

芳纶纳米纤维绝缘纸在新型油纸绝缘中的热老化特性研究

赵莉华¹, 陈志杰¹, 安建国², 任俊文¹

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网常德供电公司, 湖南 常德 415099)

摘要:制备了以芳纶纳米纤维为基本结构单元的新型绝缘纸,系统研究了其在天然酯绝缘油及矿物绝缘油中的老化特性,并与商用Nomex T410绝缘纸进行对比分析。结果表明:芳纶纳米纤维基绝缘纸具有更好的热稳定性和耐老化特性,经相同条件的加速热老化实验后,芳纶纳米纤维基绝缘纸的力学性能以及电气特性均优于Nomex T410绝缘纸;由天然酯绝缘油与芳纶纳米纤维基绝缘纸配合形成的新型油纸绝缘系统,可有效延长变压器的寿命,为绿色低碳电工能源装备的绝缘设计及开发提供了参考。

关键词:芳纶纳米纤维;热老化;天然酯绝缘油;油纸绝缘

中图分类号:TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.03.004

Thermal ageing characteristics of aramid nano fiber insulating paper in new oil-paper insulation

ZHAO Lihua¹, CHEN Zhijie¹, AN Jianguo², REN Junwen¹

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Changde Power Supply Company, Changde 415099, China)

Abstract: A new type of insulating paper with aramid nanofiber as the basic structural unit was prepared, and its ageing characteristics in natural ester insulating oil and mineral insulating oil were systematically investigated and compared with the commercial Nomex T410 insulating paper. The results show that the aramid nanofiber-based insulating paper has better thermal stability and ageing resistance, and the mechanical and electrical properties of the aramid nanofiber-based insulating paper are better than those of Nomex T410 insulating paper after accelerated thermal ageing test under the same condition. In addition, the new oil-paper insulation system composed by natural ester insulating oil and aramid nanofiber-based insulating paper can effectively extend the life of the transformer, which provides a reference for the insulation design and development of green low-carbon electrical energy equipment.

Key words: aramid nanofiber; heat ageing; natural ester insulating oil; oil-paper insulation

0 引言

油浸式变压器在电力系统中应用广泛,其绝缘系统主要是采用绝缘纸与绝缘油组成的固-液复合绝缘结构^[1-3]。传统油浸式变压器的油纸绝缘系统主要由纤维素绝缘纸与矿物绝缘油组成^[4]。然而,纤维素绝缘纸的热稳定性较差,在变压器运行过程中遭受长期的电、热、力以及环境因素考验,引起绝缘纸老化降解,导致其机械强度和绝缘性能降低,进而影响变压器的安全稳定运行^[5-8]。虽然通过化学和物理的方法对纤维素绝缘纸进行改性,可在一定程度上提升纤维素绝缘纸的热稳定性,但受限于纤维素分子固有特性,纤维素绝缘纸耐热老化能力

的提升空间仍有限^[9-11]。美国杜邦公司研制的Nomex绝缘纸能在220℃的高温下保持各项性能稳定,已被广泛应用于各类对温度要求较高的变压器中^[12]。然而Nomex绝缘纸的制造技术长期被国外垄断,其价格高达纤维素绝缘纸的十几倍,大幅增加了变压器的制造成本。因此,亟需研发一种低成本,且兼具良好电气性能、力学性能及耐热老化性能的新型绝缘纸。近年来,芳纶纤维因其突出的力学性能、热稳定性、绝缘性能、化学惰性和阻燃性,逐渐成为电子和电力系统用高性能绝缘纸的研究热点^[13-15]。

另一方面,由于矿物绝缘油具有不可再生、难以降解、耐温性差、燃点低、易闪爆等明显缺陷,难以满足国家对能源电工装备日益严苛的安全、环保要求。研究表明,天然酯绝缘油克服了上述缺陷,被视为替代矿物绝缘油的新型环境友好型液体电

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107020);中国博士后科学基金(2018M643475);四川省重点研发项目(2021YFG0284)

介质^[16-17],目前全球应用的植物绝缘油变压器已超过75万台^[18]。为了克服传统绝缘纸的性能束缚与国外Nomex绝缘纸的技术垄断,需要一种新型耐老化绝缘纸与天然酯绝缘油进行配合,构建均匀耐高温的长寿命油纸绝缘系统。之前的研究表明,天然酯绝缘油对传统绝缘纸老化具有一定的延缓作用^[19],但对新型绝缘纸使用寿命的影响尚待探明,因此研究新型耐老化绝缘纸在天然酯绝缘油中的老化特性具有重要的现实意义。

基于此,本文首先利用芳纶纤维通过化学劈裂法制备芳纶纳米纤维(ANF),通过抽滤、热压的方式制备芳纶纳米纤维基绝缘纸。然后与商用Nomex T410绝缘纸对比,开展绝缘纸在天然酯绝缘油和矿物绝缘油中的热老化实验,得到绝缘纸的各类老化参数,以期新型油纸绝缘系统变压器的研发和稳定运行提供参考和数据支撑。

1 实验

1.1 主要原材料

Kevlar对位芳纶浆粕(AP),美国杜邦公司,平均长度为0.9 mm,原纤化度为210 mm;二甲亚砜(DMSO),阿拉丁试剂有限公司;氢氧化钾(KOH),成都科龙化工有限公司;FR3天然酯绝缘油,Cargill公司;昆仑25#矿物绝缘油,新疆克拉玛依公司。绝缘油具体参数见表1。

表1 绝缘油参数

Tab.1 Parameters of insulating oil

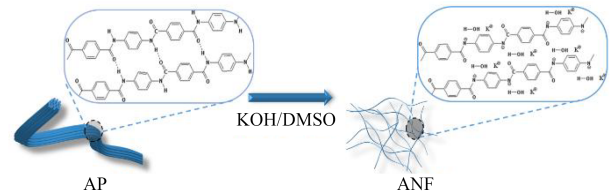
参数	FR3	25#矿物绝缘油
颜色	亮绿色	透明无色
密度(20℃)/(kg/m ³)	920	830~890
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	32~34	3~16
21天生物降解率/%	99	30
工频击穿电压/kV(2.5 mm)	73	60
相对介电常数(25℃)	3.2	2.2
介质损耗因数/(%) (90℃)	0.03	0.01
体积电阻率/(Ω·m)(90℃)	10 ¹²	10 ¹³

1.2 芳纶纳米纤维绝缘纸的制备

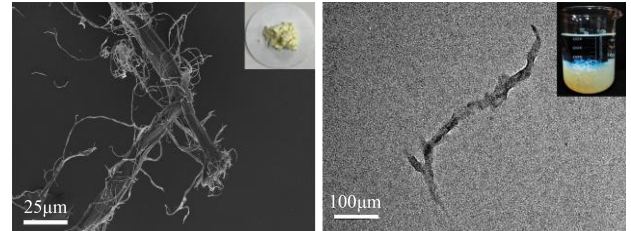
称取适量AP加入无水乙醇浸泡并超声48 h进行清洗,反复过滤清洗后在45℃真空环境下保温72 h,得到洁净的AP。

采用化学劈裂法对AP进行处理,如图1所示。将AP、KOH、DMSO、去离子水以质量比2:3:110:16的比例配置混合溶液,然后将配置的AP/DMSO混合溶液在室温避光下磁力搅拌14天,利用KOH/DMSO破坏芳纶分子链之间的氢键作用,通过静电

排斥力将芳纶纤维沿横截面方向劈裂成直径更小的芳纶纳米纤维(ANF),平均直径约为20 nm(图1(c))。



(a)化学劈裂法制备ANF示意图



(b)AP的SEM及实物图 (c)ANF的TEM及其水分散图

图1 化学劈裂法制备ANF

Fig.1 Preparation of ANF by chemical splitting method

称取22.9 mg的AP/DMSO混合溶液加入400 mL去离子水中制得ANF水分散剂。将分离出的ANF胶体加入适量去离子水后在1 200 r/min转速下磁力搅拌15 min使ANF胶体解离,然后置于超声仪中超声20 min去除气泡。将得到的产物进行抽滤得到表面光滑的芳纶纳米纤维绝缘纸,平均厚度为60 μm,初始水分为8%,将样品记为ANF绝缘纸。

1.3 加速热老化实验方案

使用天然酯绝缘油对ANF绝缘纸进行浸渍得到实验组,同时设置ANF绝缘纸在矿物绝缘油、Nomex T410绝缘纸在天然酯绝缘油中热老化的实验组作为参照组,在130℃下进行加速热老化实验,流程如图2所示。称取100 mL天然酯绝缘油,在油样中放入等量已预处理过的绝缘纸样品,在90℃真空烘箱中浸渍48 h,ANF绝缘纸在真空干燥与浸渍后的初始水分应低于0.1%,使用聚四氟乙烯对锥形瓶瓶口进行密封处理。依据变压器绝缘老化的6℃规则确定加速热老化实验温度。以A级绝缘材料常规绝缘系统寿命为98℃为基准,当超过基准工作温度6℃时,其寿命会缩短一半左右。由于样品中存在矿物绝缘油,过高的温度会产生安全隐患,因此以130℃作为热老化实验温度。

当样品老化40天后,油纸绝缘材料的等效寿命损耗计算如式(1)所示。

$$40 \times 2^{(130-98)/6} = 1612.7 \text{天} \approx 4.42 \text{年} \quad (1)$$

即在130℃老化40天后,相当于近4.4年的寿命损耗。由于ANF绝缘纸具有较高的耐热等级,热老

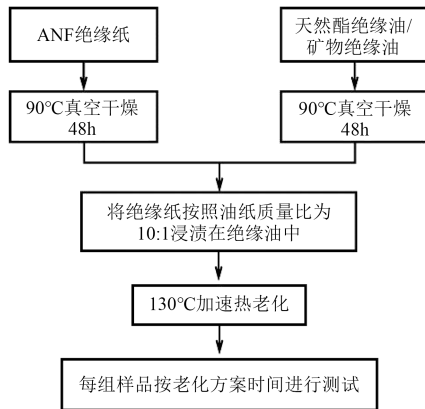


图2 热老化实验流程

Fig.2 Process of thermal ageing experiment

化初期的特性变化不明显,因此从老化40天起每隔10天取出样品进行测量,得到老化40、50、60、70天的老化数据。各实验组命名如表2所示。

表2 各实验组命名

Tab.2 Naming of test groups

实验组	命名
ANF绝缘纸在天然酯绝缘油中热老化	F-130
ANF绝缘纸在矿物绝缘油中热老化	K-130
Nomex T410绝缘纸在天然酯绝缘油中热老化	N-130

1.4 表征及测试

绝缘纸样品在测试前均使用自动X-压榨机(LP-S-50 ASTM, Labtech)在150°C、15 MPa下热压。微观形貌:通过扫描电子显微镜(SEM, Quanta 250 FEG型, FEI)表征。傅里叶红外光谱:使用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Nicolet iS50型, Thermo)进行表征,波数为400~4 000 cm⁻¹。热重分析(TGA):使用热重分析仪(TG 2950型, NETZSCH)进行测试,加热速度为10°C/min,温度范围为30~790°C。力学性能:使用万能试验机(5967型, Instron)进行测试,试样尺寸为30 mm×5 mm。介电特性:使用宽带介电阻抗弛豫谱仪(Concept 50型, Novocontrol)进行测试,测试频率为1~10⁶ Hz。击穿特性:使用电击穿测试仪(DDJ50kV型,北京皇冠测量仪器有限公司)在直流高压下进行测试,升压速率为500 V/s,每组样品(直径为35.0 mm)重复测量10次。

2 结果与讨论

2.1 热稳定性

ANF绝缘纸和Nomex T410绝缘纸的TGA测试结果如图3所示。由图3可知,ANF绝缘纸和Nomex T410绝缘纸在失重10%时的温度分别为

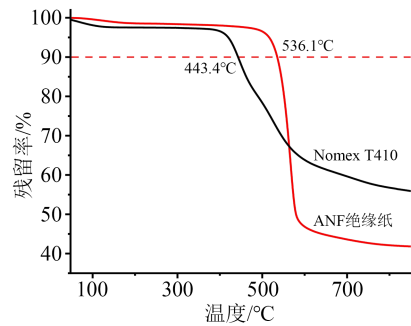


图3 ANF绝缘纸与Nomex T410绝缘纸的热失重曲线

Fig.3 TGA curves of ANF insulating paper and Nomex T410

536.1°C和443.4°C,ANF绝缘纸失重10%时的温度比Nomex T410绝缘纸高出约100°C。这是由于Nomex纤维在达到热分解温度后由于纸张纤维之间存在较大空隙,与氧气接触更加充分,因而氧化反应更为剧烈,纤维降解显著。而ANF绝缘纸的分子链之间存在大量的氢键与π-π键作用,纤维排布更加紧密,热分解温度相比Nomex绝缘纸显著提高。测试结果说明制备的ANF绝缘纸具有优异的热稳定性,为耐高温变压器的绝缘材料提供了良好的选择。

2.2 微观形貌表征

图4为Nomex T410、ANF绝缘纸以及ANF绝缘纸分别在天然酯绝缘油(F-130)、矿物绝缘油中(K-130)热老化70天的SEM及实物图。从图4(a)、(b)可以看出,ANF绝缘纸表面形态光滑,结构紧密,而Nomex T410绝缘纸表面有明显空隙且纤维结构粗糙。在油纸绝缘系统中,纸张自身结构存在的空

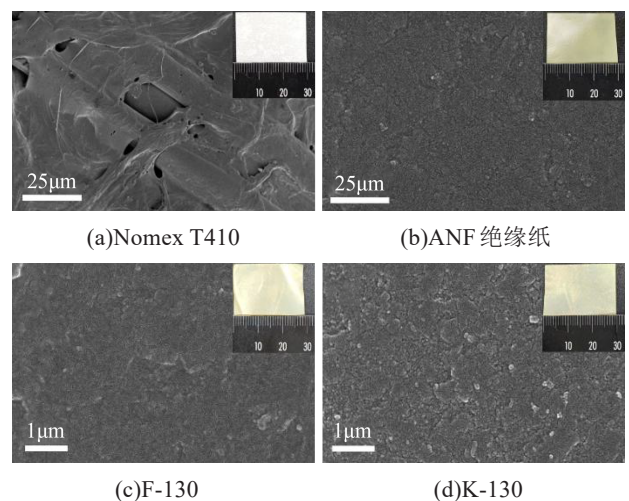


图4 Nomex T410、ANF绝缘纸以及ANF绝缘纸分别在天然酯油、矿物绝缘油中热老化70天的SEM及实物图

Fig.4 SEM and photos of Nomex T410, ANF insulating paper, and ANF insulating paper thermal-aged in natural ester oil and mineral insulating oil for 70 days

隙被绝缘油填充。油-纸的介电常数不匹配会导致绝缘纸的空隙处容易出现畸变电场,在电应力作用下空隙处的纤维会先被分解,进而发展为绝缘纸的击穿。而ANF绝缘纸致密的表面可以抑制油渗透到空隙中形成畸变电场,因此降低了由于场分布不均导致的纸张击穿的可能性。

从图4(c)、(d)可以看出,F-130样品表面显示出与未老化纸表面相同的光滑致密结构,可见ANF绝缘纸具有优异的耐老化性。F-130样品的表面相比与K-130样品更为平整,说明ANF绝缘纸与天然酯绝缘油的相容性优于矿物绝缘油。

2.3 傅里叶红外光谱表征

对Nomex T410绝缘纸以及制备的ANF绝缘纸进行红外光谱表征,结果如图5所示。从图5可以看出,两种绝缘纸在 $3\ 310\ \text{cm}^{-1}$ 处都有明显的N-H键的伸缩振动峰,在 $1\ 644\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 508\ \text{cm}^{-1}$ 处出现酰胺基和苯环骨架中C=O键的伸缩振动峰。在 $1\ 304\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了C-N键的伸缩振动峰,在 $820\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了苯环对位取代伸缩振动峰。从ANF绝缘纸的红外光谱判断,绝缘纸的制备过程中并没有改变芳纶纳米纤维的结构。

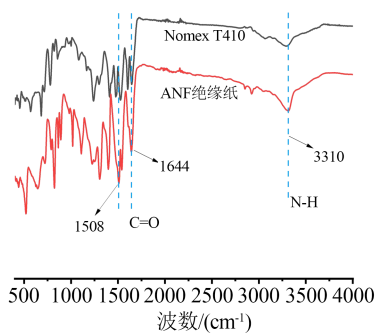
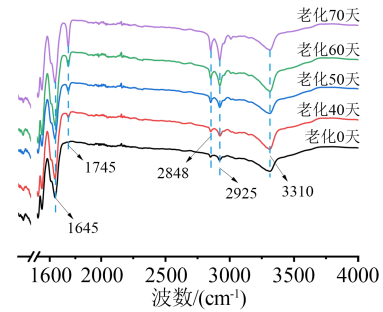


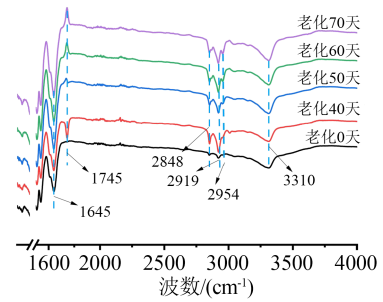
图5 ANF绝缘纸与Nomex T410的红外光谱

Fig.5 FT-IR of ANF insulating paper and Nomex T410

热老化后ANF绝缘纸的红外光谱测试结果如图6所示。从图6可以看出,与未老化样品相比,老化样品在 $1\ 745\ \text{cm}^{-1}$ 处出现C=O键的伸缩振动峰,这可能是由于在加速热老化过程中,芳纶纳米纤维分子链之间的氢键断裂导致分子链中酰胺基上C=O基团的红外吸收峰增加。老化样品在 $2\ 848\ \text{cm}^{-1}$ 与 $2\ 925\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了新的伸缩振动峰,分别为 $-\text{CH}_3$ 与 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动峰,且随着老化时间的增加,二者的振动幅度呈增大趋势,表明ANF绝缘纸在加速热老化过程中芳纶纳米纤维分子链发生苯环上的甲基或其他化学键的断裂,生成包含有 $-\text{CH}_3$ 与 $-\text{CH}_2-$ 等官能团的老化产物。 $2\ 848\ \text{cm}^{-1}$ 与 $2\ 925\ \text{cm}^{-1}$ 处的伸缩振动峰振动幅度可以作为ANF绝缘纸的复合油纸绝缘老化程度的特征量。



(a)F-130



(b)K-130

图6 F-130与K-130样品不同老化时间的红外光谱

Fig.6 FT-IR spectra of F-130 and K-130 samples with different ageing time

2.4 介电性能

各实验组中绝缘纸的相对介电常数随老化时间的变化如图7所示。由图7(a)和(b)可知,F-130和K-130实验组中绝缘纸的相对介电常数表现出相似的变化趋势,均随着热老化时间的增加而变大。在油纸绝缘加速热老化过程中,热应力长期作用会导致芳纶纳米纤维分子间的氢键断裂,分子间相互作用力减弱,绝缘油中极性小分子更多的进入绝缘纸或附着在绝缘纸表面,因此ANF绝缘纸的相对介电常数随老化时间的增加而逐渐增大。随着老化时间的增加,ANF绝缘纸的相对介电常数与绝缘油的相对介电常数差距缩小,使得绝缘油与绝缘纸之间的电场分布更加均匀,进而增强了油纸绝缘系统耐热老化的能力。由图7(c)可知,Nomex T410绝缘纸的相对介电常数在加速热老化之后进一步增大。值得注意的是,在经过70天热老化后,F-130与K-130组中绝缘纸的相对介电常数均接近相应绝缘油的相对介电常数。

图8为不同实验组经过加速热老化之后绝缘纸的介质损耗因数频率特性曲线。由图8(a)可知,F-130实验组中ANF绝缘纸的介质损耗因数随老化时间的增加呈现出先增大后减小的趋势,老化60天后其介质损耗因数低于未老化的样品,表现出优秀的耐老化特性。由图8(b)可知,K-130实验组中ANF绝缘纸的介损略低于F-130。由图8(c)可知,相较于

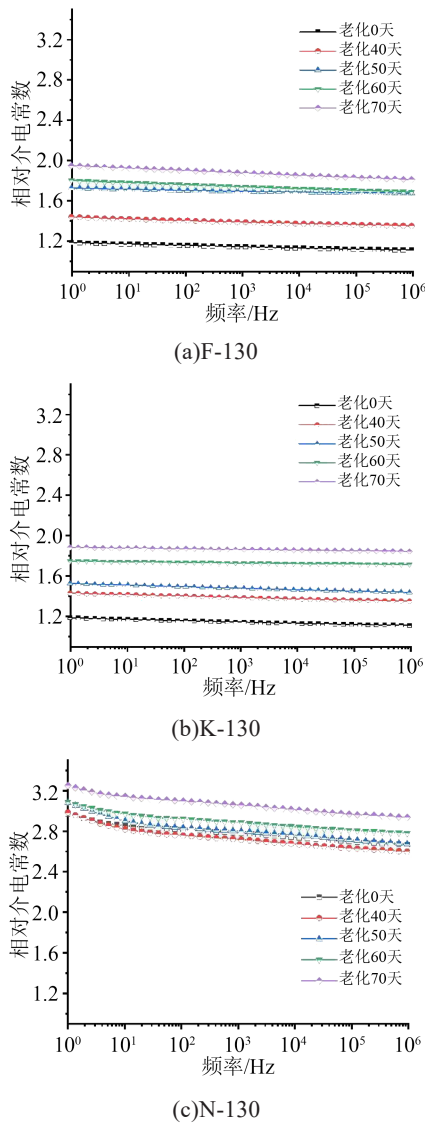


图7 F-130、K-130、N-130样品不同老化时间的相对介电常数

Fig.7 Relative permittivity of F-130, K-130, and N-130 samples with different ageing time

ANF 绝缘纸的介损频率特性, Nomex T410 绝缘纸的介质损耗因数在频率小于 100 Hz 时显著升高, 在 1 Hz 时达到 0.049 5, 这是由于二者分子结构不同导致的极化特性不同。相比于 Nomex T410 绝缘纸, ANF 绝缘纸在全频率范围内具有更低的介质损耗因数 (<0.012), 在实际运行过程中将会产生更少的热量, 有利于延长油纸绝缘寿命, 进而延长变压器的使用寿命。

图 9(a) 为工频 50 Hz 下各实验组中绝缘纸的相对介电常数随热老化时间的变化图。从图 9(a) 可以看出, F-130 组样品在老化 70 天后绝缘纸的相对介电常数达到 1.954, 略大于矿物绝缘油中老化的样品 (1.903)。但 K-130 与 F-130 组中绝缘纸的相对介电常数均明显小于 N-130 组, 这是因为两种绝缘纸的本征相对介电常数有显著差异。两种绝缘纸的相

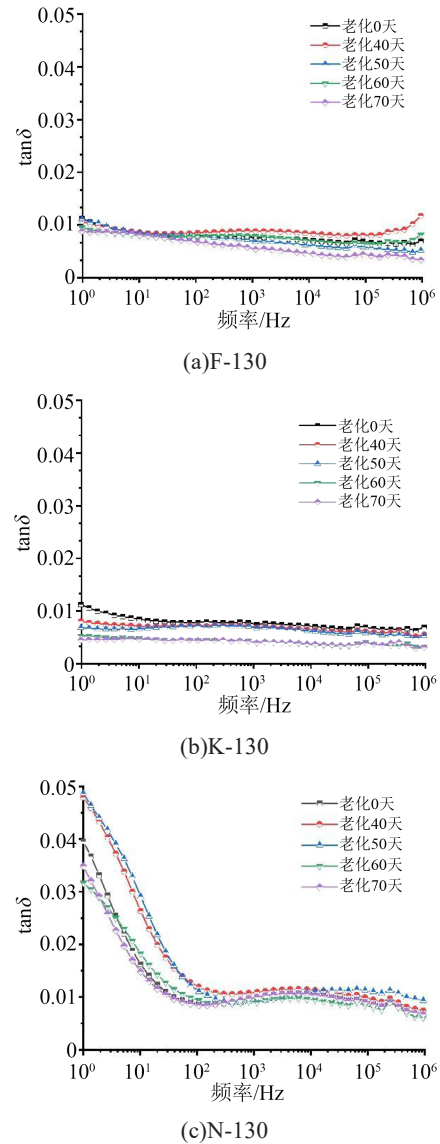
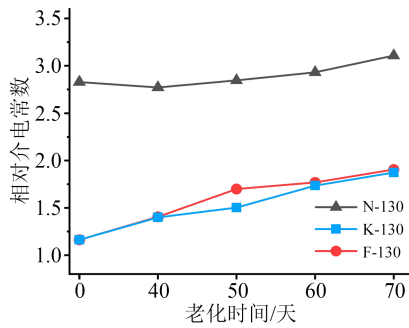


图8 F-130、K-130、N-130样品不同老化时间的介质损耗因数

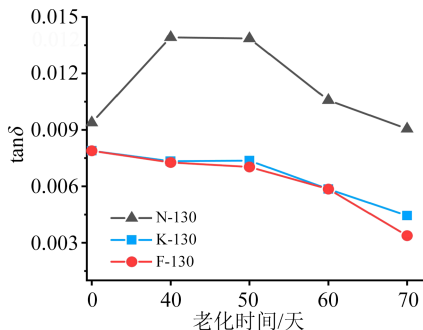
Fig.8 $\tan\delta$ of F-130, K-130, N-130 samples with different ageing time

对介电常数随老化时间的增加均呈现出增大的趋势, 但 ANF 绝缘纸由于其纳米尺度所带来的耐热老化优势, 在两种不同的绝缘油浸渍情况下其相对介电常数变化较小, 在老化实验结束时仍保持相近的相对介电常数。

图 9(b) 是各实验组中绝缘纸的介质损耗因数随热老化时间的变化图。从图 9(b) 可以看出, ANF 绝缘纸的介质损耗因数在整个热老化实验中均低于 0.008, 表现出非常优异的低介质损耗特性, 且随着老化时间的增加, 其介质损耗因数进一步减小, 两组 ANF 绝缘纸样品表现出这一相似的特性。而 Nomex T410 绝缘纸在老化实验初期出现介质损耗因数变大的情况, 这是因为随着老化实验的进行, 其较为粗糙的表面结构被破坏, 导致介质损耗因数增



(a)相对介电常数



(b)介质损耗因数

图9 50 Hz下绝缘纸的相对介电常数与介质损耗因数随热老化时间的变化

Fig.9 Changes in relative permittivity and tanδ of insulating paper with thermal ageing time at 50 Hz

大。随着老化时间的增加,其整体被绝缘油充分浸润,介质损耗因数随之减小,但整体介质损耗因数仍然明显大于ANF绝缘纸。

2.5 耐击穿性能

各实验组中绝缘纸的电气强度随老化时间的变化关系如图10所示。从图10可以看出,相较于Nomex T410绝缘纸,ANF绝缘纸的耐击穿性能有非常显著的提升。在经过不同时间老化后,ANF绝缘纸的电气强度变化幅度较小,其中F-130组样品表现出最佳的耐击穿性能,老化70天后ANF绝缘纸的电气强度仍大于120 kV/mm。而K-130组样品在老化70天后ANF绝缘纸的电气强度略小,但仍表现出较高的耐击穿性能,这是因为芳纶纳米纤维本身具有优异的耐热性能,ANF绝缘纸的结构没有因为长时间热老化而发生显著劣化。Nomex T410绝缘纸在热老化70天后其电气强度减小至90 kV/mm,不足ANF绝缘纸的75%。这是由于Nomex T410绝缘纸物理结构损坏,在外部强电场的作用下内部更易形成畸变电场导致放电与击穿,因此耐击穿性能随着老化时间的增加而显著降低。

2.6 力学性能

对不同老化时间下ANF绝缘纸的基本力学性能进行测量,得到不同实验组中绝缘纸的拉伸应力、断裂伸长率与弹性模量随老化时间的变化关系

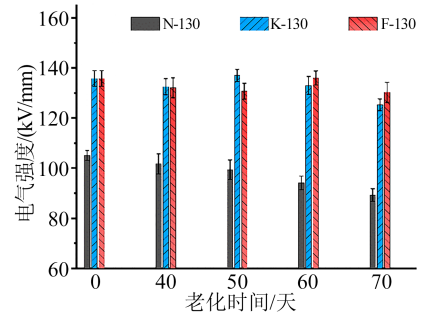
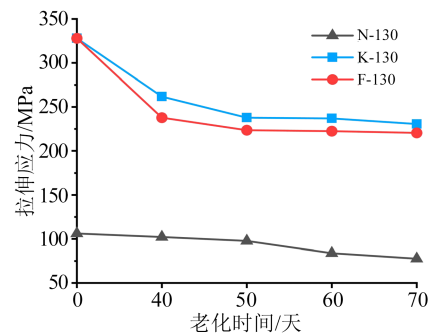


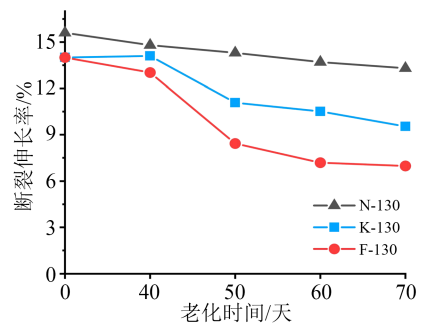
图10 绝缘纸的电气强度随热老化时间的变化

Fig.10 Changes in electric strength of insulating paper with thermal ageing time

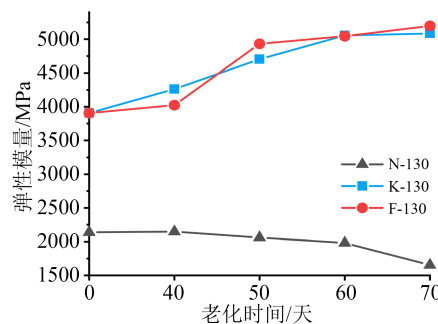
如图11所示。由图11(a)与(b)可知,随着老化时间的增加,ANF绝缘纸的断裂伸长率与拉伸应力均逐渐减小。这是因为芳纶纳米纤维分子链长期在高



(a)拉伸应力



(b)断裂伸长率



(c)弹性模量

图11 绝缘纸的拉伸应力、断裂伸长率与弹性模量随热老化时间的变化

Fig.11 Changes in tensile stress, elongation at break, and elastic modulus of insulating paper with thermal ageing time

温作用下裂解,分子链变短,纸张聚合度降低,导致ANF绝缘纸能承受的机械外力与韧性降低。虽然ANF绝缘纸的力学性能随老化时间的增加有一定的下降,但由图11(a)可知,老化70天后ANF绝缘纸能承受的最大拉伸应力仍远大于Nomex T410绝缘纸。值得注意的是,矿物绝缘油对ANF绝缘纸表现出一定的“保护”作用,这是因为矿物绝缘油在老化过程中的主要生成物为烃类小分子气体,相较于天然酯绝缘油会产生更少的自由基与不饱和脂肪酸链,所以在加速热老化过程中,ANF绝缘纸分子链与其他极性分子反应较少,导致K-130组中样品的拉伸应力与断裂伸长率下降较小。由图11(c)可知,ANF绝缘纸的弹性模量随老化时间的变化趋势与Nomex T410绝缘纸相反,呈逐渐增大趋势。弹性模量的增大表明ANF绝缘纸的弹性有所降低,更不易变形。综上可知,ANF绝缘纸的力学性能明显优于Nomex T410绝缘纸,更高的拉伸应力与弹性模量也使得ANF绝缘纸适用于变压器中的油纸绝缘系统。

3 结论

针对芳纶纤维具有优异的力学性能、热稳定性、绝缘性能,本文制备了一种新型的ANF绝缘纸,并开展加速热老化实验,对新型ANF绝缘纸的力学性能、介电性能和微观结构在老化过程中的变化规律进行研究,得到如下主要结论:

(1)制备的ANF绝缘纸相较于Nomex T410绝缘纸具有更加致密的表面结构、更高的热分解温度。

(2)加速热老化实验研究结果表明,ANF绝缘纸在天然酯绝缘油和矿物绝缘油中均表现出优异的电气绝缘特性和耐老化特性,F-130组样品的耐击穿性能与介质损耗因数甚至优于K-130组样品,证明天然酯绝缘油作为油纸绝缘系统的重要组成部分替代矿物绝缘油具有可行性。

(3)ANF绝缘纸的介电性能、耐击穿性能、热稳定性、力学性能方面均优于Nomex T410绝缘纸,且具有更优异的耐老化特性,表明ANF绝缘纸作为变压器油纸绝缘系统的重要组成部分具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 廖瑞金,胡舰,杨丽君,等. 变压器绝缘纸热老化降解微观机理的分子模拟研究[J]. 高电压技术,2009,35(7):1565-1570.
- [2] 丛日立,赵明宇,周洋,等. 基于参数优化的电力变压器故障诊断模型[J]. 电测与仪表,2019,56(22):84-88.

- [3] 张涛,李林多,王尧,等. 基于复介电常数实部变化率的油纸绝缘受潮状态研究[J]. 电测与仪表,2019,56(16):45-49,60.
- [4] 向彬,廖瑞金,杨丽君,等. 变压器矿物油中糠醛的稳定性研究[J]. 高电压技术,2007,33(8):85-87.
- [5] 蒋友列,祝诗平,唐超,等. 绝缘油热老化时间及糠醛含量的近红外光谱快速预测方法[J]. 光谱学与光谱分析,2020,40(11):3515-3521.
- [6] 李剑,陈晓陵,张召涛,等. 植物油纸绝缘的微水扩散特性[J]. 高电压技术,2010,36(6):1379-1384.
- [7] 廖瑞金,郭超,汪可,等. 干燥空气下植物油-纸绝缘老化特性[J]. 高电压技术,2013,39(6):1460-1468.
- [8] 姚伟,姚德贵,王飞鹏,等. 油纸绝缘热老化行为及纤维折射率演变规律[J]. 绝缘材料,2021,4(7):81-87.
- [9] 张松,唐超,周渠,等. 纳米 Al_2O_3 对变压器绝缘纸纤维素热稳定性的影响及其机理分析[J]. 中国科学(技术科学),2015,45(11):1167-1179.
- [10] 莫洋,杨丽君,鄢水强,等. 掺杂纳米 Al_2O_3 对纤维绝缘纸电寿命的影响及机理[J]. 电工技术学报,2018,33(19):4618-4626.
- [11] 杨路,庞锴,王栋,等. 纳米 SiO_2 表面KH550接枝密度对改性纤维素绝缘纸力学性能与热稳定性的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(1):25-30.
- [12] 温敏敏,田慕琴,宋渊,等. 干式变压器用Nomex绝缘纸老化规律及其可靠性分析[J]. 高电压技术,2014,40(11):3430-3437.
- [13] 王琳,张美云,杨斌,等. 导热型芳纶纳米纸基绝缘材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(8):42-50.
- [14] 张美云,罗晶晶,杨斌,等. 芳纶纳米纤维的制备及应用研究进展[J]. 材料导报,2020,34(5):158-166.
- [15] ZHAO L, WEI C, LI Z, et al. High-temperature dielectric paper with high thermal conductivity and mechanical strength by engineering the aramid nanofibers and boron nitride nanotubes[J]. Materials & Design,2021,210:110124.
- [16] MANEEROT S, NIMSANONG P, SIRIWORACH J, et al. Dielectric response analysis of mineral oil immersed transformer, natural ester (FR3) immersed transformer, and palm oil immersed transformer[C]//20th IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Roma, Italy:IEEE,2019.
- [17] KRAUSE C, KAMINSKIS U, WILD A, et al. Dielectric prototype test of a full-scale 420 kV power transformer HV lead exit insulated with natural ester liquid[C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada:IEEE,2016.
- [18] PAGGER E, MUHR M, BRAUNSTEIN R, et al. Natural Ester FR3 Insulating liquid-very paper friendly[C]//12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China:IEEE,2018.
- [19] 刘睿,张宗喜,聂鸿宇,等. 矿物油与植物油对绝缘纸热老化特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(6):65-69.

收稿日期:2022-03-14 修回日期:2022-05-05

作者简介:赵莉华(1968-),女(汉族),四川射洪人,副教授,主要从事电气设备状态监测及评估的研究;通信作者:任俊文(1987-),男(汉族),四川南充人,副教授,研究方向为电力设备绝缘劣化机理及故障检测、功能电介质材料。