

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.02.018

热压温度和压力对芳纶绝缘纸介电性能的影响

马 婕, 史 晟, 黄 猛, 齐 波, 李成榕

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 为深入研究芳纶绝缘纸热压过程对其介电性能的影响,文中制备了不同热压温度和热压压力的芳纶绝缘纸,测试了其紧度和介电性能,并结合扫描电子显微镜进行微观形貌分析。研究表明,在热压温度为220~260℃,压力为8~16 MPa范围内,随热压温度及压力的提升,绝缘纸介电常数受到结晶度和纸中孔隙的影响,整体呈现小幅度上升趋势;交流击穿强度受到纸中孔隙的影响,随热压参数的提升而不断提高并趋向稳定。热压过程中,温度和压力协同作用于绝缘纸,其中温度对交流击穿强度的影响较大。

关键词: 芳纶绝缘纸; 介电常数; 击穿强度; 热压

Influence of Hot Pressing Temperature and Pressure on Dielectric Performance of Aramid Insulating Paper

MA Jie, SHI Sheng, HUANG Meng, QI Bo, LI Chengrong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For deeply studying the influence of hot pressing process on the dielectric performance of aramid insulating paper, the aramid insulating paper with different hot pressing temperatures and pressures is prepared, its compactness and dielectric performance are tested, and the micro morphology analysis is performed by scanning electron microscope. The research results show that when the hot pressing temperature is within 220-260℃ and the pressure is within 8-16 MPa, with the increase of hot pressing temperature and pressure, the dielectric constant of the insulating paper shows overall a small rise trend due to the influence of crystallinity and pores in the paper. The AC breakdown strength, due to the influence of the pores in the paper, improves continuously with the increases of hot pressing parameters and tends to be stable. In the hot pressing period, temperature and pressure act together on the insulating paper, in which the influence of temperature on the AC breakdown strength is larger.

Key words: aramid insulating paper; dielectric constant; breakdown strength; hot pressing

0 引言

随着中国未来电网朝高电压、大容量发展,以电力变压器为主的油纸绝缘问题备受关注^[1-6]。芳纶绝缘纸具有优异的耐高温特性、电绝缘性能和机械性能,应用于电力变压器中可提高变压器的绝缘性能和使用寿命^[7-12],作为油浸式变压器中绝缘纸的潜在替代材料。

芳纶绝缘纸以芳纶短切纤维、芳纶沉析纤维为

原料,通过湿法成型以及热压等工艺制备而成。短切纤维作为骨架材料,均匀分散在纸张中,沉析纤维起到填充和粘结的作用^[13],两种纤维按照一定比例混合抄造,在高温高压条件下,共同组成了“钢筋混凝土结构”。在热压过程中,沉析纤维以及短切纤维表面受热软化,纤维之间结合力增加,纤维连接更加紧密。因此,芳纶绝缘纸热压过程中温度和压力的改变对绝缘纸结构有较大影响,将直接影响其介电性能。

收稿日期:2024-09-12; 修回日期:2024-11-17

基金项目:北京市自然科学基金(3212035)。

Project Supported by Beijing Natural Science Foundation(3212035).

热压技术为纤维抄造成型后最为关键的环节, 由于技术保密问题, 国外针对热压技术公开发表的文献并不多^[14]。杜邦公司发表的一些专利中提及芳纶纸的热压工艺^[15-17], 为芳纶纸热压过程分析提供了一定指导意义。中国从20世纪70年代以来开展对芳纶纸的研制工作, 目前烟台泰和新材、上海圣欧集团等公司已实现芳纶纸的工业化生产, 相关研究院校及研究所对芳纶纸的制备及结构开展了研究, 陆赵情^[18]等人发现热压对纸张的性能影响较大, 热压可使纤维之间结合力增强, 并使芳纶纸的机械性能得到较大提升^[19]。Zhao H等人^[20]通过对纤维进行分子质量及结晶度的测量, 发现较低的结晶度和较宽的分子量分布范围是导致国产芳纶纸机械性能低的主要原因。李金宝等^[21]研究了热压温度和压力对芳纶纸机械及耐压强度的影响, 芳纶纸的耐压强度随温度及压力的增加, 均呈现先上升后下降的变化。杨兵^[22]等人利用正交试验, 分析了热压过程中各参数对绝缘纸机械性能的影响程度。

现有关于芳纶纸热压的研究大多集中在对纸张的机械性能和纸页结构的分析上, 缺少了制备过程对电气绝缘方面的研究。而芳纶绝缘纸作为优异的绝缘材料, 未来在电气绝缘领域应用广泛, 因此, 有必要开展对芳纶绝缘纸制备工艺与介电性能之间的影响规律探究。

文中利用实验室搭建的合成纤维绝缘纸制备平台, 研究间位芳纶绝缘纸的介电性能随热压工艺的变化规律, 将芳纶短切纤维和沉析纤维混抄, 分别按照不同热压温度及压力进行热压, 对所得的绝缘纸试样的介电性能进行测试, 并通过扫描电子显微镜观测试样的微观形貌, 讨论了热压参数对芳纶绝缘纸的微观形貌及介电性能的影响。

1 试验

1.1 绝缘纸试样制备

所选用沉析纤维打浆度为55.3 SR, 短切纤维长度为6 mm, 通过实验室合成纤维绝缘纸制备平台制备绝缘纸试样, 步骤为: ①设置纸张定量为90 g/m², 按照短切纤维质量与沉析纤维质量比为1:1.5的比例计算并称取纤维; ②利用纤维疏解机对沉析纤维和短切纤维进行疏解分散得到纸浆; ③将纸浆通过纸页成型器进行制备抄造, 得到绝缘纸湿纸页, 并进行真空干燥; ④最后将绝缘纸转移到热压设备中, 按照一定的热压温度和压力对芳纶绝缘纸进行热压, 得到绝缘纸, 将芳纶绝缘纸置于密封袋内密封保存, 供后续实验使用。

芳纶沉析纤维为无定形结构, 无定形芳纶高聚物分子的玻璃化转变温度约在280 ℃, 考虑到压力

的作用, 低于玻璃化转变温度时, 沉析纤维也能发生再结晶现象, 而过高的温度和压力会使芳纶大分子的化学键破坏, 相对分子质量下降^[23], 故在试验过程中, 将热压温度设置为220~260 ℃, 压力设置为8~16 MPa。整个制备过程中, 除热压温度、热压压力以外, 其余工艺参数及步骤均保持一致。

1.2 油浸绝缘纸试样制备

将制备好的绝缘纸裁剪成合适的尺寸大小, 置于105 ℃的真空干燥箱内烘干24 h。用经过过滤处理的变压器油对干燥的绝缘纸进行浸油处理, 置于90 ℃的真空干燥箱内真空浸渍24 h, 温度降为常温时再进行使用。

1.3 测试方法

1.3.1 介电常数测试

试样尺寸为10 cm×10 cm, 采用Haefely 2830/2831精密液固体介电分析仪进行介电常数的测量, 施加电压为1 kV, 待示数稳定后取值, 每种试样测量3次, 结果取平均值。

1.3.2 交流击穿特性测试

按照标准GB/T 1408.1—2016进行芳纶绝缘纸工频击穿强度的测试, 试样尺寸为5 cm×5 cm, 电极选取直径为25 mm的对称不锈钢圆柱电极。每次测试样品数量为10个, 取平均值作为最终结果。

2 试验结果

2.1 热压温度的影响

2.1.1 介电常数及紧度

浸油前后的芳纶绝缘纸介电常数变化见图1, 随热压温度的提升, 介电常数整体呈现出小幅度增加的趋势。当热压温度从220 ℃提高至240 ℃时, 绝缘纸紧度提升幅度较大, 从0.56 g/cm³提高至0.61 g/cm³, 此后随着热压温度的提高, 紧度逐步趋于稳定。

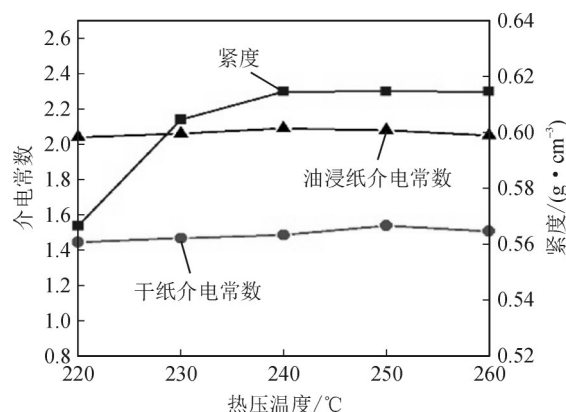


图1 不同热压温度绝缘纸的紧度和浸油前后介电常数

Fig. 1 Tightness of insulating paper and dielectric constant with different hot pressing temperatures

2.1.2 交流击穿强度

油浸绝缘纸的交流击穿强度测试结果见图2。

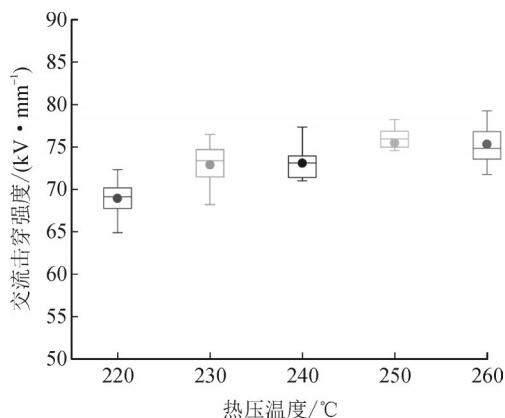


图2 不同热压温度的油浸纸交流击穿强度

Fig. 2 AC breakdown strength of oil-impregnated paper with different hot pressing temperatures

随着热压温度的提升,交流击穿强度逐渐增加,当热压温度从220 °C提高至250 °C时,交流击穿强度增长较快,由68.95 kV/mm增长至75.48 kV/mm,此后交流击穿强度趋于稳定。

2.2 热压压力的影响

2.2.1 介电常数及紧度

不同压力下,芳纶绝缘纸的紧度和浸油前后的介电常数测试结果见图3。由图3可以看出,热压压力较低时,浸油前后介电常数均提升较明显,之后随着热压压力的提升,介电常数变化不大。随着热压压力的提升,芳纶纸的紧度不断增大,当压力达到14 MPa时,紧度趋于稳定值0.58 g/cm³。

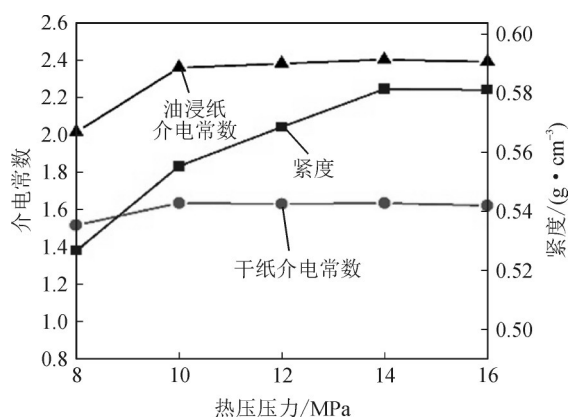


图3 不同热压压力的绝缘纸紧度和浸油前后介电常数

Fig. 3 Tightness of insulating paper and dielectric constant with different hot pressing pressures

2.2.2 交流击穿强度

不同热压压力下油浸纸的交流击穿强度测试结果见图4。

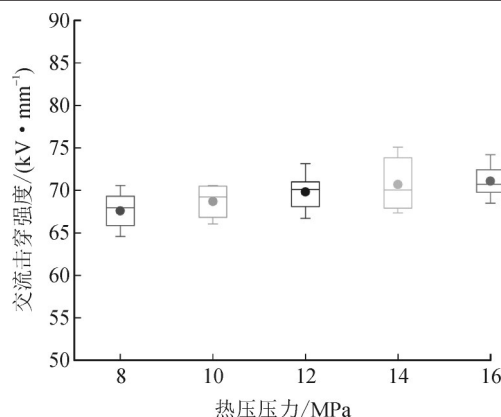


图4 不同热压压力的油浸纸交流击穿强度

Fig. 4 AC breakdown strength of oil-impregnated paper with different hot pressing pressures

当热压压力从8 MPa增长至14 MPa时,交流击穿强度由67.59 kV/mm增长至70.67 kV/mm,增幅为4.5%,热压压力大于14 MPa之后增速放缓。

3 分析与讨论

3.1 热压参数对微观形貌及紧度的影响

为进一步对试验结果进行分析和讨论,利用扫描电镜(SEM)对不同热压温度及压力的芳纶绝缘纸进行了微观形貌观测,结果见图5、6。

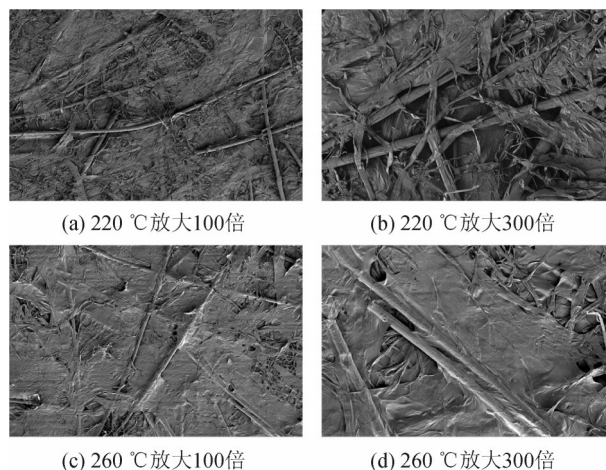


图5 不同热压温度的绝缘纸微观形貌

Fig. 5 Micromorphology of insulating paper with different hot pressing temperatures

由图5可以看到,当热压温度为220 °C时,绝缘纸中短切纤维与沉析纤维之间存在孔洞,个别短切纤维孤立存在,通过放大300倍的图像可直接看到单根纤维的轮廓,此时沉析纤维未能充分填充孔隙及包裹短切纤维。当热压温度增加至260 °C时,沉析纤维对短切纤维的包裹性更好,纤维之间结合更加紧密。当热压温度在240 °C及以下时,温度的增加使得紧度上升8.9%,当温度再提升时,已到达能使纤维进行完全玻璃化转变的温度范围,故后期温

度的增加对紧度没有较大影响。

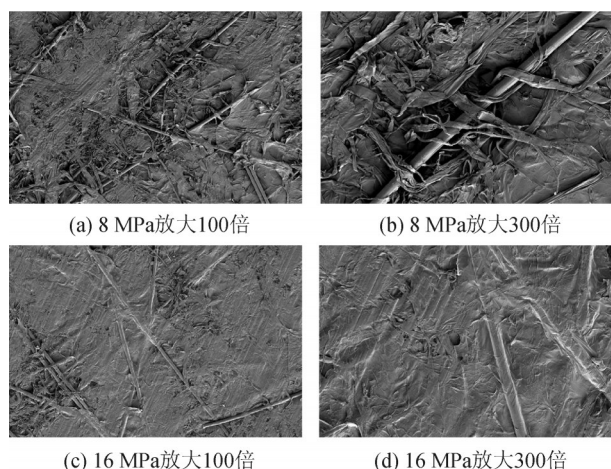


图6 不同热压压力的绝缘纸微观形貌

Fig. 6 Micromorphology of insulating paper with different hot pressing pressures

图6为不同热压压力下芳纶绝缘纸表面的微观形貌,热压压力为8 MPa时,纸中孔隙较多。当压力从8 MPa增加至14 MPa的过程中,紧度不断增加,此过程一方面是压力的作用使纤维之间间距更小,另一方面则由于热压压力的提升,可使沉析纤维软化程度增大并进行微小的形变迁移,填补纤维之间的孔隙,提升芳纶绝缘纸的紧度,并使纸张表面变的更加平整。

芳纶绝缘纸热压的过程是一个热压温度和压力协同作用的结果,在热压过程中沉析纤维起到粘合剂的作用。高温条件下沉析纤维受热软化,伴随着压力的作用,软化的沉析纤维发生微小的形变迁移,填补纤维之间的孔隙,使纤维之间结合更加紧密,提高绝缘纸的紧度。

3.2 热压参数对介电常数的影响

随着热压温度及压力的提升,芳纶绝缘纸介电常数变化较小,整体呈现小幅度增加趋势。随着热压参数的增大,绝缘纸的紧度提高,透气度增大,使所测试样介电常数数值变大。另一方面,热压过程也使纤维发生重结晶现象,使结晶度发生改变,进而影响介电常数,单独增大热压温度和压力均能使结晶度提高^[24-25]。为便于进行直观分析,对不同热压温度的芳纶绝缘纸进行XRD分析,谱图见图7,芳纶绝缘纸在 2θ 为 18.3° 、 22.6° 、 27.3° 处出现较为尖锐的特征峰^[26],说明芳纶绝缘纸中存在几种不同的晶体类型。通过Jade软件进行对芳纶绝缘纸进行结晶度计算^[27],热压温度为 220°C 和 260°C 的相对结晶度分别为66.3%和76.2%,热压温度的提升使纤维结晶度变大,而结晶结构的存在限制了大分子的取向极化和松弛运动^[26, 28],有利于绝缘纸介电常数的降

低。因此,芳纶绝缘纸介电常数的变化可认为是纸中孔隙和结晶度共同作用的结果。

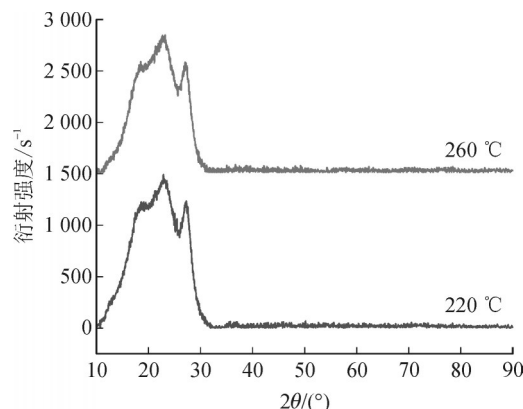


图7 芳纶绝缘纸的XRD图

Fig. 7 XRD diagrams of aramid insulating paper

3.3 热压参数对交流击穿强度的影响

当热压温度由 220°C 上升至 250°C ,压力从8 MPa增长至14 MPa时,交流击穿强度分别增长9.5%和4.5%。由图5、6可知,当热压参数较低时,纤维之间连结疏松,纸中含有大量孔隙。在外电场作用下,孔隙处的电子易形成电子崩,进一步发展导致击穿^[29]。热压参数提升后,纤维之间结合紧密,使孔隙减少,进而减少了内部放电点,使交流击穿强度增大^[30]。当热压温度达到 250°C ,热压压力在14 MPa之后,热压参数的提升对孔隙的影响变小,交流击穿强度增速变缓趋于平稳。热压温度和压力的提升均会使纸中孔隙减少,并影响绝缘纸击穿强度^[31]。此外,在试验设置参数范围内,温度改变时交流击穿强度的变化趋势更为明显。热压过程中,沉析纤维的受热软化过程主要由温度主导^[32],因此温度的改变对绝缘纸内部结构的影响更大,进而对交流击穿强度产生较大影响。

为直观展现热压过程中,热压参数的改变对绝缘纸内孔隙变化乃至交流击穿强度的影响,结合不同热压温度芳纶纸横截面的扫描电镜图像^[33],建立不同热压条件下芳纶绝缘纸的横截面模拟图见图8,黑色和灰色单元分别代表沉析纤维和短切纤维,白色单元代表孔隙。由于热压温度和压力的协同作用以及其对交流击穿电压具有相似的变化规律,下文以热压参数的高、低来共同代表热压温度和压力在较高和较低时的情况。

当热压参数较低时,纤维交界处存在大量孔隙,如图8(a)所示,经过浸油处理后,内部的孔隙被变压器油填充,在外界电场的作用下,孔隙处的电场强度较大,易形成放电点,导致绝缘纸击穿^[34]。当热压温度及压力提升后,沉析纤维受热软化,并发

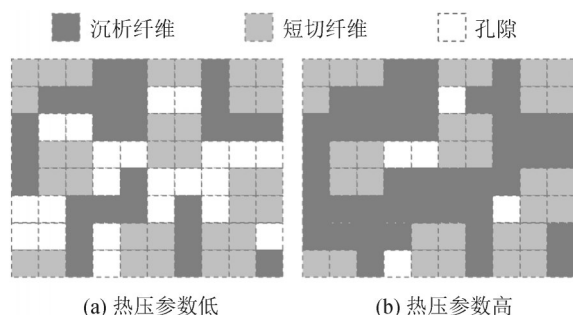


图8 不同热压条件芳纶纸横截面模拟图

Fig. 8 Simulation diagram of cross section of aramid paper under different hot pressing conditions

生微小的形变和迁移,填补了绝缘纸中的孔隙,使得绝缘纸中孔隙减小或消失,如图8(b)所示,此时纸中放电点减少,交流击穿强度增加。由于合成纤维具有热收缩效应,纸中孔隙无法完全消失,故击穿强度后期增长趋于平稳。

在热压参数较低时,绝缘纸介电常数较小,但此时绝缘纸存在大量孔隙,纤维连接疏松,影响其实际使用。之后热压参数的增长对绝缘纸的介电常数并没有太大影响。而绝缘纸的击穿强度随着热压参数提高呈现出明显的增长趋势,并且温度占据主导地位,对交流击穿强度影响更大。当热压参数提升到250℃和14 MPa后,热压参数的提升对交流击穿强度的影响变小,考虑到热压过度会导致纤维受损,为了保持绝缘纸具有良好的击穿强度,建议把热压参数设置在250℃和14 MPa。在实际工业生产中,调整热压工艺时,应着重注意热压工艺导致的击穿强度变化是否满足应用需求。

4 结论

1)芳纶纸制备过程中热压温度的提升扩大了纤维的软化区域及程度,而热压压力的协同作用使沉积纤维发生微小形变和迁移,填补纤维之间的孔隙,提高绝缘纸紧度。

2)热压参数的提升对芳纶绝缘纸介电常数影响不大,热压过程中,芳纶绝缘纸介电常数的变化受到纤维结晶度和纸中孔隙的共同影响,随热压参数提升介电常数整体呈现小幅度上升趋势。

3)随着热压温度及压力的提升,芳纶绝缘纸交流击穿强度不断提高后增速减缓趋于稳定,针对文中所研究的热压工艺,当热压温度为250℃,压力为14 MPa时绝缘纸即可达到较好的介电性能。

4)热压温度及压力对绝缘纸的介电性能具有协同效果,且二者对介电性能影响相似,在文中研究参数范围内,热压温度对绝缘纸击穿强度的影响更大。

参考文献:

- [1] 陈明星,高波,胡广才,等.基于时域介电法的变压器油纸绝缘老化特征参量分析[J].高压电器,2020,56(2):108-113.
CHEN Mingxing, GAO Bo, HU Guangcai, et al. Aging characteristic parameters analysis of transformer oil-paper insulation based on time domain dielectric method[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 108-113.
- [2] 邹阳,陈啸轩,张云霄,等.基于界面电荷极化特性的变压器油纸绝缘寿命预测方法研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):138-148.
ZOU Yang, CHEN Xiaoxuan, ZHANG Yunxiao, et al. A life prediction method of transformer oil-paper insulation based on interfacial charge polarization characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 138-148.
- [3] 张德文,张健,曲利民,等.基于PSO-ELM的变压器油纸绝缘状态无损评估方法[J].电力工程技术,2024,43(3):201-208.
ZHANG Dewen, ZHANG Jian, QU Limin, et al. The assessment method of transformer oil-paper insulation state based on PSO-ELM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 201-208.
- [4] 吴延宇,张蕾,黄猛,等.温度对环氧树脂沿面闪络特性的影响研究[J].高压电器,2024,60(4):199-206.
WU Yanyu, ZHANG Lei, HUANG Meng, et al. Research on influence of temperature on surface flashover characteristics of epoxy resin[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 199-206.
- [5] 赵洪山,常杰英,曲岳晗,等.基于二元非线性Wiener随机过程的变压器油纸绝缘剩余寿命预测方法[J].电工技术学报,2023,38(15):4040-4049.
ZHAO Hongshan, CHANG Jieying, QU Yuehan, et al. Residual life prediction method of transformer oil-paper insulation based on binary nonlinear Wiener random process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4040-4049.
- [6] 邹阳,俞豪奕,金涛.融合模糊K近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):55-63.
ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 55-63.
- [7] 王世强,胡海燕,刘全桢,等.热老化对变压器绝缘纸微观结构影响的实验研究[J].高压电器,2016,52(2):5.
WANG Shiqiang, HU Haiyan, LIU Quanzhen, et al. Experimental research on thermal aging effects on microstructure of transformer paper[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 5.

- [8] 邓昭宏,赵春明,冷俊,等.基于IWOA-BP算法的变压器绝缘老化评估方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):253-261.
DENG Zhaohong, ZHAO Chunming, LENG Jun, et al. Evaluation method of transformer insulation aging state based on IWOA-BP algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 253-261.
- [9] 杨鑫,王渝红,莫思特.基于变分模态分解的变压器绝缘缺陷故障检测[J].电子设计工程,2023,31(21):60-64.
YANG Xin, WANG Yuhong, MO Site. Fault detection of transformer insulation defects based on variational modal decomposition[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(21): 60-64.
- [10] 曹辰,路敦林,王雪,等.变压器温度和机械振动特性的仿真与分析[J].变压器,2024,61(1):17-23.
CAO Chen, LU Dunlin, WANG Xue, et al. Simulation and analysis of temperature mechanical vibration characteristics of transformers[J]. Transformer, 2024, 61(1): 17-23.
- [11] 律方成,汪鑫宇,王平,等.基于振动偏离及加权熵的多次短路冲击下变压器绕组机械形变辨识[J].电工技术学报,2023,38(11):3022-3032.
LYU Fangcheng, WANG Xinyu, WANG Ping, et al. Mechanical deformation identification of transformer winding under multiple short-circuit impacts based on vibration deviation and weighted entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3022-3032.
- [12] FOFANA I, BORSI H, GOCKENBACH E, et al. Aging of transformer insulating materials under selective conditions[J]. European Transactions on Electrical Power, 2007, 17(5):450-470.
- [13] 田建忠,胡金生. NOMEX 纸及其应用[J]. 绝缘材料, 1995(3):37-39.
TIAN Jianzhong, HU Jinsheng. NOMEX paper and its application[J]. Insulation Materials, 1995(3): 37-39.
- [14] 胡健,王宜,曾靖山,等.芳纶纸基复合材料的研究进展[J].中国造纸,2004,23(1):49-52.
HU Jian, WANG Yi, ZENG Jingshan, et al. Progress in development of aramid paper[J]. China Pulp & Paper, 2004, 23(1): 49-52.
- [15] E I Du Pont De Nemours & Company. Process of making wholly aromatic polyamides:US3063966A[P].1962-11-13.
- [16] TOKARSKY E W. High density para-aramid papers:US06/839270[P].1987-10-06.
- [17] E I Du Pont De Nemours & Company. Aramid papers containing aramid paper pulp:JPH04228696A[P].1992-08-18.
- [18] 陆赵倩,刘俊华,张美云,等.热压对间位芳纶纸表面形态、结构和物理性能的影响研究[J].造纸科学与技术,2013,32(4):26-30.
LU Zhaoqing, LIU Junhua, ZHANG Meiyun, et al. Effects of hot pressing on the surface morphology, structure and physical properties of meta-aramid paper[J]. Paper Science & Technology, 2013, 32(4): 26-30.
- [19] YAO L R, LI X J, JIANG Y Q, et al. Influence of hot-pressing temperature on the formation of aramid paper[J]. Thermal Science, 2017(22): 144-144.
- [20] ZHAO H, ZHU Y, SHA L. Study of the relationship between characteristics of aramid fibrils and mechanical property of aramid paper using DSC[J]. E-Polymers, 2014, 14(2): 139-144.
- [21] 李金宝,张美云,修慧娟.热压工艺对芳香族聚酰胺纤维纸性能的影响[J].纸和造纸,2007,26(3):30-32.
LI Jinbao, ZHANG Meiyun, XIU Huijuan. Effect of hot press process on properties of aramid fiber paper[J]. Paper and Paper Making, 2007, 26(3): 30-32.
- [22] 杨兵,惠岚峰,刘倩,等.热压对芳纶纤维纸性能的影响[J].天津科技大学学报,2021,36(1):25-29.
YANG Bing, HUI Lanfeng, LIU Qian, et al. Effect of hot pressing on the properties of aramid fiber paper[J]. Journal of Tianjing University of Science & Technology, 2021, 36(1): 25-29.
- [23] 何方,张美云,张素凤.热压光对纸基芳纶纤维结构的影响[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2008,26(1):34-37.
HE Fang, ZHANG Meiyun, ZHANG Sufeng. Influence of heat-calendering on the structure of paper-based aramid fibre[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 26(1): 34-37.
- [24] 赵会芳.芳纶纤维和芳纶浆粕的结构与芳纶纸特性的相关性研究[D].西安:陕西科技大学,2012.
ZHAO Huifang. Study on the correlation between the structure of aramid fiber and aramid pulp and the properties of aramid paper[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.
- [25] DOWNING J W, NEWELL J A. Characterization of structural changes in thermally enhanced Kevlar-29 fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 91(1): 417-424.
- [26] 廖瑞金,李萧,杨丽君,等.间位芳纶短切纤维/浆粕的对比对芳纶绝缘纸性能的影响[J].高电压技术,2015,41(2):364-373.
LIAO Ruijin, LI Xiao, YANG Lijun, et al. Effect of the ratios of aramid fiber to pulp on the properties of aramid paper[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 364-373.
- [27] 向彬,廖瑞金,张勇,等.电力变压器用绝缘纸热老化微观机理的X射线衍射分析[J].高压电器,2012,48(3):40-45.
XIANG Bin, LIAO Ruijin, ZHANG Yong, et al. Aging micro-mechanism of oil-paper insulation in power transformers by XRD analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 40-45.

- [28] 黄 猛,牛铭康,吕玉珍,等. 绝缘纸宽频介电响应阻容等效模型及纤维极化特性提取[J]. 高电压技术,2021,47(2):663-670.
HUANG Meng, NIU Mingkang, LYU Yuzhen, et al. Resistance - capacitance equivalent model for broadband frequency dielectric response of insulation paper and polarization characteristics extraction of fiber[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2):663-670.
- [29] ZAKREVSII V A, SUDAR N T, ZAPO A, et al. Mechanism of electrical degradation and breakdown of insulating polymers[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(4):2135-2139.
- [30] 汪佛池,程祥瑞,赵 涛,等. 油纸绝缘中气泡的生成特性及其对击穿性能的影响[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 61-67.
WANG Fochi, CHENG Xiangrui, ZHAO Tao, et al. Characteristics of bubble formation in oil-paper insulation and its influence on the breakdown[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):61-67.
- [31] 李艳文,李媛媛,田慕琴,等. 矿用典型绝缘材料击穿特性及寿命模型的研究[J]. 高压电器,2019,55(2):104-109.
LI Yanwen, LI Yuanyuan, TIAN Muqin, et al. Study on breakdown characteristic and life model of typical insulation materials used in coal mine[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2):104-109.
- [32] 张素凤. 芳纶纤维/浆粕界面及结构与成纸性能相关性研究[D]. 西安:陕西科技大学,2010.
ZHANG Sufeng. Study on the correlation between aramid fiber/pulp interface and structure and paper properties[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2010.
- [33] 张素凤,孙召霞,王 群,等. 热压工艺对间位芳纶复合纸微结构与性能的影响[J]. 中国造纸,2013,32(6):36-39.
ZHANG Sufeng, SUN Zhaoxia, WANG Qun, et al. Effect of hot pressing on micro-structure and properties of meta-aramid sheets[J]. China Pulp & Paper, 2013, 32(6):36-39.
- [34] HUANG Jianwen, ZHOU Yuanxiang, DONG Longyu, et al. Enhancement of mechanical and electrical performances of insulating presspaper by introduction of nanocellulose[J]. Composites Science and Technology, 2017, 138(1):40-48.
- 马 婕(1998—),女,硕士,研究方向为新型绝缘材料(E-mail:mmm3jjj@163.com)。
- 黄 猛(1988—),男,博士,副教授,研究方向为新型绝缘材料、电介质理论等(通信作者)(E-mail:Hm2016@ncepu.edu.cn)。

(上接第157页)

- [31] 黄永生,黄玲玲. 大型海上风电场风机微观选址与集电系统联合优化[J]. 电测与仪表,2023,60(12):71-76.
HUANG Yongsheng, HUANG Lingling. Joint optimization of wind turbine micro-location and power collection system in offshore wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12):71-76.
- [32] 李 杰. 风电机组雷击暂态过电压分布规律及磁场分析[D]. 西安:西安理工大学,2019.
LI Jie. Distribution law of transient overvoltage and magnetic field analysis of wind turbine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [33] 陈怀飞,王 宇,孙 通,等. 风机回击电磁场波形特征及辐射增强效应研究[J]. 高电压技术,2020,46(6):2122-2130.
CHEN Huaifei, WANG Yu, SUN Tong, et al. Study on waveform characteristics and radiation enhancement effect of lightning return stroke initiated from wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2122-2130.
- 张 萍(1979—),女,博士,副教授,主要研究方向为风电机组的防雷保护研究。
- 杨晓磊(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为风电机组的防雷保护研究(通信作者)(E-mail:2375620273@qq.com)。