

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.017

一例镀层附着力不良引起的高压开关产品放电问题分析

路亚娟^{1,2,3}, 沈晓^{1,2,3}, 李晓征^{1,2,3}, 娄金钢^{1,2,3}, 吴茹梦^{1,2,3*}, 杜书万¹

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 平高集团 表面处理及金属防腐实验室, 河南 平顶山 467001; 3. 平高集团 路亚娟创新工作室, 河南 平顶山 467001)

摘要: 高压开关设备内核心零部件压气缸为 6063 铝合金材质, 外表面进行电镀银层, 内腔进行硬质阳极氧化处理。本文针对该零件电镀银层脱落造成放电的一起事故, 通过对镀层脱落部位基体及脱落镀层底面进行成分分析, 确定剥离部位为中间过渡铜层。通过对不合格零部件加工过程排查, 确定此次放电的原因是压气缸工装挂具导电不良造成银镀层附着力不良, 高压开关设备运行过程中, 镀层经受外力反复摩擦脱落, 引起产品放电。后期为规避此类问题, 提出了该类核心零部件电镀银过程中, 关键控制点及问题的规避方案, 为电镀银表面处理产品工艺过程控制, 提供参考依据。

关键词: 高压电气; 放电; 银层脱落

中图分类号: TG17 **文献标识码:** A

An example of a high voltage switch product caused by poor plating adhesion

Lu Yajuan^{1,2,3}, Shenxiao^{1,2,3}, Li Xiaozheng^{1,2,3}, Lou Jingang^{1,2,3},
Wu Rumeng^{1,2,3*}, Du Shuwang¹

(1. HenanPinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 2. Lab of Surface Treatment and Metal Anti-corrosion, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China; 3. Lu Yajuan Innovation Studio, Pinggao Group, Pingdingshan 467001, China)

Abstract: The pressure cylinder of the core parts in the high voltage switchgear is made of 6063 aluminum alloy. It is plated with a silver layer on the outer surface and undergoes a hard anodized treatment on the inner cavity. This article discusses an incident caused by the silver peeled off. By analyzing the composition of the substrate and the bottom surface of the peeled coating, it was determined that the peeling occurred at the intermediate copper layer. It was identified that the cause of the discharge was poor conductivity of the fixtures, resulting in poor adhesion of the silver coating. During the operation of the high voltage switchgear, the coating experienced repeated friction and detachment due to external forces, leading to product discharge. To avoid such issues in the future, key control points and problem mitigation strategies were proposed for the silver plating process of these core parts. This provides a

收稿日期: 2024-02-25

修回日期: 2024-07-09

作者简介: 路亚娟(1982—), 女, 本科, 高级工程师, email: luyajuan0512@163.com

通信作者: 吴茹梦, email: wrm2938176750@163.com

引用信息: 路亚娟, 沈晓, 李晓征, 等. 一例镀层附着力不良引起的高压开关产品放电问题分析[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 115-119.

Lu Yajuan, Shenxiao, Li Xiaozheng, et al. An example of a high voltage switch product caused by poor plating adhesion[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 115-119.

reference for process control in the silver plating surface treatment of products.

Keywords: high voltage electrical; discharge; silver layer peeling off

铝合金具有质轻、导电性好、易加工等优点，在现代工业领域得到了广泛应用^[1-2]。铝合金用作高压电器产品的导电连接部位时一般要求镀银，以降低接触电阻^[3-5]，同时，铝合金硬质阳极氧化膜由于具有硬度高、耐磨性强、耐热性高、电绝缘性好、具有一定金属异物去除效果、制造成本低等优点，克服了铝合金本身在表面硬度、耐磨性能方面的缺陷，扩大了铝合金的应用范围，延长了其使用寿命，在高压电器产品的主要导电回路中，某些部位要求硬度高、绝缘屏蔽性能好时，需要进行局部硬质阳极氧化处理^[6-9]。

压气缸作为高压电器产品内核心零部件，在产品内位置，如图1所示。外表面与动触指滑动接触导电，需进行镀厚硬银处理。同时，内腔为屏蔽电场，需进行硬质阳极氧化处理，提高绝缘屏蔽性能^[10]，该零件在设备开断过程中与配套零件相互运动、传输电流起着关键作用。产品运行过程中，当有异物产生，会造成尖端放电^[11]，本论文就针对一次高压电器产品放电事故原因进行深度调查、分析，并提出后期解决办法。

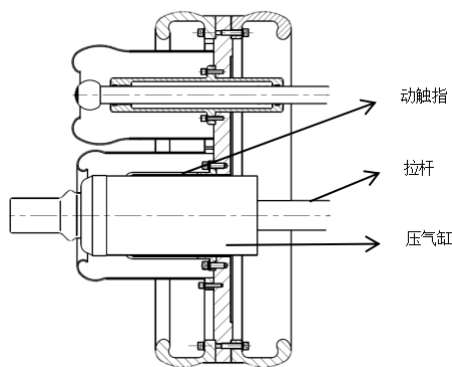


图1 装配结构示意图

Fig.1 Diagram of the assembly structure

1 实验

1.1 压气缸表面处理工艺流程

非镀银面屏蔽→镀银上挂→局部镀银→热水法银层附着力检测(80~85℃, 保温5 min)→下挂干燥(压缩空气吹干)→去除非镀银面屏蔽→非硬质阳极氧化面屏蔽→局部硬质阳极氧化→热水封闭(去离子水, 85~90℃, 保温20 min)→下挂干燥(压缩空气吹干)。

1.2 局部镀银工艺

碱浸蚀(去除表面油脂、污染物、污垢、氧化膜等, 使铝基体暴露在表面)→除垢剂酸洗(去除表面微量元素, 比如Si、Mg元素等)→一次浸锌(厚度约为1 μm)→氢氟酸洗→二次浸锌(厚度约1~3 μm)→电镀铜(厚度约3 μm)→镀银(以银板或不锈钢板作为阳极, 在温度20~35℃、电流密度0.5~1.5 A/dm²的条件下电镀银120 min)→水洗→热水洗(80~85℃, 保温5 min, 检测附着力)→下挂干燥。

1.3 分析及测试

本文中所使用的SEM型号为QUANTA-200, 主要用于观察零件基体和镀银层形貌及元素组成。烘箱型号为RGH-9039A, 主要用于镀银层结合力检测, 具体检测方法为加热到190℃后保温30min, 打开烘箱自然冷却, 再次进行加热进行附着力试验。硬度检测所用的型号为TMVS-1, 主要用于检测镀银层硬度。

2 银层脱落的原因分析

2023年, 某变电站发生事故, 将断路器隔离开关进行解体检查。放电部位结构如图2所示。

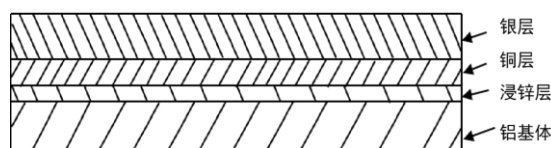


图2 铝基材镀银后镀层结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the aluminum substrate after silver plating

解体后发现与动触指相连的压气缸银层脱落, 产生异物导致放电。为分析故障产生原因, 首先排查槽液成分及工艺参数。对操作工人进行询问, 调查该批零件镀银加工过程情况。并让化验人员分析了浸锌镀银、镀铜等槽液的主要控制物成分和含量。化验结果表明: 所有槽液的主要控制物成分均在工艺规定的范围之内, 因此排除了镀液的影响。对电流密度等工艺参数进行排查, 工艺要求镀铜的电流密度范围为0.6~1.5 A/dm², 实际操作电流密度为1.1 A/dm², 镀银电流密度范围为0.4~1.5 A/dm², 实际操作电流密度为0.8 A/dm², 因此排除该因素的影响。然后排查了工装挂具, 发现此类压气缸采用

非固定式单钩悬挂导电的连接方式,仅靠零件自身重力使电导体与零件间导电连接,存在镀层附着力不良的风险,推测该因素为本次镀层结合力不良的原因之一。最后排查了镀后附着力的检测方法,发现目前采用热水法(80~85℃,保温5 min),推测附着力检测温度不够可能是导致产生不合格产品的另一个原因。

为进一步确定不合格压气缸银层脱落的原因,使用扫描电镜及能谱对结合力不好的部位进行检测分析,并提高检测的热冲击温度对镀层附着力进行检测,以确定加热法(190℃,保温30 min)能否将不合格品检出。然后对镀层硬度进行检测,确定镀层银层硬度是否达标,最后对该零件的加工过程进行详细调查分析。

2.1 脱落部位成分分析

拆解出来的压气缸如图3所示,表面银层大部分脱落,呈暗红色。通过颜色初步分析认为,可能是由于铜层结合力不好导致脱落。为进一步确定是哪一层结合力不好,对镀层脱落后的基底和脱落的镀层成分进行分析(图3)。6063铝基体成分为硅0.2%~0.6%,铁≤0.35%,铜≤0.1%,锌≤0.1%,钛≤0.1%。脱落之后基体碳含量为38.15%、铜含量为22.36%、锌含量为2.80%;脱落后镀层铜含量高达62.98%、锌含量为1.49%(见表1)。分析认为碳含量增加是由于放电后硅脂碳化附着物在基体表面附着导致,而脱落下的镀层和脱落后基体中铜的含量

表1 基体和脱落层成分(wt.%)

Tab.1 Composition of the substrate and delamination layer(wt.%)

点位	C	O	F	Al	Cu	Zn	Ag
镀层脱落后的基底	38.15	5.13	1.90	25.44	22.36	2.80	2.05
脱落的镀层	8.44	3.38	0.00	0.00	62.98	1.49	23.71

2.2 附着力检测方法分析

对热水法能否将不合格品检出情况进行测试,发现不合格产品经热水法检测后未出现起泡情况。之后将附着力检测方式改为加热到190℃后保温30 min,打开烤箱自然冷却。可以看出(如图4框线处放大图)加热后镀银面原本未脱落、无起泡的部位发生鼓泡现象,说明提高检测的热冲击温度,采用加热法(190℃,保温30 min)较热水法(80~85℃,保温5 min)更能有效检出镀层附着力不良问题。

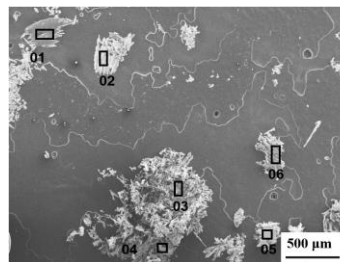
2.3 镀层硬度分析

使用维氏硬度计对前期加工的压气缸零部件

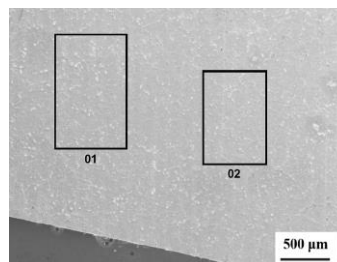
都大大增加,说明镀层脱落剥离部位为中间预镀铜层,是铜层和锌层的结合力不佳导致镀层脱落。



(a) 压气缸形貌



(b) 镀层脱落后的基底



(c) 脱落的镀层

图3 基体与脱落层形貌图

Fig.3 Morphological diagrams of the matrix and delamination layer

镀银层硬度进行检测,结果如表2所示。国家电网规定零部件的银层硬度应该在120~140 HV之间,本零件三个点位的平均硬度分别为132.7、129.1和129.1 HV,全部在国家电网要求的范围之内。



(a) 加热后起泡产品



(b) 图(a)框线处的放大图

图4 加热法附着力检测

Fig.4 Heating method adhesion testing

表 2 镀银层硬度测量结果

Tab.2 Hardness measurement results of the silver plating layer

硬度	1/HV	2/HV	3/HV	4/HV	5/HV	平均值/HV
点位 1	138.5	132.2	130.6	128.6	133.4	132.7
点位 2	126.3	131.1	133.2	129.7	125.4	129.1
点位 3	128.1	130.8	123.2	126.7	125.4	129.1

2.4 工装挂具分析

该压气缸零件上挂方法如图5所示。使用单钩悬挂在极杠上，通过零件上端1个 $\Phi 16$ mm通孔内侧倒角处进行导电。如图6所示，在电镀过程中，受镀槽内阴极移动、溶液循环流动等因素的影响，零件在镀槽内处于轻微晃动状态， $\Phi 16$ mm通孔内侧倒角处为非镀面边缘，周围覆盖有遮蔽层，遮蔽层为

绝缘材料，当单钩接触遮蔽层时，易造成间歇性导电情况，进而造成镀银层结合力不良。分析认为，此类零部件采用非固定式单钩悬挂导电连接方式，靠零件自身重力使导电工装与零件间导电连接，会存在镀层附着力不良的风险，后续需要改进为靠机械张力导电连接的方式。

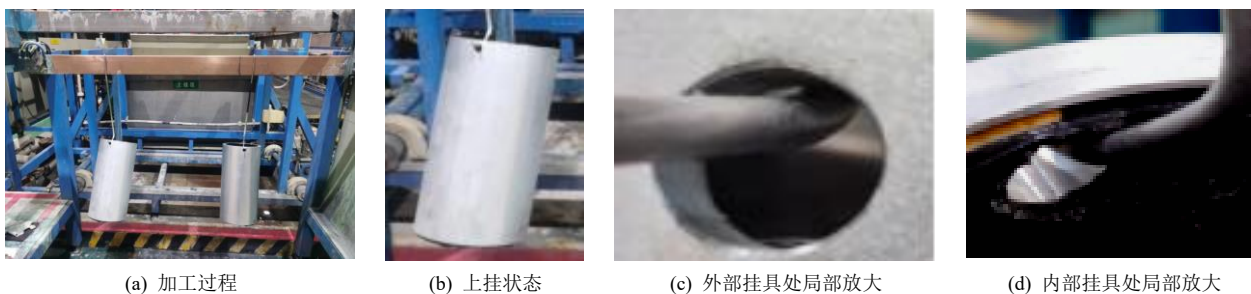


图 5 压气缸上挂方法

Fig.5 Hanging method of the pressure cylinder

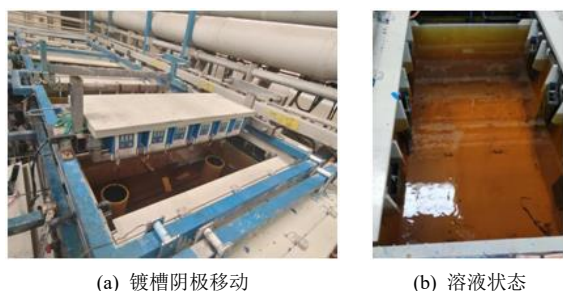


图 6 电镀过程

Fig.6 Electroplating process

3 总结及建议

通过以上分析，得出此次银层脱落的原因为：电镀过程中，选取的上挂工装不当，导致工装与零件间导电不良；在镀中间过渡铜层时，由于镀液流动、镀槽内阴极移动晃动等原因，产生了间歇导电问题；镀铜层与锌层结合力不良，进而导致银层与基体间附着力不良；仅采用了热水法进行了附着力检测，未进行加热法附着力检测，造成了不合格问题未及时检出，高压开关产品后期再反复摩擦过程

中，会使银层脱落，产生放电。针对此问题，改进建议：

(1) 将重力导电方式挂钩改成张力挂钩导电方式。

电镀表面处理类零部件，采用非固定式单钩悬挂导电连接方式，靠零件自身重力使导电工装与零件间导电连接，会存在镀层附着力不良的风险，均需改为靠机械张力导电连接的方式。

(2) 提高检测的热冲击温度

加热法(190 °C，保温30 min)较热水法(80~85 °C，保温5 min)更能有效检出镀层附着力不良的问题。故对于需滑动摩擦接触或灭弧室内使用的这类零部件，它们的镀银层均需要采用加热法进行附着力检测。

(3) 改变局部镀银工艺流程

图纸要求需进行氧化和镀银处理的零件，若先进行局部镀银处理，后进行硬质阳极氧化处理，用加热法进行附着力检测后，会导致硬氧膜层裂纹增多^[12]。故建议此类零件先进行镀银处理，然后用加

热法附着力检测后, 再进行硬质阳极氧化处理。

参考文献

- [1] 许振明, 徐孝勉. 铝和镁的表面处理[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005:1-4.
- [2] 盛曦霆. 铝合金表面硬质阳极氧化制备工艺及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- [3] 郝留成, 廉继英, 周瑛, 等. 6063 铝合金材料镀银层脱落原因及其解决途径[J]. 铸造技术, 2009, 30(10):1350-1352.
- [4] 王斌, 李晓征, 张颖杰, 等. 一例元素富集引起的 6A02 铝合金电镀银层起泡故障分析和解决[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(1):16-19.
- [5] 付国华, 张礼学. 铝合金微波腔体表面处理工艺[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(8):571-573.
- [6] 张策, 张德忠, 郭俊灏, 等. 铝合金阳极氧化膜低温无镍封孔工艺及其封孔性能[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(1):20-27.
- [7] 王旗, 张尹航, 张晓云. 碱蚀对铝合金常温硬质阳极氧化膜性能的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(10):161-165.
- [8] 赵旭辉, 左禹, 赵景茂. 几种封闭方法处理后铝阳极氧化膜的耐蚀性比较[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(8):400-403.
- [9] 韩克, 欧忠文, 蒲滕. 铝及铝合金硬质阳极氧化的研究进展[J]. 表面技术, 2011, 40(5):92-96.
- [10] 路亚娟, 李晓征, 马迎春, 等. 一例放电事故造成硬氧膜脱落的原因分析[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(1):92-97.
- [11] 余爽, 赵科. 一起 1100kV 气体绝缘金属封闭开关设备母线放电故障分析[J]. 电气技术, 2021, 4(22):1-4.
- [12] Liu Z H, Zheng X Y, Zhang H Wi, et al. Review on formation of biofouling in the marine environment and functionalization of new marine antifouling coatings[J]. Journal of Materias Science, 2022, 57(39):18221-18242.

新书讯

《电镀技术与装备》一书出版发行

由刘仁志、匡优新、匡泓编著的《电镀技术与装备》一书将于今年(2025年)三月在化学工业出版社出版发行。

本书特点在于结合电镀技术原理介绍了电镀装备在电镀过程中的作用, 突出了电镀技术与装备的独特性, 同时对各类电镀装备和自动生产线从结构到应用都做了全面介绍。书中介绍了金刚石线锯复合电镀、芯片电镀、印制板电镀、箔材电镀等高端电镀技术中的特殊装置, 并提出了一些创新理念和建议, 有利于读者将电镀理论学习与电镀工艺与装备的研发结合起来, 提升专业素养。本书对从事电镀专业技术研发和电镀装备制造的技术人员极具参考价值, 也适合大专院校电化学等相关专业师生作为教材和辅助读物。

全书共12章, 42万多字, 内容丰富, 信息量大, 值得拥有。读者可在化学工业出版社网站或各网售平台购买。扫购书码可直接进入化学工业出版社在京东的网店。

