

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.001

# 插拔对贮存电连接器性能退化的影响研究\*

陈文华<sup>1</sup>, 孔祥泽<sup>1</sup>, 钱 萍<sup>1</sup>, 高 亮<sup>2</sup>, 朱志鹏<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 浙江省机电产品可靠性技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018;

2. 四川农业大学 机电工程学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:**针对目前电连接器的贮存寿命评估中尚未明确计入插拔的效应,因而不能准确地指导实际应用现状,以Y11P-1419型电连接器为研究对象,深入分析了电连接器贮存期间的氧化腐蚀和定期的测试插拔所造成的接触失效,并设计了实验室模拟实际贮存的加速退化对照试验,进而通过对试验现象的观察、试验数据的统计分析和试验样品插孔微观表面形貌的扫描电镜(SEM)与能谱(EDS)分析等方面的研究,明确了贮存电连接器计入插拔的效应:因定期插拔造成了插拔后的阻值跳变,且因插拔而逐渐刮擦磨损镀金层和氧化膜、裸露基体铜,加速了后续贮存期间接触区域的氧化腐蚀。研究结果表明,插拔明显地加快了贮存电连接器性能退化的进程。因此,为了提高电连接器贮存寿命评估的准确度,必须计入插拔因素的影响。

**关键词:**贮存;电连接器;插拔;加速退化;接触电阻

**中图分类号:**TM503+.5;TH117.1;TG146.3+1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)05-0507-06

## Effects of insertion-extraction on performance degradation of storage electrical connector

CHEN When-hua<sup>1</sup>, KONG Xiang-ze<sup>1</sup>, QIAN Ping<sup>1</sup>, GAO Liang<sup>2</sup>, ZHU Zhi-peng<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Province's Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product,

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

**Abstract:** Aiming at figuring out the effects of insertion-extraction on storage life evaluation of electrical connector, and accurately guiding the practice, the Y11P-1419 electrical connector was taken as the object. The contact failure, which was caused by oxidation corrosion and insertion-extraction, was analyzed. Moreover, the accelerated degradation test was designed. The observation of test phenomena, the statistical analysis of data, and the micro morphology analysis of receptacle by SEM and EDS, were researched. And the effects of insertion-extraction during storage were revealed: regular insertion-extraction caused jump of resistance, were of gold layer and oxide film, exposed of copper substrate, it can accelerate of oxide etched for the contact area. The research results show that insertion-extraction can accelerate the performance degradation for the storage electrical connector. improving the accuracy of the storage life evaluation, the effects of insertion-extraction must be considered.

**Key words:** storage; electrical connector; insertion-extraction; accelerated degradation; contact resistance

## 0 引言

一些型号如导弹、鱼雷,作为一种威慑和防御力量

而存在,交付服役后基本上都是处于贮存状态,目前研发的新型号已要求贮存期限为20年~30年。型号贮存期间,性能会逐渐退化,对于接近或达到贮存期限的

收稿日期:2015-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275480,51305402)

作者简介:陈文华(1963-),男,浙江杭州人,博士,教授,博士生导师,主要从事机电产品可靠性技术方面的研究. E-mail: chenwh@zstu.edu.cn

型号,一项重要的工作是对其定寿延寿<sup>[1-2]</sup>。

电连接器作为一种基础机电元件,用机械方式实现电信号和能量的传递,在型号装备中数量众多,应用广泛,任何一个电连接器的失效都有可能引起整体系统的异常。因此,电连接器的寿命评估是型号定寿延寿的必要前提。

对于电连接器的寿命评估,目前已有用温度为加速因子的电连接器加速寿命试验和加速退化试验研究<sup>[3-6]</sup>。但是,贮存过程中还需要定期对型号进行测试,以检测型号状态是否正常。当型号进行单元级测试时,仪器设备、电缆、舱段间和级间的电连接器都会经历插拔的过程。插拔改变电连接器的接触状态和接触表面形貌,影响接触性能,进而影响贮存寿命。而目前有关电连接器贮存寿命的研究都没有考虑这一因素,不能满足实际评估寿命的要求。

本研究拟以某型号中常用的 Y11P-1419 型电连接器为对象,通过失效机理分析和加速退化试验,研究插拔对库房贮存电连接器性能退化的影响。

## 1 电连接器的失效分析

根据电接触理论,真实接触表面是由一些随机分布的微米纳米级凸起(称为“导电斑点”)连接的点接触<sup>[7]</sup>,电流经过时会产生额外的收缩电阻和膜层电阻,再加上接触零件本身的体电阻(基本保持不变)共同组成接触零件的接触电阻。接触电阻超出阈值而失效是电连接器最主要的失效模式,约占 45.1% 的比例<sup>[8]</sup>,本研究将重点考察接触失效。

### 1.1 电连接器的结构材料

Y11 系列电连接器的结构如图 1 所示。

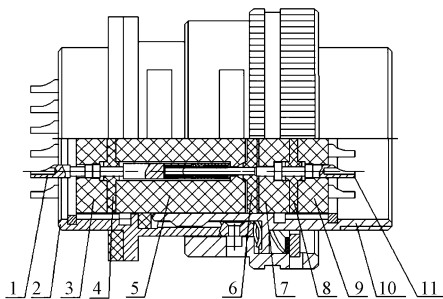


图 1 Y11 系列电连接器结构图

1—插孔;2—插座壳体;3—绝缘安装板-A;4—橡胶垫;  
5—绝缘体;6—字序橡胶垫;7—绝缘安装板-B;8—橡胶垫;  
9—绝缘安装板-C;10—插头壳体;11—插针

其基本结构主要包括:接触件、绝缘体和壳体。其中,接触件包括插针和插孔,插针和插孔插合后形成通路,导通电流实现电连接功能。对于 Y11P-1419 型电

连接器,接触件基体材料为锡青铜(QSn4-3),表面镀金,厚度为  $1.27\ \mu\text{m}$ ,插孔为中心开槽式,外径  $\Phi 1.8\ \text{mm}$ ,内径  $\Phi 1.1\ \text{mm}$ ,收口量  $0.15\ \text{mm}$ ,插针直径为  $\Phi 1\ \text{mm}$ 。

### 1.2 氧化对失效过程的影响分析

Y11P-1419 型电连接器接触件表面虽有镀金,但由于镀金工艺水平的限制,镀金层中仍然存在一些微孔和裂纹,环境中的氧沿着这些通道与基体铜接触,发生电化学反应和化学反应生成氧化亚铜,并随着贮存时间的延长逐渐堆积<sup>[9-11]</sup>,其中: $\text{Cu} - \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$ ,  $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$ ,  $2\text{Cu}^+ + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$ 。增厚的氧化亚铜使大气中的氧越来越难以穿通,氧化速率减慢并最终趋于停止。铜的氧化腐蚀化学反应总方程式为: $4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$ 。

由量子力学的隧道效应可知,电流击穿膜层导电的能力随着膜层厚度的增加而减小,当厚度达到  $20\ \text{nm}$  时,膜层隧道电阻率急剧增大,从而导致接触电阻剧增<sup>[12]</sup>。对于贮存期长达 20 年~30 年的电连接器而言,接触件表面的氧化亚铜随着时间的延长生长堆积,当达到一定厚度时,接触电阻超出阈值,电连接器发生接触失效。实际贮存中的电连接器存放一定周期需要测试插拔,接触表面的氧化亚铜被刮擦,经历插拔后在新的接触状态下氧化亚铜重新生长堆积,影响接触性能。

### 1.3 插拔对失效过程的影响分析

到达一定的存放周期,型号需要单元级测试,此时施加的插拔会改变原有的静态稳定接触,影响接触性能。

#### 1.3.1 插拔过程的影响

Y11P-1419 型电连接器接触斑点静态接触时,在热和压力的共同作用下,接触面间产生粘着,出现轻微冷焊现象<sup>[13]</sup>。插拔过程中在剪切力作用下微冷焊的凸点被切断,然后与下一个凸点粘着、切断,甚至撕碎剥落,材料在两接触面间迁移。同时,接触表面的氧化亚铜受到微凸点的刮擦被剪切迁移。由剪切迁移的接触表面材料和氧化物共同组成的磨粒参与插拔过程,在接触表面产生加工硬化现象,严重擦伤接触表面镀金层,产生较深的沟壑和较高的脊背,表面粗糙度增大。增大的表面粗糙度和脱落在两接触面之间的磨屑使下次的插拔磨损更加严重。插拔的拔、插过程是两个相反方向的刮擦,即使是粘附性强的金,经过多次刮擦也会磨损甚至脱落。插拔过后部分磨屑脱落在接触面上,阻碍两接触面的直接接触,接触斑点数目

大量减少,收缩电阻增大,容易产生插拔后的阻值跳变现象。

插拔擦拭接触表面的氧化亚铜,膜层厚度减小,膜层电阻减小。同时,少量氧化物嵌入表面材料,接触斑点有效面积减小,收缩电阻增大。多次的插拔刮擦使镀层逐渐变薄,镀层表面硬度逐渐增大趋于铜的硬度,收缩电阻增大<sup>[14-15]</sup>。

以上分析表明,插拔过程引起了收缩电阻和膜层电阻的不同变化。因此,反映综合效果的接触电阻变化需要通过试验才能判定。

1.3.2 插拔对后续存放过程的影响

插合后最初接触时,两表面之间只有很少的接触斑点并且面积非常小,接触斑点单位面积承受的接触压力非常大,产生弹性变形。随着时间的延长,在热和压力的共同作用下材料向塑性变形转变,产生粘着,接触斑点面积逐渐扩大,同时接触斑点间的孔隙变小,接触件表面出现新的接触斑点。最后,当总的接触斑点形变能够承受接触压力时,接触状态达到稳定。

多次插拔刮擦使表面镀金层逐渐磨损变薄,孔隙增多,甚至裸露基体铜,在后续的长期存放中,接触表面氧化腐蚀加快,膜层电阻增大。同时氧化亚铜生长侵蚀接触斑点,收缩电阻减小。

以上分析表明,后续贮存期间收缩电阻和膜层电阻产生了不同变化。因此,反映综合效果的接触电阻变化需要通过试验才能判定。

- 综合以上分析,主要归纳为以下3点:
- (1) 插拔改变接触面上接触斑点的数量;
  - (2) 插拔造成接触表面材料和氧化物迁移;
  - (3) 插拔磨损镀金层,使孔隙增多,甚至裸露基体铜。

其中,(1)和(2)可能带来插拔后接触的不稳定,造成阻值的跳变,(3)可能加速电连接器在后续贮存过程中的氧化。长期的贮存过程中,接触件的蠕变和应力松弛量缓慢增大,使接触压力减小,接触电阻增大。

2 插拔对电接触性能影响的试验研究

2.1 试验方案

2.1.1 试验安排

Y11P-1419 型电连接器样品均从例行试验合格的批次中随机抽取,试验前样品需拔、插各 2 次检验是否可以正常分离与插合。本研究将样品分为对照

组和插拔组,每组 8 个,两组样品均在 120 ℃ 下加速退化,另外,插拔组每隔 72 h 施加插拔应力,拔、插各 2 次作为插拔应力的施加,其他试验环境两组保持完全相同。试验采用定时测试,测试条件需满足 GJB1217A—2009 的规定,接触电阻采用“四线法”测量,试验截尾时间为1 000 h。失效判据为:接触电阻大于 5 mΩ。试验后取样品做 SEM 分析,超声波清洗后做 EDS 分析。

2.1.2 设备和仪器

本研究的温度控制选用上海 ESPEC 高温试验箱,控制范围: +20 ℃ ~ +200 ℃,波动 ±0.3 ℃,显示 0.1 ℃;

电流测试选用上海乾峰直流数字电流表,测试范围:0 ~ 2 A,分辨率:4 位半,屏幕显示 6 位;

电压测试选用上海乾峰直流数字电压表,测试范围:10 μV ~ 200 V,分辨率:4 位半,屏幕显示 6 位;

SEM 选用德国蔡司扫描电子显微镜(附带能谱仪),分辨率:1 nm;

超声波清洗选用昆山超声波清洗机,超声频率 40 kHz,超声功率 50 W。

2.2 试验数据和试验结果分析

2.2.1 试验数据分析

本研究根据测试记录的  $3.9 \times 10^4$  个接触电阻值将样品接触件阻值的均值绘制随时间变化的曲线,即可反映电连接器的性能变化趋势,此处绘制样品 C1 和 D1 的性能退化曲线,以示代表,该曲线如图 2 所示。

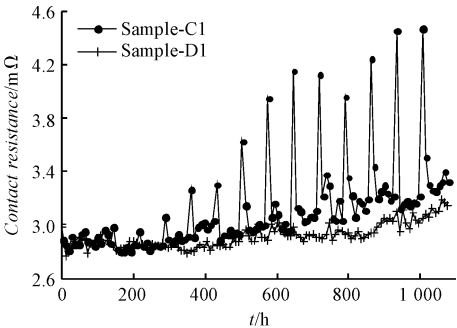


图2 样品 C1 和 D1 性能退化曲线

从图2 可以看出:样品 C1 插拔之后,阻值有跳变,后期容易出现失效。因此说明:插拔后收缩电阻跳变,引起接触电阻跳变。

综合图 2 中样品 C1 和 D1 的性能退化曲线,可以看出:随着时间的延长,样品阻值均有逐渐增大的趋势(暂不计入阻值跳变情况)。但是两(组)样品阻值的退化速度是否具有统计意义上的区别,难以直接判断,需要给予分析证明。

本研究将插拔组样品每个接触件的结束值与初始值之差作为性能的变化量,其中以第 1 次插拔前的阻值作为初始值,代表初始接触性能,以试验结束后的阻值作为结束值,代表最终接触性能。同理得到对照组性能的变化量。由于两组变化量为相互独立样本,可选用非参数统计 Mann-Whitney-Wilcoxon 检验方法判别。

令插拔组和对照组的变化量分别记为样本  $X$  和  $Y$  (将每组电连接器接触件混合成为  $8 \times 19 = 152$  的大数据样本),服从累计分布函数  $F_x$  和  $F_y$ ,中位数记为  $M_x$  和  $M_y$ ,那么:

零假设: $H_0:M_x=M_y$

备择假设: $H_1:M_x>M_y$

样本  $X$  和  $Y$  的观测值为: $x_1,x_2,\cdots,x_m$  和  $y_1,y_2,\cdots,y_n,(m=n=152)$ 。

计算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 插拔组和对照组退化速度比较-秩

| 分组变量 | $N$ | 秩均值   | 秩和     |
|------|-----|-------|--------|
| 插拔组  | 152 | 165.7 | 25 186 |
| 对照组  | 152 | 139.3 | 21 174 |

表 2 插拔组和对照组退化速度比较-检验统计量

| 统计量名称          | 检验变量   |
|----------------|--------|
| Mann-Whitney U | 9 546  |
| Wilcoxon W     | 21 174 |
| Z              | -2.618 |
| 渐进显著性(双侧)      | 0.009  |

从表 1 和表 2 可以看出,插拔组的秩和(25 186)远大于对照组的秩和(21 174),检验统计量  $Z = -2.618$ ,渐进显著性水平为 0.009,小于 5%,说明两

组数据中位数不同,插拔组阻值变化量偏大。所以没有理由接受原假设,即认为插拔组的阻值退化量明显大于对照组阻值退化量,插拔加快了贮存电连接器性能退化的进程。

2.2.2 试验结果分析

本研究取初始样品插孔做 SEM 分析;试验结束后分别取插拔组、对照组电连接器插孔做 SEM 分析。整体形貌和接触区域形貌如图 3 所示。

从图 3 可以看出插拔样品磨损最为严重,不插拔样品和初始样品磨损轻微。对于初始样品,如图 3(c),3(f)所示,仅有试验开始前检验样品是否可以正常分离和插合时的插拔,接触表面脱落粘附有少量片状金属,粘附区域为 200  $\mu\text{m}$  左右的圆。与初始样品相比,不插拔样品由于经历了长期的贮存,接触斑点塑性形变量较大,插拔分离后,接触区域脱落粘附的片状金属较多,粘附区域为 300  $\mu\text{m}$  左右的圆,如图 3(b),3(e)所示,其中黑色物质为氧化亚铜。插拔样品经过长期存放和多次插拔,镀金层逐渐磨损,如图 3(a),3(d)所示,与不插拔样品相比,脱落粘附的片状金属区域基本不变,但表面磨损较为严重(长轴 200  $\mu\text{m}$ ,短轴 100  $\mu\text{m}$  左右的椭圆区域),磨屑细小。

前期插拔时,刮擦磨损表面的镀金层,脱落粘附在接触表面的磨屑主要为金,插拔后阻值跳变不大;后期插拔时,镀层变薄,甚至裸露基体铜,氧化腐蚀成为接触电阻增大的主要因素,造成插拔后脱落粘附在接触面间的磨屑中氧化亚铜的成分越来越多,阻碍了插合后两接触面的直接接触,接触状态更加不稳定,阻值跳变越来越大。

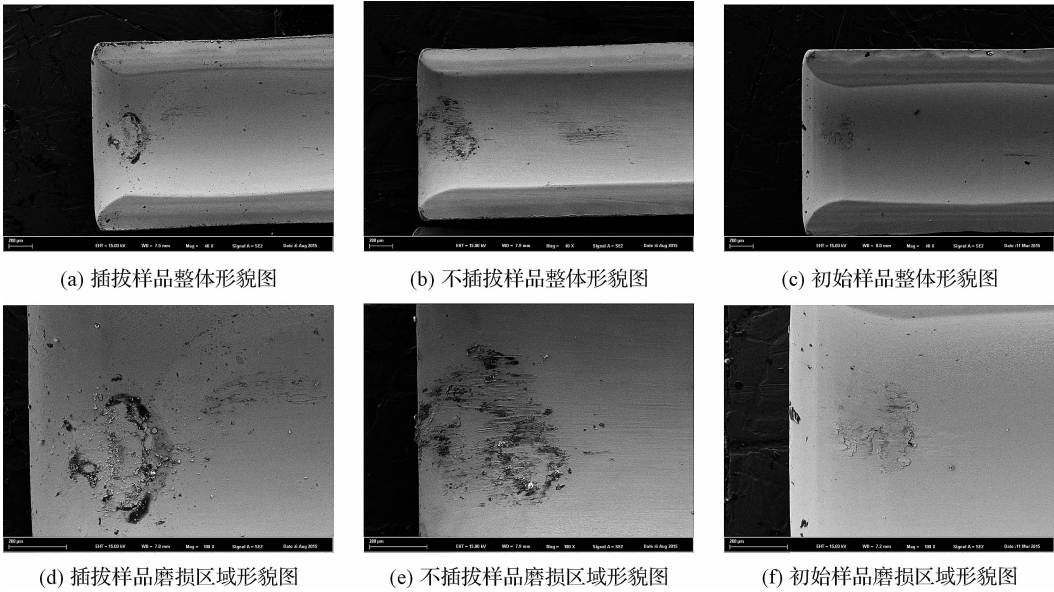
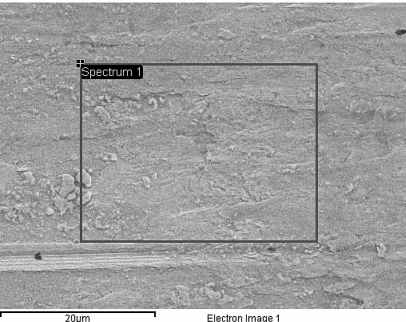
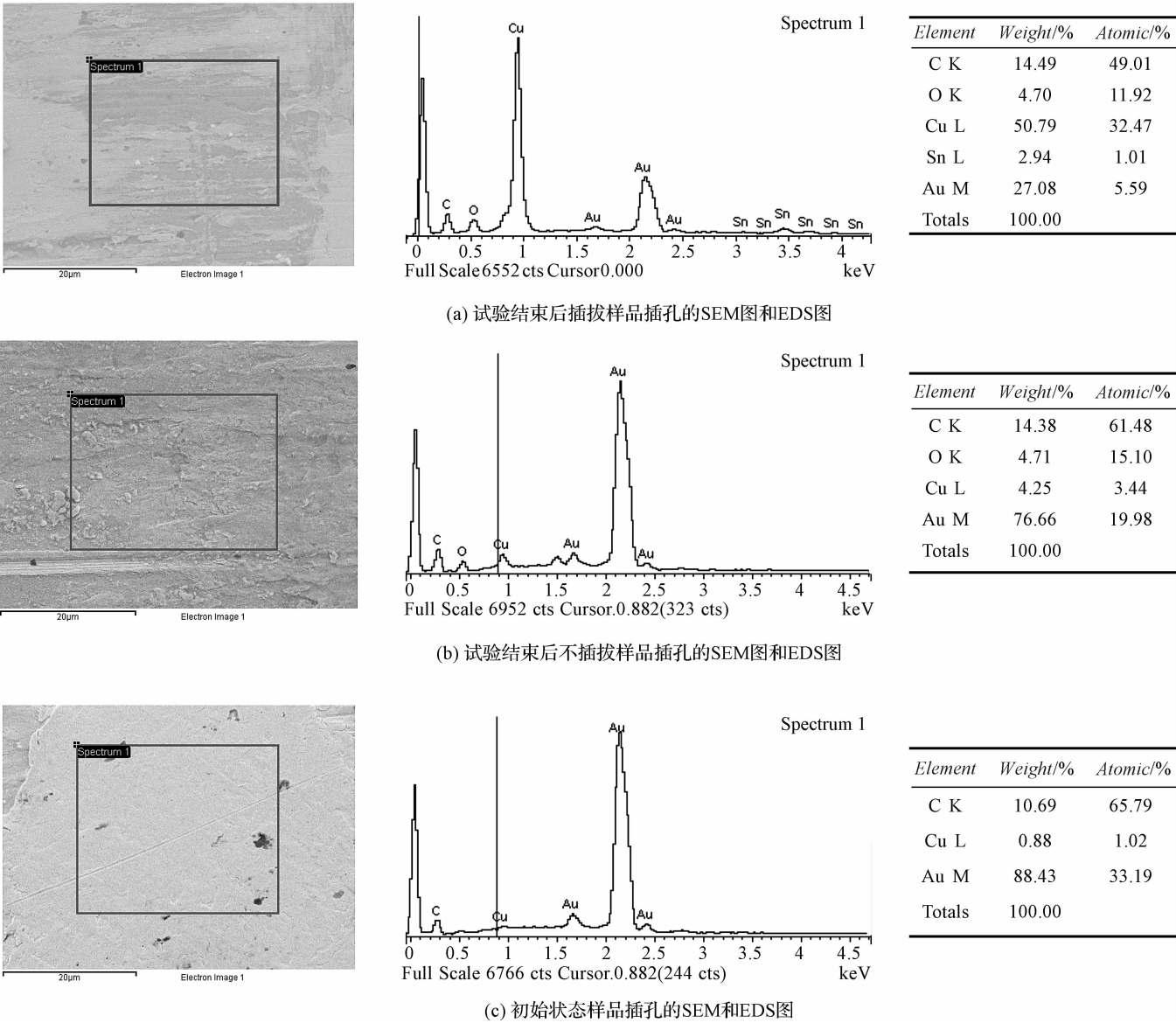


图 3 插孔整体形貌和磨损区域形貌图

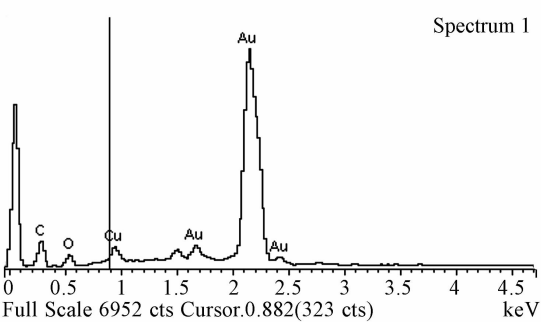
本研究将插拔样品、不插拔样品和初始样品表面经无水乙醇超声清洗,对磨损区域 SEM 分析、EDS 表面元素成分分析,分析结果如图 4 所示。从图 4 (a)可以看出,插拔样品接触表面镀金层磨损严重,检测到铜(原子百分比:32.47%)和锡(1.01%),说明铜基体已经裸露,且铜原子百分比已大于金

(5.59%);由图 4(b)可以看出,不插拔样品接触表面塑性变形严重,但是镀金层仍完整,金元素含量非常高,原子百分比(19.98%)远远大于铜的原子百分比(3.44%);由图 4(c)可以看出,初始样品接触表面基本没有塑性变形,镀金层完好,原子百分比(33.19%)非常高。

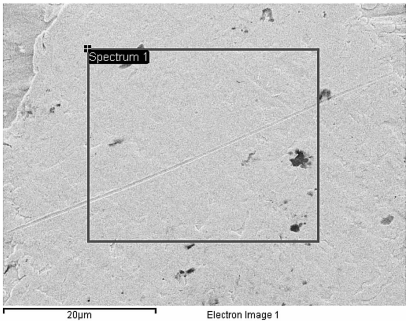


Electron Image 1

Spectrum 1

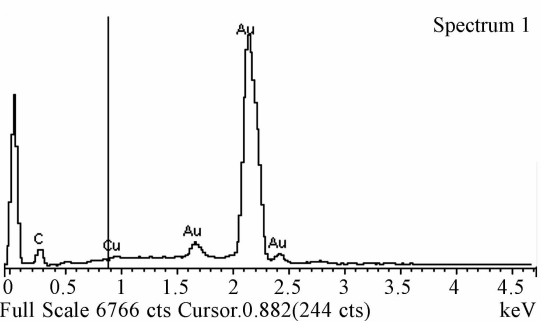


Full Scale 6952 cts Cursor 0.882(323 cts) keV



Electron Image 1

Spectrum 1



Full Scale 6766 cts Cursor 0.882(244 cts) keV

图 4 磨损部位表面形貌 SEM 图和 EDS 图

图 3 和图 4 中插拔样品和不插拔样品的表面形貌和元素比例的不同,是由于计入插拔因素所产生的不同效应。插拔样品表现出的形貌和元素组成是长时间贮存和多次插拔的综合效应。插拔改变接触表面的原有稳定接触状态,使接触表面产生材料的刮擦磨损和转移。在宏观上镀金层磨损,基体铜裸露增加,后续存放周期氧化腐蚀加快;在微观上接触斑点的数目和大小发生改变,出现插拔过后的阻值

跳变现象。

综合以上研究表明:插拔加快了电连接器的性能退化速度,是评估贮存寿命时必须考虑的因素。

### 3 结束语

本研究首先对插拔的影响进行了失效机理分析,然后进行了加速退化试验,并分析试验数据和试验结果,在该试验条件下,得到如下结论:

(1)揭示了计入插拔的效应,并证明了计入插拔会加速电连接器接触性能的退化进程。因此,为了提高电连接器贮存寿命评估的准确度,插拔因素的影响必须考虑。

(2)插拔后阻值有跳变。因此,长期贮存的电连接器插拔后不宜立即使用,尤其接近贮存年限时应谨慎插拔。

## 参考文献(References):

- [1] 孟 涛,张仕念,易当祥,等. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.
- [2] 张福光,王鲁杉,崔旭涛,等. 导弹战备完好性度量参数及影响因素[J]. 兵工自动化,2014,33(8):1-4,19.
- [3] 陈文华. 航天电连接器可靠性试验和分析的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,1997.
- [4] 潘 骏,刘红杰,陈文华,等. 航天电连接器步进应力加速寿命试验研究[J]. 机电工程,2011,28(2):172-175,183.
- [5] CHEN Wen-hua, LIU Juan, GAO Liang, et al. Accelerated Degradation Reliability Modeling and Test Data Statistical Analysis of Aerospace Electrical connector[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2011,24(6): 957-962.
- [6] 刘娟. 电连接器步进应力加速退化试验的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2013.
- [7] SLADE, PAUL G. Electrical Contacts: Principles and Applications[M]. 2nd ed. CRC Press, 2013.
- [8] 张菊华,孔宪宝. 低频电连接器失效模式的分析[J]. 机电元件,1989,9(1):36-43.
- [9] CHEN Wen-hua, LIU Juan, GAO Liang, et al. Step-stress Accelerated Degradation Test Modeling and Statistical Analysis Methods[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2013,26 (6):1154-1159.
- [10] ANTLE M, DROZDOWICZ M N, Wear and Porosity of Electrodeposited Gold Contacts: The Effect of Laser Glazing the Substrate Metals [C]//**Proceedings of 35th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. Chicago, USA:[ s. n. ], 1989: 105-109.
- [11] KRUMBEIN S J, ANTLE M. Corrosion inhibition and wear protection of gold plated connector contacts[J]. **Parts Materials & Packaging IEEE Transactions on**,1968, 4 (1):3-11.
- [12] 钱 萍. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2010.
- [13] 温诗铸,黄 平. 摩擦学原理[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2012.
- [14] TIMSIT R S. Electrical contact resistance: properties of stationary interfaces[J]. **IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies**,1999,22(1): 85-98.
- [15] MISRA P, NAGARAJU J. Electrical contact resistance in thin ( $\leq 0.5 \mu\text{m}$ ) gold plated contacts: effect of gold plating thickness[J]. **IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies**,2010,33(4): 830-835.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

陈文华,孔祥泽,钱 萍,等. 插拔对贮存电连接器性能退化的影响研究[J]. 机电工程,2016,33(5):507-512.

CHEN When-hua, KONG Xiang-ze, QIAN Ping, et al. Effects of insertion-extraction on performance degradation of storage electrical connector[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(5):507-512.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>