

海军某型飞机典型电连接器失效分析

王腾¹, 郁大照¹, 朱蒙², 肖楚琬¹, 李明², 王泗环¹

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100000)

摘要: **目的** 分析得出电连接器失效的主要原因。**方法** 以海军某型飞机三个型号典型电连接器插孔端为主要研究对象, 对电连接器宏观形貌进行目视检查分析, 并采用扫描电子显微镜进行微观形貌观察, 采用能谱分析仪进行微观成分分析, 研究壳体表面和插孔接触面的化学成分组成。**结果** 腐蚀和磨损是外场电连接器失效的主要诱因, 电连接器有一定程度的局部腐蚀, 表面积聚的灰尘和海盐颗粒对腐蚀有较明显的促进作用。插拔不当造成的插针与插孔间同心度的偏差, 与微动磨损共同作用加速了局部腐蚀。**结论** 插拔不当、微振磨损与局部腐蚀是导致电连接器性能下降乃至失效的三大主要因素。

关键词: 电连接器; 失效; 腐蚀; 微动磨损; 插拔

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.005

中图分类号: TG172.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0028-08

Failure Analysis of Electrical Connectors Connectors on Naval Aircraft

WANG Teng¹, YU Da-zhao¹, ZHU Meng², XIAO Chu-wan¹, LI Ming², WANG Si-huan¹

(1. Naval Aviation University, Shandong, Yantai 264001, China;

2. AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100000, China)

ABSTRACT: **Objective** To conclude the main reasons of connector failure. **Methods** Three types of typical electrical connectors for naval aircraft were studied by macro and micro morphology observation. SEM and EDS were used to analyze the microstructure, micro component and chemical composition of surfaces on shell and socket contact. **Results** Corrosion and wear were the main causes of connector failure in out-field. The electrical connectors had local corrosion to a certain extent. Obviously promotion to corrosion came from the dust and sea salt particles accumulated on the surfaces. The deviation of concentricity caused by incorrect insertion and extraction and fretting acted together, generating the local corrosion. **Conclusion** Incorrect insertion and extraction, fretting and local corrosion were the three main factors causing the performance of electrical connectors degrading to failure.

KEY WORDS: electrical connectors; failure; corrosion; fretting; insertion and extraction

电连接器是用于实现器件、组件和系统之间电信号和相关控制信号传输的基础性元件, 具有应用的广泛性与功能的不可替代性^[1], 这些特性使电连接器的环境适应性与可靠性成为影响整体系统性能的关键一环。据相关数据统计, 在各种电气系统的失效和故

障现象中, 70%是由元器件的失效产生的, 这其中有40%由电连接器的失效直接或间接导致^[2-3]。以美国、日本为首的发达国家也一直致力于电连接器的可靠性分析与研究。美国相关研究发现, F-22 飞机电连接器失效的主要原因大多是由振动、温湿度变化、盐雾

收稿日期: 2019-05-16; 修订日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375490)

作者简介: 王腾 (1991—), 男, 山东平度人, 硕士研究生, 主要研究方向海洋环境与舰载飞行器使用工程。

通讯作者: 郁大照 (1976—), 男, 山东聊城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为机载设备的腐蚀防护与控制。

等环境因素影响下的磨损和腐蚀导致的，此类问题在 F-16、B-1、F-15、B-2、F/A-18 等机型上同样存在。Stefan M. Glista 从电连接器的设计、分析测试、子系统测试、飞机总体的地面和飞行测试、寿命管理和质量控制五个方面来研究电连接器的磨损和振动导致的失效问题，并提出了降低由环境因素导致的故障率的方法^[4]。余俊以 Y11P-1419 型电连接器（航空插头）为研究对象，通过加速退化试验研究插拔对电连接器接触性能的影响规律，发现插拔行为会加速电连接器的退化，造成电连接器接触电阻退化曲线的跳变，插拔次数越多，跳变幅度越大^[5]。申敏敏^[6]以相同型号电连接器为研究对象，针对电连接器在温度应力下性能退化的特点，建立了基于布朗运动的电连接器接触性能退化模型。通过基于 White 法和 Breusch-Pagan 法的接触性能退化模型进行检验，验证了所建模型的正确性。

对于飞机上长期使用的电连接器故障样品直接进行检查分析的研究较少，尤其是对长期处于海洋环境下的海军飞机上装备的电连接器的直接研究。在海军飞机的整体系统中，电连接器是各类涉电附件的必需组件。海军飞机电连接器受海洋环境和振动等因素影响较大^[7-8]，工作环境恶劣，对可靠性和维护性要求高。因此，对海军飞机电连接器失效的原因和过程进行相关分析具有重要意义。

1 电连接器失效样品研究方案

1.1 研究对象

研究对象是海军某型飞机起落架收放系统三种型号的故障电连接器插孔端。电连接器样品安装于飞机起落架舱，属于 GJB 599A 系列，壳体为铝合金镀军绿镉，尾部有螺纹，可安装后附件。接触件为铜合金镀金（过渡层为镍），镀金层厚度为 1.27 μm。三种接触件型号分别为：JY27467T09B35SN，6 根插针，额定电流为 5 A；JY27467T13B98SN，10 根插针，额定电流为 7.5 A；JY27467T11B4S，4 根插针，额定电流为 7.5 A。

这三型电连接器安装位置暴露于自然大气环境中，所属飞机长期使用于渤海沿岸机场和海上平台，在停放和使用的全周期中，受海洋大气环境持续影响。日常维护保养以机务人员对接触件的清洁为主，清洗剂的主要成分为酒精。故障样品的使用基本情况见表 1。

1.2 失效现象

JY27467T09B35SN 样品 a 所属飞机在周期性检查工作中出现一次起落架未能正常收放故障，进一步检查发现，起落架收放控制电路出现电流瞬断。在经过机务人员对电连接器接触件进行清洗和再装

配后，电流瞬断现象重现。通过扩大面检查发现，总共在 3 种型号共 5 件电连接器上都出现了电流瞬断现象。

表 1 故障样品使用基本情况

连接器型号	样品分类	日历寿命/月	飞行时间/h	插拔次数/次
JY27467T09B35SN	样品 a	36	589	约 80
JY27467T13B98SN	样品 b	30	500	约 60
JY27467T11B4S	样品 c	29	521	约 70
JY27467T11B4S	样品 d	36	592	约 80
JY27467T11B4S	样品 e	35	583	约 80

1.3 研究方法

对故障件中电流瞬断现象复现频率高的样品 a、样品 c 和样品 d 进行研究分析，通过拆除尾端连接导线的方式，将失效电连接器从飞机上拆下。拆解过程中并不破坏其原有状态，拆解后的样品在贮存、运输过程中保持干燥密封，未曾破坏、污染原有表面物质。实验室对电连接器插孔端进行外观检查、接触面检查和相关判定，使用 Quanta400 扫描电镜观察微观结构，使用 Link2SISI 能谱仪分析表面物质的组成成分，对失效过程进行研究^[9-11]。

2 电连接器的损伤状态检查结果

2.1 电连接器的宏观形貌

电连接器 JY27467T09B35SN 插孔端外观形貌如图 1、图 2a 所示，电连接器 JY27467T13B98SN 插孔端外观形貌如图 2b 所示，电连接器 JY27467T11B4S 插孔端外观如图 2c 所示，电连接器损伤状态检查结果见表 2。

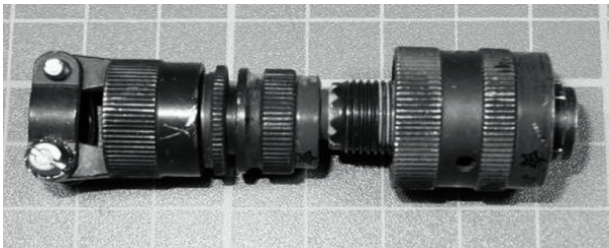


图 1 JY27467T09B35SN 型号连接器插孔端外观形貌

2.2 电连接器的微观形貌与组分鉴定

对三种型号的电连接器分别进行微观形貌观察与组分鉴定，发现三种型号的电连接器损伤类型相似，组分鉴定结果基本一致。其中 JY27467T11B4S 型号的电连接器微观形貌辨识度最高（如图 3 所示），因此以 JY27467T11B4S 型号电连接器为例，进行损伤分析。



图 2 三种型号电连接器插孔端外观形貌（拆解后）

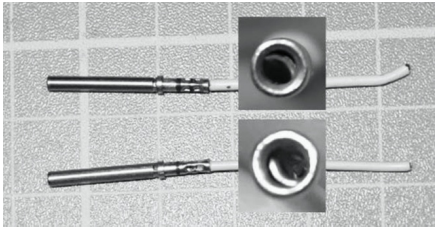


图 3 JY27467T11B4S 型号连接器接触件插孔形貌

2.2.1 壳体的微观形貌与组分鉴定

JY27467T11B4S 型电连接器壳体为铝合金军绿

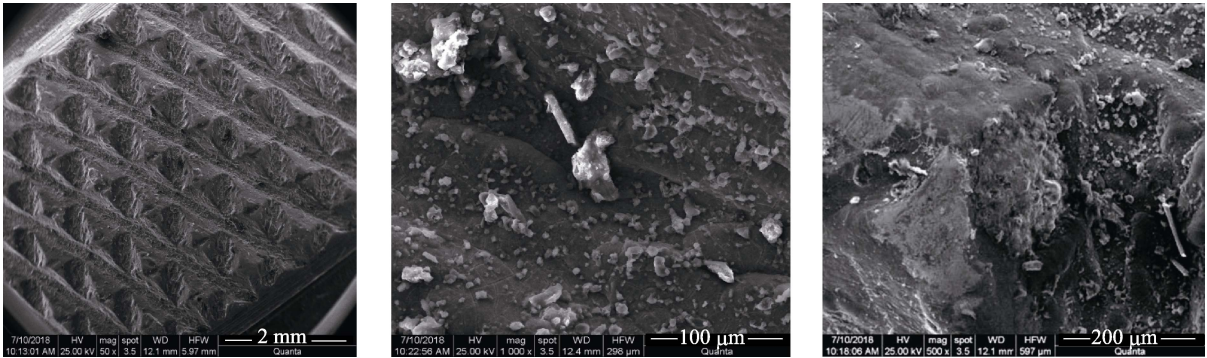


图 4 连接器壳体局部表面微观形貌

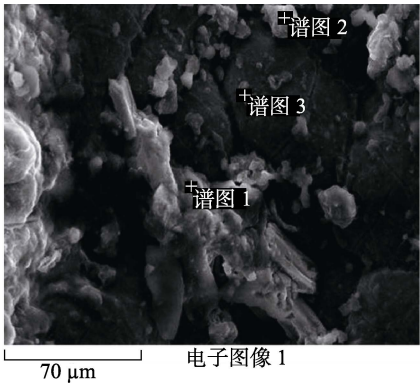


图 5 连接器壳体局部表面

色镀镉，电镀后表面采用铬酸盐钝化。连接器壳体易受机械损伤的防滑锁紧套表面的 SEM 微观形貌如图 4 所示。表面能够清晰看到金属构件的机械加工痕迹，在结构凸起部分，表面相对洁净，在凹陷区域沉积有大量颗粒状多余物，粒径从几个微米至几十个微米不等。

对连接器壳体表面附着的白色粉末状多余物进行 EDS 分析，取样点为图 5 中谱图 1、谱图 2，分析结果见表 3、表 4。对军绿色镀镉层表面进行 EDS 分析，取样点为图 5 中谱图 3 和图 6 中的谱图 4、谱图 5，分析结果见表 5、表 6、表 7。

表 2 电连接器损伤状态检查结果

连接器型号	损伤类型	损伤位置	镀层状态
JY27467T09 B35SN	轻微划伤	壳体表面	颜色暗淡，未 出现明显腐蚀
	螺纹中度磨损	壳体表面	
	粉末状多 余物沉积	螺纹凹陷处、绝缘 橡胶表面、插孔 处、壳体内表面等	
JY27467T13 B98SN	轻微划伤	壳体表面	
	粉末状多 余物沉积	螺纹凹陷处、尾部 附件、绝缘橡胶表 面、壳体内表面等	
	轻度变形 (不规则圆形)	插孔接触件	
JY27467T11 B4S	轻微划伤	壳体表面	
	粉末状多 余物沉积	尾部螺纹、绝缘橡 胶表面、插孔处、 壳体内表面等	
	轻度变形 (不规则圆形)	插孔接触件	

表 3 谱图 1 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O	55.98	82.56
Na	1.41	1.44
Si	0.97	0.81
S	8.19	6.03
K	5.43	3.28
Cd	28.03	5.88
总量	100.00	100.00

2.2.2 内部插孔的微观形貌与组分鉴定

对插孔进行拆解，通过 SEM 观察接触面微观形貌，如图 7 所示。该插孔为开槽式，插孔口部收缩以提供接触压力。由于插针与插孔的同心度发生变化，由插拔导致的插孔内部和插针表面磨损严重。插孔口部（如图 7a、c、f 所示）存在大量明显磨痕，磨痕的终点和磨痕的中部分布有片状和颗粒状物质，初步判定多数为滑动磨损过程中形成的片状金属磨粒，个别物质为外部多余物。在磨损严重的区域（如图 7f 所示）出现了类似腐蚀坑的结构。

对插孔内表面典型磨粒进行成分分析，取样点如图 8、图 9 所示，分析结果见表 8、表 9、表 10。由图 8 可见，磨粒为典型片状金属磨粒。EDS 分析结果

表明，其主要成分为 Au。表 9 为该磨粒造成的磨痕处的 EDS 分析结果，故障件插孔内表面典型腐蚀位置 EDS 分析结果如图 10 所示。

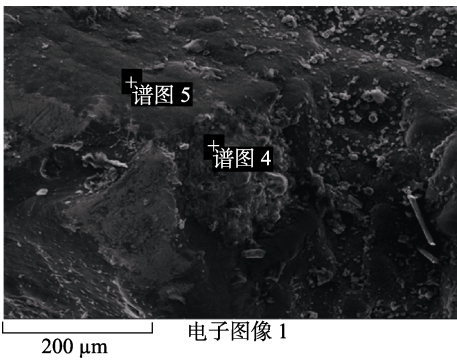


图 6 连接器壳体局部镀层表面

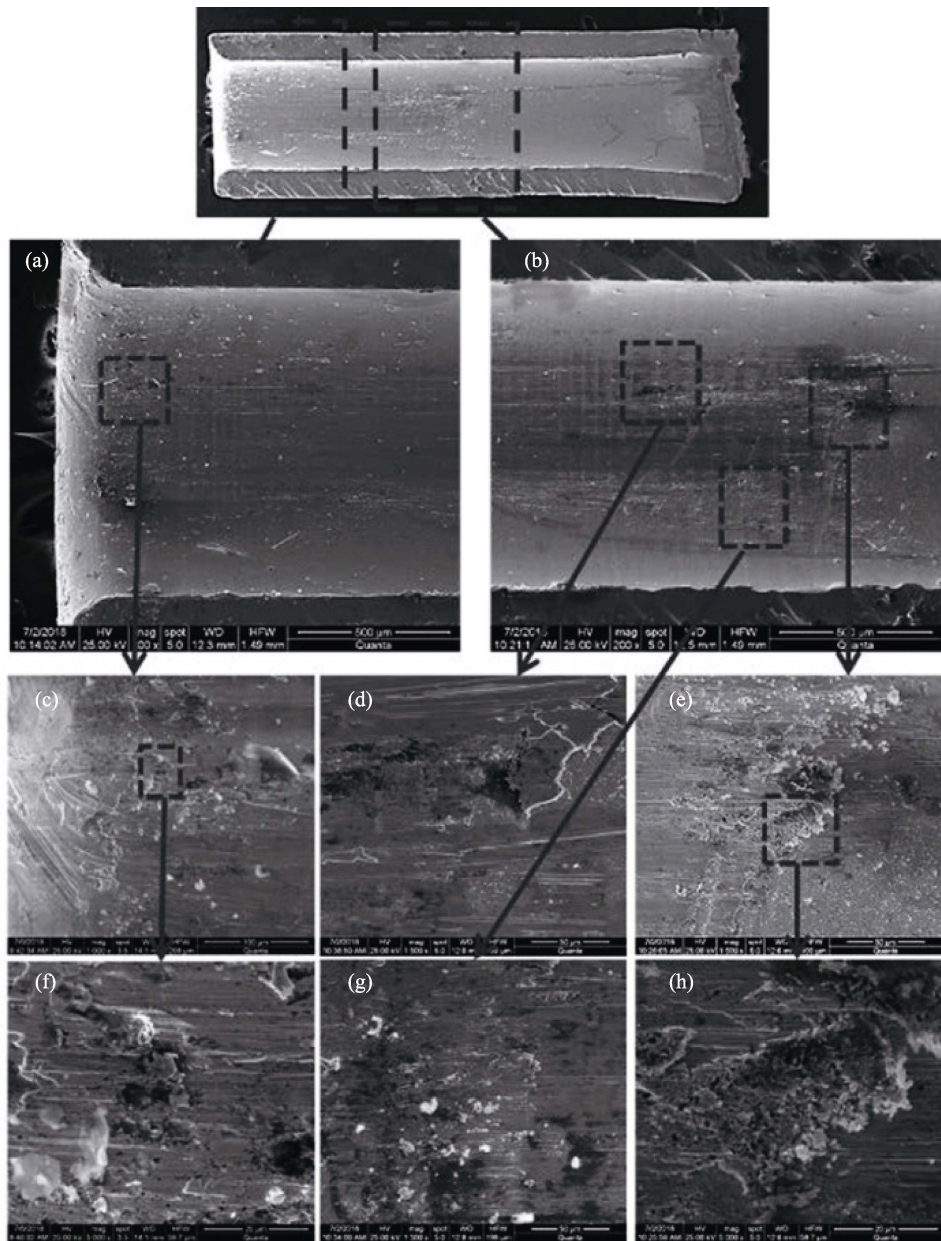


图 7 插孔内部局部区域表面微观形貌

表 4 谱图 2 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O	48.79	74.96
Mg	3.03	3.06
Al	1.96	1.75
Si	9.76	8.54
S	2.98	2.25
Cl	2.17	1.50
Cr	4.02	1.90
Cd	27.30	5.97
总量	100.00	100.00

表 5 谱图 3 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O K	59.54	88.50
S K	0.56	0.42
Cr K	10.75	4.92
Cd L	29.15	6.17
总量	100.00	100.00

表 6 谱图 4 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O K	59.54	88.50
Cd L	29.15	6.17
总量	100.00	100.00

表 7 谱图 5 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O	66.66	91.50
Cr	8.74	3.69
Cd	24.60	4.81
总量	100.00	100.00

表 8 图 9 中谱图 6 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
O	43.47	77.36
Mg	5.34	6.26
Cl	1.17	0.94
Ni	18.14	8.79
Cu	6.73	3.02
Au	25.15	3.63
总量	100.00	100.00

表 9 图 9 中谱图 7 EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
Si	5.05	17.57
Ca	14.12	34.44
Ni	6.74	11.23
Au	74.09	36.77
总量	100.00	100.00

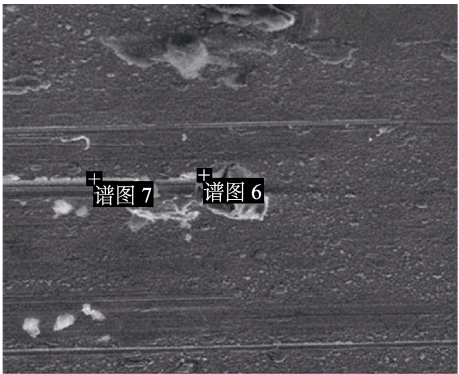


20 μm 电子图像 1

EDS 分析结果

元素	质量分数/%	原子数分数/%
OK	7.34	49.39
Au M	92.66	50.61
总量	100.00	100.00

图 8 插孔内部磨粒表面微观形貌及 EDS 分析结果



40 μm 电子图像 1

图 9 插孔内部磨粒及磨痕表面微观形貌及 EDS 分析结果

3 电连接器的损伤原理分析

3.1 电连接器的壳体损伤分析

将图 4 的 SEM 观察结果与新出厂样品仔细对比,发现经过较长时间外场使用的电连接器表面会出现龟裂现象,致使镀层现有表面状态与原始表面状态差异较大。图 4 观察到的表面形貌为镀层轻微腐蚀后致密的腐蚀产物膜龟裂的形貌。电镀镉层作为一种牺牲阳极性防护层,其腐蚀产物膜对腐蚀介质的阻碍作用对腐蚀防护效果具有显著影响。从外观来看,军绿色

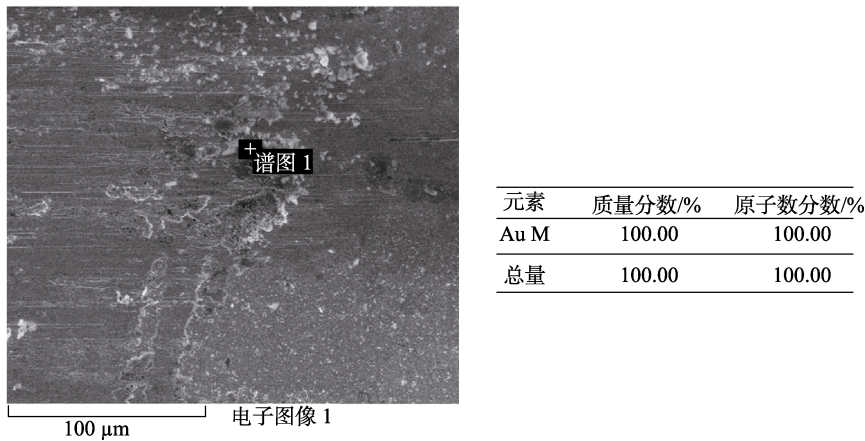


图 10 插孔内部典型局部腐蚀位置微观形貌及 EDS 分析

钝化膜颜色暗淡,也与镀层表面覆盖的腐蚀产物膜有直接关系。在容易受到机械损伤的局部表面,微观上同样可以观察到镀层腐蚀产物的堆积,但相对其他位置,堆积程度不够明显。

由壳体螺纹凹陷处的表面粉末 EDS 分析结果可知,表面粉末的主要成分有 Na、Mg、Si、K、Cl 等元素。Na、Mg、K、Cl 等元素是海盐中的主要元素,灰尘中富含 Si 元素,因此初步判定表面粉末主要是海盐和灰尘在表面的沉积。海盐、灰尘以及连接器表面钝化膜或腐蚀产物膜都含有 O 元素。Cr 元素来源于铬酸盐钝化膜,Cd 元素来源于电镀镉层或电镀层的腐蚀产物膜(EDS 测试所接收的特征 X 射线溢出深度较大)。S 元素可能来源于海盐或灰尘中的硫酸根离子,但更有可能来源于大气污染物(壳体表面 S 元素含量相对较高)。该产品在海上平台使用,起飞降落过程受到空间的限制,容易受到舰船或飞机排放废气的影响,SO₂ 等污染物吸附在表面或直接溶入表面的微液膜中。在不能及时清洗掉的情况下,SO₂ 溶入表面液膜形成的硫酸盐干燥结晶,与表面沉积的灰尘和海盐颗粒混合在一起,以多余物的形式覆盖在表面。

由军绿色电镀层表面的 EDS 分析结果可知,产生龟裂的腐蚀产物膜的主要元素为 O、Cd 和 Cr 元素。Cr 元素的比重较大,认定镀层表面含 Cr 钝化膜破损但尚未完全丧失保护作用。分析结果表明,镀层目前状态处于其腐蚀历程的初期,壳体铝合金基体并未出现腐蚀,表面电镀镉层仍具有良好的防护能力。在结构的凹陷处,仍可检测到少量的 S 元素,应为污染物在表面溶解累积的结果。在谱图 4 所示的局部腐蚀产物堆积处,元素以 O 和 Cd 为主。说明该位置由于机械损伤等原因,镀层表面的含 Cr 钝化膜已失去屏蔽作用,造成镀层局部腐蚀加速,产生腐蚀产物堆积,但未伤及铝合金基体。

3.2 电连接器的插孔损伤分析

从图 7 中的插孔磨损痕迹判断,插针插入的深

度约为 2.5 mm。在插合状态下,插针和插孔的接触面主要存在两个区域:一个是插孔口部;另一个是插针头部边缘与插孔内部接触的区域(插孔内部约 2.5 mm 处)。

在多次的插拔过程中,接触件表面镀金层损伤后,外部腐蚀性介质进入微孔,引起局部腐蚀,产生腐蚀坑。由于插拔过程对表面腐蚀产物和腐蚀坑结构的破坏,使得腐蚀产物特征并不明显。在插孔中部(如图 7d、g 所示),表面分布有明显的贯穿性磨痕。在靠近插合状态插针头部所处区域,磨痕现象中断。磨痕终点处,片状磨粒分布明显。在插合状态,插针头部与插孔结合部位(如图 7e 和 h 所示)磨痕密度较大,磨痕终止现象增多,多余物有堆积现象,应与磨粒的累积有关。同时,该部位出现了多个尺寸在 10~30 μm 的局部磨损严重区域,镀层损伤严重,磨痕尺寸细密,周围多余物堆积明显。根据现象判断属于微动磨损,初步推测为飞机飞行过程中,振动应力或温度变化造成插针插孔间微小的相对磨损导致。由于镀层损伤严重,该部位出现了局部腐蚀的迹象。

连接器的插入力往往大于拔出力,这是由于插针张开插孔时所需的力以及插针与插孔同心度较差时所产生的附加力等造成。无论是插入还是拔出时,针孔接触界面都可能会有磨损颗粒及粘结的磨粒。这些颗粒因为冷作硬化而硬度升高,容易镶嵌或粘结在界面上,使接触表面产生擦伤。

该连接器接触件的表层为镀金层,插拔可视为同种材料组成的针与平面之间的滑动过程,因此可认为是金-金之间发生滑动磨损。金-金滑动磨损可分为四个进程:

- 1) 磨粒的形成。当针孔接触时,在一定压力的作用下产生粘结,滑动后,粘结部分被切断,并继续粘结产生了磨粒。
- 2) 磨粒的滑动。当两个接触面进行滑动时,磨粒粘结在接触面上,因此针孔之间的滑动都是磨粒与平面之间滑动。

3) 磨粒被加工硬化。在摩擦过程中, 磨粒逐渐被加工硬化, 其硬度比接触面上的金属大, 从而擦伤表面, 接触面不仅因粘结损失金属, 而且也因磨粒的擦伤而损失金属。

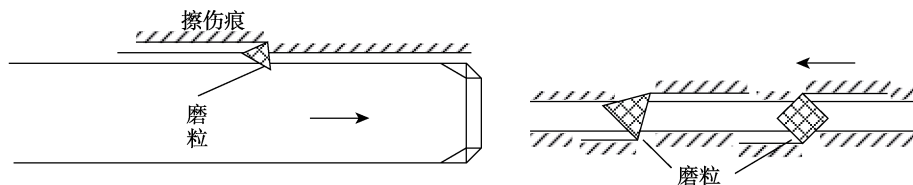


图 11 滑动磨损界面擦伤原理

另外, 在外场使用过程中, 由于维护、检修等操作, 也会造成外部多余物附着在插针或插孔表面作为磨粒, 使得插拔过程中表面镀层磨损加剧。

从图 8 的 EDS 分析结果可知, 磨粒的主要成分是 Au, 说明该磨粒为插针和插孔滑动磨损时由表面镀金层累积、强化生成。观察到的元素还包括 O 元素, 其主要原因在于测试采用的是区域测试, 磨粒周围腐蚀产物对测试造成了干扰。同时也说明, 在磨损严重区域, 随着腐蚀介质的侵入, 形成局部 Au-Ni 甚至 Au-Cu 原电池结构, 加剧腐蚀发生。图 9 中谱图 6 所示磨粒中除了含有 Au 外, 还含有 Si、Ca 和 Ni 元素, 其中 Ni 元素可能来源于镀金层下方的 Ni 层, 镀金层破损或减薄后被检测到。而 Si 和 Ca 元素的存在, 说明该磨粒最先来源于外部灰尘, 灰尘颗粒硬度高, 在插拔过程中损伤镀金层, 并与脱落的镀金层强化在一起形成磨粒。磨痕处镀金层尚保持连续, 磨损深度没有贯穿镀金层。

在图 9 谱图 7 所示的测试位置检测到 Cl 元素, 初步判断为海面盐雾侵入所致。腐蚀产物的出现, 导致 O 元素含量高。由于滑动磨损和微动磨损的存在, 腐蚀产物膜容易受到破坏, 腐蚀产物累积不明显。EDS 测试结果中, Ni、Cu 元素的存在表明镀金层局部被破坏后, 过渡镀 Ni 层和插孔的 Cu 基体均在 Au 的加速作用下发生腐蚀, 腐蚀产物迁移, 到达插孔表面。

插孔内表面疑似腐蚀位置均属于磨损严重区域, 虽然镀金层的孔隙容易成为腐蚀萌生的位置, 但在实际使用状态下, 由于插拔、外来物、微动磨损等原因造成的镀层破损处更容易成为腐蚀萌生位置。电连接器绝大多数时间处于插合状态, 外部水汽、腐蚀性介质渗入缓慢, 但在维修和维护的插拔和暴露过程中, 盐雾、灰尘等容易进入内部, 加速电接触表面的腐蚀。

4 结论

根据上述对电连接器外壳和插孔外观和微观形

貌、成分的分析, 可以初步得到以下结论。

1) 外场使用的电连接器壳体 (铝合金军绿色镀铬) 腐蚀现象并不显著, 仅在容易受到机械损伤的防滑锁紧套表面出现轻微腐蚀, 腐蚀产物膜具有较好的阻碍腐蚀进一步扩展的作用。壳体表面容易积聚灰尘和海盐颗粒, 在一定的温湿度条件下, 会形成腐蚀性微液膜, 为腐蚀提供有利条件。大气污染物 (SO_2 等) 在表面的积聚, 可能会对电连接器壳体的腐蚀产生影响。

2) 插拔、振动和腐蚀的综合作用导致了插孔表面损伤, 损伤类型有同心度偏移、滑动磨损、微动磨损和局部腐蚀。机械损伤产生的多余物 (滑动磨损产生的磨粒等) 加上外部侵入的灰尘和海盐颗粒共同作用, 加剧了表面镀层的损伤, 损伤处为腐蚀萌生提供了良好的起始位置。飞机停放-飞行-停放的周期性任务状态变化, 造成各种损伤叠加、累积在一起, 影响到接触面的材质、结构、接触力和多余物特征, 进而影响接触电阻等电气特性, 导致了电连接器的最终失效。

3) 建议加强外场使用中电连接器表面的清洗, 及时清除表面海盐、灰尘等多余物, 降低酸性介质成分在表面的积聚。尽量减少电连接器在外场的插拔操作, 特别是在高湿度、高盐雾的强腐蚀性环境中的插拔操作, 进一步规范电连接器插拔操作。注意对插针、插孔两端的临时性防护, 避免腐蚀性介质的进入。电连接器重新插合前, 需要对插针、插孔端进行清洗和干燥处理。

参考文献:

- [1] 骆燕燕, 武雄伟, 田亚超, 等. 冲击环境下电连接器接触性能研究[J]. 工程设计学报, 2018, 25(1): 110-117.
- [2] 宋洋. 航空电连接器可靠性研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [3] STEFAN M G, WILLIAM F B, BRIAND L. F-22 Lessons Learned: Line Replaceable Module (LRM) Elec-

- trical Connector—An Investigation of Vibration-Induced Contact Wear and Electro Static Discharge Hardening[C]// Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE). Lake Buena Vista, Florida, USA, 2009.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] HANNEL S, FOUVRY S, KAPSA P, et al. The Fretting Sliding Transition as a Criterion for Electrical Contact Performance[J]. Wear, 2001, 249: 761-770.
- [7] WU Ji. Electrical Characterization and Reliability Assessment of Lead-free Solder Coated Electrical Contacts[D]. Maryland: University of Maryland, 2003.
- [8] 杨万钧, 肖敏, 何德洪. 军用电子部件失效分析[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 56-74.
- [9] 魏振伟, 周静怡, 刘昌奎. 电连接器 4J29 合金接触体断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(6): 369-375.
- [10] 余永涛, 范剑锋, 陈毓彬, 等. 电连接器的混合流动气体腐蚀试验标准方法探讨[J]. 环境技术, 2018, 36(2): 92-96.
- [11] 燕翔, 唐爱玲, 姜涛. 电连接器插针损伤失效分析[J]. 失效分析与预防, 2016, 11(2): 105-110.