

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.007

## 柔直电容器关键工艺缺陷对性能的影响及表征

廖梓豪<sup>1,2</sup>, 蔡玲珑<sup>1,2</sup>, 马志钦<sup>1,2</sup>, 李谦<sup>1,2</sup>, 王中奥<sup>1,2</sup>, 周丹<sup>1,2</sup>, 李中祥<sup>1,2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080;

2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080)

**摘要:**本文针对柔直电容器整机生产过程中的关键工艺缺陷,系统研究了焊接、浇注等工艺环节可能引入的缺陷类型及其对样机性能的影响,明确不同缺陷对应的特征参量。通过人为设置虚焊、尖角焊接、非真空浇注、壳体分离等典型缺陷,设计和制作了缺陷元件及试品,并提出了相应的工艺质量管控措施。基于电容量、损耗角正切、局部放电量等特征参量,结合极对壳耐压、局部放电、极间耐压及直流老化等试验方法,分析了不同缺陷对电容器性能的影响规律。研究结果表明,虚焊缺陷显著增加局部放电量,非真空浇注缺陷在交直流叠加老化试验中易引发自愈失效,而未注胶缺陷则加速电容器的劣化进程。本文提出的缺陷表征参数和试验方法为柔直电容器的工艺优化和质量提升提供了理论依据和试验方法支持。

**关键词:**柔直电容器; 工艺缺陷; 性能表征; 局部放电; 老化试验

### Influence and Characterization of Key Process Defects on Performance of VSC-HVDC Capacitors

LIAO Zihao<sup>1,2</sup>, CAI Linglong<sup>1,2</sup>, MA Zhiqin<sup>1,2</sup>, LI Qian<sup>1,2</sup>, WANG Zhongao<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Dan<sup>1,2</sup>, LI Zhongxiang<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability Enterprises, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Aiming at the key process defects in the production process of VSC-HVDC capacitors, in this paper the types of defects due to soldering and casting and their impact on the performance of the prototype are systematically studied, and the characteristic parameters corresponding to different defects are clarified. By artificially setting such typical defects as cold solder joints, sharp angle soldering, non-vacuum casting and case separation, defective components and test samples are designed and produced, and corresponding process quality control measures are proposed. Based on such characteristic parameters as capacitance, loss tangent, partial discharge and also in combination with such test methods as withstand voltage of pole to case, partial discharge, inter-pole withstand voltage, and DC aging, the influence of different defects on the performance of capacitors is analyzed. The research results show that the cold solder joints defects significantly increase the partial discharge, the non-vacuum casting defects are prone to cause self-healing failure in AC/DC superimposed aging tests, while the non-injection defects accelerate the degradation process of capacitors. The defect characterization parameters and test methods proposed in this paper provide theoretical basis and test method support for process optimization and quality improvement of VSC-HVDC capacitors.

**Keywords:** VSC-HVDC capacitors; process defects; performance characterization; partial discharge; aging test

收稿日期:2025-07-07

基金项目:南方电网公司科技项目(GDKJXM20222647(030000KC22120031))。

## 0 引言

柔直电容器是柔直换流阀功率模块的重要组成部分,与 IGBT 器件共同控制换流器交流侧和直流侧的能量交换,同时抑制功率传输在换流器内部引起的电压波动,稳定电压和电流,为 IGBT 的稳定工作提供安全保障<sup>[1-3]</sup>。

柔直电容器主要由电容器元件、汇流铜排、外壳、套管、出线端子、注胶树脂等部件组成,外壳上装设压力开关和压力释放阀<sup>[2-3]</sup>。电容器元件是由两层金属化膜卷绕而成的圆柱体,金属化膜即在聚丙烯薄膜表面蒸镀一层导电金属层作为电极,在其两端面喷涂金属,将极板引出作为电极<sup>[4-5]</sup>。金属化膜电容器具有绝缘电阻高、耐热性好、体积小、寿命长、自愈性和低电感特性等优点<sup>[6-13]</sup>,是柔直换流阀性能的关键部件,其质量关乎使用寿命,其可靠运行关乎阀厅的安全<sup>[14-18]</sup>。

受电-热联合应力的长期作用,柔直电容器在运行过程中不可避免地会出现性能劣化<sup>[19-24]</sup>,目前行业上缺乏电容器运行后性能优劣的评价方法,且工艺缺陷对产品造成的性能影响不明晰。因此,通过研究电容器整机外特性变化以反映其结构与性能缺陷,对提高柔直系统整体可靠性具有重要意义<sup>[21-22]</sup>。

本文通过对柔直电容器样机生产制造过程中普遍会发生的缺陷进行人为设置,开展不同缺陷类型试品的研究对比试验,验证缺陷对样机质量性能水平及寿命水平的影响程度,获得了表征缺陷元件及电容器性能参数的数据,进而通过分析特征参量识别缺陷类型。

## 1 样机缺陷类型

### 1.1 焊接缺陷

焊接缺陷主要包括虚焊、过度焊接和焊接尖角缺陷。

虚焊缺陷的来源主要包括:元件端面喷金层和铜联接片表面氧化后,无法与焊锡充分结合,造成虚焊;电烙铁温度不够,导致焊锡不能充分熔化、填充,造成虚焊<sup>[23]</sup>。

试验时焊接缺陷设置方法有:

1)元件端面与引线虚焊:在元件端面焊接引线时,电烙铁温度设置为 250℃,焊接时间不变,使焊点与喷金层结合力下降,如图 1(a)。

2)元件端面引线与联接片虚焊:在元件与联接片焊接时,电烙铁温度设置为 250℃,同时减少焊锡丝,将该处焊接设置为虚焊,如图 1(b)。

3)出线导杆虚焊:其中一个导杆与出线焊接时,电烙铁温度设置为 250℃,同时减少焊锡丝,将该处焊接设置为虚焊,如图 1(c)。

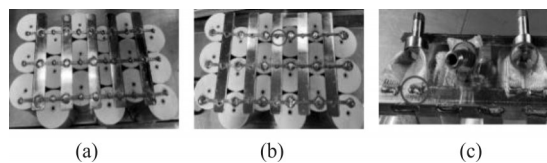


图1 虚焊缺陷各类型

Fig. 1 Various types of cold solder joint defects

元件端面过度焊接和焊接尖角缺陷主要发生源为操作工的焊接技能不够熟练,对焊锡丝的用量、焊接时间、焊接手法等工艺把控不到位,造成过度焊接或焊点处有尖角。加工试品时,通过将焊接时长延长 1 倍和提高烙铁温度来设置过度焊接缺陷,如图 2 所示。在元件端面与引线间、引线与联接片间、引线导杆焊接处焊接时故意堆锡形成尖角,来设置焊接尖角缺陷,如图 3 所示。图 3(a)为元件端面与引线间缺陷设置,图 3(b)为引线与联接片间缺陷设置,图 3(c)为引线导杆焊接处缺陷设置。

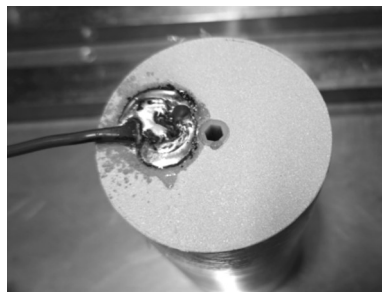


图2 元件端面过度焊接缺陷

Fig. 2 Excessive soldering defect on end surface of component

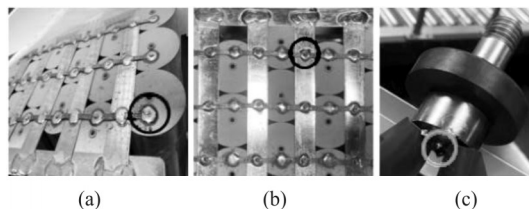


图3 元件焊接尖角缺陷

Fig. 3 Solder sharp angle defect of component

### 1.2 浇注缺陷

浇注缺陷包括非真空浇注(存在气泡)缺陷、注胶未完全缺陷、壳体分离缺陷和喷金端部暴露缺陷。

非真空浇注缺陷的主要原因为机器故障或操作工的参数设置错误,导致抽真空时间过短、真空度不够等,使得浇注的胶体内部存在大量气泡,如图 4 所示。试验时,将元件装配、焊盖后,在常温常压下,人工按比例混料,搅拌均匀后直接注入产品

中,以设置非真空浇注缺陷。



图4 非真空浇注(存在气泡)缺陷  
Fig. 4 Non-vacuum casting (air bubbles) defect

样机高、低压电极端部注胶未完全缺陷是因为操作工参数设置失误或机器故障,导致电容器的浇注胶量低于实际需求值,电极未被胶覆盖,暴露在空气中。试验时制作小样机,小样机胶量计算时将胶面高度设置在露出高、低压电极的位置,注胶时注意控制胶量,确保胶面符合要求,由此设置注胶未完全缺陷。

壳体分离缺陷来源于胶粘黏度不够、外壳内壁光滑,使得胶与外壳的结合度不够。产品注胶结束72 h且胶体固化后,将氮气从注胶口通入产品内,氮气压力控制在0.4~0.5 MPa之间,使外壳鼓起约5 mm(泄压后不回弹),与器身出现空壳,由此设计壳体分离缺陷。

喷金端部暴露(不密封状态影响)缺陷源于操作工参数设置失误或机器故障,导致电容器的浇注胶量低于实际需求值,喷金层未被胶覆盖,暴露在空气中。设置缺陷时,制作元件试品,元件试品两端焊接4 mm<sup>2</sup>导线作为电极引出线,元件试品外面包绝缘材料,将元件固定立放在马口铁外壳中,再进行注胶,胶面低于元件上端面20 mm,如图5所示。



图5 喷金端部暴露缺陷  
Fig. 5 Exposed defect at the metallization end

### 1.3 运行可靠性缺陷

运行可靠性缺陷包括套管密封不良或元件试品不封盖导致电容器受潮、压力开关保护性能缺陷和故障单元缺陷<sup>[25-26]</sup>。

套管密封不良导致电容器受潮主要因为电容器装配时,套管内漏放密封垫圈、密封垫圈尺寸不配套、螺母未扭紧,导致套管处密封不良,如图6所

示。该缺陷设置方法为制作小样机,小样机装配时将其中一个套管与盖之间的密封圈取消,且紧固螺母无须扭紧,注胶后在85℃、85%湿度环境下放置96 h后,进行直流耐久试验。



图6 套管密封不良导致电容器受潮缺陷  
Fig. 6 Damp defect of capacitors due to weak sealing of bushing

元件试品不封盖导致电容器受潮来源于外壳焊缝处有缝隙,导致电容器的密封性不良,如图7所示。元件试品不封盖,注胶后,在湿度80%、温度85℃环境下放置96 h,由此设置该缺陷。



图7 元件试品不封盖导致电容器受潮缺陷  
Fig. 7 Damp defect of capacitors due to uncovering of the component sample

故障元件缺陷来源于电容器中的某个元件本身存在材质缺陷,导致电容器在运行时,该处成为电气薄弱点。缺陷设置方法为内部设置一个预短路故障元件,如图8所示。

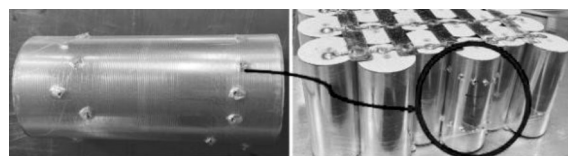


图8 故障单元缺陷  
Fig. 8 Faulty unit defect

## 2 试验方法

### 2.1 试验样机

设置13组电容器试验样机,其中包含1组对照组和12组缺陷组。试验样机概况见表1,缺陷类型包括焊接缺陷、浇注缺陷和运行可靠性缺陷。对

试验样机进行极对壳耐压试验、极对壳局部放电试验、极间耐压试验、直流老化和交直流叠加老化试验,探究可表征电容器缺陷参数数据。

表 1 电容器样机试品概况  
Table 1 General condition of capacitor sample

| 序号 | 样机类型                |
|----|---------------------|
| 1  | 对照组                 |
| 2  | 元件端面虚焊              |
| 3  | 元件端面引线与联接片虚焊        |
| 4  | 出线导杆焊接虚焊            |
| 5  | 非真空浇注(存在气泡)         |
| 6  | 高、低压电极端部未灌封完全       |
| 7  | 壳体分离                |
| 8  | 套管密封不良导致电容器受潮       |
| 9  | 元件端面与联接片间,焊接时堆锡形成尖角 |
| 10 | 联接片间焊接处尖端,焊接时堆锡形成尖角 |
| 11 | 导杆焊接时堆锡形成尖角         |
| 12 | 内部设置一个短路故障元件        |
| 13 | 内部设置一个短路故障元件,不注胶    |

2.2 极对壳耐压试验

对试验样机进行如图 9 所示极对壳耐压试验。试验样机端子与外壳间施加工频电压 5 kV,持续 60 s,试验过程中观察试品是否有闪络、击穿或内响现象。

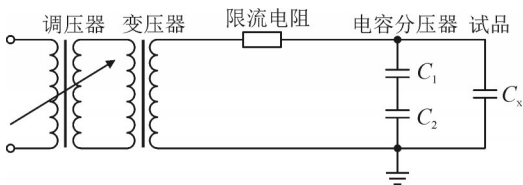


图 9 电容器样机试品端子与外壳间耐电压试验原理图  
Fig. 9 Schematic diagram of the withstand voltage test between terminal of capacitor prototype and case

2.3 极对壳局部放电试验

对试验样机进行如图 10 所示极对壳局部放电试验。试验样机端子与外壳间施加工频电压 5 kV,持续 60 s,然后将电压降至 3 kV,再持续 60 s。采用电测法分别测量上述两个电压等级耐压过程中试品端子与外壳间局部放电量<sup>[26-27]</sup>。局部放电测试见图 11。

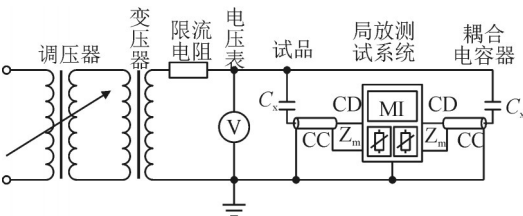


图 10 电容器样机试品端子与外壳间局部放电试验原理图  
Fig. 10 Schematic diagram of partial discharge test between terminal of capacitor prototype and case

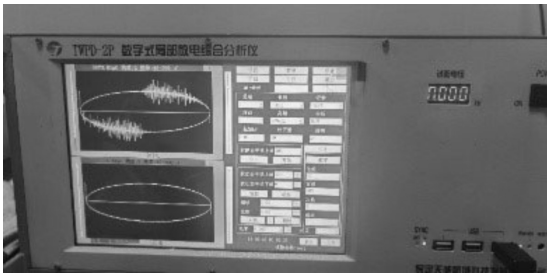


图 11 局部放电测试  
Fig. 11 Partial discharge measurement

2.4 极间耐压试验

对试验样机进行如图 12 所示极间耐压试验,试验样机端子间(极间)施加直流电压  $1.5U_{NDC} = 4.2 \text{ kV}$ ,持续 60 s,试验过程中观察样机是否有闪络、击穿或内响现象。试验前后用 IM3570 型高精度数字电桥测试试品电容( $C$ )和损耗角正切( $\tan\delta$ )。

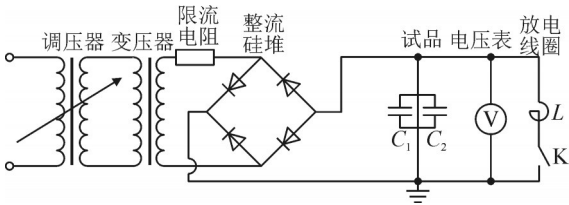


图 12 电容器样机试品端子间(极间)耐电压试验原理图  
Fig. 12 Schematic diagram of withstanding voltage test between terminals (inter-electrode) of capacitor sample

2.5 直流老化试验

将对照组和套管密封不良导致电容器受潮的缺陷组并联接线,参考 GB/T 17702—2021 标准进行试验样机的直流耐久性试验,具体步骤如下<sup>[28-32]</sup>:

- 1)样机在不低于 10℃ 的室温下静止空气中施加  $1.1U_{NDC}$  的直流电压 16 h;
- 2)在不通电的情况下,将样机置于  $(30\pm 2)^\circ\text{C}$  的烘箱中 12 h 达到指定温度;
- 3)对样机端子间施加  $1.1U_{NDC}=3.08 \text{ kV}$  的直流电压 5 min 后,测量初始  $C$  及  $\tan\delta$ ;
- 4)将样机放入烘箱,烘箱温度保持  $(70\pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- 5)样机通体达到试验温度后,施加  $1.4U_{NDC}=3.92 \text{ kV}$  直流试验电压,持续 250 h;
- 6)将样机断电,在环境温度下冷却 12~48 h,再次测量试品  $C$  和  $\tan\delta$ ;
- 7)在常温下对样机进行 1 000 次充放电试验,试验电压不低于  $1.1U_{NDC}$ ,放电峰值电流为  $1.4\hat{I}$  ( $\hat{I}$  为最大峰值电流),记录放电波形,48 h 内完成放电试验。试验结束后测量样机  $C$  及  $\tan\delta$ ;
- 8)重复第步骤 5)~6)试验内容。

试验原理图见图 13~14。

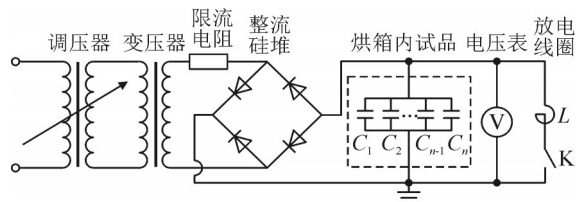


图 13 电容器样机直流老化试验原理图  
Fig. 13 DC aging test wiring schematic diagram of capacitor sample

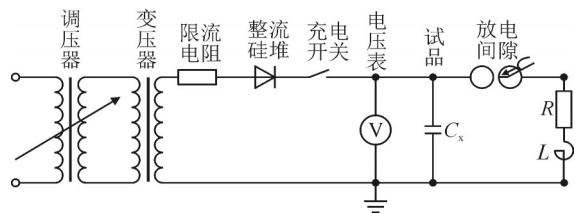


图 14 电容器样机 1000 次充放电试验原理图  
Fig. 14 Principle diagram of 1000 times charge and discharge test of capacitor sample

2.6 交直流叠加加速老化试验

室温下对样机施加 16 h 的  $1.1U_{NDC}$  直流电压,后静置 12 h,在极间施加直流叠加交流电压,其中直流电压为  $1.3U_{NDC} \sim 1.6U_{NDC}$ ,梯度为  $0.1U_{NDC}$ ,交流电压为工频  $0.1U_{NAC}$ 。每一个直流电压阶段历时 16 h 后,分别通过提高温度和电压的方式进行试验,温度梯度为  $5^{\circ}\text{C}$ ,起始温度为  $55^{\circ}\text{C}$ 。每一试验阶段结束后使用数字电桥测量  $C$  和  $\tan\delta$ 。试验过程中若有试品发生自愈失效损坏(稳态充电电流大于 200 mA)或电容下降率达到 90%,该试品终止试验。试验原理图见图 15,图 16 为进行耐久性试验的试品。

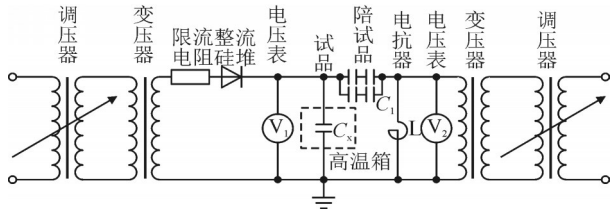


图 15 直流叠加工频交流耐久性试验原理图  
Fig. 15 Principle diagram of DC superimposed power frequency AC durability test

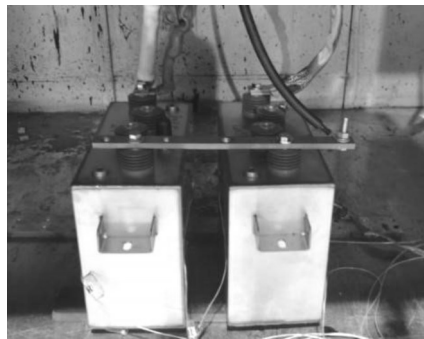


图 16 进行耐久性试验的试品  
Fig. 16 The test sample subjected to the durability test

3 结果与讨论

3.1 极对壳耐压试验

人为设置的各种缺陷电容器样机均通过了端子与外壳间工频电压 5 kV 历时 60 s 的耐受电压试验,均未出现闪络和击穿。说明在柔直输电用柔直电容器技术规定的端子对壳耐电压要求下,上述缺陷无法被试验测出。

3.2 极对壳局部放电试验

电容器样机端子与外壳间局部放电试验结果见表 2。从表 2 可知,元件端面虚焊的缺陷样机极对壳局部放电量在 5 kV 和 3 kV 时均为各缺陷中最大值,说明虚焊缺陷严重影响样机局部放电性能。此外,非真空浇注、未完全灌封、壳体分离和套管密封不良导致的受潮对局部放电性能影响也较大。

表 2 电容器样机端子与外壳间局部放电试验结果  
Table 2 Partial discharge test results between terminal and case of capacitor sample

| 序号 | 样机类型                | 局部放电量/pC |      |
|----|---------------------|----------|------|
|    |                     | 5 kV     | 3 kV |
|    |                     | 60 s     | 60 s |
| 1  | 对照组                 | 120      | 8    |
| 2  | 元件端面虚焊              | 800      | 300  |
| 3  | 元件端面引线与联接片虚焊        | 700      | 200  |
| 4  | 出线导杆焊接虚焊            | 800      | 300  |
| 5  | 非真空浇注(存在气泡)         | 450      | 120  |
| 6  | 高、低压电极端部未灌封完全       | 500      | 250  |
| 7  | 壳体分离                | 800      | 9    |
| 8  | 套管密封不良导致电容器受潮       | 600      | 6    |
| 9  | 元件端面与联接片间,焊接时堆锡形成尖角 | 100      | 20   |
| 10 | 联接片间焊接处尖端,焊接时堆锡形成尖角 | 160      | 20   |
| 11 | 导杆与联接间焊接时堆锡形成尖角     | 180      | 20   |
| 12 | 内部设置一个认为短路故障元件      | 50       | 5    |
| 13 | 内部设置一个认为短路故障元件,不注胶  | 200      | 17   |

3.3 极间耐压试验

电容器样机试品端子间耐电压试验结果见表 3。从表 3 可看出,人为设置的各种缺陷电容器样机均能通过极间直流电压  $1.5U_{NDC} = 4.2\text{ kV}$ 、历时 60 s 的耐受试验,电容变化量  $\Delta C$  在  $-0.11\% \sim 0.01\%$  之间,损耗角正切变化量  $\Delta\tan\delta$  在  $-0.3 \times 10^{-4} \sim 0.3 \times 10^{-4}$  之间。说明在柔直电容器技术规定的极间耐电压要求下,上述缺陷无法被试验测出。

表3 电容器样机试品端子间耐电压试验结果  
Table 3 Withstanding voltage test result between terminal and case of capacitor sample

| 序号 | 样机类型                | 试验后     |                                  |
|----|---------------------|---------|----------------------------------|
|    |                     | 电容值变化/% | 损耗角正切变化量<br>( $\times 10^{-4}$ ) |
| 1  | 对照组                 | -0.01   | -0.3                             |
| 2  | 元件端面虚焊              | -0.02   | -0.1                             |
| 3  | 元件端面引线与联接片虚焊        | -0.02   | 0                                |
| 4  | 出线导杆焊接虚焊            | -0.01   | 0.3                              |
| 5  | 非真空浇注(存在气泡)         | -0.01   | 0.1                              |
| 6  | 高、低压电极端部未灌封完全       | -0.01   | -0.1                             |
| 7  | 壳体分离                | -0.11   | -0.3                             |
| 8  | 套管密封不良导致电容器受潮       | -0.01   | 0                                |
| 9  | 元件端面与联接片间,焊接时堆锡形成尖角 | -0.02   | 0.1                              |
| 10 | 联接片间焊接处尖端,焊接时堆锡形成尖角 | 0.01    | 0.2                              |
| 11 | 导杆与联接间焊接时堆锡形成尖角     | -0.01   | -0.2                             |
| 12 | 内部设置一个认为短路故障元件      | 0       | 0.1                              |
| 13 | 内部设置一个认为短路故障元件,不注胶  | -0.02   | 0.3                              |

3.4 直流老化试验

电容器样机试品直流老化试验结果见表4,从表4可知,在按照 GB/T 17702—2021 规定进行耐久性试验(250 h 热电老化+1 000 次放电+250 h 热电老化)后,套管密封不良导致电容器受潮缺陷试品以及对对照组试品的  $\tan\delta$  基本不变,电容衰减范围在 0.17%~0.25% 之间,试验通过。

表4 电容器样机试品直流老化试验结果  
Table 4 DC aging test results of capacitor sample

| 样机类型         |                               | 对照组           | 套管密封不良,电容器受潮 |
|--------------|-------------------------------|---------------|--------------|
| 试验前          | $C/\mu\text{F}$               | 1 129.8       | 1 132.2      |
| /25 ℃        | $\tan\delta_0/\times 10^{-4}$ | 2.5           | 2.7          |
| 前 250 h 耐久   |                               |               |              |
| 试验后          | $C/\mu\text{F}$               | 1 130.7       | 1 133.0      |
| /25 ℃        | $\tan\delta/\times 10^{-4}$   | 2.8           | 2.9          |
| 1 000 次充放电   | $C/\mu\text{F}$               | 1 129.6       | 1 132.5      |
| 试验后/25 ℃     | $\tan\delta/\times 10^{-4}$   | 2.7           | 2.7          |
| 后 250 h 耐久   | $C/\mu\text{F}$               | 1 127.9       | 1 129.4      |
| 试验后          |                               |               |              |
| /25 ℃        | $\tan\delta/\times 10^{-4}$   | 2.9           | 2.8          |
| 试验后与试验前相比变化量 | 电容值                           | 要求 -3~+3      | -3~+3        |
|              | 变化量/%                         | 实测 -0.17      | -0.25        |
|              | 损耗角正切                         | 要求 $\leq 1.2$ | $\leq 1.3$   |
|              | 值增量/ $\times 10^{-4}$         | 实测 0.4        | 0.1          |

3.5 交直流叠加加速老化试验

非真空浇注(存在气泡)的缺陷试品在环境温度 80 ℃、工频 280 V 叠加直流  $1.5U_{\text{NDC}}=4.20\text{ kV}$ ,历时 14 h 后发生自愈失效,装在试品上的压力开关动作,该试品直流充电稳态电流大于 200 mA,无法再施加直流试验电压。试品鼓肚严重,无开裂现象,见图 17。此时电容下降 34%,损耗角正切不变。对其进行端子与外壳间耐受电压试验 5 kV,历时 1 min,试验通过。



图17 直流叠加工频交流加速老化试验后试品鼓肚  
Fig. 17 Test sample bulging after DC stacking and frequency-modulated AC accelerated aging test

内部设置一个人为短路故障元件(未注胶)缺陷试品在环境温度为 70 ℃,工频 280 V+直流  $1.3U_{\text{NDC}}=3.64\text{ kV}$ ,历时 3 h 后发生自愈失效,装在试品上的压力开关未动作,该试品直流充电稳态电流大于 200 mA,无法再施加直流试验电压。试品无鼓肚和开裂现象,见图 18。此时电容下降 7.95%,损耗角正切增大  $15.5\times 10^{-4}$ 。对其进行端子与外壳间耐受电压试验 5 kV,历时 1 min,试验通过。



图18 直流叠加工频交流加速老化试验后试品外观  
Fig. 18 Appearance of the test sample after DC stacking and frequency-modulated AC accelerated aging test

对照组样机和壳体分离缺陷样机均依次进行环境 55 ℃下  $1.6U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、60 ℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、65 ℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、70 ℃下  $1.3U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、70 ℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、75 ℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$  和 80 ℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ ,各阶段历时 16 h 后,试品无自愈失效现象,损耗角正切基本不变,电容衰减不到 2%。

浇注缺陷样机依次进行环境 55℃下  $1.6U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、60℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、65℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、70℃下  $1.3U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、70℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、75℃下  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$  各阶段历时 16 h 后,试品无自愈失效现象,损耗角正切基本不变,电容衰减不到 0.2%,但环境温度升高至 80℃、电压维持  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$  阶段,历时 14 h 后出现自愈失效、外壳明显鼓肚现象。

内部设置一短路元件样机注胶缺陷样机,依次进行环境 70℃、 $1.3U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、55℃、 $1.6U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、60℃、 $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ 、65℃、 $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$  各阶段历时 16 h 后,试品无自愈失效现象,损耗角正切基本不变,电容衰减 0.74%。但环境温度升高至 70℃、电压维持  $1.5U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$  阶段,历时 7 h 后,样机出现自愈失效、外壳稍微鼓肚现象;而内部设置一短路元件且未注胶缺陷样机,在进行第一阶段环境 70℃、 $1.3U_{\text{NDC}}+0.1U_{\text{NAC}}$ , 刚历时 3 h 就出现自愈失效。说明人为设置短路元件的未注胶缺陷样机在直流叠加工频试验状态下更容易发生失效。

#### 4 结语

本文通过设计典型缺陷模型试品并开展试验,研究了柔直电容器在生产工艺及运行过程中可能存在的缺陷对其性能的影响规律,提出了相应的表征参数。基于上述试验结果与分析,现将主要研究内容与发现小结如下:

1) 焊接缺陷的影响:虚焊缺陷会显著增加局部放电量,在 5 kV 耐压试验下局放量可达 800 pC,远高于正常水平(120 pC),表明局放量可作为虚焊缺陷的敏感表征参数。然而,损耗角正切值( $\tan\delta$ )对虚焊缺陷的响应不明显,可能与内部灌封材料的绝缘补偿作用有关。焊接尖角缺陷虽对局放量影响较小,但在长期运行中可能成为局部放电的起始点,需通过工艺优化避免此类缺陷。

2) 浇注缺陷的影响:非真空浇注(存在气泡)缺陷在交直流叠加老化试验中易引发自愈失效,电容下降率达 34%,同时伴随外壳鼓肚现象,表明电容变化可作为浇注缺陷的灵敏指标。此外,电极未灌封完全缺陷会导致局放量升高(500 pC@5 kV),而壳体分离缺陷对局放性能的影响相对较小,但长期运行中可能因机械应力导致绝缘劣化。

3) 密封加工不良和注胶不完全缺陷对于运行可靠性的影响:套管密封不良或元件未封盖导致的受潮缺陷在湿热环境下会加剧局部放电,但通过常规耐压试验难以检出,需结合老化试验评估其长期

影响。人为设置短路故障的未注胶试品在交直流叠加试验中迅速失效(3 h 内电容下降 7.95%),表明注胶工艺对电容器的机械支撑和散热至关重要,工程设计中需确保注胶完整性。

4) 缺陷表征方法的有效性:局放量对虚焊、非真空浇注和电极暴露缺陷敏感,适用于生产过程中的在线检测。电容变化率在老化试验中能有效反映绝缘劣化和结构缺陷(如气泡、短路元件)。多应力加速老化试验通过温度-电压梯度试验可快速筛选潜在缺陷,优于单一耐压测试。

需要说明的是,本研究结论基于特定结构的柔直电容器样机得出,而目前行业上电容器内部结构存在多种类型(如采用分割膜、铜片切割引线焊接喷金面、液位法控制浇注量等)。试验过程中,某些缺陷设置可能同时引入其他影响因素(如非真空浇注可能伴随气泡残留,焊接温度变化可能影响喷金层与薄膜的连接强度等)。因此,本文研究结果存在一定的局限性,但所提出的缺陷表征方法和试验方法具有普适性,可为不同类型电容器的工艺优化提供参考。未来研究可针对更多样化的电容器结构开展验证,并进一步细化研究缺陷与性能的关联机制。

#### 参考文献

- [1] 何晓靓,高琪,刘水平,等. 大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020,41(4):81-85.  
HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020,41(4):81-85.
- [2] SHOLIHAN F H, BECERRA V, PRABHU S R. DC-Link capacitor design in neutral point clamped multilevel inverter utilizing ripple current analysis and DC-DC converter control[C]//2024 International Electronics Symposium (IES). [S. l.]: IEEE, 2024:89-94.
- [3] H. WANG, H. S. H. CHUNG W. LIU. Use of a series voltage compensator for reduction of the DC-link capacitance in a capacitor-supported system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, (9):1163-1175.
- [4] 房金兰. 我国电力电容器技术的发展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010,31(1):1-4.  
FANG Jinlan. The development of power capacitor technology in China[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010,31(1):1-4.
- [5] 金龙峰. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力设备管理, 2024(16):208-210.  
JIN Longfeng. Research on DC supporting capacitors for

- flexible DC transmission projects[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(16):208-210.
- [6] 雷晓燕, 隆礼, 李金宇, 等. 缩比电容器装置噪声特性及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11):131-139.  
LEI Xiaoyan, LONG Li, LI Jinyu, et al. Study on noise characteristics and its influencing factors of scaled capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11):131-139.
- [7] 李梓玮, 许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1):48-56.  
LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1):48-56.
- [8] 张国豪, 李化, 林福昌, 等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器, 2024, 60(6):197-202.  
ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6):197-202.
- [9] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5):149-155.  
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):149-155.
- [10] 柴斌, 史磊, 韦鹏, 等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器, 2023, 59(11):211-216.  
CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):211-216.
- [11] 方仍存, 雷何, 杨东俊, 等. 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1):43-49.  
FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1):43-49.
- [12] 陈磊, 吴诚威, 李澳, 等. 基于电流监测和动态电阻分析的电容器组SF<sub>6</sub>断路器电寿命评估系统[J]. 高压电器, 2024, 60(1):55-62.  
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of SF<sub>6</sub> circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):55-62.
- [13] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3):8-18.  
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3):8-18.
- [14] 马为民, 吴方劼, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8):2429-2439.  
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8):2429-2439.
- [15] 左强林, 雷乔舒. 柔性直流输电用直流支撑电容器的关键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):108-115.  
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Study on key technology of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):108-115.
- [16] 查鲲鹏, 曹均正, 郑媚媚, 等. 计及金属化膜电容器失效的MMC换流阀组件可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4):86-93.  
ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4):86-93.
- [17] 张绮轩, 李海锋, 梁远升, 等. 基于行波解析分析的柔性直流输电线路故障智能检测方法[J]. 广东电力, 2024, 37(5):84-96.  
ZHANG Qixuan, LI Haifeng, LIANG Yuansheng, et al. Intelligent fault detection method for flexible DC transmission lines based on prior experience and of travelling wave expression[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5):84-96.
- [18] 苏寅生, 赵利刚, 姚海成, 等. 100% 新能源电源经柔性直流送出系统的机电暂态建模仿真研究[J]. 广东电力, 2023, 36(10):57-65.  
SU Yinsheng, ZHAO Ligang, YAO Haicheng, et al. Research on electromechanical transient modeling and simulation of 100% new energy power source connected by MMC-HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10):57-65.
- [19] 黄永升. 电容器安规特性动态测量关键技术研究及样机研制[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [20] 于成龙, 叶海福. 高压脉冲电容器的直流局部放电绝缘检测[J]. 高电压技术, 2006, 32(6):5-8.  
YU Chenglong, YE Haifu. Application of DC-PD technique in detection of high voltage pulse capacitors insulation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6):5-8.
- [21] 李晓华, 吴广宁, 张血琴, 等. 典型缺陷的直流局部放电波形测量与特性分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(8):31-34.  
LI Xiaohua, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. Partial

- discharge pulse shape detection and analysis under DC condition in typical defect models[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 31-34.
- [22] 李维维, 高琪, 芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 95-98.
- LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.
- [23] ZHANG Shuting, TIAN Fuqiang, LIANG Jieyi, et al. The time, electric field, and temperature dependence of charging and discharging currents in polypropylene films[J]. Polymers, 2023, 15(14): 3123.
- [24] ZHANG Shuting, TIAN Fuqiang, CAO Jinmei, et al. Thermal aging life model of biaxially oriented polypropylene films for capacitors based on cumulative power energy absorption[J]. Polymer, 2024, 313, 127722.
- [25] Plastic films for electrical purposes — Part 3: Specifications for individual materials—Sheet 1: Biaxially oriented polypropylene (PP) film for capacitors: IEC 60674—3—1 2021[S]. 2021.
- [26] 钟少龙, 方立龙, 王昕劼, 等. 金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 51-60.
- ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, et al. Simulation of electric-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitor elements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 51-60.
- [27] 赵琳, 邵先军, 金涌涛, 等. 局放重症监测技术在特高压电抗器内部缺陷检测中的应用[J]. 浙江电力, 2023, 41(2): 60-66.
- ZHAO Lin, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Application of partial discharge critical monitoring technology in internal defect detection of ultra-high voltage reactors[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 41(2): 60-66.
- [28] 左强林, 毛承雄, 李维波. 串联电容器型式试验问题研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2004, 25(3): 15-17.
- ZUO Qianglin, MAO Chengxiong, LI Weibo. Optimization of type tests circuit about series capacitor[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2004, 25(3): 15-17.
- [29] 张学恒. 电解电容卷绕过程故障分析及其控制系统的实现[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [30] 储松潮, 束长青, 潘毓娴, 等. BOPP电容薄膜可卷绕性研究[C]//2020年陕西省电网节能与电能质量技术学会换届大会暨全国电能质量学术年会. 2020.
- [31] IL'YASCHENKO D P, CHINAKHOV D A, MAMADALIEV R A. Effect of inverter power source characteristics on welding stability and heat affected zone dimensions[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, 115(1): 012041.
- [32] 李建涛. 工艺和设计对直流电容器ESR的影响[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2014学术交流会. 2014.
- [33] 王振东. 金属化薄膜电容器损耗的工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

#### 作者简介:

廖梓豪(1997—),男,助理工程师,研究方向为柔性直流用直流支撑电容器缺陷分析。E-mail:984150068@qq.com。

蔡玲珑(1990—),男,正高级工程师,研究方向为柔性直流用直流支撑电容器缺陷分析。

马志钦(1986—),男,正高级工程师,研究方向为柔性直流用直流支撑电容器缺陷分析。