

重大工程装备

模拟界面污染条件下的电接触性能及磨损研究

龚聪煜, 聂裕宸, 曹中清, 蔡振兵

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: **目的** 模拟有机物挥发的气氛环境, 研究载荷对界面污染条件下电接触性能的影响。**方法** 选用铜作为基底, 将其置于有机气氛环境中进行贮存。将初始表面与贮存后的表面作为待试验表面, 将两者置于大气及有机气氛 2 种环境中进行电接触试验。通过摩擦系数和接触阻值分析其电接触性能, 结合磨痕形貌、截面轮廓及成分, 揭示其磨损机理。**结果** 有机气氛环境中的气溶胶具有较高的接触电阻值, 并且降低了摩擦系数。载荷较低时, 接触阻值达到 0.1Ω 及以上。有机气氛中的磨痕深度减少至 $1 \mu\text{m}$ 以下, 磨损减少。载荷较高时, 2 种环境中的接触阻值均能达到 0.01Ω , 但粘着磨损加剧。较初始试样, 贮存后试样的接触电阻均有所增加, 并且磨痕深度减少。**结论** 有机气氛环境导致低载荷下的电接触性能明显下降, 高载荷条件下接触副的磨损加剧。气溶胶具有一定的润滑性, 可减少接触副之间的磨损。污染层具有较高接触阻值, 且减少了接触副之间的磨损。

关键词: 滑动磨损; 电接触; 界面污染; 气氛环境; 载荷

中图分类号: TG115.5+8

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0108-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.017

Electrical Contact Performance and Wear under Simulated Interface Pollution Conditions

GONG Cong-yu, NIE Yu-chen, CAO Zhong-qing, CAI Zhen-bing

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of load on the electrical contact performance under interface pollution conditions by simulating the atmosphere of organic volatilization. Copper was selected as the base and stored in an organic atmosphere. The original surface and the stored surface were used as the surface to be tested. They were subjected to sliding electric contact tests under different loads in the atmospheric and organic atmospheres. The electric contact performance was analyzed by the coefficient of friction and contact resistance. The wear mechanism was revealed by combining with the appearance, profile and composition of wear scars. Aerosols in organic atmosphere had higher resistance values and reduced friction coefficients. When the load was low, the contact resistance value reached 0.1Ω or above. In organic atmosphere, the wear depths de-

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-04-25

Received: 2021-02-02; Revised: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1730131)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U1730131)

作者简介: 龚聪煜 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电接触摩擦学特性。

Biography: GONG Cong-yu (1995—), Male, Postgraduate, Research focus: tribological characteristics of electrical contact.

通讯作者: 曹中清 (1967—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机电系统设计。

Corresponding author: CAO Zhong-qing (1967—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: electromechanical system design.

引文格式: 龚聪煜, 聂裕宸, 曹中清, 等. 模拟界面污染条件下的电接触性能及磨损研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 108-116.

GONG Cong-yu, NIE Yu-chen, CAO Zhong-qing, et al. Electrical Contact Performance and Wear under Simulated Interface Pollution Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 108-116.

creased to less than 1 μm , and the wear was reduced. When the load was high, the contact resistance could reach 0.01 Ω in both environments, but the adhesion wear was aggravated. Compared with the original samples, the contact resistance of the stored samples increased, and the wear depths decreased. The results show that the electrical contact performance of organic atmosphere under low load decreases obviously. The wear of contact pair is aggravated under high load condition. Aerosol has certain lubricity and can reduce wear between contact pairs. The polluted layer has higher contact resistance and reduces the wear between contact pairs.

KEY WORDS: sliding wear; electrical contact; interface pollution; atmosphere environment; load

滑动电接触结构被广泛应用于精密的仪表、仪器等电子设备中^[1]。由于滑动电接触结构可以使电流在固定件与运动件之间有效传导,因此研究者常用接触阻值来评价该结构的电接触性能。电接触性能退化将导致电信号衰弱、能量耗损增加或电弧烧蚀等不良结果。滑动电接触结构的电接触性能不仅与触头材料^[2-3]有关,还与环境^[4-5]、载荷^[6]等因素息息相关。

工业中的电子设备常常需要在恶劣环境中进行服役,环境污染将严重影响其电接触性能的稳定性。其中,影响电接触性能的环境物质包括无机颗粒、有机颗粒、腐蚀性气体及气溶胶等。服役环境中的有机物蒸汽所组成的气氛环境会造成电接触性能退化。当气氛环境中的气溶胶与电触头相接触时,会在其表面形成导电性较差的污染层,阻碍电流的导通。当气溶胶中含有腐蚀性物质时,会加速电触头的腐蚀和氧化磨损^[7-8]。Frank 等^[9]研究了不同触头材料在循环盐雾气氛环境中的电接触性能,其结果表明,各种配副在盐雾气氛环境中均发生了电阻上升的情况。李继伟等^[10]发现设备内部有机物挥发所形成的气溶胶会导致继电器的接触电阻增加。Feng 等^[11]的研究表明,高浓度的盐雾气氛不仅导致了金属材料的腐蚀,还会引起接触阻值的上升。谭晓明等^[12]将电连接器置于盐雾环境中,发现在电流加载条件下,腐蚀微孔数量明显增多,接触阻值迅速增加。郭裕钧等^[13]发现接触副结构于气溶胶环境中更易发生污闪故障,影响配电网的可靠性。上述结果表明,气氛环境的改变将会影响电接触的可靠性,从而导致电子设备的性能退化。

以往关于气氛环境对电接触性能影响的研究对象主要集中在静态电接触结构,而精密仪表、仪器中的滑动电接触副在工作过程中始终保持相对运动,不但会对电触头产生摩擦磨损,而且同时会将污染物质从接触界面内推离至界面外。Lv 等^[14-15]发现往复运动可将界面污染颗粒推至磨损区域的边缘,并且较大的载荷可将界面污染颗粒碾碎,加大电触头之间的直接接触区域。王朋关等^[16]的研究表明,较大的载荷可减少界面污染物对微动电接触性能的影响,但过大的载荷同样会导致接触副之间的磨损加剧,影响其使用寿命^[17]。但是,前人对此的研究多关注在固态颗粒物上,关于气氛环境的研究鲜有报道。因此,研究载荷

和界面污染(气氛所致)对电接触性能的耦合影响具有一定的必要性。

本文通过试验研究,系统分析了不同载荷对有机气氛环境中滑动电接触结构的磨损机理。为提高电接触结构于有机气氛环境下的可靠性打下理论基础,从而促进电接触研究与电接触可靠性工程应用之间的联系。

1 试验

1.1 装置

本试验研究借助笔者课题组自主研发的微载荷电接触试验装置^[18],并且于其上安装气氛环境模拟平台。试验装置整体的结构如图 1a 所示。该试验装置

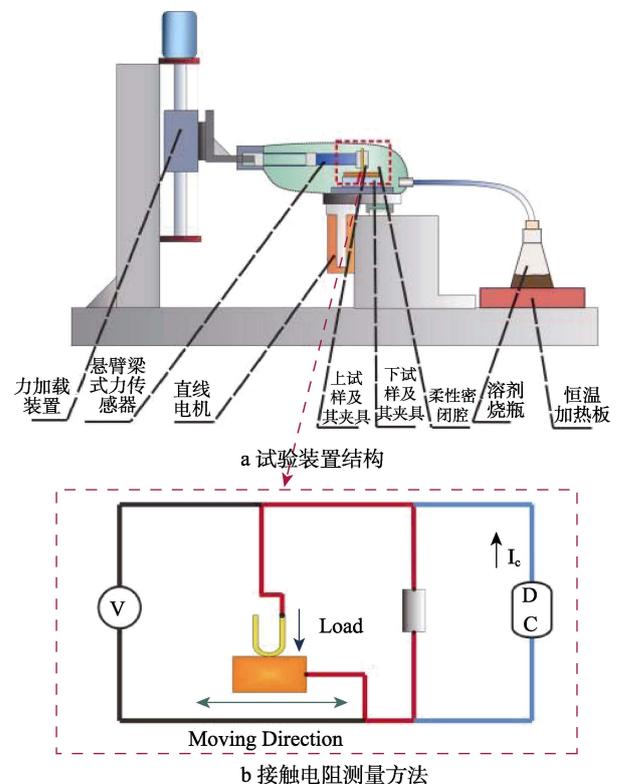


图 1 试验装置及接触电阻测量方法

Fig.1 Schematic diagram of test equipment and contact resistance measurement method: a) schematic diagram of test equipment; b) schematic diagram of contact resistance measurement method

可实现微毫牛级的载荷施加及摩擦力的测量。气氛模拟平台主要包含有恒温加热板、柔性密闭腔及溶剂烧瓶。通过对溶剂烧瓶的加热,使瓶内溶剂加速挥发,气氛通过导管导入柔性密闭腔内。通过上述设备可以在密封的环境内进行滑动电接触试验。

接触电阻的测量采用了四线法^[19],其测量方法如图1b所示。将滑动电接触副和10Ω的定值电阻并联,因为滑动电接触副在试验过程中可能出现电阻过高甚至绝缘的情况。若电压采集系统对接触副直接进行测量,可能因瞬间高压导致电压采集系统过载等不良影响。并联定值电阻可有效控制电压最高值,保护电压采集系统。使用超景深显微镜(KEYENCE, VHX-7000)对磨痕区域进行拍摄,通过所获得的图像对磨痕整体微观形貌进行分析。利用白光分析仪器(Bruker Nano GmbH, Contour GT-K1)对磨痕截面轮廓进行分析。利用扫描电镜(JEOL, JSM-7001F)分析磨损的部分形貌和元素分布情况。

1.2 材料及参数

铜因其具有良好的导电性而被广泛应用于电接触结构中。因此,本试验中采用黄铜合金(Cu 63.5%, Fe 0.01%, Pb 0.08%, P 0.015%, Sn 0.005%, Zn 余量)和纯铜块(Cu 99.9%, Sn 0.002%, Zn 0.005%, Pb 0.005%, Fe 0.005%, S 0.005%)分别作为上试样和下试样。上试样的形状为弯曲丝状,铜丝的直径和

弯曲直径分别为1mm和5mm。铜块的尺寸为10mm×10mm×30mm。其中,10mm×30mm所对应的平面为接触面。为了使试样的初始条件保持一致,对下试样的接触面均进行抛光处理,将其作为初始表面。

本试验中采用的有机缩醛胶液为x98-11。该缩醛胶液被广泛用于粘结设备内的电子元件^[20]。通过恒温加热板,对装有该缩醛胶的溶剂烧瓶进行加热来构建有机气氛环境。当有机气氛充盈密闭腔后,通过温度计探针可测得此时腔内温度保持在32~35℃(9月成都白天室温为23~25℃)。密闭腔内存在有气溶胶颗粒,于试样表面形成液态物质沉积。为更全面开展本论文的研究,本试验中制备了2种下试样的表面:抛光后的初始表面;贮存后的试样表面。其中,贮存后的试样表面的制备过程为:将抛光后的试样静置于有机x98-11胶环境中进行2h的污染,试样表面均匀分布有液态污染物;将贮存后的试样于大气环境内自然放置24h。初始表面与贮存后的表面形貌及EDS分析结果如图2所示。可以发现,光洁试样的表面无过多的沉积物粘附,而经过贮存后的试样表面存在一层致密的污染层,并且有颗粒状的沉积物粘附其表面。

试样表面和试验环境组别见表1,试验的相关参数见表2,载荷选取50、100、200mN 3个值作为变量。

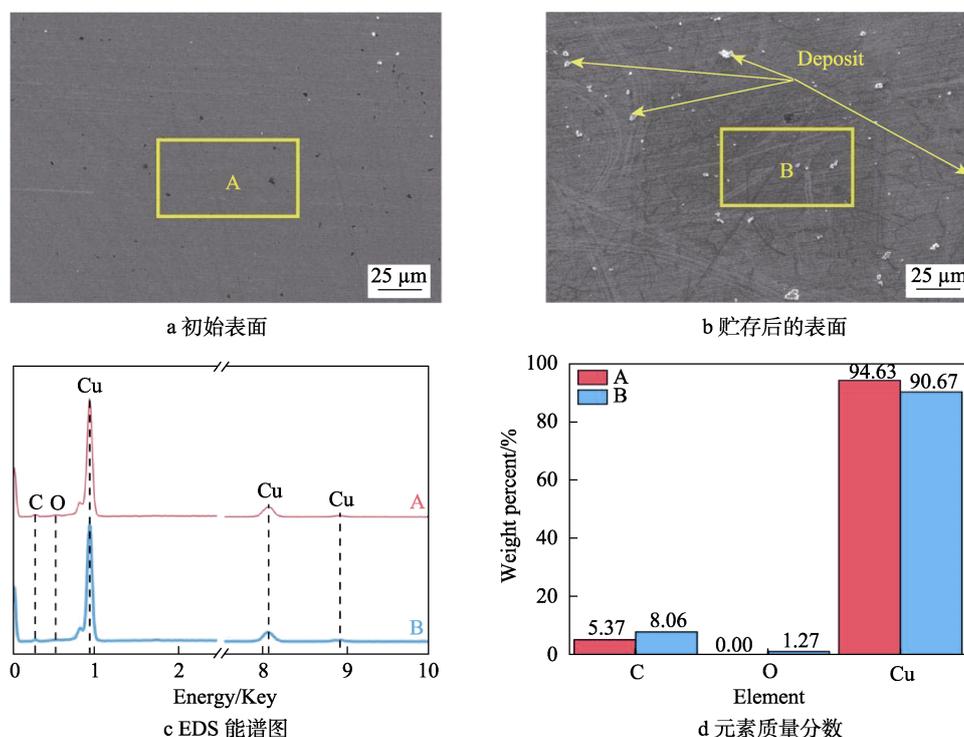


图2 制备试样表面形貌及EDS分析结果

Fig.2 Surface morphology of prepared samples and EDS analysis results: a) original surface; b) surface after storage; c) EDS spectrum diagram; d) weight percent of element

表 1 试样表面和试验环境
Tab.1 Sample surface and test environment

试验组	试样表面	试验环境	缩写
第 I 组	初始表面 (O)	大气 (A)	O-A
第 II 组	初始表面	高浓度 x98-11 气氛 (X)	O-X
第 III 组	高浓度 x98-11 气氛贮存 2 h (X)	大气	X-A
第 IV 组	高浓度 x98-11 气氛贮存 2 h	高浓度 x98-11 气氛	X-X

表 2 试验参数
Tab.2 Test parameters

参数	数值
载荷/mN	50, 100, 200
位移幅值/mm	6
位移频率/Hz	4
循环次数	3×10^4
电流值/mA	100

2 结果与分析

2.1 摩擦系数与接触阻值

试验过程中摩擦系数与接触阻值的变化曲线如图 3 所示。从图 3a 中可以观察到, 在 50 mN 的载荷下, 4 个试验组的接触阻值整体大于 0.1 Ω。其中, O-A 组的接触阻值在试验的最终阶段始终保持在 0.1~0.3 Ω。O-X 组在 10^4 次循环前的接触阻值基本大于 0.2 Ω。虽然接触阻值随着循环次数的增加而有所降低, 但其仍大于 0.1 Ω。在该载荷下, 气氛环境中

的气溶胶容易进入到接触界面内, 导致触头之间的接触面积减少, 使得有效导电的接触凸峰数量减少^[21]。气溶胶介于电触头之间形成金属-气溶胶-金属的串联电阻, 导致接触阻值增加, 并且 O-X 组的摩擦系数仅在试验最终阶段发生了上升, 说明气溶胶于接触界面中具有一定的润滑性, 导致摩擦系数的上升速度下降。通过 X-A 组的摩擦系数变化曲线可以发现, 其达到稳定磨损期所需的循环次数明显大于 O-A 组。因为在试验前期, 接触副之间主要的磨损对象为污染层, 而 50 mN 载荷对污染层的磨损能力较差, 导致需要较多的循环次数才能将其清除, 达到金属之间的直接接触^[22]。在 2×10^4 次循环前, 该组接触阻值明显大于之后稳定磨损期 ($2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$) 的接触阻值。在气溶胶环境下, 贮存后试样表面的电接触性能较差。X-X 组的摩擦系数在 4 组中最低, 且没有出现明显的上升期。说明在气溶胶和污染层的共同作用下, 跑合所需的循环次数会大大增加。还可以发现, 该组的接触电阻在 $1.5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ 次循环开始呈现了增加的趋势, 说明该载荷条件下的滑动电接触性能在该工况下会进一步恶化。

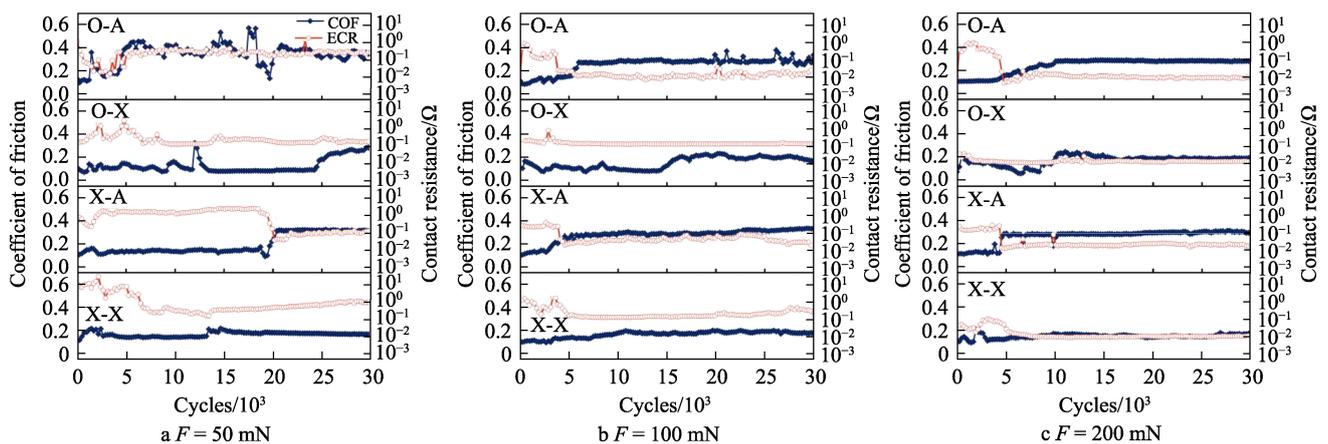


图 3 摩擦系数与接触阻值曲线

Fig.3 The curves of coefficient of friction and contact resistance

当载荷增加至 100 mN 时, O-A 组的接触阻值相较于 50 mN 载荷条件下的接触阻值明显减小, 在试验最终阶段保持在 0.01~0.05 Ω。该情况说明, 载荷的增加对改善电接触性能具有一定的积极作用。在 O-X 组中发现, 该组的接触阻值在试验过程中基本大于 0.1 Ω, 说明气溶胶在该载荷下同样会导致其接触

副之间的电接触性能下降。X-A 的摩擦系数经过 4 000~5 000 次循环后达到稳定磨损期, 说明在该载荷条件下, 接触副的往复摩擦对污染层的磨损能力加强, 可快速达到金属-金属的直接接触。该载荷条件下, X-X 组的接触阻值变化规律与 50 mN 载荷条件下相似, 其初期具有较高的接触阻值, 且在试验最终

阶段具有一定的上升趋势。

当载荷为 200 mN 时, 4 个试验组的接触阻值在试验的最终阶段都能降低至 0.01 Ω 左右, 具有优良的电接触性能。通过与 100 mN 载荷下 O-A 和 X-A 组的接触阻值对比可以发现, 其最终阶段的接触阻值虽然都处于 0.01 Ω 数量级的范围内, 但 200 mN 载荷下的接触阻值更低, 且更加稳定。这进一步说明了载荷的增加有利于电接触性能的改善。通过对比 200 mN 载荷下 O-A 组与 O-X 组的接触电阻可以发现, O-X 组的接触阻值在试验初期低于 O-A 组的接触阻值。在较大载荷下, 接触副之间的接触凸峰数量增加, 并且其接触稳定性更强^[21], 气溶胶无法大面积隔绝电触头金属之间的接触, 气溶胶与接触凸峰形成了并联等效电阻。由于气溶胶填充了接触区域, 导致接触副之间的名义接触面积增加。因此, O-X 组跑合阶的接触电阻比 O-A 组低, 且稳定。

2.2 磨痕形貌及成分分析

各个工况下磨痕整体形貌的超景深光镜图如图 4

所示。通过观察磨痕的尺寸可以发现, 随着载荷的增加, 磨痕的宽度也随之增大。通过该结果可以推断, 随着载荷的增加, 接触副之间的接触面积也随之增加。接触副之间的接触形式由点-面接触逐渐转变为面-面接触, 电流通过接触副之间的接触斑点进行传输, 而接触副之间的接触面积增加则会显著增加接触凸峰的数量。面-面接触下的接触面积大于点-面接触的接触面积, 接触斑点数量随之增加。因此, 200 mN 载荷条件下的电接触性能较好。

磨痕的截面轮廓如图 5 所示。在 50 mN 载荷条件下 (见图 5a), O-A 组和 X-A 组的截面轮廓呈“V”字形, X-A 组的磨痕深度 (3.54 μm) 小于 O-A 组的磨痕深度 (8.58 μm)。该结果说明了 2 种接触副于大气环境中主要的磨损形式均为磨粒磨损。上试样 (黄铜丝) 的硬度大于下试样 (铜块), 上试样对下试样造成单向的磨损。由于 X-A 组试样表面存在有污染层, 上试样对下试样基底造成磨损前需将污染层去除, 导致金属之间直接接触的循环次数减少。因此,

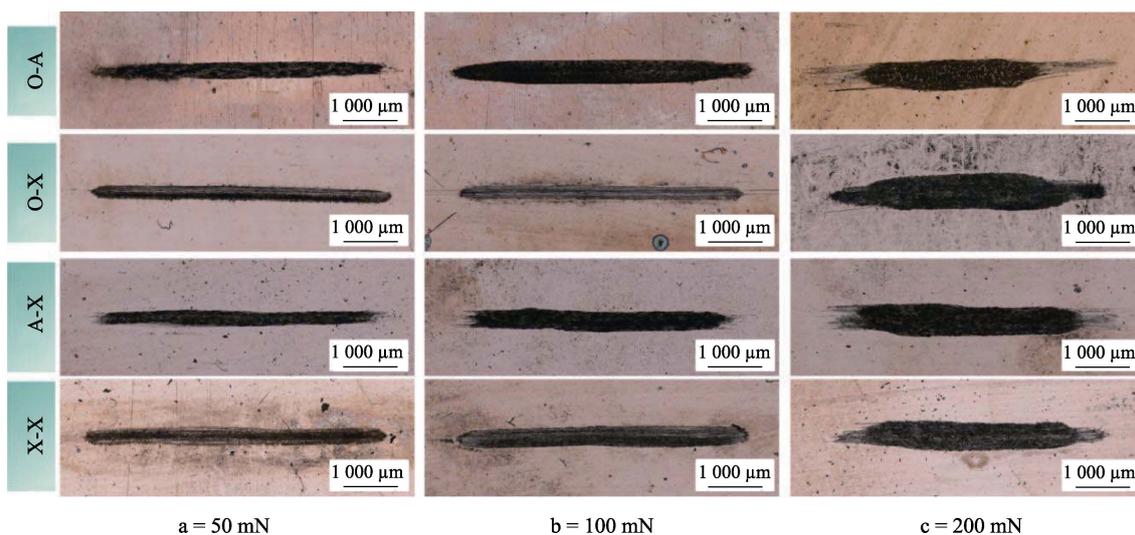


图 4 磨痕光镜图
Fig.4 OM images of wear scar

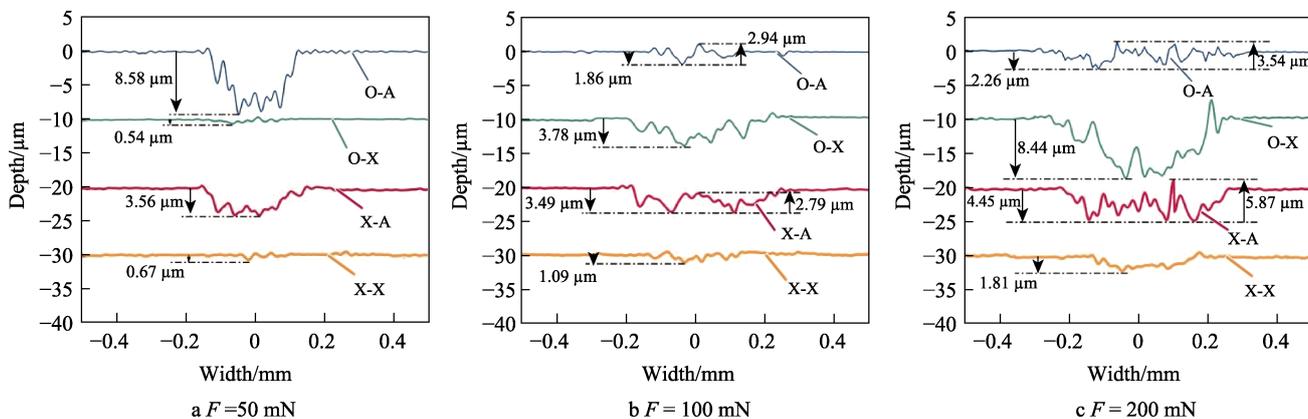


图 5 磨痕截面轮廓
Fig.5 Section profile of wear scar

X-A 组的磨痕深度较小。通过对比 2 种试样于大气环境下 (O-A、X-A) 和 x98-11 气氛环境下 (O-X、X-X) 的磨痕深度可以发现, 当试样置于 x98-11 的气氛环境下时, 其磨痕表面的磨损均不明显, 磨痕深度均在 1 μm 及以下。该结果证明了有机气溶胶于接触界面中具有润滑作用, 可减少接触副之间的磨损。

在 100 mN 载荷条件下 (见图 5b), 可以观察到 O-A 组与 X-A 组的截面轮廓呈现 “W” 字形, 其磨痕中部的磨痕深度略高于磨痕两侧, 说明接触副在大气环境下的磨损形式主要为粘着磨损。上试样发生了材料磨损, 并且转移到了下试样表面, 产生了材料堆积。材料堆积导致了磨痕底部轮廓的向上填充, 因此呈现了 “W” 字形。O-A 组的堆积高度明显大于 X-A 组。虽然 100 mN 载荷下 X-A 组的摩擦系数能快速达到稳定磨损期, 但污染层磨屑未完全推离界面, 在接触界面内具有一定的减磨作用。因此, 也导致了该工况下的接触阻值在试验最终阶段略高于 200 mN 的工况, 且稳定性不强。O-X 组与 X-X 组的截面轮廓呈现 “V” 字形, 且 X-X 组的磨痕深度 (1.09 μm) 小于 X-A 组的磨痕深度 (3.78 μm), 说明其接触副在 x98-11 气氛环境下的磨损形式主要为磨粒磨损。

在 200 mN 载荷条件下 (见图 5c), O-A 组与 X-A 组的截面轮廓也呈现了明显的 “W” 字形, 并且其磨痕中部的材料堆积高度也大于 100 mN 载荷。该情况说明, 在 200 mN 载荷下, 其接触副在大气环境下的粘着磨损情况加剧, 导致上试样的材料损失增加。

O-X 组中的截面轮廓虽整体呈现 “V” 字形, 但具有向 “W” 字形转变的趋势, 其中部有部分位置出现材料堆积, 说明该工况下的接触副磨损形式以磨粒磨损和粘着磨损为主。X-X 组中的截面轮廓呈现 “U” 字形, 其磨痕中部的形状较为平缓。说明接触副发生的粘着磨损较弱, 其材料堆积较其他工况明显减少。该结果证明了气氛环境中的气溶胶会减少接触副之间的磨损。

50 mN 载荷条件下磨痕的 SEM 形貌如图 6 所示, 对应载荷条件下的 EDS 分析结果如图 7 所示。从 O-A 组与 X-A 组磨痕的 SEM 形貌可以发现, 50 mN 工况的磨痕表面主要出现的是犁沟, 但没有出现大面积的磨屑堆积于表面。该结果进一步证明了该试验组中的接触副在试验最终阶段的磨损形式以磨粒磨损为主。通过 EDS 分析结果 (#1) 可以发现, 磨痕表面存在少量的锌元素 (2.1%), 说明接触副之间存在有一定的粘着磨损, 导致了材料转移和堆积。因此, 大气环境中的接触副在 50 mN 载荷下以磨粒磨损为主要磨损形式, 同时伴随着较低程度的粘着磨损。

O-X 组和 X-X 组的磨痕表面同样存在明显的犁沟, 但通过 EDS 分析结果可以发现, 50 mN 试验组的磨痕表面不存在锌元素。接触副在 x98-11 气氛环境内未出现明显的材料堆积情况。因此, 在 x98-11 气氛环境中, 小载荷条件下, 接触副的主要磨损形式为磨粒磨损。通过对比 O-A 组与其他 3 个试验组可以发现, O-A 组磨痕表面碳元素的质量分数明显低于

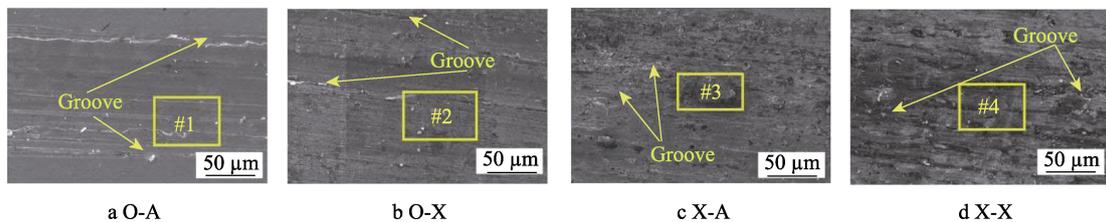


图 6 磨痕 SEM 图像 ($F=50\text{ mN}$)
Fig.6 SEM images ($F=50\text{ mN}$)

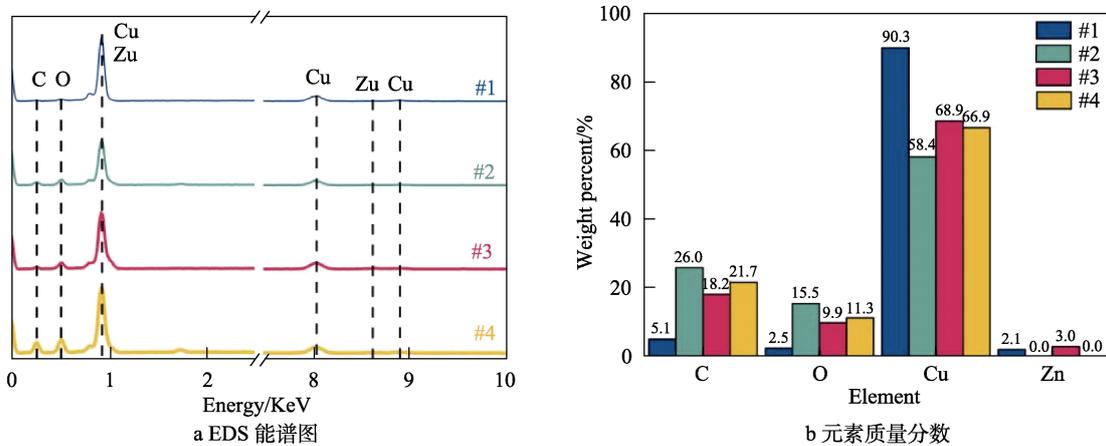


图 7 EDS 分析结果 ($F=50\text{ mN}$): a) EDS spectrum diagram; b) weight percent of element

其他3个试验组。该结果说明了其他3组的磨痕表面具有较多的有机物质,证明了小载荷条件下接触副对界面污染的去污能力较弱。

200 mN 载荷条件下的 SEM 形貌如图 8 所示,对应载荷条件下的 EDS 分析结果如图 9 所示。4 个试验组的磨痕表面均能观察到材料堆积。通过 EDS 分析结果可以发现,被检测区域均含有明显的锌元素。这证明了该载荷条件下,接触副之间均发生了粘着

磨损^[23]。对比 2 个气氛环境下磨痕表面的 SEM 形貌可以发现,在 x98-11 气氛环境下,磨痕表面的材料堆积所占面积比例较大气环境中的磨痕表面明显减少。通过 EDS 分析结果可以发现,大气环境试验组的锌元素质量分数(22.8%、19.7%)高于 x98-11 气氛环境试验组(14.2%、4.6%)。这进一步说明,x98-11 气氛环境中的气溶胶于接触界面中具有一定的减磨作用,减少了接触副之间的粘着磨损。

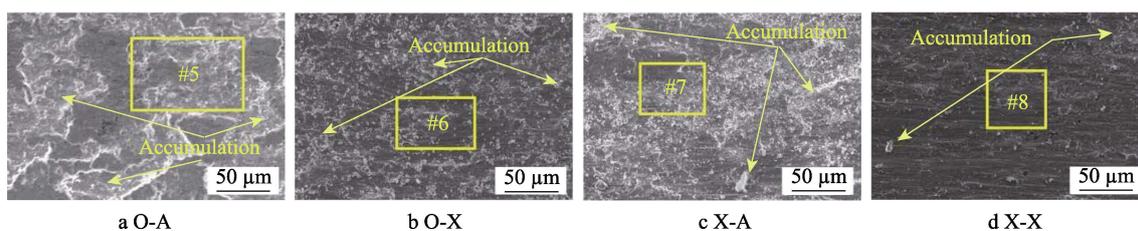


图 8 磨痕 SEM 图像 ($F=200$ mN)
Fig.8 SEM images of wear scar ($F=200$ mN)

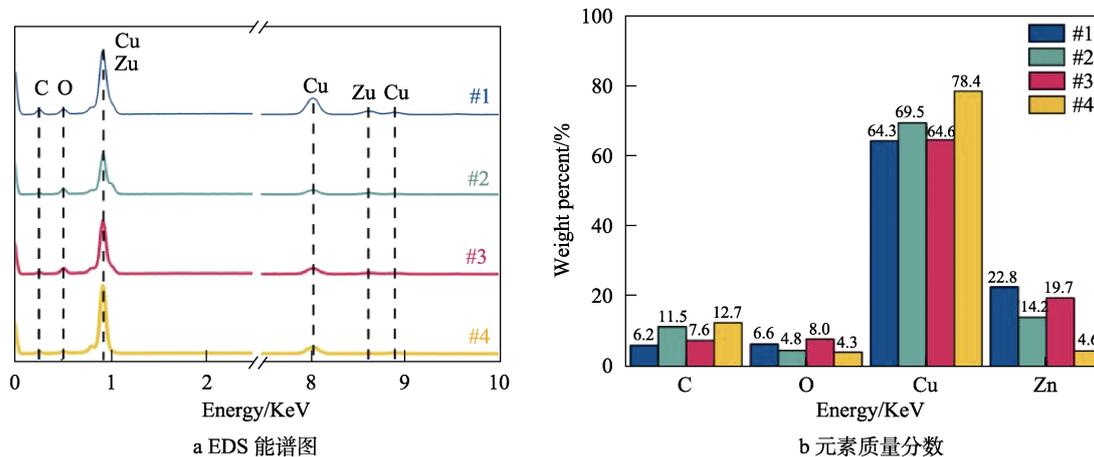


图 9 EDS 分析结果 ($F=200$ mN)
Fig.9 EDS analysis results ($F=200$ mN): a) EDS spectrum diagram; b) weight percent of element

通过比较 50 mN 载荷条件下的 EDS 分析结果可以发现,在 200 mN 载荷条件下,磨痕表面含有的锌元素比例明显高于 50 mN 载荷条件。该对比结果说明,随着载荷的增加,粘附于下试样表面的上试样材料逐渐增加,即上试样的材料损失量随着载荷的增加而增大。因此,在保证接触副具有稳定的导电性能时,应尽量选择较小的载荷,使得磨损减少,避免电接触材料过快损失。

3 结论

1) 有机气氛环境中的气溶胶具有较高阻值。在 50、100 mN 的载荷条件下,接触凸峰与气溶胶串联成等效接触电阻,试验初期的接触阻值增加;在 200 mN 的载荷条件下,接触凸峰与气溶胶并联成等效接触电阻,接触面积增加,试验初期的接触阻值降低且稳定。

2) x98-11 气氛环境中的气溶胶具有一定的润滑性。润滑性可减少接触副之间的摩擦系数上升速度,完成跑合所需的循环次数增加。气溶胶可以减少试样表面的磨损及由粘着磨损产生的材料堆积。污染层可减少接触副之间的磨损,其试样的磨痕深度小于初始试样的磨痕深度,但不会明显改变试验最终阶段的磨损形式。

3) 当载荷较高时,接触阻值相较于低载荷条件下降低,并且在试验最终阶段更加稳定。但载荷的增加导致了接触副的磨损加剧,材料的损失增加。

4) 在 x98-11 气氛环境中的气溶胶和贮存后污染层的共同作用下,50、100 mN 试验组的接触阻值在试验最终阶段呈上升趋势,电接触性能进一步恶化。200 mN 试验组的接触阻值在试验最终阶段较低,气溶胶与污染层对该试验组的电接触性能退化影响较低。

参考文献:

- [1] GRANDIN M, WIKLUND U. Wear and Electrical Performance of a Slip-Ring System with Silver-Graphite in Continuous Sliding Against PVD Coated Wires[J]. *Wear*, 2016, 348-349: 138-147.
- [2] COSOVIC V, TALIJAN N, ZIVKOVIC D, et al. Comparison of Properties of Silver-Metal Oxide Electrical Contact Materials[J]. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2012, 48(1): 131-141.
- [3] 陈永泰, 王松, 谢明, 等. 银基滑动电接触材料的研究进展[J]. *贵金属*, 2015, 36(1): 68-74.
CHEN Yong-tai, WANG Song, XIE Ming, et al. Research Progress in Silver Based Sliding Electrical Contact Material[J]. *Precious Metals*, 2015, 36(1): 68-74.
- [4] 张子华, 李坤兰, 邱森宝. 某型固体继电器储存性能退化规律研究[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(6): 39-41.
ZHANG Zi-hua, LI Kun-lan, QIU Sen-bao. Study of Storage Performance Degeneration Rules of Solid State Relay[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2009, 6(6): 39-41.
- [5] 周怡琳, 韦霞霞. 尘土污染对电路板表面湿度的影响[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(23): 163-168.
ZHOU Yi-lin, WEI Xia-xia. Effects of Dust Contamination on Surface Relative Humidity of Printed Circuit Board[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(23): 163-168.
- [6] LIU Xin-long, CAI Zhen-bing, LIU Shan-bang, et al. Influence of Wear Test Parameters on the Electrical Contact Performance of Brass Alloy/Copper Contactors under Fretting Wear[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(2): 817-827.
- [7] 陈白帆. 从技术因素分析高可靠电磁继电器多余物产生机理[J]. *机电元件*, 2016, 36(4): 29-35.
CHEN Bai-fan. Excess Production Mechanism of Highly Reliable Electromagnetic Relay Analyzed from Technical Factors[J]. *Electromechanical Components*, 2016, 36(4): 29-35.
- [8] 陈巍, 郑冀. 电接触材料腐蚀机制研究进展[J]. *电工材料*, 2010(3): 3-8.
CHEN Wei, ZHENG Ji. Progress in Study on Corrosive Failure Mechanism of Contact Materials[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2010(3): 3-8.
- [9] FRANK R, MORTON C. Comparative Corrosion and Current Burst Testing of Copper and Aluminum Electrical Power Connectors[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, 43(2): 462-468.
- [10] 李继伟, 施明哲, 刘子莲. 继电器触点接触电阻偏大的失效机理研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2009, 27(S1): 117-121.
LI Ji-wei, SHI Ming-zhe, LIU Zi-lian. The Study of Failure Mechanism of Contact Resistance Enhancement of Relay Contact[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2009, 27(S1): 117-121.
- [11] FENG Z Y, HAN L, WEN X Y, et al. Study on Electrical Contact Performance of Air Circuit Breaker Terminals in the Salt-Spray Environment[C]// *The 5th International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contactists*. Wenzhou: [s. n.], 2014: 438-443.
- [12] 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.
- [13] 郭裕钧, 蒋兴良, 孟志高, 等. 盐雾条件下染污绝缘子交流污闪特性[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(13): 248-254.
GUO Yu-jun, JIANG Xing-liang, MENG Zhi-gao, et al. AC Pollution Flashover Characteristics of Polluted Insulators under Salt Fog Conditions[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(13): 248-254.
- [14] LV Yang, ZHOU Yi-lin, KONG Wei. The Effects of one Sided Gold Finish on the Reliability of Electrical Contacts under Fretting Conditions[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 118-120: 468-473.
- [15] LV Yang, XU Liang-jun, KONG Zhi-gang, et al. Reliability Analysis of Mobile Phones' Acoustic Dust-Proof Mesh Against Contaminated Environment[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1049-1050: 802-805.
- [16] 王朋关, 曹中清, 陈海超, 等. 烟炱对电接触磨损的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(2): 23-29.
WANG Peng-guan, CAO Zhong-qing, CHEN Hai-chao, et al. Influence of Soot on Electrical Contact Wear[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(2): 23-29.
- [17] 郑艳欣, 韩培德. 铜-锡配比对Cu基耐磨合金耐磨性的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(9): 1041-1044.
ZHENG Yan-xin, HAN Pei-de. Effects of Copper-Tin Ratio on Wear Resistance of Copper-Based Friction Materials[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(9): 1041-1044.
- [18] CHEN Hai-chao, CAO Zhong-qing, CHEN Guang-yan, et al. Design and Construction of a Novel Instrument for High-Frequency Micro-Force Electrical Sliding Friction Testing[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(9): 095103.
- [19] WANG Xiao-na, HAN Li-zhan, GU Jian-feng. Precipitation Kinetics of NZ30K-Mg Alloys Based on Electrical Resistivity Measurement[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1690-1697.

[20] 李咏, 杨晓飞, 张晓峰, 等. 胶粘剂固含量测定影响因素分析[J]. 粘接, 2014, 35(8): 56-58.
LI Yong, YANG Xiao-fei, ZHANG Xiao-feng, et al. Analysis of Factors Affecting Solid Content Determination of Adhesives[J]. Adhesion, 2014, 35(8): 56-58.

[21] 杜庆丰, 张超, 王国涛, 等. 镀金触点接触电阻与压力载荷关系的试验研究[J]. 电工材料, 2020(4): 3-6.
DU Qing-feng, ZHANG Chao, WANG Guo-tao, et al. Experimental Investigation of the Relationship between the Contact Resistance and Contact Load for Gold Plated Contacts[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(4): 3-6.

[22] 王雄伟, 柴利强, 逢显娟, 等. 盐雾腐蚀对 DLC 薄膜摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(4): 453-461.
WANG Xiong-wei, CHAI Li-qiang, PANG Xian-juan, et al. Influence of Salt Spray Test to DLC Film on Tribological Properties[J]. Tribology, 2018, 38(4): 453-461.

[23] 郑超, 魏世丞, 梁义, 等. 钛金属材料干摩擦磨损特性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 44-50.
ZHENG Chao, WEI Shi-cheng, LIANG Yi, et al. Dry Friction Wearing Characteristics of Titanium Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 44-50.

责任编辑: 刘世忠