

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.08.031

高低温条件下隔离开关零部件机械特性研究及稳定性提升措施

黄坤鹏, 赵平, 康留涛

(河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 以隔离开关关键零部件为研究对象,设计高低温试验箱,研究环境温度变化对隔离开关关键零部件材料特性的影响程度,通过对6005-T5、T2Y、ZL101、Q235四种材料的抗拉强度、端面收缩率、0.2%非比例延伸强度、弹性模量和泊松比等关键性能指标的试验研究,掌握了4种材料关键性能指标随环境温度变化的规律。其次,搭建高低温试验平台并设计能够连续旋转的触头系统,研究环境温度对触头触指接触压力、弹簧力值和触指镀银层耐磨性的影响,得到了触头触指接触压力在5个温度点的变化率基本在 $\pm 6\%$ 之间,触指弹簧力值变化率小于3%,触头触指镀银层磨损量随温度的升高先减小后增大,在0℃时,触头触指磨损量最小。并根据隔离开关结构特点,提出了针对材料、结构设计及高低温适应性试验等方面的措施,为进一步提高隔离开关在高低温环境下运行稳定性奠定理论基础。

关键词: 隔离开关; 性能指标; 触指; 镀银层; 适应性

Research on Mechanical Characteristics and Stability Improvement Measures of Disconnecter Parts Under Hot and Cold Temperature Conditions

HUANG Kunpeng, ZHAO Ping, KANG Liutao

(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: The key parts of the disconnecter is taken as the research object, a high and low temperature test chamber is designed to study the influence degree of environmental temperature variation on the material properties of the key parts of disconnecter. First, through the experimental research on such key performance index as tensile strength, end face shrinkage, 0.2% non-proportional elongation strength, elastic modulus and Poisson's ratio of such four kinds of material as 6005-T5, T2Y, ZL101, Q235, the variation of the key performance index of the 4 kinds of materials with the ambient temperature is mastered. Then, the high and low temperature test platform is set up and a contact system which can rotate continuously is designed so to study the influence of ambient temperature on the contacting pressure of contact finger, spring force, and wear resistance of the silver plating layer. The variation rate of the contacting pressure of the contact finger at 5 temperature points is basically between $\pm 6\%$, and the variation rate of contact finger spring force is less than 3%, the wear amount of the silver plating layer on the contact finger decreases first and then increases with the increase of temperature. At 0℃, the wear amount of the contact finger of the contact is the smallest. Based on the structural characteristics of the disconnecter, measures have been proposed in terms of materials, structural design, and high and low temperature adaptability tests, which lay a theoretical foundation for further improving the stability of the disconnecter in high and low temperature environments.

Key words: disconnecter; performance index; contact finger; silver plating; adaptability

收稿日期:2024-03-01; 修回日期:2024-05-11

0 引言

隔离开关是一种在分闸状态时有明显的断开点的开关设备,使待检电气设备和输变电路与高压电源隔离,以确保检修人员及设备安全,在合闸位置时能可靠地通过正常负荷电流及短路故障电流。此外,双母线接线中,隔离开关在其断口两端接近等电位的条件下,可以带负荷进行分合操作,进行母线转换。由于隔离开关没有灭弧装置,因此其机械结构相对较为简单,只需要考虑工作状态时导电系统的温升和短路电流的动、热稳定性^[1-4]。

由于中国地域辽阔,且随着智能电网建设和国际市场的开发,隔离开关的使用环境温度变化较大,外界环境温度变化将导致隔离开关关键零部件材料性能发生变化,进而对隔离开关的机械性能产生重要的影响。在通常情况下,交直流隔离开关均在常温下进行研发设计,在低温环境下,关键零部件的材料性能发生改变,致使隔离开关装配间隙发生变化,且部分润滑脂性能的下降,发生隔离开关卡滞、分合闸动作缓慢及合闸不到位的现象。其次,低温容易使隔离开关动静触头材料性能发生变化,影响其通流性能。此外,在低温环境下瓷绝缘子机械性能退化而导致承受较大弯、扭载荷时发生断裂事故^[4-10]。

隔离开关的分合闸是一个机械的操作运动,材料的合理选型、零件的设计与工艺保障了隔离开关的安全运行,隔离开关的操作、运行、通流、接触等都有核心关键零部件保证其可靠性,一旦核心零件损坏,必将降低或丧失隔离开关的功能。隔离开关结构分为支撑系统、导电系统、驱动系统、传动系统。每个系统都有关键的零部件实现其基本的功能:支撑系统的核心关键零件是瓷瓶;导电系统的核心关键零件是触头触指;驱动系统的核心关键零件是电机与涡轮蜗杆;传动系统的核心关键零件是弹簧与操作杆等^[11-16];本次研究的关键零部件:触指、触头、弹簧、瓷瓶、导电杆等及其组成材料。

针对环境温度变化对隔离开关关键零部件的材料力学性能和几何尺寸的影响,对隔离开关关键零部件材料在 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内所引起的机械特性变化进行低温检测试验,通过试验数据评估相关零部件在 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内是否满足设计要求。

1 高低温试验环境及参数

根据试验种类的不同,在进行隔离开关关键材

料、零部件的高低温机械特性试验时,采用高低温试验舱分为 $400\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的矩形箱和直径 $\phi 360\text{ mm}$ 、高 400 mm 的圆柱形箱,见图1。隔离开关使用工作环境温度变化较大,一般高压隔离开关工作温度在 $-50\sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间^[17-19],而该型高低温试验舱应满足 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验环境温度,温度控制精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度连续可调。

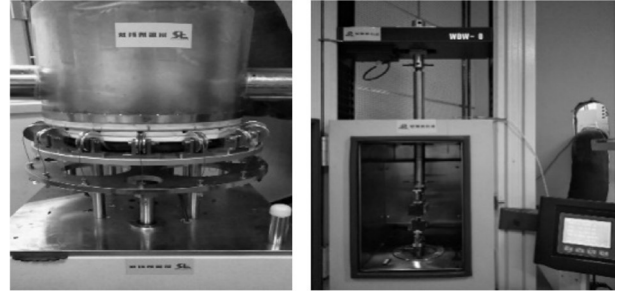


图1 高低温试验舱

Fig. 1 High and low temperature test chamber

在进行触指弹簧特性研究和触头触指镀银层耐磨性研究时,采用的是容积为 28 m^3 ,温度控制范围为 $-65\sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度控制范围为 $\leq 20\%\sim 98\%\text{RH}$ 的高低温试验平台,用于模拟隔离开关在实际运行中的环境条件。其试验流程为常温 $\rightarrow +60\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow +20\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 0\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -40\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -60\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow$ 恢复常温,温度降低梯度尽量与环境接近,减少冷热冲击。

2 隔离开关关键零部件材料特性研究

选择隔离开关最常用6005-T5、T2Y、ZL101、Q235等4种材料,其中在主导电回路中,6005-T5材料主要用于导电杆;T2Y材料主要用于静触杆,ZL101材料主要用于导电底座,Q235主要用于机械传动系统,为提高试验的效率,同时根据试验条件,制作成4种材料同尺寸的试验样品,见图2。



图2 试验用测试样品

Fig. 2 Test sample for test

通过将试验样品分别放置在 -60 、 -40 、 -20 、 0 、 20 、 40 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验舱内,静置 8 h ,通过相应的试验机及高精度传感器,分别测量4种材料在各个温度测量点的抗拉强度、端面收缩率、 0.2% 非比例延伸

强度、弹性模量和泊松比,其变化情况见图3-7。

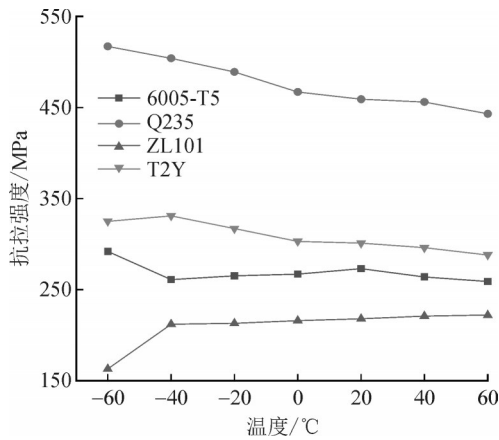


图3 4种材料的抗拉强度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of tensile strength of four materials

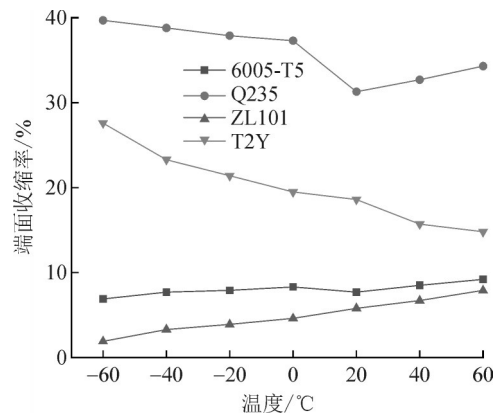


图4 4种材料的端面收缩率变化曲线

Fig. 4 Variation curve of end face shrinkage of four materials

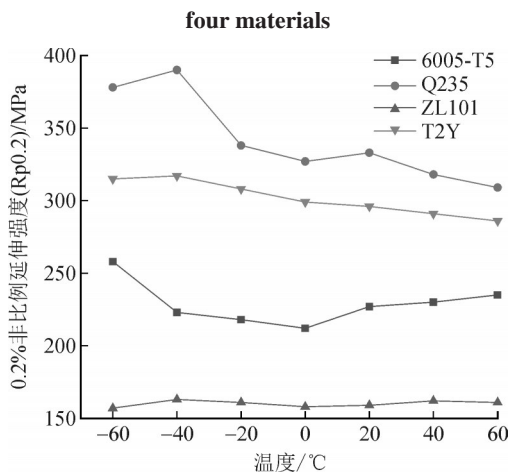


图5 4种材料0.2%非比例延伸强度的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of yield strength of four materials

由图3可知,除ZL101材料外,其余3种材料的抗拉强度均随着温度的升高而降低,其中Q235抗拉强度的变化率最大,而ZL101材料的抗拉强度随着温度的升高而缓慢升高,且温度在-40℃以上时,其抗拉强度的变化率趋近于0。

由图4可知,Q235和T2Y两种材料的端面收缩率整体趋势随着温度的升高而减小,且T2Y材料的

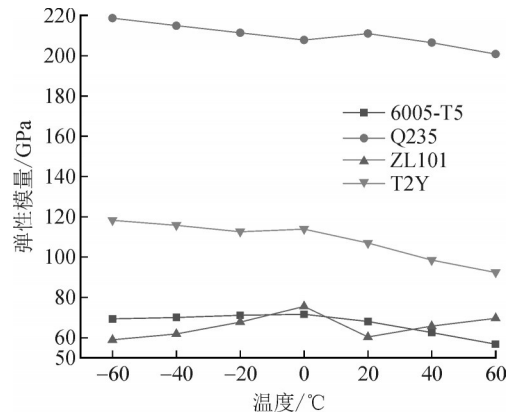


图6 4种材料弹性模量的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of elastic modulus of four materials

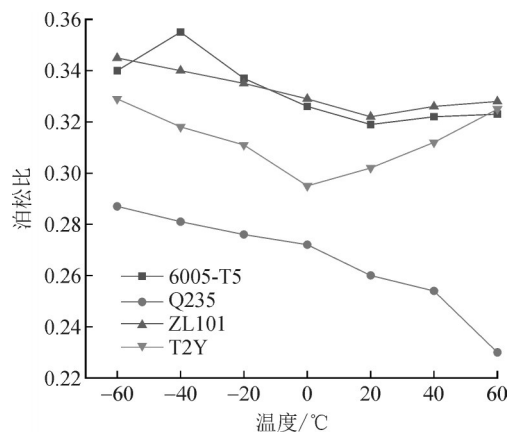


图7 4种材料泊松比的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of Poisson's ratio of four materials

端面收缩率受温度影响程度较大。6005-T5和ZL101两种材料端面收缩率随温度的升高而增大,其中ZL101材料的端面收缩率的变化率更大。

由图5可知,Q235和T2Y两种材料的0.2%非比例延伸强度随着温度的升高而降低,ZL101材料的0.2%非比例延伸强度基本无变化,6005-T5材料的0.2%非比例延伸强度随着温度的升高先降低后增大,且低温下的0.2%非比例延伸强度比高温时更大。

由图6可知,4种材料的弹性模量的整体趋势均随着温度的升高而降低,其中T2Y材料的弹性模量变化率最大。

由图7可知,除T2Y材料外,其余3种材料的泊松比均随着温度的升高而降低,其中Q235材料的泊松比变化率随温度的升高而逐渐增大,T2Y材料的泊松比随温度的升高先减小后增大,在0℃时,其泊松比最小。

通过对关键零部件的材料属性研究及相关高低温试验,基本掌握了影响隔离开关的关键零件特性。针对隔离开关野外工作环境的复杂性和多变性,在不能通过试验进行相关测试时,为隔离开关相关性能的仿真分析及出现故障时的故障排

除提供数据支持。

3 隔离开关触指弹簧特性研究

触指弹簧是隔离开关产品上保证机械特性与电气特性关键核心零部件,隔离开关触头弹簧在分合闸过程中,弹簧在每一次分合闸过程中,完成一次压缩与释放。为研究温度对其特性的影响程度,综合考虑试验条件的局限性,在高低温试验平台内设计一个能够连续旋转的触头系统,反复对触头弹簧进行压缩^[20-25]。同时,为了测量隔离开关触头触指接触压力,利用夹紧力设置工装,首先在触头触指合闸位置做出标识,调整夹紧力测试工装接触点张开尺寸与试品触头宽度数值保持等同,在合闸位置接触点张开设定尺寸,传感器可检测实际的接触压力值,通过显示器显示接触压力数值。然后,开展1 000次寿命操作,操作完成后在试验温度下检测触头接触压力变化,然后拆除在常温下检测触指弹簧刚度与高度数据。本次研究触头弹簧的动态寿命特性共在-60、-40、0、+20、+60℃5个温度点下进行试验,其中-40℃触头机械操作试验状态见图8。为保证试验的准确性,在每个温度点下,选取12组触指弹簧进行1 000次寿命操作,测量结果取平均值。



图8 触头机械操作试验状态图

Fig. 8 Contact mechanical operation test status diagram

通过5个温度测量点共计5 000次的机械寿命操作,触头接触压力变化统计见表1。12组触指高度变化平均值见表2,弹簧力值变化平均值随温度变化曲线见图9。

由表1可知,通过机械操作前后不同温度点的触头接触压力对比可知,0℃与+20℃接触压力较机械操作前降低,+60℃与-40℃接触压力较机械操作前增加,-60℃接触压力有增有减,5个温度点的接触压力变化基本在±6%之间。在两个极限温度点,高温下零件尺寸膨胀、低温下零件刚度增加,其接触压力分别正值浮动,变化数值5%左右,主要原因是隔离开关在进行分合闸操作时,合闸状态保持时

表1 机械操作前后触头接触压力变化表

Table 1 Changes in contact pressure of contacts before and after mechanical operation

温度/ ℃	机械操作前后触头接触压力变化值/N					
	A	B	C	D	E	F
-60	-1.3	0.0	0.3	2.0	-3.7	-2.0
-40	-0.7	-1.7	-3.3	-2.3	-4.0	-4.0
0	3.0	2.0	2.0	2.7	1.7	4.0
20	1.7	3.7	3.0	3.3	1.0	2.3
60	-8.7	-7.7	-10.3	-9.7	-4.7	-3.0

表2 触指高度变化平均值

Table 2 Average changes in finger height

温度/ ℃	寿命前平均高 度/mm	寿命后平均高 度/mm	高度变化平均 值/mm
-60	20.14	20.09	0.05
-40	20.18	20.13	0.05
0	20.18	20.13	0.05
20	20.13	20.12	0.01
60	20.34	20.31	0.03

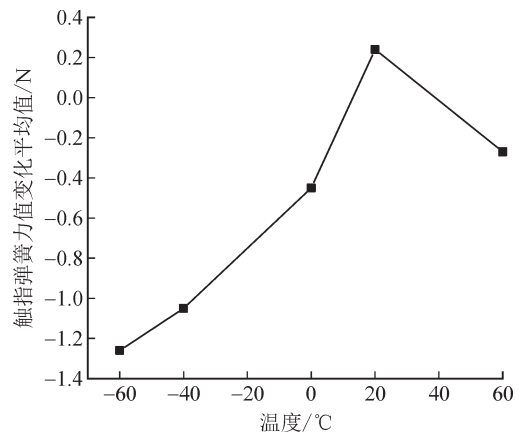


图9 触指弹簧力值变化平均值

Fig. 9 Average value of force change of finger spring

间较短,触指弹簧不容易发生金属疲劳,其弹性指标下降相对较小,进而触头触指接触压力变形较小。

由表2和图9可知,操作前后触指弹簧高度的变化值受温度影响较小,触指弹簧力值平均值随着温度的升高而增大,且弹簧力值变化率小于3%,综合考虑隔离开关的通流性能,其变化对触头触指接触电阻的影响可以忽略。

4 隔离开关触指镀银层耐磨性研究

隔离开关触头导电表面长期接触通流,并能够满足5 000次机械操作不露底,正常的机械寿命操作是在一个常温、润滑充分等十分理想的环境内完成。完全隔离了高低温、风沙的异常环境。因此,本次试验分别采用有润滑与无润滑两种检测方案

对隔离开关触指进行高低温机械特性研究。

本研究同样在高低温试验平台内进行,并在-60、-40、0、+20、+60℃5个温度点下进行试验,由于试验条件的限制,将触头触指在每个温度点分2组,分别进行涂抹低温导电脂、凡士林和无润滑处理,在试验前分别测量镀银层硬度和厚度。首先进行+60℃高温试验,+60℃温度稳定8h后进行1000次寿命试验,寿命试验后测试触指触头镀层

硬度、厚度及表面质量。试验完后更换新触头,降温至+20℃,+20℃稳定8h后进行1000次寿命试验,重复上述检测。0、-40、-60℃与上述检测流程相同。

通过对各个温度测量点隔离开关触指进行1000次机械寿命操作后,触头触指无润滑处理镀层磨损状态见图10,有润滑状态下触头触指镀层磨损状态见图11。

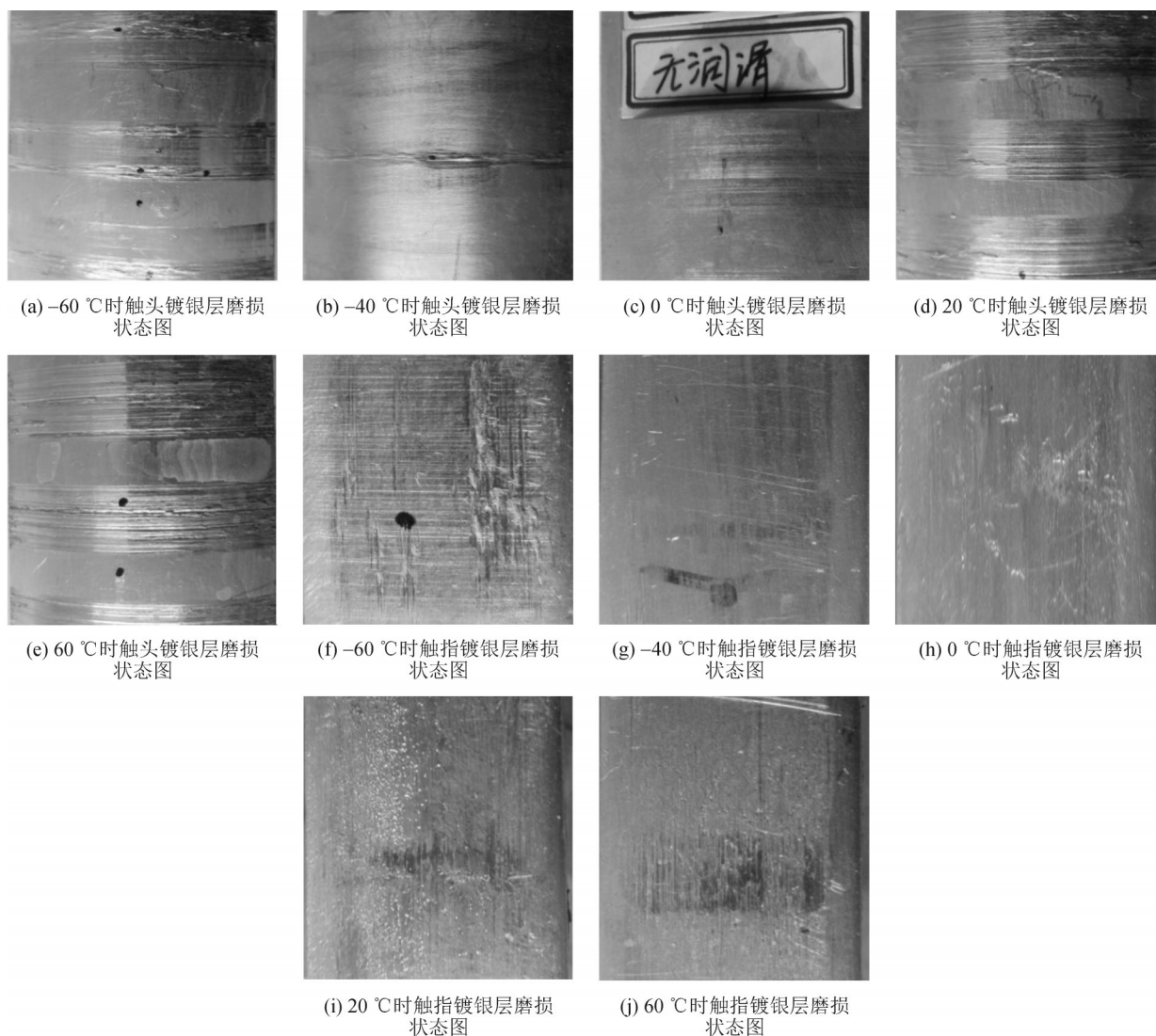


图10 无润滑状态下触头触指磨损状态图

Fig. 10 Wear state of contact finger under no lubrication state

由图10可知,触头触指在接触区域镀银层出现磨损露底现象,且在+20、+60℃镀银层接触区出现镀银层堆积,其中+60℃堆积最严重,触头镀银层外观状态质量在0℃状态下最优,+60℃状态下最差。

由图11可知,触头触指接触区域镀银层没有出现磨损露底现象,且镀银层的磨损量随温度升高而磨损量增加。

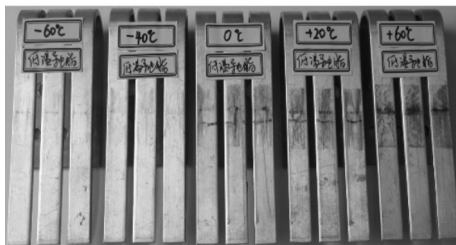
触头触指接触面作滚动或滚动滑动复合摩擦

时,产生表面物质损失。它表现为裂纹的渐渐形成和扩展、表面颗粒脱落、留下麻点和孔穴。镀银层的硬度与磨损量息息相关,随着硬度的提高,镀银层产生疲劳裂缝的危险性越小,接触疲劳强度也能相应地提高。因此,需要研究触头触指镀银层硬度随温度变化规律。通过对5个温度点下触头触指镀银层硬度和磨损量的测量,1000次操作前后镀银层硬度统计见表3,镀银层磨损量随温度的变化曲线

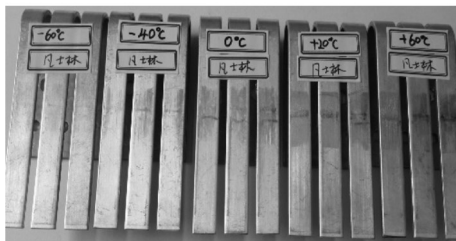
见图12、13。



(a) 触头镀银层磨损状态图



(b) 涂抹低温导电脂触指镀银层磨损状态图



(c) 涂抹凡士林触指镀银层磨损状态图

图11 有润滑状态下触头触指镀银层磨损状态图

Fig. 11 Wear state of silver coating on contact finger under lubrication

表3 触头触指镀银层硬度统计表

Table 3 Hardness statistics of silver plating layer on contact fingers

温度/ ℃	触头硬度/HV		触指硬度/HV	
	寿命前	寿命后	寿命前	寿命后
-60	124.45	126.95	124.90	125.40
-40	124.55	126.45	123.75	125.43
0	123.70	124.40	126.25	126.35
20	126.30	125.00	123.93	124.33
60	125.15	123.00	123.65	123.73

由表3可知,当温度在0℃以下时,触头在机械操作后硬度高于机械操作前,当温度在0℃以上时,触头在机械操作后硬度低于机械操作前,触指在经历机械操作之后,硬度数值均得到提升,且随着温度升高,硬度数值变化率逐渐减小。主要原因是触头镀银层内部表现为张应力,在操作过程中,受外部载荷及自身拉应力的作用,镀银层晶粒尺寸发生变化,且随着温度的升高,有利于尺寸较大的晶粒的生成,导致镀银层整体硬度降低。触指镀银层内

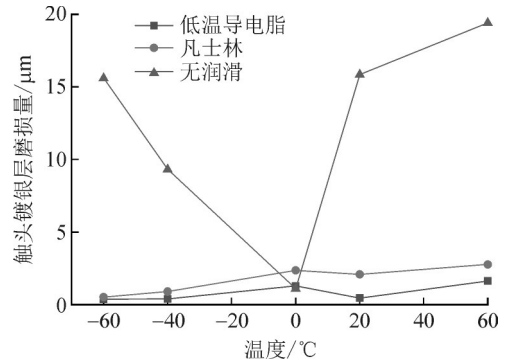


图12 触头镀银层磨损变化曲线图

Fig. 12 Wear change curve of contact silver coating

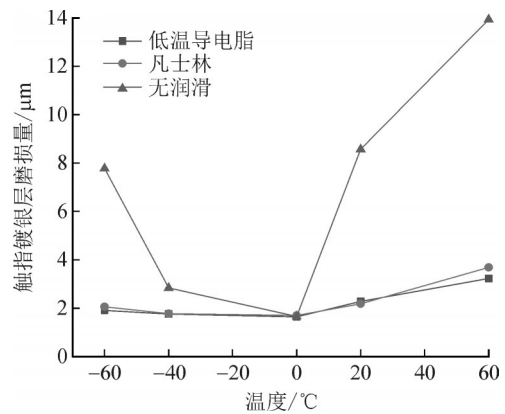


图13 触指镀银层磨损变化曲线图

Fig. 13 Wear change curve of silver plating layer on contact finger

部表现为压应力,在操作过程,受外部载荷及自身压应力的作用,使晶粒尺寸变小,进而提升了镀银层整体硬度。

由图12、13可知,在无润滑状态下,触头触指镀银层磨损量随温度的升高先减小后增大,在0℃时,触头触指磨损量最小,且高温状态下,镀银层的磨损量更大,触头镀银层最大磨损量为19.6 mm,触指镀银层最大磨损量为13.9 mm。

触头触指镀银层的磨损率随着温度的降低而降低,在复合摩擦作用下,摩擦表面在摩擦热的介入下,始终处于较高的温度,导致镀银层有蠕变软化的趋势,并在表面产生微裂纹。同时,随着温度提升,镀银层硬度降低,易发生严重粘着磨损,致使触头触指镀银层磨损量增加。在复合摩擦过程中,触头触指基体表层塑性变形,产生了许多空位和微裂纹,使表层组织变的疏松,结构发生软化。触头触指接触面表面光洁度降低,微观上出现很多微小的凸起,接触点数目和各接触点尺寸因微观的凸起降低接触点数量与接触面积,从而造成接触电阻增加,进而发生触头触指局部烧蚀的现象。

在有润滑条件下,触头触指磨损量随温度的升高而缓慢增大,且受温度影响程度较小,在试验过

程中,由于凡士林出现低温凝固与高温液化现象,涂抹凡士林与低温导电脂在低温状态下,表面质量相当,在+60℃温度点,凡士林表面质量较低温导电脂质量差,因此,触头镀银层在特殊的高低温运行条件下,根据使用环境条件在导电运动接触面涂抹凡士林或低温导电脂。

5 隔离开关支柱绝缘子特性研究

瓷绝缘子在隔离开关中起到机械支撑与绝缘隔离的功能,其中绝缘性能不受温度影响。为研究支柱绝缘子机械性能受温度的影响情况,试验选取支柱绝缘子3柱,进行高低温机械强度与渗透试验^[26-29]。

5.1 热机预应力试验

选取3个支柱绝缘子,在4个方向分别施加6.25 kN的机械负荷,和包含(+60±5)℃和(-60±5)℃两个温度水平的温度循环,在24 h温度循环重复4次,且极限温度水平分别至少保持8 h,热机试验后检查试样完好,试验状态见图14,验证了支柱绝缘子机械性能受温度影响较小。



图14 支柱绝缘子热机预应力试验状态图

Fig. 14 State diagram of post insulator thermal mechanical prestress test

5.2 水煮试验

将热机预应力试验后的3个支柱绝缘子,浸泡在浓度为0.1%的氯化钠的去离子水中保持沸腾42 h,水煮结束后,支柱绝缘子仍保留在容器内,直到水冷却到大约50℃,并在这个容器维持此温度,然后静止72 h^[30],试验结束后,检测溶液中氯化钠浓度仍为0.1%,验证了支柱绝缘子无裂纹和孔隙。

5.3 机械性能试验

选择同批次两支绝缘子在(+60±5)℃和(-60±5)℃开展24 h温度循环,两个极限温度水平保持8 h^[31-33],随后开展抗扭及抗弯试验,支柱绝缘子技术要求抗扭和抗弯性能分别为24 kN和8 kN,实际试验过程中,支柱绝缘子抗扭和抗弯性能分别达到

51.3 kN和20.6 kN时,在抗扭试验过程中,支柱下法兰处出现松动现象,试验结束,试验状态见图15。在抗弯试验过程中,支柱绝缘子发生断裂现象,试验结束,试验状态见图16。



图15 支柱绝缘子抗扭试验状态图

Fig. 15 Status diagram of torsion test for pillar insulators



图16 支柱绝缘子抗弯试验状态图

Fig. 16 Bending test status diagram of pillar insulators

支柱绝缘子经过冷热循环试验后,机械强度符合额定参数要求,且支柱绝缘子外表面没有出现明显裂纹,验证了支柱绝缘子机械性能受环境温度影响较小。

6 隔离开关机械稳定性提升措施

为满足隔离开关在高低温环境下的运行稳定性,减少故障发生的概率,针对材料、结构设计及高低温适应性试验提出以下措施,主要分为以下几个方面。

6.1 材料方面

1)环境温度 ≥ 40 ℃,相对转动部位涂低温导电脂;环境温度 ≤ 40 ℃,相对转动部位涂凡士林或低温导电脂。

2)触头润滑脂:低温触头运动部位严禁涂抹凡士林,导电运动接触面与固定面涂低温导电脂。

3)镀银层硬度 ≥ 120 HV。

4)运动面镀银层厚度:由前文可知,触头触指镀银层最大磨损量为19.6 mm,为保证触头触指回路电阻和通流能力满足要求,当触头之间润滑,镀银层厚度 ≥ 20 mm;当触头之间无润滑,镀银层厚度

≥40 mm。

6.2 结构设计方面

1)隔离开关主导电回路导电杆采用封闭式设计,避免进水、存水。

2)分、合闸操作:电动机操动机构,当其电压在下列范围内时,应保证隔离开关或附装的接地开关可靠的分闸和合闸:①电动机操动机构的电动机接线端子的电压在其额定值的85%~110%范围内时;②电动机操动机构的二次控制线圈、电磁联锁装置,当其线圈接线端子的电压在其额定值的85%~110%范围内时。

3)夏季安装与冬季机构安装调整输出角度分别为92°~95°和88°~92°。

6.3 低温适应性试验方面

1)高低温机械特性试验。试品放置在密封低温试验仓中,1℃/min升温或-1℃/min降温,达到试验温度值,恒温保持12 h。电动操作隔离开关,依照技术条件规定参数检测。

2)触头耐磨试验。试品放置在密封高低温试验仓中,1℃/min升温或-1℃/min降温,达到试验温度值,恒温保持12 h。电动操作隔离开关,额定电压下进行1 000次分合循环操作,试验后,检测镀层厚度与接触电阻变化,观察接触表面质量变化,触头触指磨损量≤2 μm。

3)机构输出角度检测试验。试品放置在密封高低温试验仓中,1℃/min升温或-1℃/min降温,达到试验温度值,恒温保持12 h。电动操作电动机构,进行20次循环操作,分别记录机构初始与终了机构角度值,换算机构角度,记录与常温的差异,机构角度误差变化≤±1°。

4)动静触头接触压力检测试验。试品放置在密封高低温试验仓中,1℃/min升温或-1℃/min降温,达到试验温度值,恒温保持12 h。电动操作隔离开关,进行5次循环操作,取下静触头,利用传感器检测动触头对静触头的压力。记录与常温的差异,触头接触压力变化≤±5%。

5)弹簧力值变化检测试验。试品放置在密封高低温试验仓中,1℃/min升温或-1℃/min降温,达到试验温度值,恒温保持12 h。检测弹簧力值变化,弹簧力值变化≤±5%。

6)高低温前后温升验证试验。经过高低温试验后的试验样机,进行温升试验,温升试验值符合GB/T 11022—2020温升规定值。

7 结论

通过对隔离开关几种关键零部件进行高低温研究可知,温度的改变会引起零部件外形尺寸变化,进而影响隔离开关的可靠性和稳定性。

1)通过对隔离开关常用的6005-T5、T2Y、ZL101和Q235四种材料关键性能指标的研究分析,掌握了其基本变化趋势,为后续隔离开关根据运行环境实施不同的运维策略奠定理论基础。优化升级及合理改进奠定了理论基础。

2)隔离开关触头触指接触压力在5个温度点的变化率基本在±6%之间,触指弹簧力值变化量随温度的升高而增大,其变化量最大值小于3%,对隔离开关通流性能影响不大。

3)通过隔离开关触指耐磨性试验研究可知,在无润滑条件下,0℃的工况条件下,触头触指镀银层的耐磨性最好,在有润滑条件下,触头触指镀银层耐磨性在低温条件下更优,同时,由于凡士林出现低温凝固与高温液化现象,低温导电脂的润滑效果更优。

4)通过对支柱绝缘子的热机预应力试验和渗透试验可知,支柱绝缘子满足高低温运行使用环境,在高低温环境下,绝缘子强度不受影响,基体没有出现明显裂纹。

参考文献:

- [1] 王雄波,李涛,蒋聪健,等.高寒动车组高压隔离开关的电气性能研究[J].机车电传动,2015(1):34-36.
WANG Xiongbo, LI Tao, JIANG Congjian, et al. Study on electrical performance of high-voltage disconnecting Switch on EMUs in extremely-cold circumstance[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(1):34-36.
- [2] 李宏楼,徐刚,姚灿江,等.高低温条件下隔离开关触头耐磨特性研究[J].高压电器,2021,57(7):46-52.
LI Honglou, XU Gang, YAO Canjiang, et al. Study on wear resistance characteristics of disconnecter contacts under high and low temperature conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7):46-52.
- [3] 纽春萍,强若辰,荣命哲,等.弹簧触指的稳态温升仿真与实验研究[J].高压电器,2015,51(3):8-14.
NIU Chunping, QIANG Ruochen, RONG Mingzhe, et al. Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3):8-14.
- [4] 王磊,严浩军,林钧,等.户外高压隔离开关电触头温升机理研究[J].广东电力,2014,27(12):92-95.

- WANG Lei, YAN Haojun, LIN Jun, et al. Research on electric contact temperature rise mechanism of outdoor high voltage disconnecting switch[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12):92-95.
- [5] 梁方建, 张道乾. GW5-110型隔离开关触头发热缺陷分析及检修处理[J]. 高压电器, 2008, 44(1):88-90.
- LIANG Fangjian, ZHANG Daoqian. Reason analysis and maintenance for overheat faults of type GW5 - 110 disconnecter contact[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1):88-90.
- [6] 时宝朋, 侯春光, 曹云东, 等. 12 kV 开关柜载流回路热分析与温度预测[J]. 电器与能效管理技术, 2023(8):68-75.
- SHI Baopeng, HOU Chunguang, CAO Yundong, et al. Thermal analysis and temperature prediction of 12 kV switchgear current - carrying loop[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(8):68-75.
- [7] 张宗伟, 卢昌宏. GW5-126型隔离开关触头烧损故障分析及对策[J]. 高压电器, 2011, 47(2):76-79.
- ZHANG Zongwei, LU Changhong. Failure analysis and countermeasures for GW5 - 126 disconnecter contacts burning[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2):76-79.
- [8] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器, 2015, 51(8):171-179.
- QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical faults analysis of high voltage disconnectors and review of diagnosis technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):171-179.
- [9] 龚泽威一, 曹占国, 周帅, 等. 基于过采样和随机森林的高压隔离开关发热故障诊断[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11):72-79.
- GONG Zewei, CAO Zhanguo, ZHOU Shuai, et al. The thermal fault detection of high voltage disconnectors based on oversampling and random forest[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11):72-79.
- [10] 徐肖庆, 白双全, 杨光彦, 等. 隔离开关发热故障分析[J]. 云南电力技术, 2017, 45(2):48-49.
- XU Xiaoqing, BAI Shuangquan, YANG Guangyan, et al. Analysis and prevention of isolating switch with fever failure [J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(2):48-49.
- [11] 吴旭涛, 马波, 李秀广, 等. 基于有限元分析的不同电压等级 GIS 隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11):160-164.
- WU Xutao, MA Bo, LI Xiuguang, et al. Simulation on temperature field of GIS disconnecter at different voltage level based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):160-164.
- [12] 徐刚, 姚灿江, 孙龙勇, 等. 高低温条件下隔离开关通流能力的研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12):57-66.
- XU Gang, YAO Canjiang, SUN Longyong, et al. Research on current carrying capacity of disconnecter at high and low temperature conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):57-66.
- [13] 胡红光. 隔离开关触头结构与发热原因分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(5):72-74.
- HU Hongguang. The structure of disconnecter contact and reason of overheat accident[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(5):72-74.
- [14] 黄明亮, 兰生. 基于 Ansys Workbench 的 110 kV 隔离开关性能优化研究[J]. 电气技术, 2017(7):5-10.
- HUANG Mingliang, LAN Sheng. Performance optimization of 110 kV disconnecter based on Ansys Workbench[J]. Electrical Engineering, 2017(7):5-10.
- [15] 高竣, 邱伟, 刘鑫, 等. 基于无功环流的变压器有载分接开关缺陷分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(6):53-58.
- GAO Jun, QIU Wei, LIU Xin, et al. Defect analysis of on-load tap - changer of transformer based on reactive power circulating current[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6):53-58.
- [16] 邱鹏锋, 周思佳, 马宏明, 等. 恶劣环境下多参量融合的断路器操动机构辅助开关研究[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6):69-77.
- QIU Pengfeng, ZHOU Sijia, MA Hongming, et al. Research on the auxiliary switch of circuit breaker operating mechanism based on multi parameter fusion in harsh environments[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6):69-77.
- [17] 王俊成, 张玉海, 蒋伟毅. GW11-550DWI 隔离开关发热缺陷分析与处理[J]. 电力安全技术, 2013, 15(9):50-52.
- WANG Juncheng, ZHANG Yuhai, JIANG Weiyi. Analysis and treatment of heating defects in GW11 - 550DWI isolation switch[J]. Electric Safety Technology, 2013, 15(9):50-52.
- [18] 王世山, 晏坚军, 牛赟, 等. 160 kN 棒形悬式瓷绝缘子应力分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(3):3-7.
- WANG Shishan, YAN Jianjun, NIU Yun, et al. Stress analysis on 160 kN porcelain rod insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(3):3-7.
- [19] 黄先进, 侯少敏, 张立伟, 等. 高速列车变流系统热设计与温升仿真研究[J]. 电源学报, 2011(4):68-72.
- HUANG Xianjin, HOU Shaomin, ZHANG Liwei, et al. Research on thermal design and temperature increase simulation of converter system for high speed EMU[J]. Journal of Power Supply, 2011(4):68-72.
- [20] 何成, 李文胜, 赵建平, 等. 高压隔离开关分合闸过程触指压力检测技术与应用[J]. 高压电器, 2017, 53(11):229-235.
- HE Cheng, LI Wensheng, ZHAO Jianping, et al. Contact-finger-pressure detection technology and application of the high voltage disconnecter during the open and close pro-

- cesses[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):229-235.
- [21] 黄 斌, 苏文宇, 徐姗姗. GW16/17-550型隔离开关缺陷原因分析及完善化改造[J]. 高压电器, 2012, 48(1):118-121.
HUANG Bin, SU Wenyu, XU Shanshan. Analysis and modification of GW16/17-550 outdoor HV disconnectors[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1):118-121.
- [22] 杜耀文, 谢 静, 刘志坚, 等. 基于深度学习的高压隔离开关分合状态检测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19):114-123.
DU Yaowen, XIE Jing, LIU Zhijian, et al. A detection algorithm for opening and closing states of high-voltage isolation switches based on deep learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19):114-123.
- [23] 程 显, 王振伟, 吕彦鹏, 等. 基于多孔隙触发的三电极场畸变开关设计与实验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24):6807-6816.
CHENG Xian, WANG Zhenwei, LYU Yanpeng, et al. Design and experiment study of three electrode field distortion switch based on multi-hole trigger[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24):6807-6816.
- [24] 郑尚直, 仲林林, 王同磊, 等. 基于改进半监督阶梯网络的有载分接开关故障诊断方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2):197-205.
ZHENG Shangzhi, ZHONG Linlin, WANG Tonglei, et al. Fault diagnosis method for OLTC based on improved semi-supervised ladder networks[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):197-205.
- [25] 刘雨芳. GW16A-550型户外高压交流隔离开关王维电场与温度场分析[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
LIU Yufang. The 3-D electric field and temperature analysis of GW16A-550 outdoors high-voltage disconnecter [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [26] 李 勇, 陈长杰, 董玉林. 基于RBF神经网络的高压隔离开关过热状态预警方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(2):67-69.
LI Yong, CHEN Changjie, DONG Yulin. Early warning method of high voltage disconnecter overheat state based on RBF neural network[J]. Automation & Instrumentation, 2016(2):67-69.
- [27] 聂进新, 赵志斌, 于守森, 等. 基于PLECS仿真的四开关 Buck-Boost 变换器参数设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(16):62-66.
NIE Jinxin, ZHAO Zhibin, YU Shoumiao, et al. Parameter design of four-switch Buck-Boost converter based on PLECS simulation[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(16):62-66.
- [28] 江岳文, 钱佳琦. 基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4):15-19.
JIANG Yuewen, QIAN Jiaqi. The optimum selection of electrical equipment types for specialized transmission project based on improved ant colony optimization algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2016, 37(4):15-19.
- [29] 邱正新, 刘本学, 张赛鹏, 等. GW46-126高压隔离开关耐温性试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3):47-52.
QIU Zhengxin, LIU Benxue, ZHANG Saipeng, et al. Experimental study on temperature resistance of GW46-126 high voltage isolation switch[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2020, 41(3):47-52.
- [30] 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.
SHENG Mingxue, WANG Zhiqing. Cause analysis and treatment of common faults of outdoor high-voltage disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10):93-96.
- [31] 彭诗怡, 刘 衍, 周涛涛, 等. 基于操作力矩的高压隔离开关机械缺陷智能诊断[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7):1356-1367.
PENG Shiyi, LIU Yan, ZHOU Taotao, et al. Intelligent diagnosis technology of mechanical defects of high voltage disconnecter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7):1356-1367.
- [32] 李 娜, 马飞越, 牛 勃, 等. 750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(6):1131-1136.
LI Na, MA Feiyue, NIU Bo, et al. Analysis of abnormal closing fault of 750 kV AIS earthing switch[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2020, 57(6):1131-1136.
- [33] 林成传, 陈建春. 三柱水平翻转式户外 330 kV 高压交流隔离开关分闸超程分析及处理[J]. 电工技术, 2019(21):89-90.
LIN Chengchuan, CHEN Jianchun. Analysis report and treatment of opening over position issue of outdoor 330 kV high voltage AC isolator with three-column horizontal flip type[J]. Electric Engineering, 2019(21):89-90.
- 黄坤鹏(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高压开关研发(E-mail:534807323@qq.com)。