第 52 卷 第 6 期：2778-2788 高电压技术 Vol.52, No.6: 2778-2788
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251653

换流变阀侧套管电连接部件静态连接特性与故障早期诱因

谢　韬，刘则希，王青于，史石峰，刘　鹏，彭宗仁
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：随着电网输送能力的提升，套管等电力设备承载着更高的电压和更大的电流，触指类电连接部件面临着更加严苛的运行挑战。为研究电连接部件故障早期诱因，以换流变阀侧套管电连接部件为研究对象，开展触指静态通流试验，并构建三维精细化模型进行电-热耦合的多物理场计算，获得触指的温度场分布。基于静态通流试验从表面形貌、微观结构和化学腐蚀三方面开展触指在变压器油环境下的故障早期诱因分析。研究结果表明，油温为 80 ℃时且单片触指通过满载电流 60 A 时，其接触区域温度可达 120.6 ℃。触指在接触初期电阻波动较大，运行 5 d 后接触电阻趋于稳定，在均值 159.71 μΩ 附近波动，波动幅值小于 1.6%。在触指与导体的接触表面观测到了微焊接现象，并通过表征接触区域微观组织结构发生的重结晶行为，论证了触点超温现象，解释了微焊接行为的发生。触指表面有明显的腐蚀痕迹，腐蚀产物以硫化物为主，且铜材料更易与油中腐蚀性硫化物反应，腐蚀产物会发生迁移并在镀银表面附着。该研究结果可为电连接部件故障早期诱因研究和表带触指的国产化设计提供理论依据。

关键词：电连接部件；过热故障；接触电阻；微焊接；金属组织结构；腐蚀性硫化物

Static Connection Characteristics and Early-stage Failure Mechanisms of Electrical Connection Components in Converter Transformer Valve-side Bushings

XIE Tao, LIU Zexi, WANG Qingyu, SHI Shifeng, LIU Peng, PENG Zongren
(State Key Laboratory of Electrical Insulated and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: With the enhancement of the power grid's transmission capacity, power devices such as bushings are subjected to higher voltages and larger currents, posing more stringent operational challenges to electrical connection components. To investigate the early causes of failures in electrical connection components, this paper focuses on the electrical connection components of the valve-side bushings in converter transformers, conducting static current-carrying tests on contactor and constructing a three-dimensional refined model for electro-thermal coupling multi-physical field calculations to obtain the temperature field distribution of the contactor. Based on static current-carrying tests, an analysis of the early failure causes of contactors in transformer oil environments is conducted from following three aspects: surface morphology, microstructure, and chemical corrosion. The research results indicate that, when the oil temperature is 80 ℃ and a single contactor carries a full-load current of 60 A, the temperature in the contact area can reach 120.6 ℃. During the initial contact phase, the resistance of the contactor exhibits significant fluctuations. After five days of operation, the contact resistance is stabilized, oscillating around a mean value of 159.71 μΩ with an amplitude of less than 1.6%. Micro-welding phenomena can be observed on the contact surface between the contactor and the conductor. Through the characterization of the recrystallization behavior in the microstructure of the contact area, the phenomenon of contact overheating is demonstrated, explaining the occurrence of micro-welding. Significant corrosion marks can be observed on the surface of the contactor, with sulfides being the primary corrosion products. Copper materials are more prone to react with corrosive sulfides in oil, leading to the migration and attachment of corrosion products on the silver-plated surface. The findings of this study can provide a theoretical basis for research on the early failure causes of electrical connection components and the domestic design of strap-type contactors.

Key words: electrical connection components; overheating faults; contact resistance; micro-welding; metal microstructure; corrosive sulfides

基金资助项目：国家自然科学基金(52477155)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52477155).

0　引言

换流变阀侧套管处于交直流混合网的“咽喉”位置，尾部位于换流变压器升高座油箱中，通过触指类插拔电连接结构实现其高压导体与换流变绕组引出线相连。触指类电连接部件长期工作在变压器油环境或 SF_6 环境中，承载着大电流、高温度、高应力作用以及油硫腐蚀化学作用，运行工况严酷。近年来，随着我国电网输送容量的提高，换流变阀侧套管载流连接结构过热失效故障时有发生，严重影响了电网的运行稳定性[1-4]。

表带触指作为特高压套管载流连接结构的关键部件，已有大量学者对不同工况下的表带触指电接触劣化问题进行了研究[5-7]。为了获得电连接结构的电热力多物理场分布规律，学者开展了实际电接触部件的电接触有限元仿真模拟[8-11]。梁睿等人建立了梅花触头三维结构力学-温度-电磁场耦合计算模型，研究了不同对接角度下触头温升特性以及正常工况下触头的电流密度、接触电阻、接触压力和温度场分布[8]。Beloufa 提出了一种力场与热场及电场间接耦合的有限元仿真方法[12]。Xiangyu Guan 等人基于 Herz 经典接触电阻理论公式，建立了气体绝缘母线插入式连接器多场耦合有限元仿真模型，获得了气体绝缘母线插入式连接器在载荷电流和环境温度循环变化作用下的力学特性和热特性[13]。为了探究电应力、化学腐蚀以及机械摩擦对电接触劣化的作用，学者们开展了大量的模拟试验[14-15]。Wanbin Ren 等人研究了不同电流负载下镀金铜电接触的磨损和微动腐蚀行为[16]。Tianhua Chen 等人探究了电流幅值对滚动摩擦接触性能的影响[17]。靳守锋等人研究了表带触指在 SF_6、N_2、氮氧混合 3 种不同气氛环境下的过热腐蚀特性[18-19]，结果表明：在掺杂氧气、纯 SF_6 条件下触指的接触电阻最大值比氮气条件增长约 14%。

上述关于电力设备电接触劣化研究多集中于 SF_6 气体环境中，换流变阀侧套管尾部电连接结构长期工作在高温变压器油环境中，变压器油中包含一些具有腐蚀性的硫化物，如二苄基二硫等。大量国内外文献指出，二苄基二硫在较高温度(>80 ℃)下具有较强的活性，可腐蚀变压器绕组并导致绝缘故障[20-21]。硫化物也会与铜基镀银触指发生油硫腐蚀反应，黄志成等人基于油浸表带触指的劣化分布特征分析了引发触指过热失效的外部原因并研究了油浸表带触指的劣化失效机制[22]。当前已有较多对不同运行条件下的电连接部件劣化机理研究，然而故障早期诱因尚不明晰，亟待开展从故障早期微观诱因到宏观表征的发展路径研究。

本文建立了换流变阀侧套管电连接部件的精细化模型并进行了电热耦合仿真分析，得到了 CUX 触指的稳态通流电热分布特性。基于自主搭建的油环境电接触劣化试验平台，开展表带触指在变压器油中的长期稳态通流试验，评估表带触指的接触性能。通过扫描电镜(scanning electron microscope，SEM)和能谱仪(energy dispersive spectroscopy，EDS)观测分析了触指的触点部分的表面形貌，观测并论证了触指与导体接触区域的微焊接行为，通过铜基体的微观结构观测表征了触点超温现象并开展变压器油对触指的腐蚀行为研究。基于对触指微焊接、触点超温与化学腐蚀现象的研究，结合实际劣化触指案例提出了故障早期诱因及劣化发展路径。本文的研究结果可为电连接部件故障早期发展诱因与表带触指国产化设计提供试验依据和理论基础。

1　静连接特性试验与仿真分析

1.1　试验平台搭建与试验条件设置

本文搭建了油中电连接部件试验平台，如图 1 所示。试验箱体布置两进两出接线柱，内部包含控制油温的加热棒和热电偶。试验用变压器油祛气后加入试验箱体内，油层上部抽真空后冲入氮气。使用毫伏表记录电极部分的电压。

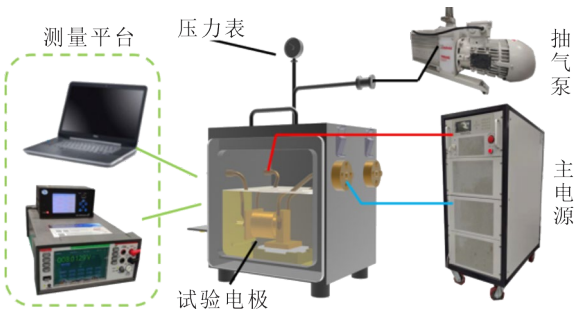


图 1　油中电连接部件试验平台

Fig.1　Test platform for oil atmosphere electrical connection components

试验电极选用圆柱电极，为缩小试验装置体积，保证电流供应并模拟触指在电力设备导体中的装配状态，尤其是导体与触指的接触面的弧度，将圆柱电极设计为由 4 个相同半径的弧面构成的柱体，每个公头弧面半径为 35 mm，模拟工程导体尺

寸。并在上下左右 4 个典型位置布置 4 对触指。

CUX 触指的指标参数为：适用压力 15 N，额定电流 60 A。为研究触指的静态通流特性，模拟较为严酷的运行工况，本试验由电流源输入 480 A 电流，布置 8 片(4 对)触指。在变压器油环境中运行，试验过程中保持油温 80 ℃。试验布置如图 2 所示。

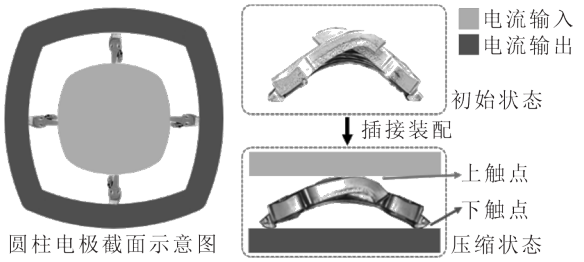


图 2 圆柱电极与触指布置

Fig.2 Arrangement of cylindrical electrode and contactors

触指的接触性能与接触压力直接相关，CUX 触指在装配过程中会因受到压力而被压缩，其接触压力与压缩量相关。在平板电极中进行试验，建立得到 CUX 触指压缩量与接触压力之间的关系，得到当 CUX 在额定 15 N/片的压力下压缩量为 2.5 mm，压缩后触指高度(上触点与下触点的垂直距离)为 5 mm。由此设计圆柱电极公头内径与母头外径的直径差为 10 mm，保证 CUX 触指具有足够且合适的接触应力。试验过程中保持公母头对心。

1.2 静态连接通流特性分析

试验过程中，通过毫伏表记录电极系统的电压，每隔 100 s 记录 1 次电压。计算得到的 CUX 触指接触电阻变化如图 3 所示。

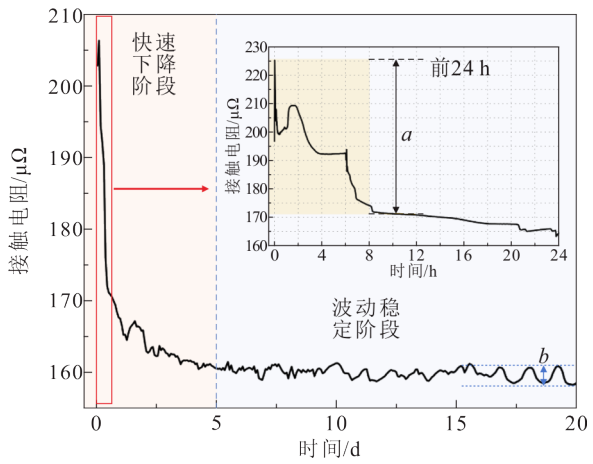


图 3 触指接触电阻变化

Fig.3 Change in contact resistance of the contactors

取 1.5 h 为 1 个时间步长，计算该时间步长内 54 个数据点的平均值，绘制 20 d 试验的电阻波动。在通流试验中，CUX 触指的接触电阻整体表现为先快速下降，之后在波动中保持相对稳定。接触电阻的变化可以被划分为 2 个阶段，即快速下降阶段、波动稳定阶段。

通流后前 5 天为快速下降阶段，在此时间段内触指的接触电阻从初始的峰值 225.36 μΩ 下降至 160.50 μΩ，接触电阻下降了 27.38%。在通流前 8 小时电阻的下降最为明显，如图 3 中电阻差值 a 所示，此阶段下降至 174.83 μΩ，下降幅值为 50.53 μΩ，下降了 22.42%。此后至第 5 天电阻在缓慢下降。接触电阻前期快速下降主要由接触应力下的表面微凸体机械形变主导，有效接触面积逐渐增大[23-24]。

随着有效接触面积扩大，微凸体的应力减小，其形变速率放缓，接触电阻逐渐稳定。第 5 天至第 20 天为波动稳定阶段，此阶段接触电阻没有明显是上升或下降，在电阻均值 159.71 μΩ 上下浮动。第 15 天到第 20 天时间内接触电阻幅值差 b 为 2.60 μΩ，此时波动百分比仅为 1.6%，接触电阻较为稳定，试验结束。

触指运行温度是目前业界关注的问题，由于触指部署空间狭窄，触点区域的温度难以直接测量，在稳态通流试验中，将 K 型热电偶黏附在公头上测量外导体的温度，波动稳定阶段外导体的平均温度为 112.4 ℃。下面本文通过有限元仿真分析触指的温度分布。

1.3 触点温度仿真分析

接触电阻是评估表带触指接触性能的关键参数。当电流流过两导体的接触面时，看似紧密相连的 2 个导体，实际发生接触的只有表面足够高度的粗糙峰。而电流从实际接触的粗糙峰流过时会发生电流收缩现象，从而形成接触电阻。

接触电阻的计算目前主要有 2 种理论计算模型，分别是基于统计学的 G-W 模型和基于分形理论的 M-B 分形接触模型。在对触指修正后的 G-W 接触电阻计算式[8]可以表示为：

$$R_c = \frac{E^* \sigma_s}{3.7 F \gamma} \tag{1}$$

式中：R_c 为接触电阻；E^*为接触材料的等效弹性模型；F 为接触压力；γ 为接触材料电导率；σ_s 为粗糙表面微凸体的高度的均方差值，取值为 0.8。

在载流连接结构模型中，导体通流产生的焦耳热是模型中主要的热源，根据电磁场中的能量守恒

和转化定律，若模型中不含电源，单位时间内从表面 A 输出的磁场能量 W 可以写作：

$$-\oint_A (\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})\cdot \mathrm{d}A = -\frac{\partial W}{\partial t} - \int_V \frac{J^2}{\gamma}\mathrm{d}V \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；J 为电流密度。右边第 1 项为体积 V 增加的电磁场能量，第 2 项为电流产生的焦耳热损耗的能量。

本文对油环境中的电连接部件进行分析，其热传导方程存在固体与流体，考虑对流换热，热传导方程可以写作：

$$\rho c_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z}\right) + Q_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

式中：ρ 为材料的密度；c_{p} 为材料的比热容；T 为温度；t 为时间；λ 为材料热导率；Q_{c} 为导体产生的焦耳热。本文选择 CUX 触指为研究对象，对载流连接结构的电热性能进行仿真分析。如图 4 所示构建 CUX 触指精细化模型，忽略触指结构上对电、热分析无影响的细小结构。

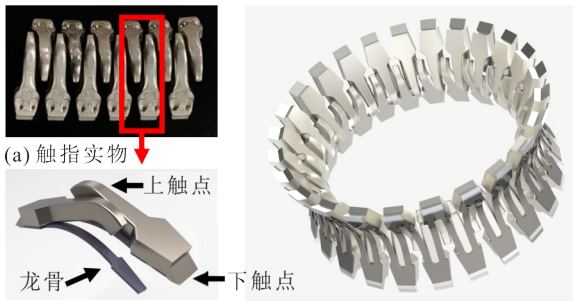


图 4　CUX 触指与其精细化建模

Fig.4　CUX conductors with its detailed model

模型中材料的关键参数如表 1 所示。其中触指与导杆的材料是铜，触指的龙骨材料是钢，环境材料是变压器油。

表 1　液、固材料参数

Table 1　Parameters of liquid and solid materials

材料	电导率/ (S·m^{-1})	密度/ (kg·m^{-3})	热导率/ (W·(m·K)$^{-1}$)	比热容/ (J·(kg·K)$^{-1}$)
铜	5.99×10^{7}	8 960	400	385
不锈钢	4.03×10^{6}	7 850	44.5	475
变压器油	1.29×10^{-11}	830.6	0.103	2 518

为每片触指施加其额定的工作电流，即每片 60 A，合计 3 000 A 电流。环境油温设置为 80 ℃。仿真得到触指的电流密度分布如图 5(a)所示。电流在触指与导体接触的部分有明显的电流收束，由于触指与母头的触点比与公头的面积大，所以触指的上触点电流密度比下触点电流密度大。通过电热耦合得到触指的温度分布如图 5(b)所示。下触点的温度与外导体的温度相近，为 113.3 ℃，与热电偶测量的结果相近。触指与内导体接触的尖端温度高于触指的基体温度，尖端的触点温度为 120.6 ℃。

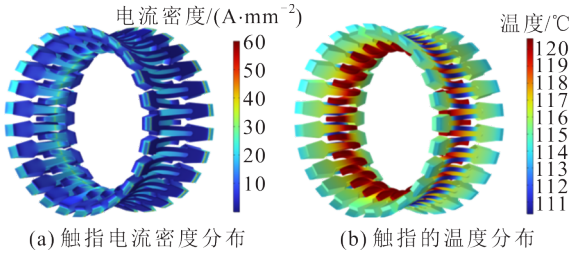


图 5　触指电流与温度场仿真

Fig.5　Simulation of contactors current and temperature

2　触点微焊接与接触超温现象研究

2.1　粘连摩擦

在 20 d 长期通流试验后，紫铜公头上和触指的上触点部分有明显的接触痕迹，擦拭表面残留的变压器油后导体的接触痕迹如图 6 所示。

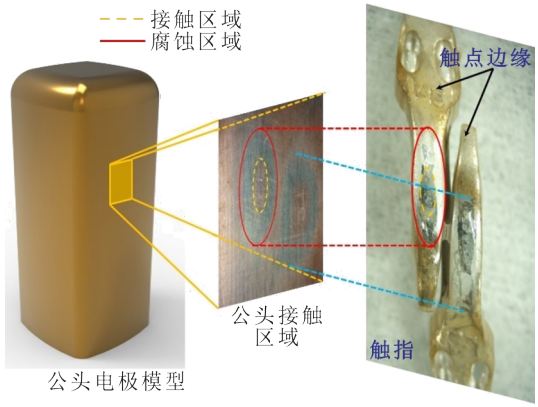


图 6　导体和触指接触痕迹

Fig.6　Contact area of the conductor and the contactors

接触区域由腐蚀区域和接触区域两部分区域构成，其中接触区域为导体与触指触点直接接触的地方，整体呈现铜本身的黄色，内部有明显的白色斑点。接触区域外到腐蚀区域边缘，铜表面颜色变暗发黑。

对接触区域的白色斑点进行观测，如图 7 所示。在导体的接触区域，铜基材料上观测到了少量的银元素分布。银元素来自触指镀银层的接触区域，导体圆周上共计 4 对触指 8 个触点均有银元素分布。银元素的残留可能来自机械磨损或触点的微焊接行为，下面对银元素来源开展进一步研究。

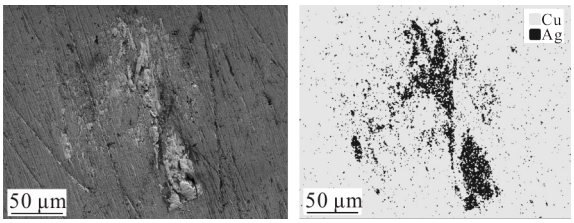
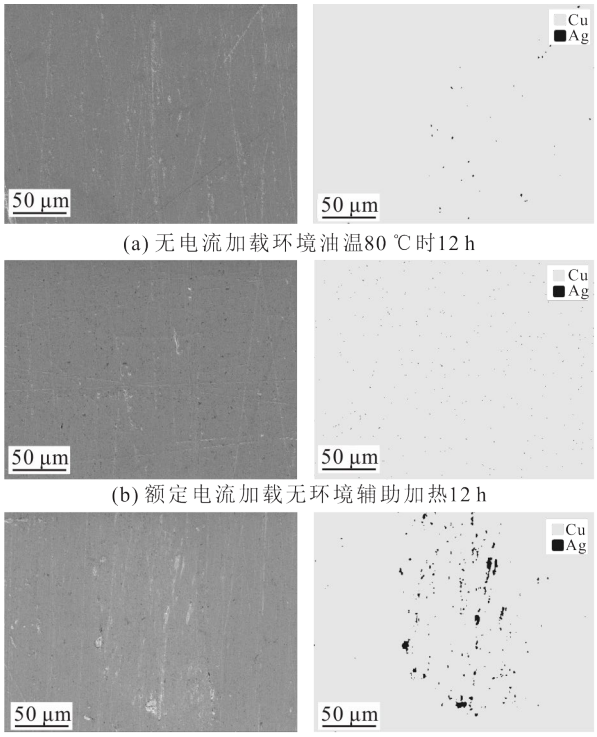


图 7 导体上接触区域 SEM 与 EDS 分析

Fig.7 SEM and EDS analysis of the contact area

开展电连接部件短期接触性能试验，选用相同的圆柱电极与触指型号分别在以下条件开展试验：1）无电流加载，环境油温 80 ℃，保持 12 h；2）额定电流加载，无环境辅助加热，保持 12 h；3）额定电流加载，环境油温 80 ℃，保持 12 h。3 种条件下试验后观测触点形貌，铜电极表面 SEM 图像与 EDS 图像如图 8 所示。



(a) 无电流加载环境油温80 ℃时12 h

(b) 额定电流加载无环境辅助加热12 h

(c) 额定电流加载环境油温80 ℃时12 h

图 8 不同条件下接触区域 SEM 与 EDS 图像

Fig.8 SEM and EDS images of contact areas under different conditions

如图 8(a)、(b)所示，在仅加热与仅通流的单一负荷情况下均未见到铜表面有银元素附着，表明得益于表面镀银材料较软且延展性较强，在插拔接触中并未产生明显的材料转移。如图 8(c)所示，在加载额定电流环境温度 80 ℃下 12 h 后接触面观测到了少量的银材料残留。综合对比图 7 与图 8，在电热联合作用下触点发生材料转移，且图 7 的触点有明显的撕裂痕迹，证明接触区域的银元素残留源于微焊接行为而非机械黏附。

微焊接的发生需要接触区域条件积累，即表面的接触压力、微触点的局部温度等达到某一状态时才会发生。微焊接的出现与接触前期发生接触面微凸体形变协同作用，维持了接触界面的低电阻状态，但同时，微焊接的出现意味着当触指接触区域发生微动磨损时，将会对触点部分造成更为严重的表面损伤加剧表面镀层的破损，成为接触劣化早期诱因之一。

2.2 触点超温现象

图 6 的温度场仿真结果表明，触指尖端的接触区域温度较高，结合触点的微焊接现象，下面讨论触指触点的超温现象。接触电阻是导致电接触的表面温升的主要原因，由于导电斑点处出现电流的收缩现象，电流密度大、发热功率高，同时触点部分空间狭窄、散热性能差，由此可知触点部分的温度较高，即为触点超温。

本文通过分析 CUX 触指接触区域的晶界，研究电连接部件触点超温现象。为获得触点截面的晶界特征，采用图 9 制样流程切割 CUX 触指，并用梯度打磨方案切削表面，切削深度＞2 mm，消除切割导致的晶界变化，然后抛光截面并使用离子抛去除表面应力。

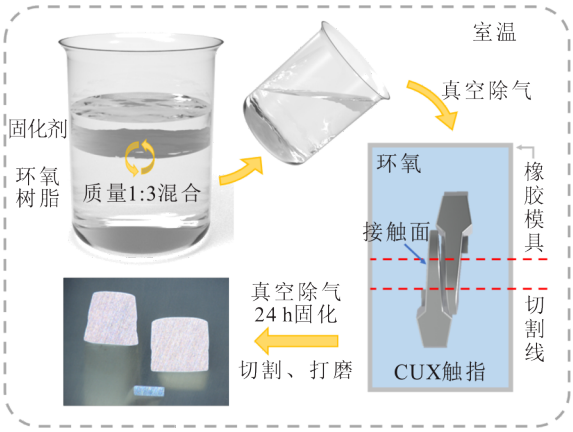


图 9 CUX 触指晶界观测样品制样流程

Fig.9 Sample preparation process for contactor crystal boundary observation samples

试样制备完成后使用电子背散射衍射技术(electron back-scattered diffraction，EBSD)观测截面的微观结构。选取靠近触点位置的区域，剖面处观测位置示意图与 all-Euler 图如图 10 所示。

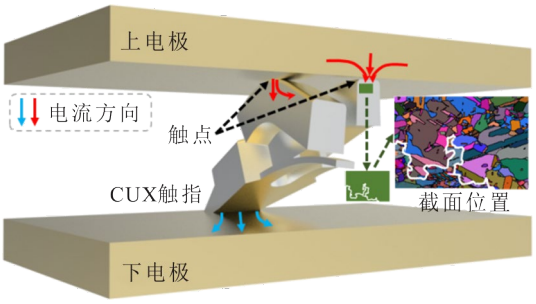


图 10　CUX 触指观测位置示意图与 all-Euler 图

Fig.10　Schematic diagram of CUX contactor observation positions and all-Euler diagram

在 all-Euler 图中可以观测到视野区域左下角，远离触点区域的晶粒明显更为细碎，小角度晶界更为密集；与之相反，靠近触点的铜晶粒更大，小角度晶界含量较少。本文中，沿晶界分布将观测区域中远离触点且晶粒细碎的区域划分为区域 1，靠近触点且晶粒较大的区域划分为区域 2。

晶界的局部取向差指晶体中不同晶粒之间的取向差异，其直接影响材料的力学、导电性能。在晶界分析中核平均取向差(kernel average misorientation，KAM)是描述材料中晶体取向差异的重要指标，对比分析全新未使用的 CUX 触指与试验后触指观测两区域的局部取向差如图 11 所示。全新触指接触区域的峰值位于 1.05°，取向差分布在 0°~4.85°内，均值为 1.184°；区域 1 峰值位于 0.95°，取向差分布在 0°~4.25°内，均值为 1.252°；区域 2 峰值位于 0.15°，取向差分布为 0°~1.45°，均值为 0.196°。全新触指与区域 1 的 KAM 分布更为相近，局部取向差分布区域与均值较高，区域 2 内应力更低，位错密度更低。

根据 KAM 图可以计算几何必须位错(geometrically necessary dislocation，GND)密度 ρ_{GND}，计算式为：

$$\rho_{\mathrm{GND}}=\frac{2\Delta\theta_i}{\mu b}=B\Delta\theta_i \tag{4}$$

式中：$\Delta\theta_i$ 为局部取向差；μ 为步长，取值 500 nm；b 为柏氏矢量(Burgers vector)的大小，与晶体的点阵常数有关；对于晶体铜，$B=2/(\mu b)$是一个常数。结合前文对 KAM 的分析与计算，得到全新触指的几何必须位错密度为 1.184B，区域 1 的几何必须位错密度为 1.252B，区域 2 的几何必须位错密度为 0.196B。对比全新触指与试验后触指的区域 1、2，区域 2 几何必须位错密度下降主要是由于接触区域

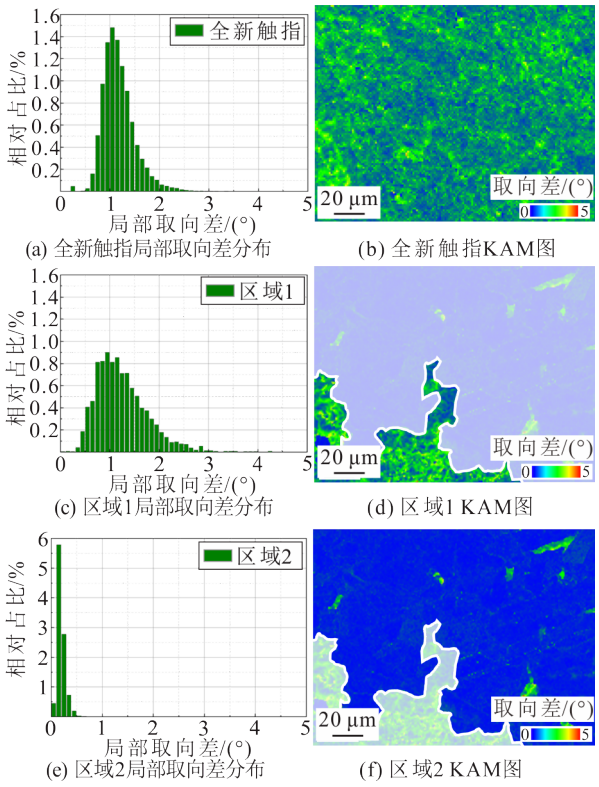


图 11　触点截面的 KAM 分布

Fig.11　KAM distribution in the cross-sectional of the contact

的热效应，导致位错重新分布与湮灭，几何必须位错密度降低。随着位错密度降低，该区域的强度降低，塑性增强，即在接触区域发生塑性形变的所需要的压力降低。

全新触指与试验后触指触点观测视野的晶粒结构如图 12 所示，在全新触指与试验后触指区域 1 中聚集了大量的变形结构和亚结构，区域 2 中以重结晶结构为主，含有少量的亚结构。触指类电连接部件的生产制造通过金属冷加工成型，在加工过程中铜金属发生塑性形变，铜晶粒间储存大量畸变能，处于不稳定状态，此时铜晶粒结构以变形结构和亚结构为主。当铜受热之后，晶粒结构发生变化，发生重结晶行为，存储的畸变能释放，组织结构从变

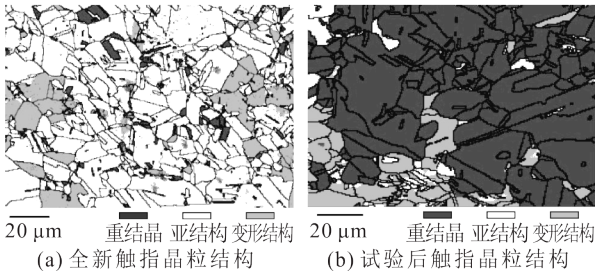


图 12　截面组织结构

Fig.12　Cross-sectional microstructure

形结构向亚结构、重结晶结构转化，晶粒合并生长，尺寸变大。晶界与位错能够阻碍位错滑移，是材料强化的关键机制，当发生重结晶晶粒生长时，晶界面积减少，位错密度降低，从而导致材料强度下降。

需要指出，重结晶温度是金属的重要特征，但是该温度并非确定的物理常量。再结晶温度受杂质及合金元素、变形程度、原始晶粒大小等变量的影响，文献[25]中指出，99.999%铜的再结晶起始温度近似值为 120 ℃，无氧铜为 200 ℃，文献[26]指出商业铜再结晶温度近似值为 180 ℃。本文观测到的触点区域再结晶现象说明触点区域接触温度至少达到了 120 ℃，该结论即印证了仿真结果的可靠性。

结合触点区域的几何必须位错密度降低和晶体发生重结晶现象，说明触点区域在运行过程中承受更高的温度，即为触点超温现象。接触区域的局部过热是导致微焊接的现象的主要原因之一。当接触区域温度过高，也可能加速变压器油的分解与老化，加速油中腐蚀性硫化物对金属结构的腐蚀。此外，由于 CUX 触指作为自力型电连接部件，正常状态下通过自身弹力保证良好的接触压力，若随着运行时间增长或发生过热现象，电连接部件铜基材料更大体积发生重结晶行为，可能整体强度降低，塑性增强，这将导致触点的接触力下降，进一步导致接触电阻升高甚至直接导致接触不良。

3 触指高温腐蚀行为分析

3.1 接触区域的腐蚀现象分析

在变压器油中存在少量的腐蚀性硫化物，在高温作用下腐蚀铜、银等活性金属。如若腐蚀发生，不仅会加速变压器油老化，腐蚀中间产物还会导致绝缘油介损增大，腐蚀产物沉积在绝缘纸上还会降低绝缘纸绝缘强度。因此有必要对变压器油中的腐蚀性硫化物进行定性与定量分析。

在本文触指运行的温度范围内，一般认为主要参与的腐蚀性硫化物是二苄基二硫醚(dibenzyl disulfide，DBDS)。在铜表面发生的主要腐蚀反应如式(5)、(6)所示。

$$\mathrm{DBDS+Cu \rightarrow DBDS\text{-}Cu} \tag{5}$$

$$\mathrm{2DBDS-Cu \rightarrow Cu_2S+DBS+BiBZ} \tag{6}$$

其中，DBS 能够再次与铜发生反应，生成 Cu_2S 和 BiBZ，反应如式(7)所示。

$$\mathrm{DBS+2Cu \rightarrow Cu_2S+BiBZ} \tag{7}$$

腐蚀反应生成的 Cu_2S 会附着在金属表面，本文中在基体温度 112.4 ℃，反应时间 20 d 后，导体接触区域如图 13 所示。

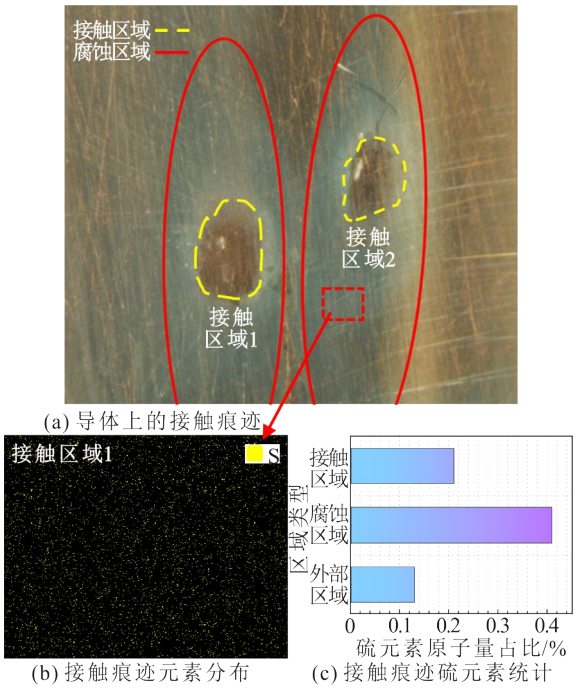


图 13 导体上接触区域与 EDS 分析

Fig.13 Contact area on conductor and EDS analysis of contacts

对接触痕迹进行表面元素分析，发现腐蚀区域的硫元素含量明显高于接触区域和外部区域，硫元素在观测区域内均匀分布。在接触区域存在由触指(镀银表面)-变压器油-电极(紫铜)构成的腐蚀原电池，由于铜的活性高于银，所以铜作为阳极失去电子，与腐蚀性硫化物发生反应，生成 Cu_2S。腐蚀产物在铜极堆积，表现为铜表面发黑。

除了导体之外，图 6 所示的触指边缘区域颜色由亮白色变为淡黄色。对该表面进行 SEM 观测，如图 14 所示。

在变黄区域的镀银表面主要有 2 种明显的腐蚀现象：区域 1 中展示的黑色区域和区域 2 所示的白色颗粒状生成物。对区域 1 进行元素分析，分析结果如图 15 所示。

该区域并非触指与导体的接触区域，镀银层并未破损，在元素分析结果中铜原子量占比达到了 18.13%，S 元素原子量占比为 4.41%。区域 1 黑色区域的分布和铜元素的分布具有一致性，同时也是硫元素聚集的区域。该黑色区域的产生可能是铜与变压器油中硫化物的腐蚀产物的附着。

对区域 2 的白色颗粒物进行 EDS 点扫描，得到

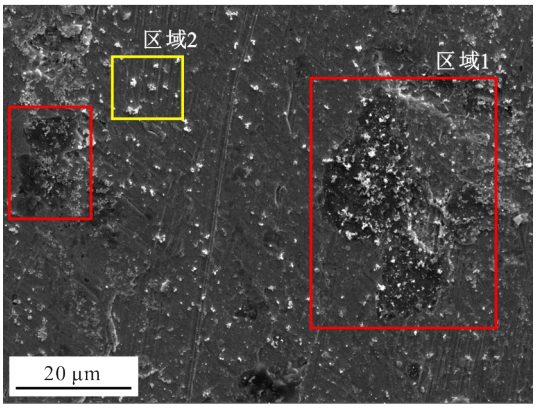


图 14　触指边缘区域 SEM 图

Fig.14　SEM image of the edge area of the contactors

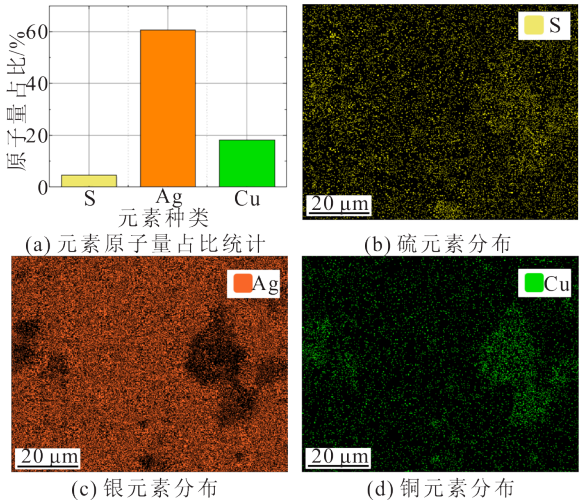


图 15　触指边缘区域 EDS 图

Fig.15　EDS image of the edge area of the contactors

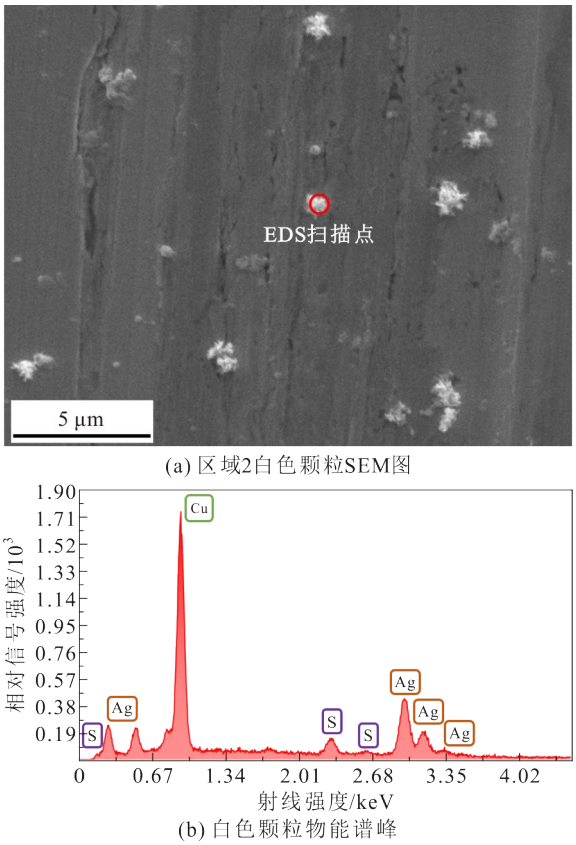


图 16　白色颗粒物 SEM 图像与元素扫描

Fig.16　SEM images of white particulate matter and elemental analysis

的能谱峰如图 16 所示。白色颗粒物的主要元素为 S、Cu 和 Ag，与铜元素的分布相关，由于该表面镀层完整，可认为白色颗粒物是腐蚀性硫化物与铜反应后的产物堆积。

变压器中腐蚀性硫化物会同时和触指试验电极系统中的铜、银反应。区域 1、2 中出现的铜腐蚀产物堆积也可能出现在绝缘纸等电力设备的其他部位，从而影响电力设备的运行可靠性。

3.2　变压器油对不同金属的腐蚀能力研究

在对触指的腐蚀分析中发现，腐蚀性硫化物的分布与铜元素的一致性更强，铜银元素在油中受腐蚀的能力存在差异。本文对 2 种金属在油中腐蚀能力进行分析。

现有的研究表明，油中的腐蚀性硫化物主要以硫醇、DBDS 等含硫化合物为主，不同温度下油中腐蚀性硫化物的活性不同，根据通流试验测量的触指基体温度为 112.4 ℃，为使油中腐蚀性硫化物与金属粉末充分反应，参考 IEC 62697 标准，在 150 ℃下进行腐蚀性硫化物总量(total corrosive sulfide，TCS)测定。

腐蚀性硫化物含量可以通过金属粉末腐蚀法进行测量，即将变压器油中的腐蚀性硫化物通过腐蚀、氧化转化为可以直接测量的硫酸根离子。测量过程主要分为金属粉末腐蚀和硫化物氧化 2 个步骤进行。

1）金属粉末的腐蚀。选择足量的金属粉末添加到已知质量 m_1 的油中，在 150 ℃环境下进行腐蚀试验，并用磁力搅拌子不断进行搅拌，反应时间为 720 min，反应结束后通过异辛烷、戊烷对金属粉末进行清洗、干燥。

2）硫化物氧化。硫化物的氧化可以通过双氧水或者硝酸钾实现，本文选择硝酸钾对金属硫化物进行氧化。在干燥后的金属粉末中加入足量的硝酸钾，在 350 ℃中反应 2 h，使得铜粉完全变黑。待冷

却后加入去离子水溶解，过滤，反复冲洗粉末 2~3 次，称量溶液的质量 m_2。

将制备好的溶液在离子色谱仪中进行检测，测量其中硫酸根的浓度 $C_{SO_4^{2-}}$，之后根据式(8)既可得到油中腐蚀性硫化物的质量分数 C_{TCS} 为：

$$C_{TCS}=\left(C_{SO_4^{2-}}m_2\right)\times\frac{32.07}{96.06}\cdot\frac{1}{m_1} \tag{8}$$

使用铜粉腐蚀法测量 TCS，无法对硫化物种类进行区分，能与金属粉末发生反应的硫化物均会被统计在内。在本文的试验布置和试验温度下，主要发生反应的硫化物为 DBDS，因此可以根据 TCS 含量计算等效 DBDS 质量分数 C_{DBDS_eq} 为：

$$C_{DBDS_eq}=C_{TCS}\cdot\frac{246.39}{2\times32.07} \tag{9}$$

本文分别使用铜粉末和银粉末对油中腐蚀性硫化物浓度进行了测量，每种粉末测量 3 组，取平均值，测量得到的结果见表 2。

表 2 腐蚀性硫化物检测结果

Table 2 Detection results of corrosive sulfide

粉末类型	C_{TCS}/(mg·kg^{-1})	C_{DBDS_eq}/(mg·kg^{-1})
铜粉末	136.10	522.83
银粉末	108.27	415.90

从表 2 中可以看出，铜、银在变压器油中均会发生腐蚀反应，但 2 种金属的腐蚀程度存在差异。受金属活性、反应速度的影响，在相同的外界条件下铜会产生更多的腐蚀产物。因此，在触指等关键部位镀银能够一定程度缓解导体在变压器油中的腐蚀劣化。

4 故障早期诱因分析

近年来，电力设备中因电连接部件接触状态劣化引发的套管过热故障屡有发生，严重威胁设备稳定运行与电网安全。图 17 展示了 1 组严重劣化的表带触指案例。

如图 17 所示，触指整体变色并局部发黑，呈现明显的外观与结构损伤，在图 17(b)和(c)中，触指接触区域磨损明显，表面镀层已破损脱落。长期高温运行环境引发了严重的材料腐蚀，设备解体后如图 17(e)所示，触指间隙及表面可见大量腐蚀产物堆积。此外，部分触指在热应力与机械应力共同作用下发生塑性形变，如图 17(d)虚线框标注所示，相邻 5 片触指呈现“倒伏”状态，完全丧失弹性恢复能力，导致接触压力显著下降甚至发生虚接。上述劣化现象共同加剧了接触电阻的上升与局部温升，形成恶性循环，最终引发设备过热故障。



(a) 严重劣化的 CUX 触指前视图 (b) 严重劣化的 CUX 触指俯视图

(c) 严重劣化CUT触指俯视图

(d) 严重劣化 CUT 触指前视图 (e) 严重劣化触指解体照片

图 17 严重劣化的表带触指

Fig.17 Severely deteriorated strap type contactors

表带触指的劣化是一个持续发展的过程，从早期微观行为到可观测的宏观表征存在一个由电、热、机械及化学因素共同作用的复杂发展过程。本文基于对微焊接、触点超温和腐蚀产物沉积现象的分析，结合电连接部件典型故障案例，得到故障早期发展过程如图 18 所示。

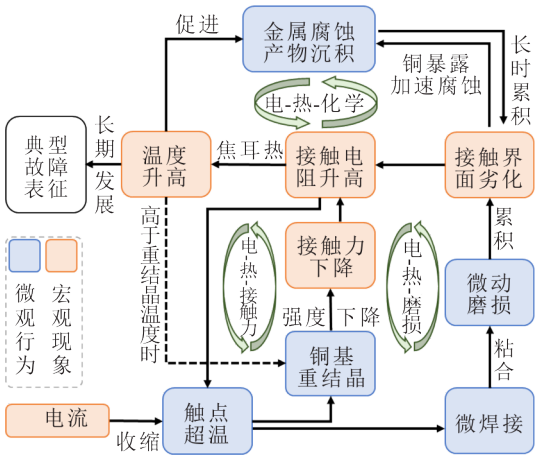


图 18 故障早期诱因演变规律

Fig.18 Evolution law of early fault inducing factors

表带触指的劣化始于接触界面的微观相互作用。在运行初期，接触压力与电流焦耳热的共同作用使触点表面微凸体发生形变，这一过程会暂时增大实际接触面积，表现为接触电阻的初期下降。若电-热-力联合作用较强或持续较久，接触点可能进一步发生微焊接，这在初期表现为接触的稳定性提

升。然而，设备运行中难以避免的机械振动与热循环会产生微动磨损，导致已形成的微焊点被剪切撕裂引发黏着磨损，如本文对触点材料转移的观测即为黏着磨损的直接表征。黏着磨损会严重破坏接触面状态，其产生的磨屑作为第三体磨料，加速镀层破损并在表面留下明显的犁沟状划痕，呈现图17(b)、(c)中的磨损劣化特性，直接导致接触面损伤，接触电阻升高。

电接触理论认为在良好的连接下，接触面的温度只比基体温度略高，但随着接触面的劣化触点区域超温现象逐渐凸显，并逐渐影响铜材料的金相变化。长期处于高温状态将诱发铜晶体发生恢复与再结晶过程，导致晶粒粗化、材料软化及强度降低，进而引起接触压力的不可逆下降。本文对触点微观结构的研究已观测到超温引起的早期金相变化迹象，可以推断随着运行时间的增加尤其是当运行温度进一步提升时，将会导致更大范围的铜基晶粒异常增长、材料强度降低，最终可能导致如图 17(d)所示的严重塑性形变，失去接触弹性。

接触压力下降直接导致接触电阻提升，而接触电阻是耦合多物理场作用形成劣化正反馈的核心参数。接触电阻提升导致产生的焦耳热增加，触点更容易发生微焊接现象，重复“微焊接-微动撕裂”过程加速磨损进程，加剧接触面劣化，形成“电-热-磨损”的劣化循环模式。同时，温升加剧促进材料的再结晶导致强度降低，接触力逐渐下降，形成“电-热-接触力”的劣化循环模式。此外，高温环境会加速油中腐蚀性硫化物对触指的腐蚀，特别是在镀层因摩擦而破损，铜基体暴露之后。接触面的腐蚀产物堆积不断恶化接触性能，提高接触电阻，构成了“电-热-化学”的劣化循环模式。

综上所述，表带触指劣化机制是以接触电阻升高为核心、微动磨损触发接触面损伤、材料强度降低与化学腐蚀加速劣化的多物理场耦合正反馈系统。早期的触点超温与微焊接经过微动磨损、材料微观结构演变、腐蚀产物沉积等因素的循环叠加与放大，接触界面状态持续劣化，最终引发电连接结构过热故障。

5　结论

1）建立三维多物理场耦合仿真分析模型，对满载时的触指进行电场、热场稳态分布研究。仿真结果表明，触指在上触点有明显的电流收缩现象，当油温在 80 ℃且单片触指通过满载电流 60 A 时，其接触区域温度可到 120.6 ℃，上触点较下触点温度高 7.3 ℃。

2）触指的接触电阻在接触初期电阻波动较大，峰值出现在通流后的 1 h 内，阻值为稳态接触电阻的 141.1%，高达 225.36 μΩ。运行前 24 h 电阻数值快速下降并在 5 天后趋于稳定，接触电阻在均值 159.71 μΩ 附近波动，波动幅值<1.6%。

3）在触指与导体的接触区域观测到了微焊接现象。EDS 结果表明，在铜电极的接触区域有银残留且不易擦拭，为微焊接的焊点。通过对触点区域微观结构的观测，发现靠近触点的地方晶粒发生重结晶现象，几何必须位错密度降低，印证了触点区域的超温现象。

4）满载通流时，导体和触指均出现了明显的腐蚀现象。导体触点区域出现了环形的腐蚀圈，触指镀银表面发黄。腐蚀产物以硫化物为主，且铜材料更易与油中腐蚀性硫化物反应。铜电极的腐蚀产物会发生迁移并在触指的镀银表面附着。

5）表带触指劣化是一个由微动磨损触发、以接触电阻升高为核心，通过材料强度降低与化学腐蚀加速的多物理场耦合正反馈过程。通过“电-热-磨损”“电-热-接触力”“电-热-化学”3 条相互强化的循环路径，接触面损伤持续累积与放大，最终导致连接失效与过热故障。

本文的研究结果可为电连接结构的故障分析与表带触指的国产化设计提供依据。触点区域的超温和微焊接现象随着运行时间增加和微动磨损的发生，可能导致接触面劣化并产生金属微粒。腐蚀产物的迁移与沉积也可能导致其他部件的电场畸变，导致过热、击穿等故障的发生。

基于本文对故障早期诱因的分析与研究，可提出对冷变形金属基体进行热处理和关键区域镀银 2 项延缓劣化的方案。通过对冷变形金属进行退火等热处理调控铜合金微观结构，可延缓或者防止再结晶行为，形成更稳定的、晶粒尺寸可控的组织。关键区域镀银依赖银优秀的延展性和导热性能减轻微动磨损，减缓腐蚀进程。对劣化演变路径的针对性阻断能延长部件使用寿命，提升运行稳定性。

参考文献　References

[1] 蓝元良，刘伟麟，兰天，等. 特高压直流输电换流阀设备数字化思考与实践[J]. 电力信息与通信技术，2024，22(8)：1-9.
LAN Yuanliang, LIU Weilin, LAN Tian, et al. Considerations and

practices of UHVDC converter's digitalization[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(8): 1-9.
[2] GAO S H, YANG L J, KE T J. Ageing characteristics and lifetime model of oil-paper insulation for oil-immersed paper condenser bushing[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 278-290.
[3] ISRAEL T, SCHLEGEL S, GROßMANN S, et al. Modelling of transient heating and softening behaviour of contact points during current pulses and short circuits[C]//Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Milwaukee, USA: IEEE, 2019: 9-18.
[4] 谢更生，史石峰，王琪林，等. ±800 kV 换流变阀侧套管温度场仿真与大电流温升试验分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：994-1002.
XIE Gengsheng, SHI Shifeng, WANG Qilin, et al. Simulation and experimental analysis of ±800 kV converter transformer valve-side bushing under high current[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 994-1002.
[5] 冯英，祁海洋，兰剑，等. 两种不同结构梅花触头的电接触性能分析[J]. 高压电器，2022，58(7)：177-182.
FENG Ying, QI Haiyang, LAN Jian, et al. Electric contact performance analysis of tulip contact with two different structures[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 177-182.
[6] 纽春萍，矫璐璐，王小华，等. 基于多场耦合的环保型 GIS 热特性分析[J]. 电工技术学报，2020，35(17)：3765-3772.
NIU Chunping, JIAO Lulu, WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3765-3772.
[7] HE W X, FENG Y, WU S L, et al. Effect of elastoplastic thermal softening on electrical contact resistance based on the dual-iterative coupling method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 11-19.
[8] 赵书涛，黄伟杰，刘会兰，等. 高压断路器触头烧蚀及电寿命评估研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(2)：489-502.
ZHAO Shutao, HUANG Weijie, LIU Huilan, et al. Review of research on contact ablation and electrical life assessment of high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 489-502.
[9] 吴广宁，史志鹏，林牧，等. 特高压直流套管电热特性及电接触系统失效机理研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4130-4145.
WU Guangning, SHI Zhipeng, LIN Mu, et al. Research review on electro-thermal coupling properties and failure mechanisms of electrical contact systems in ultra-high voltage DC bushings[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4130-4145.
[10] WANG Q Y, ZHOU X Y, YANG W, et al. Analysis of electrical contact characteristics of strap contacts used in high voltage bushings under eccentric conditions[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2024, 18(7): 334-348.
[11] WANG Y Q, LIU K, LIN M, et al. Analysis of electrical-thermal-stress characteristics for eccentric contact strip in the valve-side bushing of converter transformer[J]. High Voltage, 2025, 10(1): 106-115.
[12] BELOUFA A. Design optimization of electrical power contact using finite element method[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(1): 011401.
[13] GUAN X Y, SHU N Q, KANG B, et al. Multi-physics calculation and contact degradation mechanism evolution of GIB connector under daily cyclic loading[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3): 7401004.
[14] 田汇冬，靳守锋，龚傲，等. 换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：1146-1155.
TIAN Huidong, JIN Shoufeng, GONG Ao, et al. Analysis on the deterioration behavior of electrical contact structure used in converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1146-1155.
[15] XIE T, ZHOU X Y, JIN S F, et al. Study of microstructural evolution during operation of electrically connected components and analysis of failure mechanism[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2025, 58(5): 055502.
[16] REN W B, WANG P, SONG J, et al. Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts[J]. Tribology International, 2014, 70: 75-82.
[17] CHEN T H, SONG C F, LIU Z L, et al. Current-carrying tribological properties of an elastic roll ring under different currents[J]. Wear, 2023, 514/515: 204590.
[18] 田汇冬，靳守锋，谢韬，等. 高压套管表带触指 SF_6 气氛中高温腐蚀特性研究[J]. 高压电器，2024，60(10)：171-182，190.
TIAN Huidong, JIN Shoufeng, XIE Tao, et al. Research on high temperature corrosion characteristics of lamella of HV bushing in SF_6 atmosphere[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 171-182, 190.
[19] 靳守锋，任汀，田汇冬，等. 特高压气体绝缘输电设备载流连接结构过热腐蚀特性[J]. 电网技术，2023，47(7)：2985-2993.
JIN Shoufeng, REN Ting, TIAN Huidong, et al. Overheating corrosion characteristics of electrical connection structure of UHV gas insulated transmission apparatus[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2985-2993.
[20] 王子懿，宋睿敏，陈伟根，等. 基于互相关检测的变压器油硫化物拉曼光谱检测信号增强方法[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5208-5215.
WANG Ziyi, SONG Ruimin, CHEN Weigen, et al. Raman spectroscopy signal enhancement methods of corrosive sulfides detection in transformer oil based on cross-correlation theory[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5208-5215.
[21] KATO F, AMIMOTO T, NAGAO E, et al. Effect of DBDS concentration and heating duration on copper sulfide formation in oil-immersed transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1869-1876.
[22] 黄志成，刘凡，涂彦明，等. 特高压换流变阀侧油浸表带触指劣化失效机制[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4120-4130.
HUANG Zhicheng, LIU Fan, TU Yanming, et al. Failure mechanism of oil-immersed louver contacts in the UHV converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4120-4130.
[23] GREENWOOD J A, TRIPP J H. The elastic contact of rough spheres[J]. Journal of Applied Mechanics, 1967, 34(1): 153-159.
[24] ZHANG C, REN W B. Modeling of 3D surface morphologies for predicting the mechanical contact behaviors and associated electrical contact resistance[J]. Tribology Letters, 2021, 69(1): 20.
[25] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 2 版. 长沙：中南大学出版社，2013.
ZHENG Ziqiao. Fundamentals of materials science[M]. 2nd ed. Changsha, China: Central South University Press, 2013.
[26] HUMPHREYS F J, HATHERLY M. Recrystallization and related annealing phenomena[M]. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004.



谢　韬
1999—，男，博士生
主要从事高电压与绝缘技术、电接触特性方面的研究工作
E-mail: 1528037633@qq.com

XIE Tao
Ph.D. candidate



王青于(通信作者)
1991—，女，博士，副教授
主要从事超/特高压交、直流套管绝缘结构优化设计、电接触特性及多物理场数值计算方法等方面的研究工作
E-mail: wqy.1991624@xjtu.edu.cn

WANG Qingyu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-20　修回日期　2026-02-26　　编辑　曾文君