

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.05.007

## 铜基银镀层表面形貌及其摩擦磨损性能的研究

杨威<sup>1</sup>, 吴程浩<sup>2</sup>, 吴明孝<sup>1</sup>, 王吉<sup>1</sup>, 石磊<sup>2\*</sup>, 高嵩<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

**摘要:** 为探究银镀层对基体的保护作用, 利用成品动触头触片和自制镀银铜片开展性能研究和摩擦磨损试验, 结果表明: 成品触片的银镀层在低频、中等振幅的摩擦条件下具有较好的耐磨性, 可以对铜基体起到有效防护作用, 但其厚度波动较大、表面粗糙度较高, 将会影响到实际应用中的耐磨性能; 自制银镀层具有更低的表面粗糙度, 与成品银镀层相比, 在试验过程中的摩擦系数更小, 具备更高的耐磨性; 较厚的银镀层在相同的摩擦条件下将承受更大的摩擦力, 不利于银镀层对基体的保护作用。

**关键词:** 动触头触片; 银镀层; 摩擦磨损试验; 防护

中图分类号: TQ153.16

文献标识码: A

## Research on the surface morphology and tribological properties of silver coating based on copper substrate

Yang Wei<sup>1</sup>, Wu Chenghao<sup>2</sup>, Wu Mingxiao<sup>1</sup>, Wang Ji<sup>1</sup>, Shi Lei<sup>2\*</sup>, Gao Song<sup>2</sup>(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;  
2. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials (MOE), Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In order to explore the protective effect of silver coating on the moving contact of tulip contact, the performance research and tribological test were carried out using the finished moving contact and the self-made silver coating based on copper substrate. The results show that the finished silver coating of the finished contact piece has great wear resistance and can effectively protect the copper substrate under the friction conditions of low frequency and medium amplitude. However, its large thickness fluctuation and high surface roughness will affect the wear resistance in practical application. The self-made silver coating has lower surface roughness, lower friction coefficient and higher wear resistance than the finished silver coating during the tribological test. Thicker silver coating will bear greater friction under the same friction condition, which is not conducive to the protection of silver coating on the substrate.

**Keywords:** contact piece of moving contact; silver coating; tribological test; protection

梅花触头利用多片触指并联形成高电压及大电流的滑动电力连接器, 具有接触点多、导电性好、接

收稿日期: 2022-09-28

修回日期: 2022-11-18

作者简介: 杨威(1984—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, email: ywdbdl@126

\*通信作者: 石磊, 男, 教授, 博士, 研究方向为金属材料表征及连接, email: lei.shi@sdu.edu.cn

基金项目: 国网河南省电力公司科技计划项目(52170220009Y)

触电阻小等特点,作为主导电回路广泛应用于高压真空断路器、中置柜、手车及气体绝缘组合电器等中高压电力设备中<sup>[1-3]</sup>。梅花触头多由纯铜制成,受户外雨雪、风沙等恶劣环境条件的影响,触头表面易产生氧化膜、划痕等缺陷,影响触头质量<sup>[4-6]</sup>。由于银镀层具备良好的导电性<sup>[7]</sup>,对于上述情况,研究人员通常会在铜基体表面电镀银层作为防护措施,用以防止触头表面氧化并提高耐磨性及导电性<sup>[8-11]</sup>。但是由于纯银的硬度较低,容易在触头使用过程中发生磨损甚至剥落,使内部的铜基体暴露在大气中,成为电化学反应中的阳极而加速腐蚀,造成热缺陷的产生,严重降低触头使用寿命及作用效果,影响电网系统的安全稳定运行<sup>[12-18]</sup>。

相关学者开展了针对银镀层摩擦学性能的研究。陈俊寰等人<sup>[19]</sup>对比了铜基体和银镀层在不同润滑条件下的摩擦磨损性能,发现银镀层与润滑脂形成的固体-脂复合润滑能够提高摩擦副的摩擦学性能;索帅等人<sup>[20]</sup>成功配置了两种体系无氰镀银液并利用电刷镀工艺制备了银镀层,通过摩擦试验可知,丁二酰亚胺体系银镀层磨损速率相对较低,耐磨损性能较好。

目前,相关研究未能体现不同摩擦条件和不同银镀层厚度对摩擦学性能的影响。因此,本文以市面上流通的成品动触头触片和自制镀银铜片作为试验对象,通过改变摩擦条件,模拟户外不同的摩擦环境,记录并分析相关摩擦参数及银镀层的变化情况,研究银镀层在不同工况下的摩擦学性能差异,同时分析银镀层厚度对基体铜片耐磨性的影响,为铜基镀银材料在电工领域的可靠应用提供数据支持。

## 1 试验方法

### 1.1 银镀层电镀工艺

以尺寸为50 mm×50 mm×2 mm的H59铜作为基体铜片,采用不同型号的砂纸对基体铜片表面进行打磨处理并抛光。将处理好的基体铜片上挂电镀仪器内,采用自制的无氰镀银液进行后续电镀工艺。首先经过冷脱、热脱等操作进行预镀银处理,随后经过反复的水洗、中和、酸铜和光银操作完成镀银工艺。在此过程中,通过选定电镀时长以实现镀层厚度的控制。最后经过吹风、烘烤后下挂镀银铜片。

### 1.2 镀层厚度测量

将成品动触头触片沿中线位置进行竖直切割,对成品触片的切割面和自制镀银铜片的侧面使用金相砂纸进行打磨并抛光,随后利用超景深三维观察显微系统(VHX-5000)对镀层厚度进行测量分析。

### 1.3 表面粗糙度测量

将成品动触头触片和自制镀银铜片放置于无水乙醇中超声清洗2 min,去除表面油污及杂质。随后利用三维光学显微镜主机(Contour Elite K)对其表面进行粗糙度测量。

### 1.4 摩擦磨损试验

采用图1所示的MDW-02G型高速往复摩擦磨损试验机进行摩擦试验,摩擦副为球盘点接触,属滑动摩擦,载荷30~70 N,往复速度 $v=s \times f$ ,其中 $s$ 为摩擦振幅, $f$ 为往复频率。上方的摩擦试样采用GCr15标准试验钢球,硬度为550~600 HV,直径为6 mm。下方的待测试样分别为成品动触头触片和自制镀银铜片。

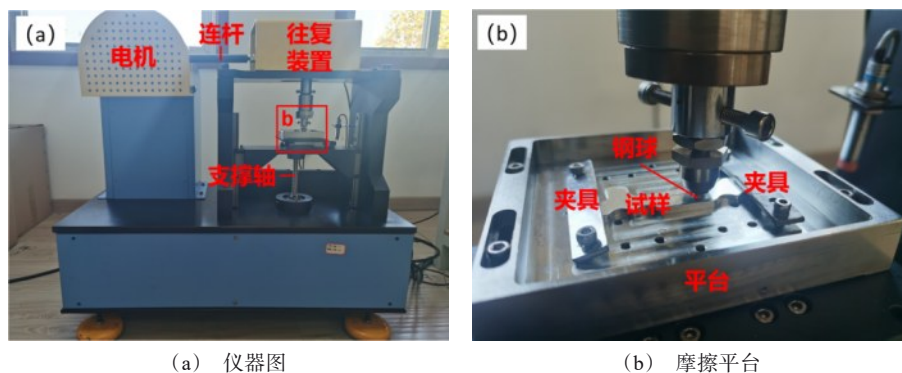


图1 MDW-02G型高速往复摩擦磨损试验机

Fig.1 MDW-02G high speed reciprocating tribological tester

摩擦磨损试验中,成品动触头触片采用的摩擦振幅 $s$ 取10 mm、20 mm和30 mm,试验力取30 N、50 N和70 N,往复频率 $f$ 为0.5 Hz和1.5 Hz,往复次数为160次和480次。自制镀银铜片以10  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ 和20  $\mu\text{m}$ 的银镀层厚度作为变量,采用的摩擦参数固定为:摩擦振幅 $s$  20 mm,试验压力50 N,往复频率 $f$  0.5 Hz,往复次数480次。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 表面宏观形貌

图2展示了成品银镀层的表面形貌,其中图2(a)为进行摩擦磨损试验的触片正面,图2(b)为触片反面。可以观察到正、反面银镀层均呈现较为光亮的银白色,表面较为平整,但存在细小划痕,推测这是由于成品在运输过程中集中放置,相互磕碰所致。图3所示为自制的不同镀层厚度的镀银铜片。观察到其表面与成品银镀层类似,呈现光亮的银白色。

### 2.2 成品镀银触片镀层厚度

对成品触头切割面四周的银镀层厚度进行测量,切割位置和银镀层横截面形貌分别如图4和图5所示,并将不同测试面的银镀层厚度及平均值记录在表1中。可以发现,银镀层的平均厚度约为10.30

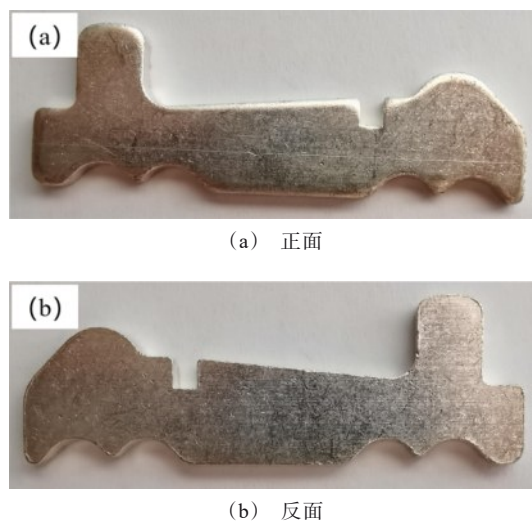


图2 成品银镀层表面形貌

Fig.2 Macro surface morphology of moving contact of tulip contact

$\mu\text{m}$ ,但铜基体表面的平整程度对银镀层厚度的均匀性产生影响。以图5(b)为例,其铜基体的表面平整度较差,呈现波纹状,因而导致b面的镀层厚度变化较大,该平面的极差达到1.58  $\mu\text{m}$ 。相关文献<sup>[21]</sup>表明,银镀层厚度的不同将会影响接触电阻的大小,进而影响产品质量。

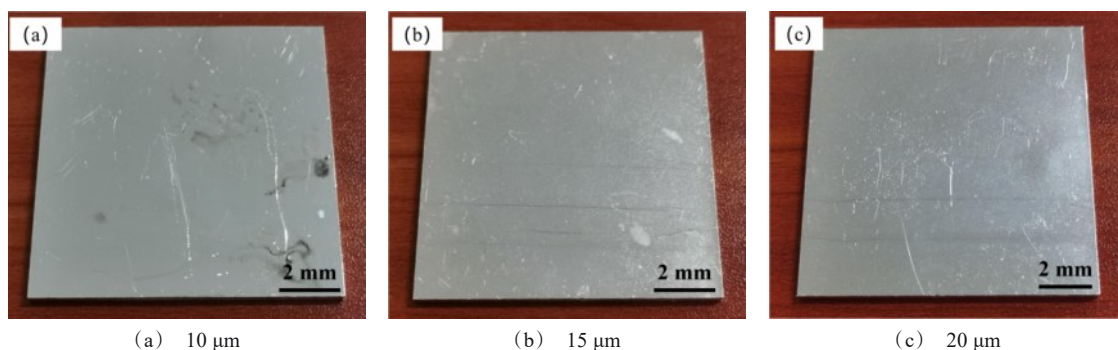


图3 自制银镀层表面形貌

Fig.3 Macro surface morphology of silver coating based on copper substrate with different thickness

### 2.3 表面粗糙度

图6展示了成品银镀层和自制银镀层的表面微观轮廓。据图6(a)可知,成品触片的表面银镀层高度分布相差较大,粗糙度 $S_a$ 为0.344  $\mu\text{m}$ 。图6(b)~(d)分别展示了不同厚度自制银镀层的表面微观形貌,可以看到,10  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ 和20  $\mu\text{m}$ 厚度的银镀

层,其表面粗糙度 $S_a$ 分别为0.101  $\mu\text{m}$ 、0.143  $\mu\text{m}$ 和0.144  $\mu\text{m}$ 。这说明银镀层的厚度越大,其表面高度差越大,表面粗糙也就越大。另外,自制镀银铜片的表面粗糙度均小于成品触片,这也说明自制银镀层的表面均匀性优于成品银镀层。



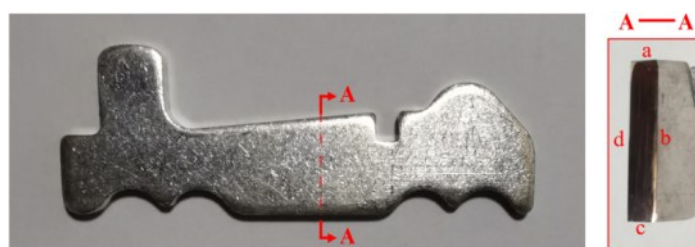


图4 成品动触头触片切割位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of cutting position of finished moving contact

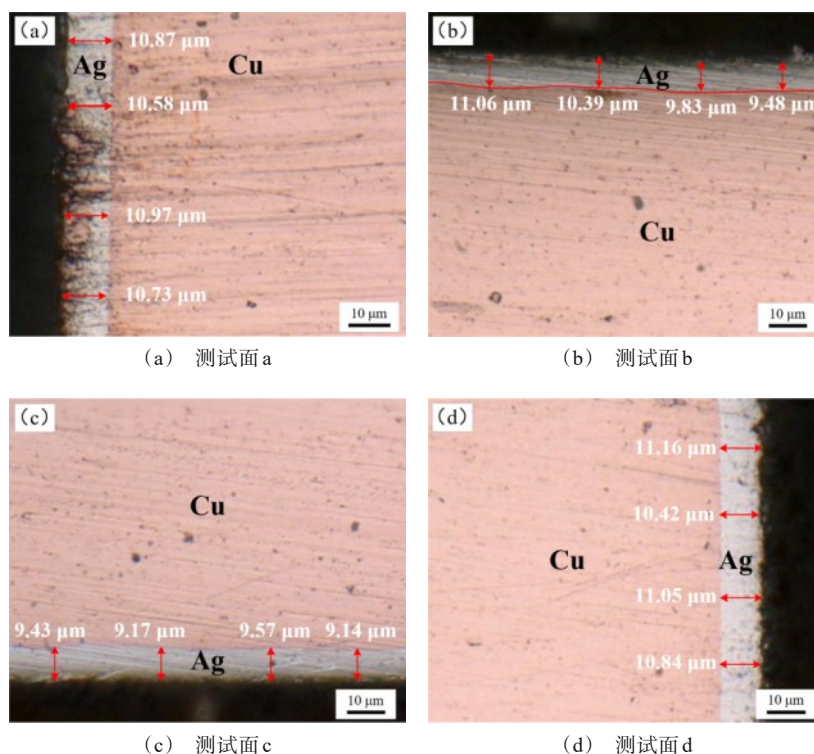


图5 成品动触头触片银镀层横截面形貌

Fig.5 Cross section morphology of silver coating of finished moving contact

表1 不同测试面的银镀层厚度

Tab. 1 Thickness of silver coating at different test surfaces

测试面	测量1	测量2	测量3	测量4	极差	平均厚度	
a	10.87	10.58	10.97	10.73	0.39	10.79	10.30
b	11.06	10.39	9.83	9.48	1.58	10.19	
c	9.43	9.17	9.57	9.14	0.43	9.33	
d	11.16	10.42	11.05	10.84	0.74	10.87	

## 2.4 摩擦磨损试验

图7所示为成品银镀层在不同摩擦试验条件下

的摩擦系数变化情况。可以看出,在摩擦磨损试验初始阶段,摩擦系数总体呈现上升趋势。这是因为起始阶段钢球和银镀层表面可视为点接触,接触面积较小,同时初始时的银镀层表面较为光滑,因而此时的摩擦系数较小;随着试验钢球不断摩擦并压入银镀层,钢球与银镀层内部的接触面积增大,大量银外溢到划痕两侧堆积,内部出现大量犁沟等缺陷,造成划痕内部的表面粗糙度提高,进而使摩擦系数上升。

图7(a)展示了不同试验力下摩擦系数变化曲线。可以观察到,随着试验力从30 N提升至50 N,

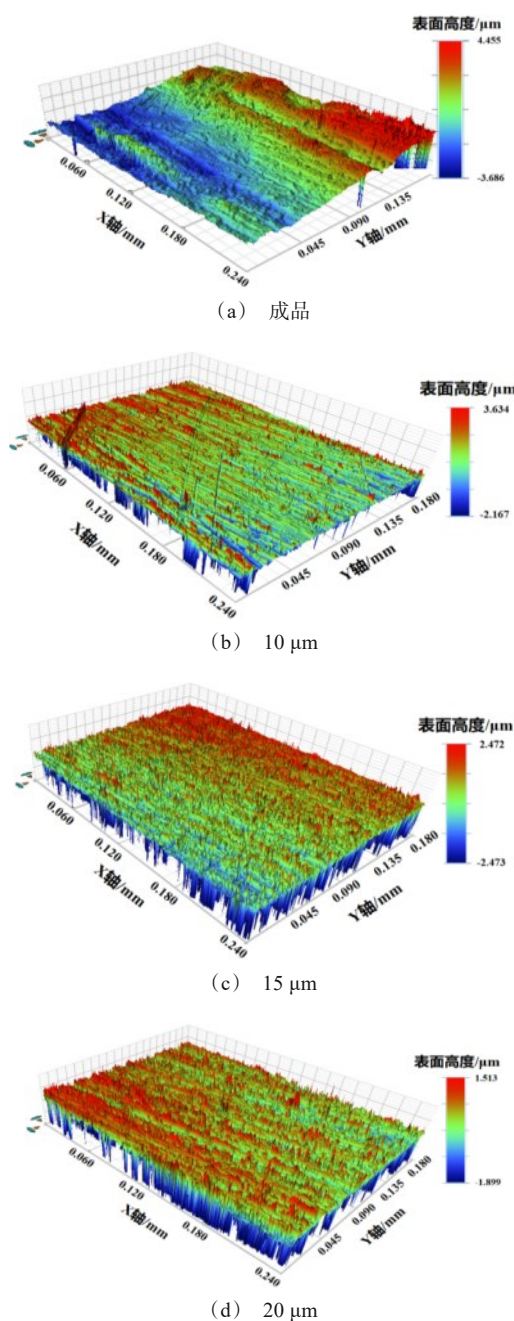


图 6 成品银镀层和自制银镀层的表面微观轮廓  
Fig.6 Surface micro profile of finished silver coating and self-made silver coating

再到 70 N, 摩擦系数逐渐增大, 稳定后的平均摩擦系数分别为 0.291、0.294 和 0.469。这是因为随着试验力提高, 起始摩擦力较大, 导致在相同的往复次数下划痕更深, 更多的银被剥离镀层内部, 使划痕内部的粗糙程度提高, 因此摩擦系数更大。

图 7(b) 展示了不同摩擦振幅下摩擦系数变化

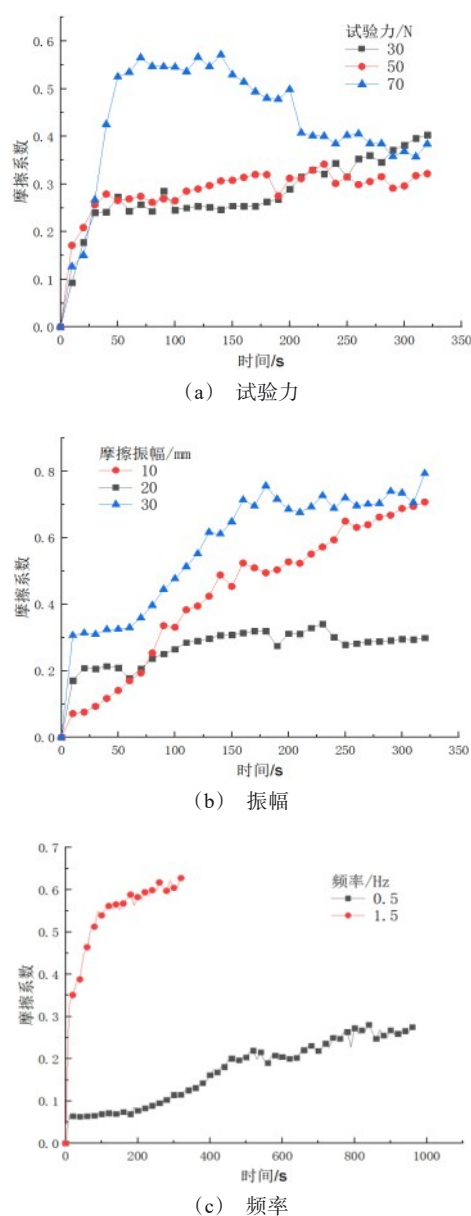


图 7 成品银镀层在不同摩擦参数下的摩擦系数

Fig.7 Friction coefficient of finished silver coating under different friction parameters

曲线。如图所示, 当摩擦振幅分别为 10 mm 和 30 mm 时, 试验过程中的摩擦系数较高, 平均摩擦系数分别为 0.439 和 0.584; 当摩擦振幅为 20 mm 时, 试验过程中的摩擦系数最低, 对应的平均摩擦系数为 0.274。由此说明, 在所测试的振幅范围内, 成品触片银镀层在高振幅和低振幅的摩擦环境下耐磨性能较差, 在中等振幅的摩擦环境下具有良好的防护

性能。

图7(c)所示为往复频率0.5 Hz和1.5 Hz时的摩擦系数变化曲线。可以看出,1.5 Hz时的摩擦系数远高于0.5 Hz的摩擦系数。在往复摩擦中,较高的往复频率将导致银镀层在剧烈的摩擦挤压作用下发生严重剥落,外溢到划痕两侧堆积,使钢球和银镀层之间的接触面更加粗糙,最终导致摩擦系数的提高。

为了减小镀层厚度不均匀对摩擦磨损试验的影响,同时研究不同银镀层厚度对铜基体保护效果的差异,本文以自制镀银铜片作为研究对象,记录不同银镀层厚度在摩擦磨损试验中的变化情况,分析厚度的变化对基体耐磨性的影响规律,进而优化铜基银镀层的摩擦学性能。

图8展示了自制银镀层在不同厚度条件下的平均摩擦系数变化情况。从图8中可以看出,随着镀层厚度从10  $\mu\text{m}$ 增至15  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$ ,稳定摩擦后的平均摩擦系数分别为0.228、0.347和0.414,这是因为当划过较厚的银镀层时,银在试验钢球的摩擦挤压下从原位置剥落,在内部形成的犁沟、点蚀等结构将提高划痕内部的粗糙度程度,进而使摩擦系数升高。同时,与基体铜片(0  $\mu\text{m}$ )的0.438相比,自制银镀层的摩擦系数分别下降了47.90%、20.78%和5.48%,这说明自制银镀层可以通过降低表面粗糙度来保护基体铜片。

图9所示为自制银镀层和成品银镀层在相同摩擦参数下(50 N, 480次, 20 mm, 0.5 Hz)的摩擦系数变化情况。据图9可知,对比成品触片和相同镀层厚度(10  $\mu\text{m}$ )的自制镀银铜片发现,成品触片在摩擦磨损过程中,不仅摩擦系数明显高于自制镀银铜片,同时摩擦系数的波动也更大,这说明了由于成品触片的银镀层较为粗糙,在相同摩擦环境下更易遭受磨损,降低保护时效。当比较10  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ 和20  $\mu\text{m}$ 的自制镀银铜片时,银镀层越厚,其摩擦系数在试验过程中的波动越大,这是因为越厚的银镀层具有更加复杂的划痕内部结构。但由于自制镀银铜片表面较成品触片更为光滑,其镀层厚度适当增大而使摩擦系数增加,也仍然小于成品触片的摩擦系数。总之,通过与基体铜片和成品触片的摩擦学性能对比,证明了自制银镀层能够不同程度地降低摩擦系数,对基体铜片起到保护作用;相比于成品触片的银镀层,具有更低的表面粗糙度,在相同摩擦条件

下的保护时效更长。另一方面通过对比自制不同厚度银镀层在摩擦过程中的变化趋势,也证明了同种工艺下划痕内部的表面粗糙度与银镀层厚度有关,越厚的银镀层在相同摩擦条件下将承受更大的摩擦力,因此银镀层对铜基体的保护时效会降低。

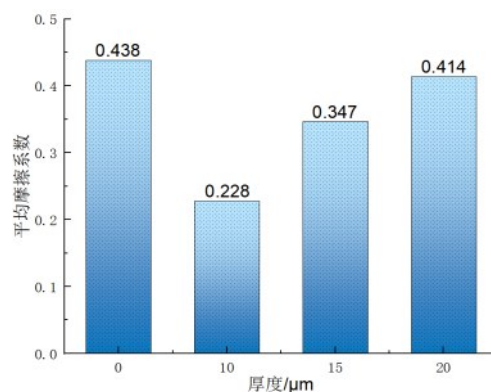


图8 自制银镀层在不同厚度下的平均摩擦系数

Fig.8 Average friction coefficient of self-made silver coating under different thickness

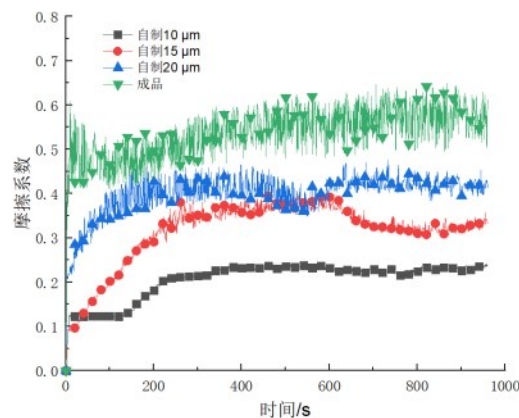


图9 自制银镀层与成品银镀层在摩擦过程中的摩擦系数变化

Fig.9 Friction coefficient of self-made silver coating and finished silver coating during friction

摩擦磨损试验后的自制银镀层表面划痕形貌如图10所示。从图10中可以看出,随着镀层厚度的增加,划痕宽度逐渐由763.64  $\mu\text{m}$ 提升至780.89  $\mu\text{m}$ 和1043.10  $\mu\text{m}$ ,同时划痕两侧的最远飞边距离由165.18  $\mu\text{m}$ 增大到313.56  $\mu\text{m}$ 和650.44  $\mu\text{m}$ 。这是由于银镀层越厚,其表面硬度越小,受钢球摩擦挤压作用的银的体积更大,这将导致较大飞边的出现以及划痕直径的扩宽,镀银层表面磨损也就越严重。



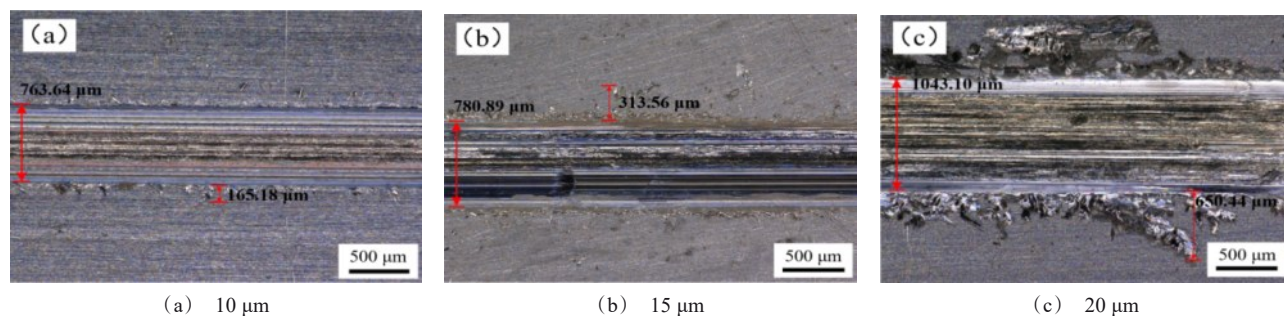


图 10 自制银镀层表面划痕微观形貌

Fig.10 Micromorphology of scratch on the surface of self-made silver coating

### 3 结论

(1)成品银镀层的厚度存在较大波动,同时其表面粗糙度( $S_a$  0.344  $\mu\text{m}$ )远高于自制银镀层。这将导致与自制银镀层相比,成品银镀层在相同摩擦条件下的摩擦系数及其波动更大,对基体铜片的保护能力较差。

(2)成品银镀层在低频(0.5 Hz)且中等振幅(20 mm)的摩擦环境中具备较好的耐磨性,可以对铜基体起到良好的防护。

(3)随着自制银镀层厚度由 10  $\mu\text{m}$  增加至 15  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$ ,对应的平均摩擦系数分别为 0.228、0.347 和 0.414,且摩擦系数曲线波动程度逐渐升高,这说明较厚的银镀层将承受更大的摩擦力,降低对基体的保护效率。

### 参考文献

- [1] 张伟. 梅花触头在高压供电系统的应用与探讨[J]. 铜业工程, 2014(5): 71-74.
- [2] 刘英. SF6 高压电器产品中各类触头形式的优劣对比[J]. 高压电器, 2004(4): 298-300.
- [3] 方煜瑛. 关于梅花触头的设计要领[J]. 华通技术, 2005(2): 38-40.
- [4] 张伟. 高压隔离开关触头导电性失效研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [5] 陈健, 吴绍武, 卢昊. 户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J]. 中国新技术新产品, 2016(6): 33.
- [6] 曹春博, 王慧源. 隔离开关触指镀银层现场修复新工艺的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(6): 66-69.
- [7] Tyagi R, Dang S X, Li J L, et al. High-temperature friction and wear of Ag/h-BN-containing Ni-based composites against steel[J]. Tribology Letters, 2010, 40(1): 181-186.
- [8] 王松, 付作鑫, 王塞北, 等. 银基电接触材料的研究现状及发展趋势[J]. 贵金属, 2013, 34(1): 79-83.
- [9] 徐雪霞, 冯砚厅, 柯浩, 等. 高压隔离开关触头银镀层质量检测分析[J]. 河北电力技术, 2013, 32(3): 3-5, 11.
- [10] 邓飞凤, 裴锋, 刘拥军. 空气相对湿度对室外电气柜内金属腐蚀的影响及防潮措施[J]. 华中电力, 2008, 21(2): 57-61.
- [11] 曾文清. 高压开关柜触头发热的原因分析和应对措施[J]. 冶金动力, 2016(8): 46-47.
- [12] 祁海洋, 朱志豪, 王海燕, 等. 多影响因素下开关柜梅花触头的电接触性能分析[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 67-74.
- [13] 盛明学, 王志清. 户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 93-96.
- [14] 杨翠茹, 王文轩, 雷璟, 等. 配电变压器保护用熔断器式隔离开关片状熔体温度特性分析[J]. 广东电力, 2016, 29(5): 113-117.
- [15] 郑克勤, 吕旺燕, 聂铭, 等. 户外高压隔离开关触头材料的腐蚀与防护分析[J]. 广东电力, 2019, 32(7): 124-133.
- [16] 郭秉义, 郭欣. 隔离开关过热故障分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2008, 26(1): 19-21.
- [17] 崔景春, 袁大陆, 宋杲. 高压隔离开关运行分析及其完善化[J]. 电器工业, 2007(2): 51-56.
- [18] 谢宏亮. GW4-110 型隔离开关触头发热缺陷及处理方法[J]. 大众用电, 2007(9): 31-32.
- [19] 陈俊寰, 夏延秋, 曹正锋. 铜基银镀层的导电性及摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2016, 49(10): 1-4, 13.
- [20] 索帅, 李文, 杜宝帅, 等. 无氰电刷镀银镀层性能研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(2): 7-11.
- [21] 李禹生, 许东杰. 基体粗糙度对银镀层粗糙度及接触电阻的影响研究[J]. 材料保护, 2020, 53(12): 143-145.