

变电设备机构箱外壳基体及涂层对比分析

顾温国¹, 李兴旺², 梁永纯², 吕旺燕²

(1. 广东电网有限责任公司, 广州 510060; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 针对变电设备机构箱在亚热带海洋气候条件下易生锈、腐蚀、老化等严重影响变电设备安全稳定运行的问题, 采用宏观观察、金属涂层厚度测试仪、附着力测试仪、扫描电镜、能谱、红外光谱和电化学阻抗谱等方法对国产和进口箱体外壳进行了对比分析, 提出适合南方特殊气候条件的变电设备机构箱改进建议。试验结果表明: 进口箱体外壳涂层厚度相对均匀, 且涂层附着力优于国产机构箱; 国产外壳基材选用碳钢, 进口外壳基材选用耐腐蚀性能更好的铝合金, 且进口箱体外壳基材的阻抗($Z_{\text{imported substrate}}$)是国产箱体外壳基材阻抗($Z_{\text{imported substrate}}$)的 18 倍; 国产箱体外壳涂层面漆是醇酸树脂类而进口箱体外壳涂层面漆是聚酯类面漆。
关键词: 机构箱; 涂层; 外壳基体; 腐蚀

Comparative Analysis of Mechanism Case Shell Matrix and Coating of Substation Equipment

GU Wenguo¹, LI Xingwang², LIANG Yongchun², LYU Wangyan²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510060, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The paper analyzed the rust, corrosion, aging problems of mechanism case, which were used in typical subtropical marine climate zone. Domestic and imported mechanism case shell are compared through the macroscopic observation, and other methods such as, the metal coating thickness tester, adhesion tester, scanning electron microscopy with energy dispersive spectrometer, infrared spectroscopy and electrochemical impedance spectroscopy, the recommendations for mechanism improvement is proposed that, which met the southern weather atmosphere. The results show that, the coating thickness of imported mechanism case shell is relatively uniform and the adhesion rating of import mechanism case shell coating better than domestic mechanism. The substrate of domestic mechanism case shell is made of steel casing while it is aluminum alloy for imported mechanism case shell. The impedance of aluminum alloy ($Z_{\text{imported substrate}}$) is 18 times of steel casting ($Z_{\text{imported substrate}}$). The finish on domestic mechanism case shell is alkyd resin while it is polyester-based paint on imported mechanism case shell.

Key words: mechanism case; coating; shell matrix; corrosion

0 引言

机构箱作为变电设备(变压器、开关)的重要组成部分, 其性能直接影响着设备的准确动作和运行可靠性。近年来, 电网公司发生了多起由于机构箱部件原因导致的设备事故事件^[1-3]。如 110 kV 土塘变电站 1 号主变压器有载分接开关, 因为机构箱门

密封胶垫老化, 箱内元器件严重受潮, 引起电动机轴承锈蚀、卡涩, 导致电动和手动无法操作^[4]。苏州供电局也发生多起西门子 3AT 型断路器液压机构微动开关的接点顶杆发生锈蚀引起的压力开关接点粘连故障^[5]。陕西电网 330 kV 某变电站 3332、3330、3311 开关跳闸, 2 台主变被迫停运, 造成延安地区大面积停电, 事后事故调查发现是由于 110 kV 开关机构箱进水造成加热器短路, 致使交流电压

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(K-GD2014-0532)。

Project Supported by the Key Technology Projects of China Southern Power Grid(K-GD2014-0532).

串入直流系统而引起两台主变跳闸^[6]。四川电网某 750 kV 变电站 756227 接地刀闸机构箱外壁残留水滴, 变速箱输出传动杆上有明显水渍, 顶部铸造凹槽内残留大量雨水, 通过对全站该型设备进行全面检查, 发现多台隔离开关传动杆顶部橡胶密封塞脱落或缺失, 机构箱存在渗水隐患, 通过采取临时措施(在传动杆底部打孔), 暂时缓解了隐患继续发展问题, 但未能有效地从根本上解决^[7]。某变电站 LW15-220 SF₆ 高压断路器操作机构, 由于下大雨, 操作机构箱内出现严重潮湿, 引起控制回路 220 V 直流电源负极接地^[8]。某变电站 110 kV 接地刀闸机构箱受潮进水, 10 kV 接地刀闸辅助开关接线盒受潮^[9]。

南方沿海省市地处典型的亚热带及海洋性气候, 运行环境具有高温、高湿、高盐雾的特点, 特别是台风天气, 经常发生户外电气设备机构箱进水受潮现象, 且生锈、腐蚀、老化的问题较为严重, 已经发生多起开关误动、误报信号和二次元器件损坏等事故^[10]。近年来, 广东电网开关设备发生的缺陷中近 50% 的数量与机构生锈、卡阻及二次元件老化有关。

目前对于机构箱的研究多集中在设备进水受潮和防潮等结构设计方面^[11-16], 但壳体基体及表面涂层作为机构箱防腐蚀的基础, 少有国产设备和进口设备的对比研究。设备现场运行情况表明, 国产机构箱的生锈、腐蚀、老化的问题明显较进口及合资设备更为严重。在开关设备缺陷率上, 广东电网在运的国产设备近 5 年缺陷率均保持在合资(含进口)设备的 3 倍以上。因此, 文中开展了国产机构箱和进口机构箱外壳基体和涂层的对比试验, 以期找到国产机构箱与进口机构箱的差距, 据此提出适合南方特殊气候条件的机构箱改进建议。

1 试验内容和方法

分别就现场运行 10 年以上的国产和进口箱体外壳进行宏观对比分析; 采用电镜和能谱对国产和进口箱体材质和涂层进行形貌和成分分析; 利用红外光谱确定国产和进口箱体涂层面漆类型; 采用金属涂层厚度测试仪分别对国产、进口箱体外壳四周边缘、外壳中心、外壳侧面、外壳内四边框 4 个不同区域涂层的厚度进行测试, 每个区域选择 6 个测试样点, 测试的样点区域分散均匀; 采用划格法对涂层附着力进行检测。分别从国产箱体外壳和进口箱体外壳上取尺寸 100 mm×50 mm 的样品, 然后采用

普林斯顿 V3-400 电化学工作站对基体和涂层分别进行阻抗分析, 其中测试溶液选择 3.5%NaCl 溶液, 扫描频率范围为 0.01~10⁵ Hz, 交流幅值 10 mV。

2 试验结果和讨论

2.1 机构箱外壳宏观对比分析

在广东电网运行中的同一变电站, 选取运行 2015 年的国产机构箱和进口机构箱样品, 具体见图 1、2。进口箱体外壳表面完好, 没有锈蚀, 也未出现针孔毛刺等现象, 只有局部涂层出现磨损的情况。而国产箱体外壳涂层出现很多针孔, 毛刺, 当对其进行破坏后就会暴露出锈蚀的斑点。



图 1 国产箱体外壳涂层表面

Fig. 1 Coating of domestic mechanism case shell



图 2 进口箱体外壳涂层表面

Fig. 2 Coating of imported mechanism case shell

对国产箱体外壳涂层进行破坏直至露出基材, 见图 3。可观察到涂层由 3 层组成, 分别是灰色面漆、橙色中间漆、浅灰色底漆, 其中紧挨基材的铁红色部分是基材表面的锈迹。

2.2 箱体外壳涂层对比分析

2.2.1 厚度检测

采用金属涂层厚度测试仪分别对国产、进口箱体外壳四周边缘、外壳中心、外壳侧面、外壳内四边框 4 个不同区域涂层的厚度进行测试, 每个区域选择 6 个测试样点, 测试的样点区域分散均匀。测试结果见表 1、2。

国产箱体外壳四周边缘、外壳中心、外壳侧面、

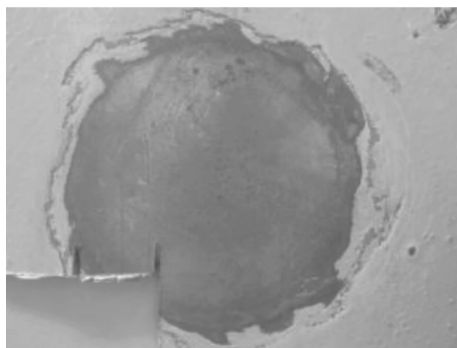


图 3 国产箱体外壳涂层

Fig. 3 Coating of domestic mechanism case shell

外壳内四边框 4 个不同的区域涂层的平均厚度各不相同,其中边缘的涂层厚度>中心的涂层厚度>侧面的涂层厚度>内四边框的涂层厚度,内四边框涂层最薄。从各区域 6 个测试样点涂层厚度的标准偏

差可以看出,外壳中心区域涂层厚度相对均匀,内四边框涂层厚度均匀性较差,且内四边框涂层相对中心区域涂层厚度的不均匀率达到了 51.2%。说明国产外壳涂层施工过程质量控制不严格,导致外壳边缘和侧面的涂层厚度明显比中心涂层厚度更低,涂层薄处易发生腐蚀。

进口箱体外壳四周边缘、外壳中心、外壳侧面、外壳内四边框 4 个不同的区域涂层的平均厚度各不相同,其中边缘的涂层厚度>侧面的涂层厚度>中心的涂层厚度>内四边框的涂层厚度,内四边框涂层最薄。从各区域 6 个测试样点涂层厚度的标准偏差可以看出,侧面和四周边缘区域涂层厚度相对均匀,内四边框和中心的涂层厚度均匀性相对较差,其中内四边框涂层相对中心部位涂层厚度的不均匀率达到了 28.9%。

表 1 国产箱体外壳不同区域点涂层的厚度

Table 1 Thickness of different areas on domestic mechanism case shell

 μm

不同部位	样点 1	样点 2	样点 3	样点 4	样点 5	样点 6	平均值	标准偏差/%	不均匀率/%
四周边缘	280	204	200	198	216	210	218.0	31.1	7.6
中心	190	192	238	210	188	190	201.3	19.7	0.0
侧面	178	156	228	124	102	142	155.0	44.3	28.9
内四边框	54	132	80	204	82	86	106.3	54.1	51.2

注: X 涂层厚度的不均匀率 $= [(\text{中心面涂层厚度的平均值} - X \text{ 涂层厚度的平均值}) / \text{中心面涂层厚度的平均值}] \times 100\%$, 例: 边缘涂层厚度的不均匀率 $= [(\text{中心面涂层厚度的平均值} - \text{边缘涂层厚度的平均值}) / \text{中心面涂层厚度的平均值}] \times 100\%$ 。

表 2 进口箱体外壳不同区域点涂层的厚度

Table 2 Thickness of different areas on imported mechanism case shell

 μm

不同部位	样点 1	样点 2	样点 3	样点 4	样点 5	样点 6	平均值	标准偏差/%	不均匀率/%
四周边缘	148	120	138	122	102	128	126.3	15.9	-27.6
中心	110	120	64	110	88	102	99.0	20.2	0.0
侧面	120	120	106	128	92	132	116.3	14.9	-17.5
内四边框	52	70	40	90	84	86	70.3	20.4	28.9

由表 1、2 可见,与国产箱体外壳涂层相比,进口箱体外壳涂层厚度相对均匀。若以中心涂层厚度为施工的标准厚度,国产箱体外壳边缘涂层偏厚,侧面和底面涂层严重偏薄,进口箱体外壳边缘和侧面涂层偏厚,底面涂层略微偏薄。

2.2.2 涂层附着力检测

国产和进口箱体外壳涂层划格法附着力测试图分别见图 4、5。国产箱体外壳涂层附着力评定等级为 5 级,面漆大范围脱落,面漆附着力较差。进口箱体外壳涂层附着力评定等级为 0 级,漆层无脱落,涂层与基材的附着力较好。

2.2.3 涂层微观分析

1) 国产箱体外壳材质及涂层分析。对国产箱体外壳中心位置的涂层截面在扫描电子显微镜下进行观

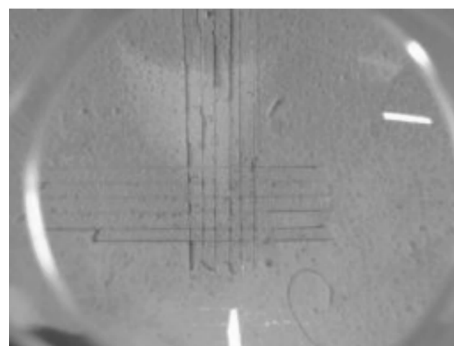


图 4 国产箱体外壳涂层划格法附着力测试

Fig. 4 Adhesion of coating in the domestic mechanism case shell

察分析,见图 6、表 3。从表 3 成分可推断国产箱体外壳基材为碳钢,涂层底漆为含 Ti 元素的有机涂层。

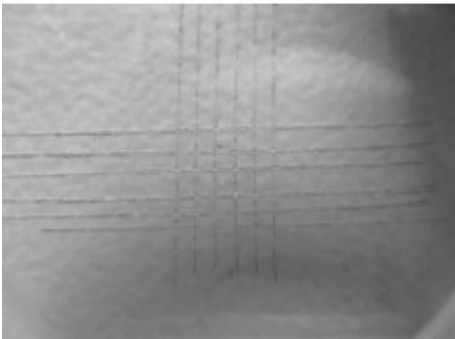


图 5 进口箱体外壳涂层划格法附着力测试

Fig. 5 Adhesion of coating in the imported mechanism case shell

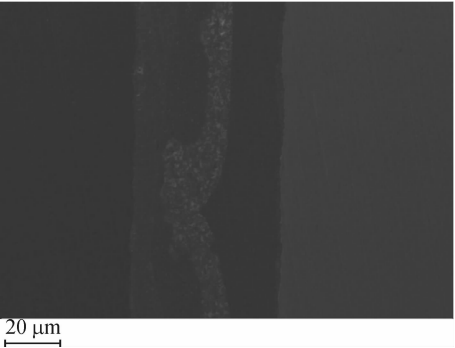


图 6 国产箱体外壳涂层截面区域取样点

Fig. 6 Sampling point of coating section of the domestic mechanism case shell

表 3 国产箱体外壳涂层截面区域能谱分析

Table 3 EDS of coating section of domestic mechanism case shell

名称	Fe	C	O	Al	Ti	Cr
箱体外壳	96.83	3.17	—	—	—	—
涂层底漆	0.86	22.40	64.17	0.77	11.25	0.56

国产箱体涂层为底、中、面 3 层体系,其中面漆涂覆了 2 道,各层涂层厚度不均匀,具体见图 7。涂层总厚度为 201.5 μm,这与金属涂层厚度测试仪的测试结果基本一致。

第 1 层涂层厚度均值为 $(63.82+61.96+67.56)/3=64.45\text{ }\mu\text{m}$;

第 2 层涂层厚度均值为 $(33.22+44.79+38.82)/3=38.94\text{ }\mu\text{m}$;

第 3 层涂层厚度均值为 $(68.68+64.20+46.65)/3=59.84\text{ }\mu\text{m}$;

第 4 层涂层厚度均值为 $(42.18+35.46+56.36)/3=44.67\text{ }\mu\text{m}$;

2)进口箱体外壳材质及涂层分析。进口箱体外壳涂层截面区域取样点电子图见图 8,成分分析见表 4。从表 4 可以判断,进口箱体外壳基材为含有少

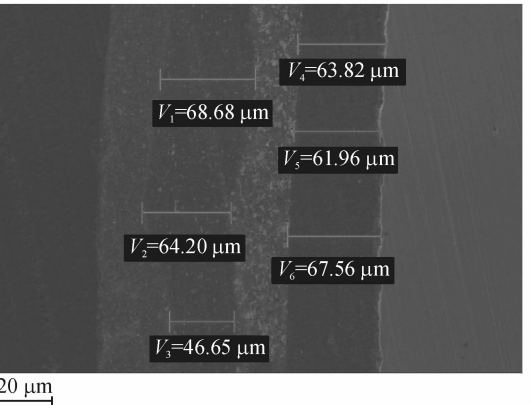
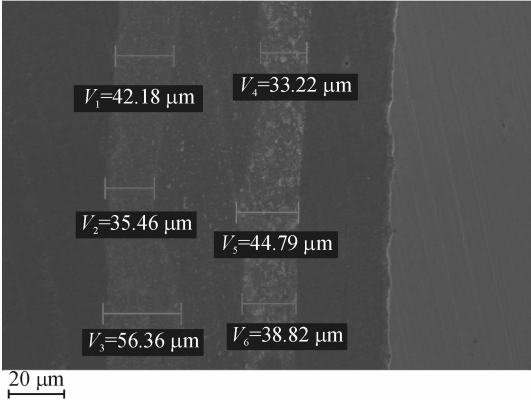


图 7 国产箱体壳涂层各层涂层厚度测试

Fig. 7 Thickness of coating of the domestic mechanism case shell

量的 Mg 元素的铝合金。进口箱体外壳涂层以 C、O 为主,主要为有机涂层,另外还有少量的 Ca、Ti,这是涂层中的无机物颜料成分。

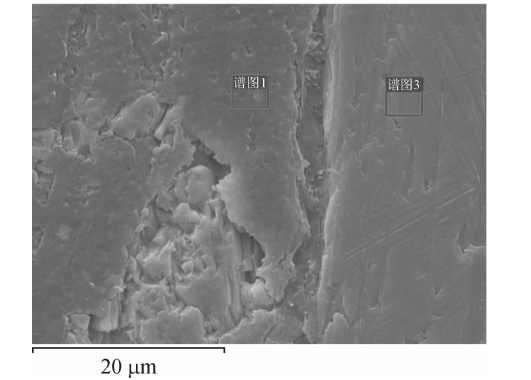


图 8 进口箱体外壳涂层截面区域取样点

Fig. 8 Sampling point of coating section of the imported mechanism case shell

表 4 进口箱体外壳涂层截面区域能谱分析

Table 4 EDS of coating section of imported mechanism case shell

名称	CK	OK	MgK	AlK	TiK	SiK	CaK
箱体外壳	3.82	8.29	2.28	85.61	—	—	—
涂层	24.63	60.18	—	0.76	7.39	0.83	6.21

进口箱体外壳涂层只有1道漆,涂层相对均匀,涂层总厚度为 $98.16\text{ }\mu\text{m}$,见图9,与涂层厚度测试结果基本一致。

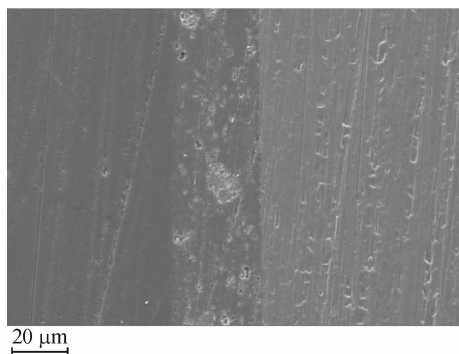


图9 进口箱体外壳涂层截面形貌

Fig. 9 Section of the coating on the imported mechanism case shell

2.2.4 涂层红外光谱分析

分别对国产、进口箱体外壳涂层进行取样,然后进行红外测试,结果见图10、11。

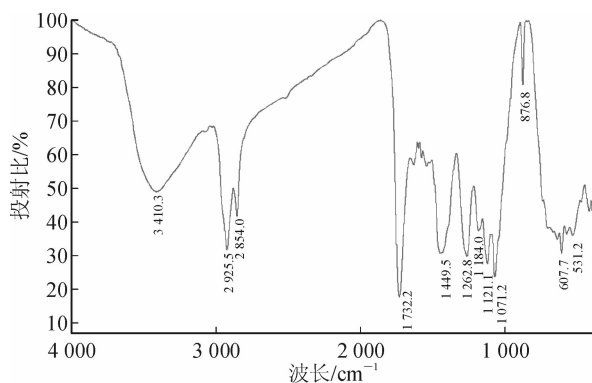


图10 国产箱体外壳涂层面漆红外图谱

Fig. 10 IR of the finish on the domestic mechanism case shell

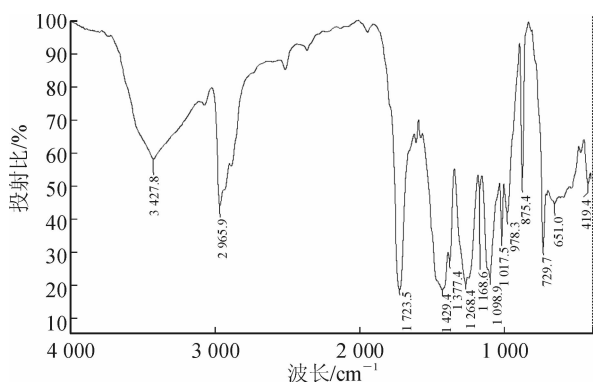


图11 进口箱体外壳涂层面漆红外图谱

Fig. 11 IR of the finish on the imported mechanism case shell

图10、11中的横坐标是指波长,不同波长处出

现了特征峰就代表物质中存在某种特征官能团。通过图谱中横坐标出现的特征峰推断物质中含有哪些特征官能团,进而推断物质的主要成分。红外图谱特征分析推测国产箱体外壳涂层面漆是醇酸树脂类面漆而进口箱体外壳涂层面漆是聚酯类面漆。

2.3 电化学阻抗分析

分别对国产箱体和进口箱体外壳基材和涂层进行电化学阻抗测试,结果见图12、13。

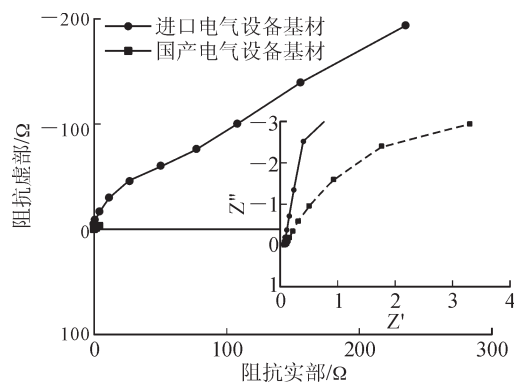


图12 国产进口箱体外壳基材阻抗分析

Fig. 12 EIS of the substrate of the domestic mechanism case shell

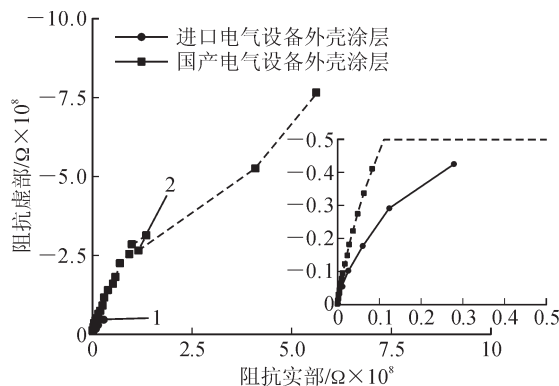


图13 国产进口箱体外壳涂层阻抗分析

Fig. 13 EIS of the substrate of the domestic mechanism case shell

图12、13横坐标是指阻抗,阻抗越大,表示材料越不容易发生电化学腐蚀,耐蚀性能越好。以图13为例,两条曲线整体上看是重合,局部放大了发现曲线2要比曲线1略大,即曲线2对应的样品要比曲线1对应的样品耐腐蚀能力略强。

根据数据拟合得知,进口基材阻抗为 $156.1\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,国产基材阻抗为 $8.6\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$,进口箱体外壳基材的阻抗是国产箱体外壳基材阻抗的18倍,进口箱体外壳基材更耐腐蚀。国产箱体外壳涂层的阻抗要比进口箱体外壳涂层的阻抗略大,说明国产外壳涂层的抗渗透能力要略强于进口外壳涂层,与国产涂层较厚有关。

3 结论

1) 国产箱体外壳中心区域涂层厚度相对均匀, 内四边框涂层厚度均匀性较差, 且内四边框涂层相对中心区域涂层厚度的不均匀率达到 51.2%。进口箱体外壳侧面和四周边缘区域涂层厚度相对均匀, 内四边框和中心的涂层厚度均匀性相对较差, 其中内四边框涂层相对中心部位涂层厚度的不均匀率达到 28.9%。与国产箱体外壳涂层相比, 进口箱体外壳涂层厚度相对均匀。

2) 国产箱体外壳涂层附着力评定等级为 5 级, 面漆大范围脱落, 面漆附着力较差。进口箱体外壳涂层附着力评定等级为 0 级, 漆层无脱落, 涂层与基材的附着力较好。

3) 国产箱体涂层为底、中、面 3 层体系, 其中面漆涂覆了 2 道, 各层涂层厚度不均匀, 涂层总厚度为 $201.5\ \mu\text{m}$; 进口箱体外壳涂层只有一道漆, 涂层相对均匀, 涂层总厚度为 $98.16\ \mu\text{m}$ 。国产箱体涂层厚度明显比进口箱体外壳涂层更厚。

4) 国产箱体外壳涂层面漆是醇酸树脂类而进口箱体外壳涂层面漆是聚酯类面漆, 在使用过程中国产箱体发现明显腐蚀问题。

5) 国产外壳基材选用的是碳钢, 而进口外壳基材选用的是铝合金, 国产箱体外壳基材耐蚀性较差。

6) 国产外壳基材表面发现铁红色锈迹, 这可能是涂料施工前基材表面处理不当, 或是表面处理后没有及时保护, 导致基材生锈, 在锈没有除尽前便开始了涂装, 导致涂层与基材结合力较差。

7) 进口基材阻抗为 $156.1\ \Omega\cdot\text{cm}^2$, 国产基材阻抗为 $8.6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$, 进口箱体外壳基材的阻抗是国产箱体外壳基材阻抗的 18 倍, 进口箱体外壳基材更耐腐蚀。国产箱体外壳涂层的阻抗要比进口箱体外壳涂层的阻抗略大, 说明国产外壳涂层的抗渗透能力要略强于进口外壳涂层, 与国产涂层较厚有关。

笔者提出一些建议:

1) 机构箱基材优先采用热浸镀锌钢、铝合金、不锈钢或其他耐蚀材料。若采用铝合金材质, 其表面宜做阳极氧化并封闭处理。腐蚀等级较高时, 应选用耐蚀铝合金。

2) 对于非不锈钢基材的机构箱, 应选择耐老化性能不低于聚酯类的面漆作为涂层。

3) 应严格控制涂层施工质量, 保证涂层的厚度及均匀性。当选用无机富锌底漆时, 金属结构件表

面上的底层涂料附着力应大于 $3\ \text{MPa}$, 划格法测定不低于 2 级; 选用其他类型底漆时, 附着力应大于 $5\ \text{MPa}$, 划格法测定不低于 1 级。

参考文献:

- [1] 徐亮, 孙瑜, 王广, 等. 变压器有载分接开关 CMA9 型电动机构故障的分析[J]. 浙江电力, 2012(3): 66-68.
XU Liang, SUN Yu, WANG Guang, et al. Analysis on fault of CMA9 motor-driven mechanism for transformer on-load tap-changer[J]. Zhejiang Electric Power, 2012(3): 66-68.
- [2] 吴慧颖, 焦丽娜. 高压断路器液压操作机构严重漏油故障的处理[J]. 电气开关, 2009(5): 16-21.
WU Huiying, JIAO Lina. Treatment of serious oil spill fault of the hydraulic operation mechanism of HV circuit breakers[J]. Electric Switchgear, 2009(5): 16-21.
- [3] 时彦文, 许海超. 户外隔离开关操动机构的故障分析[J]. 科技信息, 2010(31): 93.
SHI Yanwen, XU Haichao. Fault analysis of outdoor isolation switch operation mechanism[J]. Science and Technology Information, 2010(31): 93.
- [4] 莫登斌, 孙小梅. 变压器有载分接开关电动机构故障的现场处理[J]. 变压器, 2010, 47(2): 31-33.
MO Dengbin, SUN Xiaomei. On-site treatment of motor-driving mechanism fault of on-load tap-changer in transformer[J]. Transformer, 2010, 47(2): 31-33.
- [5] 汤峻. 3AT 型断路器液压机构压力开关故障分析[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(5): 17-18.
TANG Jun. Analysis of the malfunction about pressure switch of 3AT circuit breaker's hydraulic mechanism[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 47(2): 31-33.
- [6] 张晓东. 变电站机构箱端子箱防潮防凝露改进措施探讨[J]. 延安职业技术学院学报, 2014, 28(5): 155-156.
ZHANG Xiaodong. Improvement measures of preventing moisture and condensation of transformer substation terminal box[J]. Journal of Yan'an Vocational & Technical Institute, 2014, 28(5): 155-156.
- [7] 李小军, 师旭, 李继红. 一起隔离开关机构箱渗水原因分析与处理[J]. 陕西电力, 2013(9): 82-84.
LI Xiaojun, SHI Xu, LI Jihong. Reason analysis and treatment of water percolation phenomenon in mechanism box of high voltage disconnecter[J]. Shaanxi Electric Power, 2013(9): 82-84.
- [8] 苏东青, 张国灿, 陈志鹏. 断路器机构箱的防潮[J]. 电工技术, 2009(5): 58.
SU Dongqing, ZHANG Guocan, CHEN Zhipeng. Measures of preventing moisture of circuit breaker mechanism box[J]. Electric Engineering, 2009(5): 58.
- [9] 魏丽萍. 两起因受潮引发直流失地事件的原因分析[J]. 河南科技, 2013, 11(22): 82.

(下转第 186 页)

- [5] 焦全平. 一种用于固体绝缘环网柜的气体间隙绝缘结构研究[J]. 中国电机(技术版), 2015, 11(6): 66-68.
JIAO Quanning. Research on gas insulated structure for solid insulation switchgear[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015, 11(6): 66-68.
- [6] 何建. 中压开关设备运行中存在的主要问题分析及对策[J]. 高压电器, 2015, 41(5): 68-70.
HE Jian. Analysis and treatment for the problems in the operation of medium-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 41(5): 68-70.
- [7] 邓虎, 彭彦卿, 游一民, 等. 穿墙套管的屏蔽仿真及优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2015, 23(5): 41-45.
DENG Hu, PENG Yanqin, YOU Yimin, et al. Simulation and design optimization of the shielding wall bushing[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2015, 23(5): 41-45.
- [8] 王文峰, 张清杰, 蒋立齐. 40.5 kV 开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术, 2011, 32(2): 20-21.
WANG Wenfeng, ZHANG Qingjie, JIANG Liqi. Analysis on electric field of wall bushing for 40.5 kV switch cabinet and optimized design[J]. Huadian Technology, 2011, 32(2): 20-21.
- [9] DL/T 404—2007 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备[S]. 2007.
DL/T 404—2007 Alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV[S]. 2007.
- [10] 翟鹏飞. 12 kV 固体绝缘环网开关设备的研究与开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
ZHAI Pengfei. Research and develop on 12 kV solid insulated switchgear[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [11] 李泉, 修士新. 中压开关设备内部电场仿真分析与优化[C]//2010 输变电年会论文集. 南京: 中国电工技术学会, 2010: 78-81.
LI Quan, XIU Shixin. Simulation analysis and optimization for internal electric field of medium-voltage switchgear[C]//2010 Transmission and Distribution Conference. Nanjing: CES, 2010: 78-81.
- [12] 纪江辉, 张杰, 王小丽, 等. 中压开关设备复合绝缘及固体绝缘技术研究[J]. 电工电气, 2015(6): 23-26.
JI Jianghui, ZHANG Jie, WANG Xiaoli, et al. Research on insulation technology of medium and high voltage switchgear[J]. Electrotechnics Electric, 2015(6): 23-26.
- [13] 吐松江, 蔺红, 阿布都瓦伊提. 中压开关柜三维电场有限元分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 166-170.
TU Songjiang, LIN Hong, ABUDUWAYITI. 3D finite element analysis of cubicle metal-enclosed switchgear[J]. Computer Simulation, 2015, 32(8): 166-170.
- [14] 韩强, 司红玲, 李光肖. 中压开关设备对固体绝缘件局部放电量要求探讨[J]. 山东电力技术, 2013(6): 55-56.
HAN Qiang, SI Hongling, LI Guangxiao. Discussion on the partial discharge requirements of solid insulating parts in medium-voltage switchgear[J]. Shandong Electric Power, 2013(6): 55-56.
- [15] 贾茹. 高压套管绝缘设计与性能分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
JIA Ru. Insulation design and performance analyses of the high voltage bushing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- 韩筛根(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事配电设备研发与质量监督测试工作。

(上接第 179 页)

- WEI Liping. Causes of two DC landless events by damp[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013, 11(22): 82.
- [10] 林智敏, 黄亮, 蔡恒滨. 电气设备端子箱、机构箱防潮技术措施研究[J]. 电气制造, 2014(6): 88-89.
LIN Zhimin, HUANG Liang, CAI Hengbin. Technology of preventing rain and moisture of terminal box and mechanism box[J]. Electrical Manufacturing, 2014(6): 88-89.
- [11] 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): 57-60.
DENG Feifeng, PEI Feng, LIU Yongjun. Effect of air humidity on metal corrosion of outdoor electrical cabinets and the measure to control humidity[J]. Central China Power, 2008, 21(2): 57-60.
- [12] 羊万其. 室外端子箱凝露现象与解决方案分析[J]. 技术与市场, 2014, 21(1): 56-57.
YANG Wanqi. Gel phenomenon and solution of outdoor terminal box[J]. Technology and Market, 2014, 21(1): 56-57.
- [13] 俞赐湖. 变电设备机构箱进水的原因和对策[J]. 中国电力教育, 2008(s3): 744-745.
YU Cihu. Causes and countermeasures of water penetration of substation equipment mechanism box[J]. China Electric Power Education, 2008(s3): 744-745.
- [14] 高永鹏, 陈炜. 常见类型断路器机构箱进水问题的分析[J]. 科学之友, 2011(21): 50-51.
GAO Yongpeng, CHEN Wei. Common type of circuit breaker box body water analysis of the problem[J]. Friends of Science, 2011(21): 50-51.
- [15] 许汉荣, 刘秋泉. 防止 SW4 型断路器进水受潮的简易方法[J]. 华东电力, 1985(7): 49-50.
XU Hanrong, LIU Qiuquan. Simple method of prevent water penetration and wet of SW4 breaker[J]. Central China Power, 1985(7): 49-50.
- [16] 周欣康. SW4-110 型断路器进水受潮的原因及改进措施[J]. 高压电器, 1991, 27(2): 31-34.
ZHOU Xinkang. The reason and improvement measures for the dampness of SW4-110 type circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27(2): 31-34.
- 顾温国(1967—), 男, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。