

天然酯绝缘油改性的研究进展

韩丹丹, 邹梦, 张亮, 赵举, 潘好伟, 胡自书
(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:天然酯绝缘油具有较高的燃点和闪点、优异的天然降解能力和良好的绝缘性能,是矿物绝缘油的绿色替代品。由于其自身的理化特性,将其应用于变电设备还面临着很多挑战。本文综述了天然酯绝缘油的制备工艺,结合天然酯绝缘油的不足之处,从添加剂改性、混合改性、纳米改性及化学改性等方面阐述了天然酯绝缘油的研究成果,并对未来的研究方向进行了展望。

关键词:绝缘油;天然酯绝缘油;改性

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)04-0008-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.04.002

Research Progress in Modification of Natural Ester Insulating Oil

HAN Dandan, ZOU Meng, ZHANG Liang, ZHAO Ju, PAN Haowei, HU Zishu
(Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.,
Urumqi 830011, China)

Abstract: Natural ester insulating oil has higher ignition point and flash point, excellent natural degradation ability and good insulation performance, and it is a green substitute for mineral insulating oil. Due to the physical and chemical characteristics of natural ester insulating oil, it is still facing many challenges to widely used in transformer equipment. In this paper, the preparation process of natural ester insulating oil was reviewed combining with its shortcomings. The research results of natural ester insulating oil were expounded from the aspects of additive modification, mixed modification, nano modification, and chemical modification. Finally, the future research direction was prospected.

Key words: insulating oil; natural ester insulating oil; modification

0 引言

绝缘油是一种液体绝缘介质,被广泛应用于各种电气设备如变压器、断路器、互感器、套管等中,起到绝缘、冷却散热和灭弧的作用,为电气设备的安全运行提供了有效保障。随着可持续发展战略的提出,公众的环保意识也越来越高。目前,我国每年消耗的矿物绝缘油高达60万吨,由于矿物绝缘油降解性差、容易造成水体污染,废弃绝缘油中含有硫、磷、氯及重金属等有毒有害物质,对环境造成了不可计量的污染。与此同时,石油资源也日益枯竭,因此寻找一种环境友好、可再生的绝缘液体来代替矿物绝缘油是亟待解决的问题。

天然酯绝缘油是一种可再生资源,具有生物降解性强的优点,生物降解率高达97%~99%^[1]。在矿物绝缘油开发的同时,天然酯绝缘油就受到过关注。虽然天然酯绝缘油具有与矿物绝缘油相当的电气性能,但是存在成本高、凝点高、运动黏度大、氧化安定性差的缺点^[2-3],因此在用作液体绝缘介质方面受到一定限制。如何使天然酯绝缘油同时具有较高的生物降解率和优异的绝缘特性是科研人员一直研究的方向。

1 天然酯绝缘油概述

天然酯绝缘油是一种通过植物种子提炼得到的绝缘油,具有燃点高、环境友好、自然降解率高等优点^[4]。天然酯的水饱和度很高,可有效吸收绝缘纸中的水分,从而抑制绝缘纸的老化^[5-6]。我国油料作物丰富,主要油料作物及其含油量如表1所示,这

收稿日期:2020-05-22 修回日期:2020-06-20

作者简介:韩丹丹(1990-),女(汉族),新疆乌鲁木齐人,工程师,主要从事电力用油的研究。

些原料产量高、来源广泛,为天然酯绝缘油的广泛应用奠定了物质基础。表2列出了目前普遍采用的天然酯绝缘油FR3与矿物绝缘油的性能^[7],可以看出天然酯绝缘油电气性能良好,满足绝缘液体电气性能的要求;闪点很高,属于K类高燃点绝缘油,满足高防火性能的要求。

表1 我国主要油料作物及其含油量

Tab.1 Main oil crops and their oil content in China

作物种类	油菜籽	花生	大豆	葵花籽	山茶籽	芝麻	棉籽
含油量/%	39~46	40~51	16~22	45~54	56~58	51~56	14~25

表2 天然酯绝缘油与矿物油性能比较

Tab.2 Performance comparison of natural ester insulating oil and mineral oil

性能参数	矿物油	FR3天然酯绝缘油
相对介电常数(25℃)	2.0~2.3	3.2
击穿电压/kV	30~80	73
凝点/℃	-25~-60	-21
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	3~16	34
燃点/℃	100~185	360
开口闪点/℃	100~170	320
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.83~0.89	0.92
导热系数/(W/(m·K))	0.11~0.16	0.167

天然酯绝缘油原料多、来源广,电气性能及防火性能优于矿物绝缘油,但是存在氧化安定性差、运动黏度大、凝点高等缺点。从分子结构方面来探讨造成其缺点的内部原因,可以为解决现实问题提供理论基础。天然酯绝缘油是饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸与甘油结合的产物,分子中存在大量的碳碳双键,容易发生烯丙基自由基反应,能够在氧化反应初期就迅速反应,并且在后续的氧化反应中起引发作用,使得其氧化安定性很差。天然酯绝缘油的分子量较大,碳链均为16个C或18个C组成的直链烃,碳链越长凝点越高,低温流动性就越差,运动黏度也越大,越难起到有效散热的作用。饱和脂肪酸性质稳定但是凝点很高,不饱和脂肪酸凝点较低但是又容易氧化^[8]。这些缺点限制了其作为绝缘液体在电力领域中的应用。

2 天然酯绝缘油的制备工艺

油料作物的种子经过萃取或压榨处理后可以得到颜色很深、杂质较多的植物油,该油经过进一步的脱胶、脱酸、脱色、脱臭等工序后就得到了纯化后的植物油,即RBD(refined, bleached, deodorized)级别的植物油。电力用油在设备中主要起到绝缘、降温、灭弧的作用,对绝缘液体的要求很高,相应检测指标达10余项。普通的RBD油中存在的少量色素、磷脂等极性大分子杂质,游离脂肪酸,水分等物质,严重影响其酸值、介质损耗因数、水分含量等指标^[9]。因此,还需对RBD油进行精炼才能用作电力行业的绝缘冷却介质。

精炼是在RBD油基础上再进行吸附、脱酸、脱水等工序。对植物油进行吸附处理可有效吸附油中的胶状物质、水分、酸性组分等,使植物油的颜色、酸值得到明显改善,之后进行脱酸处理使天然酯绝缘油中的酸性物质含量降低到标准要求之下,再对天然酯绝缘油进行脱水处理即可得到满足使用要求的绝缘油。

电力用油中常用的吸附剂有白土、铝矾土、水矾土、硅胶、硅铝胶、活性炭、氧化铝等,其中最常用的是白土。诸红玉等^[10]采用活性白土对废油进行吸附处理,在最佳的吸附条件下,活性白土吸附再生后油品酸值下降了0.20 mgKOH/g。

脱酸处理可以有效降低油中的游离脂肪酸含量和极性杂质^[11]。杨涛等^[12]对转基因一级大豆油进行了物理脱酸和化学脱酸处理,并对两种脱酸方式对天然酯绝缘油性能的影响进行了研究。结果表明物理脱酸虽然可以有效去除天然酯绝缘油中的游离脂肪酸,但是在加热处理环节会使天然酯绝缘油发生热聚合反应生成一些极性聚合物,或者发生热分解反应生成一些极性小分子物质,严重影响天然酯绝缘油的绝缘性能。化学脱酸方式可以有效降低天然酯绝缘油中游离脂肪酸及极性杂质含量,通过化学脱酸方式,天然酯绝缘油的理化、电气绝缘性能可得到有效的改善。

胡婷等^[13]以大豆油和菜籽油为原料,对炼碱工艺进行了优化,结果表明加碱量为理论量的2~3倍时,炼碱效果最佳,在加入氢氧化钠溶液的同时加入少量的硅酸钠可有效提高静置效果,一次水洗就可以达到脱色含皂量的要求,且可提高成品油的电气性能。

传统利用氢氧化钠降低酸值的方法,存在易使

天然酯绝缘油皂化、后处理时间长、产生的废液污染环境等问题。付伯桥等^[14]使用碱性氧化铝降低植物绝缘油的酸值,通过对碱性氧化铝的用量、反应温度、反应时间等进行系统的研究,提出了合理的处理条件,证实了该方法能够达到降低酸值的目的,并具有无皂化、反应时间短及后处理操作简单的优点。

经过精炼后的植物油,其部分指标得到改善,以大豆油为例,精炼后其主要技术指标如表3所示^[15]。从表3可以看出,精炼后天然酯绝缘油的电气性能得到较大改善,水分和酸值大幅降低,能够达到矿物绝缘油的指标,但是运动黏度和凝点依旧改观不大。

表3 大豆油精炼前后主要性能比较

Tab.3 Comparison of main properties of soybean oil before and after refined

性能参数	大豆油		矿物绝缘油
	精炼前	精炼后	
外观	黄色	浅黄色、透明、无杂质	透明、无杂质
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	33.24	32.52	≤13
凝点/℃	-9	-10	≤-22
闪点(闭口)/℃	228	230	≥135
水分含量/(mg/kg)	299	<10	≤50
酸值/(mgKOH/g)	0.125	0.020	<0.03
击穿电压(间距为2.5 mm)/kV	26.0	60.4	≥60
介质损耗因数(90℃)	1.086 0	0.002 3	≤0.005 0
相对介电常数	2.816	2.800	—
体积电阻率(90℃)/(×10 ¹⁰ Ω·m)	1.76	8.66	≥6

3 天然酯绝缘油改性方法

3.1 添加剂改性

通过深度纯化后的天然酯绝缘油虽然电气性能等能够达到使用标准,但是依然具有较高的凝点和运动黏度,抗氧化性能也较差,且不能再通过更深度的纯化得到改善^[16]。为使天然酯绝缘油得到应用,可以向油中加入适当的添加剂,常用的添加剂有抗氧化剂、钝化剂、降凝剂等。目前已商业化的天然酯绝缘油如 Cargill 公司的 Envirotemp FR3,

ABB 公司的 BIOTEMP 及 M&I 公司的 MIDEL 等均添加了部分添加剂^[17]。

抗氧化剂是一种能够阻止或者延缓氧化过程的添加剂,起到消除氧化过程产生的自由基、分解过氧化物中间体的作用。在植物油和矿物油中广泛使用的抗氧化剂有 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)、生育酚(维生素 E)、叔丁基对苯二酚(TBHQ)等。绝缘油的抗氧化性能是其在变压器中能否长期稳定运行的决定性因素。吴俐亚^[18]研究了乙酯化植物绝缘油的抗氧化剂复配方法,结果表明向乙酯化植物绝缘油中添加适当的抗氧化剂能够有效提高其抗氧化性能,并且使用复配的添加剂能更好地抑制氧化。酚类抗氧化剂对乙酯化植物绝缘油的抗氧化性能有较好的提升效果,在老化后期向乙酯化天然酯绝缘油中添加复配抗氧化剂,油样的介质损耗因数较空白油样降低了 44.1%。

降凝剂是通过破坏油品中石蜡的结晶过程达到降凝效果的添加剂。其作用机理主要有吸附机理、混晶机理和晶核作用机理。商业化的降凝剂主要有聚甲基丙烯酸酯型、聚 α -烯烃型、烷基萘型。余辉^[19]考察了聚甲基丙烯酸酯(PMA)型降凝剂 PPD150 对 4 种纯化植物油的降凝效果。结果表明加入 0.5% 的 PPD150 可使大豆油基天然酯绝缘油的凝点降到-10℃ 以下,菜籽油基天然酯绝缘油的凝点最低可降至-28℃。

3.2 混合改性

用于变压器的绝缘液体种类很多,如聚氯联苯、硅油、合成酯、天然酯等,不同种类绝缘油的理化性质也有所差别。混合改性是指不同种类的绝缘油按照一定的方式及比例混合,组成新的混合绝缘油,通过这种方式达到扬长避短,改善单一油种某方面性能的目的。

郝建等^[20]研制了一种矿物油-天然酯混合绝缘油,通过一系列试验,证明了混合绝缘油的抗老化性能优于矿物绝缘油且能够有效抑制绝缘纸的老化。天然酯的酯基能够通过氢键束缚水分子,减弱水分对绝缘油和绝缘纸的催化加速老化作用,天然酯水解生成的脂肪酸能够与绝缘纸纤维素上的羟基发生酯化反应,对绝缘纸起到保护作用。混合油-纸绝缘的热稳定性优于矿物油-纸绝缘,能够承受变压器运行过程中长期热应力的作用。

廖瑞金等^[21]将橄榄油与矿物油进行混合,再经特殊处理制成了一种新型绝缘油,通过试验证明了

矿物油和橄榄油能够混合均匀且保持长期稳定,其理化及电气性能指标均能满足 GB 2536—1990 的要求且击穿电压值远高于矿物绝缘油,在不同温度下的运动黏度和矿物油几乎相当,氧化安定性和生物降解性也均优于矿物绝缘油。

余辉^[19]在对 4 种植物油进行甲酯化研究的基础上,通过控制反应转化率制备出目标转化率的部分甲酯化天然酯绝缘油产品,即混酯。通过部分甲酯化,使植物基绝缘油的基本物理性能具备了可调控性,以满足不同场合的需求。

3.3 纳米改性

天然酯绝缘油由于运动黏度大而影响散热能力,可以通过两种途径来解决:①降低天然酯绝缘油的运动黏度,从而增大流动速度,达到为设备降温的目的;②提高天然酯绝缘油的导热性能来弥补其散热能力不足的缺点。当物质到达纳米尺度(0.1~10 nm)后,其性能会发生突变,表现出特殊的性能^[22]。纳米改性技术因能提高传统材料的导热性能而得到广泛应用^[23-24]。

为解决天然酯绝缘油在实际应用中存在的不足,人们将目光锁定在纳米改性方向^[25-26]。目前对纳米改性天然酯绝缘油的研究主要集中在制备方法,稳定性,改变介电性能、工频击穿与直流击穿特性、雷电击穿特性、流注放电特性、击穿机理以及导热特性等方面。

纳米改性天然酯绝缘油的长期稳定是保证其得到广泛应用的基础。姚伟^[27]采用液相剥离法制备出纳米氮化硼并用其改性植物绝缘油,通过试验证实制备的纳米改性油具有良好的分散稳定性,在纳米氮化硼含量为 0.1% 时,击穿电压在 25℃ 时增大 18%,在 90℃ 时增大 15%,此外,通过纳米改性的绝缘油热导率也得到了提高。从以上研究及结论可以看出纳米改性油比纯天然酯绝缘油具有更好的导热性能和电气性能。

杜斌^[28]利用高温分解法制备了具有不同粒径的单分散 Fe_3O_4 纳米粒子及与之对应的纳米天然酯绝缘油,并建立了纳米绝缘油热导率的计算模型。通过一系列试验,得出随着纳米粒子粒径的增加,纳米改性油和油纸绝缘的击穿电压显著提高, Fe_3O_4 纳米粒子对油浸绝缘纸的绝缘性能也有所改善;纳米粒子粒径的增加会显著抑制空间电荷密度和降低纳米绝缘油的离子迁移率。表面活性剂的厚度、粒径、类固层厚度均能够对纳米改性绝缘油的热导率

产生影响。

3.4 化学改性

天然酯绝缘油的主要成分是脂肪酸甘油三酯,还含有种类繁多但是含量很少的类脂,平均相对分子质量为 800~1 000。天然酯绝缘油中约 80% 是油酸和亚油酸,存在大量的不饱和双键,双键非常活泼,在空气中就能够发生氧化,因此天然酯绝缘油的氧化安定性差;大分子长烷基链间的相互作用使得天然酯绝缘油的运动黏度大、凝点高,降低了其作为绝缘液体的散热作用,也限制了其在低温地区的使用。通过对天然酯分子结构进行改造,可以弥补天然酯绝缘油的缺点。常用的化学改性方法有氢化、酯交换和环氧化改性,得到的绝缘液体称为植物油衍生物。

氢化反应是在高温高压的条件下,天然酯绝缘油中的碳碳双键与氢气反应,是双键饱和的过程。虽然碳碳双键的减少能够提高油品的抗氧化性,但会使油品的低温性能变得更差。选择性氢化对于该问题有非常重要的意义。B NOHAIR 等^[29]在 40℃、1 MPa 下对葵花籽油进行选择性的氢化,对比含 Pt、Pd、Ru 的催化剂,发现含 Pd 的催化剂催化活性最好。通过使用掺杂 Cu 和 Pb 的多金属催化剂,油酸酯在氢化过程中获得了高的选择性。

环氧化反应是在双键两端碳原子间加上原子氧,形成三元环的氧化反应。研究发现,利用过氧甲酸环氧化菜籽油,可使油品的氧化稳定性显著增强。H S HWANG 等^[30]利用环氧化后的大豆油与各种直链和支链醇进行开环反应,再将所得的羟基酰化,使植物油的氧化稳定性得到了一定改善,通过引入支链和加入降凝剂,显著降低了倾点。

酯交换反应是酯与醇、酸、酯(不同的酯)在酸或碱的催化下生成一个新酯和一个新醇、酸、酯的反应。天然酯通过酯交换反应,可以得到相对分子质量较小的单脂肪酸酯,大幅降低天然酯绝缘油的运动黏度,提高其流动性,使天然酯绝缘油具备良好的散热效果^[31-32]。蔡胜伟等^[33]用花生油、菜籽油、大豆油、棉籽油与甲醇、乙醇、丙醇、异丙醇、丁醇、异丁醇和叔丁醇等低分子醇进行酯交换反应合成了一系列酯油,发现精炼油与酯交换后的植物绝缘油微水、闪点、酸值、击穿电压和界面张力等指标能够达到国标要求。经过酯交换反应后,分子量大的脂肪酸甘油三酯转换成了分子量较小的单脂肪酸酯,因此运动黏度比精炼油得到了较大程度的降

低,且制备的天然酯绝缘油与变压器内部的绝缘材料有较好的相容性,没有出现关键参数异常的现象。但是因双键还存在,且分子链很长,故该系列酯油的氧化安定性、低温特性并未得到改善,可以通过添加适当的添加剂对这两项指标加以改进。

4 结束语

对天然酯绝缘油的研究已有多多年,商业化的天然酯绝缘油产品在倾点、运动黏度等指标上与矿物绝缘油还存在一定差距,归纳如下:

首先,通过深度纯化的绝缘油还需加入多种添加剂以满足使用性能。添加抗氧化剂、降凝剂等可以改善天然酯绝缘油的稳定性和凝点等理化指标,而将部分添加剂复配使用能够起到协同作用,达到更好的改性效果。因此,适合天然酯绝缘油的添加剂及各类添加剂的复配使用是一个值得关注的研究领域,也是研制性能更加优异的天然酯绝缘油产品的有效途径之一。

其次,混合改性天然酯绝缘油的性能与各油品有关,混合方式也多种多样,天然酯绝缘油与矿物绝缘油相混合,使用性能虽可以满足要求,但是生物降解性能不如纯天然酯绝缘油。而天然酯绝缘油与部分改性天然酯绝缘油相混合得到的混酯,各使用性能虽有一定改善,但是想具有矿物绝缘油这般优异的使用性能,所做工作还有许多。

再次,纳米改性天然酯绝缘油是目前研究的方向之一。通过向天然酯绝缘油中加入纳米粒子,可达到不改变天然酯绝缘油的分子结构而解决设备的散热问题。但是,在实际使用中存在的电、磁、热以及油中的杂质是否会使油中的纳米粒子发生团聚以及纳米粒子分布是否均匀是有待核实的问题。同时,随着纳米改性技术越发成熟,有必要提出低成本纳米粒子批量生产工艺,为纳米改性天然酯绝缘油的广泛应用奠定良好的基础。

最后,通过化学改性制备低运动黏度、低凝点、低介质损耗因数的天然酯绝缘油是解决天然酯绝缘油在实际应用中存在问题的方法之一。通过化学方法对天然酯绝缘油进行分子修饰,控制甘油三酯分子链长和不饱和双键的数量,使天然酯绝缘油的推广应用成为可能。但通过该方法使天然酯绝缘油的运动黏度、凝点、介质损耗因数降低的同时而不降低其闪点和燃点是该领域研究的难点之一。同时,化学改性所需催化剂的研制也是一个难点。

天然酯绝缘油虽具有优异的生物降解性,但是在精炼处理后还不能达到使用条件,需要对其进行改性处理。目前已商业化的天然酯绝缘油均是通过添加各种添加剂来达到使用要求。虽然通过化学改性、纳米改性及混合改性有望提高天然酯绝缘油的使用性能,但还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘光祺,钟力生,于钦学,等. 植物绝缘油研究现状[J]. 绝缘材料, 2012,45(3):34-39.
- [2] 邓小聘,李松江,胡婷,等. 变压器用植物绝缘油的研究进展[J]. 绝缘材料,2019,52(11):25-30.
- [3] 张涛,肖霞,杨文雁,等. 变压器用天然酯绝缘油研究现状[J]. 中国油脂,2019,44(4):66-71.
- [4] 李晓虎,李剑,孙才新,等. 植物油-纸绝缘的电老化寿命试验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):18-22.
- [5] 宋浩永,陈于晴,黄青丹,等. 植物绝缘油变压器不同油纸绝缘组合老化水分含量研究[J]. 绝缘材料,2019,52(6):43-50.
- [6] 凡勇,胡婷,周竹君,等. 植物绝缘油-纸板与矿物油-纸板的加速热老化寿命对比研究[J]. 绝缘材料,2014,47(4):105-109.
- [7] FEIL D L P, SILVA P R, BERNARDON D P, et al. Development of an efficient distribution transformer using amorphous core and vegetable insulating oil[J]. Electric Power Systems Research, 2017,144:268-279.
- [8] 陈朋,余辉,陈江波,等. 植物绝缘油主要组分的理化与电气性能研究[J]. 绝缘材料,2014,47(3):45-49.
- [9] 杨涛,寇晓适,张小勇,等. 间歇式植物绝缘油精炼工艺探讨[J]. 中国油脂,2016,41(12):73-75.
- [10] 诸红玉,吴佳妮,翟翔,等. 废汽轮机油的吸附处理[J]. 中国西部科技,2011,10(1):6-7.
- [11] 陶长元,黄晶,杜军,等. 降低植物型变压器油酸值的研究[J]. 绝缘材料,2005,38(5):15-18.
- [12] 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):54-61.
- [13] 胡婷,吴义华,周竹君,等. 植物绝缘油碱炼工艺的优化[J]. 绝缘材料,2012,45(4):60-63.
- [14] 付伯桥,任乔林,肖洒,等. 运用碱性氧化铝降低植物绝缘油酸值研究[J]. 湖北工程学院学报,2018,38(6):5-8.
- [15] 刘格霞,陈江波,余辉,等. 大豆绝缘油的制备与性能研究[J]. 可再生能源,2012,30(10):61-66.
- [16] 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.
- [17] 项阳. 浅谈植物绝缘油变压器[J]. 变压器,2014,51(12):23-27.
- [18] 吴刚亚. 乙酯化植物绝缘油及其介电性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [19] 余辉. 植物基绝缘油的制备以及相关性能的研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [20] 郝建,杨丽君,廖瑞金,等. 混合绝缘油对油-纸绝缘热老化速率的延缓原因分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):120-126.
- [21] 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.
- [22] 张召涛. 植物绝缘油中特征气体及油纸吸湿特性与纳米粒子分散稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [23] YAO Wei, HUANG Zhengyong, LI Jian, et al. Enhanced electrical insulation and heat transfer performance of vegetable oil based nanofluids[J]. *Journal of Nanomaterials*,2018(7):1-12.
- [24] 王寿泰. 纳米绝缘材料[J]. *绝缘材料*,2001,34(3):13-17.
- [25] CHOI C, YOO H S, OH J M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants[J]. *Current Applied Physics*,2008,8(6):710-712.
- [26] TIMOFEEVA E V, MORAVEK M R, SINGH D. Improving the heat transfer efficiency of synthetic oil with silica nanoparticles [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*,2011,364(1):71-79.
- [27] 姚伟. 纳米氮化硼改性植物绝缘油及其导热与绝缘性能研究 [D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [28] 杜斌. 单分散四氧化三铁纳米植物绝缘油制备方法及介电与导热性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [29] NOHAIR B, ESPECEL C, MARECOT P, et al. Selective hydrogenation of sunflower oil over supported precious metals[J]. *Comptes Rendus Chimie*,2004,7(2):113-118.
- [30] HWANG H S, ERHAN S Z. Modification of epoxidized soybean oil for lubricant formulations with improved oxidative stability and low pour point[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*,2001,78(12):1179-1184.
- [31] YU Hui, YU Ping, LUO Yunbai. Renewable low-viscosity dielectrics based on vegetable oil methyl esters[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*,2017,12(2):820-829.
- [32] RAO N A, RASHID U, YUNUS R, et al. Development of palm-based neopentyl glycol diester as dielectric fluid and its thermal aging performance[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2016,23(4):2051-2058.
- [33] 蔡胜伟,陈江波,梁云丹,等. 植物绝缘油的性能改进及试验考核研究[J]. *变压器*,2013,50(12):58-62.