

DOI: 10.7652/xjtuxb201704006

针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响

崔彦捷¹, 彭平², 曹沛¹, 祝令瑜¹, 邓军波¹, 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家电网湖南省电力公司电力科学研究院, 410007, 长沙)

摘要: 针对油浸绝缘纸板在长期局部放电应力作用下的劣化问题,在针板电极下对油浸绝缘纸板进行了长期局部放电试验,对绝缘纸板的局部放电特性及表面形态的理化特性进行了测量和分析。其中,记录了长期局部放电发展过程中的局部放电相位分布(PRPD)图谱,对处于不同放电阶段的纸板进行了表面形貌、化学基团的观测,研究并给出了放电对纸板表面理化特性的影响机理。结果表明:油浸绝缘纸板的长期局部放电发展经历4个阶段,不同阶段放电由表面向内部发展,对纸板的损伤程度不同;局部放电会造成纸板中纤维的烧蚀及断裂,产生孔洞并不断扩大,形成气泡层;气泡层中不断发生的气体放电生成自由基,这些自由基会与纤维束表面的基团反应并改变其微观形态,促使放电向内不断发展;最终纸板内部堆积大量气泡,形成贯穿的气泡柱并导致纸板击穿。长期局放应力下绝缘纸板的微观结构破坏是导致纸板失效的重要原因,而PRPD图谱的变化是其在局部放电特性上的反映。

关键词: 油浸绝缘纸板;局部放电;表面形态

中图分类号: TM215.6;TM851 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0037-08

Influence of Partial Discharge on Oil-Impregnated Insulation Pressboard Surface

CUI Yanjie¹, PENG Ping², CAO Pei¹, ZHU Lingyu¹, DENG Junbo¹, JI Shengchang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: To study the deterioration of oil immersed pressboard under long-term partial discharge stress, experiments were performed in needle-plane electrode system, and the characteristics of partial discharge and both physical and chemical properties of pressboard surface were measured. Phase-resolved partial discharge (PRPD) patterns in developing process of long-term partial discharge were recorded, and surface morphology and chemical groups of the pressboard in different stages were observed. The influencing mechanism of partial discharge on physical and chemical properties of the pressboard surface was also discussed. The results show that the development of long-term partial discharge (PD) of oil-immersed insulating pressboard undergoes four stages. In different stages, discharge progresses from surface to inside and the damage degree of the paperboard is different. Partial discharge can induce fiber ablation and fracture, resulting in continually expanding holes and bubble layers. Gaseous discharge in the bubble layer

收稿日期: 2016-08-01。 作者简介: 崔彦捷(1991—),男,博士生;汲胜昌(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577150)。

网络出版时间: 2017-02-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170209.1730.002.html>

generates free radicals, which react with the clusters on the fiber bundle surface and change its microscopic morphology to urge the discharge forward. A bubble column due to accumulation of large number of bubbles inside leads to pressboard breakdown. Damage of the microstructures of the insulation paperboard under long-term partial discharge stress is the main cause of pressboard failure, and the damage is reflected by changing PRPD pattern.

Keywords: oil-impregnated insulation pressboard; partial discharge; surface morphology

油浸绝缘纸板在变压器中担负着主绝缘及机械固定不同电位导体的任务,在正常运行的电力设备中,其同时承受着强电场应力以及机械应力,并在这些应力的作用下不断劣化^[1]。此外,由于正常运行的变压器内部温度较高,绝缘纸板中的纤维会不断裂解,进一步恶化设备内部绝缘状态,增加了设备故障的风险。在上述因素中,强电场引发的局部放电是引起绝缘纸板劣化的重要原因之一,对此国内外学者围绕油纸绝缘系统的局部放电特性、形成机理、检测方法及其影响因素等开展了很多研究工作,而长期局部放电对绝缘纸板表面形态侵蚀特性的研究尚不多见。开展此项工作对分析绝缘纸板在长期局部放电应力作用下的老化机理、解释绝缘纸板各项特性参数的变化原因以及预测绝缘纸板的剩余绝缘强度等具有十分重要的理论意义和实际价值。

固体绝缘在长期局部放电作用下会不断劣化,其各项性能参数也会降低^[2]。随着电压等级的逐渐提升,电力设备内部绝缘结构的设计不断改进,其电场分布越来越复杂,极不均匀电场区域出现的可能性有所上升,固体绝缘材料在强电场引发的局部放电作用下的劣化损伤情况也表现的更为明显。国内外开展较多的是研究云母、环氧以及交联聚乙烯、聚乙烯等固体绝缘材料在局部放电作用下的材料损伤和性能劣化机理及影响因素^[3-11]。文献[12-15]最早对绝缘纸类材料在不同应力下的老化情况进行了分析,指出温度、强电场、机械应力均会导致绝缘纸板老化,而不均匀的应力分布会导致绝缘纸板老化速度不一,部分区域发生与正常老化不同的劣化现象。文献[16]研究了局部放电对绝缘纸性能的影响,认为短时局部放电对绝缘材料的影响不大。文献[17-20]提出放电过程中纸板的劣化主要体现在活性气体与纤维素的反应及纤维素的烧蚀。此外,材料表面受侵蚀后会生成羧酸与含羰基的物质,使酸值变高,材料的抗氧化性能降低。以往的研究主要集中于油浸纸板中气隙缺陷引发的局部放电对纸板的劣化作用,而对于以针板电极为代表的金属突出物缺陷引发的局部放电对油浸绝缘纸板表面微观

结构的劣化作用及其机理的研究较少。

本文以基于尖板电极的油浸绝缘纸板试验模型为研究对象,对其进行长期恒压下的局部放电试验,研究在局部放电作用下绝缘纸板表面形态及化学性质的变化过程,并讨论局部放电对绝缘纸板的劣化机理,分析绝缘纸板在局部放电作用下表面的变化规律及影响因素,从而为深入研究局部放电对绝缘纸板的劣化机理提供了依据。

1 试验方法及测量

1.1 局部放电试验模型

试验采用常规的25#变压器油以及厚度为0.5 mm绝缘纸板,其中绝缘纸板的制备过程如下:

(1)按图1所示的尺寸对绝缘纸板进行剪裁,并采用7 000目砂纸对纸板边缘进行打磨,消除可能导致电场畸变的突出毛刺等;

(2)将绝缘纸板放入变压器油中真空浸渍,并通过加热祛除纸板与油中的水分;

(3)将绝缘纸板置于设计的油纸绝缘尖板缺陷试验装置中。试验模型完全浸在油中,避免脱离容器直接暴露在空气中。

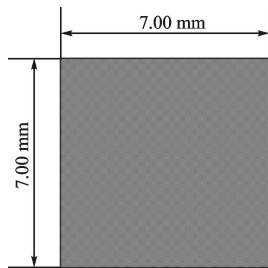
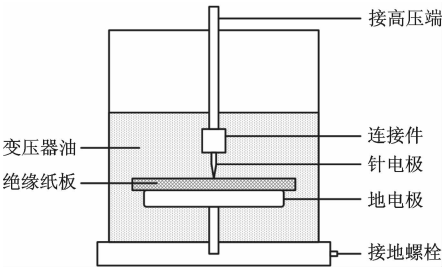


图1 绝缘纸板试验模型

所设计制作基于针板缺陷的油纸绝缘局部放电试验装置如图2所示。该装置将亚克力管与铝排用环氧树脂粘接,构成试验油杯。放电模型中的电极材料选择黄铜;针电极为电机唱针,其尖端曲率半径约为70 μm ,试验时安装于特制的连接件上,并通过金属导杆与高压引线连接。试品置于针板两电极之间,针电极紧靠在绝缘纸板表面上。为防止试验时连接件起晕,变压器油的液面高度高于连接件。



(a)油杯示意图



(b)油杯实物图

图 2 油纸绝缘结构局部放电模型试验油杯

由于固体绝缘材料的不可恢复特性、绝缘纸板不透光以及部分样品测试方法为破坏性测试等原因,不采取进行一段时间电老化后取出绝缘纸板测试后再进行加压试验的研究方法,而是采用分次进行但每次电老化时间不同的方法。试验模型的平均起晕电压为 15 kV,击穿电压在 35~42 kV 之间。本文选取了 25 kV 作为试验电压,在该电压下放电能稳定存在并发展,同时不致过快击穿。试验过程中利用基于脉冲电流法的 PDCheck 检测系统采集脉冲放电信号。

1.2 表面形态与化学性质测量

由于绝缘纸板在试验时浸泡在油中,而绝缘油会对各项表面形态的分析结果造成一定影响,因此在进行表面测试前均利用丙酮对绝缘纸板进行预处理,萃取出其中的变压器油后,再进行各项表面测试。为确保测试的准确性,先采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)对绝缘纸板表面的化学基团进行测量,然后再分别利用扫描电镜(SEM)与共聚焦显微镜(CLSM)分析绝缘纸板表面的形貌。其中,扫描电镜可以获取绝缘纸板表面的特征,且分辨率较高,然而无法直接获得表面放电烧蚀深度等参数,而共聚焦显微镜可以对绝缘纸板表面进行三维观测,能直接获取表面粗糙度与烧蚀深度。

2 试验结果及分析

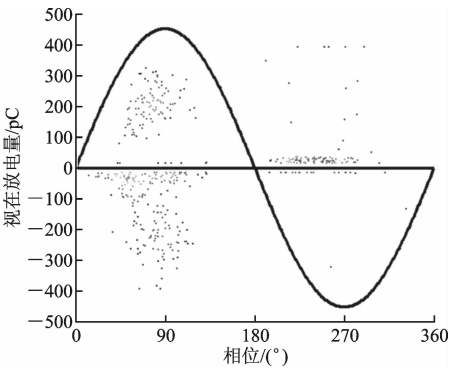
2.1 局部放电试验结果

当外施电压为 25 kV 时,由 PDCheck 测得的局部放电相位分布(PRPD)谱图如图 3 所示。根据图 3 中 PRPD 谱图的特征,将油浸绝缘纸板的局部放电发展过程划分为 4 个阶段:起始期,发展期,停滞期与爆发期。

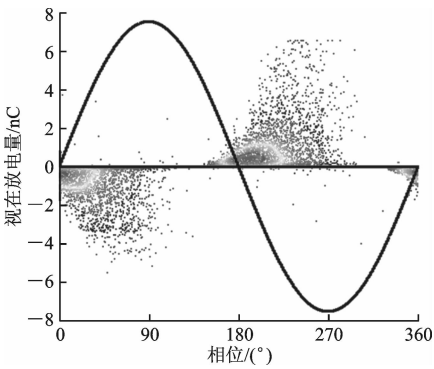
图 3 中不同阶段的 PRPD 谱图表现出不同的特征,原因解释如下。起始期放电发生在尖端附近的油中,以油中杂质放电、场致电离为主^[21],因此主要集中在电压幅值最高的 90°与 270°附近,放电量较小,没有明显的分布规律。

当油中尖端附近的气泡或杂质集聚到一定程度后,放电开始发展至绝缘纸板表面,并进入发展期。由于尖端附近的电场强度较高,因此绝缘纸板表面会出现沿面放电,主要表现为纤维素的烧蚀。在这一阶段,放电脉冲集中在工频电压正半周的上升沿与负半周的下降沿,放电量最高可达 6 nC,高放电量脉冲出现频次也较多,局部放电中烧蚀放电对绝缘纸板损伤较大。

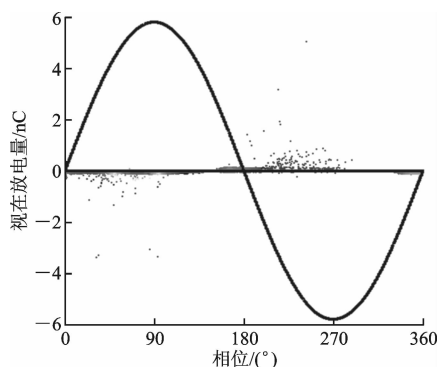
当放电开始发展至绝缘纸板内部时,由于局部



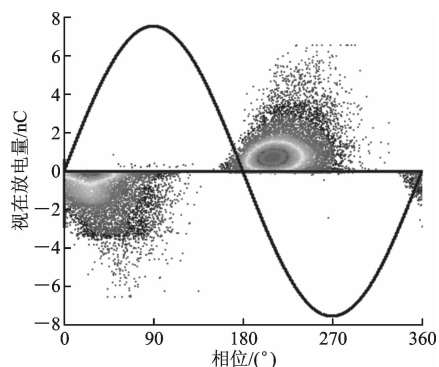
(a)起始期



(b)发展期



(c) 停滞期



(d) 爆发期

图3 油浸绝缘纸板局部放电不同发展阶段的 PRPD 图

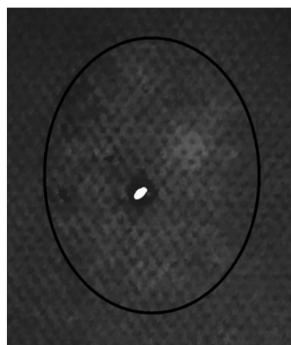
放电使绝缘油分解、烧蚀绝缘纸板纤维素等作用,在纸板内部会产生大量气泡,如图4所示。绝缘纸板是由多张薄纸经压制形成的,层间存在着空隙;同时绝缘纸板由纤维组成,内部存在着许多缝隙。放电产生的气泡会聚集在缝隙中,并从绝缘纸板较薄的位置溢出产生气泡柱。聚集在缝隙中的气泡会形成带有一定均匀电场效果的气泡层,使放电停止发展并稳定一段时间。由于该段时间内的放电各项特征量几乎不变,同时放电量减小,因此称为停滞期。在停滞期,放电脉冲分布相位与发展期相同,放电量明显减小,主要集中在1 nC以下,偶有较高幅值的放电脉冲,出现频次不多。

在放电停滞期内,气泡层内会产生大量带电粒子并不断撞击纸板中的纤维素,使其断裂;这些带电粒子一般具有强氧化性,可能使纤维素迅速氧化变质,改变电场分布情况,使放电向下发展并再次进入了发展期。由于绝缘纸板内部结构复杂,气泡层可能出现的地方较多,因此停滞期与发展期会不断交替出现。当放电发展至纸板下表面附近时,此时在被烧蚀的纤维素末端附近电场极强,放电量也极大,气泡不断产生并向上涌出,形成了贯通性的气体通道,放电进入了最后阶段。在放电爆发期中,放电分

布脉冲依然集中在正半周的上升沿与负半周的下降沿处,最大放电量与发展期内的相似,其出现频次远高于发展期。进入放电爆发期一定时间后,绝缘纸板发生贯通性的击穿,彻底丧失绝缘性能。



(a) 放电过程中的气泡柱



(b) 击穿后可见纸板内部形成的气泡层

图4 油浸绝缘纸板局部放电中形成的气隙情况

由 PRPD 图谱的分析可知,油纸绝缘局部放电的发展过程较为复杂,在不同阶段不同类型的局部放电占主导地位,并依据不同的机理对绝缘纸板起到不同的破坏作用。

2.2 对绝缘纸板表面形态的影响

2.2.1 扫描电镜观测下绝缘纸板表面形态 以 PRPD 图谱为依据,分别选取具有代表性的不同劣化阶段的绝缘纸板进行表面形态观测。由于放电爆发期时间较短,往往出现爆发期时很快就发生击穿,因此未能观测到爆发期下绝缘纸板的表面形态。

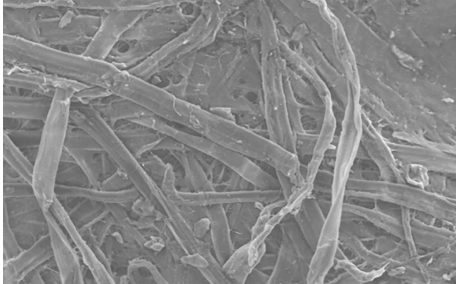
图5所示为不同劣化阶段的绝缘纸板表面形态,从中可以看出,新的绝缘纸板中的纤维素表面光滑,纤维素链完整,基本没有脱落的纤维素碎屑或断链情况的出现,此时绝缘纸板各项性能良好。

放电起始阶段的30 min后,纸板表面尖端区域附近的纤维素开始出现断裂现象,纸板表面开始出现凹坑使电场分布改变,在凹坑中积聚的气泡对电场起到一定的均匀作用。

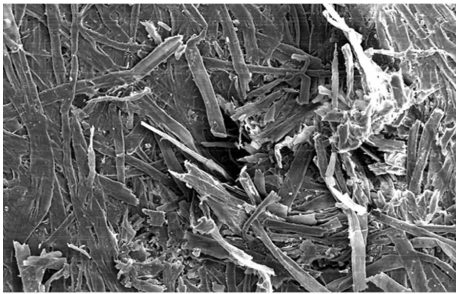
当放电继续演变至发展期时,绝缘纸板表面纤

纤维素断裂明显增多,同时纸板表面的凹坑向下发展为一深洞,直径约在 $70\text{ }\mu\text{m}$ 左右,恰与针尖曲率半径相同。该深洞的形成是由于针尖的不断放电作用而产生,但又由于气泡的均匀电场作用而难以向两侧发展,只能在电场作用下不断向下发展。

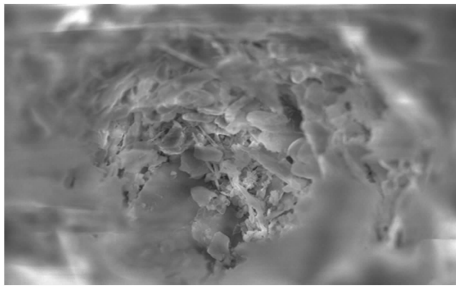
当放电进入停滞期时,绝缘纸板表面纤维素依然有断裂的现象,同时也出现了分岔的劣化现象。与未进行试验的纸板中纤维素相比,停滞期的纤维素表面坑洼不平,同时两侧出现了一些细丝。这应



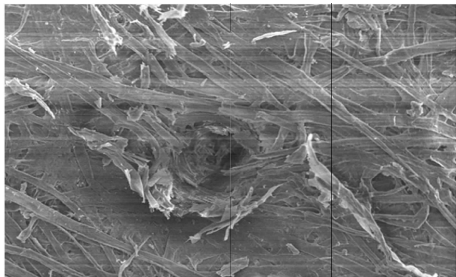
(a)新纸板



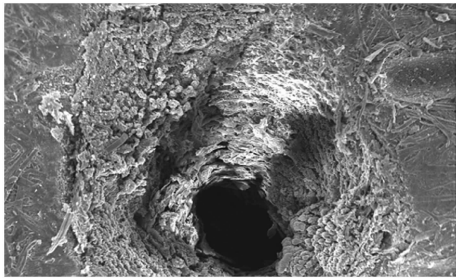
(b)起始期



(c)发展期



(d)停滞期



(e)击穿后

图 5 不同劣化阶段的绝缘纸板表面扫描电镜图

该是由于停滞期中气泡层不断放电,形成了大量带电离子。这些带电离子实质上是具有强氧化性的自由基,如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}\cdot$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{CH}_3$ 等。这些自由基具有强氧化性,很容易与纤维素分子中的氢发生反应,如羟基与氢反应生成水,或甲基与氢反应生成甲烷等。由于纸板中的纤维素实际上是由若干根纤维素通过氢键结合的纤维素束,因此在自由基破坏了氢键后,纤维素束会分裂,形成单根的纤维素并使其表面变得坑洼不平。

最后,形成贯穿性通道后,绝缘纸板表面会出现较大的空洞,直径在毫米量级,长于深洞或凹坑的直径。同时,空洞内壁上出现大量粉末状或球状的碳化痕迹,反映了击穿后流过的大电流对纸板会产生强烈的热作用,直接改变纸板的化学成分,使其丧失绝缘性能。

2.2.2 共聚焦显微镜观测下绝缘纸板表面形态

图 6 所示为共聚焦显微镜下不同劣化阶段的绝缘纸板表面形态图。未加压时绝缘纸板表面很少有坑洞,图 6a 上的两个凹坑为制造时压紧的痕迹,其尺寸远大于放电形成的凹坑。图 6b 中心所示即为放电形成的凹坑,其深度约为 $50\text{ }\mu\text{m}$,对绝缘纸板的破坏不算显著。当放电演化至发展期与停滞期时,凹坑变成深洞,其深度也由 $50\text{ }\mu\text{m}$ 发展至 $200\sim300\text{ }\mu\text{m}$ 之间,但是宽度并没有明显的变化。由图 6d 可以看出,放电停滞期时,内部气泡层对纸板会有侵蚀,在不同位置侵蚀的程度不尽相同。由于气泡层对电场的均匀作用,放电几乎不向下发展,而是在气泡层四周不断扩大放电范围。可能由于不同的侵蚀程度导致电场畸变程度也有所变化,诱发了停滞期与发展期之间的转变过程。最终到达击穿后,放电形成的空洞深度达到最大的 $500\text{ }\mu\text{m}$,纸板完全击穿,纸板形貌如图 6e 所示。此时纸板除了放电形成的空洞外,在其附近以细长线为代表的小空洞明显增多。

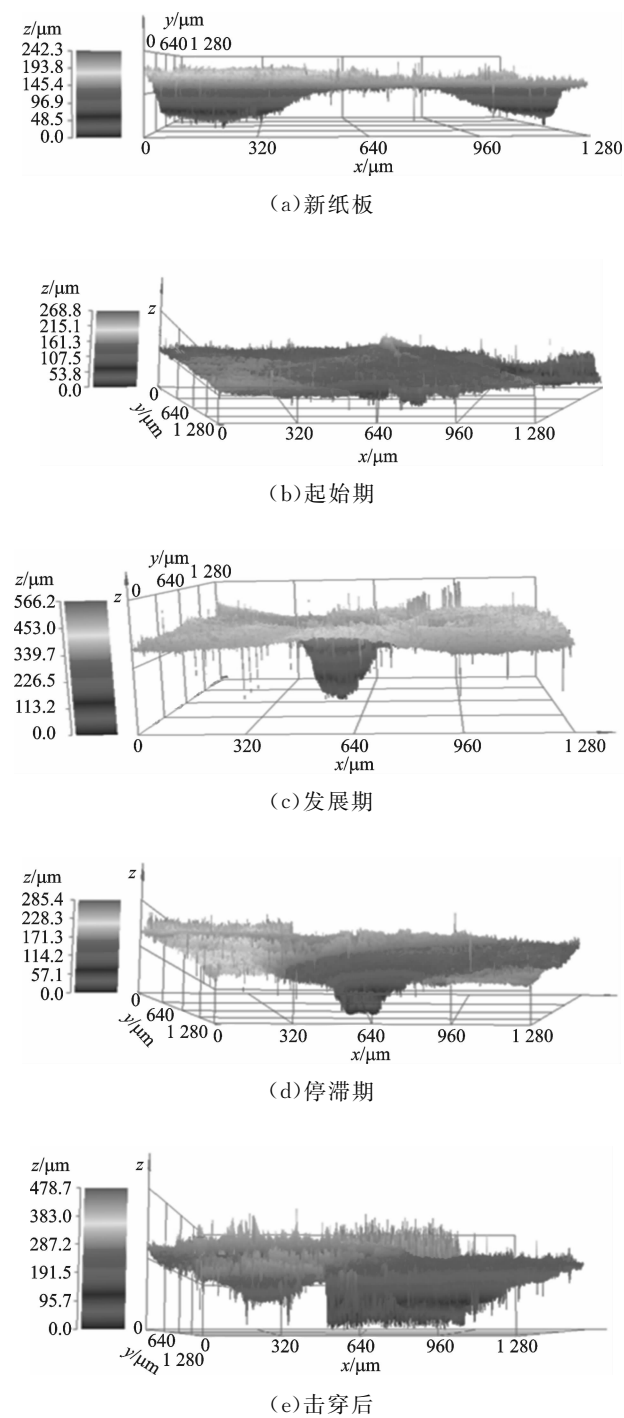


图 6 不同劣化阶段的绝缘纸板表面共聚焦显微镜图

2.3 对绝缘纸板表面化学性质的影响

在局部放电过程中,绝缘纸板表面材料的化学性质会发生变化。本文采用傅里叶红外光谱仪对绝缘材料表面进行检测,研究局部放电对绝缘材料表面基团的影响规律。图 7 所示为不同劣化情况下的绝缘纸板表面傅里叶红外光谱图。

由图 7 可以看出,老化对绝缘纸板表面红外光谱特性的影响主要集中在 $2\,750\sim3\,000\text{ cm}^{-1}$ 之间

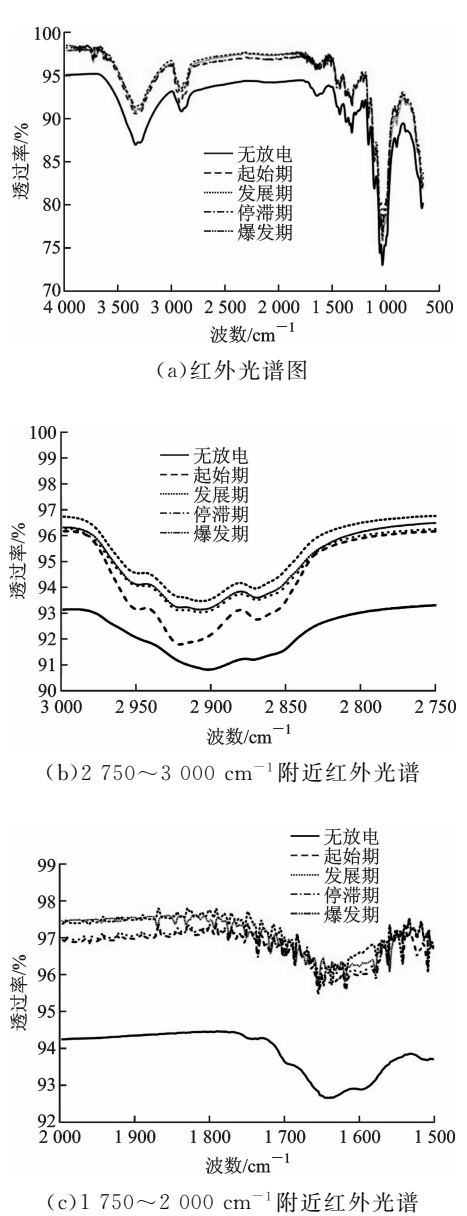


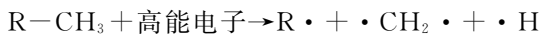
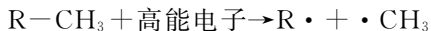
图 7 不同劣化阶段的绝缘纸板表面的红外光谱

以及 $1\,750\sim2\,000\text{ cm}^{-1}$ 之间。经过局部放电损伤后,在 $2\,750\sim3\,000\text{ cm}^{-1}$ 之间产生了较强的吸收峰,根据标准图谱^[22]可知,该处吸收峰主要由醛类以及缔合的羟基(如 $-\text{COOH}$)构成。这表明经过放电作用后,绝缘纸板中的纤维素内葡萄糖单元上的羟基被氧化为醛或酸,导致其内部氢键作用有所减弱,抗氧化性能也会有所下降。由于氧化过程中会生成水分子,因此羧酸有可能借助于水分子的质子化过程催化纤维素的解离,加速劣化过程。 $1\,750\sim2\,000\text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰主要由 $\text{C}=\text{O}$ 键构成,表明老化后羟基不但被氧化生成了醛或羧酸,甚至发生了脱水缩合过程,形成了羰基,从而使纤维素结构发生了改变。

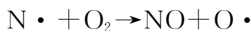
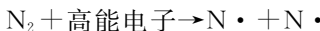
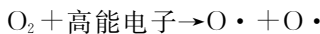
3 局部放电破坏绝缘纸板的机理

在局部放电过程中,油浸绝缘纸板内部的纤维素一直承担着局部放电对其产生的物理、化学作用,并不断发生着劣化。其中既有局部放电产生的高能粒子撞击使纤维素断裂的物理劣化过程,也有局部放电产生的自由基与纤维素反应使其化学性质发生变化的化学劣化过程,甚至还有局部放电沿面发展时直接烧蚀纸板表面的综合劣化过程。不同的劣化过程对绝缘纸板绝缘能力的破坏性也有所不同,物理劣化过程使绝缘纸板表面出现深洞或凹坑,这为反应生成的气泡停留在绝缘纸板内部提供了空间;生成的气泡中不断发生放电形成自由基,与邻近的纤维素发生化学反应使其裂解或变性,电场畸变出现新的高场强区域,使放电向下不断发展。当放电向下发展至一定程度后,绝缘纸板内部出现贯穿性的空洞,此时相连的气泡层会引发巨大电流直接烧蚀洞壁使其碳化,形成导电通道,油浸纸板最终丧失绝缘性能,引发故障。

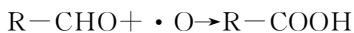
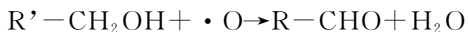
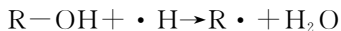
新生成的自由基主要由绝缘油分解而成,其中含有大量的 $\cdot\text{CH}_3$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{CH}_2$ 等活性粒子,其主要形成方式为^[17-18]



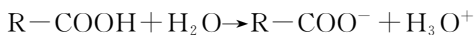
同时,油中残存的部分空气中的氮、氧分子也会在高能电子作用下发生分解,形成活性粒子,主要形成方式为



以上活性离子形成后,会与纤维素中的羟基反应,形成酮、醛、羧酸等氧化物质,这一过程还会释放出水,反应式如下



值得指出的是, $\text{R}-\text{COOH}$ 类型的羧酸可以与水发生质子化过程,生成水合氢离子,加速纤维素的裂解过程



以上反应式可以归结为局部放电生成的含氧自由基具有强氧化性,含氢自由基具有强还原性;强氧化性自由基会氧化纤维素中的羟基直至其达到最终的氧化态,羧酸;含氢自由基会与羟基反应生成水。

这些反应的生成物在绝缘纸板内部会形成大量水合氢离子,极大地加快了绝缘纸板的老化速率。由于这些反应会消耗羟基,而羟基是纤维素束形成氢键的关键,因此随着反应的进行,纤维素束本身也开始出现裂解,形成很多丝状纤维,改变了电场分布。

4 结 论

(1)局部放电作用下绝缘纸板表面在放电不同阶段会依次出现凹坑、深洞直至最后的贯穿性空洞等不同形态,与此同时在放电点附近的纤维会发生断裂或烧蚀,产生的纤维素碎屑与一部分气泡会停留在坑洞中,并影响纸板内部电场分布。

(2)在放电停滞期时,绝缘纸板表面的纤维素中的羟基会与局部放电生成的自由基不断反应,生成酮、醛或羧酸,在这一过程中还会生成水分子;由于自由基、羧酸电离出的水合氢离子与纤维素反应以及放电造成的烧蚀都会使纤维素表面出现分岔或坑洼,引发新一轮的放电发展过程,直至最终击穿。

(3)局部放电对绝缘材料的损伤主要体现在高放电量的沿纤维束表面的放电,起始阶段的油中放电对纸板的损伤较小。因此,在现场的检测中,应更关注局部放电量的大小,当油纸绝缘类设备中连续出现高放电量脉冲时,意味着设备的绝缘状况处于危险状态,可能发生击穿。

参考文献:

- [1] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
 - [2] BOGGS S A. Partial discharge: overview and signal generation [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1990, 6(4): 33-39.
 - [3] SHIELDS A J, KEMP I J. Degradation and breakdown of mica under partial discharge stressing: transverse discharges [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2000, 147(3): 105-109.
 - [4] HEPBURN D M, KEMP I J, SHIELDS A J, et al. Degradation of epoxy resin by partial discharges [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2000, 147(3): 97-104.
 - [5] 郝艳捧, 谢恒堃. 红外光谱法研究运行23年大电机定子绝缘中环氧的老化机理 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 19-23.
- HAO Yanpeng, XIE Hengkun. Degradation behavior of epoxy in stator insulation of large generators in

- service for 23 years based on infrared spectrometric [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 19-23.
- [6] 郝艳捧, 谢恒堃. 基于热重和红外光谱分析研究大电机定子绝缘中环氧的老化过程 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 15-19.
- HAO Yanpeng, XIE Hengkun. Degradation behaviour of epoxy in stator insulation based on thermogravimetry and infra-red spectrometry [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 15-19.
- [7] 郝艳捧, 王国利, 高乃奎, 等. 大电机环氧云母绝缘动态力学老化特征量的研究 [J]. 电工电能新技术, 2003, 22(1): 52-55.
- HAO Yanpeng, WANG Guoli, GAO Naikui, et al. Application of dynamic mechanical analysis to stator insulation diagnosis [J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy, 2003, 22(1): 52-55.
- [8] BOZZO R, GEMME C, GUASTAVINO F, et al. Aging diagnosis of insulation systems by PD measurements extraction of partial discharge features in electrical treeing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1998, 5(1): 118-124.
- [9] WU K, SUZUOKI Y, MIZUTANI T, et al. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: II Tree growth affected by PDs [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2000, 33(10): 1197-1201.
- [10] WU K, SUZUOKI Y, MIZUTANI T, et al. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: III PD extinction and re-growth of tree [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2000, 33(10): 1209-1218.
- [11] 吴锴, 秦楷, 孙常浩, 等. 电负性气体对局部放电特性的影响 [J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1372-1378.
- WU Kai, QIN Kai, SUN Changhao, et al. Effect of electronegative gas on partial discharge characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1372-1378.
- [12] EMSLEY A M, STEVENS G C. Kinetics and mechanisms of the low-temperature degradation of cellulose [J]. Cellulose, 1994, 1(1): 26-56.
- [13] EMSLEY A M, STEVENS G C. Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 1994, 141(5): 324-334.
- [14] EMSLEY A M, XIAO X, HEYWOOD R J, et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers: part 3 Effects of oxygen and water on ageing in oil [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2000, 147(3): 115-119.
- [15] EMSLEY A M, HEYWOOD R J, ALI M, et al. On the kinetics of degradation of cellulose [J]. Cellulose, 1997, 4(1): 1-5.
- [16] 王晓蓉, 胡龙龙, 张冠军, 等. 局部放电对绝缘纸性能的影响 [J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 9-10.
- WANG Xiaorong, HU Longlong, ZHANG Guanjin, et al. Effect of PD on the insulating paper and press-board [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 9-10.
- [17] 廖瑞金, 严家明, 杨丽君, 等. 局部放电对油浸绝缘纸表面损伤特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 129-137.
- LIAO Ruijin, YAN Jiaming, YANG Lijun, et al. Characteristics of partial discharge-caused surface damage for oil-impregnated insulation paper [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 129-137.
- [18] 严家明, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 油浸绝缘纸局部放电损伤产物分析 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 184-191.
- YAN Jiaming, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Analysis of damage products of oil-impregnated insulation paper caused by partial discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 184-191.
- [19] YAN Jiaming, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Product analysis of partial discharge damage to oil-impregnated insulation paper [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(13): 5863-5870.
- [20] YAN Jiaming, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Measurements and analysis of surface damage on oil-impregnated insulation paper caused by partial discharge [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(5): 055703.
- [21] 岳华山. 油纸绝缘针板放电发展过程的试验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010: 21-39.
- [22] 胡皆汉. 实用红外光谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 298-308.

(编辑 杜秀杰)