

新能源汽车驱动电机用槽绝缘材料油品兼容性及其试验研究*

刘芮^{1,2}, 张生德^{1,2}, 王振兴^{3†}

(1 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063;

2 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063;

3 东华大学 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

(2024 年 2 月 2 日收稿; 2024 年 4 月 7 日收修改稿)

刘芮, 张生德, 王振兴. 新能源汽车驱动电机用槽绝缘材料油品兼容性及其试验研究[J]. 中国科学院大学学报, DOI:10.7523/j.ucas. 2024. 022.

摘要 “双碳”目标引领汽车行业变革, 也对汽车产业低碳发展提出更高要求。无论采用何种电气化和动力电池技术, 电动驱动系统始终在汽车的动力输出和控制中发挥着至关重要的作用, 提升驱动电机可靠性是保障整车安全稳定运行的基础。本文根据 T/CEEIA 415 标准, 以驱动电机槽绝缘材料为研究对象, 选取三种 0.25 mm 厚度的间位芳纶类绝缘纸进行油品兼容性试验, 并基于绝缘纸表面物理、化学性质及电气和机械性能在不同周期的变化, 对材料的损伤程度和劣化因素进行了详细阐述。结果表明, 在油品兼容性试验中, 短期内受多孔结构和表面毛细作用, 增强了纸基结构的致密性, 有利于电气性能; 但随试验时间增加, 自动变速箱润滑油中的水分在油纸绝缘系统中扩散加剧, 引发绝缘缺陷形成, 造成机械强度衰减, 因此通过力学性能变化筛选绝缘材料更直观、准确; 此外, 由于氢键稳定构型受到了破坏, 酰胺键和 C=O 键强度改变, 密度较低的间位芳纶绝缘纸的介电性能明显恶化。

关键词 槽绝缘; 间位芳纶纸; 新能源汽车驱动电机; 油品兼容性

中图分类号: TM215.3

文献标志码: A

DOI:10.7523/j.ucas. 2024. 022

Research on oil compatibility and characteristics of insulating paper materials for new energy vehicle drive motors

LIU Rui^{1,2}, ZHANG Shengde^{1,2}, Wang Zhenxing^{3,†}

(1 Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2 Shanghai Motor System Energy Saving Engineering Technology Research Center Co., Ltd, Shanghai 200063, China;

3 Donghua University State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Shanghai, 201620, China)

Abstract The "dual-carbon" objectives are driving the transformation of the automotive industry and imposing higher demands on the low-carbon development of the automotive sector. Regardless of the electrification technology and power batteries adopted by new energy vehicles, power output and control must be achieved through the electric drive system. Enhancing the reliability of the drive motor is the foundation for ensuring the overall safety and stability of the vehicle. In this paper, according to the T/CEEIA 415 standard, taking the drive motor slot insulating material as the research object, three kinds of interstitial aramid insulating papers with 0.25 mm thickness are selected for the oil compatibility test, and based on the changes of the physical, chemical, electrical and mechanical properties of the insulating paper surfaces in different cycles, the degree of damage and the degradation factors of the materials are elaborated in detail. The results indicate that in the oil compatibility test, the porous structure and surface capillarity enhance the densification of the paper-based structure in the short term, which is beneficial to the electrical performance. However, with the increase of the test time, the diffusion of

* 上海市自然科学基金(22ZR1403200)资助

† 通信作者, E-mail: 437132954@qq.com

moisture in the automatic transmission fluid in the oil-paper insulating system is intensified, which triggers the formation of insulating defects and results in the attenuation of the mechanical strength. When screening insulation materials, changes in mechanical properties are more intuitive and accurate. In addition, due to the destruction of the hydrogen bond stabilizing configuration, the amide bond and the C=O bond strength are changed, and the dielectric properties of the lower density paper deteriorate significantly.

新能源汽车驱动电机在实际运行中，经受高压、高速、高热等环境考验，驱动电机定子承受各类应力都较普通电机更为严酷。局部放电现象是导致驱动电动机定子绝缘故障和寿命缩减的主要原因之一^[1-2]，可通过定子槽中可靠的绝缘材料对驱动电机定子槽内局部放电的产生及发展进行有效抑制。直接油冷电机在使用过程中会在高低温条件下与自动变速箱润滑油（automatic transmission fluid，ATF）长期接触，且运行过程中电机定子的温度会随着工况的不同出现骤热/骤冷等现象^[3-4]。

作为驱动电机槽内最主要的绝缘材料，间位芳纶类纸不仅有高耐压强度和良好的机械性能，还耐高温、耐酸碱和耐辐射^[5-7]。已有研究表明，间位芳纶类绝缘纸产品，在实际工况温度范围内存在明显的老化现象，其化学结构、微观形貌、机械强度等参量均会因温度环境作用出现明显的劣化现象。而与成分复杂的 ATF 长期接触，势必会对绝缘材料与绝缘结构的可靠性产生影响^[8]。

本文主要根据目前市场需求，对槽绝缘材料进行油品兼容性评价试验，主要选取高/低温、温变、水分等影响因子，选取 3 种 0.25 mm 规格的间位芳纶类绝缘纸进行油品兼容性试验。通过对其试验前后的各项性能测试，分析不同周期油品兼容性评定下材料的劣化程度，验证相关标准用于绝缘材料可靠性筛选的试验是否可行。

1 油品兼容性试验

目前关于新能源驱动电机绝缘材料及结构的可靠性评价主要集中在长期耐热性评定、电压耐久性评定、油品兼容性评定以及环境可靠性评定几方面。行业中常用表 1 所示的三种方法评定绝缘材料的油品兼容性。这些方法可对比是否采用水含量作为加速因子增加绝缘材料在温度冲击环境以及 ATF 中的劣化失效。在初始 ATF 介质含水量相同的情况下，采用上述密封型温度冲击较透气阀密封型温度冲击油品兼容性评定方法可以更迅速加快绝缘材料分解，更适用于加速评定^[9-10]。但针对

油品兼容性试验对绝缘材料有何劣化影响及主要影响因素的研究较少。关于评定体系的含水量，T/CEEIA 415-2023^[11]在附录 C 中对密封条件下 ATF 中水含量的计算给出了可行性模型的推导和计算实例。2023 版标准采用 2000 ppm 初始水含量，155 °C 时液相中实际水含量约为 1103 ppm，符合电机运行可能出现的实际工况。

表 1 常用绝缘材料油品兼容性评定方法

Table 1 Method for evaluating the compatibility of commonly used insulation materials and oil products

序号	评定方法	密封型	密封型	透气阀密封型
		温度冲击	长期高温	温度冲击
1	采用标准	T/CEEIA 415-2023 ^[11]	T/CAAMTB 130-2023 ^[12]	/
2	是否含水	是	否	是
3	含水量	2000 ppm	否	2000/5000 ppm
4	是否密封	是	否	透气阀密封
5	高温/时间	155±2 °C /40 h	150±2 °C /120 h	155±2、180±2 °C 等 /168 h
6	低温/时间	-45±2 °C /8 h	常温冷却 /24 h	供需双方确定
7	循环次数	8	16	供需双方确定

1.1 预处理

选取了不同生产商提供的 3 种厚度为 0.25 mm±0.005 mm 的商业化间位芳纶类绝缘纸样品（A~C）与 1 种 ATF 样品组合，分别进行 4/8 周期油品兼容性试验，样品及其参数见表 2。

表 2 样品及其参数

Table 2 Test samples and parameters

样品	实测质量 / (g/m ²)	实测厚度 /mm	密度 / (g/cc)	实测密度 / (g/cc)
A	246	0.245	0.954	1.004
B	244	0.247	1.004	0.988
C	88	0.252	0.31	0.349

注：ATF 油为出光润滑油 AXLE 系列。

将裁剪好的绝缘纸进行 105 °C，4 h 烘干处理，分别放置于已进行清洗、烘干处理的密封管容器中再次干燥处理 1 h(105±2 °C)；配置 ATF 油及去离子水的混合液，

两者体积比为 99.8%:0.2%(先测 ATF 油的初始含水量,加入适量的水并混合均匀使混合液体总含水量达到 2000±100 ppm)。待装好待测样品的密封容器冷却至室温后,将混合液沿密封容器内壁缓缓注入密封容器并将容器完全密封(注入量为密封容器内尺寸高度的 75%)。

1.2 温度冲击处理

在高温和低温试验箱中进行表 3 所示的温度冲击试验(试验参考 T/CEEIA 415^[11])。将装有 A~C 试的两组密封容器分别进行 4 周期和 8 周期循环温冲处理,完成后进行性能表征。

表 3 温度冲击试验参数

Table 3 Temperature shock test parameters

编号	名称	时间	温度
t ₁	升温时间	<1 h	155±2 °C
t ₂	高温保持时间	40 h	
t ₃	转换时间	≤30 s	
t ₄	降温时间	<1 h	-45±2 °C
t ₅	低温保持时间	8 h	

1.3 性能表征

微观形貌表征:采用扫描电子显微镜(SEM, SU8010 型)表征间位芳纶纸试样的表面形貌。

机械性能表征:拉伸强度与断裂伸长率采用万能试验机(CMT6104 型)测试;边缘撕裂性采用万能试验机(CMT6104 型)测试(测试方法按照:GB/T5591.2)。

化学性能表征:采用傅里叶红外光谱仪(FT-IR, Nicolet IS50 型)分析间位芳纶纸试样元素与化学键变化。

电气性能表征:击穿电压采用 50 kV 工频耐压试验

仪(JTKZ-5&JTKC-5&YDT-50&CVD-50 型)(测试方法按国标 GB/T 3333,快速升压法);介电常数、介质损耗用 LCR 数字电桥测试(测试方法按照:GB/T 3334)

2 结果及分析

2.1 耐油试验对绝缘纸微观形貌影响分析

间位芳纶纸属于纤维复合纸基材料,由结晶区短切纤维(增强纤维,由连续长丝切成的高结晶、高模量短段纤维)和非晶区沉析纤维(粘结纤维,在高剪切作用下将芳纶树脂溶液加入凝固液中沉析而制得的低结晶度纤维)两种形态结构经范德华力作用结合,与液体的相互作用行为各不相同^[13]。

图 1(a)~1(c)为 A~C 绝缘纸样品在 ATF 油中经过 4、8 周期温度冲击前后的 SEM 图。观察可知,初始状态下 A、B 纸的短切纤维呈扁圆形,且表面整体较光滑,A 纸的纤维分布更均匀致密。密度最低的 C 纸纤维相对分散且细度不均,部分结晶区与非晶区接触面处于不完整状态。经过 4、8 周期温度冲击后,间位芳纶纸试样的表面形貌均有一定程度改变。4 周期后 A 纸基本无变化,由于毛细作用,B 纸表面的短切纤维与沉析纤维结合处吸附大量 ATF 油,C 纸表面大量缺陷被 ATF 油填补,形成油膜。8 周期后 A 纸最表层非晶区沉析纤维脱落,表面逐渐出现分丝,伴随少许油品附着;B 纸表面的部分沉析纤维发生龟裂,结晶区短切纤维逐渐对外暴露;C 纸的劣化现象尤为明显,ATF 油富集在表面,部分相邻纤维间连接中断,沉析纤维近乎脱离,短切纤维大面积暴露。

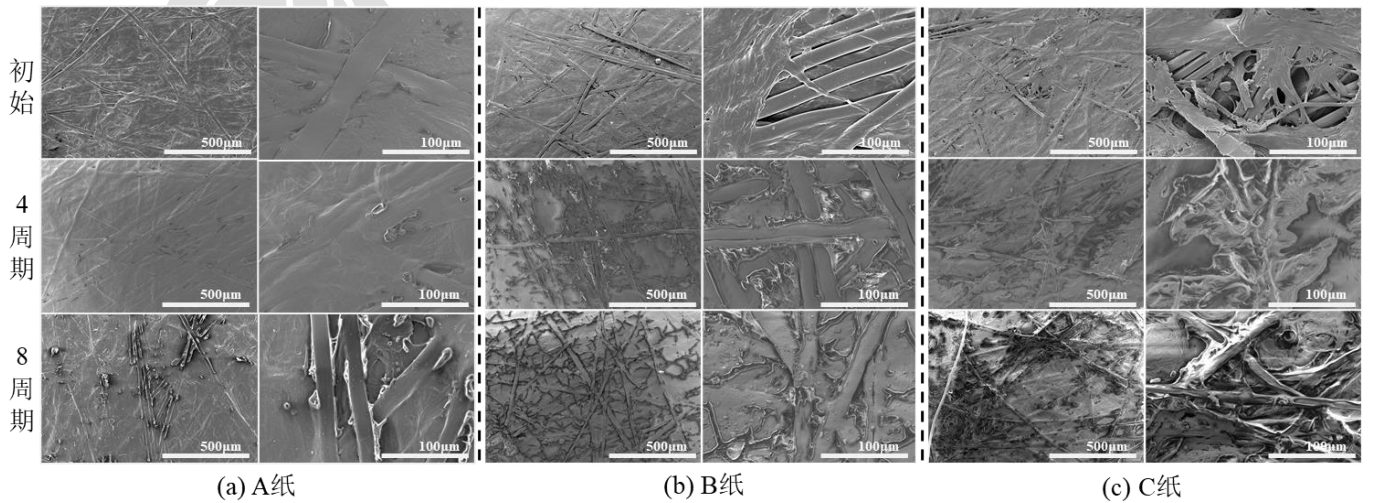


图 1 芳纶绝缘纸经耐油试验前后的表面 SEM 图

Fig.1 SEM image of the surface of aramid paper before and after oil resistance test

2.2 耐油试验对绝缘纸表面吸附性影响分析

纸基结构的内部孔隙使其具有优异的吸附特性，更容易让液体浸润和渗透，减少空隙和气泡。这可能是由于结晶区域包含紧密有序的间位芳纶分子，分子间存在强烈的非键合相互作用，因此该区域的液体吸附仅限于表面。非晶区域的分子间的相互作用较弱且存在更多的空隙，使老化产物伴随 ATF 更容易进入^[14-15]。对试验前后间位芳纶纸的质量变化进行记录，并推算出相应密度改变量，结果如表 4 所示。结合微观形貌分析的结果可见，ATF 的吸附量随试验周期增加而增加，其中，密度较低的 C 纸吸附质量最高，其次是 B 纸，而密度较高、较为致密的 A 纸其相对密度变化最不明显。同等厚度的间位芳纶绝缘纸材料，其密度与表面吸附性呈一定正相关，且与接触时间正相关。

表 4 芳纶绝缘纸试验后质量与密度变化

Table 4 The change in quality and density of the aramid paper after the test

周期 样品	4 周期		8 周期	
	质量/%	密度/%	质量/%	密度/%
A	+2.5	+2.5	+4.3	+3.46
B	+5.3	+4.45	+14.2	+12.38
C	+17.9	+15.61	+29.2	+24.27

2.3 耐油性试验对绝缘纸机械性能影响分析

分别对 A~C 绝缘纸耐油性试验前后的样品进行机械性能测试，结果如表 5 所示。

表 5 芳纶绝缘纸机械性能测试结果

Table 5 Aramid paper mechanical properties test results

测试项目	样品	性能保持率/%	
		4 周期	8 周期
拉伸强度 (纵向)	A	98.9	94.1
	B	94.8	81.7
	C	62.1	57.4
	D ^[10]	70.21	54.84
拉伸强度 (横向)	A	96.5	80.8
	B	92.4	86.1
	C	71.9	69.5
	D ^[10]	74.83	55.55
伸长率 (纵向)	A	53.5	38.1
	B	89.7	49.2
	C	32.2	29.4
	D ^[10]	27.9	21.92

伸长率 (横向)	A	53.1	39.3
	B	52.8	38.6
	C	38.5	28.0
	D ^[10]	34.96	26.12
边缘撕裂 (纵向)	A	78.6	41.5
	B	90.1	60.3
	C	47.1	29.3
边缘撕裂 (横向)	A	73.8	49.6
	B	84.9	67.0
	C	66.5	45.8

三种绝缘纸机械性能均随耐油试验周期增加而降低，耐油性试验后拉伸强度性能保持率下降较低，伸长率与边缘撕裂性的性能保持率降幅较高。其中，A、B 纸的拉伸强度劣化不明显（超过初始性能的 80%），伸长率和边缘撕裂性性能保持较差；密度最低的 C 纸各项机械强度均降低最甚，8 周期后伸长率、边缘撕裂（纵向）低于初始性能的 30%。结果表明油品兼容性试验对间位芳纶绝缘纸材料的机械性能劣化影响明显。对比参考文献^[10]中采用相同实验方法不同体系含水量（5000 ppm）的某一间位芳纶纸试验结果，绝缘纸的机械性能变化趋势一致，通过 8 周期的力学性能变化对绝缘纸材料进行筛选更直观、准确。

2.4 耐油试验对绝缘纸化学性能影响分析

分别对 A~C 绝缘纸的初始及在 ATF 油中经过 4、8 周期温度冲击后的样品进行 FT-IR 表征（见图 2）。仔细对照芳纶纸的红外光谱几个变化明显的特征峰。C-H 的伸缩振动出现在 2853~2962 cm⁻¹ 间；酰胺 I 带 C=O 弯曲振动、酰胺 II 带 C-N 伸缩振动和 C=O 非对称拉伸振动分别出现在 1640 cm⁻¹、1530 cm⁻¹ 和 1412 cm⁻¹。与初始状态相比，耐油性试验后未出现新的吸收峰，说明在此期间，三种绝缘纸未出现化学变化；三种绝缘纸的 C-H 的振动均明显增强，绝缘纸表面电负性增强；仅绝缘纸 C 的酰胺键和 C=O 键强度明显减弱，这可能是由于 ATF 和老化产物进入非晶区域，氢键的稳定构型受到一定程度破坏^[16]。

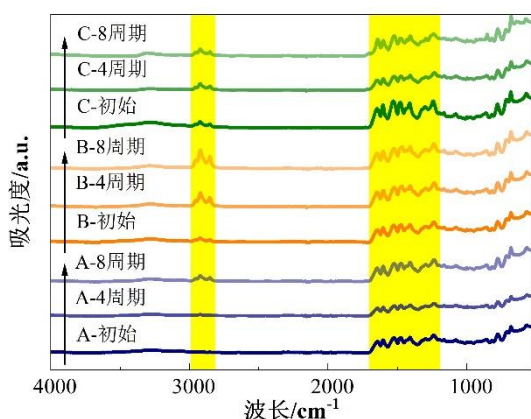


图2 芳纶绝缘纸的 FT-IR 图

Fig.2 FT-IR diagram of aramid insulating paper

2.5 耐油试验对绝缘纸电气性能影响分析

图3显示了A~C绝缘纸的在ATF油中经过4、8周期温度冲击前后击穿电压试验结果。结合SEM表面形貌分析,绝缘纸的击穿电压性能经4周期试验后均大幅提高,其中A~C纸的性能保持率分别为164%、185%、253%;经8周期的耐油试验后,表面较为致密的A纸与B纸性能略微下降,其性能保持率分别为150%和178%,受损更严重的C纸,反而由于油品在表面成膜,击穿电压呈现上升趋势(高于267%的初始值)。对比文献[10]中采用相同实验方法(5000 ppm含水量)的某一间位芳纶纸,其击穿电压增长100%以上(4周期高于222.86%初始值、8周期高于234.29%初始值)。纸基材料多孔且疏松的结构会吸附部分润滑油,且吸附量受材料密度影响,同等厚度下,密度较低的绝缘纸具有更疏松的表面结构,利于ATF填充表面缺陷,进而导致绝缘纸材料介电击穿强度的增强。耐油性试验对于绝缘纸击穿电压性能的劣化不明显。

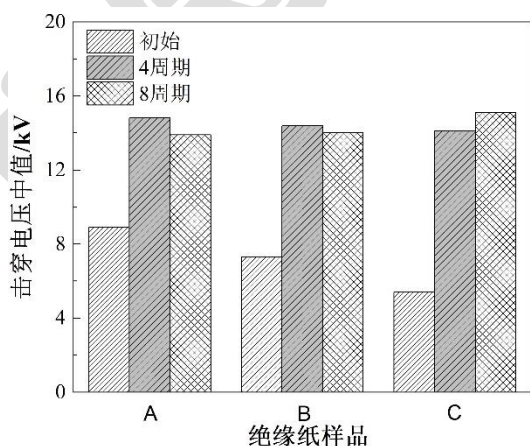


图3 芳纶绝缘纸的击穿电压

Fig.3 BDV of aramid insulating paper

介电性能可以反映出绝缘材料发生在绝缘内部的介电现象。图4、图5分别为A~C三种间位芳纶绝缘纸在耐油性试验前后的介电常数、介电损耗随频率的变化曲线。从图4结果可知,绝缘纸的介电常数会随频率的提高而略微下降。A、B、纸经耐油性试验后,介电常数较初始状态有些许提高,这可能是由于间位芳纶纸经耐油性实验后,ATF油在纸表面形成一层致密膜,改善了表面孔隙不均问题。

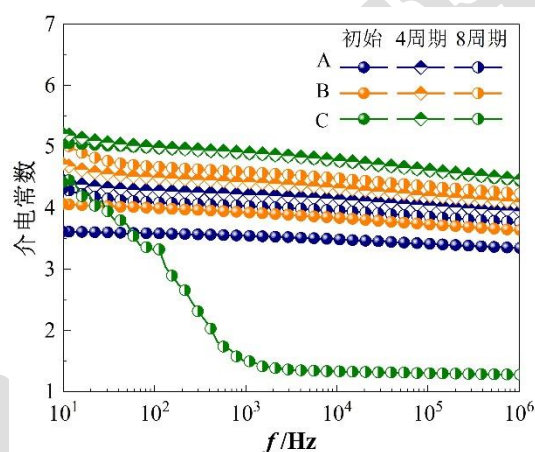


图4 芳纶绝缘纸的介电常数

Fig.4 Dielectric constant of aramid paper

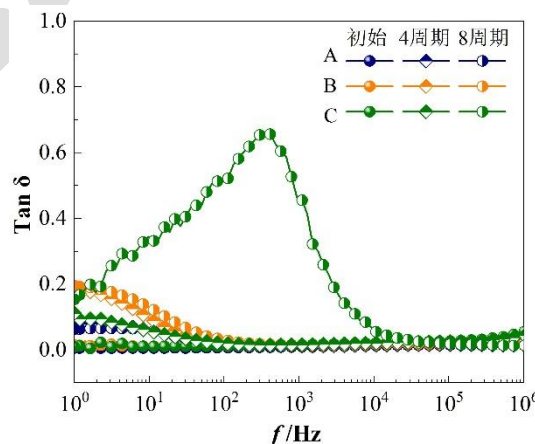


图5 芳纶绝缘纸的介电损耗因数

Fig.5 Dielectric loss factor of aramid paper

根据图5所示的介电损耗因数结果,耐油试验前后A、B纸的介电损耗因数均随着电场频率的提高而发生些微降低;试验后芳纶纸的介电损耗,在 10^2 Hz时下降到初始性能值左右。C纸在经8周期耐油试验后,介电损耗随频率的增加先升高后降低,并在412 Hz处达到最高值0.656,结合其介电常数试验结果,在412 Hz时C纸介电常数性能大幅衰减至1.245(仅为原纸的25%)。这可能是由于:(1)同等厚度下,密度较低的绝缘纸表

面劣化受损较严重,界面极化损耗升高导致;(2)随着耐油性试验时间增加,ATF 中的水分在油纸绝缘系统中的扩散行为增强,空间电荷更深地渗入绝缘纸,导致电场畸变。造成绝缘结构的缺陷^[17]。

3 结论

(1) 本文通过对 3 种 0.25mm 厚度的间位芳纶基绝缘纸初始以及油品兼容性试验后微观形貌、化学结构、电气特性及机械性能等测试,结果表明采用 T/CEEIA 415 标准进行油品兼容性试验后,8 周期评定对绝缘材料劣化更明显,用于槽绝缘材料和绝缘结构油品兼容性加速评定的可靠性更高,该标准更适宜通过力学性能变化评定绝缘材料可靠性,电学性能变化不明显。

(2) 间位芳纶材料的介电特性受耐油性试验影响较低;而随着高低温冲击处理次数增加,部分纸的介电性能发生大幅衰减,可能是 ATF 和老化产物进入非晶区域,间位芳纶纸分子结构中氢键的稳定构型受到一定程度破坏,影响酰胺键和 C=O 键强度变化。

(3) 一定程度上,绝缘纸的密度与绝缘性能相关。密度较低的材料受益于毛细作用会增强间位芳纶纸表面对 ATF 的吸引力,填充孔隙进而增强间位芳纶纸的击穿强度,但对机械性能增益效果有限。随着耐油性试验时间增加,ATF 中的水分在油纸绝缘系统中的扩散行为增强,会造成绝缘的缺陷,也会加剧机械强度衰减。提高纸基结构的致密性有利于绝缘可靠性和耐久性。

参考文献:

[1] 王双双. 干式变压器用国产芳纶纸与Nomex的绝缘性能与局部放电特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.

[2] 刘麦. 电动汽车驱动电机的应用现状与发展趋势[J]. 汽车零部件, 2020(10): 91-94. DOI: 10.19466/j.cnki.1674-1986.2020.10.022.

[3] 陈俊辉. 电动汽车驱动电机用芳纶绝缘纸的电老化特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.

[4] 石扬帆, 樊鑫虎, 王博文等. 全球电动汽车发展现状及未来趋势分析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(10): 194-195. DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.010.062.

[5] Moranda H, Moscicka-Grzesiak H, Przybylek P, et al. Comparative tests of partial discharges in Nomex® 910 paper and cellulose paper[J]. Energies, 2020, 13(3): 647. DOI: 10.3390/en13030647.

[6] 解浩, 唐建伟, 严家明等. 热老化过程中油浸绝缘纸局部放电能量特性分析[J]. 绝缘材料, 2018, 51(4): 69-74. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2018.04.014.

[7] 陈磊, 宋欢, 李正胜等. 芳纶纤维材料在电气绝缘和电子领域中的应用进展[J]. 绝缘材料, 2018, 51(10): 7-10, 15. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2018.10.002.

[8] 杜洋. 电动汽车传动系统润滑油电导率及铜腐蚀性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.

[9] 巩智利, 李强军, 张晓晶等. 电动汽车电机用绝缘材料与变速箱油相容性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(6): 45-50. DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.06.008.

[10] 李园园. 新能源汽车驱动电机绝缘系统油品兼容性评价方法[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(2): 115-119. DOI: 10.16638/j.cnki.1671-7988.2024.002.021.

[11] 张生德, 汪双灿, 刘芮等. T/CEEIA 415-2023, 新能源汽车驱动电机绝缘结构技术规范[S]. 北京: 科学技术文献出版社, 2023.

[12] 曹红飞, 黄苏融, 谢颖等. T/CAAMTB 130-2023, 车用直接油冷电机及其材料兼容性技术要求与验证方法[S]. 北京: 科学技术文献出版社, 2023.

[13] Liao R J, Zhu M Z, Yang L J, et al. Molecular dynamics study of water molecule diffusion in oil-paper insulation materials[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(5): 1162-1168. DOI: 10.1016/j.physb.2010.12.074.

[14] Yin F, Tang C, Li X, et al. Effect of moisture on mechanical properties and thermal stability of meta-aramid fiber used in insulating paper[J]. Polymers, 2017, 9(10): 537. DOI: 10.3390/polym9100537.

[15] Li X, Tang C, Wang J N, et al. Analysis and mechanism of adsorption of naphthenic mineral oil, water, formic acid, carbon dioxide, and methane on meta-aramid

insulation paper[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(11): 8556-8570. DOI: 10.1007/s10853-019-03476-x.

[16] 张旭, 张天骄. 间位芳纶和对位芳纶的红外光谱与拉曼光谱研究[J]. 合成纤维工业, 2019, 42(6): 88-91.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0041.2019.06.019.

[17] Yoon H, Chen G. Space charge characteristics of natural ester oil-impregnated paper with different moisture contents[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2139-2146. DOI:

10.1109/TDEI.2022.3202740.