

DOI:10.11918/202404013

随机振动下电连接器性能退化及磨屑迁移

骆燕燕¹, 祁侨绅¹, 王永鹏², 武雄伟³, 马旋⁴

(1. 电工产品可靠性技术省部共建协同创新中心(河北工业大学), 天津 300401; 2. 国家电网山东省电力公司邹平供电公司, 山东 邹平 256200; 3. 国家电网河北省电力公司邯郸新区供电公司, 河北 邯郸 056000; 4. 国家电网冀北电力公司张家口供电公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 为探究电连接器在运行过程中随机振动导致其接触件发生微动磨损, 产生磨屑造成接触性能降低的问题, 分别进行步进应力及恒定应力随机振动试验。采用电容层析技术对微动磨损过程中电连接器接触件间磨屑进行检测, 研究振动周期、振动方向、振动量级和负载电流对磨屑堆积与分布的影响; 对试验后的试品进行表面形貌及能谱分析, 并引用分形维数研究磨屑分布均匀度, 量化接触件表面的磨损程度。试验结果表明: 振动周期、振动方向、振动量级对接触件间磨屑的产生与堆积具有正向累积效应; 负载电流因发热与应力松弛的耦合作用, 延缓了性能退化过程; 轴向振动磨损最为严重; 插针根部为严重磨损区域; 电连接器在步进应力随机振动下的性能退化规律与恒定应力下相似, 且步进应力下的磨屑特征值呈现出一定的阶跃变化特征; 电连接器在微动磨损过程中接触表面形貌会发生显著变化; 表面形貌及能谱分析结果与磨屑特征值及接触电阻变化规律相吻合。

关键词: 电连接器; 电容层析技术; 磨屑; 微动磨损; 分形维数

中图分类号: TM501 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)09-0038-10

Performance degradation and wear debris migration of electrical connectors under random vibrations

LUO Yanyan¹, QI Qiaoshen¹, WANG Yongpeng², WU Xiongwei³, MA Xuan⁴

(1. Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center on Reliability Technology of Electrical Products(Hebei University of Technology), Tianjin 300401, China;

2. Zouping Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zouping 256200, Shandong, China;

3. Handan New Area Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Handan 056000, Hebei, China;

4. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: To investigate the fretting wear of the contact parts of electrical connectors caused by random vibrations during operation, resulting in decreased contact performance due to wear debris, stepped stress and constant stress random vibration tests were conducted. Electrical capacitance tomography technology was used to detect the wear debris between the contact parts of the electrical connectors during fretting wear. The effects of vibration period, direction, magnitude, and load current on wear debris accumulation and distribution were studied. Surface morphology and energy spectrum analysis were conducted on the specimens after testing, and fractal dimension was used to study the uniformity of debris distribution, quantifying the extent of wear on the contact surfaces. Results of the tests show that vibration period, direction, and magnitude have a positive cumulative effect on the generation and accumulation of wear debris between contact parts. The coupling effect of load current, leading to heating and stress relaxation, delays the performance degradation process. Axial vibration causes the most severe wear, with the root of the pin being the area of severe wear. The degradation patterns of the electrical connectors under stepped stress random vibration are similar to those under constant stress, with wear debris characteristic values under stepped stress showing a certain step-change feature. Significant changes occur in contact surface morphology during fretting wear of the connectors. The results of surface morphology and spectrum analysis align with the characteristics of wear debris and the variation in contact resistance.

Keywords: electrical connector; electrical capacitance tomography; wear debris; fretting wear; fractal dimension

电连接器是应用于轨道交通、航空航天、通信设备及核电等重要领域的一种基础机电元件, 其功能

主要是完成器件、组件及系统间的信号通断和电气连接。电连接器除了要满足基本的性能指标以外,

收稿日期: 2024-04-03; 录用日期: 2024-05-18; 网络首发日期: 2024-06-25

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240624.1613.017>

作者简介: 骆燕燕(1971—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 祁侨绅, 983651950@qq.com

还要求接触良好、工作安全和维护方便。接触性能优劣对系统的可靠运行具有重要影响。

在使用期间,电连接器会受到多种环境因素的影响,使其接触性能逐渐降低,最终导致其失效。振动应力对电连接器的接触性能和可靠性有着极其重要的影响,长期的机械振动会导致插针与插孔间的相对位移,造成接触区域微动磨损,并在接触面上形成大量的磨屑;暴露的基体金属与空气发生氧化反应,形成氧化物,使接触电阻急剧增加,降低电连接器的使用寿命和可靠性,影响连接器的性能^[1-3]。振动激励大致可分为正弦振动和随机振动,其中随机振动具有统计特性,更适合实际工况^[4-5]。与正弦振动相比,随机振动频谱是连续的,在测试过程中,可以同时测试所有频率下的器件相互作用,充分暴露产品设计缺陷。

目前,国内外学者对于随机振动下电连接器性能退化进行了大量研究。何林涛等^[6]通过对触碰式电连接器的随机振动仿真发现,振动位移较大时易使电连接器插针与插孔接触表面出现较大的往复摩擦力,引起插针表面疲劳断裂;刘少杰等^[7]经仿真研究建立随机振动下微矩形电连接器松动过程中应力与接触电阻的映射关系;刘琦等^[8]对电连接器在不同载荷和工况下进行插拔、模态、随机振动和热-结构耦合仿真分析,发现电连接器接触表面在振动与高温作用下易产生微米级的相对滑移,温差作用下比振动条件下的滑移量更大;Xu等^[9]根据弹性接触的 Greenwood-Williamson 模型和随机粗糙表面的等效弹簧模型,研究电连接器在振动过程中接触压力的变化;Huang等^[10]建立微型 USB 电连接器三维模型,发现 1σ 振动水平下的等效应力和形变响应没有太大变化;Flowers等^[11]通过建立早期微动腐蚀率与连接器的阈值振动水平、连接器/布线配置的动态特性和振动轮廓间关系,证明模型与实验数据之间的高度一致性;Yang等^[12]在随机振动试验中发现,单频振动输入的电连接器的振幅阈值为微米级,且随着振动频率的变化而变化。但已有的研究存在以下不足:1)多采用数学建模与有限元仿真方法,实体试验较少;2)性能退化多采用摩擦力、接触压力及形变量等参数来表征,对于磨屑量与电连接器性能退化间的规律尚未进行研究;3)磨损检测方法多采用有损检测,对接触件的接触状态会造成一定程度的破坏。

针对上述问题,本文进行电连接器随机振动试验,采用电容层析成像技术,根据接触件间磨屑的积累和分布导致的介电常数变化转化为电容值变化,实现无损检测^[13-15],分析随机振动应力下电连接器

性能退化规律,并利用分形维数表征磨屑分布均匀度,量化微动磨损程度。

1 随机振动微动磨损试验

1.1 试验样品

本文选取 M 型圆形电连接器作为研究对象。触头直径约 10 mm,材质为黄铜(HPb59-1 级:铜,60.0%;铅,1.9%;镍,1.0%;铁,0.5%;平衡锌)和镀金镍镀层。M 型电连接器试样实物见图 1。



图 1 电连接器试样实物

Fig. 1 Physical drawing of electrical connector specimen

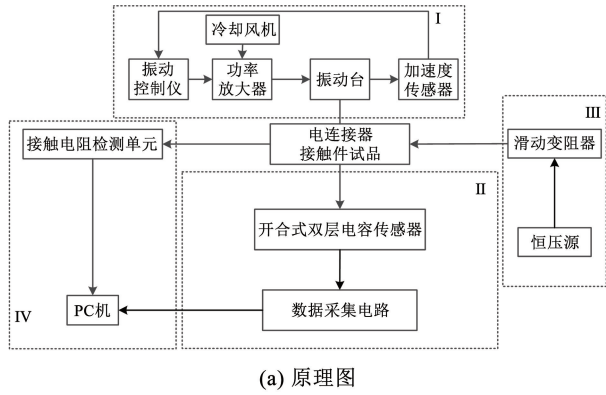
1.2 试验设备

电连接器微动磨损试验装置见图 2。主要包括 4 部分:随机振动驱动单元(I)、磨屑特征值检测单元(II)、负载电流施加单元(III)、接触电阻测量单元(IV)。随机振动驱动单元提供振动激励,促使接触件间发生微动磨损;磨屑特征值检测单元安装在试品的外围,利用电极的电场效应将电连接器接触件间磨损后产生的磨屑变化值转化为电容信号;负载电流施加单元提供稳定的电流;接触电阻测量单元采用 VC6310A 型直流低电阻测试仪定期进行接触电阻测试,其精度可保证满量程时测量误差小于 0.1%,并将测量数据传输至计算机。

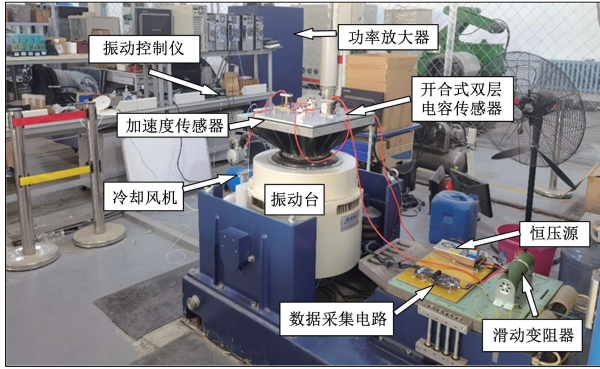
1.3 试品的安装与检测

在试验过程中,电连接器试样以等间距对称牢固地安装在振动台上,以保证施加在试样上的振动应力与振动台施加的振动应力同步。试样安装位置见图 3。试样安装在 3 个不同的振动方向(X、Y、Z),见图 4。试样的 X 振动方向垂直于轴向,平行于劈槽;试样的 Y 振动方向与轴向平行;试样的 Z 振动方向与接触面和劈槽的轴向垂直。

受试样尺寸和测量精度的限制,本文设计了一种双层电容传感器。其中 16 个电极沿轴向分两层固定在其外壳,沿每层圆周等间距布置 8 个电极。为减小杂散电容带来的误差,提高磨屑特征值检测装置精度,采用高分辨率电容数字转换器 AD7746。经对比设置电极片到试样中心的距离为 19 mm,并添加屏蔽罩以消除外界电磁场的干扰。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 2 电连接器微动磨损试验装置

Fig. 2 Fretting wear test device for electrical connector

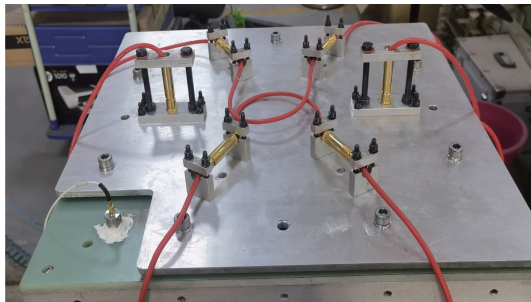


图 3 试样安装位置

Fig. 3 Schematic diagram of specimen installation location

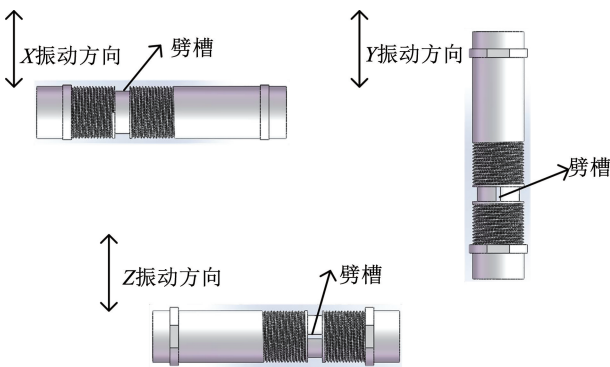


图 4 振动方向

Fig. 4 Schematic diagram of vibration direction

由于电容器的边缘效应,本试验依次选择同一层相邻的两个电极作为激励电极和检测电极(如上层电极对 1-2、2-3)。测量的每一个电容值都可以表

征某对电极对应的接触区域内磨屑量。因此,被测接触件的接触区域可分为 16 个子区域。同时,也可通过插针中间的劈槽将接触区域分为两部分,即 A 区域和 B 区域,见图 5。

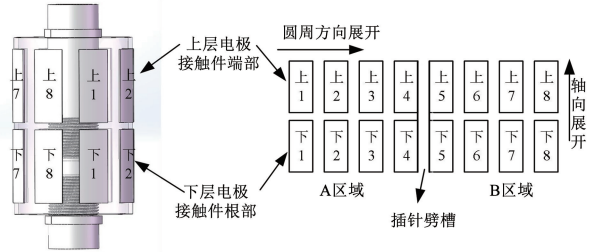


图 5 接触区域划分

Fig. 5 Schematic diagram of contact area division

通过分析 16 个子区域磨屑对应的电容值,可以得到电连接器随机振动下微动磨损过程中各接触子区域的磨损程度及微动磨损的演化过程。

1.4 试验方案

为了准确分析随机振动下电连接器接触件微动磨损过程性能退化规律及磨屑分布,本文设计了两种随机振动激励下的微动磨损试验方案,即恒定应力和步进应力随机振动。选择 400 min 恒定应力试验时间,每 20 min 为一个振动周期,每 40 min 测量一次磨屑特征值(电容值)和接触电阻值,对定期检测的电容值与试验前初始值的差值作为磨屑特征值 ΔC 进行分析。为比较和分析电连接器在空载和负载恒定应力随机振动条件下微动磨损性能的退化规律,在电连接器的两端施加 5 A 的负载电流。根据步进应力水平数的选择要求,确定应力水平数为 4,每 20 min 测量一次磨屑特征值和接触电阻值。每 200 min 作为一个振动量级循环,试验共持续 800 min。为减小温度对接触电阻及磨屑特征值测量的影响,试验均保持在室温 $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行。图 6 为步进应力随机振动试验中应力水平,表 1、2 分别为恒定应力、步进应力随机振动试验方案。

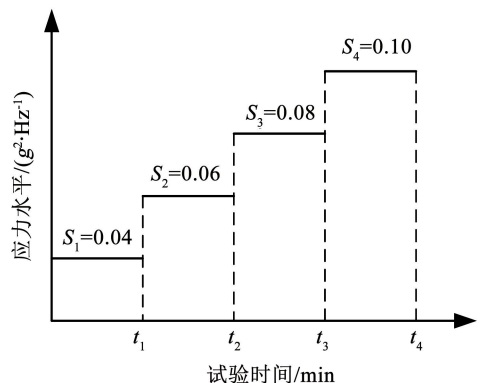


图 6 步进应力随机振动试验应力水平

Fig. 6 Step stress random vibration test stress level

表1 电连接器恒定应力随机振动试验方案

Tab.1 Constant stress random vibration test scheme of electrical connector

试品编号	振动方向	负载电流/A	应力水平/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	试验时间/ min
X-1, X-2	X	0	0.04	400
Y-1, Y-2	Y	0	0.04	400
Z-1, Z-2	Z	0	0.04	400
X-3, X-4	X	5	0.04	400
Y-3, Y-4	Y	5	0.04	400
Z-3, Z-4	Z	5	0.04	400
X-5, X-6	X	0	0.06	400
Y-5, Y-6	Y	0	0.06	400
Z-5, Z-6	Z	0	0.06	400
X-7, X-8	X	5	0.06	400
Y-7, Y-8	Y	5	0.06	400
Z-7, Z-8	Z	5	0.06	400
X-9, X-10	X	0	0.08	400
Y-9, Y-10	Y	0	0.08	400
Z-9, Z-10	Z	0	0.08	400
X-11, X-12	X	5	0.08	400
Y-11, Y-12	Y	5	0.08	400
Z-11, Z-12	Z	5	0.08	400

表2 电连接器步进应力随机振动试验方案

Tab.2 Step stress random vibration test scheme of electrical connector

试品编号	振动方向	负载电流/A	应力水平/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	试验时间/ min
X-13, X-14	X	0	0.04→0.06→0.08→0.10	800
Y-13, Y-14	Y	0	0.04→0.06→0.08→0.10	800
Z-13, Z-14	Z	0	0.04→0.06→0.08→0.10	800

2 恒定应力随机振动性能退化规律分析

2.1 磨屑特征值总量变化

图7为不同随机振动条件下磨屑特征值总量的变化曲线。由图7可知:

1)随着振动周期的增加,试品磨屑特征值总量的增长大致分为3个阶段:微动磨损初期,即磨合期,插针与插孔间出现氧化物,并在微动过程中被切割形成磨屑,磨损率很高,磨屑累积量迅速增加。然而,磨合期在整个寿命期中所占比例很小。之后微动磨损迅速进入第2阶段,磨损率逐渐降低。随着磨屑堆积和氧化程度的增加,接触点逐渐合并为小平台,插针与插孔处于稳定磨损状态,性能退化过程相对缓慢。第3阶段,接触件磨损进一步加剧。

2)振动量级不同时,磨屑特征值总量随着振动量级的增大略有增加,但在第20个振动周期时相差不大。Y-1 (0.04 g^2/Hz)、Y-5 (0.06 g^2/Hz)和Y-9 (0.08 g^2/Hz)试品在20个振动周期下的磨屑特征值总量分别为0.477、0.504和0.553 pF,振动量级越大,磨损率越高,即磨屑量增加越快。在第2个振动周期时,Y-1、Y-5和Y-9试品磨屑特征值总量分别为0.127、0.171和0.237 pF,Y-9试品磨屑特征值总量约为Y-1的2倍。在第6个振动周期时,Y-9的磨屑特征值总量为0.325 pF,而在第12个振动周期时,Y-1和Y-5才达到0.294和0.329 pF,Y-9试品的磨屑特征值总量增长速率高于Y-1和Y-5。说明在同一振动周期内,高振动量级下微动磨损较为严重,磨损初期磨屑堆积速率较大,进入第2阶段速度较快,磨损平台期更长。

3)在相同振动条件下,负载试品磨屑特征值总量高于空载试品的磨屑特征值总量。Y-11 (0.08 g^2/Hz ,5 A)和Y-9 (0.08 g^2/Hz ,0 A)试品在第20个振动周期时,磨屑特征值总量分别为0.608和0.553 pF。这表明负载电流对磨屑的产生有正向累积效应。电流负载作用下接触面温度升高,接触软化,容易“切削”形成碎屑,且氧化速率增大,磨屑增多,磨损进一步加剧。在高振动量级下,加载更容易产生磨屑,加剧磨损。

4)在相同振动条件下,Y振动方向试品的磨屑特征值总量高于X和Z振动方向试品,X向试品的磨屑特征值总量略高于Z向试品。Y振动方向试品的磨屑累积速度最快。说明在Y向振动过程中,接触件之间的相对位移增加,导致微动磨损加剧。

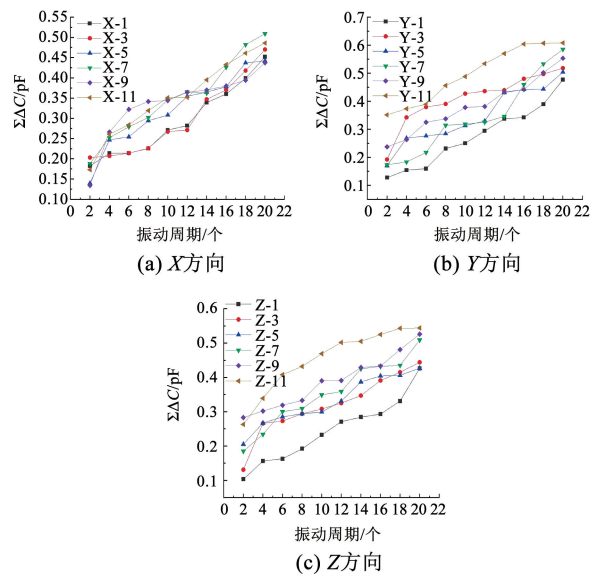


图7 不同随机振动条件下磨屑特征值总量变化

Fig.7 Variation of total amount of wear debris characteristic values under different random vibration conditions

2.2 不同区域磨屑特征值变化

图 8 为不同区域磨屑特征值变化曲线。由图 8 可知,接触件不同区域磨屑特征值的变化趋势与磨屑特征值总量变化趋势基本一致。上层区域磨屑特征值总量较小,平均值小于 0.06 pF。下层区域磨屑特征值总量远大于上层区域磨屑特征值总量,约为上层区域的 8~10 倍,由此推断插针根部磨损较轻,接触件的磨损和磨屑堆积主要发生在插针根部。原因是电连接器的插孔端部为缩口结构,接触区与插针根部之间的接触压力大于其他区域,产生的摩擦与接触压力成正比,因此插针根部的磨损比端部严重。此外,A 区域磨屑特征值总量普遍大于 B 区域磨屑特征值总量,表明 A 区域磨损程度比 B 区域更严重。负载电流会加剧试品磨损。

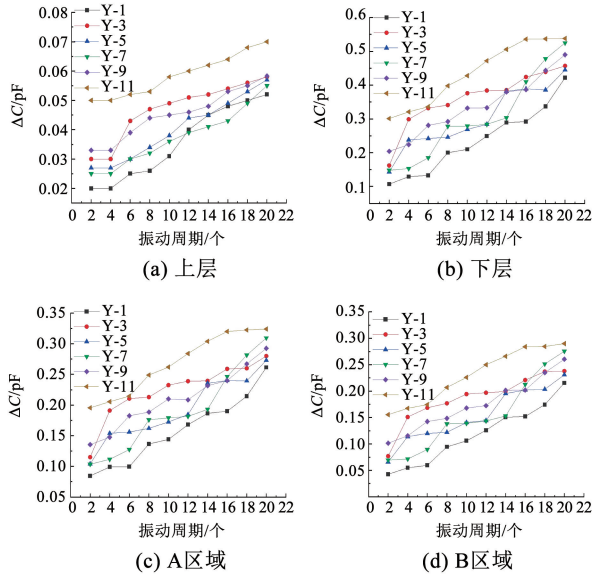


图 8 不同区域磨屑特征值变化

Fig. 8 Variation of wear debris characteristic values in different areas

2.3 接触电阻变化规律

图 9 为不同随机振动条件下部分典型试品接触电阻变化曲线。由图 9 可知,不同随机振动条件下

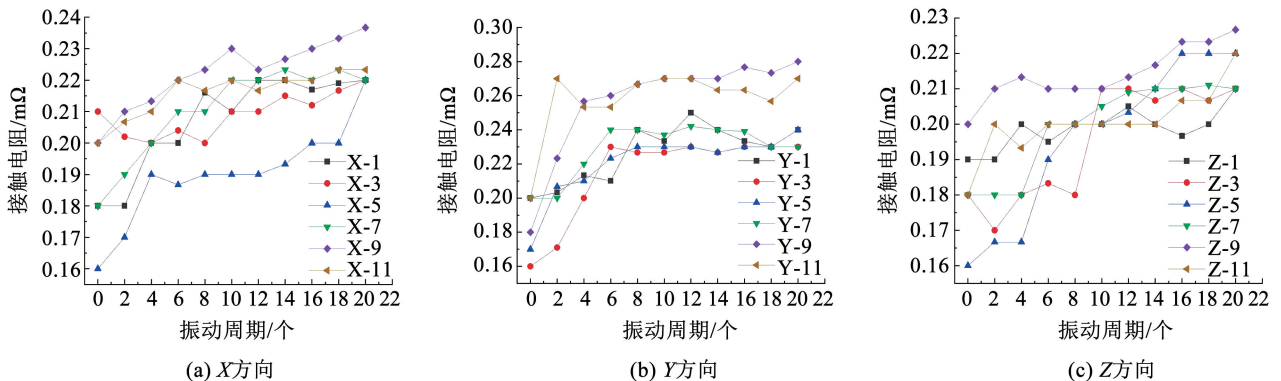


图 9 不同随机振动条件下接触电阻的变化

Fig. 9 Variation of contact resistance under different random vibration conditions

接触电阻变化规律与图 7 中磨屑特征值总量相似。

1) 随着振动周期的增加,接触电阻值呈波动上升趋势,但与磨屑特征值相比,周期性增长特征不明显。4~6 个振动周期前后接触电阻值显著增加。试验后试品接触电阻增幅为 0.03~0.10 mΩ。由此可知,虽然此时磨屑堆积速率降低,但随着氧化程度的增加,逐渐形成的“第三体”减小了接触面积,使接触电阻迅速上升。此外,随着振动周期的增加,磨屑迁移的概率也增加,导致接触电阻波动。但是,只要磨屑堆积和覆盖面积没有有效改变接触面积,接触电阻就不会显著增加。

2) 高振动量级接触电阻值高于低振动量级。如 Y-9(0.08g²/Hz)、Y-5(0.06g²/Hz)、Y-1(0.04g²/Hz) 试品在第 20 个振动周期时,接触电阻值分别为 0.280、0.243、0.240 mΩ,比试验前分别高 56%、41%、20%。

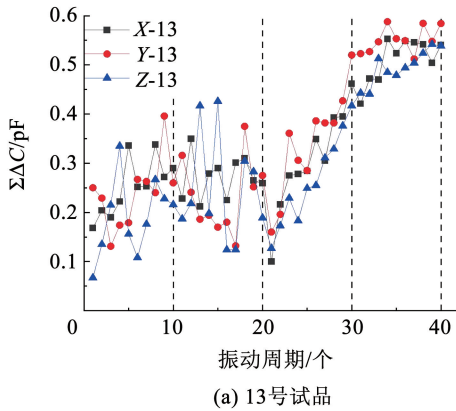
3) 当施加负载电流时,试品接触电阻值达到稳定波动周期的时间变长,且相同振动周期下,其数值比空载时低。可以推断,负载会使得电接触性能退化过程复杂化。一方面,当负载电流通过触点时,接触面上的触点会因加热而软化,从而增大接触面的导电面积,降低接触电阻;另一方面,接触件的加热会加速接触区裸露接触材料的氧化,增加膜层电阻,同时加速磨屑的氧化。磨屑的连续积累和随机分布会减小实际接触面积。此外,电流热效应产生的应力松弛现象降低了接触件之间的接触压力,导致接触电阻增大。因此,由于上述两种因素的耦合作用,电连接器的接触电阻值波动较大,负载作用下微动磨损接触性能的退化过程比空载时更长。

4) 在相同条件下,Y 振动方向试品接触电阻值和波动量均大于 X 方向和 Z 方向试品,X 方向试品略大于 Z 方向试品,这与磨屑特征值总量的变化规律一致。由此可推断,Y 向振动时,插针与插孔之间的微动磨损较严重,磨屑迁移的概率较大,导致接触电阻增大和波动,接触性能恶化。

3 步进应力随机振动性能退化规律分析

3.1 磨屑特征值总量变化

步进应力下电连接器试品磨屑特征值总量变化曲线见图10。由图10可知,随着振动周期的增加,电连接器试品在X、Y和Z方向上的磨屑特征值总量呈波动上升趋势。在0.04、0.06g²/Hz的应力水平下,磨屑特征值总量呈现出波动式缓慢上升的趋势;当振动应力达到0.08g²/Hz时,磨屑特征值总量大幅增长,类似线性增长;最后,磨屑特征值总量进入相对停滞期。磨屑特征值总量的波动变化是由于磨屑一直处于随机迁移状态,在微动过程中,部分磨屑会堆积在插针与插孔的接触面上,部分磨屑可能散落在接触区域之外,但随着磨损的加剧,磨屑特征值总量是增长的。



随着振动应力水平的逐步增加,电连接器接触件磨损程度加重,磨屑特征值总量增加趋势基本呈阶梯式。由此可推断:当振动应力水平较小时,插针和插孔会发生初步磨损,磨损相对较轻;随着振动应力水平的进一步增加,磨损逐渐加剧;在相同的振动周期下,Y-13和Y-14试品的磨屑特征值总量和波动高于X和Z方向试品,X方向试品高于Z方向试品。表明电连接器试品在Y振动方向下的接触区域磨屑堆积最多,接触部位磨损最严重;与Z方向相比,X振动方向试品的磨损更严重。

3.2 不同区域磨屑特征值变化

图11为步进应力下部分电连接器试品重度磨损接触子区域中电极对2-3和6-7磨屑特征值变化曲线。由图11可知,在步进应力作用下试品的磨屑特征值呈现出阶梯变化特征。

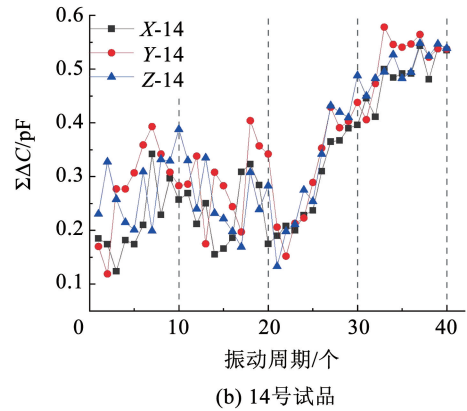


图10 不同随机振动条件下磨屑特征值总量变化

Fig. 10 Variation of total amount of wear debris characteristic values under different random vibration

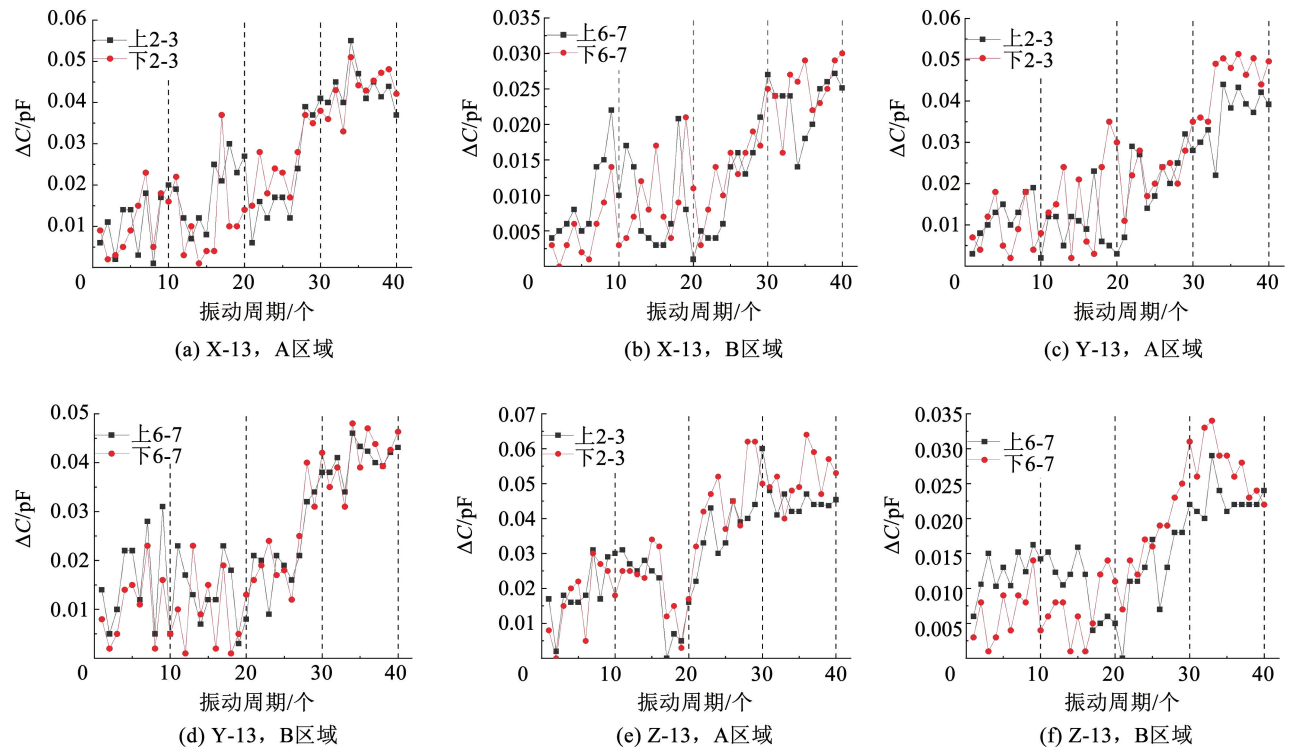


图11 部分试品重度磨损区域电极对2-3和6-7磨屑特征值变化

Fig. 11 Variation of wear debris characteristic values of electrode pairs 2-3 and 6-7 in severe wear area of part specimens

在步进应力下,随着振动周期的增加,电连接器试品的磨屑特征值呈波动上升趋势。当应力水平为 $0.04g^2/Hz$ 时,磨屑特征值表现出较小振幅波动。当应力水平达到 $0.06g^2/Hz$ 时,磨屑特征值的增长趋势减缓,但波动程度增加。原因是插针和插孔之间的相对位移随着应力水平的增加而增加,加剧了磨屑的迁移。当应力水平为 $0.08g^2/Hz$ 时,磨屑特征值迅速增加。当应力水平达到 $0.10g^2/Hz$ 时,磨屑特征值进入相对停滞期。

下层电极对 2-3、6-7 的磨屑特征值波动程度高于上层电极对 2-3、6-7 的磨屑特征值,说明电连接器的下层磨损严重,即接触件根部的磨损比端部的磨损更严重。通过比较图 11(a)和(b)、图 11(c)和(d)以及图 11(e)和(f)可以看出:A 区域中的磨屑特征值高于 B 区域中的磨屑特征值;在 Z 振动方向情况下,A 区域中磨屑特征值约是 B 区域中磨屑特征值的 2 倍;Y-13 试品的 B 区域磨屑特征值明显高于 X-13 试品和 Z-13 试品,即 Y 振动方向的磨损程度高于 X 和 Z 方向。

3.3 接触电阻变化规律

图 12 为步进应力下电连接器试品接触电阻变

化曲线。由图 12 可知,试品的接触电阻值随着振动周期的增加呈阶梯式波动上升趋势。振动量级为 $0.04g^2/Hz$ 时,接触电阻变化不明显; $0.06g^2/Hz$ 时,接触电阻值波动增加,但增幅较小; $0.08g^2/Hz$ 时,接触电阻值大幅增加; $0.10g^2/Hz$ 时,接触电阻变化不明显,但仍有波动。在相同的应力水平下,与 X 和 Z 方向相比,试品在 Y 振动方向具有更高的接触电阻值和波动性。试品 Y-13 的接触电阻最大值为 $0.267\text{ m}\Omega$,最大波动达到 $0.037\text{ m}\Omega$;X-13 试品接触电阻的最大值和波动分别为 0.210 和 $0.027\text{ m}\Omega$;Z-13 试品接触电阻最大值和波动分别为 0.243 和 $0.033\text{ m}\Omega$ 。Y 方向接触电阻最大值和波动量分别为 X 方向和 Z 方向的 1.27、1.37 倍和 1.10、1.12 倍。

电连接器试品的接触电阻呈阶梯式变化趋势的原因是在不同的步进应力水平下,接触件的接触状态会发生变化。初始阶段,插针与插孔间初步磨合,磨屑产生并逐渐积累,氧化膜或吸附水膜被部分破坏,此时,接触电阻值也可以保持较低且稳定;此后,接触件插针与插孔间微动磨损逐渐加剧,导致磨屑增多,各子区域磨屑堆积,导致导电斑点减小,实际接触面积减小,接触电阻值升高。

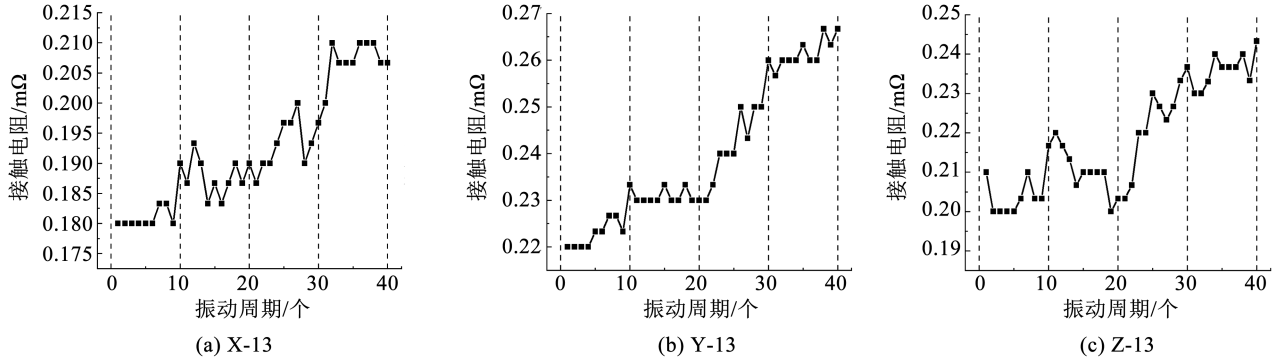


图 12 不同随机振动条件下接触电阻的变化

Fig. 12 Variation of contact resistance under different random vibration conditions

4 电连接器磨屑迁移规律分析

盒维数是分形理论中常用的一种分形维数计算方法^[16]。訾艳阳等^[17]于 2001 年提出了一种计算离散振动信号盒维数的方法,并将盒维数方法推广到一维时间序列。随机振动下电连接器磨屑特征值曲线为一维时间序列曲线,纵轴为各子区域磨屑特征值,横轴为 16 个子区域。将一维时间序列盒维数应用于随机振动下电连接器的磨屑特征值曲线,可表征不同振动周期下磨屑分布的均匀性。某一区域中的磨屑堆积,会导致该区域对应电极的磨屑特征值远大于其他区域,即磨屑特征值曲线曲折度增加,会导致分形维数的增加。磨屑特征值曲线越曲折,磨屑分布越不均匀,分形维数越大。此外,本文还利

用分形维数表征电连接器插针表面磨损程度,验证磨屑特征值与插针表面磨损程度的相关性。

将随机振动下电连接器磨屑特征值曲线和表面形貌图覆盖在一系列尺寸逐渐减小的盒中,并计算盒子的总数与盒尺寸的关系以估计分形维数:

$$1 = Nr^D \text{ 或 } D = \frac{\ln(N)}{\ln(1/r)}$$

式中: D 为分形维数, r 为盒尺寸, N 为盒子总数。

为减小分形维数计算误差,增强数据可信度,本文计算分形维数时均保证在相同坐标刻度下进行。图 13 为盒维数法计算得到的磨屑特征值时间序列的分形维数。

根据图 13 可知,由电连接器磨屑特征值曲线计算出的分形维数均介于 1~2 之间,表明电连接器随

机振动磨屑特征值曲线具有明显的分形特征。随着振动周期的增加,分形维数呈下降趋势,振动应力越大,分形维数下降越快。说明随着振动周期的增加,磨屑分布趋于均匀,振动应力会加速磨屑的均匀分布。原因是随着振动应力的增加,部分大粒径磨屑被压碎,从而增加小粒径磨屑的数量,磨屑分布趋于均匀。 X 向试品的分形维数明显大于 Y 和 Z 向的分形维数, Z 向试品的分形维数最小,说明 X 向试品的磨屑分布最不均匀,而 Z 向试品最均匀。加载试品的分形维数与未加载试品的分形维数相似,说明电流对磨屑分布的均匀度影响不大。

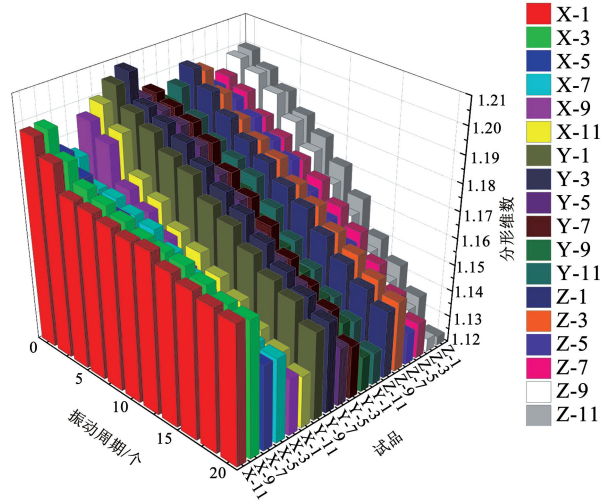


图 13 各试品的分形维数随振动周期的变化

Fig. 13 Fractal dimension variation with vibration cycle for each specimens

以各试品磨屑特征值总量为纵轴,振动周期为横轴绘制成曲线,计算该曲线分形维数,以表征磨屑特征值曲线的波动程度,其结果见图 14。由图 14 可知, X 向试品磨屑特征值总量的分形维数明显低于 Y 和 Z 向试品的分形维数,说明 X 向试品的磨屑特征值总量曲线曲折度较低,即磨屑特征值总量呈现稳定上升趋势,波动程度小,而 Y 和 Z 向试品磨屑特征值总量波动程度大。

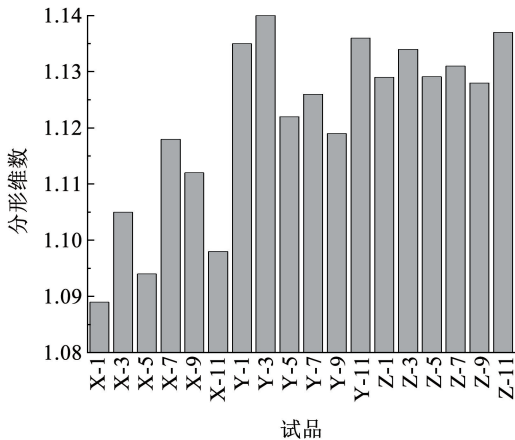
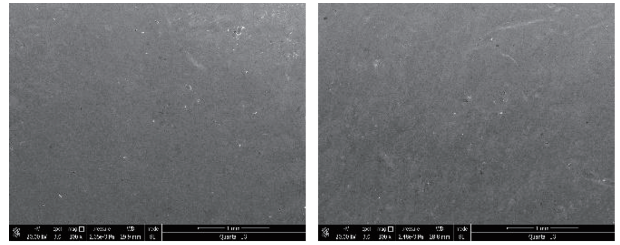


图 14 各试品磨屑特征值总量分形维数

Fig. 14 Fractal dimension of total amount of wear debris characteristic values for each specimens

5 基于分形维数的表面形貌分析

为验证试品接触面磨损情况与磨屑特征值之间的相关性,采用扫描电镜 (SEM) 对试验前后一些典型试品插针的 A、B 区域,上层 (端部)、下层 (根部) 进行检测,试验前试品的表面形貌见图 15, Y-9 ($0.08g^2/Hz, 0 A$) 试品的表面形貌见图 16,一些典型试品的插针 A 区域下层的表面形貌见图 17。



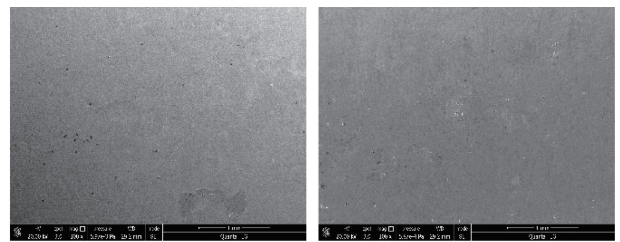
(a) 上层(D=2.235 6) (b) 下层(D=2.262 3)

图 15 未经磨损的插针表面 SEM 形貌

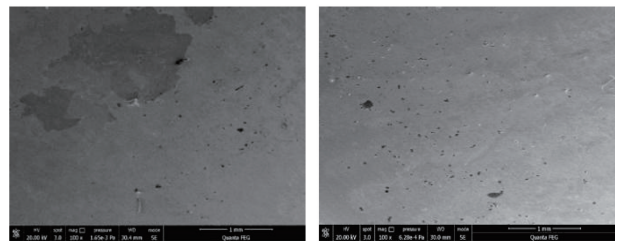
Fig. 15 Surface SEM morphology of the unworn pin

本文引入分形维数以量化接触面磨损程度,避免主观误差。分形维数越大,接触面越粗糙,磨损越严重;分形维数越小,表面越光滑,磨损越轻。为避免因环境光照不同引起误差,表面形貌图采样均保证在同样光照强度下进行。计算得到的分形维数介于 2~3 之间,符合空间表面分形维数的特征,表明电连接器插针表面具有分形特征。

由图 15 可知,试验前插针端部和根部无明显划痕和磨损,分形维数 D 较小。由图 16、17 可知,试验后插针表面出现零星黑点,部分区域凹陷或镀层脱落,说明在随机振动过程中,电连接器接触件之间发生微动磨损。



(a) A 区域上层(D=2.272 0) (b) B 区域上层(D=2.266 9)



(c) A 区域下层(D=2.377 2) (d) B 区域下层(D=2.301 6)

图 16 试品 Y-9 ($0.08g^2/Hz, 0 A$) 表面 SEM 形貌

Fig. 16 Surface SEM morphology of specimen Y-9 ($0.08g^2/Hz, 0 A$)

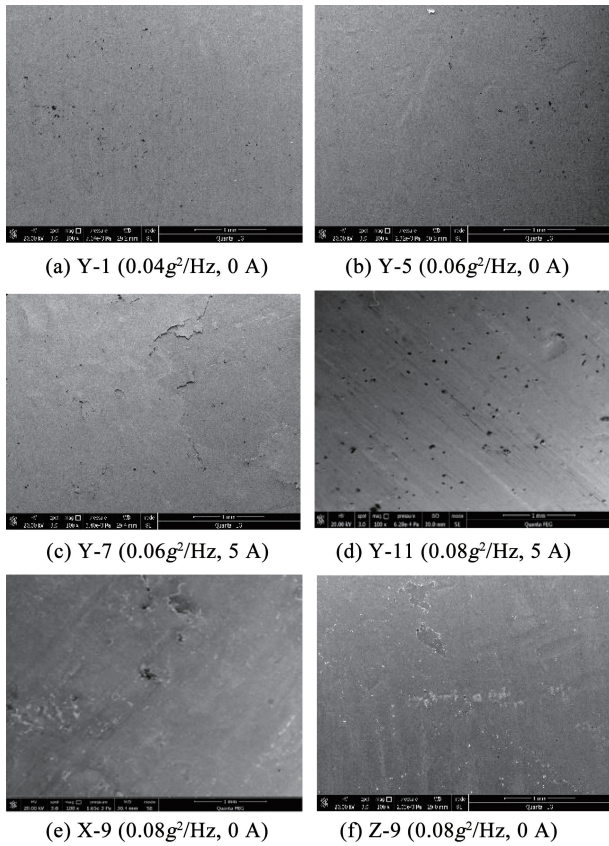


图 17 典型试样插针 A 区域下层表面 SEM 形貌

Fig. 17 Surface SEM morphology of lower layer of pin A area of typical specimens

由图 17(a)、17(b)和图 16(c)可知, Y-1 (0.04g²/Hz) 试样存在较多不规则黑点 ($D = 2.2829$), Y-5 (0.06g²/Hz) 试样部分镀层脱落 ($D = 2.2927$), Y-9 (0.08g²/Hz) 试样镀层大范围脱落 ($D = 2.3772$), 同时存在黑点, 并有一定量的磨屑堆积。说明不同的振动水平下, 插针 A 区域下层的表面形貌不同。这与磨屑特征值随振动应力的增大而增大的规律一致。

对比图 17(b) ~ 17(d)和图 16(c), 发现 Y-5 试样插针表面镀层刚开始脱落 ($D = 2.2927$), Y-7 试样有明显的脱落区域 ($D = 2.4032$), Y-9 试样表面镀层明显脱落, 并有磨屑堆积 ($D = 2.3772$), Y-11 试样有凹凸区和磨屑的迁移和堆积 ($D = 2.3803$)。可见, 与空载相比, 负载电流作用下插针 A 区域下层磨损更严重, 与图 7 分析的结论相符。

对比图 17(e)、17(f)和图 16(c)可知, 9 号试样在 Y 向 ($D = 2.3772$) 振动下的磨损比 X 向 ($D = 2.2804$) 和 Z 向 ($D = 2.3653$) 严重, 这与图 7 和图 9 所得出的 Y 向振动下磨屑特征值和接触电阻值波动较大结论一致。说明在长时间的振动过程中, 插针表面的镀层被氧化后脱落形成磨屑并积聚在接触区域。由于获取表面形貌时插针拔出, 导致表面积累的磨屑层脱落, 只留下基体金属层。

6 能谱分析

在表面形貌分析的基础上, 为进一步研究振动试验前后接触区域内元素含量的变化, 试验结束后, 选取 Y-9 试样, 对插针 A 区域下层进行能谱分析。能谱位置选择区域和分析位置见图 18, 各检测部位元素含量见表 3。由图 18 和表 3 可知: 1 号位置是试样插针接触良好区域, 通过能谱测量, 该区域插针表面的主要元素为 Ni 和 Au, 表明该区域的镀层未完全破坏; 2 号位置为黑色斑点区, 主要元素为 C、Ni、O 和 Au, 与 1 号位置相比, Ni 和 Au 元素明显减少, C 含量迅速增加, 表明插针表面的镍金镀层大部分磨损, 基体金属裸露, 接触表面吸附含 C 的有机物; 3 号位置可被归类为磨损氧化区域, 与接触良好区域相比, Ni 含量降低, O、Au 等元素增加, 表明该区域的镍金镀层磨损, 暴露的基体金属与空气中的氧发生反应, 形成附着在接触面上的氧化物。

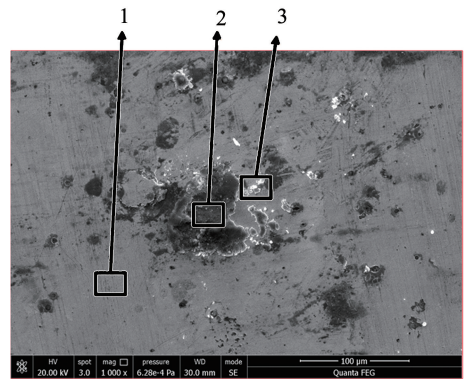


图 18 能谱分析区域的选取

Fig. 18 Selection of regions for energy spectrum analysis

表 3 试样 Y-9 各位置元素含量

Tab. 3 Element content at each position of specimen Y-9

元素	质量分数/%			原子分数/%		
	1 号位置	2 号位置	3 号位置	1 号位置	2 号位置	3 号位置
C	—	33.09	—	—	70.61	—
O	1.64	2.07	3.61	7.04	3.31	15.88
Pb	0.54	0.22	0.88	0.18	0.03	0.29
Ni	68.97	56.05	57.21	80.51	24.46	68.56
Cu	3.08	1.76	2.09	3.32	0.71	2.32
Au	25.77	6.82	36.21	8.97	0.89	12.94

7 结 论

1) 随着振动周期和振动幅度的增加, 电连接器的磨损程度加深, 性能退化严重; 负载电流加速了磨损过程, 但也延缓了性能退化; 轴向振动会加剧试品的磨损和性能退化; X 振动方向试品的磨屑特征值总量呈平稳上升趋势, 波动较小; Y、Z 振动方向试品

的磨屑特征值总量呈波动上升趋势。因此在使用中,合理选择电连接器的安装方式,紧密固定且尽量避免发生轴向振动,必要时需采取合理的缓冲设计以降低振动幅度。

2)随着振动周期的增加,磨屑分布趋于均匀;振动应力增大会加速磨屑的均匀分布; X 振动方向试品的磨屑分布最不均匀, Z 振动方向试品最均匀;电流对磨屑分布均匀度影响不大。

3)电连接器在步进应力随机振动下的性能退化规律与恒定应力下相似,且步进应力下磨屑特征值呈现一定的阶跃变化特征。

4)表面形貌及能谱分析结果表明,电连接器在微动磨损过程中接触表面形貌会发生显著变化;该结果与磨屑特征值及接触电阻变化规律相吻合。

5)插针根部为电连接器在随机振动应力下磨损最严重区域,因此,在设计中需重点优化接触件缩口结构。

参考文献

- [1] WEN Baohua, PAN Jun, QIAN Ping, et al. Research on the influence of the closing amount of electrical connector contacts on fretting wear under a vibration environment[J]. *Electronics*, 2023, 12(11): 2469. DOI:10.3390/electronics12112469
- [2] CHENG Xianzhe, LV Kehong, LIU Guanjun, et al. Characteristics of intermittent fault in electrical connectors under vibration environment[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, 10(9): 1575. DOI:10.1109/TCPMT.2020.3015358
- [3] LI Qingya, GAO Jinchun, FLOWERS G T, et al. Investigation on vibration induced fretting in degraded contact interface [J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 139: 114794. DOI:10.1016/j.microrel.2022.114794
- [4] LUO Yanyan, GAO Pengyu, LIANG Hong, et al. Application of ultrasonic testing technology to fretting wear detection of electrical connectors[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, 11(6): 922. DOI:10.1109/TCPMT.2021.3079348
- [5] 张雯. 振动条件下电连接器接触件步进应力加速退化试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2020
ZHANG Wen. Study on step-stress acceleration degradation test of electrical connector contacts under vibration [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020. DOI:10.27786/d.cnki.gzjlg.2020.000677
- [6] 何林涛, 任建峰, 张克非, 等. 一种连接器振动故障分析[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(1): 30
HE Lintao, REN Jianfeng, ZHANG Keifei, et al. Vibration fault analysis of a connector[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(1): 30. DOI:10.7643/issn.1672-9242.2023.01.005
- [7] 刘少杰, 仇原鹰, 白金, 等. 三轴随机振动下电连接器的松动机理及应力-电阻映射关系研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 190
LIU Shaojie, QIU Yuanying, BAI Jin, et al. Loosening mechanism and stress-resistance mapping relationship of electrical connector under triaxial random vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 190. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.11.027
- [8] 刘琦, 郁大照, 许振晓, 等. 典型航空电连接器接触件动态性能仿真分析[J]. *海军航空大学学报*, 2022, 37(1): 146
LIU Qi, YU Dazhao, XU Zhenxiao, et al. Dynamic performance simulation analysis of typical aviation electrical connector contact assembly[J]. *Journal of Naval Aviation University*, 2022, 37(1): 146. DOI:10.7682/j.issn.2097-1427.2022.01.008
- [9] XU Le, LIANG Sanqiang, LI Dawei, et al. Vibration-induced dynamic characteristics modeling of electrical contact resistance for connectors[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 114: 113868. DOI:10.1016/j.microrel.2020.113868
- [10] HUANG Bo, LI Xunbo, ZENG Zhi, et al. Numerical simulation of random vibration for electrical connectors[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 401-403: 416. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.416
- [11] FLOWERS G T, XIE Fei, BOZACK M J, et al. Modeling early stage fretting of electrical connectors subjected to random vibration [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2005, 28(4): 721. DOI:10.1109/TCAPT.2005.859762
- [12] YANG Haoyue, FLOWERS G. Fretting in electrical connectors induced by axial vibration[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5(3): 328. DOI:10.1109/TCPMT.2015.2400394
- [13] LUO Yanyan, ZHANG Zhaopan, WU Xiongwei, et al. Identification and sensing of wear debris caused by fretting wear of electrical connectors[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2020, 103(5): 246. DOI:10.1587/transle.2019ECP5045
- [14] 骆燕燕, 刘县, 张兆攀, 等. 电连接器接触件的性能退化规律与寿命预测[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(9): 39
LUO Yanyan, LIU Tan, ZHANG Zhaopan, et al. Performance degradation law and life prediction of electrical connector contacts [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(9): 39. DOI:10.11809/bqzbgxb2022.09.007
- [15] LUO Yanyan, AN Jingzhao, SU Jingyuan, et al. Study on wear debris distribution and performance degradation in low frequency fretting wear of electrical connector [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2023, 106(3): 93. DOI:10.1587/transle.2022ECP5022
- [16] 秦建强, 孔祥玉, 胡绍林, 等. 一维时间序列分形维数算法对比分析[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(22): 33
QIN Jianqiang, KONG Xiangyu, HU Shaolin, et al. Performance comparison of methods for estimating fractal dimension of time series [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(22): 33. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1605-0179
- [17] 訾艳阳, 胥永刚, 何正嘉. 离散振动信号分形盒维数的改进算法和应用[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(3): 373
ZI Yanyang, XU Yonggang, HE Zhengjia. Fractal box dimension of discrete vibration signals: improved algorithm and applications[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(3): 373. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.2001.03.02