第 51 卷 第 6 期：2599-2609 高电压技术 Vol.51, No.6: 2599-2609
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241481

变压器用植物绝缘油冷流特性的研究进展

郑含博[1]，蓝泓策[1]，姚德贵[2]，李　毅[1]，蔡胜伟[3]，李婧祺[3]，杨　涛[2]，王　阳[1]
（1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学)，南宁 530004；2. 国网河南省电力公司电力科学研究院，郑州 450000；3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：植物绝缘油作为一种液体介质，因其优异的环保、防火和可再生性，被普遍认为是变压器矿物绝缘油的良好替代品。但由于植物绝缘油存在高黏度、高倾点等冷流特性缺陷，使得植物绝缘油变压器低温运行可靠性不高，这已成为制约其广泛应用的瓶颈。因此，首先系统梳理了植物绝缘油冷流特性的研究成果，聚焦植物绝缘油的微观分子结构，论述了植物绝缘油分子的脂肪酸种类、碳链长度、不饱和度和分子几何构型与冷流特性方面的关系。然后，着重论述了提升植物绝缘油冷流特性的改进方法，总结了不同改进方法的优势和不足，并展望了变压器用植物绝缘油冷流特性的后续研究动态和发展前景。该研究总结将为植物绝缘油在冷流特性改善和变压器绝缘系统应用提供参考和借鉴。

关键词：变压器；植物绝缘油；冷流特性；倾点；运动黏度

Research Progress on Cold Flow Characteristics of Vegetable Insulating Oils for Transformers

ZHENG Hanbo[1], LAN Hongce[1], YAO Degui[2], LI Yi[1], CAI Shengwei[3], LI Jingqi[3], YANG Tao[2], WANG Yang[1]
(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China, Zhengzhou 450000, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Vegetable insulating oil, as an insulating medium, is generally recognized as a good alternative to mineral insulating oil due to its excellent environmental friendliness, fire resistance and renewability. However, its poor cold flow characteristics such as high viscosity and high pour point enable the low-temperature operation reliability of vegetable insulating oil in transformer to be not high, which has become a bottleneck restricting its wide application. Therefore, in this paper, we first systematically sort out the research results on the cold flow characteristics of vegetable insulating oils, focus on the microscopic molecular structure of vegetable insulating oils, and discuss the relationship between the fatty acid species, carbon chain length, degree of unsaturation, and molecular geometric configurations of vegetable insulating oils and their cold flow characteristics. Then, the improvement methods to enhance the cold flow characteristics of vegetable insulating oils are discussed, the advantages and disadvantages of different improvement methods are summarized, and the subsequent research dynamics and development prospects of the cold flow characteristics of vegetable insulating oils for transformers are envisioned. This research summary will provide reference for the application of vegetable insulating oils in improving cold flow characteristics and transformer insulation systems.

Key words: transformer; vegetable insulating oil; cold flow characteristic; pour point; kinematic viscosity

0　引言

变压器作为电力系统的关键设备，其稳定运行对于电能的传输与分配起着至关重要的作用。由于变压器内部处于高电压、大电流环境，对绝缘和冷却的要求极为严格。变压器油作为变压器内部的绝缘介质和冷却剂，其性能在变压器运行过程中至关重要。变压器油不仅能够有效隔离电器设备中的电流，防止电击和电弧的发生，还具备优异的热传导性能，能够迅速吸收并散发变压器运行过程中产生的热量，确保变压器的稳定运行[1]。传统上，矿物绝缘油因其良好的绝缘性能和低廉的成本而被广泛应用于变压器中。然而，随着对电力系统安全性要求的日益提高，矿物绝缘油因其较低的闪点和燃点的特性，在高负荷工况下可能引发火灾或爆炸的风

基金资助项目：国家自然科学基金(52277139；52367014)；广西杰出青年科学基金(2024GXNSFFA999017)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277139, 52367014), Guangxi Science Fund for Distinguished Young Scholars (2024GXNSFFA999017).

险，因此难以突破广泛应用的瓶颈[2-6]。在此背景下，植物绝缘油以其优异的环保性、防火性、可再生性，展现出替代矿物绝缘油的巨大潜力，也顺应了电力行业向绿色低碳转型的发展趋势[7]。

植物绝缘油的分子组成与矿物油不同，植物绝缘油的主要成分为甘油三酸酯，而矿物绝缘油的主要成分为饱和烃类，这种差异决定了植物绝缘油具有较差的冷流特性。例如，大豆绝缘油的倾点仅在−12 ℃至−16 ℃之间，相比之下矿物油的倾点一般在−25 ℃以下。在零下的低温条件下，植物绝缘油变压器会出现油流动性降低、冷却系统故障和变压器内部工作压力增加等问题，严重影响变压器油浸设备的正常运行和工作效率。这一缺陷直接限制了植物绝缘油在我国东北和西北以及世界上其他高寒地区的广泛使用[8]。因此探索研究植物绝缘油冷流特性提升和改性方法，有助于突破植物绝缘油在大容量、高电压等级及寒冷气候环境等更广泛场景应用的技术瓶颈，具有重要的理论意义和工程价值。

为了克服植物绝缘油在冷流特性方面的不足，推动其在电力变压器中的广泛应用。本文介绍了植物绝缘油的冷流特性，分析了植物绝缘油分子的脂肪酸种类、碳链长度、不饱和度和分子几何构型影响其冷流特性所取得的进展。通过介绍植物绝缘油冷流特性改进的研究，分析了各种改进方法的优势和存在的问题。最后，提出了在未来的研究中植物绝缘油冷流特性应关注的问题，并展望了该领域未来的研究方向与前景。

1 植物绝缘油的冷流特性

冷流特性指的是液体在低温环境下保持流动性的能力。对于植物绝缘油，冷流特性决定了其在低温下能否有效地应用于电力设备中。倾点和运动黏度决定了植物绝缘油的冷流特性，几种植物油和矿物油的倾点和运动黏度对比见表 1。

倾点是植物绝缘油在冷却过程中能够继续流动的最低温度，是表征绝缘液冷流特性的有效指标。低于这一温度，绝缘油会变得过于粘稠甚至冻结，导致失去流动性。低倾点意味着绝缘油在更低的温度下仍能保持流动，适合在极端寒冷环境中使用。黏度是液体抵抗流动的能力，低黏度则代表绝缘油具有良好的散热性，而温度降低通常会导致绝缘油黏度增加。

表 1 几种植物绝缘油和矿物油的倾点和运动黏度对比

Table 1 Comparison of pour point and kinematic viscosity of several vegetable insulating oils and mineral oils

参数	FR3	山茶籽油	BIOTEMP	矿物油
倾点/℃	−21	−28	−15~−20	−50
运动黏度(40 ℃)/($mm^2·s^{-1}$)	36	40	42	9

在低温环境下，植物绝缘油较高的倾点和黏度的升高不仅严重影响了变压器的冷启动，还会阻碍油中热量的传递，会导致变压器局部过热，绕组芯组件内产生的内部热量升高从而损害固体绝缘系统，进而加速绝缘油的劣化，降低绝缘系统的有效性[9]。如果变压器在低温下长时间停机，即使温度高于倾点，植物绝缘油也有可能停止流动。低温下植物绝缘油的局部冷冻和局部升温及运行过程中产生的气体，会导致变压器内部压力变化，造成储罐冷却管变形，严重变压器的正常运行[8,10-11]。这种动态变化过程将对植物绝缘油的电气强度产生显著影响[12]。虽然植物绝缘油的导热性能优于矿物油，但是在变压器运行过程中，植物油因其自身较高的黏度会使得其流动性下降，流动性的降低又会导致其散热性能降低。在变压器强迫油循环过程中，绝缘油与油纸之间的摩擦、电荷分离以及电荷累积会导致油流带电，同时带电荷的油液会随着油流动而分布在变压器的不同区域。在绝缘油流速较高的区域，电荷分离会更加剧烈，导致整个油流带电现象的增强[13]。低温下植物绝缘油的黏度进一步上升，从而加剧变压器内部强迫油循环过程中油纸接触摩擦程度，加速油纸界面的电荷分离，造成油流带电问题。这种带电现象不仅会影响油纸绝缘的电场分布，还会引发局部放电、绝缘油分解等问题，导致变压器的绝缘寿命缩短，增加变压器事故发生的风险。

受限于实验条件的影响，在极端温度下研究植物绝缘油的冷流特性面临诸多挑战。因此，众多研究采用了分子模拟和量子化学技术模拟研究绝缘油低温下的冷流特性。文献[14]通过分子动力学模拟方法研究了大豆基植物绝缘油的冷流特性，并将密度与自由体积相结合，通过模拟得到了大豆基植物绝缘油的倾点，如图 1 所示。文献[15]研究了大豆油和棕榈油在−20~20 ℃范围内低温的交流击穿电压，如图 2 所示。随着温度的升高，大豆油和棕榈油的击穿电压先降低后升高。通过分子动力学模拟和量子力学理论分析了两种天然酯的不同击穿行

为。结果表明自由体积、相互作用能和氢键等性质的变化差异是造成两种植物油的低温击穿行为不同的原因。文献[16]研究了−20~20 ℃内合成酯和矿物油之间的交流击穿电压差异，两者的击穿电压同样随着温度的升高而先降低后升高。同样通过分子动力学模拟和量子力学理论分析了两种绝缘油的不同击穿行为的原因。文献[17]采用模拟仿真方法预测了大豆基植物绝缘油在−20~20 ℃温度范围内的运动黏度，如图 3 所示。研究结果表明预测的大豆基植物绝缘油在不同温度下的运动黏度和其总体趋势与实验数据较相符。

2 植物绝缘油冷流特性的微观机理研究

植物绝缘油的主要分子组成是各种混合的甘油三酸酯分子，甘油三酸酯分子的脂肪酸种类、碳链长度、不饱和度和分子几何构型等因素对植物绝缘油的冷流特性起着重要作用[18-21]。甘油三酸酯分子的分子结构如图 4 所示，R，R′和 R″分别代表不同的脂肪酸。

甘油三酸酯复杂结构导致植物绝缘油内摩擦力大，运动黏度高于矿物油。甘油三酸酯分子在低温下易堆积成大晶体，导致黏度上升。同时，油中杂质如高熔点蜡和固体脂肪析出形成网状结构，也会增加黏度[22]，而破坏甘油三酸酯分子结构的对称性可有效改善低温黏度[23]。表 2 列举了几种典型植物绝缘油中主要脂肪酸的含量[24-25]。脂肪酸饱和度和链长会影响油的性质，不饱和度高则倾点、黏度低但易氧化；饱和度高则氧化稳定但倾点、黏度上升[12,26]。可见如何平衡植物绝缘油之间的倾点、黏度与抗氧化性是当前研究的一个难点。

已有研究表明分子间弱相互作用(静电相互作用、范德华相互作用)越强，则越不利于植物绝缘油的运动黏度[27]。为进一步探究分子间弱相互作用对黏度的影响，ZHENG H 等研究了天然脂肪酸甲酯运动黏度的影响机理[28]，从分子间弱相互作用的微观尺度分析了 4 种天然酯脂肪酸甲酯分子的静电相互作用、范德华相互作用和平均局部电离能。如图 5—图 7 所示，其中图中 $C_{18:0}$、$C_{18:1}$、$C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 分别表示脂肪酸甲酯链上含有 0、1、2、3 个碳碳双键(C═C 双键)，其中数字“18”则代表脂肪酸链中的碳原子个数。图 5 中颜色越红代表范德华力越大，颜色越蓝则代表范德华力越小。图 6 中蓝色区域为对应于范德华势为 0 的等值面。图 7 中蓝色区

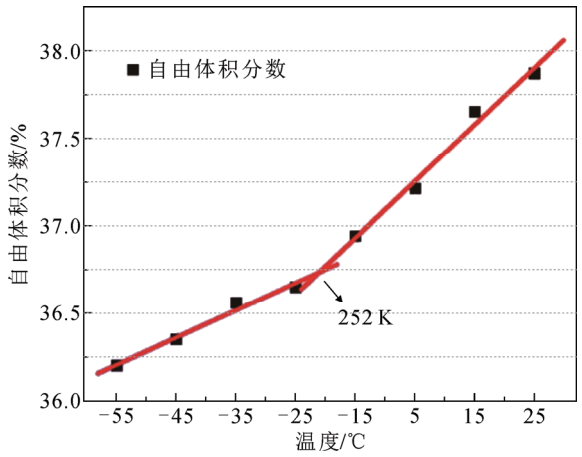


图 1 大豆绝缘油的自由体积分数与温度的函数关系

Fig.1 Free volume fraction of soybean insulating oil as a function of temperature

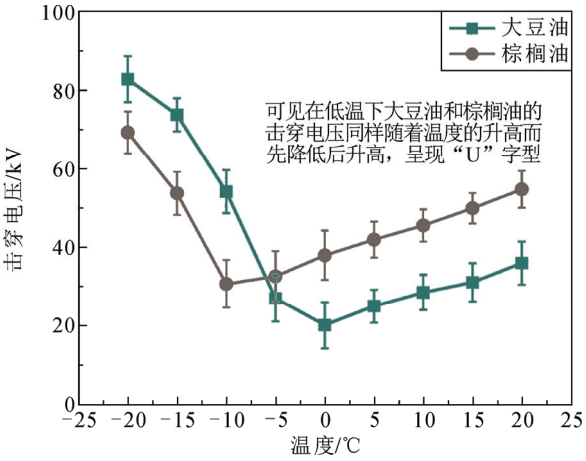


图 2 −20~20 ℃下大豆油和棕榈油的击穿电压对比

Fig.2 Comparison of breakdown voltage between soybean oil and palm oil at −20 ℃ to 20 ℃

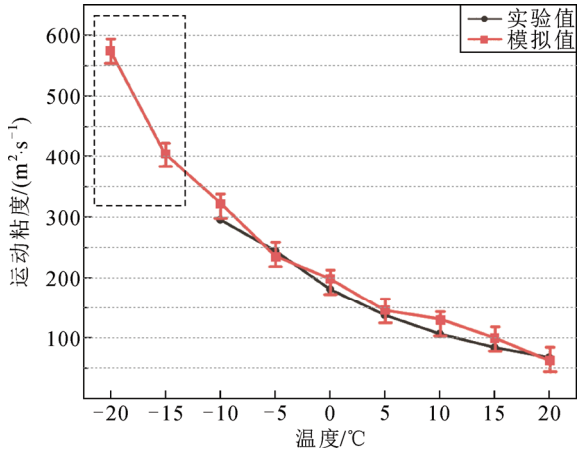


图 3 预测与实验的运动黏度曲线比较

Fig.3 Comparison of predicted and experimental kinematic viscosity profiles

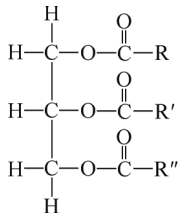


图 4 甘油三酸酯分子

Fig.4 Triglyceride molecule

表 2 常见植物绝缘油中主要脂肪酸的含量

Table 2 Content of major fatty acids in common vegetable insulating oils

植物绝缘油	饱和脂肪酸/%	单/双/三不饱和脂肪酸/%
大豆油	14.2	22.5/51.0/6.8
菜籽油	7.9	55.9/7.9/0.6
棕榈油	35	15/49.1/0.8
山茶籽油	11	75.1/10/0.9
橄榄油	13.2	73.3/7.9/0.6
花生油	13.5	17.8/51.8/0.2
玉米油	12.7	24.2/58.0/0.7
葵花籽油	10.5	19.6/65.7/0.3
棉籽油	25.8	17.8/51.8/0.2
红花油	8.5	12.1/74.1/0.4

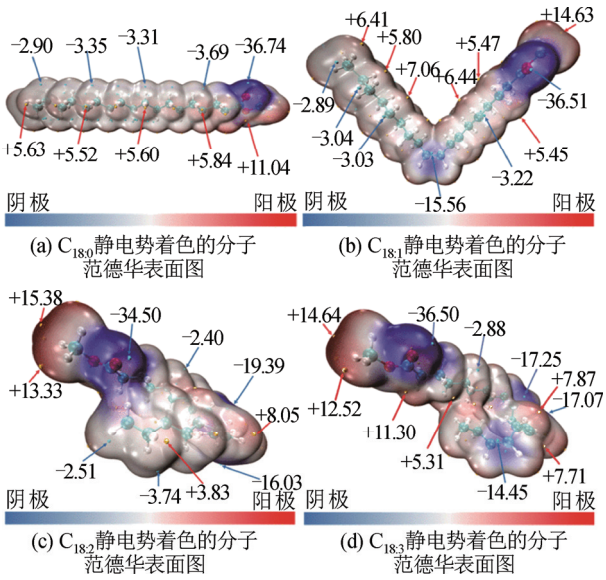


图 5 静电势着色的分子范德华表面图(单位：4.19 kJ/mol)

Fig.5 Electrostatic Potential-mapped molecular van der Waals surface (unit: 4.19 kJ/mol)

域表示平均局部离子化能数值小的区域，红色表示平均局部离子化能数值较大的区域。计算结果表明，4 种脂肪酸甲酯分子中的 C═C 双键减弱了分子间静电相互作用和范德华相互作用，且 C═C 双键数越多削弱作用越强，从而导致分子相互靠近的趋势也被减弱，而分子之间的弱相互作用越强，其运动

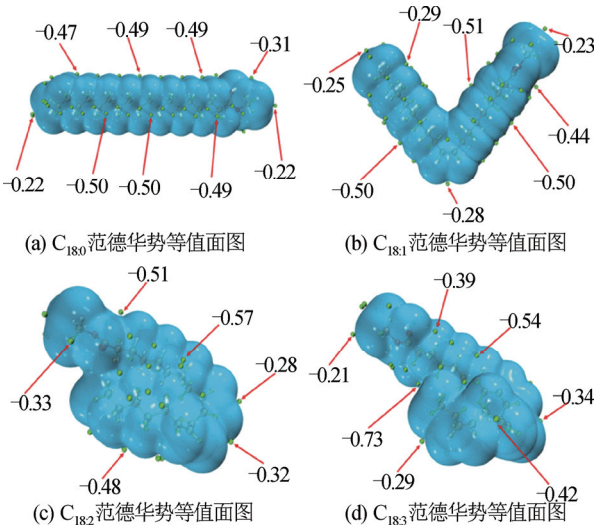


图 6 范德华势等值面图(单位：4.19 kJ/mol)

Fig.6 Van der Waals potential isosurface maps (unit: 4.19 kJ/mol)

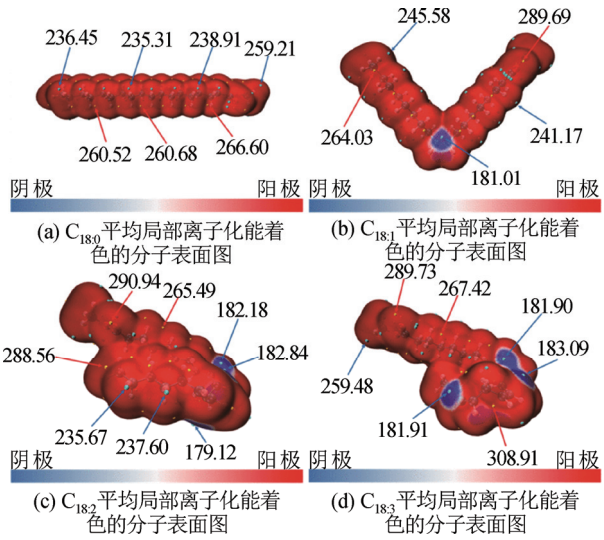


图 7 平均局部离子化能着色的分子表面图(单位：4.19 kJ/mol)

Fig.7 Average local ionization energy-mapped molecular surface (unit: 4.19 kJ/mol)

黏度越差。通过对平均局部离子化能分析表明随着 C═C 双键数量的增加，分子表面最有可能参与亲电反应的位点数量也会增加。图 7 中这些平均局部离子化能的位点区域与图 5 中双键附近静电势值相对较大的极小值点相对应，这表明双键可能会对分子间相互作用的影响，从而影响运动黏度。当甘油三酸酯分子在侧链碳原子数相同时，分支状况同样会影响倾点[29]。合成酯绝缘油的分子结构中不含 C═C 双键等不稳定基团，其分子结构具有高度可调控性，

在降低倾点、黏度等冷流特性方面具有突出优势，通过增加脂肪酸链中碳原子的分子量和碳原子数，可以提高合成酯的倾点，而含有支链脂肪酸链的合成酯的倾点通常低于由直脂肪酸链组成的合成酯的倾点[30-31]。

植物绝缘油的性能优化需深入理解其分子结构、脂肪酸特性及分子间弱相互作用的复杂机制。未来研究应聚焦于如何在保持植物绝缘油优异性能的基础上，通过分子设计与合成策略，克服其高黏度、低流动性及易氧化等固有缺陷，以满足电力设备日益严格的绝缘与运行要求。

3 植物绝缘油冷流特性的改进

针对植物绝缘油冷流特性差的问题，国内外学者开展了一系列研究。通过添加降凝剂可提高植物绝缘油的倾点还可使其他性质保持良好，采用结晶分提工艺将倾点相差较大的固态酯和液态油分离，降低植物绝缘油的倾点。此外，在分子层面的改进如酯交换、超声波技术等，同样可提升植物绝缘油的冷流特性。本章将从添加降凝剂、结晶分提工艺、酯交换反应、超声波技术和混合绝缘油 5 个方面，探讨植物绝缘油冷流特性的改进方法及其效果。

3.1 添加降凝剂

通过向植物绝缘油中加入降凝剂的方式改善低温流动性能是最直接、最经济、最有效的的方法[32-33]。其不仅可以降低植物绝缘油的倾点，还能兼顾其氧化特[34]。目前对于在植物油中加入降凝剂的研究，多数是延续了矿物油的降凝剂[35]。

1996 年，DUNN R O 等[36]通过实验发现在植物油中添加柴油降凝剂的效果并不明显。2011 年，李炎龙等[37]通过在植物油中添加 1%的乙烯-醋酸乙烯酯降凝剂使得冷凝点下降了约 7 ℃，其认为可能是降凝剂与酯分子发生了共结晶现象而改变了油品的结晶过程从而降低倾点。此后，YU H 等[38]在菜籽油甲酯中加入了质量分数为 0.5%的聚甲基丙烯酸酯降凝剂，实验发现该做法可将菜籽油甲酯的倾点从−9 ℃降低到−26 ℃，且对其它性能影响不大。瑞典 ABB 公司[39]研究了在不影响优异的安全防火性能的情况下改善其运动黏度和冷流特性，但是研究结果表明，在植物绝缘油中仅添加一种化合物是不可能在不影响防火安全性的情况下改善其冷流性能。

杨涛等[40]研究了不同降凝剂添加比例(质量分数)对植物绝缘油各种理化性质的影响，具体包括倾点、酸值和介质损耗因数，结果见图 8—图 10。其研究发现丙烯酸酯的添加并不能改善植物绝缘油的低温特性。而聚 α 烯烃和聚甲基丙烯酸酯加入植物油中之后，则展现出了显著的降凝效果。在这之中

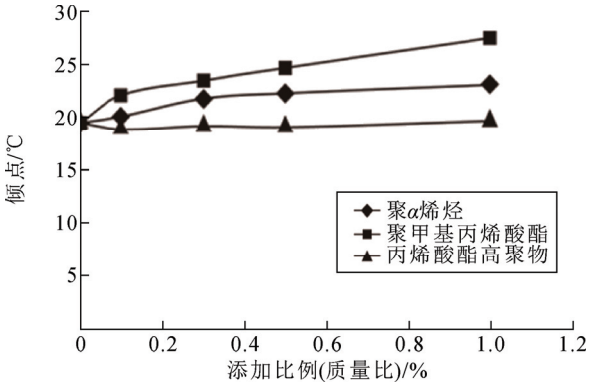


图 8 不同降凝剂对植物绝缘油倾点影响

Fig.8 Effect of different depressants on pour point of vegetable insulating oils

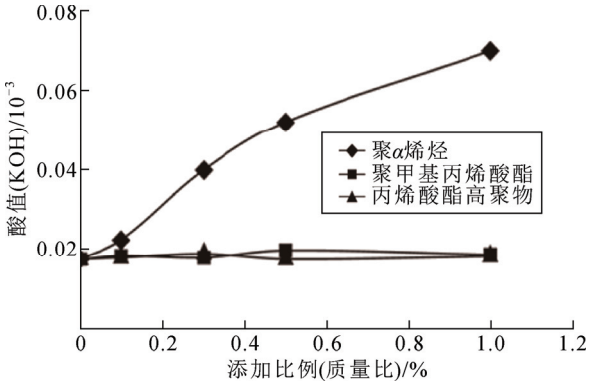


图 9 不同降凝剂对植物绝缘油酸值影响

Fig.9 Effect of different depressants on acid value of vegetable insulating oils

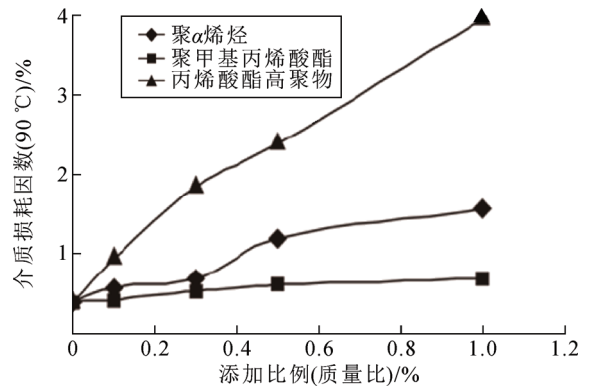


图 10 不同降凝剂对植物绝缘油介质损耗因数的影响

Fig.10 Effect of different depressants on dielectric loss factor of vegetable insulating oils

聚甲基丙烯酸酯的效果尤为突出。随着这两种添加剂在植物绝缘油中比例的增加，其倾点呈现出明显的下降趋势，这直接反映了它们对改善油品低温流动性的积极作用。当聚甲基丙烯酸酯的添加比例(质量比)达到 1%时，植物绝缘油的倾点能够显著降低至−26.3 ℃，这一降凝效果相较于聚 α 烯烃更为显著。

目前研究的降凝剂虽能降低油品倾点，但现有的降凝剂多数在植物绝缘油中的降凝效果并不明显，同时降凝剂的加入还可能会带来油品黏度增加、酸值上升、介质损耗因数上升等负面影响，因此如何选择优异的添加剂在不影响植物绝缘油其他性能的情况下改善冷流特性仍是值得研究的。

3.2 结晶分提工艺

在一定的低温条件下，可采用冷冻结晶的方法将倾点相差较大的固态酯和液态油分离，即结晶分提。该方法的原理是利用不同甘油三酸酯倾点及溶解度的不同将两者分离[41-42]。表 3 为低温养晶过程中搅拌速度对植物绝缘油性能参数的影响。采用结晶分提工艺去除了植物绝缘油中的部分高熔点甘油酯，有效降低了植物绝缘油的低温流动性[43]。在其结晶分提工艺中通过调整养晶过程中的搅拌速度来优化结晶分提，不同搅拌速度下得到的植物绝缘油主要性能如表 3 所示。

结晶分提工艺通过在低温条件下优化搅拌速度和控制结晶过程，可去除植物绝缘油中的高熔点甘油酯，改善其低温流动性能。但是结晶分提工艺旨在选择性分离高熔点的油脂，这种选择性分离可能会使植物绝缘油中对抗氧化性和电气性能有积极作用的油脂被分离，导致植物绝缘油的抗氧化性及其他电气性能下降，从而影响植物绝缘油的整体品质和长期稳定性。因此，如何在分提过程中保持这些有益成分的完整性，同时实现对高熔点组分的有效分离是改进该工艺的关键。

3.3 酯交换反应

酯交换反应是植物绝缘油中甘油三酸酯与醇的反应，该反应过程会生成新的合成酯和甘油。在此过程中需要对温度、压力、反应时间、催化剂以及天然酯和甲醇的摩尔比调节优化以提高产量。酯交换反应的工艺如图 11 所示。

合成酯绝缘油的分子结构中不含 C═C 双键等不稳定基团，其分子结构具有高度可调控性，在降低倾点、黏度等冷流特性方面具有突出优势[30-31]。通过优化反应条件和催化剂选择，可以制备出高性能的植物绝缘油，该工艺已被广泛用于生产植物绝缘油[44-47]。

表 3 低温养晶过程中搅拌速度对植物绝缘油性能参数的影响[40]

Table 3 Effect of stirring speed on the performance parameters of vegetable insulating oils during low-temperature crystallization[40]

搅拌速度/(r·min^{-1})	倾点/℃	酸值(KOH)/10^{-3}	介质损耗因数(90℃)/%
17	−14.5	0.017 8	0.455
10	−17.7	0.017 3	0.410
5	−19.5	0.017 5	0.409
2	−15.7	0.018 1	0.422

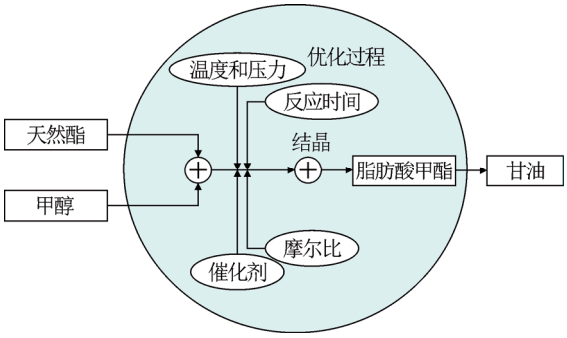


图 11 酯交换反应的工艺

Fig.11 Process of ester exchange reaction

前文已经提到，植物绝缘油的冷流特性受到分子结构的直接影响，分子链的结构和脂肪酸含量都会变化会改变油品的冷流特性[48-49]。因此，对于酯交换反应的原料油应选择具有良好的低温性能和含有高比例的不饱和脂肪酸的油料。但是不饱和脂肪酸比例高的植物油又会降低氧化性能，所以需要在饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量之间做出合理的选择。同时，在进行酯交换时采用长链醇、支链醇，对于降低其黏度，提高流动性和降低凝点，以及提高防火安全性等综合性能有比较理想的效果。TOKUNAGA J 等采用分子设计技术[50]，通过对脂肪酸甲酯与烷基醇进行酯交换反应，开发了拥有极低黏度且倾点低至−37.5 ℃的棕榈脂肪酸酯绝缘油，但改性后绝缘油的闪点、燃点下降严重。KANOH T 等人利用棕榈油脂肪酸和甲醇通过两步酯交换反应制备了棕榈油脂肪酸单酯绝缘油[51]，该绝缘油不仅具有良好的生物降解性以及击穿特性，而且黏度仅为矿物油的 60%、闪点比矿物油更高。韩秋篁使用生物酶催化法[52]，在生产过程中添加油酸，制备了倾点为−57 ℃，运动黏度为 10.59 mm^2/s，

电气性能优良的新戊二醇酯绝缘油。

王后政用含侧链的异辛醇与高油酸的双低型油菜籽油进行酯化反应[53]，制得倾点为−42 ℃的脂肪酸异辛酯变压器绝缘油，该绝缘油可单独使用在−50~−40 ℃的极端低温环境。MALINS K 等在酯化反应中以各种线型和支链的醇类化合物为原料[54]，经三步法合成了具有良好低温性能的脂肪酸烷基酯，发现其在较低温度下具有良好的热稳定性。DE OLIVEIRA V F 等人用脂肪酸烷基酯[55]，与不同醇进行酯化反应，研究发现与甲醇相比较而言，使用长链醇会使合成产物冷流特性大大改善。VIERTEL J 等学者通过将天然酯与支链脂肪酸酯、超支化聚合物和改性植物油混合[21]，来降低植物油的黏度和倾点。但结果表明简单的物理混合似乎无法在不影响消防安全的情况下降低植物绝缘油的黏度和倾点。

虽然通过对植物绝缘油分子及组分比例合理调控，可有效提升绝缘油的冷流性能，但现有研究通常局限于对其冷流特性中某单一特性的改善。同时，改性后的绝缘油某一特性的提升，又会使得其他特性的下降，因此如何兼顾改性后植物绝缘油的各项性能是未来研究的关键。

3.4 超声波技术

超声波技术已应用于食品加工、环境修复、气体理化性质、真空成分和流体特性的改变等研究领域[56-58]。在电力变压器高压绝缘领域，采用超声波处理技术也可以用来降低植物绝缘油的黏度[59]。

超声波降低植物油倾点机制涉及超声功率、频率及振动效应等变量。其机理在于超声振动使得分子结构重构，伴随能量释放引发的热效应，影响植物油物理性质。具体而言，超声波作用于植物油分子，引发分子级振动，导致分子反复压缩与拉伸，破坏分子间键合，进而可能降低倾点[60-63]。此变化受超声功率与频率调控，低频超声因循环次数多而更利于分子结构变化[64-66]。

MOOSASAIT B 等对油样进行 100 W、30 kHz 的超声波照射[67]，照射时间分别为 15、30、45 和 60 min。实验结果表明，超声波处理植物油可降低其倾点。倾点的降低与油品在超声波下暴露时间成正比。在最大暴露时间内，各样品的倾点温度从−15 ℃降低到−18 ℃。文章还指出为了进一步判断超声波对植物油样品作为液体绝缘处理的一致性，可以分析不同的超声波功率水平和超声波频率对植物油样品的其他特性产生的影响。

虽然超声波技术可降低植物绝缘油的黏度，但是其也会破坏植物绝缘油的分子结构，这很可能改变植物绝缘油的其他性质。因此，对于超声波处理对植物绝缘油分子结构的改变及其对其他性质的影响仍需要进一步研究。

3.5 混合绝缘油

由于植物绝缘油相较于传统的矿物绝缘油在运动黏度和倾点方面的劣势，单一植物油的冷流缺陷可能不足以应对其在低温环境下的应用。因此，许多研究人员研究了植物绝缘油与其他绝缘油的混合以改善黏度和倾点。

PERRIER C 等通过研究发现[68]，在不牺牲矿物油原有运动黏度的前提下，采用 80%矿物油与 20%合成酯的混合比例，能够显著优化矿物油的介电性能及热老化特性，展现出最佳的改性效果。廖瑞金等将矿物油与橄榄油以 8:2 的比例混合[69]，所制备的混合绝缘油在击穿电压、酸值及黏度等方面均展现出优异的性能。KHOSHSIMA A 则聚焦于生物柴油的制备[70]，通过混合菜籽油与脂肪酸甲酯，成功开发出一种具有低运动黏度特性的新型生物柴油。CHEN B 等深入分析了不同比例菜籽油与棕榈脂肪酸酯混合油的运动黏度及氧化稳定性变化[71]，结果显示，随着棕榈脂肪酸酯比例的增加，混合油的运动黏度逐渐降低。在 80%菜籽油与 20%棕榈脂肪酸酯的混合比例下，运动黏度降幅高达 51.3%。然而，进一步增加棕榈脂肪酸酯的比例会削弱其对运动黏度的改善作用，并导致混合油氧化稳定性下降。因此，他们认为 80%菜籽油与 20%棕榈脂肪酸酯的混合比例是较为理想的平衡点，能够在保持体系氧化稳定性不受显著影响的同时，有效降低运动黏度。此外，他们还通过向油样中添加纳米粒子，实现了油品倾点的有效降低[72]。RADHIKA R V 等人在对不同油类混合绝缘油样黏度进行比较研究时，发现 25%米糠油与 75%玉米油的混合比例能够使得油品黏度达到最小值，为混合绝缘油配方的优化提供了重要参考[73]。武新智针对大豆绝缘油进行了改性研究[74]，通过添加 7.5%的三乙酸甘油酯，成功制备出一种满足 DL/T 1811—2018 标准的混合绝缘油，改性后的绝缘油和 DL/T 1811—2018 参数对比如表 4 所示。文献分析了三乙酸甘油酯在改善大豆绝缘油黏度方面的作用机制，指出其通过增加油中的自由体积，为油分子提供了更大的扩散空间，进而促进

表 4 文献[74]中改性绝缘油与 DL/T 1811—2018 参数对比

Table 4 Comparison of modified insulating oil in literature [74] with DL/T 1811—2018 standard

参数	击穿电压/kV	介质损耗因数(90 ℃)/%	运动黏度(40 ℃)/($mm^2·s^{-1}$)
改性大豆油	73.9	0.037	32.84
DL/T 1811—2018	≥40	≤0.04	≤50

了油分子的运动，实现了混合绝缘油黏度的有效降低[74]。

针对植物绝缘油在低温下的冷流缺陷，通过混合策略及创新技术已成功实现其在运动黏度、倾点及多种理化性能上的显著提升。由于植物绝缘油类型多样，分子成分和结构有较大差异，导致不同植物油与其他绝缘油混合后的理化、电气性能有不同的影响。此外，混合绝缘油成分比例对性能影响还缺乏系统性研究。因此对混合后绝缘油的各种性质需要进一步研究。

4 未来研究工作展望

在探讨植物基绝缘油冷流特性的学术领域中，尚存诸多亟待深入剖析的复杂议题，本文特此系统归纳如下。

首先，在微观分子尺度上深入剖析植物绝缘油冷流特性的内在机理，仍是当前科学研究的关键问题。具体而言，植物绝缘油分子中碳碳双键的精确定位、分子链长度的精细调控以及分子分支结构的复杂性，均对其倾点、黏度等关键物理性质产生深远影响。因此，通过高精度的分子模拟与实验验证相结合的方法，系统探究这些分子结构特征与冷流特性之间的构效关系，将为植物绝缘油的分子设计与性能优化提供强有力的理论指导。

在植物绝缘油体系中，分子运动黏度、倾点与闪点、抗氧化性等关键性能之间存在复杂的相互制约关系，即优化某一特性往往伴随着其他性能的调整或牺牲。故此，如何在保持或提升冷流性能的同时，兼顾并优化绝缘油的其他关键性能指标，成为后续科研工作中亟待解决的关键科学问题。

此外，针对当前植物绝缘油冷流特性改进过程中可能伴随的油品酸值升高、介质损耗因数增加等不利效应，因此需开发新型、高效的改性策略与技术手段。这些策略应旨在通过精准调控分子结构、优化生产工艺或引入新型添加剂等方式，在不影响或最小程度影响植物绝缘油其他性能的前提下，提升冷流特性。

5 结论

由于植物绝缘油的冷流特性较差，限制了植物油变压器在极端寒冷环境下的稳定运行能力。因此本文针对植物绝缘油的冷流特性，总结了近年来植物绝缘油冷流特性的研究进展，介绍和分析了影响植物绝缘油冷流特性的微观机理以及冷流特性改进的研究，并对未来的研究进行了展望。得到的结论如下：

1）低温环境对植物绝缘油在变压器中的应用构成了显著挑战，包括影响冷启动、阻碍热量传递、导致局部过热及绝缘系统损害、加速绝缘油劣化、引起内部压力变化以及降低电气强度等。植物绝缘油在低温下的高黏度、高倾点等物理特性加剧了这些问题。尽管实验条件限制了在极端温度下的直接实验研究，但分子模拟和量子化学技术为理解并预测植物绝缘油在低温下的行为提供了有力工具，为优化植物绝缘油在低温环境下的应用提供了科学依据。

2）植物绝缘油的冷流特性受到其分子结构、脂肪酸特性及分子间弱相互作用等复杂因素的影响。这些因素会导致植物绝缘油在低温下易于堆积形成大晶体，增加内摩擦力等，从而显著提高其运动黏度并降低流动性。此外，高熔点蜡和固体脂肪等杂质的析出也进一步恶化了低温下的流动性。对于植物绝缘油还需要进一步研究分析其微观机理，并通过分子设计与合成策略，来克服低流动性及易氧化等固有缺陷，以实现植物绝缘油的有效改性。

3）植物绝缘油冷流特性的改进研究表明，通过添加降凝剂、结晶分提工艺、酯交换反应和超声波技术等方法可以有效提升其低温流动性能。具体而言，降凝剂的添加能够显著降低植物绝缘油的倾点，但可能引发其他负面影响；结晶分提工艺则通过去除高熔点油脂有效改善低温流动性，但也有可能分离掉对抗氧化性和电气性能有积极作用的油脂；酯交换反应利用分子结构的可调控性在降低倾点和黏度方面表现出优势，但需要平衡抗氧化能力和燃点；超声波技术通过改变分子结构降低黏度和倾点，但可能对其他性能产生影响；混合绝缘油可有效改善植物绝缘油的黏度和倾点，但混合绝缘油成分比例对性能影响还需要系统性的研究。因此，未来的研究应致力于综合优化各改进方法，在不损害其他性能的前提下全面提升植物绝缘油的冷流特性。

参考文献 References

[1] 李 剑，姚舒瀚，杜 斌，等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术，2015，41(2)：353-363.
LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 353-363.

[2] 高 路，徐 浩，吕泽鹏，等. 油纸复合绝缘组成类型对电荷输运特性的影响[J]. 高电压技术，2025，51(1)：309-321.
GAO Lu, XU Hao, LYU Zepeng, et al. Effect of composition of oil-paper insulation on charge transport characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 309-321.

[3] 吴治诚，周俊杰，张乔根，等. 油纸绝缘水分迁移特性研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(2)：781-792.
WU Zhicheng, ZHOU Junjie, ZHANG Qiaogen, et al. Review on moisture migration characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 781-792.

[4] CILLIYUZ Y, BICEN Y, ARAS F, et al. Measurements and performance evaluations of natural ester and mineral oil-immersed identical transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106517.

[5] ROUABEH J, M'BARKI L, HAMMAMI A, et al. Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers[J]. Heliyon, 2019, 5(3): e01159.

[6] 张钧奕，郝 建，张静文，等. 三元混合绝缘油雷电冲击流注放电发展特性仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5435-5448.
ZHANG Junyi, HAO Jian, ZHANG Jingwen, et al. Development characteristics of lightning impulse discharge streamer of three-element mixed insulation oil based on simulation research[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5435-5448.

[7] 毛淦霖，赵 峰，李世军，等. 绝缘油种类对油纸绝缘直流空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1726-1736.
MAO Ganlin, ZHAO Feng, LI Shijun, et al. Influences of insulating oil type on DC space charge characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1726-1736.

[8] SHEN Z J, WANG F P, WANG Z Q, et al, A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110783.

[9] DELVECCHIO R, RAPP K. Cold start of a 240 MVA generator step-up transformer filled with natural ester fluid[C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition(T&D). Dallas, USA: IEEE, 2016: 256-263.

[10] RAO U M, FOFANA I, JAYA T, et al. Alternative dielectric fluids for transformer insulation system: progress, challenges, and future prospects[J]. IEEE Access, 2019, 7: 184552-184571.

[11] AB GHANI S, MUHAMAD N A, NOORDEN Z A, et al. Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163: 655-667.

[12] DUY C T, LESAINT O, BONIFACI N, et al. High voltage breakdown and pre-breakdown properties in rape-seed insulating oil[C]//2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver, Canada: IEEE, 2007: 623-626.

[13] 钱艺华，卓 然，王 青，等. 酯类绝缘油的油流带电度影响因素研究[J]. 南方电网技术，2024，18(12)：35-41.
QIAO Yihua, ZHUO Ran, WANG Qing, et al. Study on the factors influencing the oil flow chargeability of ester insulating oil[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 35-41.

[14] ZHENG H B, WANG Y, YANG T, et al. Investigation on cold flow properties of natural ester insulating oils based on molecular dynamics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1323-1330.

[15] YE W Y, HAO J, ZHU M Z, et al. Low temperature breakdown behavior analysis of natural esters from the perspective of molecular structure[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 318: 114032.

[16] LI S, WANG F P, OUYANG L X, et al. Differential low-temperature AC breakdown between synthetic ester and mineral oils: insights from both molecular dynamics and quantum mechanics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1296-1304.

[17] ZHENG H B, FENG Y J, LI X F, et al. Investigation on molecular dynamics simulation for predicting kinematic viscosity of natural ester insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1882-1888.

[18] OOMMEN T V. Vegetable oils for liquid-filled transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(1): 6-11.

[19] MCSHANE C. New safety dielectric coolants for distribution and power transformers[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2000, 6(3): 24-32.

[20] PERKASA C Y, LELEKAKIS N, CZASZEJKO T, et al. A comparison of the formation of bubbles and water droplets in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2111-2118.

[21] VIERTEL J, OHLSSON K, SINGHA S. Studies of the improvement of the viscosity of natural ester liquids[C]//2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids(ICDL). Bled, Slovenia: IEEE, 2014: 1-4.

[22] TANG D M, MARANGONI A G. Microstructure and fractal analysis of fat crystal networks[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2006, 83(5): 377-388.

[23] ERHAN S Z, SHARMA B K, PEREZ J M. Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants[J]. Industrial Crops and Products, 2006, 24(3): 292-299.

[24] 王亚超. 基于密度泛函理论的甘油三酯分子及植物绝缘油放电相关参量研究[D]. 重庆：重庆大学，2018.
WANG Yachao. Study on the discharge-related parameters of triglyceride molecules and vegetable insulating oils based on density functional theory[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.

[25] 李 萌，盛祖红. CTR 天然酯绝缘油的研制[J]. 石油商技，2020，38(4)：22-29.
LI Meng, SHENG Zuhong. Development of CTR natural ester insulating oil[J]. Petroleum Products Application Research, 2020, 38(4): 22-29.

[26] GNANASEKARAN D, CHAVIDI V P. Vegetable oil: an eco-friendly liquid insulator[M]. GNANASEKARAN D, CHAVIDI V P. Vegetable oil based bio-lubricants and transformer fluids-applications in power plants. Berlin, Germany: Springer, 2018: 101-124.

[27] XU J P, WANG N, XUE S, et al. Insights into the mechanism during viscosity reduction process of heavy oil through molecule simulation[J]. Fuel, 2022, 310: 122270.

[28] ZHENG H B, FENG Y J, LÜ W J, et al. Unraveling weak interaction of kinematic viscosity of fatty acid methyl esters in natural ester insulating oils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 528-535.

[29] TONKONOGOV B P, DOROGOCHINSKAYA V A, BAGDASAROV L N, et al. Development of a proximate IR spectrometric method for the determination of base oil viscosity, viscosity index, and pour point[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2016, 52(1): 76-84.

[30] WANG F P, OUYANG L X, SONG C, et al. Enhancing dielectric and thermal performances of synthetic-ester insulating oil via blending with natural ester[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1115-1124.

[31] WANG K Z, WANG F P, LI J, et al. Synthesis of trimethylolpropane fatty acid triester as a high performance electrical insulating oil[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 142: 111834.

[32] KHIDR T T. The effect of commercial additives as pour point depressants for fuel oils[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33(9): 975–983.

[33] ZHAO Z C, XUE Y, XU G W, et al. Effect of the nano-hybrid pour point depressants on the cold flow properties of diesel fuel[J]. Fuel, 2017, 193: 65-71.

[34] CHOI S H, HUH C S. The lightning impulse properties and breakdown voltage of natural ester fluids near the pour point[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013, 8(3): 524-529.

[35] 姚佳辰. 低倾点季戊四醇酯绝缘油的分子调控与制备方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2022.
YAO Jiachen. Study on molecular regulation and preparation of pentaerythritol ester insulating oil with low pour point[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022.

[36] DUNN R O, SHOCKLEY M W, BAGBY M O. Improving the low-temperature properties of alternative diesel fuels: vegetable oil-derived methyl esters[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1996, 73(12): 1719–1728.

[37] 李炎龙，王大鹭，韩 生，等. EVA 类降凝剂对生物柴油低温流动性的作用机理[J]. 大连工业大学学报，2011，30(5)：365-368.
LI Yanlong, WANG Dazhi, HAN Sheng, et al. Mechanism of EVA pour point depressant in biodiesel[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2011, 30(5): 365-368.

[38] YU H, YU P, LUO Y B. Renewable low-viscosity dielectrics based on vegetable oil methyl esters[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2017, 12(2): 820-829.

[39] GHANI S A, MUHAMAD N A, NOORDEN Z A, et al. Multi-response optimization of the properties of natural ester oil with mixed antioxidants using taguchi-based methodology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1674-1684.

[40] 杨 涛，王飞鹏，姚德贵，等. 植物绝缘油低温性能的改进[J]. 中国油脂，2021，46(9)：67-70.
YAO Tao, WANG Feipeng, YAO Degui, et al. Improvement of low temperature performance of vegetable insulating oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(9): 67-70.

[41] ZALIHA O, CHONG C L, CHEOW C S, et al. Crystallization properties of palm oil by dry fractionation[J]. Food Chemistry, 2004, 86(2): 245-250.

[42] RAMLI M R, SIEW W L, CHEAH K Y. Properties of high-oleic palm oils derived by fractional crystallization[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(3): C140-C145.

[43] YANG T, WANG F P, YAO D G, et al. Low-temperature property improvement on green and low-carbon natural ester insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1459-1464.

[44] KHAN M A, YUSUP S, AHMAD M M. Acid esterification of a high free fatty acid crude palm oil and crude rubber seed oil blend: Optimization and parametric analysis[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(12): 1751-1756.

[45] BERCHMANS H J, HIRATA S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1716-1721.

[46] TIWARI A K, KUMAR A, RAHEMAN H. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(8): 569-575.

[47] GUO F, FANG Z, TIAN X F, et al. One-step production of biodiesel from *Jatropha* oil with high-acid value in ionic liquids[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(11): 6469-6472.

[48] SITORUS H B H, SETIABUDY R, BISMO S, et al. Jatropha curcas methyl ester oil obtaining as vegetable insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2021-2028.

[49] BERTRAND Y, HOANG L C. Vegetal oils as substitute for mineral oils[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003, 2: 491-494.

[50] TOKUNAGA J, NIKAIDO M, KOIDE H, et al. Palm fatty acid ester as biodegradable dielectric fluid in transformers: a review[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2019, 35(2): 34-46.

[51] KANOH T, IWABUCHI H, HOSHIDA Y, et al. Analyses of electro-chemical characteristics of Palm Fatty Acid Esters as insulating oil[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil, France: IEEE, 2008: 1-4.

[52] 韩秋篁. 二酯绝缘油的制备及其工频击穿特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.
HAN Qiuhuang. Investigation on preparation of diester insulating oil and its power-frequency breakdown characteristics[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2021.

[53] 王后政. 双低菜籽油与异辛醇酯交换反应制备低凝点变压器绝缘油[D]. 无锡：江南大学，2021.
WANG Houzheng, Preparation of low-freezing point transformer insulating oil by transesterification reaction of canola oil and isooctanol[D]. Wuxi, China: Jiangnan University, 2021.

[54] MALINS K, KAMPARS V, KAMPARE R, et al. Properties of rapeseed oil fatty acid alkyl esters derived from different alcohols[J]. Fuel, 2014, 137: 28-35.

[55] DE OLIVEIRA V F, PARENTE JR. E J S, MANRIQUE-RUEDA E D, et al. Fatty acid alkyl esters obtained from babassu oil using C_1-C_8 alcohols and process integration into a typical biodiesel plant[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 160: 224-232.

[56] HUANG D, MEN K Y, LI D P, et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104950.

[57] WANG J, WANG Z J, VIEIRA C L Z, et al. Review on the treatment of organic pollutants in water by ultrasonic technology[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 273-278.

[58] TAHERI-SHAKIB J, NADERI H, SALIMIDELSHAD Y, et al. Application of ultrasonic as a novel technology for removal of inorganic scales (KCl) in hydrocarbon reservoirs: an experimental approach[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 249-259.

[59] BAKRUTHEEN M, IRUTHAYARAJAN M W, NARAYANI A. Influence of ultrasonic waves on viscosity of edible natural esters based liquid insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1628-1635.

[60] MIN Y, LUO J, LIU C J. Viscosity and related structure transformation of fluorine bearing silicate melt under ultrasonic field[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 289-296.

[61] HUANG X T, ZHOU C H, SUO Q Y, et al. Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 41: 661-669.

[62] HAMIDI H, RAFATI R, JUNIN R B, et al. A role of ultrasonic fre-

quency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2012, 2(1): 29-36.

[63] YUSOF S M, HUSSIN N, ISA M. Viscosity reduction of palm oil via ultrasonic radiation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 785: 315-319.

[64] NADERI K, BABADAGLI T. Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(3): 500-508.

[65] NAZARI-MAHROO H, PASANDIDEH K, NAVID H A, et al. How important is the liquid bulk viscosity effect on the dynamics of a single cavitation bubble?[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 47-52.

[66] MOHAMMADIAN E, JUNIN R, RAHMANI O, et al. Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding[J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 607-614.

[67] MOOSASAIT B, SILUVAIRAJ W I M. Impact of ultrasonic treatment process on pour point of vegetable oils based liquid insulation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 71: 105380.

[68] PERRIER C, BEROUAL A, BESSEDE J L. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3): 556-564.

[69] 廖瑞金，梁帅伟，李 剑，等. 矿物油和天然酯混合绝缘油的理化特性和击穿电压研究[J]. 中国电机工程学报，2009，29(13)：117-123.
LIAO Ruijin, LIANG Shuaiwei, LI Jian, et al. Study on the physics and chemistry characteristics and breakdown voltage of a mixed insulation oil composed of mineral oil and natural easter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 117-123.

[70] KHOSHSIMA A, BROCK D, TOURAUD D, et al. Pre-formulation of biofuels: kinematic viscosities, low-temperature phase behaviour and nanostructuring of ethanol/“ethanolotrope”/rapeseed oil mixtures[J]. Fuel, 2017, 191: 212-220.

[71] CHEN B H, SU Z M, DU Z B, et al. A new type of mixed vegetable insulating oil with better kinematic viscosity and oxidation stability[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119512.

[72] 陈炳豪. 纳米 KH550-TiO_2 改性二元混合天然酯绝缘油的制备与性能研究[D]. 重庆：西南大学，2023.
CHEN Binghao. Study on preparation and properties of nano KH550-TiO_2 modified binary mixed natural ester insulating oil[D]. Chongqing, China: Southwest University, 2023.

[73] RADHIKA R V, IRUTHAYARAJAN M W, PAKIANATHAN P S. Investigation of critical parameters of mixed insulating fluids[C]//2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies. Nagercoil, India: IEEE, 2014: 357-362.

[74] 武新智. 三乙酸甘油酯混合大豆绝缘油的制备与性能研究[D]. 重庆：西南大学，2023.
WU Xinzhi. Preparation and performance study of glycerol triacetate mixed soybean insulating oil[D]. Chongqing, China: Southwest University, 2023.



郑含博(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要从事电气设备状态监测与智能诊断、高性能电工装备与材料、智能配电网及新能源应用等研究
E-mail: hanbozheng@163.com

ZHENG Hanbo
Ph.D., Professor
Corresponding author



蓝泓策
2000—，男，硕士
主要从事高电压与电工绝缘新材料方面的研究工作
E-mail: RedsideLan@163.com

LAN Hongce



李 毅
1991—，男，博士
主要从事高电压与电工绝缘新材料方面的研究工作
E-mail: yili665143@163.com

LI Yi
Ph.D.



王 阳
2001—，男，硕士
主要从事高电压与电工绝缘新材料方面的研究工作
E-mail: wangyang010121@163.com

WANG Yang

收稿日期 2024-09-10 修回日期 2025-02-13 编辑 曹昭君