

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.008

柱上隔离开关不同镀银层参数的导电及磨损性能实验研究

余亚东, 孙浩, 薛亚许*

(平顶山学院 电气与机械工程学院, 河南 平顶山 467000)

摘要: 为提高柱上隔离开关的导电和耐摩抗磨能力, 行业目前主要采用在其接触部位进行镀银处理。但镀银层厚度、粗糙度和硬度对柱上隔离开关的导电性、磨损度的影响缺乏研究, 亟需给出更加合理的设计标准。本文以 GW-9 系列柱上隔离开关为研究对象, 通过投制试验样件, 研究了镀银层厚度、粗糙度、硬度及涂覆电力复合脂对其接触部位导电性及摩擦磨损性能的影响。研究表明: 柱上隔离开关接触部位镀银能够提高接触表面的导电性和摩擦性能, 镀银层的粗糙度和硬度对接触部位的导电性具有一定影响, 不同镀银层厚度对接触部位导电性的影响较小, 电力复合脂润滑能够显著提高隔离开关接触部位的抗磨性能。研究结果可为隔离开关电接触材料参数的标准化设计提供理论与实验依据。

关键词: 柱上隔离开关; 导电性能; 抗磨能力; 电力复合脂; 电接触材料

中图分类号: TM 930.1

文献标识码: A

Experimental study on conductivity and wear properties of different silver coating parameters of column disconnecting switch

Yu Yadong, Sun Hao, Xue Yaxu*

(College of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University,
Pingdingshan 467000, China)

Abstract: To improve the conductivity and wear resistance of disconnecting switch, silver plating is mainly used in the contact part. However, there is a lack of research on the influence of thickness, roughness and hardness of silver plating on the conductivity and wear of disconnecting switch, it is urgent to provide a more reasonable design standard. In this paper, GW-9 series column disconnecting switches were taken as the research object, and the test samples were produced. The effects of thickness, roughness, hardness of silver plating layer and coated electric grease on the electrical conductivity and friction properties of the contact parts of disconnecting switches were studied. The results show that silver plating can improve the electrical conductivity and friction properties of disconnecting switch contact. The roughness and hardness of silver plating have a certain effect on the electrical conductivity of contact surface. Thickness of the silver plating has little effect on the electrical conductivity of contact surface. The anti-wear property of disconnecting switch can be improved significantly under electric compound grease lubrication. The research results can provide theoretical and experimental basis for the standardized design of electrical contact material parameters of disconnecting switch.

收稿日期: 2024-01-17

修回日期: 2024-02-28

第一作者: 余亚东(1989—), 男, 博士, email: yadongyu12@163.com

*通信作者: 薛亚许(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高压开关设备智能化, email: yaxu.xue@pdsu.edu.cn

基金项目: 河南省科技攻关专项: 基于多模态感知的仿生多指灵巧机械手控制关键技术研究(232102211022)

Keywords: column disconnecting switch; electrical conductivity; anti-wear ability; electric compound grease; electrical contact material

户外柱上隔离开关的可靠性决定着配电网的安全工作^[1-2]。在工程应用中,发现隔离开关发生热故障的几率较大,究其原因是其接触部位接触电阻的增大,产生了较高的温升^[3-4],因此有必要采取有效的优化措施来降低接触电阻,减少温升故障。针对此问题行业上大多采用镀银的方式来降低隔离开关的接触电阻^[5-7],这在一定程度上降低了接触部位的发热量,同时增强了其耐磨性。但企业为了降本增效,在镀银层的厚度和粗糙度等方面达不到要求,导致隔离开关在使用的过程中存在导电性和耐磨性变差,引发触头的发热和烧蚀,严重威胁着配电网的安全运行。

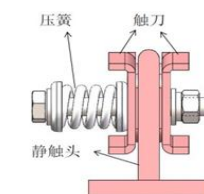
为了解决上述问题,近几年,国网公司物资采购标准^[8]及十八项反事故措施陆续修订,规定隔离开关主触头表面应镀银,且镀银层厚度不小于 $20\text{ }\mu\text{m}$,硬度不小于 120 HV 。但上述规定的依据不够充分,在业界不被信服,同时在高压开关设备电接触的相关镀层实验研究方面不够系统性,这给国网公司的物资抽检带来了极大的不便。为提出相对完善、科学的质量监督依据,亟需开展柱上隔离开关接触部位镀层重要参数的理论分析和试验研究。李杰等人^[9]通过改变梅花触头接触部位的银层参数,分析了其不同参数下的温升变化,给出了镀层参数选择的合理化建议。徐曦等人^[10]通过在气体绝缘金属封闭开关设备中进行了薄层硬银的电镀,不仅增强了开关设备的导电性,还有效降低了成本。李禹生等人^[11]同时分析了基体粗糙度、银镀层厚度及粗糙度对接触电阻的影响,得到了有价值的结论。焦承东等人^[12]采用回路电阻测量^[13]的方法,给出了试样在不同镀银层粗糙度影响下,导电性与粗糙度之间的规律。Madhavan. R等人^[14]分析了铜基银镀层的磨损率和硬度之间的关系,表明了镀银能够降低磨损率,有利于提高其摩擦特性。陈俊寰等人^[15-16]通过对比铜基体和银镀层在不同润滑条件下的摩擦性能,表明了脂润滑能够提高电接触的减摩抗磨性能。张雪松等人^[17]对涂覆有电力复合脂的连接端子进行了系统性的试验研究,所得结论和其理论分析较为吻合。综合以上研究,尚缺乏隔离开关接触部

位镀银层参数与其导电及摩擦性能之间存在的影响规律。

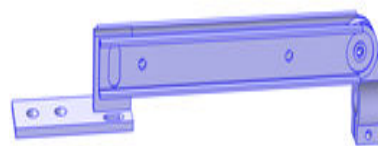
为了支撑国网公司物资采购标准中规定的隔离开关触头表面重要镀银层参数(厚度、粗糙度、硬度和是否涂覆电力复合脂)的选择,本文开展了隔离开关接触部位镀层参数的试验分析。以GW-9系列柱上隔离开关为研究对象,通过实验的手段,分析了不同镀层参数下,柱上隔离开关的导电性能和摩擦磨损性能,为镀银层参数的选择提供参考。

1 柱上隔离开关实验样件投制

图1给出了 12 kV 柱上隔离开关^[18-19]的结构模型。在模型中,左右两端用孔固定,中间的两块触刀可绕着右端关节旋转,与左端的垂直长条可接触和分离,两个触刀通过压簧与静触头连接。整个样件模型中有4个接触部位,在接触部位镀不同银参数的薄银^[20]。通过改变镀银层的厚度、粗糙度和硬度等不同工况条件进行实验分析。



(a) 隔离开关结构图



(b) 隔离开关样件图

图1 12 kV 柱上隔离开关结构模型

Fig.1 The structure of 12 kV column disconnecting switch

镀银的位置如图2所示,在隔离刀闸闭合时,图2(a)所形成的接触面积为 600 mm^2 ,图2(b)中关节处形成的接触面积为 1100 mm^2 。

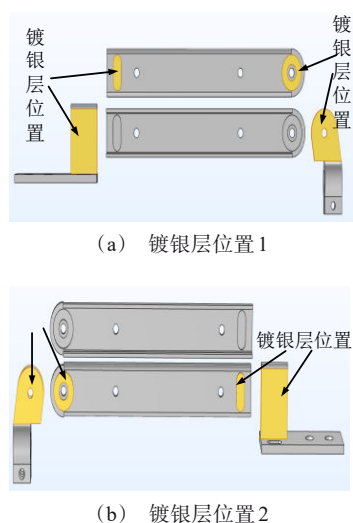


图2 隔离刀闸镀银层位置

Fig.2 The location of silver plating on disconnecting switch

为分析不同镀层参数对隔离开关导电性和摩擦性能的影响,投制了如图3所示的试验工装和隔离开关样件。其中图3(a)为实验用试验工装,图3(b)为投制的隔离开关静触头样件,图3(c)为投制的隔离开关触刀。样件共投制30对,其中接触表面粗糙度为 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $3.2\ \mu\text{m}$ 和 $6.3\ \mu\text{m}$ 的样件各投制3对,镀层厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 和 $26\ \mu\text{m}$ 的样件各投制3对,镀层硬度为80 HV、100 HV和120 HV的样件各投制3对。试验工况为:载荷30 N,频率3 Hz,室温 $15\ ^\circ\text{C}$,每组试验进行摩擦3000次。

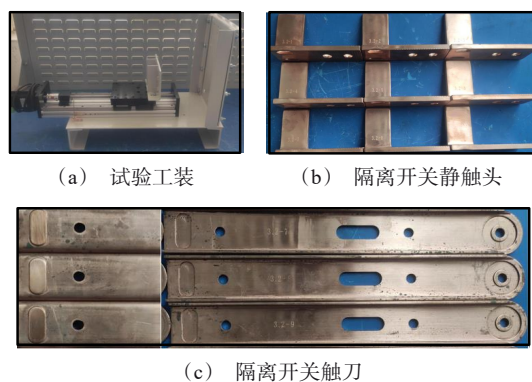


图3 试验工装及柱上隔离开关样件图

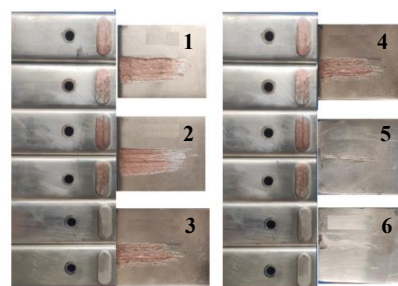
Fig.3 Diagrams of the test fixture and column disconnecting switch samples

2 不同镀银层参数对柱上隔离开关的电接触性能影响

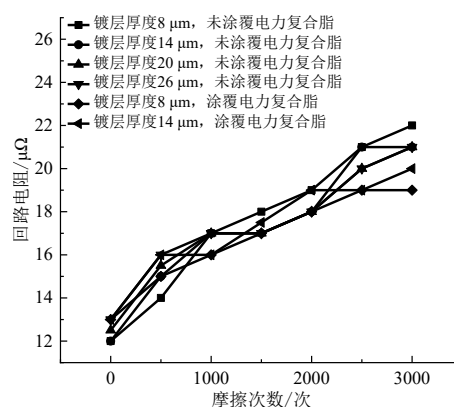
为分析不同镀银层参数下隔离开关的导电及摩擦磨损性能,回路电阻的测试设备选用 HLY-200A 型回路电阻测试仪。其中,拧紧力矩为 $10\ \text{N}\cdot\text{m}$,通电时间为10 s,通电电流为100 A。选用自制的实验工装进行往复摩擦磨损性能评价,载荷为30 N,往复频率为3 Hz。摩擦系数由计算机自动记录,磨斑宽度由 NIKON-LV150N 光学显微镜测量。

2.1 不同镀层厚度的试验结果分析

图4是在样件镀硬银、涂/未覆电力复合脂、粗糙度和硬度分别为 $3.2\ \mu\text{m}$ 和120 HV的条件下,不同镀层厚度的摩擦磨损形貌图及回路电阻测试图。



(a) 不同镀层厚度下摩擦磨损形貌图
(1、2、3、4分别代表未涂覆电力复合脂和镀银层厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、 $26\ \mu\text{m}$ 样件;5、6分别代表涂覆电力复合脂和镀银层厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$ 样件)



(b) 不同镀层厚度下回路电阻测试曲线图

图4 隔离开关样件在不同镀层厚度下摩擦磨损形貌图及回路电阻测试图

Fig.4 Friction and wear morphology and circuit resistance test diagram of disconnecting switch under different coating thickness

由图4可知,随着摩擦次数增加,不同厚度样件的回路电阻基本呈现增大趋势。在摩擦次数小于500时,镀层厚度为8 μm 的样件表现出了较低的回路电阻。这是因为在摩擦次数小于500时,样件磨损程度较小,但大于500次摩擦后,未涂覆电力复合脂的样件均出现了严重的漏铜现象。由于铜的电阻率高于银的电阻率,故在500次摩擦后,未涂覆电力复合脂样件的回路电阻均大于涂覆电力复合脂样件的回路电阻。镀银层厚度为8 μm 、且涂覆电力复合脂的样件在3000次摩擦后仍未出现漏铜,如图4(a)所示。故涂覆电力复合脂后,减小了样件的接触电阻,增强了隔离开关的导电性和减摩抗磨能力。

图5给出了在涂/未涂覆电力复合脂润滑条件下,镀银层不同厚度样件的摩擦系数和磨斑宽度随摩擦次数的变化对比图。

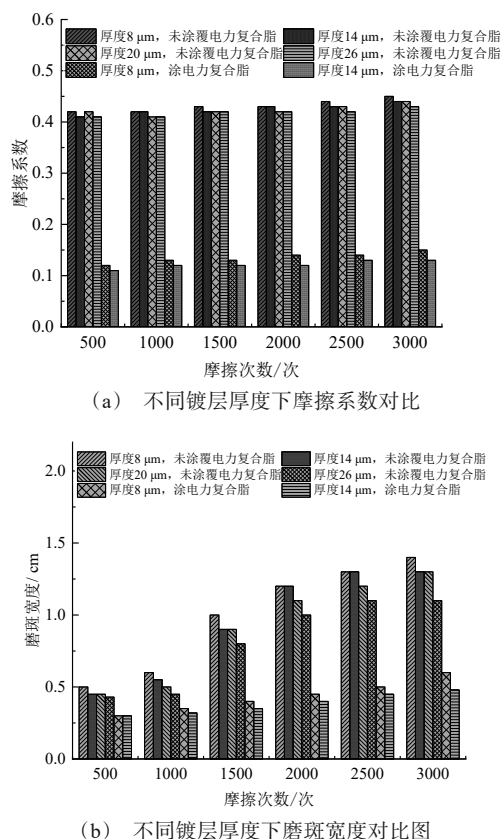


图5 镀银层不同厚度下的摩擦系数和磨斑宽度随摩擦次数变化对比图

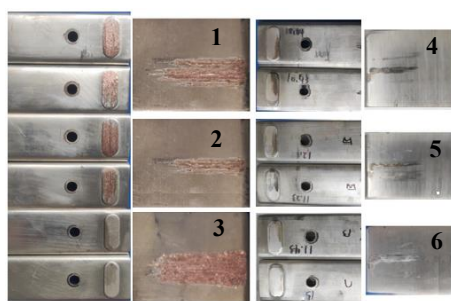
Fig.5 Comparison of friction coefficient and wear width with friction times under different thicknesses of silver layer

从图5(a)可看出,未涂覆润滑脂样件的摩擦系数明显高于涂覆有润滑脂样件的摩擦系数。在冠亚ELC501S型电力复合脂的润滑下,银镀层的摩擦系数基本保持在0.13左右,而干摩擦下摩擦系数基本保持在0.42左右(在干摩擦试验中,载荷不变且500次摩擦后均已磨损,出现严重漏铜现象,进而导致摩擦系数保持不变),降幅达到了70.2%。从图5(b)可看出,不同厚度样件的磨斑宽度均随着摩擦次数的增加而增大。在摩擦次数相同且干摩擦下,镀银层越厚的样件表现出了越小的磨斑宽度。在3000次机械摩擦寿命后,镀银层厚度为20 μm ~26 μm 样件的磨斑宽度降幅最大,达到了15.4%。与干摩擦相比,脂润滑样件的磨斑宽度较小,最大降幅为63.1%,说明镀银层可以和电力复合脂形成良好的固体-脂复合润滑的作用,具有较好的减摩抗磨性能。

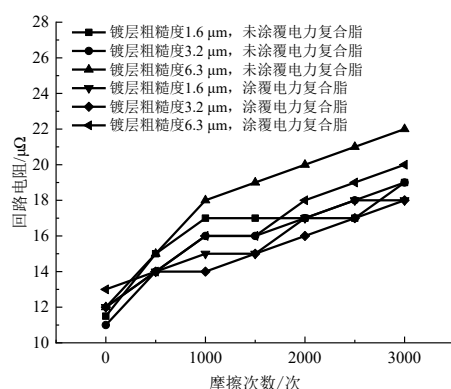
2.2 不同镀层粗糙度的试验结果分析

图6是在镀硬银、涂/未覆电力复合脂、厚度和硬度分别为14 μm 和120 HV条件下,不同镀层粗糙度时,隔离开关样件的摩擦磨损形貌图及回路电阻测试图。由图6(b)可知,随着摩擦次数增加,不同镀层粗糙度样件的回路电阻基本呈现增大趋势。摩擦次数小于500时,镀层粗糙度为3.2 μm 的样件表现出了较低回路电阻值,这是因为该样件的露铜现象不明显。但在大于500次的摩擦次数后,未涂覆电力复合脂样件的回路电阻均大于涂覆润滑脂样件的回路电阻,原因是铜的电阻率大于银的电阻率。在经过3000次的机械摩擦后,样件的形貌如图6(a)所示,涂覆电力复合脂的样件在3000次机械摩擦后,均未出现漏铜现象,而未涂覆电力复合脂的样件出现了漏铜现象,涂覆电力复合脂能够增强隔离开关的减摩抗磨能力。

图7是在脂润滑条件下,随着摩擦次数的变化,样件的摩擦系数和磨斑宽度的对比图。由图7(a)可知,在干摩擦条件下,不同粗糙度样件的摩擦系数随着摩擦次数的增加变化不大,保持在0.55左右。在电力复合脂的润滑下,由于油润滑脂能够填充到粗糙峰之间而起到润滑作用,摩擦系数始终保持在0.15左右,降低了72.7%。此外,在干摩擦条件下,粗糙度为1.6 μm 与6.3 μm 样件的摩擦系数基本相同,而粗糙度为3.2 μm 样件的摩擦系数要明显低于其余2种粗糙度样件。这是因为粗糙度越大的样



(a) 不同粗糙度下摩擦磨损形貌图
(1、2、3分别代表未涂覆电力复合脂和镀银层粗糙度为1.6 μm、3.2 μm、6.4 μm试样;4、5、6分别代表涂覆电力复合脂和镀银层粗糙度为1.6 μm、3.2 μm、6.4 μm试样)



(b) 不同粗糙度下回路电阻测试曲线图

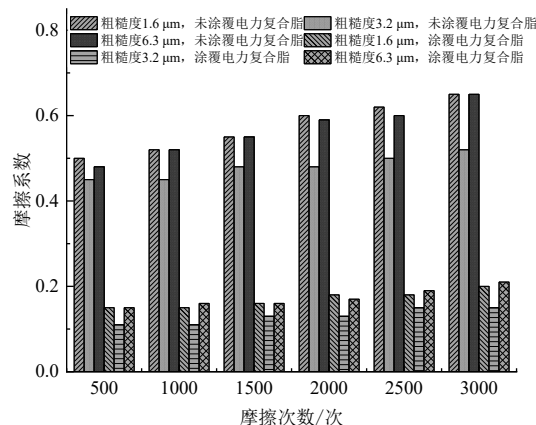
图6 隔离开关样件在不同镀层粗糙度下的摩擦磨损形貌图及回路电阻测试图

Fig.6 Friction and wear morphology and circuit resistance test diagram of the disconnection switch under different coating roughness

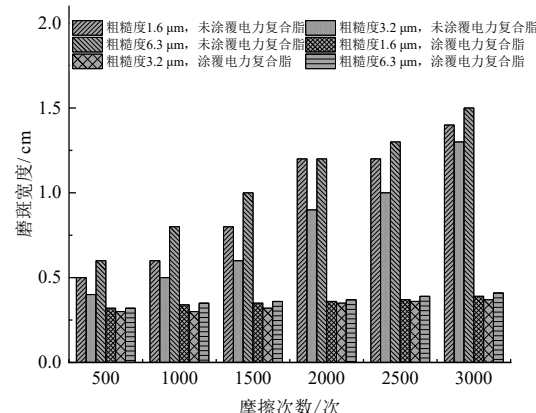
件,其表面剪应力越大,通过磨损后形成了较多的磨粒,造成摩擦系数升高。粗糙度越小的样件,在摩擦时接触面接触越紧密,分子作用力越强,摩擦系数也会越高。从图7(b)中可知,与干摩擦相比,脂润滑样件的磨斑宽度较小,摩擦次数与磨斑宽度呈正比关系。经过3000次摩擦后,粗糙度为3.2 μm,且涂覆电力复合脂样件表现出了最低磨斑宽度,仅为0.45 cm。与相同粗糙度且未涂覆电力复合脂样件的磨斑宽度相比,减小了64.5%。这说明了镀银层可以和润滑脂形成良好的润滑作用,具有较好的减摩擦抗磨性能。

2.3 不同镀层硬度的试验结果分析

图8给出了样件在涂/未覆电力复合脂、厚度和粗糙度分别为14 μm和3.2 μm的条件下,不同镀层



(a) 不同粗糙度下摩擦系数对比



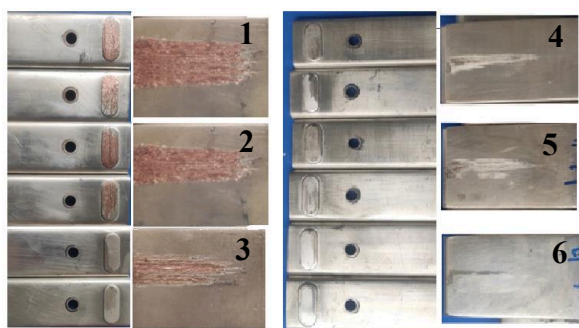
(b) 不同粗糙度下磨斑宽度对比图

图7 镀银层不同粗糙度下的摩擦系数和磨斑宽度随摩擦次数变化的对比图

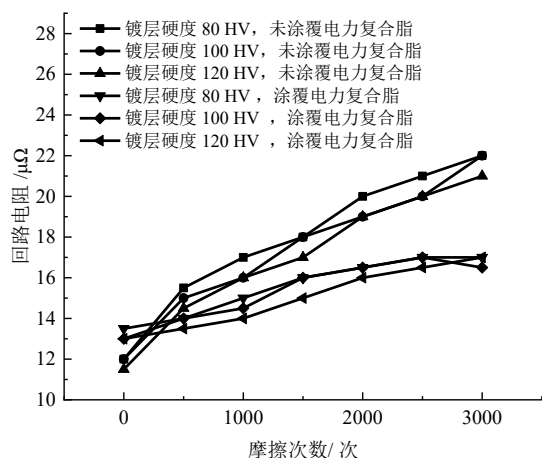
Fig.7 Comparison of friction coefficient and wear width of silver layer with friction times under different roughnesses

硬度样件的摩擦形貌图及回路电阻测试图。由图8可知,摩擦次数与不同硬度样件的回路电阻呈正相关关系。摩擦次数小于500时,硬度为120 HV的样件表现出了较低回路电阻值,具有较好的耐磨性。但大于临界值后,经过3000次的机械摩擦后,未涂覆电力复合脂的样件均出现了漏铜现象,涂覆电力复合脂的样件均未出现漏铜现象,形貌如图8(a)所示。可见涂覆电力复合脂能够增强隔离开关的减摩擦抗磨能力。

图9是样件的摩擦系数和磨斑宽度与摩擦次数之间的对比图。从图9(a)中可知,在干摩擦条件下,不同硬度样件的摩擦系数基本保持在0.46,而在脂润滑下摩擦系数保持在0.13,摩擦系数降低了



(a) 不同镀层硬度下摩擦磨损形貌图
(其中1、2、3分别代表未涂覆电力复合脂和镀银层硬度为80 HV、100 HV、120 HV试样;4、5、6 分别代表涂覆电力复合脂和镀银层硬度为80 HV、100 HV、120 HV试样)

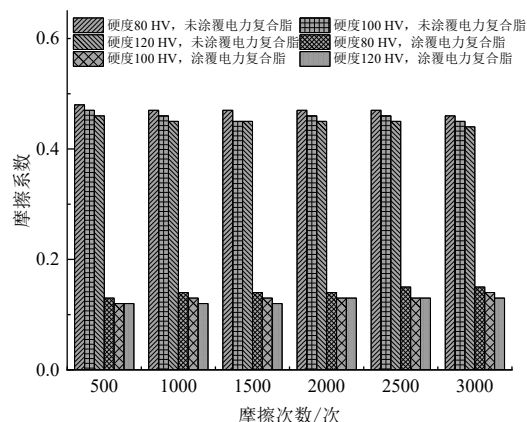


(b) 不同镀层硬度下回路电阻测试曲线图

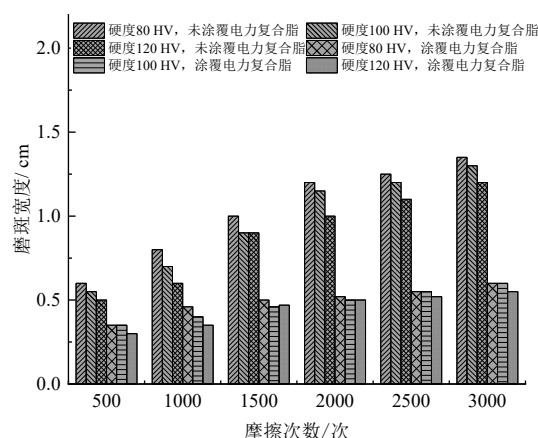
图8 隔离开关样件在不同镀层硬度下摩擦磨损形貌及回路电阻测试图

Fig.8 Friction and wear morphology and circuit resistance test diagram of the disconnecting switch under different coating hardness

71.7%,说明脂润滑具有较好的减摩抗磨作用。在干摩擦且相同摩擦次数下,硬度为120 HV的样件表现出了较低的摩擦系数,这是因为硬度越大,材料表面的磨耗量越小。从图9(b)可知,相同硬度条件,随着摩擦次数的增加,磨斑宽度逐渐增大。在摩擦次数相同且干摩擦下,样件硬度越大,磨斑宽度越小。经过3000次机械摩擦后,硬度为120 HV的样件表现出了较低的磨斑宽度,与干摩擦相比,脂润滑下银镀层样件的磨斑宽度较小。硬度为120 HV且涂覆电力复合脂样件表现出了最低磨斑宽度,达到了0.55 cm,与相同硬度且未涂覆电力复合脂样件的磨斑宽度相比,减小了59.3%。



(a) 不同镀层硬度下摩擦系数对比图



(b) 不同镀层硬度下磨斑宽度对比图

图9 镀银层不同硬度下的摩擦系数和磨斑宽度随摩擦次数变化的对比图

Fig.9 Comparison of friction coefficient and wear width of silver layer with friction times under different hardness

3 结论

本文针对国网公司物资采购标准中规定隔离开关触头表面镀银参数选择依据不充分的问题,开展了柱上隔离开关接触部位镀层重要参数的试验研究,得到了以下结论:

(1) 镀银层厚度的增加对接触电阻影响不大。3000次机械寿命摩擦后,镀层厚度在20 μm~6 μm之间,磨斑宽度降幅最大,减小了15.4%,镀层厚度可增强基底材料的耐磨性。镀层粗糙度和硬度与接触部位接触电阻均呈正相关,不同粗糙度对摩擦磨损性能的影响较大。在干摩擦及相同摩擦次数下,粗糙度为3.2 μm样件的摩擦因数和磨斑宽度最小。

在 80 HV~120 HV 硬度范围内,未引起触头表面碎裂。样件硬度越大,磨斑宽度越小,硬度为 120 HV 样件表现出了较好耐磨性。

(2) 通过涂覆电力复合脂后,有效减小了接触电阻,增强了导电性。与干摩擦相比,在 3000 次机械寿命摩擦后,电力复合脂润滑下,镀银层样件摩擦系数的最大降幅为 71.5%,磨斑宽度的最大降幅为 62.3%。镀银层能够和润滑脂形成良好的固体-脂复合润滑作用,增强了其耐磨性。针对隔离开关运行环境的特殊性,在实际工程应用中需对导电接触部位涂覆润滑脂,以延长其使用寿命。

参考文献

- [1] 马宏明,周涛涛,彭诗怡,等. GW4 隔离开关机械故障仿真与诊断技术[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 501-508.
- [2] 丁健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 114-117.
- [3] 李洋洋,孙艳,董龔,等. 110 kV 隔离开关线夹发热故障分析与研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 195-200.
- [4] 时光,陈忠华,郭凤仪,等. 波动载荷下弓网接触电阻特性及建模研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2287-2295.
- [5] 祁海洋,王海燕,蒋成博. 铝合金镀银过渡工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(10): 78-82.
- [6] Yan L W, Qin Z K, Guang Z Z. Performance studies of Ag, Ag-graphite, and Ag-graphene coatings on Cu substrate for high-voltage isolation switch [J]. Materials and Corrosion, 2018, 69(12): 1847-1853.
- [7] 陈婧. 厚度与粗糙度对紫铜镀银层温升的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(8): 19-22.
- [8] 国家电网有限公司企业标准. Q/GDW 13073.2—2018. 12kV 三相柱上隔离开关采购标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [9] 李杰,余亚东,薛亚许,等. 配电开关梅花触头接触部位镀银导电性的仿真分析和实验研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(11): 7-15.
- [10] 徐曦,陈阳,邓乐萍. 薄层镀硬银工艺在气体绝缘金属封闭开关设备上的应用性研究[J]. 电气技术, 2020, 21(2): 134-137.
- [11] 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.
- [12] 焦承东,李宾,田兴强. 铝合金基材表面粗糙度对镀银层导电性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(23): 1090-1093.
- [13] 傅中,陈维江,李志兵,等. SF6 断路器动态接触电阻测量方法及影响因素[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1535-1542.
- [14] Madhavan R, Bellon P, Averbach R S. Wear resistance of Cu/Ag multi-layers: a microscopic study [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(17): 15288-15297.
- [15] 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.
- [16] 陈俊寰. 银镀层在边界润滑下的导电能力和载流摩擦学性能研究[D]. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2019.
- [17] 张雪松,周立宪,刘胜春,等. 电力复合脂分油率对接头端子温升的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1210-1216.
- [18] 沈佩琦,李为民,周友东. 10 kV 户外柱上开关存在的问题及对策[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 211-214.
- [19] 朱杰,刘斌,刘丽洁. 10kV 柱上隔离开关与站内进线断路器闭锁装置的研制[J]. 电器与能效管理技术, 2014(23): 28-31.
- [20] 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.