 µm 时,由于电镀 工艺限制会导致金镀层出现孔隙,发生微孔腐蚀^[16]。 在铜和金之间镀上镍中间层,因为铜在镍中扩散速度 极低,可以有效防止铜原子发生扩散,同时镍表面可 以在镀金层的微孔处生成致密绝缘的 NiO 层,缓解 环境的侵蚀。

取下受到腐蚀的插针和插孔,进行 EDS 能谱分析,插针分析结果见图 6 和表 2,插孔与之类似。在插针中段往上,靠近与插孔结合处,存在明显的长条



图 5 不锈钢电连接器内部腐蚀形貌 Fig.5 Internal corrosion morphology of stainless steel electrical connectors









图 6 插针 EDS 能谱分析 Fig.6 Analysis of pin EDS spectrum





形腐蚀带,中部与根部均有腐蚀产物和盐的堆积,表明试验中盐雾与水汽进入到插针插孔内部,参与了腐蚀反应。腐蚀处仅有少量的 Au 和 Ni 元素存在,Cu 原子数分数为 18.70%,O 原子数分数为 55.70%,Cl 原子数分数为 11.26%。表明中间镍层和基底铜都被腐蚀氧化,腐蚀产物向外扩散和膨胀,导致金镀层不断遭到破坏,镀 Ni 层在基底 Cu 之上,在腐蚀中先于Cu 发生腐蚀,但含量较少。腐蚀产物在干燥状态下呈蓝绿色,可知其中主要为铜的氧化物,又根据 Cl 元素的原子数分数比 Na 元素高 3.74%,可知腐蚀产物中还存在碱式氯化铜。

表 2 EDS 分析结果 Tab.2 EDS analysis results

| 元素 | 质量分数/% | 原子数分数/% |
|----|--------|---------|
| Cl | 11.44 | 11.26 |
| Cu | 34.03 | 18.70 |
| Au | 17.89 | 3.16 |
| 0 | 25.54 | 55.70 |
| Na | 4.95 | 7.52 |
| Ni | 6.15 | 3.66 |
| 总量 | 100.00 | 100.00 |
| | | |

进一步观察发现, 插针的腐蚀区域主要集中在插 针、插孔接触的附近区域(如图 7 所示), 这一区域 恰好是受毛细作用影响最大的区域。插针与插孔结合 处的缝隙距离为 0, 靠近结合处的缝隙距离极小, 沿 着结合处向两侧扩展逐渐增大。盐雾、水汽等侵入连 接器内部后,水汽附着在固体壁面,形成液体。由于 固体壁面对水分子的附着力大于水分子之间的内聚 力, 在靠近针孔结合处缝隙极窄的地方, 会发生固、 液、气三相界面上的毛细现象,导致有液体集聚。当 毛细作用区内的 Au 镀层存在微孔或磨损等缺陷时, 下方的镀 Ni 层和 Cu 基体就会发生电化学腐蚀,集聚



图 7 插针和插孔的接触区和毛细作用区 Fig.7 The contact area and capillary action area between the pin and socket

的液体充当了腐蚀原电池的电解质,所以此处的腐蚀 水平明显高于其他区域。腐蚀坑导致接触件表面粗糙 度增加,减小了接触区有效面积,同时,腐蚀产物中 的 Cu₂O 为阻值极高的半导体,CuO 为绝缘体,腐蚀 产物堆积膨胀,最终胀破,镀 Au 层分布到接触件表 面,导致接触件电阻值升高,并发生波动。腐蚀过程 和产物受环境条件和插拔影响明显,因此,接触件受 到腐蚀后的接触电阻波动范围较大,并且随着试验的 进行,整体趋势是上升的。

2.3 其他电气性能

周期性电性能测试过程中,电连接器壳体与芯 线、芯线与芯线之间的耐压强度和绝缘电阻都发生了 明显变化,漏电流呈增大趋势。绝缘电阻逐渐减小, 均由原来的大于 10 GΩ 减小到小于 1 MΩ。随着试验 的开展,后期部分试样的耐压强度出现了间歇通不过 和持续通不过两种现象。前者可能是暂时短路引起的 通不过,而后者是由试样的电性能失效引起的。因为 电连接器壳体在试验过程中受盐雾和交变湿热因素 交替作用,部分水汽和腐蚀介质通过定位槽和螺纹等 进入到电连接器内部的插针插孔处,停留在电连接器 内部的水汽和介质等无法完全从电连接器中扩散出 来,则形成了一个相对密闭的湿润空间,出现了本次 测试短路通不过而在下一循环测试时出现能通过现 象。后者的表现则可能是电连接器在试验后, 壳体表 面腐蚀、水汽扩散、内部绝缘材料吸湿等,引起电性能 下降至规定值以下,使得样品本身在试验过程中失效。

3 接触件腐蚀仿真分析

3.1 仿真模型构建

在实际应用中,接触件的镀层不会一直保持完整 无缺的状态,造成镀层缺陷或破坏的原因主要有3个 方面。1)镀层本身存在孔隙缺陷,这是由材料和工艺 特性造成的;2)接触件在插拔过程中,受到机械损伤, 导致部分镀层材料被磨损去除;3)接触件在插合状态 下,由于机械应力、环境应力以及电应力的作用,产 生了微动磨损。根据接触件表面不同的镀层完好状态, 可将其简化为镀 Au 层破损和镀 Ni 层破损(包括镀 Au 层破损)两种情形,参照真实接触界面在 COMSOL Multiphysics 中建立简化腐蚀模型,如图8所示。

为便于分析,在模型中作出如下假设:1)模型 无外加电位干扰,电偶反应的驱动力为金属间电势 差;2)将毛细作用区简化为长 30 µm、高 10 µm 的 长方形区域,且忽略水汽集聚成液滴的过程,即液位 无变化,内部电解质为 5% NaCl 溶液;3)忽略电极 表面双电层和电解质中发生的对流影响;4)参照 J599/20MWE-35 规格设置镀 Au 层厚度为 1.5 µm,镀 Ni 层厚度为 2 µm,镀层缺陷区域剖面为圆角矩形,



图 8 镀层不完整的简化模型及其在 COMSOL 中对应的几何模型

Fig.8 Simplified model of the defective coating and corresponding geometric model in COMSOL: a) defective Au coating; b) defective Ni coating

长 1.8 µm, 圆角半径为 0.5 µm。

镀金层存在孔隙,镀镍层接触 NaCl 溶液时,由于 Cl⁻具有很强的吸附性和穿透能力,会不断破坏镍 金属表面的钝化膜,使其耐蚀性降低。新鲜的镍与镀 金层和钝化膜区域之间存在电势差,于是镀金层和钝 化膜区域作为阴极,裸露的镍作为阳极,发生电化学 腐蚀^[17],反应过程为:

 $Ni+H_2O+Cl^- \rightarrow NiClH^-+H^++e$ (1)

 $NiClH^- + Cl^- \rightarrow NiCl_2 + OH^- + e$ (2)

 $NiCl_2 + H_2O \rightarrow NiO + 2Cl^- + 2H^+$ (3)

$$NiO+H_2O \rightarrow Ni(OH)_2 \tag{4}$$

镀金层与镀镍层均发生破损,裸露铜基体接触 NaCl 溶液时,即作为阳极发生电偶腐蚀,Cl⁻在其中 起到加速催化的作用^[18],反应过程为:

$$Cu+2Cl^{-} \rightarrow CuCl_{2}^{-}+e \tag{5}$$

$$2\mathrm{Cu}\mathrm{Cl}_{2}^{-}+\mathrm{H}_{2}\mathrm{O} \to \mathrm{Cu}_{2}\mathrm{O}+4\mathrm{Cl}^{-}+2\mathrm{H}^{+}$$
(6)

$$Cu_2O + \frac{1}{2}O_2 + Cl^- + 2H_2O \rightarrow Cu_2(OH)_3Cl + OH^-$$
 (7)

两种情形下的阴极反应发生在 Au 电极表面,为 吸氧反应和析氢反应。

 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \tag{8}$

$$2\mathrm{H}^{+} + 2\mathrm{e} \to \mathrm{H}_{2} \tag{9}$$

在腐蚀仿真过程中,阳极反应通过材料极化曲线 进行控制。通过文献[19]和文献[20]分别获得纯镍和 H62铜合金在35℃条件下5% NaCl 溶液中的极化曲 线,如图9所示。将极化曲线数值的插值函数作为电 极动力学表达式输入模型。

阴极反应通过 Tafel 公式进行控制, 阴极 Tafel 表达式定义为:

$$i_{\rm loc} = -i_0 \cdot 10^{\eta/A_{\rm c}} \tag{10}$$

式中:负号表示负的阴极电荷转移电流; i₀为交换电流密度; A_c为 Tafel 斜率,这里为负值。

在电解质里面,通过质量守恒方程,计算物质的 传输过程:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot N_i = R_{i,\text{tot}} \tag{11}$$

式中: c_i 为某物质i的物质的量浓度,mol/m³; N_i 为物质i的总通量,mol/(m²·s); $R_{i,tot}$ 为电解质区域 里面的反应源项。

由于表面位点是电子接触,且与相同的电解质接触,因此可得到一个净电流为0的混合电位的原电池。根据法拉第定律,净电流可以表示为:

$$I_1 = F \sum z_i N_i$$
 (12)

 根据基尔霍夫定律,可以推导出电流守恒方程为:
 $\nabla \cdot i_l = Q_l$

 (13)

式中: Q₁表示电解质里面的电流源,此处为 0。 水平集方法是一种使用固定网格来表示移动界 面或边界的技术,可用于计算域被界面分割成两个域 的问题。这里采用水平集方法跟踪接触件腐蚀产物沉 积的移动界面。在 COMSOL 中,水平集函数 *o* 是一



图 9 纯镍和 H62 铜合金在 5% NaCl 溶液中的极化曲线 Fig.9 Polarization curves of pure nickel and H62 copper alloy in 5% NaCl solution

个平滑的阶跃函数,在一个域中等于0,在另一个域 中等于1,界面上的值定义为0.5或其他水平集值。 水平集函数可由求解下面描述界面随速度场*u*移动 的物理方程得到:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$
(14)

式中: 左边的项描述界面的运动, 右边的项则是 保持数值稳定性的必需项。参数 *ε* 用于决定 *φ* 平滑地 从 0 变化到 1 的区域的厚度, 通常与网格单元的大小 顺序相同。参数 *γ* 用于决定水平集函数的重新初始化 或稳定的数量, 需要针对每个具体问题进行调整, 通 常 *γ* 的合适取值是速度场 *u* 的最大值。

利用 COMSOL 中的二次电流分布、变形几何、 稀物质传递、水平集和多物理场模块,分别对镀 Au 层不完整、镀 Au 层与镀 Ni 层均发生破损两种进行 建模,其中用到的主要参数见表 3。

3.2 仿真结果与讨论

对于镀 Au 层存在缺陷, 镀 Ni 层直接接触电解 质的情形,其对应的电解质电场分布和腐蚀产物沉积 情况如图 10 所示。镀 Ni 层腐蚀 12 d 后,腐蚀界面 下移约 2.1 μm,电解质的混合电位随反应的进行缓慢 提高,变化区间为[-319 mV,-304 mV],电位最高位 置始终保持在靠近阳极表面区域。腐蚀速率随反应进 行不断下降,初始电极总腐蚀速率约为0.123 mm/a, 到第12天时,腐蚀速率下降为0.042 mm/a。腐蚀界 面在向下移动的同时,沿镀Au层下表面向四周扩展。

表 3 仿真所需主要参数

| Tab.3 Major parameters required for simulation | | | | |
|--|--|-----------------------|--|--|
| 名称 | 值 | 描述 | | |
| Eeq_cat | 0.401 V | 阴极平衡电位 | | |
| Eeq_Ni | -0.397 V | Ni 电极平衡电位 | | |
| <i>E</i> eq_Cu | –0.6 V | Cu电极平衡电位 | | |
| $i_{0, \text{ cat}}$ | 10^{-3} A/m^2 | 阴极交换电流密度 | | |
| $A_{\rm c}$ | -118 mV | 阴极 Tafel 斜率 | | |
| σ | 6.7 S/m | 电解液电导率 | | |
| $D_{ m OH}$ | $5.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ | 氢氧根扩散系数 | | |
| $D_{ m Ni}$ | $7.05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ | Ni ²⁺ 扩散系数 | | |
| D_{Cu} | $5.41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ | Cu ²⁺ 扩散系数 | | |
| $\mathcal{C}_{\mathrm{OH},0}$ | 10^{-4} mol/m^3 | 浓度初始值 | | |
| <i>K</i> sp_NiOH ₂ | $2 \times 10^{-15} \text{ mol}^3/\text{m}^9$ | 氢氧化镍溶度积 | | |
| Ksp_CuOH ₂ | $6 \times 10^{-20} \text{ mol}^3/\text{m}^9$ | 氢氧化铜溶度积 | | |
| k | $3.7 \times 10^{-7} \text{ m}^{7}/(\text{mol}^2 \cdot \text{s})$ | 沉淀反应速率常数 | | |
| τ | 1 | 有效扩散系数因子 | | |
| $\varepsilon_{\rm p}$ | 0.55 | 腐蚀产物沉积孔隙度 | | |
| $s_{\rm L}$ | 1 | 流体饱和度 | | |
| m | 1 | 胶结指数 | | |
| n | 2 | 饱和系数 | | |





在插拔过程中,插针受到圆柱形开槽插孔的摩擦,并在镀Au层外表面形成划痕,划痕处容易形成裂纹形核,使镀Au层形成裂隙。同时,在镀Au层的裂隙和孔隙下方发生腐蚀,镀Ni层的腐蚀界面向四周扩展,导致镀层间附着力下降。在经历一定时间的腐蚀作用和多次插拔后,镀Au层出现了片状剥落的现象,如图11所示。

对于镀 Au 层与镀 Ni 层均发生破损,裸露 Cu 基



体接触电解质的情形,其对应的腐蚀产物沉积过程和 电解质电场分布情况如图 12 所示。混合电位的变化区 间为[108 mV,132 mV],最高电位始终保持在 Cu 反应 界面上。Cu 基体的电极总腐蚀速率也是随反应进行不 断下降的,但速度明显快于镀 Ni 层,在第400 s 时约 为 255 mm/a。Cu 基体的腐蚀产物不断增加,向上膨 胀,最终胀到镀 Au 层表面,其形貌与接触件典型腐蚀 情况相同(见图 13),这也间接证明了模型的合理性。



图 11 镀 Au 层发生剥落 Fig.11 The Au coating peeled off



Fig.12 Corrosion product deposition process and electrolyte electric field distribution corresponding to the defective Ni coating



图 13 接触件腐蚀典型形貌 Fig.13 Typical morphology of the contact corrosion

以上两种情形共同解释了接触件发生腐蚀的过程。在电连接壳体密封性受到侵蚀的情况下,环境中的盐雾在呼吸作用和毛细作用下吸附到接触件表面。如果此时镀Au层表面存在缺陷或破损,就会使镀Au层与下方镀Ni层形成大阴极、小阳极的原电池结构,并在CI的侵蚀下,Ni表面钝化膜被穿透,加速阳极溶解。随着溶解界面向下扩展,镀Ni层被消耗掉,Cu基体受到进一步的腐蚀,且腐蚀速率明显加快,形成腐蚀坑。腐蚀坑和腐蚀产物减小了电接触的有效接触面积,最终导致接触电阻在第8个循环后出现较大波动,而且内部腐蚀最严重的不锈钢电连接器平均阻值的增幅最大。

4 结论

 1)盐雾和交变湿热环境对电连接器的壳体密封 性、接触电阻和绝缘电阻均有影响。当电连接器壳体 密封性受到侵蚀破坏后,接触件发生腐蚀,导致接触 电阻出现波动。内部金属卡圈腐蚀造成部分壳体内壁 和绝缘体污染,后期出现耐压测试通不过现象,绝缘 电阻均有明显减小。

2)水汽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前6个循环中没有 明显变化;8个循环后,接触电阻显著增大;10个循 环后,起伏波动尤其明显。变化原因在于盐雾、水汽 等在呼吸作用和毛细作用下,通过电连接器壳体螺纹 口、定位槽等部位进入壳体内部,造成局部环境的水 分、Cl⁻等腐蚀介质含量持续增加。

3)通过建立仿真模型,动态模拟了不同镀层存 在缺陷情况下的腐蚀产物沉积和界面移动过程,镀 Ni层腐蚀界面在向下移动的同时向四周扩展,Cu基 体的腐蚀产物向上膨胀到镀金层表面,从而导致接触 电阻增加。该模型有助于分析带镀层接触件发生腐蚀 的行为和机理。

参考文献:

[1] 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.

- [2] LALL P, LUO Yi-hua, NGUYEN L. Multiphysics-modeling of corrosion in copper-aluminum interconnects in high humidity environments[C]//2015 IEEE 65th electronic components and technology conference (ECTC). San Diego: IEEE, 2015.
- [3] LALL P, LUO Yi-hua, NGUYEN L. Multiphysics life-prediction model based on measurements of polarization curves for copper-aluminum intermetallics[C]//2016 IEEE 66th electronic components and technology conference (ECTC). Las Vegas: IEEE, 2016.
- [4] LALL P, LUO Y H, NGUYEN L. Multiphysics model for chlorine-ion related corrosion in Cu-Al wirebond microelectronic packages[C]//Proceedings of ASME 2015 international mechanical engineering congress and exposition. Houston: [s. n.], 2015.
- [5] LI Chen-tao, LIN Li-bo, SU Xiao-peng, et al. The influence of complex environmental conditions on the corrosion degree of outdoor typical transformer equipments[C]//2019 IEEE PES asia-pacific power and energy engineering conference (APPEEC). Macao: IEEE, 2019: 1-6.
- [6] 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.
- [7] 李云双,曹江利,姚文清,等. Au/Ni/Cu 多层薄膜热带 海洋气候腐蚀失效机制研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 43-47.

LI Yun-shuang, CAO Jiang-li, YAO Wen-qing, et al. Study on corrosion failure mechanism of Au / Ni / Cu multilayer film in the tropical marine climate[J]. Surface technology, 2014, 43(6): 43-47.

[8] 王泗环, 郁大照, 王腾. H62 铜合金镀金接触件镀层破 损条件下的腐蚀仿真[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12):

WANG Si-huan, YU Da-zhao, WANG Teng. Corrosion simulation of damaged coating of H62 copper alloy gold-plated contact[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(12): 7-13.

 [9] 郁大照, 王泗环, 王腾, 等. 铜在弱酸性缝隙溶液下的局部腐蚀仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 175-178.

YU Da-zhao, WANG Si-huan, WANG Teng, et al. Local corrosion simulation of copper in weak acid crevice solution[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2020, 41(5): 175-178.

- [10] 张彤, 郁大照. 航空电连接器力学性能和电学性能仿 真[J]. 海军航空工程学院学报, 2020, 35(2): 181-188. ZHANG Tong, YU Da-zhao. Simulation of mechanical and electrical properties of avionics connectors[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2020, 35(2): 181-188.
- [11] 王琳, 郁大照, 王希彬, 等. 飞机电连接器腐蚀外场检查与处理要求研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 114-118.

WANG Lin, YU Da-zhao, WANG Xi-bin, et al. Requirements on out-field corrosion inspection and treatment of aircraft's electrical connector[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(11): 114-118.

 [12] 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]. Electromechanical components, 2019, 39(5): 40-44.

[13] 林雪燕. 连接器触点表面的大气腐蚀[D]. 北京: 北京 邮电大学, 2009.
 LIN Xue-yan. Atmospheric corrosion of connector contact surfaces[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.

[14] 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.

- [15] 张丹峰,穆志韬,谭晓明.缓蚀剂对飞机电连接器腐蚀 行为的影响规律研究[J].环境技术,2018,36(S1): 29-35.
 ZHANG Dan-feng, MU Zhi-tao, TAN Xiao-ming. Influence of corrosion inhibitors on corrosion behavior of electrical connector[J]. Environmental technology, 2018,
- [16] 赵晓利,张宝根.金镀层表面腐蚀机理及抗腐蚀性保 护[J].电子工艺技术,2005,26(6):362-364,369.
 ZHAO Xiao-li, ZHANG Bao-gen. Corrosion mechanism of gold plating and its anticorrosivon[J]. Electronics process technology, 2005, 26(6): 362-364.

36(S1): 29-35, 49.

- [17] 赵宇,杨玉国,许韵华,等.脉冲参数对镍镀层在 NaCl 溶液中耐蚀性的影响[J]. 电镀与环保, 2007, 27(5): 5-8. ZHAO Yu, YANG Yu-guo, XU Yun-hua, et al. Influence of pulse plating parameters on corrosion resistance of Ni deposits in NaCl solution[J]. Electroplating & pollution control, 2007, 27(5): 5-8.
- [18] MA A L, JIANG S L, ZHENG Y G, et al. Corrosion product film formed on the 90/10 copper-nickel tube in natural seawater: Composition/structure and formation mechanism[J]. Corrosion science, 2015, 91: 245-261.
- [19] 王希靖,李梦泽,王博士,等.不同 pH 值的 NaCl 溶液 中纯镍的电化学腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(22): 70-75.
 WANG Xi-jing, LI Meng-ze, WANG Bo-shi, et al. Research on electrochemical corrosion behavior of pure nickel immersed in NaCl solution with different pH value[J]. Hot working technology, 2019, 48(22): 70-75.
 [20] 王泗环,郁大照,王腾.不同环境因素对 H62 铜合金极
 - 化曲线的影响分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(3): 310-316.
 WANG Si-huan, YU Da-zhao, WANG Teng. Influence analysis of different environmental factors on polarization curve of H62 copper alloy[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2019, 34(3): 310-316.

^{7-13.}