

电力变压器用纤维素绝缘纸物理改性的研究进展

霍上元, 刘俊伍, 刘 乾, 季 雨

(辽宁西电兴启电工材料有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 绝缘纸的性能决定了电力变压器的可靠性和寿命, 为了保障变压器安全可靠运行, 本文结合国内外文献及相关研究成果, 从纳米粒子改性和热稳定剂改性阐述当前采用物理改性技术提升绝缘纸性能的研究现状, 分析两种改性方式的利弊, 探究经济可行的电力变压器用纤维素绝缘纸改性方法, 从本质上提升变压器运行可靠性。

关键词: 电力变压器; 纤维素绝缘纸; 热稳定剂; 纳米粒子

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.001

Research progress in physical modification of cellulose insulating paper for power transformers

HUO Shangyuan, LIU Junwu, LIU Qian, JI Yu

(Liaoning Xidian Xingqi Electrical Materials Co., Ltd., Liaoyang 111000, China)

Abstract: The performance of insulating paper determines the reliability and life of power transformers. In order to ensure the safe and reliable operation of transformers, we combined with domestic and foreign literature and related research results, described the current research status of physical modification technology to improve the performance of insulating paper from the nanoparticle modification and thermal stabilizer modification, analyzed the advantages and disadvantages of the two modification methods, and explored the economic and feasible modification method of cellulose insulating paper for power transformers to essentially improve the reliability of transformer operation.

Key words: power transformer; cellulose insulating paper; thermal stabilizer; nanoparticle

0 引言

特高压电网建设是我国电力工业发展的必经之路^[1], 电力变压器作为电力转换和传输的核心枢纽, 是电力系统网络输配电装备中的关键设备^[2-4]。输配电装备的安全运行是保证电网安全的第一道防线, 而大型电力变压器绝缘材料的状态在很大程度上影响着输电系统的可靠性。目前, 电力变压器普遍以油纸复合绝缘为主要绝缘材料, 包含绝缘油及纤维素材料, 其中绝缘油在变压器中具有冷却、绝缘以及灭弧的作用, 对变压器的可靠运行有重大意义。常用变压器油为25#矿物油, 变压器使用的绝缘纸主要成分为天然纤维素。电力变压器在长期运行过程中, 机器老化及运行故障会导致油纸绝缘系统的绝缘性能下降。绝缘油的绝缘性能可以通过换油得到改善, 但绝缘纸在运行过程无法更换, 所以绝缘纸的性能优劣最大程度决定了变压器的性能和使用寿命^[5-7]。

纤维素绝缘纸作为变压器内一种重要的绝缘材料, 其老化损坏主要由热、电、机械应力及氧气、水分等因素协同作用而发生裂解所致。为了提升

纤维素绝缘纸的性能和寿命, 国内外学者进行了大量研究。纤维素绝缘纸的改性从20世纪50年代纤维素的化学改性开始, 但由于氰乙化、乙酰化纤维素链上羟基数量变少, 导致成纸时机械强度下降^[8-10]。20世纪90年代, 国外学者在纤维素纤维中添加化学增强纤维来提升绝缘纸的电气性能和抗老化性能^[11-12]。21世纪初, 对纤维素绝缘纸的改性研究多为不影响原有结构的物理改性为主, 例如在绝缘纸中添加胺类热稳定剂, 热稳定剂与绝缘纸中的水分、酸等加速绝缘纸老化的成分发生反应, 从而保护绝缘纸使其降解减缓^[13-14]。近年来, 随着纳米技术的发展, 纳米粒子由于其量子效应、比表面积大的特点, 利用纳米调控技术来增强改性绝缘纸的各项性能也成为近年来的研究热点^[15-16]。本文以物理改性为切入点, 综述纳米改性和热稳定剂改性对绝缘纸性能的影响。

1 纳米改性

1.1 纳米Al₂O₃改性

纳米Al₂O₃具有耐热性强、电阻率大、介电常数低的特点, 在制备新型复合绝缘材料中具有明显的

优势。陶可鹏^[17]采用纳米 Al_2O_3 作为添加物,在对其进行表面处理后与纸浆共混,通过高速搅拌使纳米 Al_2O_3 均匀分散,再经抄取、干燥、压光等流程,制备得到纳米 Al_2O_3 改性纤维素绝缘纸。改性后绝缘纸的颜色随纳米 Al_2O_3 粒子含量的增加越来越白,通过电射透镜观察到纳米 Al_2O_3 粒子分散均匀。纳米 Al_2O_3 改性绝缘纸在介电性能、电气强度、抗老化性能等方面均得到一定改善。

在电学性能方面,廖瑞金等^[18-19]制备了纳米 Al_2O_3 质量分数为1%~7%的改性绝缘纸,经过电学性能试验分析,结果表明改性绝缘纸的电阻率随纳米 Al_2O_3 含量的增加而增大,但当纳米 Al_2O_3 质量分数大于1%后增大幅度明显减小;改性绝缘纸的工频电气强度和直流电气强度均随纳米 Al_2O_3 含量的增加先增大后减小,当纳米 Al_2O_3 质量分数为1%时,工频电气强度达到最大值,为66.78 kV/mm,相比未改性绝缘纸的59.23 kV/mm增大了12.75%,直流电气强度从215.83 kV/mm增大到242.52 kV/mm,提升了12.37%。采用宽带介电谱测得不同改性绝缘纸的相对介电常数和介质损耗因数如图1和图2所示。

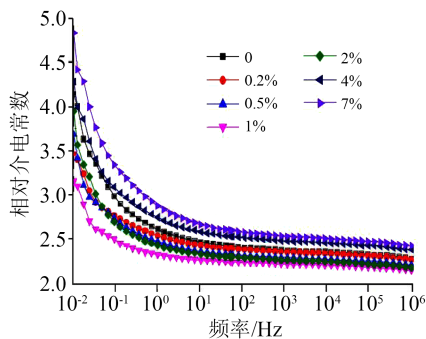


图1 纳米 Al_2O_3 含量对绝缘纸相对介电常数的影响

Fig.1 Effect of nano- Al_2O_3 content on the relative dielectric constant of insulating paper

从图1和图2可以看出,纳米 Al_2O_3 改性绝缘纸的相对介电常数和介质损耗因数均随 Al_2O_3 含量的增加呈先减小后增大的趋势。其中相对介电常数随着频率的增大而减小,且不同纳米粒子含量的变化趋势基本一致,介质损耗因数随频率的增大先减小后增大,在工频附近,纳米 Al_2O_3 质量分数为1%的改性绝缘纸介质损耗因数最小。

国外学者^[20-22]提出聚合物纳米复合电介质多核模型并用分子动力学分析纤维素的热分解过程,多核模型理论假设“相互作用区”的界面为多层,分为键合层、束缚层和松散层,该理论解释了聚合物纳米复合材料作为介质和电绝缘所表现出的各种性能

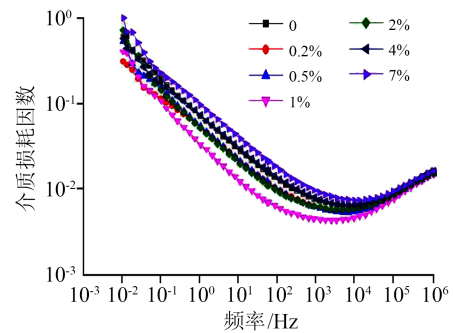


图2 纳米 Al_2O_3 含量对绝缘纸介质损耗因数的影响

Fig.2 Effect of nano- Al_2O_3 content on the dielectric loss factor of insulating paper

质和现象。

刘贺千^[23]通过改性绝缘纸的油纸绝缘分子动力学理论和空间电荷特性研究,建立纳米 Al_2O_3 掺杂改性纸能带结构模型,如图3所示,其中, E_C 为导带, E_V 为价带, E_{F1} 为费米能级, E_{G1} 为纤维素禁带宽度, E_{G2} 为 Al_2O_3 禁带宽度, t_{S1} 为纤维素陷阱能级, t_{S2} 为 Al_2O_3 陷阱能级, D 为纳米颗粒间距。纳米掺杂改性纸中纳米粒子的分布随掺杂含量而变化,纳米粒子的引入会使体系内的陷阱特性发生变化,由于 Al_2O_3 的禁带宽度较宽,使整个体系的势垒变高,载流子难以越过,使 Al_2O_3 改性绝缘纸的电阻率增大,陷阱深度和密度也增大。陷阱深度和密度的增大会使载流子脱陷阱困难,导致电气强度增大。而过量的掺杂会使体系内陷阱密度和深度减小,导致电阻率和电气强度减小。由于改性绝缘纸的陷阱电荷量和陷阱深度随掺杂量的增加先增大后减小,导致改性绝缘纸的介电常数和介质损耗因数随之变化。掺杂纳米粒子使陷阱密度和深度增大、提高绝缘纸体系势垒,对空间电荷的注入、迁移、积聚起到抑制作用。

在抗老化方面,掺杂纳米 Al_2O_3 改性绝缘纸在电老化和热老化方面均具有一定优势。廖瑞金等^[24-26]

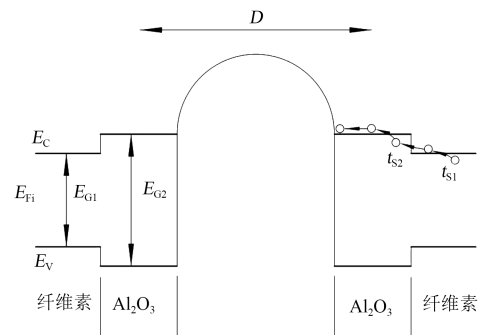


图3 纳米 Al_2O_3 改性纸能带结构模型

Fig.3 Energy band structure model of nano- Al_2O_3 modified paper

通过搭建电老化试验平台进行电老化试验,结果表明纳米 Al_2O_3 改性后油浸绝缘纸的寿命指数提升了约20%,并通过多核模型理论进行了分析,多核模型如图4所示。

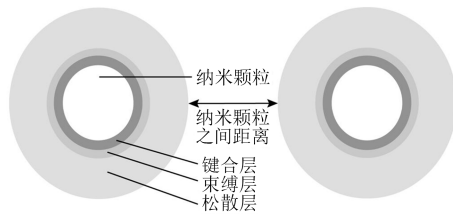


图4 纳米粒子在绝缘纸中界面的多核模型
Fig.4 Multi-core model of nano-particle in the interface of insulating paper

通过引入无机纳米粒子,松散层及束缚层在极性纤维素分子之间形成纳米尺度的界面区域,该界面是一种具有独立介电性能的“物质”,能限制分子链段的运动及极性基团的转动、削弱转向极化,从而降低油浸绝缘纸的相对介电常数。在油纸绝缘系统中, Al_2O_3 改性绝缘纸的相对介电常数低、电阻率大,使得油纸绝缘系统在电场作用下分布更合理,并且介质损耗和泄漏电流减小可以增强绝缘纸的抗老化性。

掺杂纳米 Al_2O_3 可以提高绝缘纸的热导率,削弱热应力对纤维素的损伤,同时与加速纤维素热老化的水分和小分子酸反应,进而提升纳米改性绝缘纸的抗热老化性能。经热老化试验后可知,改性绝缘纸的聚合度、抗张强度对变压器油的影响等均强于未改性绝缘纸。

1.2 纳米 SiO_2 改性

纳米 SiO_2 俗称“白炭黑”,具有粒径小、比表面积和表面能大等优点。纳米 SiO_2 改性绝缘纸主要通过打浆后添加纳米 SiO_2 到纸浆中或者通过接枝聚合物对纳米 SiO_2 表面改性后添加到纸浆中制备得到,纳米 SiO_2 改性绝缘纸具有更低的相对介电常数和更好的力学性能,并且在抗机械老化、热老化、电老化性能方面突出^[27]。

Y J KIM 等^[28]和 R NIKJOO 等^[29]研究发现将纳米 SiO_2 颗粒经表面处理后添加到化学纤维素中可提升复合材料的电气性能。唐超等^[30-31]通过分子动力学计算,经表面处理的纳米 SiO_2 粒子添加到绝缘纸中,由于 SiO_2 颗粒弹性模量较高且具备偶联介质,可以提升改性绝缘纸的拉伸强度,但添加过量的纳米 SiO_2 会引起“杂质效应”使绝缘纸受力不均导致力学性能降低。陈杰等^[32]制备了质量分数分别为1%、3%、5%、7%的纳米 SiO_2 改性绝缘纸并进行

拉伸试验分析,结果表明当纳米 SiO_2 质量分数为3%时,改性绝缘纸的拉伸强度最大。张福州等^[33]通过试验制备纳米级 SiO_2 空心微球,并制备了 SiO_2 质量分数分别为3%、5%、7%的改性绝缘纸,采用宽频介电与阻抗谱仪进行测量,研究纳米 SiO_2 含量对绝缘纸相对介电常数的影响,结果如图5所示。

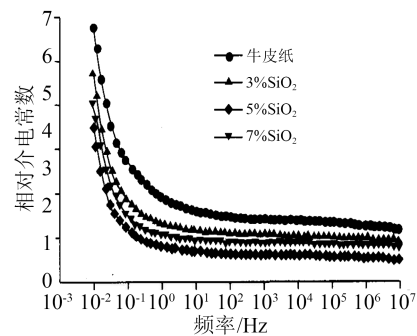


图5 纳米 SiO_2 含量对绝缘纸相对介电常数的影响
Fig.5 Effect of nano- SiO_2 content on the relative dielectric constant of insulating paper

从图5可以看出,添加处理后的纳米 SiO_2 粒子,降低了改性绝缘纸的相对介电常数,这是由于纳米粒子的引入增大了纤维素的间距,使自由体积变大,导致绝缘纸的相对介电常数降低。但过量的纳米 SiO_2 粒子会发生聚集导致改性绝缘纸的相对介电常数有所升高,当纳米 SiO_2 的质量分数为5%时,改性绝缘纸的相对介电常数最低,在50 Hz时,其相对介电常数比未改性绝缘纸的相对介电常数下降了34%。改性绝缘纸的相对介电常数降低可以使纸-油-纸复合绝缘系统的电场分布均匀,进而提升绝缘系统的击穿电压,由添加质量分数为5%的纳米 SiO_2 的低介电常数绝缘纸组成的纸-油-纸复合绝缘系统击穿电压提高了15.5%。ZHANG S 等^[34]通过分子动力学模拟了掺杂质量分数为1%~9%纳米 SiO_2 的改性绝缘纸,也证明了掺杂质量分数为5%的纳米 SiO_2 改性绝缘纸的相对介电常数最低。

1.3 纳米 TiO_2 改性

纳米 TiO_2 具有比表面积大、粒径小等特点,由于Ti-O键并不平衡, TiO_2 具有较强的极性,其水解表面产生大量羟基,能够与纤维素紧密结合。但纳米 TiO_2 的表面活性会吸引杂质,影响其在水中的分散性,所以在绝缘纸改性时常需要先利用偶联剂对纳米 TiO_2 进行表面处理,再使其与纸浆混合后制备改性绝缘纸^[35-36]。纳米 TiO_2 改性的绝缘纸在电气强度、介电常数、局部放电等电气特性方面均得到提升,同时其抗电老化和热老化性能更优。

廖瑞金等^[37]制备了纳米 TiO_2 质量分数为1%~

4%的改性绝缘纸并进行抗张强度测量,结果如图6所示。从图6可以看出,纳米TiO₂质量分数小于3%的绝缘纸抗张强度随纳米TiO₂含量的增加略有提升,在纳米TiO₂质量分数为4%时,改性绝缘纸的抗张强度急剧下降。将纳米TiO₂掺杂到纸浆中,TiO₂分子会发生水解在其表面产生大量的羟基,该羟基与纤维素的羟基以氢键的形式结合,使改性绝缘纸的抗张强度略有提升。

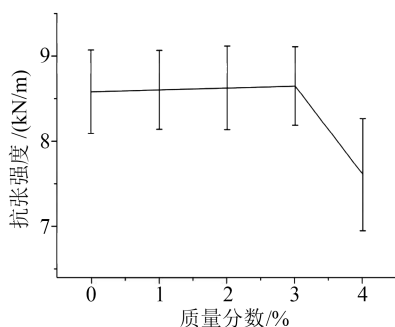


图6 纳米TiO₂含量对绝缘纸抗张强度的影响

Fig.6 Effect of nano-TiO₂ content on the tensile strength of insulating paper

纳米TiO₂与纤维相互作用,一方面可以阻碍纤维素绝缘纸中某些极性基团的转向极化,削弱纤维素链的极化能力,降低绝缘纸的相对介电常数,另一方面可以使纤维表面转向极化损耗降低,介质损耗因数降低。此外,TiO₂纳米粒子会使改性绝缘纸形成界面效应产生抑制载流子迁移的陷阱,从而使体积电导率下降的同时减小泄漏电流,也会降低介质损耗。

郭正阳^[38]利用Weibull分布理论和有限元分析方法分析了纳米TiO₂改性油纸绝缘系统的电气强度随纳米TiO₂的粒径大小和掺杂量的变化关系,结果表明加入纳米TiO₂粒子可以减小深陷阱和浅陷阱的密度,同时减少界面电荷的集合和迁移电荷的数量,导致界面电荷衰减速率减慢,提高改性绝缘纸的电气强度,其中掺杂质量分数为5%、粒径为10 nm纳米TiO₂的改性绝缘纸电气强度最大。

叶敬^[35]通过搭建电老化试验平台(如图7所示),对纳米TiO₂改性绝缘纸进行电老化试验。在8 kV直流电压下进行40 h老化试验,每10 h对掺杂不同含量纳米TiO₂绝缘纸的抗张强度、聚合度、含水率、局放和耐压等参数进行测量,结果表明当纳米TiO₂质量分数为5%时,改性绝缘纸的抗电老化性能最好。

刘道生团队^[38-39]也对纳米TiO₂改性绝缘纸进行了加速热老化试验,结果表明在130℃加速热老化

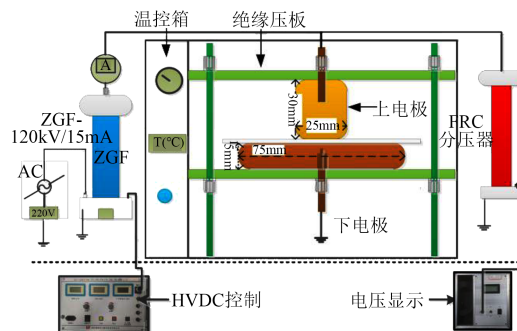


图7 电老化试验装置

Fig.7 Electrical ageing test device

试验中,掺杂纳米TiO₂质量分数为5%的改性绝缘纸聚合度和电气强度衰减速率最低。

2 热稳定剂改性

热稳定剂改性主要通过添加热稳定剂与绝缘纸中的水分、酸等促进绝缘纸老化的物质发生反应来抑制绝缘纸的热老化。常用的热稳定剂主要为尿素、双氰胺、三聚氰胺和聚丙烯酰胺等胺类化合物及其催化改性的耐高温老化助剂,通常用氮含量来衡量绝缘纸热稳定剂的添加量,常采用打浆、涂布、浸渍或喷涂的方式来实现热稳定剂改性,经干燥后热稳定剂存在于纤维素纸的非定型区,不影响纤维素间氢键的结合,对绝缘纸的机械强度不产生影响^[40-41]。

廖瑞金等^[42]和唐超等^[43]通过分子动力学模拟和热老化试验的方法对改性绝缘纸的老化性能进行研究,发现双氰胺、三聚氰胺和尿素分别作为单一热稳定剂时,添加双氰胺的绝缘纸抗老化效果最好,三聚氰胺次之;通过不同热稳定剂的组合配比进行老化试验,发现添加“双氰胺+三聚氰胺+聚丙烯酰胺”的绝缘纸抗热老化效果最好,聚合度下降速率最慢;由于热稳定剂与绝缘纸老化产生的水分和小分子酸发生反应,对绝缘纸老化起到抑制作用,因此热稳定剂改性绝缘纸在老化试验中的聚合度、电气强度、水分含量、油中酸值等参数均较未改性绝缘纸的变化率更低。欧阳春等^[44]通过耐热助剂涂布改性制备耐热绝缘纸并对其进行表征和热老化试验,结果表明,当绝缘纸中氮含量为1.72%时,经150℃老化168 h后,耐热绝缘纸中的耐热助剂能够有效地保护纤维素和绝缘纸洁净区的稳定性,抗张强度和聚合度的稳定性远高于普通绝缘纸。

3 物理改性绝缘纸发展现状分析

国内外学者对纤维素绝缘纸物理改性的研究方法主要分为理论和试验两种,一部分学者利用小

型造纸设备制备出添加不同纳米粒子、不同含量、不同表面处理的改性绝缘纸,并通过对改性绝缘纸的表征和比对试验来验证不同改性方法对改性绝缘纸在力学性能、电气性能、抗老化性能等方面的提升;一部分学者利用分子动力学和计算机仿真软件的方法对改性绝缘纸进行研究,利用仿真软件建立纤维素微观模型进行力学参数模拟,并与添加改性粒子的力学模型计算结果进行对比,进而研究物理改性对纤维素纸在力学性能和热稳定性方面的提升。

通过对国内外学者研究成果的总结与分析可知,采用不同种类的纳米粒子改性可以使纤维素纸的基础性能得到提升,但各学者对纳米粒子的预处理和添加含量对纤维素纸不同性能的提升研究存在差异,相同的改性纳米粒子添加不同含量时对绝缘纸不同性能的提升也存在差异,因此可针对绝缘纸的应用场景进行有针对性的改性。

4 结束语

本文结合国内外文献以及相关研究成果,阐述了当前物理改性纤维素绝缘纸的研究现状,纳米改性主要通过纳米粒子在改性绝缘纸内部的界面效应以及纳米粒子引起的陷阱深度与密度增大和改性绝缘纸体系势垒的变化来改善绝缘纸的力学性能、电气性能和抗老化性能;热稳定剂改性主要通过热稳定剂与促进老化物质发生反应来提升绝缘纸的抗老化性能。

基于上述两方面提升纤维素绝缘纸性能的改性技术,可以看出由于纳米粒子本身的特性不同,对绝缘纸的改性效果也各不相同,并且由于大多数粒子团聚因素的影响,改善的效果存在极限值;而热稳定剂改性只能改善绝缘纸的抗老化性能,对基础性能的提升几乎没有影响。因此,对电力变压器用纤维素绝缘纸的物理改性研究尚需进一步探索,可以通过不同添加方式或对纳米粒子进行预处理来提升纳米粒子在纤维素绝缘纸中的分布来进一步提升绝缘纸的性能,也可以通过热稳定剂与不同纳米粒子的共同改性,来实现对绝缘纸性能的综合提升。

参考文献:

[1] 盛云康. 加快建设坚强国家电网促进中国能源可持续发展[J]. 科技风,2018(21):187.
 [2] 孙才新. 输变电设备状态在线监测与诊断技术现状和前景[J]. 中国电力,2005,38(2):1-7.
 [3] 张博文,王峰,韩帅,等. 特高压输变电设备状态监测数据通信仿

真研究[J]. 中国电力,2017,50(2):11-16,22.
 [4] 蔡金锭,刘永清,蔡嘉. 油纸绝缘变压器极化等效电路分析及其老化评估[J]. 电工技术学报,2016,31(15):204-212.
 [5] 廖瑞金,刘团,张福州,等. 蒙脱土改性热稳定纸的制备及热老化特性研究[J]. 电工技术学报,2015,30(1):220-227.
 [6] 李盛伟,梁刚,毕雯,等. 基于广义极值分布模型的变压器寿命概率评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(7):131-135.
 [7] 石颀,赵德宇,郝万君,等. 基于变化活化能的变压器绝缘纸寿命评估模型的研究[J]. 绝缘材料,2020,53(9):48-53.
 [8] BEAVERS M F, RAAB E L, RAAB L, et al. Permalax, a new insulation system[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1960,79(3):64-70.
 [9] OOMMEN T V, PREVOST T A. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part II maintaining insulation integrity and life[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2006,22(2):5-14.
 [10] PULAT M, ISAKOCA C. Chemically induced graft copolymerization of vinyl monomers onto cotton fibers[J]. Applied Polymer Science,2006,100(3):2343-2347.
 [11] KAMATA Y, OHE E, ENDOH K, et al. Development of low permittivity pressboard and its evaluation for insulation of oil-immersed EHV power transformers[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1991,26(4):819-825.
 [12] FERRITO S J, STEGEHUIS R L. High temperature reinforced cellulose insulation for use in electrical applications[C]//2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives. Atlanta, USA:IEEE,2001.
 [13] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):230-239.
 [14] 廖瑞金,张福州,袁媛,等. 含双氰胺的新型绝缘纸制备及其油纸绝缘体系热老化试验[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2013(7):47-51.
 [15] 张立美,刘巧芬,孙晓然. 自由基聚合表面改性纳米粒子的研究进展[J]. 化学世界,2012(6):381-384.
 [16] 桑士晶,杨瑞. 纳米技术前景展望[J]. 中国新技术新产品,2012(6):1.
 [17] 陶可鹏. 纳米改性绝缘纸板空间电荷特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
 [18] 廖瑞金,项敏,袁媛,等. 纳米 Al_2O_3 掺杂对绝缘纸的空间电荷及陷阱能级分布特征的影响[J]. 高电压技术,2019,45(3):681-690.
 [19] 廖瑞金,吕程,吴伟强,等. 纳米 Al_2O_3 改性变压器绝缘纸性能的研究[J]. 电力科学与技术学报,2014,29(1):3-7.
 [20] GANICHEVA S I, BYSTROVA E S, LOTSMANOVA E M. Influence of thermal aging characteristics of cellulose conditions on the molecular and mechanical properties of paper thereof[J]. Russian Journal of Applied Chemistry,2004,77(7):1172-1177.
 [21] TANAKA T, KOZAKO M, FUSE N, et al. Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(4):669-681.
 [22] MAMLEEV V, BOURBIGOT S, YVON J. Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The change of the rate

- limitation[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2007,1(80):141-150.
- [23] 刘贺千. 纳米碳化硅及氧化铝改性绝缘纸板介电特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [24] 廖瑞金,何利华,吕彦冬,等. 纳米 Al_2O_3 掺杂对油纸绝缘热老化特性的影响[J]. 电工技术学报,2017,32(15):207-215.
- [25] 鄢水强,廖瑞金,吕彦冬,等. 纳米 Al_2O_3 掺杂对绝缘纸热老化电气特性的影响[J]. 电工技术学报,2017,32(11):225-232.
- [26] 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.
- [27] 陈燕琳,沈一春,钱宜刚,等. 纳米二氧化硅的制备与发展趋势[J]. 玻璃,2022,49(4):16-19.
- [28] KIM Y J, HA S W, JEON S M, et al. Fabrication of t-riacetylcellulose- SiO_2 nanocomposites by surface modification of silica nanoparticles[J]. Langmuir,2010,26(10):7555-7560.
- [29] NIKJOO R, TAYLOR N, EDIN H, et al. Comparison of oil-impregnated papers with SiO_2 and ZnO nanoparticles or high lignin content, for the effect of superimposed impulse voltage on AC surface PD[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electric Insulation,2017,24(3):1726-1734.
- [30] 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.
- [31] TANG C, ZHANG S, WANG X B, et al. Enhanced mechanical properties and thermal stability of cellulose insulation paper achieved by doping with melamine-grafted nano- SiO_2 [J]. Cellulose,2018,25(6):3619-3633.
- [32] 陈杰,朱力. 纳米 SiO_2 改性绝缘纸的机械老化与电老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2020,49(6):52-54.
- [33] 张福州,廖瑞金,袁媛,等. 低介电常数绝缘纸的制备及其击穿性能[J]. 高电压技术,2012,38(3):691-696.
- [34] ZHANG S, TANG C, HAO J, et al. Thermal stability and dielectric properties of nano- SiO_2 -doped cellulose[J]. Applied Physics Letters,2017,111(1):1-4.
- [35] 叶敬. 纳米 TiO_2 改性绝缘纸板的电气与电老化特性研究[D]. 赣州:江西理工大学,2020.
- [36] 吕程. 纳米 TiO_2 改性纤维素绝缘纸的制备和性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [37] 廖瑞金,吕程,吴伟强,等. 纳米 TiO_2 改性绝缘纸的绝缘性能[J]. 高电压技术,2014,40(7):1932-1939.
- [38] 郭正阳. 纳米 TiO_2 改性纤维素绝缘纸板的电气特性与热老化特性研究[D]. 赣州:江西理工大学,2021.
- [39] 刘道生,郭正阳,赵子明,等. 纳米 TiO_2 改性纤维素绝缘纸板热老化特性[J]. 高电压技术,2021,47(9):3134-3143.
- [40] 杨雁,袁磊,王谦,等. 不同复合热稳定剂对矿物油-改性纸绝缘系统热老化特性的影响[J]. 高电压技术,2013,39(5):1121-1127.
- [41] 姚洁,魏晓魏,殷勤俭,等. 绝缘纸耐高温老化助剂的制备及应用[J]. 化学研究与应用,2002,14(5):608-610.
- [42] 廖瑞金,吴伟强,张福州,等. 复合胺类化合物对油纸系统中绝缘纸热老化特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(6):1891-1897.
- [43] 唐超,张松,张福州,等. 变压器绝缘纸纤维素耐热老化性能提升的模拟及试验[J]. 电工技术学报,2016,31(10):68-76.
- [44] 欧阳春,姚洁,王公应. 绝缘纸的制备及耐热性能[J]. 合成化学,2020,28(9):825-829.

收稿日期:2022-11-23;修回日期:2023-03-24。

作者简介:霍上元(1987-),男(满族),辽宁本溪人,工程师,主要从事超特高压变压器、电抗器、换流变压器用绝缘部件、电工用绝缘纸板技术开发与设计,常规产品成本、工艺优化的工作。