

## 植物绝缘油低温性能的改进

杨涛<sup>1,2</sup>, 王飞鹏<sup>1</sup>, 姚德贵<sup>2</sup>, 王天<sup>2</sup>, 姚伟<sup>2</sup>, 黄正勇<sup>1</sup>, 王吉<sup>2</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. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

**摘要:**为提高植物绝缘油变压器的低温运行可靠性,采用结晶分提和添加降凝剂相结合的方法对植物绝缘油低温性能进行改进研究。结果表明,结晶分提工艺可以有效改善植物绝缘油的低温特性,且不影响植物绝缘油的原有性能,低温养晶过程中搅拌速度为5 r/min时,植物绝缘油倾点可降至-19.5℃。丙烯酸酯高聚物不具有降凝效果,而且还会对植物绝缘油电气绝缘性能造成影响。聚甲基丙烯酸酯降凝效果优于聚 $\alpha$ 烯烃,添加比例为1%时可将结晶分提处理后的植物绝缘油倾点降至-26.3℃,且能保持良好的理化、电气性能,进一步拓宽了植物绝缘油变压器的应用条件和应用范围。

**关键词:**植物绝缘油;低温性能;倾点;结晶分提工艺;降凝剂

中图分类号:TM41;TM215.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)09-0067-04

### Improvement of low temperature performance of vegetable insulating oil

YANG Tao<sup>1,2</sup>, WANG Feipeng<sup>1</sup>, YAO Degui<sup>2</sup>, WANG Tian<sup>2</sup>,  
YAO Wei<sup>2</sup>, HUANG Zhengyong<sup>1</sup>, WANG Ji<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In order to improve the low temperature operation reliability of vegetable insulating oil-immersed transformer, the low temperature performance improvement experiment of vegetable insulating oil was studied by combining crystallizing fractionation and adding pour point depressant. The results showed that crystallizing fractionation process could effectively improve the low temperature performance of vegetable insulating oil, and did not affect the original performance. When the stirring speed reached 5 r/min during the low temperature crystallization, the pour point of vegetable insulating oil could be reduced to -19.5℃. Acrylate polymer had no depression effect, and could affect the electrical performance of vegetable insulating oil. The depression effect of polymethacrylate was better than that of poly- $\alpha$ -olefin, and when the addition ratio of polymethacrylate was 1%, the pour point of vegetable insulating oil treated by crystallization fractionation could be reduced to -26.3℃, and the good physicochemical and electrical properties were maintained, which further expanded the application conditions and scope of the vegetable insulating oil-immersed transformer.

**Key words:** vegetable insulating oil; low temperature performance; pour point; crystallizing fractionation process; pour point depressant

收稿日期:2020-10-29;修回日期:2020-11-23

作者简介:杨涛(1985),男,高级工程师,硕士,主要从事油浸式电气设备状态监测与故障诊断、绝缘材料老化特性分析、新型环保液体绝缘材料研制及应用等工作(E-mail) yangtao19850315@163.com。

近年来,随着电网绿色转型升级的不断推进,对电气设备的环保性和安全可靠性的要求也提出了更高的要求。作为电网中发、输、变、配多个环节的能量枢纽,油浸式变压器采用石油精炼得到的矿物绝缘油进行冷却和绝缘,矿物绝缘油年消耗量已接近60万t<sup>[1]</sup>。

但矿物绝缘油生物降解率低于 30%<sup>[2]</sup>, 燃点较低, 近年来变压器泄漏污染事件、废旧变压器油回收难题及变压器过载引发的大面积停电事故已严重影响人们的生活<sup>[3-5]</sup>。

植物绝缘油具有矿物绝缘油不可比拟的环保和消防安全性能优势<sup>[6-7]</sup>, 可以大幅提高变压器的环保性和电网的安全运行水平, 有效拓宽油浸式变压器的应用范围, 完全满足我国节能减排和绿色电网发展的要求<sup>[8]</sup>。近年来, 我国植物绝缘油发展迅速, 现已成功实现国产化, 并已有超过 3 000 台植物绝缘油变压器挂网运行, 运行电压等级达到 110 kV<sup>[9]</sup>, 220 kV 植物绝缘油变压器也已顺利通过型式试验考核<sup>[10]</sup>。

由于组成成分的差异, 植物绝缘油倾点高于矿物绝缘油, 而倾点越高, 对应的低温流动性就越差<sup>[11-13]</sup>。例如, 目前常采用的大豆绝缘油倾点仅为  $-12 \sim -14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而我国北方大部分地区最低环境温度低于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低温条件下, 随着环境温度的降低, 植物绝缘油中高熔点的蜡质和甘油酯等物质会结晶析出, 使其运动黏度增大, 流动性能降低; 当环境温度低于其倾点时, 植物绝缘油由液态逐渐变成固态, 流动性能丧失, 植物绝缘油变压器启动时就会影响其散热, 并导致分解开关和油泵等机械转动部件损坏等问题, 变压器低温可靠性难以得到有效保障。

研究表明, 植物绝缘油中掺混矿物绝缘油可以有效改善其倾点和运动黏度, 但是随着矿物绝缘油掺混比例的增加, 环保特性不再突显, 掺混比例超过 10% 时闪点急剧下降 (低于  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 无法满足 IEC K 级绝缘液体 (难燃) 的要求<sup>[14-16]</sup>。目前, 国内外学者只是对低温凝固状态下的植物绝缘油绝缘强度及植物绝缘油变压器低温冷态启动方面进行了初步的研究<sup>[17-19]</sup>, 并没有切实有效的方法来改善植物绝缘油的低温特性。

植物绝缘油中, 组成甘油三酯的脂肪酸碳链长度、饱和程度、键的构型及脂肪酸在甘油三酯中的分布情况不同, 甘油三酯的理化性质也不同。在一定的低温条件下, 利用不同甘油三酯倾点及溶解度的不同, 采用冷冻结晶的方法将倾点相差较大的固态脂和液态油分离即结晶分提<sup>[20-22]</sup>, 可改善植物绝缘油的低温流动性。

本文采用结晶分提工艺去除植物绝缘油 (大豆绝缘油) 中的部分高熔点甘油酯, 并结合降凝剂, 有效降低植物绝缘油的倾点, 为植物绝缘油变压器在低温条件下的冷态启动与安全运行提供保障, 进一步扩大植物绝缘油变压器的应用条件和应用范围。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

植物绝缘油 (大豆绝缘油), 其主要参数如表 1 所示。氢氧化钾、异丙醇、邻苯二甲酸氢钾、石油醚等, 均为分析纯; 聚  $\alpha$  烯烃、聚甲基丙烯酸酯和丙烯酸酯高聚物, 市售。

表 1 植物绝缘油主要性能参数

主要参数	结果
倾点/ $^{\circ}\text{C}$	-12.5
水分/(mg/kg)	18.5
酸值(KOH)/(mg/g)	0.017 5
介质损耗因数(90 $^{\circ}\text{C}$ )/%	0.426
击穿电压/kV	87

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 主要参数测定

酸值按照 IEC 62021 - 3《Insulating liquids - Determination of acidity - Part 3: Test methods for non - mineral insulating oils》进行测定; 水分按照 NB/T 42140—2017《绝缘液体 油浸纸及油浸纸板 用卡尔费休自动电量滴定法测定水分》进行测定; 击穿电压按照 GB/T 507—2002《绝缘油击穿电压测定法》进行测定; 介质损耗因数按照 GB/T 5654—2007《液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量》进行测定; 倾点按照 GB/T 3535—2006《石油产品倾点测定法》进行测定。

#### 1.2.2 结晶分提工艺

在 50 r/min 和  $-0.096\text{ MPa}$  的真空条件下, 将植物绝缘油加热至  $65 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 持续搅拌 30 min 后将搅拌速度降至 30 r/min, 并将植物绝缘油冷却至  $22 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 持续搅拌 60 min; 将冷却介质与植物绝缘油之间的温差维持在  $8 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在较低的搅拌速度下将植物绝缘油常压冷却至  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 持续 8 h; 降低冷却介质与植物绝缘油之间的温差至  $3 \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 将植物绝缘油常压冷却至  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 恒温搅拌 12 h 后进行恒温过滤。

#### 1.2.3 降凝剂试验

在 40 ~ 50 r/min 和  $-0.096 \sim -0.1\text{ MPa}$  真空条件下, 将结晶分提工艺优化处理后的植物绝缘油加热至  $75 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 搅拌 15 min 后加入降凝剂, 并进行间歇式短时超声分散处理, 持续搅拌 50 ~ 60 min 后真空冷却至室温, 测定低温性能指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 结晶分提工艺对植物绝缘油低温性能的影响

按照 1.2.2 的方法, 在其他条件不变的情况下, 通过调整养晶过程中的搅拌速度来优化结晶分提的

效果。不同搅拌速度下得到的植物绝缘油主要性能参数如表2所示。

表2 低温养晶过程中搅拌速度对植物绝缘油性能参数的影响

搅拌速度/ (r/min)	倾点/°C	酸值(KOH)/ (mg/g)	介质损耗因数 (90°C)/%
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

由表2可以看出,在不影响植物绝缘油原有性能的基础上,结晶分提可有效降低植物绝缘油的倾点,且倾点随着低温养晶过程中搅拌速度的降低呈先降低后上升的趋势。当搅拌速度为5 r/min时,植物绝缘油倾点达到-19.5°C。

低温养晶过程中,植物绝缘油运动黏度过高,绝缘油与形成的晶体表面之间的传质比较困难,且晶体生长速率缓慢,因此需要通过搅拌的方式来加快传质速度,保证植物绝缘油中各组分温度保持均匀

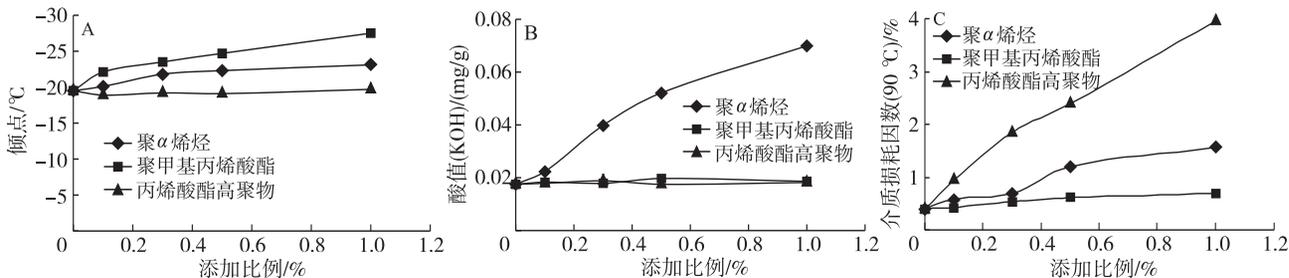


图1 不同降凝剂对植物绝缘油倾点(A)、酸值(B)和介质损耗因数(C)的影响

从图1A可知,丙烯酸酯高聚物的添加并不能改善植物绝缘油的低温性能。聚 $\alpha$ 烯烃和聚甲基丙烯酸酯具有较好的降凝效果,且随着添加比例的增加,倾点呈明显下降趋势。聚甲基丙烯酸酯添加比例为1%时,可将植物绝缘油倾点降至-26.3°C,降凝效果明显优于聚 $\alpha$ 烯烃。

由图1B可知,聚甲基丙烯酸酯和丙烯酸酯高聚物的添加对植物绝缘油酸值几乎没有影响,但是随着聚 $\alpha$ 烯烃添加比例的增加,植物绝缘油酸值呈明显上升趋势。当聚 $\alpha$ 烯烃添加比例为1%时,植物绝缘油酸值(KOH)达到了0.07 mg/g,已无法满足 IEC 62770、DL/T 1811—2018 及 NB/T 10199—2019 等植物绝缘油标准的技术要求(标准要求酸值(KOH)  $\leq$  0.06 mg/g)。

由图1C可知,植物绝缘油介质损耗因数随着降凝剂添加比例的增加整体呈现上升趋势。聚甲基丙烯酸酯添加比例为1%时,植物绝缘油介质损耗因数上升至0.698%;聚 $\alpha$ 烯烃添加比例为1%时,介质损

耗因数达到了1.57%。丙烯酸酯高聚物对植物绝缘油介质损耗因数的影响最大,当其添加比例为0.5%时,介质损耗因数从结晶分提后的0.409%上升至2.394%,添加比例为1%时,介质损耗因数高达3.96%。可见,丙烯酸酯高聚物不仅不具有降凝效果,而且还会降低植物绝缘油的电气绝缘性能。

此外,结晶分提前将植物绝缘油加热至65~70°C,破坏了植物绝缘油在精炼、储存和运输过程中由于油温低于高熔点甘油酯的凝固点而析出的不均匀、不规则晶体,避免了植物绝缘油进入低温结晶阶段后晶体自身产生缺陷,有效提高结晶分提的效果<sup>[20,23-24]</sup>。

## 2.2 降凝剂对植物绝缘油低温性能的影响

按照1.2.3的方法,考察不同降凝剂添加比例对植物绝缘油倾点、酸值和介质损耗因数的影响,结果见图1。

耗因数达到了1.57%。丙烯酸酯高聚物对植物绝缘油介质损耗因数的影响最大,当其添加比例为0.5%时,介质损耗因数从结晶分提后的0.409%上升至2.394%,添加比例为1%时,介质损耗因数高达3.96%。可见,丙烯酸酯高聚物不仅不具有降凝效果,而且还会降低植物绝缘油的电气绝缘性能。

## 3 结论

(1)在不影响植物绝缘油原有性能的基础上,结晶分提工艺可以大大降低植物绝缘油中高熔点甘油三酯含量,有效改善植物绝缘油的低温特性。低温养晶过程中搅拌速度为5 r/min时,植物绝缘油倾点可降低至-19.5°C。

(2)丙烯酸酯高聚物不具有降凝效果,而且还会降低植物绝缘油的电气绝缘性能。聚甲基丙烯酸酯降凝效果优于聚 $\alpha$ 烯烃,添加比例为1%时可将结晶分提优化处理后的植物绝缘油倾点降至-26.3°C,且能保持良好的理化、电气绝缘性能,完全满足植物绝缘油在我国大部分地区的应用需求。

## 参考文献:

- [1] 任佳,符雪鹏,王巍,等.天然酯绝缘油的发展历程、性能及展望[J].摩擦学学报,2020,40(1):135-142.
- [2] 杨涛,张小勇,王天,等.新型高燃点环保型液体绝缘介质——植物绝缘油[J].中国油脂,2016,41(11):41-45.
- [3] KUMAR S S, IRUTHAYARAJAN M W, BAKRUTHEEN M. Analysis of vegetable liquid insulating medium for applications in high voltage transformers [C]//IEEE International Conference on Science, Engineering and Management Research Chennai. India: IEEE,2014:1-5.
- [4] 袁飞,李沐,王华兴,等.天然酯绝缘油的基础特性及其应用研究[J].中国油脂,2020,45(6):58-61,68.
- [5] 张重远,范名琳,赵涛,等.纤维素颗粒和水分对天然酯绝缘性能影响试验研究[J].华北电力大学学报,2020,47(3):41-48.
- [6] 杨涛,寇晓适,潘浩伟,等.热故障下天然酯绝缘油中溶解气体分析[J].绝缘材料,2018,51(3):74-78.
- [7] 杨涛,王吉,王震宇,等.传统矿物绝缘油配电变压器直接更换天然酯绝缘油可行性研究[J].绝缘材料,2018,51(2):39-43.
- [8] 杨涛,张慧,景冬冬,等.脱酸方式对天然酯绝缘油性能的影响[J].绝缘材料,2017,50(3):54-56.
- [9] 蔡胜伟,李华强,黄芝强,等.天然酯绝缘油变压器技术发展及应用概况[J].绝缘材料,2019,52(11):9-16.
- [10] 国内首款 220 kV 天然酯绝缘油变压器诞生[EB/OL]. (2019-08-27)[2020-10-28]. [http://shsjb.com/sjb/html/2019-08/27/content\\_54300.html](http://shsjb.com/sjb/html/2019-08/27/content_54300.html).
- [11] 王普照,段庆华.植物油制备可生物降解基础油的工艺现状及展望[J].石油商技,2016,34(6):10-19.
- [12] 刘宣池.对植物油基基础油倾点改进的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2016.
- [13] 杨超.生物柴油低温流动性及其改进研究[D].上海:上海应用技术大学,2016.
- [14] 寇凌峰,王金丽,宋祺鹏,等.不同混合绝缘油性能的试验研究[J].绝缘材料,2017,50(2):76-80.
- [15] 杨涛.环保新型变压器油——植物绝缘油应用技术[M].北京:中国电力出版社,2019:151-154.
- [16] IEEE Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers: IEEE Std C57.147-2018[S]. New York:IEEE,2018.
- [17] 王珊珊,周竹君,梁嗣元.变压器用植物绝缘油的低温特性试验研究[J].电工电气,2014(12):48-50.
- [18] BIOTEMP®—Cold start procedure for distribution transformers[Z/OL][2020-10-28]. <http://www.docin.com/p-872311493.html>.
- [19] DELVECCHIO R, RAPP K J. Cold start of a 240 MVA generator step-up transformer filled with natural ester fluid[C]//Transmission & Distribution Conference & Exposition. Dallas, TX, USA:IEEE,2016.
- [20] 罗质.油脂精炼工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,2016:146-154.
- [21] 王兴国,金青哲.油脂化学[M].北京:科学出版社,2012:95-99.
- [22] 柏云爱,梁少华,刘恩礼,等.油脂改性技术研究现状及发展趋势[J].中国油脂,2011,36(12):1-6.
- [23] 王宏平,徐斌,李健.油脂分提工艺的进展与应用[J].中国油脂,2004,29(7):23-25.
- [24] 蔡丽丽,钱林.油脂分提工艺研究进展与应用[J].粮食与油脂,2006(10):22-25.
- (上接第56页)
- [40] 范进填.超临界 CO<sub>2</sub> 分离柑桔油的风味物质[J].广州食品工业科技,1989(3):23-24.
- [41] 张郁松.蚕蛹油超临界萃取与有机溶剂萃取的比较研究[J].粮油加工,2009(2):45-46.
- [42] WANG L, WU M, LIU H, et al. Subcritical fluid extraction of Chinese quince seed: optimization and product characterization[J]. Molecules, 2017, 22(4):528-543.
- [43] 谷令彪.亚临界萃取葫芦巴籽油及其籽粕的开发利用研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [44] ZHANG R, LIU H, MA Y, et al. Characterization of fragrant oil extracted from pepper seed during subcritical propane extraction[J]. LWT - Food Sci Technol, 2019, 110:110-116.
- [45] 吕斌杰.亚临界低温萃取浓香型辣椒籽油及产香机理研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [46] 苏晓霞,郭斐,黄一珍,等.精炼过程对菜籽油风味成分的影响[J].中国油脂,2019,44(3):41-47.
- [47] 王笑园,宋章弈,张延琦,等.精炼过程对亚麻籽油风味物质的影响[J].食品工业科技,2016,37(18):55-59.
- [48] 谢婧,徐俐,吴浪,等.SPME-GC-MS对菜籽毛油和精炼菜籽油挥发性风味成分的分析[J].中国油脂,2012,37(8):84-87.
- [49] 李梓铭,李玉平,余佳荣,等.精炼过程对茶籽油脂肪酸与挥发性物质的影响[J].食品工业科技,2018,39(8):34-38.
- [50] 杨涓,刘昌盛,周琦,等.加工工艺对菜籽油主要挥发性风味成分的影响[J].中国油料作物学报,2010,32(4):551-557.
- [51] 张盛阳,孙建军,杜京京,等.冷冻凝香工艺对菜籽油品质及主要挥发性风味成分的影响[J].安徽农业科学,2017,45(29):65-67,71.
- [52] ZHANG N, SUN B, MAO X, et al. Flavor formation in frying process of green onion (*Allium fistulosum* L.) deep-fried oil[J]. Food Res Int, 2019, 121:296-306.