

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.08.005

# 氟化无纺聚丙烯驻极体滤膜用于变压器油净化的过滤性能

王飞鹏<sup>1</sup>, 万春香<sup>1</sup>, 穆朋<sup>2</sup>, 李剑<sup>1</sup>, 黄正勇<sup>1</sup>, 黄镜亮<sup>1</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆渝能滤油机制造有限公司, 重庆 400707)

**摘要:** 变压器油的绝缘性能是影响电力设备安全运行的关键因素。采用氟化和直流电晕充电处理聚丙烯无纺布, 并将其用于变压器油的净化, 考察其过滤性能。结果表明: 在氟化过程中, 聚丙烯的部分 C-H 键被 C-F 键取代, 同时聚丙烯纤维的平均直径减小, 粗糙度增加, 制备得到了超疏水滤膜。将氟化后的滤膜进行电晕充电并用于变压器油的净化发现, 过滤后的油样相对于用原始滤膜过滤后的油样绝缘性能得到更多恢复, 击穿电压升高, 微水含量、相对介电常数和介质损耗因数降低。

**关键词:** 变压器油净化; 直接氟化; 电晕充电; 驻极体

**中图分类号:** TM215.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2019)08-039-11

## Transformer-oil filtration properties of fluorinated nonwoven polypropylene electret films

WANG Feipeng<sup>1</sup>, WAN Chunxiang<sup>1</sup>, MU Peng<sup>2</sup>, LI Jian, HUANG Zhengyong<sup>1</sup>, HUANG Jingliang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Yuneng Oil-filter

Manufacturing Co. Ltd., Chongqing 400707, P. R. China)

**Abstract:** The insulation property of transformer oil is a critical factor affecting the safe operation of power equipment. The nonwoven polypropylene (PP) electret films used for purification of transformer oil were treated by fluorination and DC corona charging, and the oil filtration properties were investigated. The results show that the C-H bonds in polypropylene can be replaced by C-F bonds during fluorination process and the mean diameter of fibers decreases while the roughness of the fibers increases, which represents the super-hydrophobicity. When the fluorinated PP films were corona charged and applied to transformer oil filtration, it was observed that the aged oil filtered by the modified films got a better recovery of insulation properties in comparison to that of oil filtered by original PP films. There was a great increase in the breakdown voltage. Furthermore, the content of moisture, the relative dielectric permittivity and loss factor decreased significantly.

**Keywords:** transformer oil filtration; direct fluorination; corona charging; electret

**收稿日期:** 2019-01-05

**基金项目:** 重庆市重点产业共性关键技术创新专项重点研发项目(cstc2017zdcy-zdyfx006)。

Supported by the Special Key R & D Projects for Key Technology Innovation of Key Industries in Chongqing (cstc2017zdcy-zdyfx006).

**作者简介:** 王飞鹏(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事工程电介质、电功能聚合物及其应用研究, (E-mail) fpwang@cqu.edu.cn。

**通讯作者:** 万春香(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事绝缘油净化和膜分离技术研究, (E-mail) 20161102026t@cqu.edu.cn。

电力变压器是电网系统中的核心枢纽设备,其绝缘运行状况的好坏和健康水平直接关系到电网的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。变压器油是电力变压器中的重要绝缘介质,起绝缘和冷却作用<sup>[2]</sup>。长期运行的变压器油会在光、热、电场、氧等各种因素作用下不断老化,产生有机酸、纤维、金属颗粒等杂质,使其绝缘和冷却性能下降,甚至引起变压器故障,威胁电网系统安全运行<sup>[3]</sup>。采用变压器油净化技术能有效滤除油中长时间运行产生的杂质,在很大程度上恢复其绝缘性能,并防止杂质进一步引起油质劣化和绝缘性能下降。

滤芯是变压器油净化设备中的关键部件。近年来,通过熔喷技术制备的无纺布滤膜被广泛应用<sup>[4]</sup>。聚丙烯(PP)由于其易加工、价格低廉和良好的驻极特性被用作空气过滤、抑菌杀菌和油水分离等方面的重要滤材<sup>[5]</sup>,空气中的大量粉尘、PM<sub>2.5</sub>和细菌等微米级颗粒能通过扩散、截留、惯性冲击和静电吸附作用被PP滤膜滤除。将PP滤膜用于变压器油净化的机械阻挡作用与空气过滤相仿,但利用其驻极特性净化变压器油的性能研究还不够深入。利用PP纤维膜的驻极特性可借助纤维间隙间的电场对带电微粒或极化后的部分微粒进行吸附截留,实现在较低过滤压差下获得较高过滤效率<sup>[6]</sup>。但聚丙烯存在着因电荷稳定性欠佳而影响其使用寿命和过滤效率的问题<sup>[7]</sup>,如何改善PP的电荷存储稳定性成为近年来备受关注的研究热点。

直接氟化是表面化学改性的一种方法<sup>[8]</sup>,可有效调控聚合物表面化学成分和形貌结构,从而改变其亲疏水性、绝缘性能、电荷陷阱分布或电荷稳定性等理化特性。研究表明,工业氟化聚丙烯薄膜的电荷稳定性和压电性可得到显著提升<sup>[9]</sup>。

为了得到一种高性能的净化变压器油的滤膜,本研究中首先通过氟化对无纺聚丙烯滤膜进行处理,探究不同氟化浓度对其化学成分、表面形貌和疏水性的影响规律。然后采用直流电晕充电的方法使聚丙烯驻极体滤膜带电,并测量其等温表面电位衰减特性。将氟化与电晕充电的滤膜用于老化变压器油的净化,通过测量油样的微水含量、工频击穿电压和频域介电响应(FDS)来研究其过滤性能。

## 1 实验

### 1.1 聚丙烯滤膜氟化处理

试验中采用滤膜材料为浙江朝晖过滤技术股份有限公司生产的厚度约250 μm、克质量约30 g/m<sup>2</sup>的无纺聚丙烯滤膜。先将原始滤膜在60 °C真空干燥箱中干燥8 h,随后将样品放入氟化反应釜中,控制反应气压为0.1 MPa,分别设置氟气浓度为6%、1%和2%,在常温下反应30 min后取出样品。使用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察氟化与未氟化样品表面形貌及纤维结构,并采用傅里叶红外光谱仪(FITR)对其表层化学组成进行分析,以此来表征PP纤维的氟化效果。用氟气浓度0、6%、1%和2%处理的样品分别编号为F0、F6%、F1%和F2%。

### 1.2 聚丙烯滤膜直流电晕充电

为了在纤维间建立电场,需要对PP滤膜进行极化处理,目前工业上大量使用的驻极体极化方法有热极化和电晕充电法<sup>[10]</sup>。本研究中采用电晕充电的方法,利用高压电场引起空气电晕放电,并使离子电荷沉积于PP试样中,其实验装置如图1所示,选用铜片作背电极置于电动位移台上并接地,将PP纤维膜试样置于背电极上。采用针-栅电极与高压直流源相连作为充电电极,其中针电极直径1 mm、曲率半径约10 μm的不

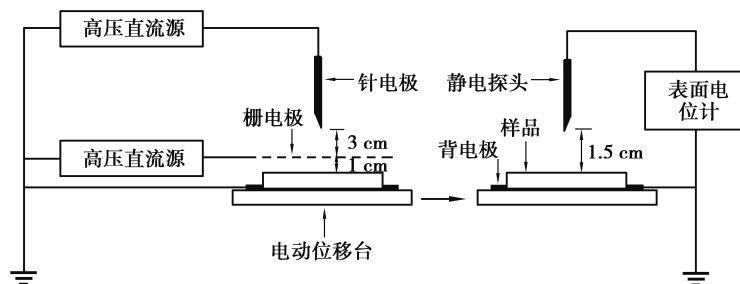


图 1 直流电晕充电与等温表面电位衰减测量装置

Fig. 1 Setup for DC corona charging and isothermal initial surface potential (ISPD) measurement

锈钢针,栅电极为直径 30 cm、孔径约 0.35 mm 的不锈钢栅网,栅极的存在可以使试样受到均匀的充电电压,分别设置针-栅和栅-试样之间的距离为 3 cm 和 1 cm。调节针电极和栅电极充电电压分别为 7 kV 和 2 kV,试样完成 3 min 电晕充电后利用电动位移台迅速将其移至表面电位计的静电探头下,在恒温 90 °C 条件下测量其表面电位。

### 1.3 变压器油净化试验

本研究中用于净化试验的变压器油在实验室加速老化得到,老化试验采用国产 25 # 矿物油与 0.13 mm 厚的牛皮绝缘纸。试验步骤参照文献[11],首先将矿物油与绝缘纸分别在 80 °C 真空干燥箱中干燥 48 h;然后将矿物油和绝缘纸按 10:1 的质量比混合装入老化罐中,并加入适量铜片,在 60 °C 真空干燥箱中静置 24 h,使油纸充分浸渍;最后放入 130 °C 老化箱中老化 30 d。

使用原 PP 试样、氟化试样(F1%)和氟化充电试样(命名为 CF1%)分别过滤 400 mL 老化油样。为反映不同滤膜的过滤性能,采用卡尔费修水分仪,绝缘油介电强度测试仪和 Concept80 宽频介电和阻抗谱仪分别测量油样过滤前后的微水含量、工频击穿电压、相对介电常数和介质损耗因数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氟化聚丙烯的理化性能

图 2 为不同氟气浓度氟化后的聚丙烯试样全反射红外光谱测试结果,原试样 F0 中的吸收峰主要表现为波数 3 050~2 700  $\text{cm}^{-1}$  范围内的碳氢伸缩振动、碳氢弯曲振动(1 454  $\text{cm}^{-1}$ )和碳氢对称变形振动(1 375  $\text{cm}^{-1}$ )<sup>[12]</sup>。随着氟化浓度增加,在 1 300~1 000  $\text{cm}^{-1}$  波数范围内出现明显的宽特征吸收峰,表明氟化反应在 PP 中引入了碳氟基团,且随着氟化浓度增加,碳氢的吸收峰强度逐渐减弱,碳氟吸收峰逐渐增强。这是由于碳氟键的键能(约 544 kJ/mol)比碳氢键(约 414 kJ/mol)键能高<sup>[13]</sup>,在氟化反应过程中引起 PP 试样中碳氢键断裂及碳氟键形成。

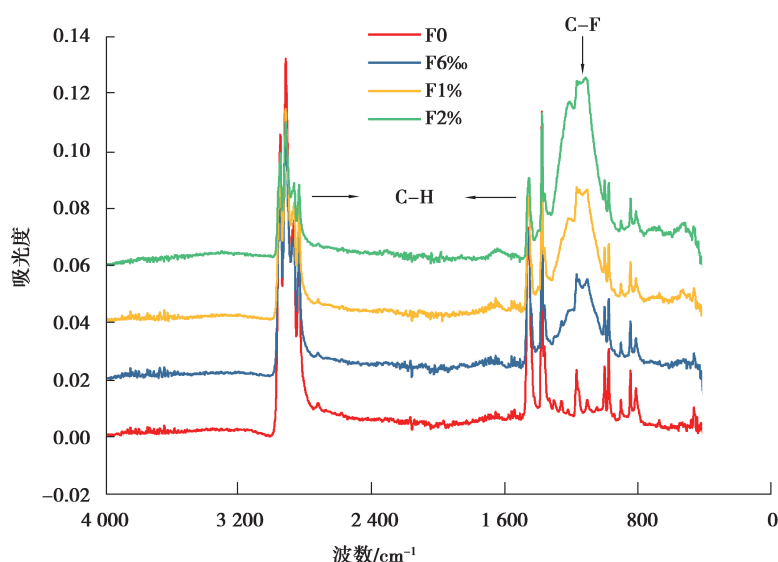


图 2 氟化聚丙烯全反射红外光谱图

Fig. 2 ATR-IR spectra of fluorinated PP samples

使用场发射扫描电子显微镜(SEM)测量得到试样的表面形貌如图 3 所示,其纤维直径分布在 1~6  $\mu\text{m}$ ,纤维之间排列错综复杂,形成三维网状结构,纤维网内部含有大量微小空隙,由此形成大量弯曲通道,实现对杂质颗粒的截留。采用图像分析软件 Image-Pro Plus 在每个样品 SEM 图像上随机选取 50 根纤维测量并绘制得到其直径分布图,并计算得到其平均直径如图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出,随着氟化浓度增加,PP 纤维直径逐渐减小,同时单根纤维上的粗糙度显著增加。纤维直径减小使纤维网间空隙增大,从而增大滤膜的孔隙率,有利于减小过滤压力,实现高效过滤。氟化反应过程中大量化学键断裂与置换反应显著增加了 PP 纤维的粗糙度,有利于截留更多微小的杂质粒子。

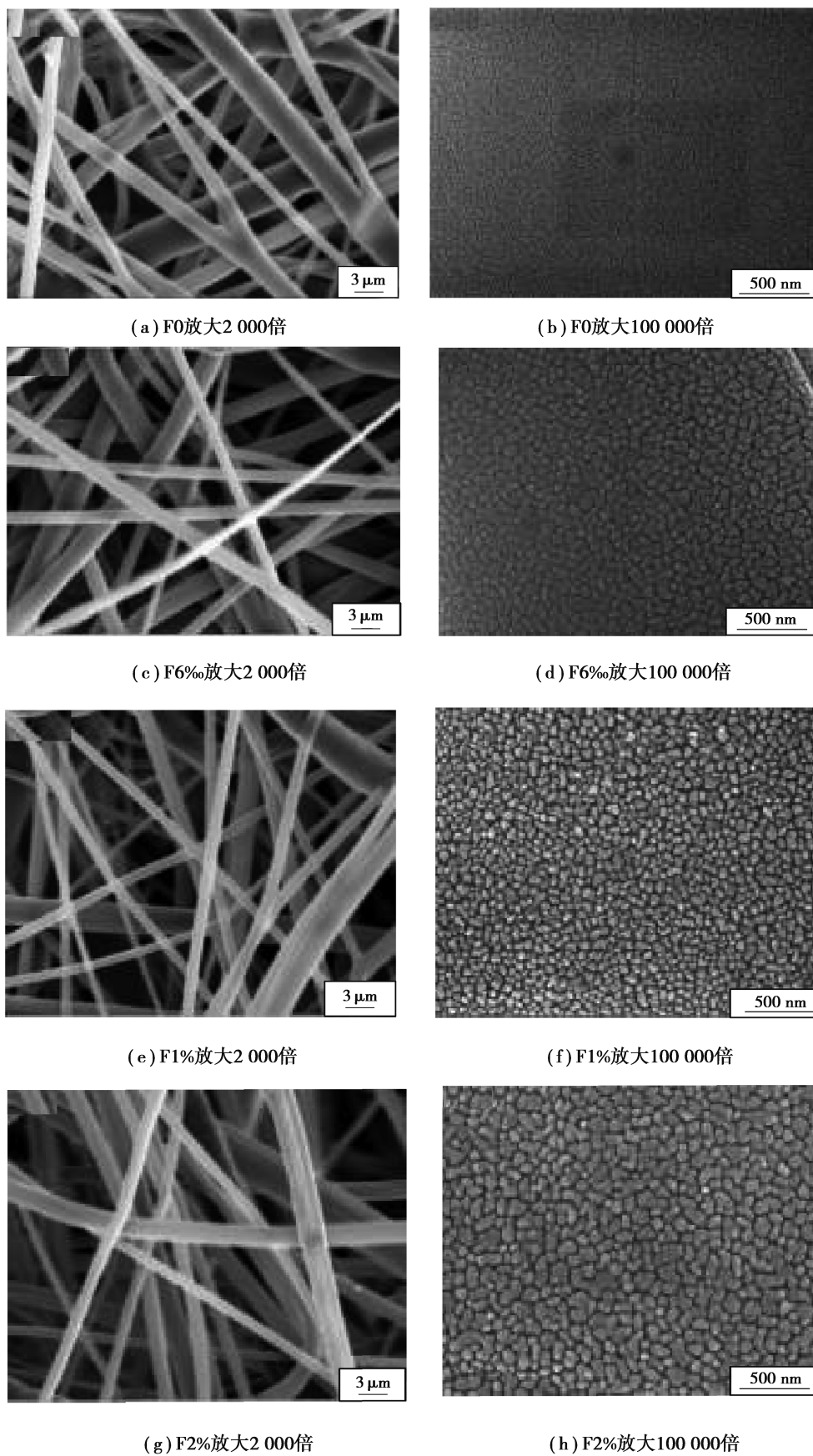


图 3 氟化聚丙烯扫描电镜图

Fig. 3 The SEM images of fluorinated PP samples



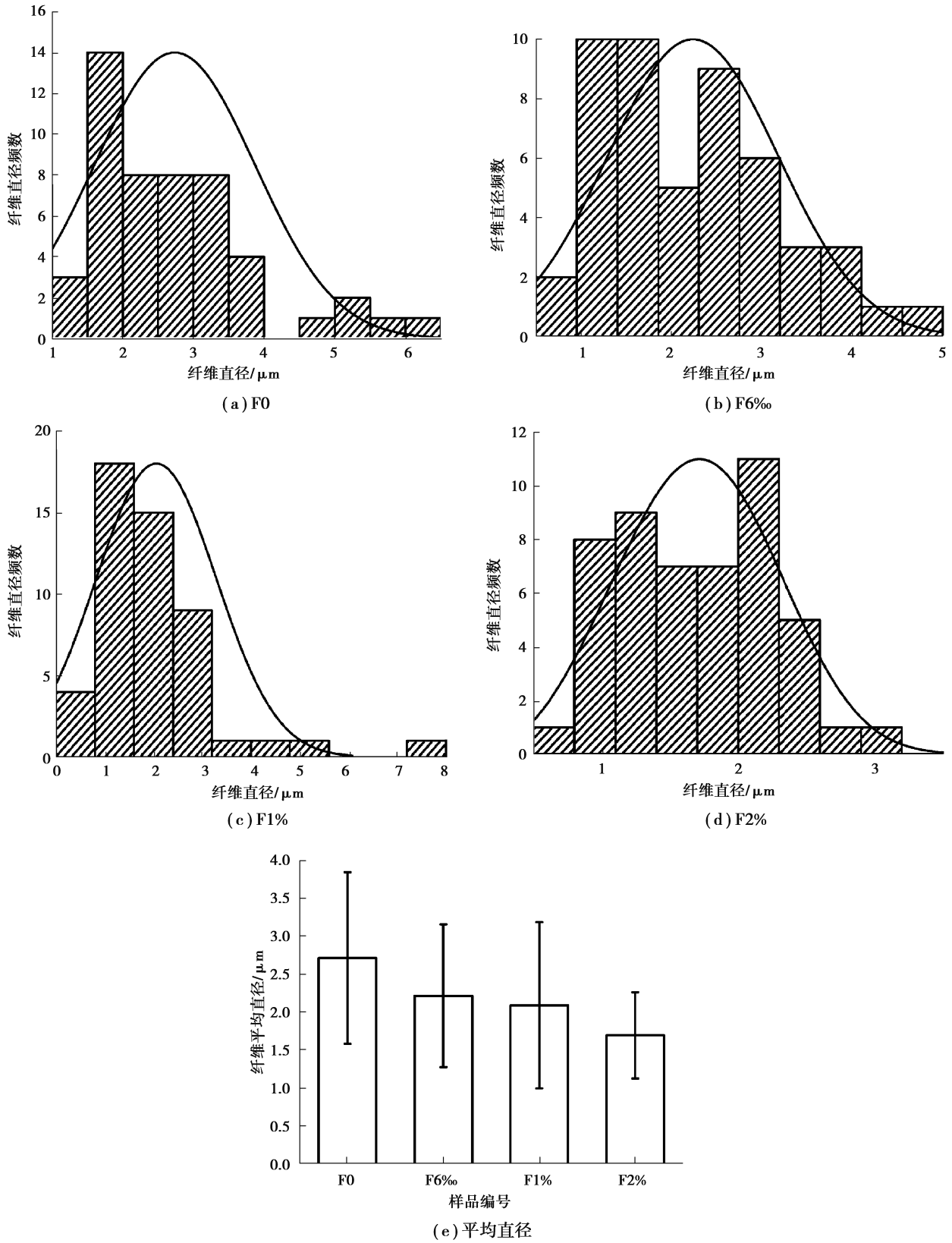


图 4 氟化聚丙烯纤维直径分析

Fig. 4 Fiber diameters of fluorinated PP samples

聚合物表面能和粗糙度的变化会引起其亲疏水性改变。含氟材料是自然界表面能最低的材料之一<sup>[14]</sup>,如 C-F<sub>3</sub> 基团的表面能低至 6.7 mJ/m<sup>2</sup>。采用接触角测量仪测量氟化前后 PP 试样的水滴接触角,每个样品选择 5 个不同区域测量 5 次,测量结果如图 5 所示。聚丙烯本身具有一定的疏水性能,其接触角为 130.5°,随着氟化浓度增大,接触角增大,氟化浓度为 2% 时,接触角高达 150.0°,得到超疏水滤膜。氟化反应一方面在 PP 中引入了低表面能的氟元素,另一方面增大了纤维表面的粗糙度,从而提高其疏水性能。

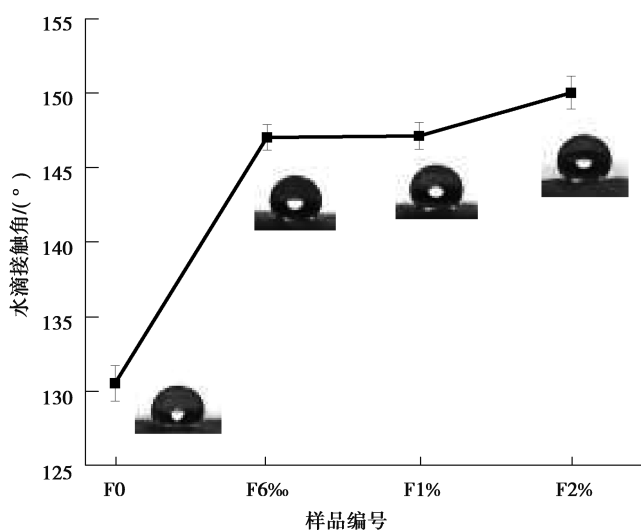


图 5 氟化聚丙烯水滴接触角

Fig. 5 Water contact angles of fluorinated PP samples

## 2.2 氟化聚丙烯的电荷稳定性

等温表面电位衰减(ISPD)特性是评估驻极体电荷稳定性的主要方法之一<sup>[15]</sup>。测试过程中发现常温下 PP 试样的表面电位衰减极慢,为了减少测试时间,试样经电晕充电后在 90 °C 恒温条件下记录表面电位 20 h。表 1 为不同氟化浓度下的初始表面电位值,可以看出氟化能增大 PP 试样的初始表面电位。为有效比较表面电位衰减速率,图 6 给出了不同氟化浓度下试样归一化表面电位衰减曲线,当记录时间结束时,原 PP 试样表面电位衰减至初始值的 56%,氟化浓度为 6%、1% 和 2% 的试样电位分别衰减至初始值的 53%、62% 和 68%。为进一步研究 PP 滤膜在油中的电荷稳定性,将电晕充电后的滤膜浸入 20 mL 变压器油中,在常温下放置 5 d 后测量其表面电位,发现未氟化、氟化浓度为 6%、1% 和 2% 的滤膜表面电位分别衰减至初始电位的 52%、49%、59% 和 63%。结果表明 PP 滤膜在油中的电荷稳定性比在空气中差,但可以通过控制合适的氟化浓度来增强其电荷稳定性,当氟化浓度较低时,聚丙烯驻极体滤膜的电荷稳定性稍有下降,当氟化浓度提高时,电荷稳定性增强。

表 1 氟化聚丙烯初始表面电位

Table 1 Initial surface potential of fluorinated samples

样品	F0	F6%	F1%	F2%
初始电位/V	1 005	1 375	1 355	1 395

研究表明,驻极体的电荷稳定性与驻极体内陷阱深度和密度密切相关<sup>[16]</sup>。电晕充电形成的电荷沉积在 PP 驻极体滤膜表面,被深陷阱和浅陷阱捕获,其中被浅陷阱捕获的电荷在高温下更容易脱陷,造成电荷消散,表面电位下降。氟化反应使 PP 试样内形成更多陷阱,因此初始表面电位增加。当氟化浓度较低时,虽然陷阱密度增大,但形成的浅陷阱较多,电位衰减速率增大。当氟化浓度较高时,形成的深陷阱较多,被捕获的电荷难以脱陷,因此电荷稳定性增强。

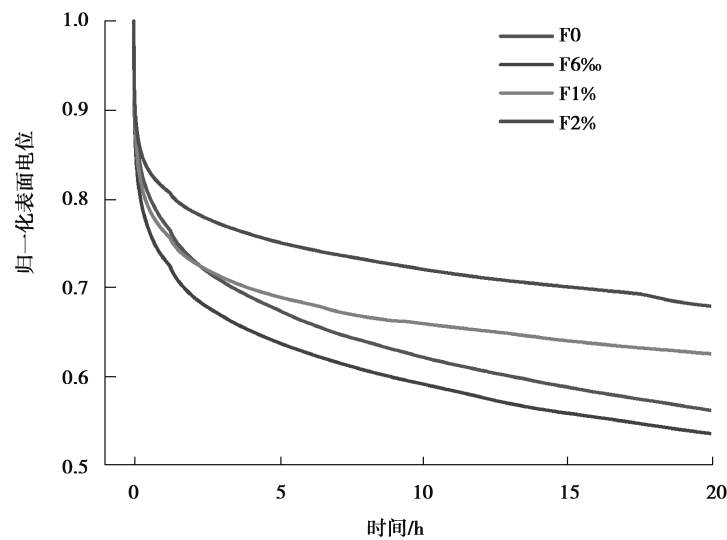


图 6 氟化聚丙烯的归一化等温表面电位衰减曲线

Fig. 6 Normalized isothermal surface potential decay curves of fluorinated PP samples

### 2.3 氟化聚丙烯滤膜的变压器油过滤性能

变压器油中水分含量是影响其绝缘性能的重要因素,较高的水分含量会直接导致变压器油击穿电压下降及介质损耗因数增大。为研究氟化滤膜的油水分离效果,采用卡尔费修水分测量仪对油中的水分进行测量,结果如图 7 所示。老化后的矿物油水分含量由  $2.6 \times 10^{-6}$  增加到  $1.60 \times 10^{-5}$ ,使用原始 PP 滤膜 F0 过滤后,水分含量降低至  $1.42 \times 10^{-5}$ ,氟化后的滤膜 F1% 过滤后的油中水分含量进一步减小,这可能是因为氟化后滤膜疏水性增强,在过滤过程中,矿物油分子能很快穿透滤膜,而少量水分子被截留在滤膜上方,达到油水分离的效果。但滤膜经电晕充电后(CF1%)过滤的油中水分含量变化不大,证明氟化在影响滤膜油水分离性能方面起主要作用。

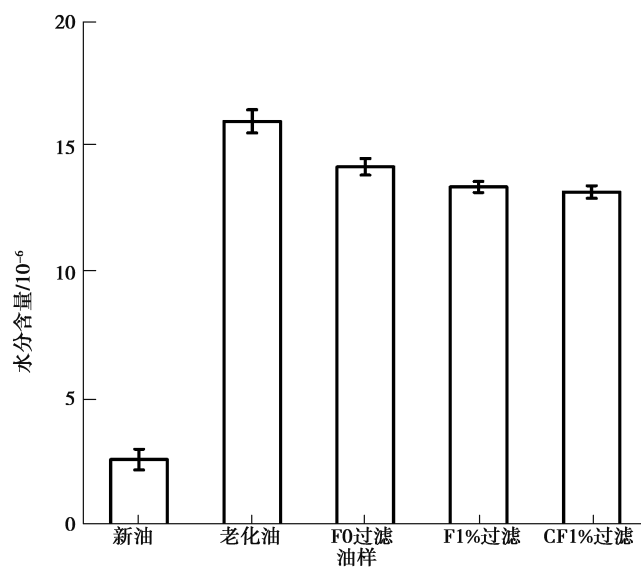


图 7 不同滤膜过滤前后油样中水分含量

Fig. 7 The moisture contents of oil samples filtered by different PP samples

为进一步分析使用不同滤膜过滤老化矿物油前后油样的绝缘性能,使用 IJJD-80 绝缘油介电强度自动测试仪测试油样的工频击穿电压。试验中采用标准圆形平板电极,电极间距离为 2.5 mm,测试前将油样搅拌 90 s,静置 180 s,每个样品测试 9 次击穿电压,最后取其平均值作为击穿电压。图 8 给出了击穿电压的测试结果,老化后矿物油的击穿电压由 55 kV 降低到 35.7 kV,采用原始 PP 滤膜(F0)、氟化滤膜(F1%)和氟化充电滤膜(CF1%)过滤后的油样击穿电压分别提升了 16.6%、29.1% 和 37.5%,表明氟化与充电对提升 PP 滤膜过滤性能有显著的作用。

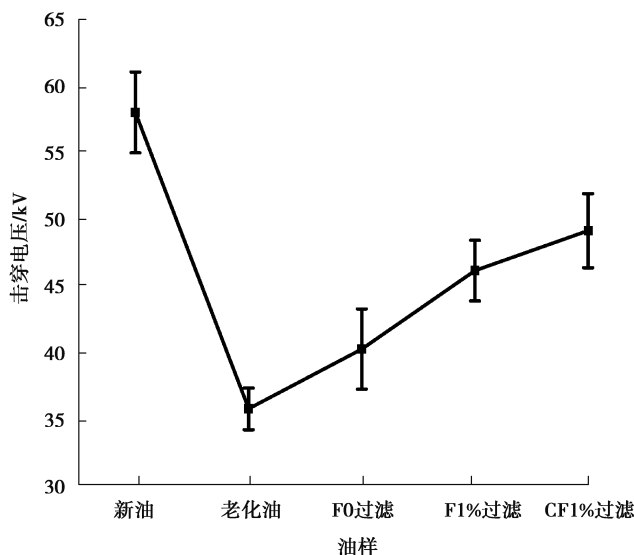


图 8 不同滤膜过滤前后油样击穿电压

Fig. 8 The breakdown voltage of oil samples filtered by different PP samples

变压器油中的水分和杂质含量是影响其击穿电压的关键因素,当变压器油中水分含量较低时,不会对击穿电压造成影响,而油中悬浮的水分含量升高时会迅速降低其击穿电压。氟化后滤膜对减少油中水分有一定的效果,在一定程度上提高了变压器油的击穿电压。同时,在变压器油老化过程中还会生成纤维、金属颗粒、碳颗粒和胶体粒子等杂质,这些杂质在电场作用下容易形成杂质小桥,导致击穿电压下降<sup>[17]</sup>。氟化后的滤膜纤维粗糙度增大,油流经滤膜时,更多微小的杂质颗粒能粘附在纤维上,当滤膜充电后,由于纤维间的间距极小,在纤维间形成场强高达数倍于 10 MV/m 的电场<sup>[18]</sup>,部分杂质颗粒在静电力的作用下被滤膜吸附,证明氟化与电晕充电能增强 PP 滤膜的过滤性能。

变压器油老化产生的杂质不仅会降低油的击穿电压,也会影响油的导电性和极化特性,改变其介电性能。近年来,以介电响应理论为基础的频域介电谱法成为一种新型的电气绝缘诊断技术,可以获得变压器油介电常数、介质损耗因数等极化参数与测量频率的关系<sup>[19]</sup>。笔者采用 Concept80 宽频介电和阻抗谱仪在常温下测量不同过滤油样的频域介电谱,得到其相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗因数  $\tan\delta$  随频率变化的谱图如图 9 和 10 所示,两者随频率的变化趋势基本一致,在高频部分基本保持不变,当频率低于 1 Hz 时,均随频率的减小而逐渐增大。相对介电常数的变化主要取决于变压器油在电场作用下的极化作用,当频率低于 1 Hz 时,油中的极化过程可以及时完成,此时相对介电常数较高,随着电场频率增大,界面极化和松弛极化等较缓慢的极化过程来不及完成,因此相对介电常数随频率增大而减小<sup>[20]</sup>。变压器油老化后的产物多为极性分子,杂质含量越多,极化能力越强,在低频部分测量得到的相对介电常数值越高。



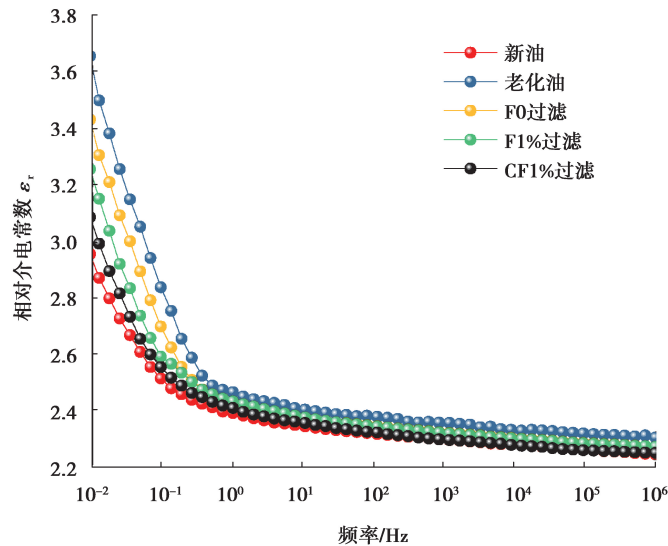


图 9 不同滤膜过滤前后油样相对介电常数频域响应谱图

Fig. 9 The relative permittivity of oil samples filtered by different PP samples

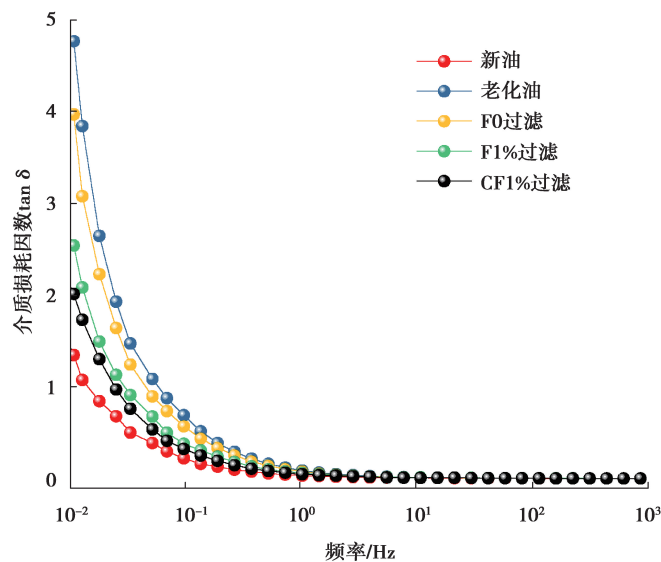


图 10 不同滤膜过滤前后油样介质损耗因数频域响应谱图

Fig. 10 The loss factor of oil samples filtered by different PP samples

介质损耗因数的改变主要反映变压器油中的损耗,当频率较低时,变压器油中电导损耗与极化损耗同时存在,此时介质损耗因数较高,随着频率升高,极化损耗逐渐减小,介质损耗因数降低。油含杂质越多,其电导率和载流子含量越高,介质损耗因数越高,这一现象在低频部分更明显。

测试发现,通过原 PP 滤膜过滤后油样的  $\epsilon_r$  和  $\tan\delta$  在低频部分有所下降,从图 9 和 10 中可以看出在 0.01 Hz 处  $\epsilon_r$  和  $\tan\delta$  相对于老化油降低了 6.1% 和 16.7%,而经过氟化滤膜过滤的油样介电性能得到进一步提升。原始的 PP 滤膜能滤除老化油中部分大颗粒杂质,经过氟化后的滤膜能滤除油中的更多杂质和水分。但变压器油老化过程中,部分老化产物会发生聚合反应,形成带电的胶体粒子,并与油分子吸附在一起<sup>[21]</sup>,胶体粒子的直径一般小于 0.1  $\mu\text{m}$ ,难以依靠传统滤膜的机械阻力滤除。胶体粒子多为极性物质,而变压器油由中性烃类组成,属于非极性分子,在电场力的作用下,胶体粒子沿着电场方向作电泳运动从而与油分子分离,并沉积于滤膜纤维上。电晕充电使滤膜纤维间形成高压电场,可滤除更多油中类似胶体粒子的微小杂质。频域介电谱的测试结果表明,采用充电和氟化后的滤膜过滤的油样  $\epsilon_r$  和  $\tan\delta$  值在 0.01 Hz 处相对于老

化油分别降低了 15.6% 和 57.7%，进一步证明氟化和电晕充电能增强 PP 滤膜的过滤性能。

### 3 结 论

笔者采用氟化和直流电晕充电技术对聚丙烯驻极体滤膜进行处理,并研究其变压器油净化性能,得到如下的结论:

1) 氟化处理后聚丙烯驻极体滤膜中部分碳氢键被碳氟键取代,随着氟化浓度增加,聚丙烯纤维直径减小,粗糙度增加,孔隙率增大。同时由于引入了低表面能的氟元素,滤膜的疏水性显著提高。

2) 氟化作用可以改变聚丙烯滤膜内部陷阱分布,增加深浅陷阱能级和密度,从而改变膜的电荷稳定性。氟化浓度较低时形成的浅陷阱较多,电荷稳定性降低;氟化浓度大于 1% 时,能形成更多深陷阱,电荷稳定性增强。因此通过控制合适的氟化浓度可获得高电荷稳定性的聚丙烯驻极体滤膜,从而增加滤膜的使用寿命和过滤效率。

3) 氟化和电晕充电后的滤膜用于变压器油净化具有优异的过滤性能。氟化增加了滤膜的纤维粗糙度和疏水性,可滤除老化油中的更多杂质和水分;电晕充电在滤膜的纤维间形成电场,在静电力作用下吸附溶于油中的胶体粒子,从而显著提升了老化油的击穿电压,降低了相对介电常数和介质损耗因数。

#### 参考文献:

- [1] 蔡胜伟, 王飞鹏, 陈程, 等. 植物绝缘油击穿放电故障特征气体分析[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(12): 52-58.  
CAI Shengwei, WANG Feipeng, CHEN Cheng, et al. Fault characteristic gas analysis of breakdown discharge of vegetable insulating oil[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(12): 52-58. (in Chinese)
- [2] 陈江波, 王飞鹏, 蔡胜伟, 等. 变压器植物、矿物绝缘油的微生物降解机制及差异[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(2): 61-68.  
CHEN Jiangbo, WANG Feipeng, CAI Shengwei, et al. Microbial degradation mechanisms and differences of plant and mineral insulating oil of transformers[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(2): 61-68. (in Chinese)
- [3] 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, 2013, 36(7): 47-51.  
LIAO Ruijin, ZHANG Fuzhou, YUAN Yuan, et al. Preparation of a dicyandiamide-contained novel insulation paper and an experiment on the thermal aging characteristics of relevant oil-paper insulations[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(7): 47-51. (in Chinese)
- [4] Chu K H, Park M, Kim H Y, et al. Preparation and characterization of polypropylene non-woven fabrics prepared by melt-blown spinning for filtration membranes[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2014, 35(6): 1901-1903.
- [5] Das D, Waychal A. On the triboelectrically charged nonwoven electrets for air filtration[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 83: 73-77.
- [6] Thakur R, Das D, Das A. Study of charge decay in corona-charged fibrous electrets[J]. Fibers and Polymers, 2014, 15(7): 1436-1443.
- [7] 陈钢进, 肖慧明, 王耀翔. 聚丙烯非织造布的驻极体电荷存储特性和稳定性[J]. 纺织学报, 2007, 28(9): 125-128.  
CHEN Gangjin, XIAO Huiming, WANG Yaoxiang. Charge characteristics and stability of non-woven polypropylene fabric electrets[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(9): 125-128. (in Chinese)
- [8] 王飞鹏, 张涛, 李剑, 等. 表层氟化环氧树脂的直流闪络特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 372-379.  
WANG Feipeng, ZHANG Tao, LI Jian, et al. DC flashover characteristics of surface fluorinated epoxy[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 372-379. (in Chinese)
- [9] 安振连, 赵敏, 汤敏敏, 等. 氟气处理孔洞聚丙烯膜显著改善的电荷存储特性[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5859-5862.  
AN Zhenlian, ZHAO Min, TANG Minmin, et al. Significantly improved charge deposit properties of the cellular polypropylene film modified by gaseous fluorine[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5859-5862. (in Chinese)
- [10] Kilic A, Russell S, Shim E, et al. The charging and stability of electret filters[M]//Kilic A, et al. editors. Fibrous filter media. Elsevier, 2017: 95-121.
- [11] 廖瑞金, 周旋, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘热老化过程的中红外光谱特性[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 1-6.  
LIAO Ruijin, ZHOU Xuan, YANG Lijun, et al. The mid-infrared spectra characteristic of the transformer oil-paper

- insulation in thermal ageing process[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(2): 1-6. (in Chinese)
- [12] Barbes L, Radulescu C, Stihl C. ATR - FTIR spectrometry characterisation of polymeric materials[J]. *Romanian Reports in Physics*, 2014, 66(3):765-777.
- [13] An Z L, Cang J, Chen X, et al. Impact of interface between polyethylene and surface fluorinated polyethylene on space charge accumulation in the layered structures[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(1): 339-336.
- [14] Song J L, Huang W B, Liu J Y, et al. Electrochemical machining of superhydrophobic surfaces on mold steel substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 499-506.
- [15] Wang J W, Rychkov D, Gerhard R. Chemical modification with orthophosphoric acid enhances surface-charge stability on polypropylene electrets[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(19): 192901.
- [16] Thyssen A, Almdal K, Thomsen E V. Electret stability related to the crystallinity in polypropylene [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(5): 3038-3046.
- [17] 李金忠, 张乔根, 李原, 等. 直流电压下油纸绝缘杂质小桥的形成过程[J]. *高电压技术*, 2016, 42(12): 3901-3908.  
LI Jinzhong, ZHANG Qiaogen, LI Yuan, et al. Generation process of impurity bridges in oil-paper insulation under DC voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(12): 3901-3908. (in Chinese)
- [18] 姚翠娥, 王荣武. 驻极工艺对 PP 熔喷非织造过滤材料静电性能的影响[J]. *山东纺织科技*, 2014, 55(1): 1-4.  
YAO Cuie, WANG Rongwu. Research on electrostatic properties of polypropylene meltblown filters[J]. *Shandong Textile Science & Technology*, 2014, 55(1): 1-4. (in Chinese)
- [19] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘状态的频域介电谱特征参量及评估方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(1): 212-219.  
YANG Lijun, QI Chaoliang, LÜ Yandong, et al. Characteristic parameters and assessment methods of frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(1): 212-219. (in Chinese)
- [20] Zhou Y, Hao M, Chen G, et al. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(12): 124105.
- [21] Kohtoh M, Kaneko S, Okabe S, et al. Aging effect on electrical characteristics of insulating oil in field transformer[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(6): 1698-1706.

(编辑 罗 敏)