

基于超疏水滤膜的绝缘油多级过滤除水新工艺

许培俊^{1,2}, 韦会逆^{1,2}, 何运华², 邱方程², 刘荣海², 郭新良²

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710064; 2. 云南省电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

摘要: 低含水量的绝缘油具有较高绝缘水平, 是电网安全、稳定运行的重要保证, 这就需要将绝缘油含水量维持在较低区间内, 文中致力于解决超疏水滤膜用于绝缘油除水的问题。采用喷涂法能将超疏水 SiO_2 纳米粒子均匀粘接在PP滤芯、滤布、滤纸表面, 获得与水接触角大于 120° 的疏水滤膜。在此基础上, 疏水PP滤芯由于精度低, 故适用于大通量的绝缘油1级过滤, 疏水滤布配合串联过滤装置用于2级过滤可在承受较高水压的同时进一步除去绝缘油中的水, 超疏水滤纸除水能力最强, 故适用于高精度的绝缘油3级过滤。这种多级过滤可将绝缘油含水量降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 除水效率高且能满足不同种类绝缘油的除水要求。

关键词: 绝缘油; 超疏水; 除水; 多级过滤

New Technology of Multi-stage Filtration of Water Removal of Insulating Oil Based on Super-hydrophobic Filter Membrane

XU Peijun^{1,2}, WEI Huini^{1,2}, HE Yunhua², QIU Fangcheng², LIU Ronghai², GUO Xinliang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Company, Kunming 650217, China)

Abstract: The insulating oil with low water content has high insulation level and is an important assurance of safe and stable operation of power grid. Thus, the water content of the insulating oil needs to be maintained in a low range and the problem about super hydrophobic filter membranes used for removing water from the insulating oil needs to be solved. In this paper, the super hydrophobic SiO_2 nanoparticles are uniformly bonded to the surface of the PP filter element, filter cloth, and filter paper by adopting the spraying method so to obtain the hydrophobic filter membrane. On this basis, the hydrophobic PP filter element is suitable for the large-flux primary filtration of insulating oil due to its low precision. The hydrophobic filter cloth combined with tandem filter device is used for secondary stage filtration, which can withstand higher oil pressure while removing the water from the insulating oil further. The super-hydrophobic filter paper is suitable for the efficient tertiary filtration due to its outstanding ability of water removal. This multi-stage filtration can reduce the water content of the insulating oil below $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Multi-stage filtration not only has high water removal efficiency, but also meets the water removal requirements of different types of insulating oils.

Key words: insulating oil; super-hydrophobic; water removal; multi-stage filtration

0 引言

绝缘油较高绝缘水平是充油电力设备能稳定、安全运行的重要保障^[1-2], 但是在服役过程中绝缘油会由于与外界接触或自身氧化反应而引入水分, 这些水分会降低绝缘油的击穿电压, 降低绝缘水平,

从而降低设备寿命甚至引发爆炸事故^[3-7], 这就需要将绝缘油含水量维持在规定区间内。例如运行工况下汽轮机油含水量需维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[8]; 220 kV 变压器运行中变压器油含水量需控制在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 而330~1 000 kV 变压器投入运行前变压器油含水量则需保持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[9]。当前

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51978072); 陕西省重点研发计划项目(2023QCY-LL-26, 2022GY-371); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资助(300102312404)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51978072), Key Research and Development Program of Shaanxi Province(2023QCY-LL-26, 2022GY-371), Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD(300102312404)。

绝缘油水分去除方法较为常见的有:离心法、真空法等^[10]。离心法是用离心力将较轻的水分和较重的油分离开来。首先,要分离水分和油分就需要较大离心力,这个过程需要能耗。其次,若离心时间过长还会引入空气,这导致水分的减少不能弥补空气卷入带来的对于绝缘油击穿电压的影响,并且长时间和多次的离心会产生更多能耗,还会引起油的氧化。真空法是让绝缘油在加温和真空的环境下雾化水分,是目前使用较为广泛的除水手段,但是真空法除水精度不高故经常需要多次过滤,在雾化水分的过程中加温及抽真空会产生较高能耗,并且多次加温会对油造成不同程度的损伤。传统方法过于单一,在去除水分时不能从不同级别有针对性地除水,另外当要将绝缘油含水量降低至较低区间($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下)时,传统方法精度不够高,这就迫切需要一种操作简单、能耗低、过滤精度高且针对性强的绝缘油除水工艺。

超疏水膜分离法精度高而能耗低,是通过构造一种具有 μm 级别的、低表面能的粗糙结构,使水在膜表面的接触角大于 150° ,油在膜表面接触角为 0° ,这样含有水分的绝缘油在通过这种超疏水膜时油质和水质就会得到分离^[11]。基于Young Thomas^[12]、Robert N Wenzel^[13]、Cassie N^[14]等人提出的材料界面润湿性理论,人们可以通过操作简单的溶胶—凝胶法来合成低表面能物质并复合至基底表面构造超疏水结构^[15-19]。有报道指出催化正硅酸乙酯(TEOS)水解、聚合并使用硅烷类^[20-21]或含氟类^[22]等偶联剂对水解聚合产物进行改性,即可获得具有低表面能的超疏水 SiO_2 纳米粒子。在此基础上,将超疏水 SiO_2 纳米粒子涂覆至基底可增大基底表面疏水性。与简单的涂覆、浸涂法不同,喷涂法^[23-24]是将树脂胶黏剂和超疏水 SiO_2 纳米粒子组成的涂料喷涂复合至基底上,使超疏水 SiO_2 纳米粒子分布更为均匀。在人们关于超疏水滤膜应用于油水分离研究中,主要是对于水中除油的探索^[25-27],关于油中除水的报道^[28-29]则较少。超疏水滤膜对油和水有超强的分离能力,若能将超疏水滤膜应用于绝缘油除水,则有望提高过滤精度且减低滤油过程所需能耗。

针对超疏水滤膜应用于绝缘油除水的问题,我们进行过一些研究。我们曾经成功采用浸涂法制备超疏水滤纸使之具有一定绝缘油除水能力^[30-31]。但是这种超疏水滤纸强度较低,承受高油压时会有破裂的风险,除水能力也有待加强。故基于前期的研究,为使粒子分布更为均匀,文中采用喷涂法制备疏水滤膜。以PP滤芯、编织滤布(尼龙滤布和涤

纶滤布)、无纺滤布(聚酯纤维无纺布和PM2.5过滤网)和滤纸为基底制备疏水滤膜,分别以大通量过滤器、串联过滤装置、砂芯过滤装置为1级过滤、2级过滤和3级过滤,研究这些疏水滤膜在绝缘油多级过滤中的除水能力,探索不同除水级别或不同种类绝缘油除水所需的疏水滤膜及过滤方式。并研究各种疏水滤膜的微观形貌、与水的静态接触角,以验证喷涂法对不同基底表面的疏水改性能力。研究疏水滤布、疏水滤纸的拉伸强度,便于预测不同疏水滤膜对于油压的承受情况。文中通过这些研究,旨在为超疏水滤膜在绝缘油多级过滤除水领域奠定基础。

1 实验部分

1.1 实验原料

无水乙醇(分析纯);十七氟癸基三乙氧基硅烷(FAS-17,浓度97%);正硅酸乙酯(TEOS,浓度99%);E-44型环氧树脂;氨水(浓度25%);固化剂;聚酯纤维无纺布;PM2.5过滤网;聚酰胺(尼龙)滤布(500目);涤纶滤布;聚丙烯(PP)滤芯(10寸);工业滤纸。

1.2 试样制备

1)超疏水 SiO_2 纳米粒子涂料制备。取125 g无水乙醇、50 g氨水于烧杯中混合均匀,向无水乙醇与氨水的混合液中加入25 g的TEOS并超声处理,并在30 min后加入2.5 g的FAS-17继续超声处理2.5 h,见图1。反应结束后用乙醇反复冲洗粗产物抽滤提纯,将提纯后的产物置于 120°C 烘箱中干燥2 h即得超疏水 SiO_2 纳米粒子(F- SiO_2)。再在烧杯中超声作用下使4 g的E-44型环氧树脂均匀分散于100 g无水乙醇中,并将4 g的F- SiO_2 纳米粒子超声均匀分散于环氧树脂的乙醇溶液中,最后加入2 g固化剂继续超声分散均匀后即得到超疏水涂料。

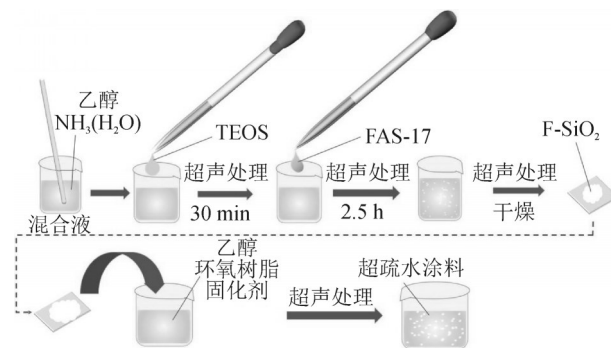


图1 超疏水涂料制备流程

Fig. 1 Preparation process of super-hydrophobic coating

2)疏水PP滤芯制备。超疏水涂料置于喷枪并在空气压缩机作用下喷涂于PP滤芯上,见图2,保

证PP滤芯上的涂层均匀分布,喷涂结束后的PP滤芯竖直摆放自然晾干,并置于90℃烘箱中固化30 min,固化完毕后即得疏水PP滤芯。

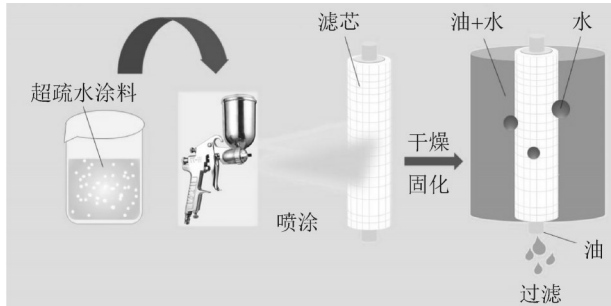


图2 疏水滤芯制备流程

Fig. 2 Preparation process of hydrophobic filter element
3)疏水滤布、疏水滤纸制备。在空气压缩机作用下将超疏水涂料喷涂于基底上,见图3,保证基底两面均匀喷涂,喷涂后的滤布滤纸在空气中晾干,并置于90℃烘箱中固化30 min,固化完成后即得到疏水滤布、疏水滤纸。

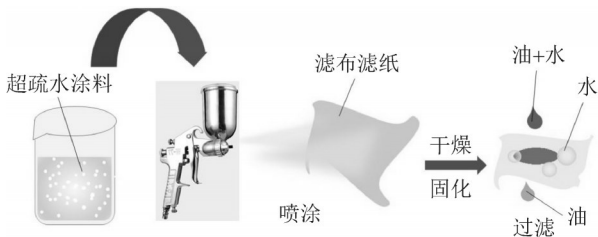


图3 疏水滤布滤纸制备流程

Fig. 3 Preparation process of hydrophobic filter cloth and filter paper

1.3 绝缘油多级过滤

文中提出一种多级过滤的设想,即采用不同过滤方式对绝缘油进行过滤除水,达到逐级降低绝缘油含水量的目的。1级过滤是使用喷射泵将含水量为130 mg·L⁻¹的绝缘油注入装有疏水PP滤芯的大通量过滤器中,过滤器处理后的绝缘油在另一端进行收集,见图4(a)。设计一套可以排除外界水分的影响的串联过滤装置,见图4(b),2级过滤采用该装置使经1级过滤处理过的绝缘油依次通过疏水滤布,并过滤10次以探讨疏水滤布之耐用性。在此基础上将超疏水滤纸裁剪后夹至砂芯过滤装置中,使绝缘油在0.06 MPa负压下通过界面而完成3级过滤,见图4(c)。

1.4 表征

- 1)微观形貌分析。采用扫描电子显微镜(SEM, 日本日立公司S-4800型)观察疏水PP滤芯、疏水滤布、疏水滤纸表面形貌。
- 2)静态接触角测试。采用德国Dataphysic公司OCA系列视频光学接触角测量仪对疏水PP滤芯、疏

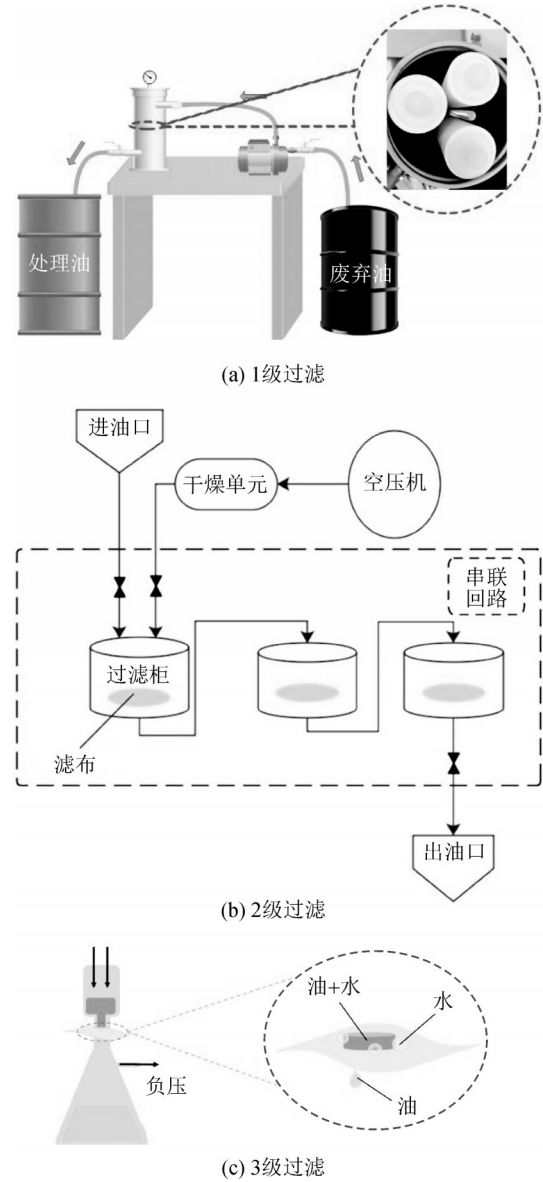


图4 多级过滤

Fig. 4 Multi-stage filtration

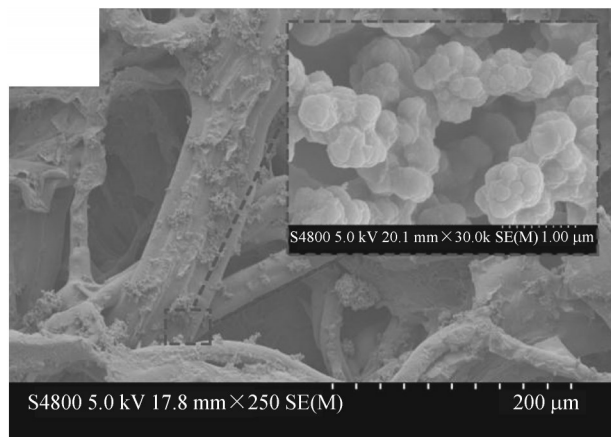
- 水滤布、疏水滤纸表面与水的静态接触角进行测量,在同一样品不同5个位置进行测量,5次测量结果的算术平均值即为样品与水的静态接触角。
- 3)拉伸强度测试。按照《JB/T 11092—2011 固液分离用织造滤布机械和物理性能测试方法》,使用CMT5105型电子万能试验机对疏水滤布、疏水滤纸进行拉伸试验,计算疏水滤布与疏水滤纸的拉伸强度。
 - 4)绝缘油中含水量测试。使用日本三菱CA-200型绝缘油微水测量仪监测多级过滤前后绝缘油中的含水量。
- 2 结果与讨论**
- 2.1 微观形貌分析**
SiO₂纳米粒子可以通过树脂粘接在基底表面各

个位置,与基底很好结合且分散较为均匀。在SEM图中, SiO_2 纳米粒子粒径最小的如尼龙219 nm,最大的是涤纶滤布,在基底上的粒子均处于纳米尺度,有利于 μm 粗糙结构的构建。由于基底粗糙程度的差别,粒子的分布和覆盖也存在区别。疏水滤膜SEM图见图5。 SiO_2 纳米粒子在PP滤芯上分布较少,这可能使疏水PP滤芯达不到超疏水,见图5(a)。图5(b)表明 SiO_2 纳米粒子在尼龙上分散不均匀且多

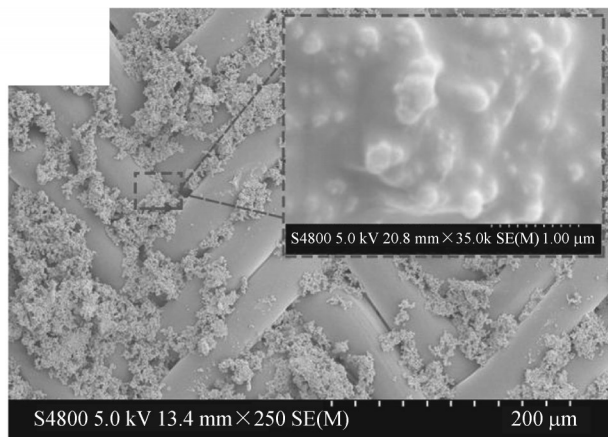
在纤维的缝隙中,这种分散不均匀的原因可能是因为纤维不够粗糙。聚酯纤维无纺布和滤纸能够粘接更多 SiO_2 纳米粒子,见图5(e)、(f),分布在聚酯纤维无纺布和滤纸表面的 SiO_2 纳米粒子更加致密,这会赋予疏水聚酯纤维和疏水滤纸更好的除水效果。

2.2 静态接触角

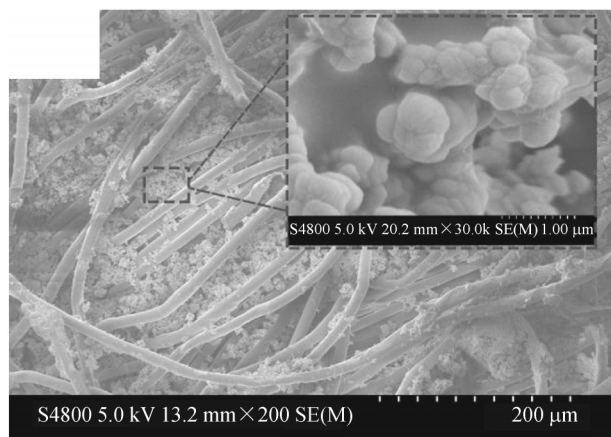
经喷涂改性的滤膜与水的静态接触角均大于 120° ,均为疏水滤膜,说明 SiO_2 纳米粒子通过喷涂法



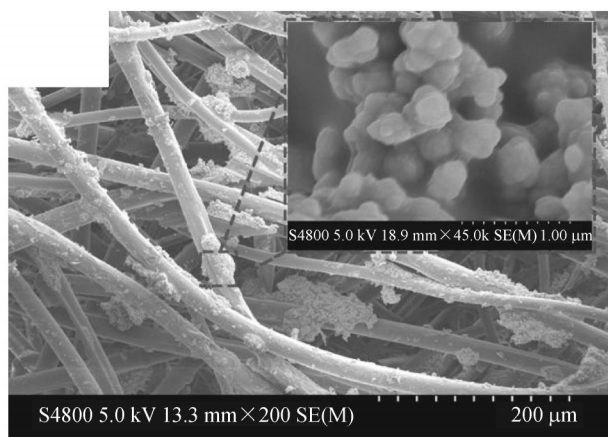
(a) PP滤芯



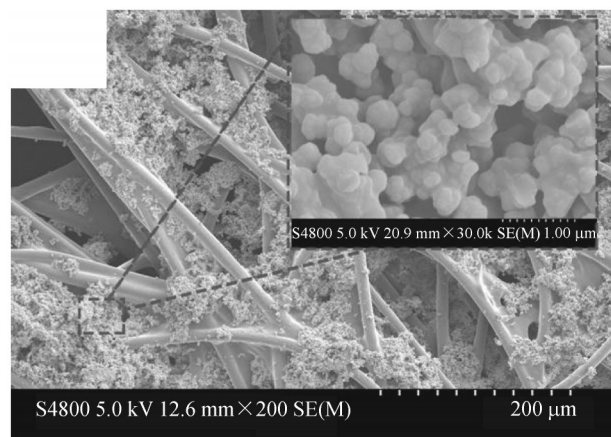
(b) 尼龙滤布



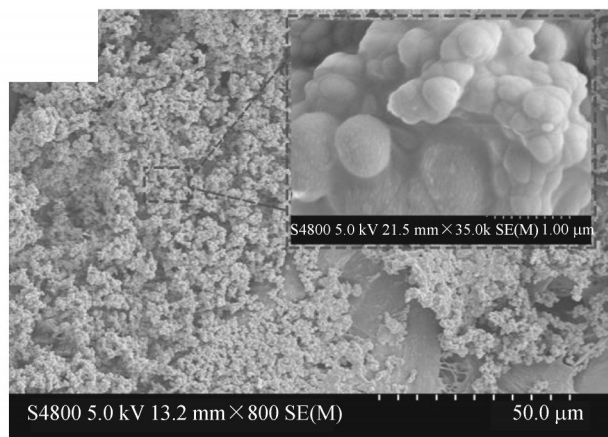
(c) 涤纶滤布



(d) PM2.5过滤网



(e) 聚酯纤维无纺布



(f) 滤纸

图5 疏水滤膜SEM图

Fig. 5 SEM image of hydrophobic membrane

均适用于滤纸、滤布及滤芯等不同基底,适用范围广。接触角在 120° 以上的滤膜即可用于1级过滤、2级过滤,而3级过滤应使用超疏水的滤膜。疏水PP滤芯与水接触角为 130.3° ,可在绝缘油中水分的1级过滤。疏水滤布与疏水PP滤芯有相近的接触角,都在 120° 以上,可在绝缘油中水分的2级过滤,滤布基底最优的潜在选择为聚酯纤维无纺布及涤纶滤布,见图6。所有的滤膜中(图6)疏水滤纸的接触角最大—— 162° ,这与SEM图中滤纸上的 SiO_2 纳米粒子均匀且紧密的分布状态很好地吻合,适用于除水级别最高的3级过滤。

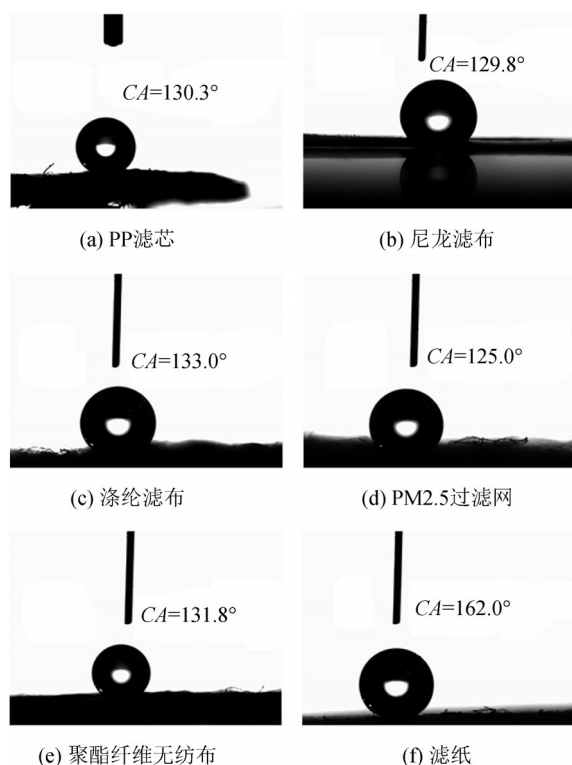


图6 水在不同滤膜上的静态接触角

Fig. 6 Static contact angle of water on different membranes

2.3 拉伸强度

选取滤布作为基底可以获得比滤纸更高的强度,能够承受更大的油压。由于滤布编织方式存在经纬交织和无纺的区别,滤布间拉伸强度差别较大,经纬相交织的滤布强度最高且比滤纸要高许多。所有基底中尼龙滤布和涤纶滤布经纬方向相互交织成网格结构,故尼龙滤布拉伸强度最高,其次是涤纶滤布,见图7。而诸如PM2.5过滤网和聚酯纤维无纺布强度则低于10 MPa,出现这种情况的原因应该是喷熔布和无纺布纤维之间无交织,在受力时很容易被拔出。2级过滤应优先选择拉伸强度在92.53 MPa以上的编织滤布使滤膜能够承受更大油压。而疏水滤纸则用于低油压、过滤精度高

的3级过滤。

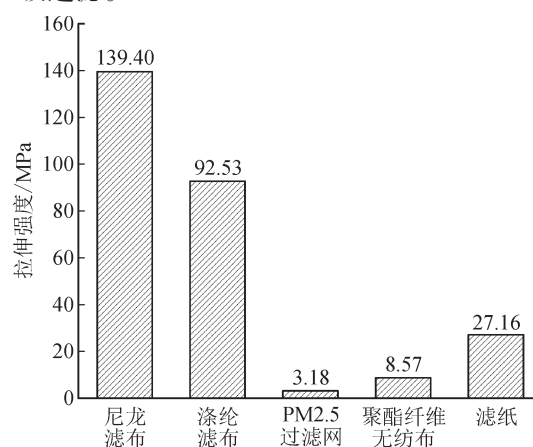


图7 不同基底的疏水滤膜拉伸强度

Fig. 7 Tensile strength of hydrophobic filter membrane with different substrates

2.4 疏水滤膜的绝缘油过滤除水效果

经1级过滤,绝缘油含水量由 $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $83.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明疏水PP滤芯能初步去除绝缘油中最容易聚集的水分,但未能将绝缘油含水量控制在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

2级过滤能够进一步除去绝缘油中水分,并且疏水滤布在反复使用10次以后仍能保持优异的除水能力。经2级过滤,绝缘油中水分含量从 $83.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,各种疏水滤布除水效果非常接近,见图8,至于图8中出现水含量上升的情况,可能是由于聚集在疏水滤布表面的小水珠被压缩空气强行挤压通过界面导致的。

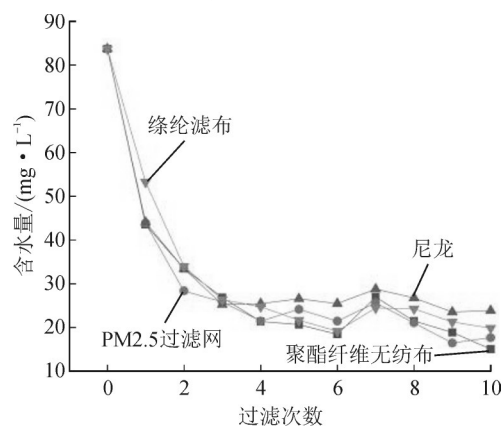


图8 2级过滤除水效果

Fig. 8 Water removal effect of secondary filtration

3级过滤以超疏水滤纸为滤膜,其除水能力最强,可将绝缘油含水量维持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。经3级过滤两次后即可将绝缘油中水分降低至 $8.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在此之后绝缘油水分含量再难降低说明除水已经达到极限,绝缘油的水分不能再聚集而被超疏水滤纸拦截,见图9。另外,由于聚集在超疏水滤纸表面的小水珠被负压空气强行抽过界面的原因,3级过滤

也会出现含水量上升的情况。

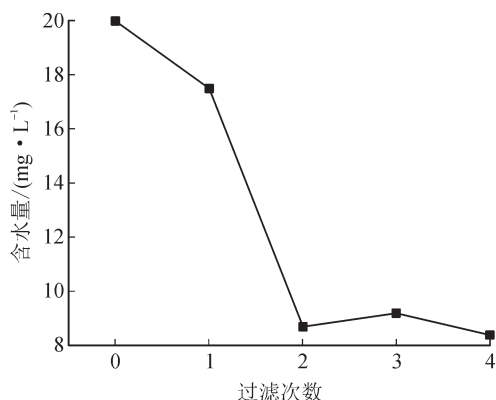


图9 3级过滤除水效果

Fig. 9 Water removal effect of tertiary filtration

1级过滤、2级过滤及3级过滤满足不同种类绝缘油的除水要求。对于对含水量要求不高的绝缘油(如汽轮机油)1级过滤可将含水量控制在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。另外对于不同电压等级变压器油,1级过滤、2级过滤能将220 kV变压器油含水量降至 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,1级过滤、2级过滤及3级过滤可将330~1 000 kV变压器油含水量降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。总的来说,这种多级过滤工艺即满足绝缘油对于水分含量低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的要求,适用于不同种类绝缘油的过滤除水。

3 结语

通过喷涂法能够将超疏水 SiO_2 纳米粒子均匀粘接在PP滤芯、滤布(尼龙滤布、涤纶滤布、聚酯纤维无纺布和PM2.5过滤网)、滤纸等不同基底表面,从而获得与水的接触角均大于 120° 的多种疏水滤膜,这说明喷涂法适用范围较广。另外,1级过滤、2级过滤和3级过滤综合作用能将绝缘油含水量从 $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $8.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并且多级过滤适用于不同种类绝缘油的不同除水级别。本方法具有操作简单、低能耗、效率高和针对性强的优点,具有实际应用的前景。

参考文献:

- [1] 陈超宗. 绝缘油的再生[M]. 北京:冶金工业出版社,1959.
CHEN Chaozong. Regeneration of insulating oil[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1959.
- [2] 明菊兰,钱洲亥,余璐静,等. 绝缘油中溶解气体在线监测装置自动校验评估及校准系统的研制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 169-175.
MING Julian, QIAN Zhouhai, YU Lujing, et al. Research and development of the auto testing, estimating and calibrating system for on-line monitoring device of gases

dissolved in transformer oil[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 169-175.

- [3] 王飞鹏,万春香,穆朋,等. 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[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(8): 39-49.
WANG Feipeng, WAN Chunxiang, MU Peng, et al. Transformer-oil filtration properties of fluorinated nonwoven polypropylene electret films[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(8): 39-49.
- [4] 娄为,吴奕南,花啸昌,等. 变压器油纸绝缘干燥过程中水分迁移规律与评估方法研究[J]. 变压器, 2022, 59(6): 18-24.
LOU Wei, WU Yinan, HUA Xiaochang, et al. Research on migration characteristics and evaluation method of moisture in drying process of oil-paper insulation[J]. Transformer, 2022, 59(6): 18-24.
- [5] 杨童亮,胡东,唐超,等. 基于SMA-VMD-GRU模型的变压器油中溶解气体含量预测[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 117-130.
YANG Tongliang, HU Dong, TANG Chao, et al. Prediction of dissolved gas content in transformer oil based on SMA-VMD-GRU model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 117-130.
- [6] 李佳,邓科,侯玉莲,等. 基于GRA-CEEMDAN-BiLSTM的变压器油中溶解气体浓度预测[J]. 变压器, 2022, 59(6): 42-47.
LI Jia, DENG Ke, HOU Yulian, et al. Prediction of dissolved gas concentration in transformer oil based on GRA-CEEMDAN-BiLSTM[J]. Transformer, 2022, 59(6): 42-47.
- [7] 武炬臻,王贵娟,曹燕明,等. 不同温度下变压器油中微水运动特性仿真分析[J]. 变压器, 2022, 59(1): 17-21.
WU Juzheng, WANG Guijuan, CAO Yanming, et al. Simulation analysis of moisture movement characteristics in transformer oil at different temperatures[J]. Transformer, 2022, 59(1): 17-21.
- [8] 电厂运行中矿物涡轮机油质量: GB/T 7596—2017 [S]. 2017.
In-service quality criteria of turbine oils used in power plants: GB/T 7596—2017[S]. 2017.
- [9] 运行中变压器油质量: GB/T 7595—2017 [S]. 2017.
Quality of transformer oils in service: GB/T 7595—2017 [S]. 2017.
- [10] 布里亚诺夫. 变压器油[M]. 北京: 电力工业出版社, 1957.
BRIANOV. Transformer oil[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1957.
- [11] 党钊,刘利彬,向宇,等. 超疏水—超亲油材料在油水分离中的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(s1): 216-222.
DANG Zhao, LIU Libin, XIANG Yu, et al. Progress of

- superhydrophobic - superoleophilic materials for oil/water separation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(s1): 216-222.
- [12] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805(95): 65-87.
- [13] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 2002, 28(8): 988-994.
- [14] CASSIE A B D, BAXT E S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40(1): 546-551.
- [15] ZHAI Shangru, ZHAI Bin, AN Qingda. Effect of preparation conditions on structural properties of PMHS-TEOS hybrid materials[J]. Journal of Sol Gel Science and Technology, 2011, 59(3): 480-487.
- [16] LIU Pengfei, BAI Xiuzhi, XING Weirong, et al. Translucent and superhydrophobic glass for self-cleaning and acid rain-restraining[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021(259): 124049.
- [17] XUE Chaohua, JI Pengting, ZHANG Ping, et al. Fabrication of superhydrophobic and superoleophilic textiles for oil-water separation[J]. Applied Surface Science, 2013(284): 464-471.
- [18] MHAISAGAR Y S, JOSHI B N, MAHAJAN A M. Surface texture modification of spin-coated SiO_2 xerogel thin films by TMCS silylation[J]. Bulletin of Materials Science, 2012, 35(2): 151-155.
- [19] 王云芳, 郭增昌, 王汝敏. 纳米二氧化硅的表面改性研究[J]. 化学研究与应用, 2007, 19(4): 382-385.
- WANG Yunfang, GUO Zengchang, WANG Rumin. Study on nano-silica colloidal particles surface modification[J]. Chemical Research and Application, 2007, 19(4): 382-385.
- [20] YANG Hao, PI Pihui, CAI Zhiqi, et al. Facile preparation of super-hydrophobic and super-oleophilic silica film on stainless steel mesh via sol-gel process[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(13): 4095-4102.
- [21] ZHAO Xueting, SU Yanlei, CHEN Wenjuan, et al. Grafting perfluoroalkyl groups onto polyacrylonitrile membrane surface for improved fouling release property[J]. Journal of Membrane Science, 2012(415/416): 824-834.
- [22] LI Hui, ZHAO Xiaoyun, CHU Guohong, et al. One-step fabrication of a superhydrophobic polymer surface from an acrylic copolymer containing POSS by spraying[J]. RSC Advances, 2014, 4(107): 62694-62697.
- [23] POLIZOS G, JANG G G, SMITH D B, et al. Transparent superhydrophobic surfaces using a spray coating process[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018(176): 405-410.
- [24] GUO Danyi, HOU Kun, XU Shouping, et al. Superhydrophobic-superoleophilic stainless steel meshes by spray-coating of a POSS hybrid acrylic polymer for oil-water separation[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(9): 6403-6413.
- [25] 易 阳. 纳米纤维改性与气凝胶构建及其在油水分离中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- YI Yang. Modification and aerogel construction of nanofibers and their application in oil-water separation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [26] ALIASGHAR P, YOUSEF T, RAHIMI P M, et al. Novel approach for rapid oil/water separation through superhydrophobic/superoleophilic zinc stearate coated polyurethane sponges[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021(618): 1-14.
- [27] YE Shihang, WANG Bo, PU Ziyang, et al. Flexible and robust porous thermoplastic polyurethane/reduced graphene oxide monolith with special wettability for continuous oil/water separation in harsh environment[J]. Separation and Purification Technology, 2021(266): 1-8.
- [28] 陈 普. 有机无机杂化超浸润涂层的制备及油水分离性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- CHEN Pu. Preparation and oil-water separation performance of organic-inorganic hybrid super-infiltrating coating[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [29] 宋 强. 复合油水分离材料的制备及其性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- SONG Qiang. Study on preparation and properties of composite filter media for fuel/water separation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [30] XUE Fang, JIA Dongmei, LI Yu, et al. Facile preparation of a mechanically robust superhydrophobic acrylic polyurethane coating[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(26): 13856-13863.
- [31] 郭新良, 许培俊, 杨雪滢, 等. 纳米 SiO_2 超疏水膜在电力设备油水分离系统中的应用[J]. 化工新型材料, 2020, 48(4): 217-221.
- GUO Xinliang, XU Peijun, YANG Xueying, et al. Application of nano- SiO_2 superhydrophobic membrane in oil-water separation system of electric power equipment[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(4): 217-221.

许培俊(1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事聚合物基复合材料方面的研究工作(E-mail: xupeijun@chd.edu.cn)。