

应用理化分析探索 40.5 kV 开关柜绝缘隔板放电原因

刘 衍, 尹桂来, 龙国华, 周求宽, 邹 阳

(国网江西省电力公司电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要:小型化后的 40.5 kV 开关柜受尺寸限制,普遍采用加装 SMC 绝缘隔板的复合绝缘方式,但开关柜母排对绝缘隔板放电的故障仍然较为普遍,因此对放电原因的研究很有必要。文中首先对一台 KYN61-40.5 型开关柜进行工频耐压试验,验证运行中开关柜内母排对绝缘隔板放电的可能性。其次通过绝缘隔板的加速热老化、湿热老化试验,采用 SEM 测试、交流击穿场强、耐漏电起痕指数和憎水性检测等绝缘材料测试评估方法,研究绝缘隔板理化特性变化规律,进而得出放电的原因。研究表明:开关柜绝缘隔板故障并非绝缘隔板击穿强度降低引起,而是在湿热环境下,开关柜内 SMC 绝缘隔板表面的保护膜分解,降低接触角,使绝缘隔板由憎水性转变为亲水性,从而当外施电压达到 70 kV 左右即发生放电;由于环氧树脂材料在老化后依旧保持良好的憎水性,因此开关柜内绝缘隔板宜采用环氧树脂材质,不宜采用不饱和聚酯玻璃纤维(SMC)。为了保证绝缘隔板的理化特性,开关柜内运行温度不超过 80 ℃,湿度控制在 75% 以下。

关键词: 40.5 kV 开关柜; SMC; 绝缘隔板; 老化试验; 理化分析

Exploration of Discharge Reasons of Insulation Partition of 40.5 kV Switchgear Based on Physical-chemical Analysis

LIU Yan, YIN Guilai, LONG Guohua, ZHOU Qiukuan, ZOU Yang

(State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: With the trend of miniaturization, the 40.5 kV switchgear is faced with size restrictions, and composite insulation which installs SMC insulation partition is general used. However, electrical fault between the switchboard bus bar and insulation partition is more common, thus researching the reasons for discharge fault is very necessary. In this paper, a KYN61-40.5 switchgear is first carried on power frequency withstand voltage test, which aims to verifying the possibility of discharge between the switch cabinet bus bar and the insulation partition. Secondly, accelerated thermal aging, hot and humid aging test of insulation baffle insulation partitions are carried on, and properties test of insulating materials such as SEM test, AC breakdown field strength, resistance to tracking index and hydrophobic detection are used to study the change rule of physical-chemical characteristic and reasons for insulation discharge. The experiments results show that the failure of the insulation cabinet of the switchgear is not caused by the decrease of the breakdown strength of the insulation partition. However, in the hot and humid environment, the protective film on the surface of the SMC insulation partition in the switchgear is decomposed and the contact angle is reduced, leading to conversion from hydrophobic to hydrophilic. When the external voltage is about 70 kV, discharge will occurs; and as epoxy insulation baffle still maintain good hydrophobic after aging, the switchgear insulation partition should better use epoxy material, and should not use unsaturated polyester glass fiber(SMC)material; in order to guarantee the physical-chemical properties of insulation partition, switchgear operating temperature should not exceed 80 ℃, and humidity should be controlled below 75%.

Key words: 40.5 kV switchgear; SMC; insulation partition; aging test; physical-chemical analysis

0 引言

高压开关柜小型化是目前开关柜发展趋势,如 KYN61-40.5 型开关柜小型化后,其宽度从 1 800 mm 降到 1 400 mm,尺寸大大减小。按照规定^[1],对于额定电压 40.5 kV 的开关柜,柜内各相导体的相间和对地空气净距不得小于 300 mm,但因柜体尺寸限制,大多数产品采用复合绝缘技术。复合绝缘技术,是以空气绝缘为主体,在放电路径上设置固体绝缘隔板,以缩短最小放电间隙。这种技术的原理在于固体绝缘隔板具有阻止放电的作用,隔板表面上施加电压同极性的电荷可以改善电场^[2-3]。绝缘隔板的材质以往普遍采用电气绝缘用酚醛玻璃纤维模塑料,但由于其抗老化性和抗潮性不良,使用中频繁出现绝缘强度降低现象^[2],因此实际均改用不饱和聚酯玻璃纤维增强模塑料(SMC、DMC)来提高绝缘性能,而安装的 SMC 绝缘板与高压带电体需保证不少于 60 mm 的空气间隙^[4]。

但高压试验和运行经验均表明,采用 SMC 绝缘隔板的开关柜母排同样容易对隔板放电^[5]。图 1 为 KYN61-40.5 型开关柜内绝缘隔板表面放电痕迹。



图 1 开关柜母排对绝缘隔板放电

Fig. 1 Discharge between switchboard bus bar and insulation baffle

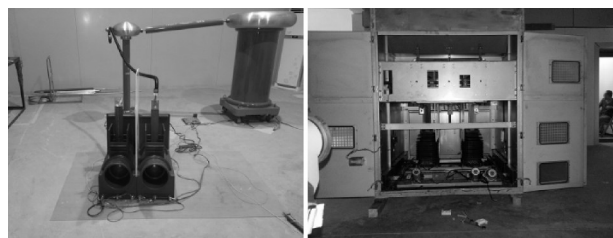
对于开关柜内放电原因,文[4-9]进行了综合性阐述,包括绝缘件设计选型不合理、元器件的加工工艺不规范、元器件的装配工艺不规范及环境对开关柜绝缘件的影响;现场故障实际情况及可能因素进行了分析,提出了相应的维护整改措施;而对于如何运用材料理化性能分析、绝缘件性能分析等技术手段,从而从源头上控制好开关柜设备质量的研究,目前相对较少。

文中首先对一台 KYN61-40.5 型开关柜进行工频耐压试验,验证运行后的开关柜内母排对绝缘隔板放电现象。通过绝缘隔板的加速老化试验,利用 SEM(扫描电子显微)测试、交流击穿、漏电起痕和憎水性检测等绝缘材料测试方法,探索绝缘隔板放电

的原因;同时考虑到开关柜触头盒、母线套管的材料均为性能更优良的环氧树脂,因此采用同样的方法对环氧树脂材料进行老化试验,比较两种材料绝缘特性的变化,最后根据试验结果提出了抑制母排对绝缘隔板放电的有效措施,可为开关柜的安全运行提供工程指导。

1 开关柜外施工频电压试验

在两相母排间分别居中放置受潮 SMC 绝缘隔板、未受潮 SMC 绝缘隔板及金属铝板。一相母排加压,另一相母排接地^[10-11]。母排端部无绝缘护套包裹。实验布置见图 2(a)。母排间空气距离 240 mm,绝缘隔板厚度 5 mm。试验结果见表 1。



(a) 母排对隔板放电模拟

(b) 实际开关柜试验

图 2 母排对 SMC 绝缘隔板放电验证试验

Fig. 2 Confirmatory test of discharge between switchboard bus bar and insulation baffle

表 1 外施工频电压试验结果

Table 1 Results of simulation test

隔板情况	高压母排对隔板发生电弧 放电起始电压/kV
绝缘隔板受潮	72
绝缘隔板未受潮	85
金属铝板	77

由表 1 可知,受潮的 SMC 绝缘隔板出现电弧放电时施加的电压甚至低于金属铝板。

对完整开关柜上同时进行了外施工频电压试验,见图 2(b),试验结果见表 2。开关柜型号 KYN61-40.5,其中电缆室 AB 相空气净距离 230 mm,BC 相空气净距离 250 mm;A 相母排与 AB 相间隔板空气净距离 115 mm;B 相母排与 AB 相隔板空气净距离 110 mm,与 BC 相隔板空气净距离 125 mm。

从表 2 可以看出,外施电压达到 70 kV 左右时,母排尖端即会对受潮 SMC 绝缘隔板发生电弧放电。即使 B 相母排与 AB 相间隔板空气净距离小于与 BC 相隔板空气净距离,B 相母排只对受潮绝缘隔板发生电弧放电。

表2 开关柜外施工频电压试验结果

Table 2 Test results of switchgear power frequency withstand voltage

加压部位	A/B相隔板状态	B/C相隔板状态	试验结果
A相母排	受潮	受潮	外施电压70 kV, A相支排尖端与AB相隔板发生电弧放电
	未受潮	受潮	外施电压85 kV, A相支排尖端与AB相隔板发生电弧放电
B相母排	未受潮	受潮	外施电压76 kV, B相支排尖端与BC隔板发生电弧放电
	受潮	未受潮	外施电压70 kV, B相支排尖端与AB隔板发生电弧放电

2 老化试验方案

2.1 老化试验设计

一般开关柜的使用期限都比较大,因此必须强化应力,促使样品失效时间缩短,以便在短时期内根据加速老化实验所得的数据来研究其长时间劣化特性及失效机理。文中采用恒定应力加速老化方法对SMC试样进行热老化及湿热老化试验,在老化的基础上进行理化性能分析^[12-14]。由于正常运行时绝缘隔板表面的理论电场值为0 kV/mm,所以未进行电老化试验。此外,作为对比,在进行SMC绝缘隔板分析基础上,同时开展环氧树脂绝缘隔板的理化性能分析。

热老化温度的选择很重要,为了避免因试验温度过高导致老化机理的改变以及温度过低而导致试验时间过长,必须限制最高与最低试验温度。一般规定最高试验温度下的热老化寿命时间不得小于100 h,最低实验温度下的寿命不小于5 000 h,或最低试验温度不能超过工作温度20~40 ℃。因此文中选取3个不同的老化温度,分别为80、100、120 ℃。每个温度分为6个老化阶段,老化时间见表3。

表3 热老化温度及老化时间

Table 3 Temperature and aging period of hot aging

阶段	80 ℃	100 ℃	120 ℃
第1阶段	500 h	260 h	100 h
第2阶段	1 000 h	500 h	200 h
第3阶段	2 000 h	800 h	500 h
第4阶段	3 000 h	1 000 h	700 h
第5阶段	4 000 h	2 000 h	900 h
第6阶段	5 000 h	3 000 h	1 300 h

湿热老化方案的制定参考GB/T 2423.3—2006,试验选取温度为80(1±2) ℃,湿度分别选为50 (1±3)%RH和96(1±3)%RH,试验取样周期为4 d(100 h)、21 d(500 h)、42 d(1 000 h)、56 d和65 d。

2.2 绝缘性能评估指标选取

高分子材料在老化过程中,会受到热、氧、光照、水、化学介质等各种环境因素的综合作用,化学、物理和力学性能也会相应改变,最终使高分子材料的性能变劣^[15]。高分子环境适用性的主要特征为:

1)外观变化。材料表面出现发黏、变硬、龟裂、变形、变色、粉化、起泡、脱层等现象;

2)物理性质变化。材料的密度、溶解度、比热、耐热性、耐介质性、溶胀率、流变性、透气透水性以及相对分子量等变化;

3)力学性能变化。材料的拉伸强度、伸长率、附着力、弯曲强度、拉伸强度、耐磨强度、弹性等性能的变化;

4)电性能的变化。材料的绝缘电阻、导电率、介电常数、介电损耗、击穿电压等性能的变化;

5)其他性能的变化。材料的质量变化、光学性能、声学性能、导磁性能的变化等。

环氧树脂和SMC复合材料在老化一段时间后由于物理老化和化学老化,击穿场强会降低,容易导致开关柜发生绝缘故障,对系统运行造成影响。因此通过研究老化过程中工频击穿场强^[14]的变化规律来寻找电性能的变化。

亲水性越好的材料接触角越小,越容易发生放电。长期暴露在日光下的绝缘材料,在紫外线照射下表面分子降解反应作用使其疏水基减少,导致材料表面接触角逐渐减少^[16],这是工作在室外的绝缘材料发生电痕破坏的主要原因之一。因此,在研究绝缘材料的耐漏电起痕特性时必须考虑其憎水性的影响电痕劣化引起绝缘破坏是电场中有机绝缘材料放电形成的碳化导电路在有机绝缘表面发生的,是有机绝缘特有的绝缘破坏形式,称为电痕破坏。引起电痕破坏的间接原因是有机绝缘表面的潮湿与污秽^[17]。国标中用相对耐漏电起痕指数(CTI)表征耐漏电起痕性能。

综上文中从外观变化、物理性质(憎水性)、电性能(工频击穿场强、漏电起痕性能)3个方面来评估不同老化情况下绝缘挡板理化性能的变化。

3 热老化试验对SMC影响分析

3.1 对SMC微观形貌的影响

120 ℃下不同老化阶段试样的SEM图见图3。

其中白色的颗粒为钛酸钙。

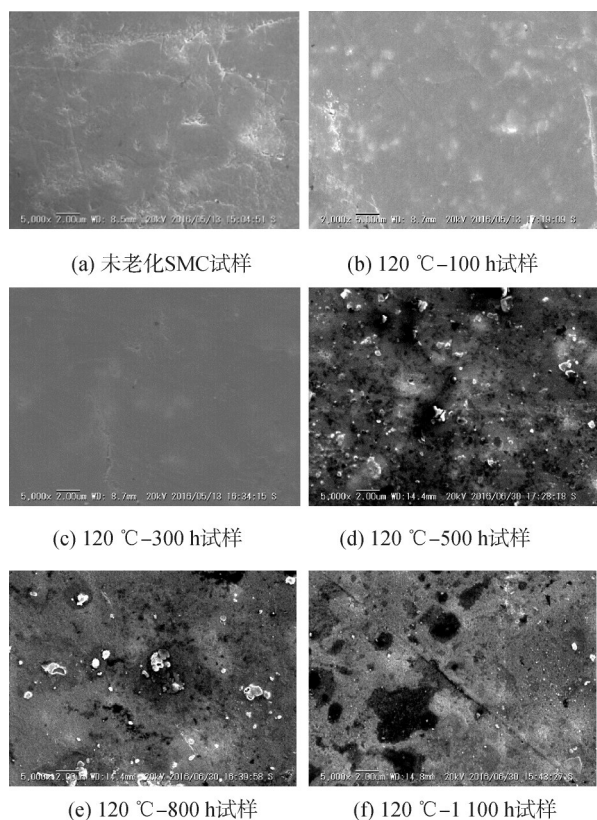


图3 120 °C下热老化对SMC微观形貌的影响

Fig. 3 Micro morphology change of the SMC under 120 °C heat aging test

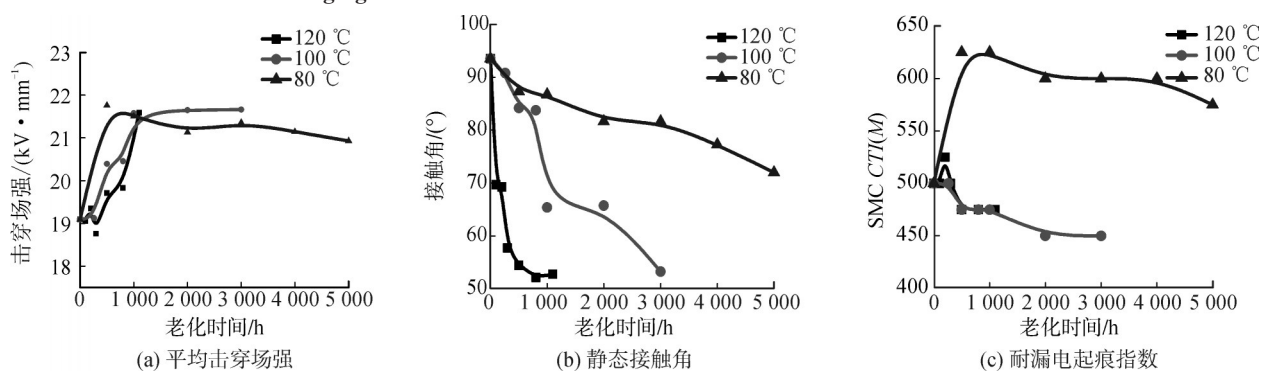


图4 热老化试验下SMC理化性能的变化规律

Fig. 4 Physical and chemical properties of SMC under hot aging test

3.3 对SMC憎水性的影响

SMC材料在老化过程中憎水性的变化见图4(b)。120 °C老化情况下, SMC的静态接触角迅速下降, 在老化500 h时, SMC的接触角降为54.44°, 下降了41.8%, 之后下降趋缓; 100 °C老化情况下, 在老化时间达到1 000 h时, 静态接触角为65.38°, 下降了30.1%, 在老化时间为3 000 h时静态接触角为53.26°, 下降了43.1%; 在80 °C老化情况下, 憎水性下降趋势较前两个温度较缓, 在老化5 000 h时SMC接触角为71.98°, 下降了23.0%。

可见3个温度热老化下接触角随着老化时间而

SMC一般会在表面加上一层保护膜。SEM结果表明, 在老化初期阶段, 即200~300 h, 保护膜变得不透明, 并将下面的填料紧紧覆盖, 但当老化进入500 h后, 表面的保护膜已经由于热氧反应而缺失, 只能覆盖一部分基体, 且可以观察到SMC中的钛酸钙颗粒, 在1 100 h老化时, 整个保护膜已经彻底分解, 将整个SMC基体暴露在外。

3.2 对SMC工频击穿场强的影响

图4(a)为SMC材料的工频击穿场强随着老化时间的变化曲线, 可以看出120 °C老化下, SMC的工频击穿场强随老化时间略有上升, 在老化1 100 h时, SMC的工频击穿场强为21.59 kV/mm, 相比未老化SMC材料19.10 kV/mm增加了13.0%; 100 °C老化下, SMC的工频击穿场强随在老化初期随老化时间上升, 之后基本不变, 在老化1 000 h时的工频击穿场强为21.58 kV/mm, 增加了13.0%, 之后变化不大; 80 °C老化下, SMC的工频击穿场强随老化时间先增大后缓慢减小, 其中在80 °C老化3 000 h时, 工频击穿场强达到了21.37 kV/mm, 增加了11.8%, 在老化5 000 h时工频击穿场强为20.93 kV/mm, 相比3 000 h时略有下降。可见无论是120、100 °C还是80 °C, SMC的工频击穿场强随着老化时间的增大而略有增加^[8]。

下降, 且温度越高, 接触角下降越剧烈。这点可以从SEM图像中得到证实: 随着老化时间延长, SMC材料表面的有机涂层发生了裂解, 生成了很多孔隙, 降低接触角, 而且在温度越高, SMC材料表面涂层裂解的越快。

3.4 对SMC漏电起痕性能(CTI)的影响

由图4(c)可以看出: 120 °C老化下SMC材料的CTI(M)随老化时间先略有上升, 之后开始下降, 在120 °C老化200 h时, 相对漏电起痕指数上升为525, 相比未老化SMC材料500增加了5.0%, 之后CTI随着老化时间的延长而减小, 在老化1 100 h时降为

475,下降了5.0%;100℃老化时,SMC的相对漏电起痕指数随着老化时间下降,在老化500 h时,CTI为475,相比未老化SMC材料下降了5.0%,之后CTI继续下降,在老化2 000 h时降为450,下降了10.0%,并在之后维持不变;在80℃老化情况下,SMC的相对漏电起痕指数随老化时间先上升而后缓慢下降,在老化500 h时CTI升至625,增加了25.0%,之后随着老化时间而下降,在老化5 000 h时降为575,仍增加了15.0%。

4 湿热老化对SMC性能影响

4.1 对SMC工频击穿场强的影响

湿热老化下SMC的工频击穿场强见图5(a),可

以看出:80℃~50%RH老化下,SMC的工频击穿场强随老化时间先缓慢上升后逐渐下降,在老化56 d时的工频击穿场强达到最大值,为19.63 kV/mm,相比未老化的情况增大了2.8%,之后SMC的工频击穿场强开始下降;80℃~96%RH老化下,SMC的工频击穿场强随着老化时间先迅速上升之后缓慢下降,在老化4 d时达到最大值为19.92 kV/mm,增大了4.3%,之后随着老化时间开始缓慢下降,在老化65 d时工频击穿场强达到18.42 kV/mm减小了5.0%。

从图5中还可以看出:在两个湿度下SMC的工频击穿场强变化规律都是一样的,随着老化时间先上升后下降。

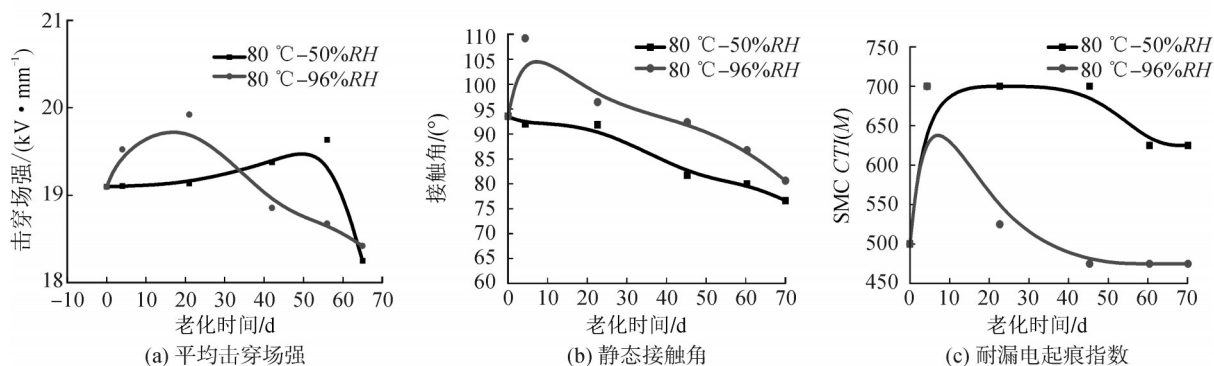


图5 湿热老化中SMC理化性能的变化规律

Fig. 5 Physical and chemical properties of SMC under hydrothermal aging test

4.2 对SMC憎水性的影响

图5(b)为SMC接触角在湿热老化情况下随着老化时间的变化,可以看出:80℃~50%RH老化下,SMC的静态接触角随着老化时间一直减小,在老化65 d时,静态接触角下降为76.68°,下降了18.0%;80℃~96%RH老化下SMC的静态接触角随着老化时间先略有升高而后开始下降,在老化4 d时SMC的静态接触角为109.20°,增大了16.7%,之后SMC的静态接触角随着老化时间而下降。

可见不同湿度下SMC憎水性丧失的机理并不相同:50%RH下,SMC的接触角随着老化时间而下降,并没有出现静态接触角略有上升的趋势;而在96%RH湿度下,SMC静态接触角随着老化时间在4 d时出现明显的峰值,之后由于水分的增塑作用和温度的破坏作用,其静态接触角开始下降。

4.3 对SMC漏电起痕性能的影响

漏电起痕随老化时间的变化见图5(c),可以看出:80℃~50%RH老化情况下,SMC的相对漏电起痕指数随着老化时间先增大而后缓慢减小,在老化时间为4 d时CTI上升至700,相比未老化上升了40.0%,

之后,SMC的相对漏电起痕指数随着老化时间而减小,在老化时间为56 d时为675,增加了35.0%,并保持不变;80℃~96%RH老化情况下,SMC的相对漏电起痕指数随着老化时间先增大而急速减小,在老化时间为4 d时为700,上升了40.0%,之后SMC的CTI开始下降,下降了5.0%。

在50%湿度下,SMC材料的相对漏电起痕指数随老化时间而上升,主要是因为SMC内部存在的后固化和物理老化现象,使得SMC材料结构变得致密,从而使得其CTI值上升,在老化56 d以后由于热氧老化的破坏作用,SMC的相对漏电起痕指数开始下降;在96%湿度下,SMC的相对漏电起痕指数在老化初期由于后固化和物理老化而上升,之后由于水分子起的增塑作用,SMC吸水后,大大降低了80℃~96%RH情况下的耐漏电起痕性能。

5 热老化对环氧树脂影响

5.1 对环氧树脂微观形貌的影响

120℃老化下环氧树脂在不同阶段的SEM图见图6。从图6中可以看出,随着老化时间的增加,

环氧树脂的表面结构并没有太大的变化。

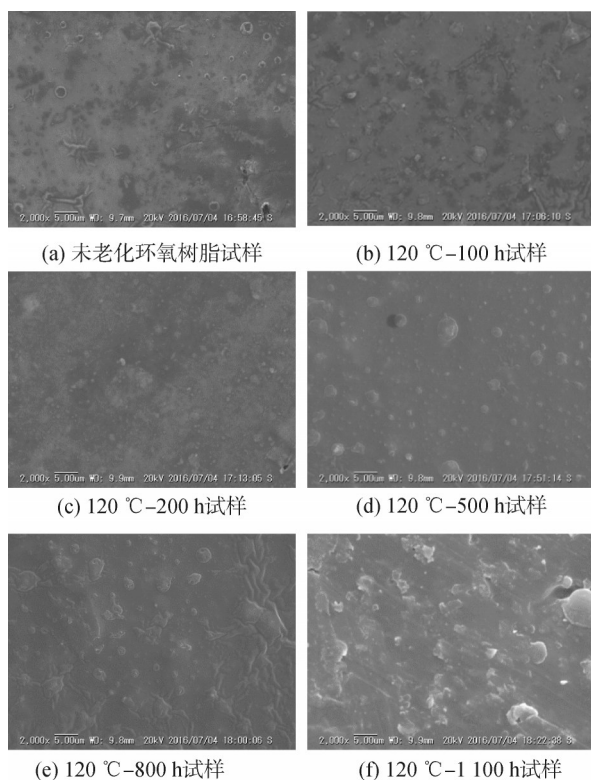


图6 120 °C下热老化对环氧树脂微观形貌的影响

Fig. 6 Micro morphology change of epoxy material under 120 °C heat aging test

5.2 对环氧树脂工频击穿场强的影响

图7(a)为环氧树脂的工频击穿场强随着老化时间的变化曲线,由图7可知:120 °C老化情况下,环氧

树脂的工频击穿场强随老化时间先上升后下降,在120 °C老化700 h时达到最大值26.25 kV/mm,相比未老化环氧树脂23.42 kV/mm增加了12.1%,之后随老化时间而下降,在老化时间为1 300 h时为25.40 kV/mm,增加了8.5%;100 °C老化情况下,环氧树脂的工频击穿场强随老化时间同样先上升后缓慢下降,在老化时间为1 000 h时达到最大值26.21 kV/mm,之后随老化时间而减小,在老化末期3 000 h时为25.37 kV/mm,仍增加了8.3%;80 °C老化情况下工频击穿场强随老化时间而增加,在老化末期时略有下降,在老化4 000 h时达到最大值26.36 kV/mm,增大了12.6%,在老化5 000 h时为26.12 kV/mm,相比未老化环氧树脂略有下降。

可见在120、100、80 °C 3个老化温度下,环氧树脂的工频击穿场强都随着老化时间先增大后减小。

5.3 对环氧树脂憎水性的影响

图7(b)为环氧树脂静态接触角随着老化温度和老化时间的变化,可以看出未老化环氧树脂的接触角为100.43°,120 °C老化整个周期内接触角最大值为105.16°,最小值为89.32°;100 °C老化整个周期内接触角最大值为109.66°,最小值为93.59°;80 °C老化整个周期内接触角最大值为107.15°,最小值为97.60°。3个老化温度下,环氧树脂静态接触角变化不大,基本都在100 °C附近波动,均保持了良好的憎水性。

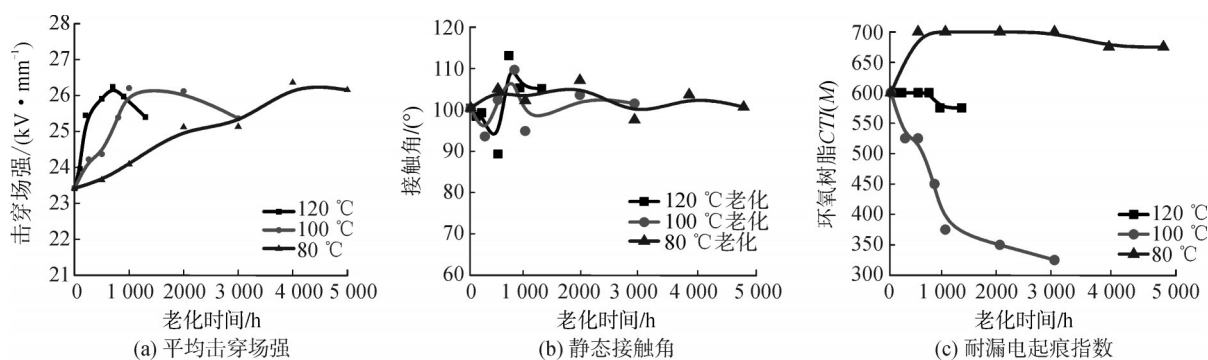


图7 热老化试验下环氧树脂理化性能的变化规律

Fig. 7 Physical and chemical properties of epoxy material under hot aging test

5.4 对环氧树脂漏电起痕性能CTI的影响

从图7(c)中可以看出,在120、100、80 °C这3个不同老化温度下,CTI(M)呈现出不同的变化趋势。120 °C老化情况下,在老化初期,环氧树脂的CTI(M)保持不变,老化900 h时开始下降至575,下降了4.2%,之后1 300 h也保持575不变;100 °C老化情况下,CTI(M)相比其他两个温度点,下降最为剧烈,其中,在老化3 000 h时,CTI(M)为325,下降了45.8%;80 °C

老化情况下,与120 °C和100 °C不同,环氧树脂的CTI(M)随着老化时间先上升至700,相比未老化环氧树脂增加了16.7%,之后在老化4 000 h时降为675,仍相比未老化环氧树脂增大了12.5%,并维持不变。

从图7(c)中还可以看出,为了保证开关柜内环氧树脂的性能不劣化,应该将开关柜的运行温度控制在80 °C以下,因为一旦达到100 °C,环氧树脂的耐漏电起痕性能会很快丧失,从而影响开关柜的正

常运行,造成开关柜故障。产生上述变化的原因主要是因为环氧树脂的玻璃化转变温度在100℃附近。

6 湿热老化对环氧树脂性能影响

6.1 对环氧树脂工频击穿场强的影响

图8(a)为湿热老化过程中环氧树脂的工频击穿场强随老化时间的变化,可以看出:80℃~50%RH老化下,环氧树脂的工频击穿场强随老化时间先是略有上升,然后下降,在老化56 d时达到最大值25.63 kV/mm,增大了9.4%;80℃~96%RH老化下,环氧树脂的工频击穿场强规律类似,在老化时间为42 d时环氧树脂的工频击穿场强达到最大值25.18 kV/mm,上升了7.5%。

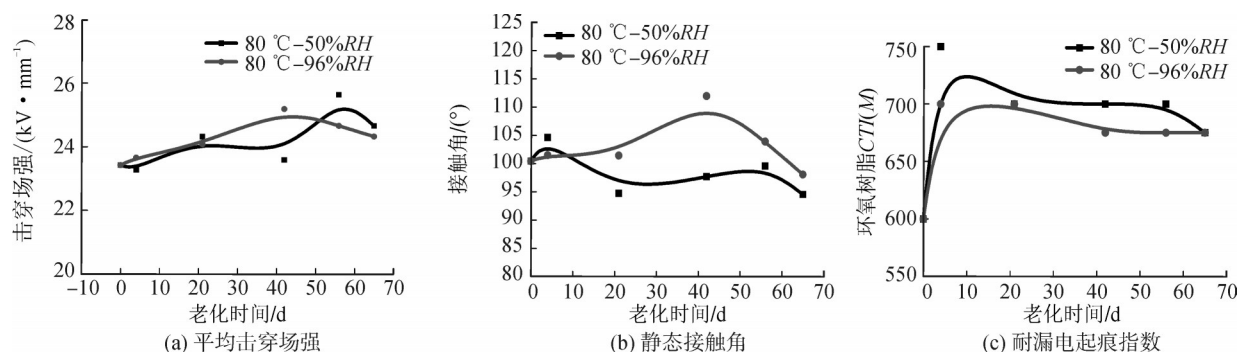


图8 湿热老化中环氧树脂理化性能的变化规律

Fig. 8 Physical and chemical properties of epoxy material under hydrothermal aging test

6.3 对环氧树脂漏电起痕性能(CTI)的影响

图8(c)为环氧树脂湿热老化过程中,耐漏电起痕指数(CTI)随老化时间的变化,由图8(c)可知:80℃~50%RH老化4 d后CTI达到最大值750,相比未老化环氧树脂增加了25%,之后开始下降,老化65 d时CTI为675,上升了12.5%;80℃~96%RH老化时与80℃~50%RH老化不同,其CTI在老化4 d达到最大值700,相比未老化环氧树脂增大了16.7%,在老化42 d时CTI降为675,并保持不变,增大了12.5%。

从图8中还可以看出在低湿度时环氧树脂的CTI值增大的更多,这主要是因为低湿度时环氧树脂存在后固化和物理老化,使得环氧树脂结构变得致密,从而增大其耐漏电起痕指数。

7 结论

文中通过对开关柜绝缘隔板材料的老化试验和理化特性分析,得到了以下结论:

1)40.5 kV开关柜绝缘隔板故障并非因绝缘隔板击穿强度降低引起,而是在湿热环境下,开关柜内SMC绝缘隔板表面的保护膜分解,降低接触角,绝缘隔板由憎水性转变为亲水性,在外施电压达到

可见在两个湿度下环氧树脂的工频击穿场强变化规律都是一样的,随着老化时间先缓慢上升后略有下降。

6.2 对环氧树脂憎水性的影响

针对不同老化时间的环氧树脂,对其进行静态接触角测试,所得结果见图8(b)。由图8可知,在两种不同湿度下,接触角随老化时间变化不大,在80℃~50%RH老化下,静态接触角最小值为94.8°,最大值为104.6°;在80℃~96%RH老化下,静态接触角最小值为98.06°,最大值为111.95°;都在100°附近波动,也均保持了良好的憎水性,因此可以看出在本老化条件下,环氧树脂憎水性不会随着老化时间发生剧烈的变化。

70 kV左右即会发生放电。

2)因环氧树脂绝缘隔板在老化后依旧保持良好的憎水性,开关柜内绝缘隔板宜采用环氧树脂材质,不宜采用不饱和聚酯玻璃纤维(SMC)材质。确需使用时,SMC绝缘隔板表面及切割面涂覆厚憎水性涂料。

3)开关柜内运行温度不超过80℃,湿度控制在75%以下。

4)采用复合绝缘方式的40.5 kV开关柜应通过凝露后的工频耐压和雷电冲击耐压试验考核。

参考文献:

- [1] Alternating-current metal-enclosed switchgear and control-gear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: DL/T404—2007[S]. 2007.
- [2] 王 隽. 中压开关柜绝缘方式和绝缘事故分析[J]. 绝缘材料, 2008, 43(3): 15-17.
WANG Jun. Analysis on insulation mode and fault of medium voltage switchgear[J]. Insulating Materials, 2008, 43(3): 15-17.
- [3] 孙 鸣,施 群. 海洋石油开采平台35 kV开关装置绝缘的参数[J]. 高压电技术, 2004, 30(12): 25-26.

- SUN Ming, SHI Qun. Insulation parameters of 35 kV Switch cabinets used at Marine petrol exploitation platform [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 30(12): 25-26.
- [4] 孙鹏程, 王帮田, 李海峰. KYN61-40.5 型开关设备工程设计选型问题探讨[J]. 电气开关, 2012(5): 61-63.
- SUN Pengcheng, WANG Bangtian, LI Haifeng. Discussion on the engineering design selection of KYN 61-40.5 switchgear[J]. Electric Switcher, 2012(5): 61-63.
- [5] 王俊杰, 王 平, 王红军. 35 kV 开关柜的防放电措施及其效果[J]. 浙江电力, 2014(12): 73-75.
- WANG Junjie, WANG Ping, WANG Hongjun. Discharge prevention measures for 35 kV switch cabinet and the effect [J]. Zhejiang Electric Power, 2014(12): 73-75.
- [6] 黎 刚, 毛文奇, 黎治宇. KYN61-40.5 型高压开关柜存在问题与对策[J]. 湖南电力, 2012, 32(4): 36-39.
- LI Gang, MAO Wenqi, LI Zhiyu. Problems and counter-measures in KYN61-40.5 type high voltage switchgear[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(4): 36-39.
- [7] 潘益伟, 陈建胜, 林 坚, 等. 一起 40.5 kV 开关柜放电的原因分析及处理[J]. 浙江电力, 2014(3): 35-37.
- PAN Yiwei, CHEN Jiansheng, LIN Jian, et al. Cause analysis and treatment on discharging of 40.5 kV Switch cabinet[J]. Zhejiang Electric Power, 2014(3): 35-37.
- [8] 黄幼如, 龚 曜, 孙云生. 10、35 kV 高压开关柜绝缘验证及其改进[J]. 中国电力, 1993(5): 51-53.
- HUANG Youru, GONG Yao, SUN Yunsheng. 10, 35 kV high voltage switchgear insulation verification and improvement[J]. Electric Power, 1993(5): 51-53.
- [9] 潘长明, 刘 刚, 熊 炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
- PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and counter-measures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [10] 王 磊, 赵现平, 董 俊, 等. 2 000 m 海拔 35 kV 开关柜母排结构安全净距试验研究[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 66-70.
- WANG Lei, ZHAO Xianping, DONG Jun, et al. Experimental study on net safety distance of 35 kV switchgear bus structure in 2 000 meters altitude[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 66-70.
- [11] 龚 曜, 石庆周, 李瑞铭. 户内 35 kV 开关设备绝缘配合的试验研究[J]. 华北电力技术, 1993(9): 3-5.
- GONG Yao, SHI Qingzhou, LI Ruiming. 35 kV high voltage switchgear experimental study of insulation coordination [J]. North China Electric Power, 1993(9): 3-5.
- [12] 孟江燕, 王云英, 赵 晴, 等. 通用不饱和聚酯加速老化失效机理研究[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(2): 65-70.
- MENG Jiangyan, WANG Yunying, ZHAO Qing, et al. Accelerated aging mechanism of Universal unsaturated polyester[J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(2): 65-70.
- [13] 高 山, 贾勇勇, 杨景刚, 等. 复合绝缘材料热氧老化中局部放电特性的实验研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(2): 49-56.
- GAO Shan, JIA Yongyong, YANG Jinggang, et al. Partial discharge characteristics study of composite insulating materials in thermo oxidative ageing[J]. Insulating Materials, 2016, 49(2): 49-56.
- [14] 屠幼萍, 孙伟忠, 岳彩鹏, 等. 固体绝缘材料热老化电气特性的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 7-13.
- TU Youping, SUN Weizhong, YUE Caipeng, et al. Research on thermal aging electrical properties of polymer materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 7-13.
- [15] 申文伟, 宋 伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
- SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge on aging characteristic of HTV silicone rubber material[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-7.
- [16] LEWIS T J. Interfaces are the dominant feature of dielectric at the nanometric level[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(5): 739-753.
- [17] 夏岩松, 骆立实, 李永东, 等. 划痕类微孔对交联聚乙烯—硅橡胶界面电痕破坏的影响[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 109-114.
- XIA Yansong, LUO Lishi, LI Yongdong, et al. Distribution characteristics of tracking failure on XLPE-silicon rubber interface with micro-cavity[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12): 109-114.
- 刘 衍(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事开关设备运行管理及过电压研究。
- 尹桂来(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事绝缘材料使用研究。
- 龙国华(1992—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为电力系过电压、电磁兼容等。
- 周求宽(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力变压器状态诊断及试验研究。