

DOI: 10.16078/j.tribology.2019087

天然酯绝缘油的发展历程、性能及展望

任佳^{1,3}, 符雪鹏², 王巍², 王晓波^{1*}, 刘维民¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 辽宁 沈阳 110144;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 天然酯绝缘油兼具了环保、消防安全两大优势, 是当前变压器绝缘油研究与应用的热点. 本文中简要回顾了绝缘油及天然酯绝缘油的技术以及国内外行业标准的发展进程; 介绍了天然酯用作变压器绝缘油的黏度、倾点、水含量、酸值和氧化安定性等理化性能, 以及材料相容性、电气绝缘指标、气体溶解和绝缘纸板特性等电气性能, 分析了天然酯绝缘油的各项性能优势及存在的问题; 展望了天然酯的发展前景并对后续的研究方向提出了建议.

关键词: 变压器; 天然酯; 高燃点; 植物油; 可生物降解性

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2020)01-0135-08

Development, Performance and Prospect of Natural Ester Insulating Oil

REN Jia^{1,3}, FU Xuepeng², WANG Wei², WANG Xiaobo^{1*}, LIU Weimin¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China

2. TBEA Shenyang Transformer Group Co., Ltd, Liaoning Shenyang 110144, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Natural ester insulating oil, with advantages of environmental protection and fire safety, is a recent hot topic as transformer insulating oil for both research and application. This paper introduces insulating oils and natural ester, reviews the technical development and international industrial standards of natural ester insulating oil. Evaluation is made regarding physical and chemical properties (viscosity, pour point, water content, acid number, oxidation stability), electrical properties (material compatibility, dielectrical property, oil dissolved gases, Kraft paper), and advantages of natural ester and its technical problems and commercial barriers. In the end, prospect of natural ester as transformer insulating oil and further directions of research are discussed.

Key words: transformer; natural ester; high fire point; vegetable oil; biodegradability

绝缘油的主要作用是绝缘和散热. 目前我国变压器绝缘油的年消耗量接近60万吨, 占润滑油年总消耗量的10%. 万吨级规模的变压器废油回收以及大量存在的变压器漏油, 会造成环境污染^[1-2]. 近年来, 由变压器故障引发的起火爆炸事故频发, 引发了业内对高燃点绝缘油的关注. 天然酯作为变压器绝缘油兼具了环保、消防安全两大优势, 是当前变压器可再生资源研究的热点课题^[3]. 本文作者综述了四大类变压器绝缘

油及其特点, 总结了天然酯的发展历程和国内外天然酯变压器的最新标准, 综合评价了天然酯的理化、电气特性.

1 天然酯的发展历程

1.1 变压器绝缘油概述

变压器绝缘油根据基础油的种类划分, 包括矿物油、硅油、合成酯和天然酯(俗称植物油)四大类^[4]. 矿

物绝缘油技术成熟, 广泛应用于油浸式变压器. 石蜡基矿物油高温氧化后易形成油泥, 油品黏度上升, 降低了散热和低温流动性. 为克服这一瓶颈, 开发了环烷基矿物油, 高温氧化产物易溶解, 芳香族化合物成分又具有极佳的低温流动性. 目前, 变压器行业常用的矿物绝缘油是按照最低冷态投运温度(倾点)分类的10号、25号、45号油.

硅油绝缘油的热稳定性、氧化安定性优异, 早期是为了取代有毒的多氯联苯(PCB)而应用在有宽温域要求的变压器上. 硅油的黏度系数高、价格昂贵、不环保, 因而目前不具备广泛推广的市场价值.

合成酯绝缘油基本成分为季戊四醇酯, 具有燃点高、易降解、耐湿性好、抗氧化、低温性能优异等优势, 在小型配电变压器、海上风电等领域, 已经具备了商业化推广的基础, 但在装油量较大的电力变压器领域, 其相对矿物绝缘油较高的价格仍然是难以逾越的门槛.

天然酯是一种可再生资源, 生物降解性强, 其甘油三酯化学结构中甘油的三个羟基被不同的脂肪酸酯化, 属于K类高燃点变压器绝缘油, 燃点可达360 ℃, 可燃性小且具备一定自熄功能. 电气性能方面, 天然酯绝缘油热老化后击穿电压强度优于矿物绝缘油^[5]. 天然酯是天然植物产物, 不含硫元素, 不会与变压器中的金属铜发生反应而改变电场强度, 因而也降低了设备故障风险^[6]. 然而, 天然酯的黏度高, 接触空气易氧化, 给变压器的冷却和密封带来了困难. 目前, 天然酯绝缘油全球已累计装机超过200万台.

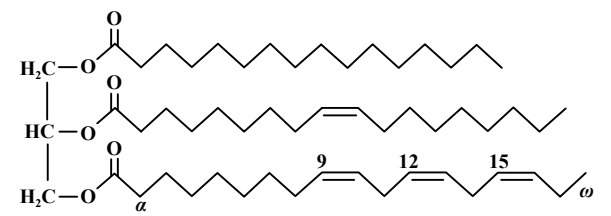


Fig. 1 Triglyceride with three different fatty acids
图 1 三种不同脂肪酸的甘油三酯结构图

1.2 天然酯绝缘油的产品发展历程

上世纪90年代初, 各国研究机构开始关注天然酯绝缘油. 1993年, 研究发现高比例的不饱和脂肪酸可改进天然酯的低温流动性, 而高比例的饱和脂肪酸能改善天然酯的氧化安定性. 两者适当比例的调和, 可优化天然酯的综合性能^[7]. 1994年, 天然酯抗氧剂的研发成功, 大大改进了天然酯的氧化安定性. 1996年, 美国制造了第一台225 kVA的天然酯箱式变压器样机^[1].

1999年, 瑞典ABB公司的BIOTEMP[®]天然酯绝缘油顺利完成变压器在-37 ℃的冷启动. 日本在2002年成功将棕榈油(PFAE)应用在77 kV电压等级变压器上. 2014年, 德国西门子投运了全球第一台420 kV天然酯电力变压器, 运行状况良好. 天然酯绝缘油直接替换传统矿物绝缘油变压器的变压器维保领域, McShane等^[8]发现, 一台三相50 MVA变压器, 天然酯替换矿物油后, 检测到绝缘纸水含量下降明显. Stockton等^[9]也得出了类似结论, 天然酯绝缘油替换过程中, 残余的矿物绝缘油与天然酯绝缘油之间也是兼容的, 不影响变压器正常运行.

我国也在近年开展了天然酯变压器的可行性研究. 一台运行矿物绝缘油的10 kV配电变压器, 替换天然酯绝缘油后, 噪声下降了1.5 dB^[10]. 陕西水利电力研究院论证了35 kV天然酯变压器的低温表现^[11]. 2017年国内首台110 kV电力变压器在广州挂网运行.

当今主流的变压器天然酯绝缘油有三大农作物来源: 棕榈油、大豆油、菜籽油. 棕榈油作为变压器天然酯绝缘油的最大优势是其饱和脂肪酸含量高, 使得氧化安定性远远高于大豆油和菜籽油, 甚至超过了矿物绝缘油, 但棕榈油在常温下就有凝固趋势. 此外, 棕榈油的燃点也未能达到K类防火等级. 大豆油制备的变压器天然酯绝缘油虽然其添加剂技术已经使得大豆天然酯抗氧化能力接近不添加任何添加剂的矿物油, 但其相对较高的黏度、倾点以及暴露空气下的高速氧化, 使得大豆天然酯变压器必须采取特殊的设计和生产工艺. 高油酸菜籽油, 其不饱和脂肪酸含量更高, 总体性能与大豆油相当.

1.3 天然酯绝缘油的行业标准发展历程

随着天然酯在变压器行业的逐步普及, 天然酯在产品理化特性以及特征气体分析方法(DGA)上与矿物油存在一定差异. 在此背景下, 国外首先出台了变压器天然酯绝缘油新油的质量标准IEC 62770和ASTM D6871^[12], 以及电气和电子工程师协会(IEEE)颁布的天然酯油中溶解气体分析导则和天然酯验收、维护导则. 天然酯的理化指标测定和绝缘材料相容性测试大多沿用了之前矿物油的试验方法, 只是在天然酯绝缘油新油质量标准上, 对试验结果限定值做出了更新. 我国在2014年, 参照IEC 62770以及FR₃[®]大豆天然酯的技术参数, 出台了第一个国内天然酯质量标准^[13]. 国家能源局在2018年更新了天然酯绝缘油的质量标准^[14].

表 1 国内外天然酯绝缘油标准
Table 1 Natural ester insulating oil standards

Standard	Contents
IEC 62021-3	Test acid number for non-mineral insulating oil
IEEE Std C57.147	Quality acceptance and maintenance
IEEE C57.155	Guidance for ester oil DGA
IEC 62770	Quality standard for unused natural ester oils
ASTM D6871	Quality standard for unused natural ester oils (U.S. standard)
DL/T 1360	Quality criteria for soybean transformer oils
DL/T 1811	Quality criteria for natural ester oils
Q/GW 11659	Natural ester insulating oil for distribution transformer

2 天然酯的理化特性

不同原料的天然酯, 40 ℃黏度一般都在35~40之间. 天然酯的不饱和油酸含量高, 易氧化或水解, 这一结构上的本质特征决定了其氧化安定性较差、吸水能力强(酸值高)、生物降解快. 天然酯在真空过滤后, 酸值和水含量与矿物油相当, 但在变压器运行过程中, 由于天然酯自身的吸水能力较强, 天然酯绝缘油实际

的酸值和水含量均会远超矿物绝缘油.

2.1 黏度

黏度是指流体流动的阻力. 随着温度的上升, 天然酯黏度系数较大, 因而黏度下降速度的比例低于矿物油, 表现为高温下天然酯的黏度更大; 随着温度的下降, 天然酯变得比矿物油更黏稠. 评价天然酯的低温性能除了倾点外, 也需要考虑低温时黏度的增加速率.

表 2 天然酯与矿物油的新油理化指标典型值
Table 2 Typical properties for unused natural ester and mineral oil

Physical and Chemical	Soybean	Rapeseed	PFAE	#25	#45
Appearance	Light green	Transparent	Transparent	Transparent	Transparent
Density (20 ℃)/(kg/m ³)	0.92	0.92	0.86	0.84	0.84
Viscosity(40 ℃)/(mm ² /m)	34	37	40	8.9	9.1
Fire point/℃	360	360	210	180	180
Pour point/℃	-20	-20	0	-25	-45
Acid number/(mg KOH/g)	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01
Interfacial Tension/(mN/m)	24	26	30	44	43
Moisture content/(mg/kg)	30	<50	15	35	32

天然酯黏度上与矿物油的差异使得天然酯变压器的生产工艺需要做出相应调整: 天然酯流速相对较低, 注油时间需延长; 天然酯所需的绝缘浸渍时间为矿物油的2倍; 天然酯所需的注油温度更高, 避免集中加热^[15]; 天然酯在绝缘试验前的静放时间为矿物油的2倍.

杨涛等^[10]在研究传统矿物油变压器替换天然酯绝缘油的过程中, 发现天然酯的黏度大, 因而散热差. 李小松^[16]更新了天然酯配电变压器的温升计算公式, 发现高黏度使得变压器内部温差较大. 一般来说, 天然酯绝缘油变压器顶层油温升比矿物绝缘油变压器高3~5 ℃, 平均线圈温升高1~2 ℃, 线圈热点温升最高可达20 ℃, 因而推荐使用大功率的冷却系统和大容量的油泵, 增加油道宽度和扩大储油柜至油箱本体的管径^[11].

2.2 倾点

天然酯绝缘油的倾点接近常用的25号矿物绝缘油. 王珊珊等^[17]将一台10 kV/315 kVA天然酯变压器挂网运行, 试验发现天然酯凝固后击穿电压未明显下降, 绝缘油-纸系统击穿电压甚至略有上升. 胡宇等^[11]在延安黄河引水工程中应用的35 kV变压器冬季试验中观察到-20 ℃环境温度下, 天然酯有凝固趋势, 故建议变压器带载运行前, 需外部加热或空载低负荷运行一段时间, 使得天然酯绝缘油油温上升到0 ℃以上, 避免天然酯凝固的风险.

2.3 水含量及酸值

变压器绝缘油由于自身氧化或外界进入的形式, 都可能在变压器中产生水. 微水在变压器中以游离态或细微颗粒溶于水的形态存在, 这部分水进入绝缘纸板, 会促使绝缘纸纤维老化, 降低纤维的聚合度, 变压

器寿命也会大大降低。

变压器绝缘油的酸值反映了新油的精制程度和运行油的老化程度。天然酯绝缘油易吸收水分，变压器运行过程中水含量大于矿物绝缘油，因而酸值也高于矿物绝缘油。变压器的运行标准要求注油后天然酯绝缘油的水含量界限值在200 mg/L以内^[12]。

酸值的升高会使得变压器电气绝缘特性下降，为了改善天然酯的绝缘特性，一般在生产天然酯的工艺中都会加入化学脱酸的方式^[18]。变压器天然酯注油完成后，若油样检测酸值过高，很有可能是滤油不当造成的外界污染导致天然酯水解，而天然酯接触空气造成的氧化通常会伴随黏度的增加^[19]。

2.4 氧化安定性

天然酯分子结构中的碳-碳双键活性大，遇空气易发生氧化。廖瑞金等^[20]适配了不同比例的抗氧化剂，发现0.3%T501+0.3%L06在20%天然酯和80%矿物油的混合油中，具有最佳的氧化安定性。采用旋转氧弹法在140℃评估天然酯抗氧化添加剂的作用时发现，添加剂可提升天然酯抗氧化时间从40 min至100 min，但仍远远低于矿物油的300 min。蔡胜伟等^[21]参照IEC 62770标准，发现采取修正后的氧化安定试验方法和评定标准对天然酯绝缘油是可行的。

抗氧化添加剂虽然一定程度上提高了天然酯的抗氧化能力，但天然酯绝缘油仍需密封，油箱上部充氮或采用胶囊、密闭储油柜等装置隔离空气。

表 3 天然酯氧化安定性试验^[21]

Table 3 Oxidation stability test for natural ester^[21]

Test items	Limit Value	Test method
TAN/(mg KOH/g)	≤ 0.6	IEC 62021
Viscosity increase (40℃)	≤ 30%	GB/T 265
Dissipation power factor (90℃)	≤0.5	GB/T 5654

2.5 生物可降解性

绝缘油的生物可降解性是指绝缘油被微生物降解为水、二氧化碳等对环境无污染的物质，以降解的百分率来度量。天然酯中的甘油三酯富含不饱和双键，易发生水解反应，而矿物油分子结构的环烷烃、芳香烃难以承受微生物攻击进而氧化，降解率较低。

陈江波等^[22]采用密闭瓶法测试对比了自制的菜籽油(RDB)，进口大豆油FR₃和25号矿物油的生物可降解性，发现菜籽油和大豆油在3 d内快速降解了80%以上，同期矿物油只降解了不到20%。最终28 d测试期内两款天然酯降解了99%。基于此特性，天然酯绝缘的

变压器可以减少或不配置事故放油池。此外，天然酯在全寿命周期内的碳排放比矿物油少2%，温室气体产生量只有矿物油的1.8%。可见，天然酯是一种绿色环保的绝缘油。

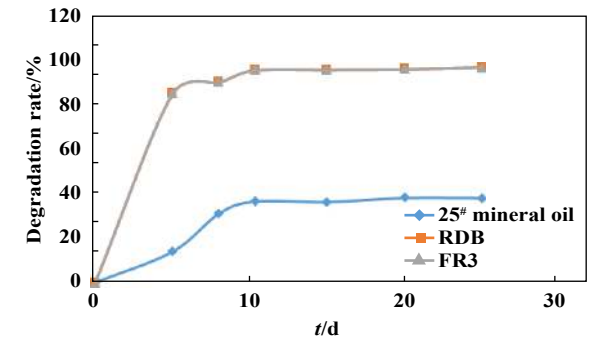


Fig. 2 The degradation curves of insulating fluids^[22]
图2 绝缘油的降解变化曲线^[22]

2.6 燃点

燃点是油浸式电力设备消防安全的重要参数之一。天然酯的高燃点特性可使得油浸式变压器替代干式变压器应用在较高消防要求的场合，如楼宇、化工厂等。天然酯绝缘油变压器的防火间隙要求仅是矿物绝缘油变压器的十分之一，可显著提高空间利用率。ABB公司对比了高油酸菜籽天然酯绝缘油和传统矿物绝缘油的失火风险^[23]，汽化矿物油的空气/燃料混合物达到0.6%就会发生爆炸，而菜籽天然酯混合比例达到9%才会具备爆炸的前提，爆炸起始温度也要比矿物油高200℃。当外界热源持续存在时，菜籽油的点火时间是矿物油的12倍，为消防灭火争取了宝贵的时间。蔡胜伟等^[24]进行了10 kV天然酯变压器的燃烧试验时也得出和ABB公司在海外试验类似的结论，天然酯变压器在外部火灾时，30 min后才会开始燃烧，且提高套管和密封件的耐高温能力、改进压力释放阀结构还能进一步提高天然酯的抗燃能力。

综上，从天然酯的理化特性来分析，天然酯完全适合作为变压器绝缘油使用，且具备绿色环保、消防安全性高的突出优势，变压器生产厂商可以参照天然酯的国家、行业标准开展相应的产品设计、工艺改进，推荐天然酯变压器的应用。

3 天然酯的电气特性

天然酯绝缘油在分子结构上的差异决定了其具有与矿物绝缘油不一样的绝缘能力、特征气体种类及产气量、浸渍纸板性能等变压器电气特性，这些特性

对天然酯变压器的设计和运维至关重要。

3.1 绝缘材料及混合油的相容性

天然酯绝缘油的相容性试验^[25]主要依据的是 ASTM D6871 或者 IEEE C57.147 标准, 测试绝缘材料浸油后的黏度变化、酸值、90 ℃ 介质损耗因数和界面张力。Wilhelm 等^[26]在研究绝缘油与密封橡胶材料相容性试验时指出, 丁腈橡胶浸泡于矿物油后, 高温下橡胶化学性质、机械强度变化较大, 不适宜在高温下长期使用。丁腈橡胶浸泡于天然酯后, 出现了油品变色的现象, 相容性劣于矿物油。邱武斌等^[27]在测试绝缘螺栓、层压纸板、硅钢片、密封垫与天然酯的相容性时也发现绝大多数现有矿物绝缘油变压器使用的绝缘材料和天然酯绝缘油相容性较好, 仅丁腈橡胶在高温下酸值和介质损耗因数上升较快, 超过了标准规定上限。Thomas 等^[28]研究氟橡胶高温机械强度和化学温度性时, 总结氟橡胶在高温下与矿物油、酯类油(天然酯和合成酯)相容性都较好。其他绝缘材料如变压器内壁油漆, 一般推荐使用环氧双组份油漆而避免使用单组份油漆。天然酯变压器使用丁腈密封垫前, 必须进行相关相容性试验或更换为氟橡胶。

关于混合油的使用, 国内变压器生产厂家目前尚未配置天然酯专用真空滤油机, 注油用滤油机经常交替过滤天然酯绝缘油与矿物绝缘油, 混合油是否兼容以及兼容的比例有待考证。McShane 等^[8]在使用天然酯绝缘油替换矿物绝缘油变压器时测试了混合油的各项参数, 发现混合 7% 的矿物绝缘油, 混合油的各项理化指标仍可接受。超过 7% 的比例, 则黏度下降较大, 燃点下降明显, 可能会低于 K 类防火油要求的 300 ℃ 下限值。

3.2 电气绝缘指标

绝缘油的击穿电压与绝缘油的水含量和杂质有关。廖瑞金等^[29]在 80% 的矿物油(含一定量的微水)中添加 20% 的天然酯, 发现击穿电压值有上升, 证明了天然酯有提高绝缘油击穿电压的性能, 这与天然酯的吸湿性有关。Thien 等^[30]发现天然酯在大量水分存在的

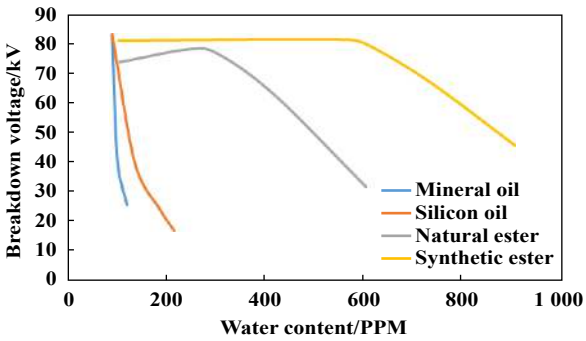


Fig. 3 Breakdown voltage influenced by moisture content
图 3 水含量对击穿电压的影响

情况下, 仍能保持较高的击穿电压, 而矿物油少量含水量即可导致击穿电压的大幅下降。但是当液体间隙长度大于 25 mm 时, 天然酯相对矿物油会出现击穿电压的急剧下降。

20 ℃ 时, 天然酯的相对介电常数约为 3.1。变压器绝缘油介质损耗因数的升高可能是水含量增加、热油循环时间过长、油中混有溶胶杂质引起的。天然酯的介质损耗因数高, 在 90 ℃ 下约为矿物油的 10 倍, 建议 35 kV 以下天然酯变压器, 注油后的天然酯介质损耗因数应小于 0.05, 110 kV 以上天然酯变压器应低于 0.04。

3.3 油中溶解气体分析

天然酯的特征气体种类与矿物油相同, 但在比率和产气速率上相差较大, 必须区别对待。天然酯和矿物绝缘油在电场作用下, 油中的氢离子可能结合为氢气和烷烃类气体, 释放的气体在油中形成介电强度较低的气泡, 容易发生击穿。陈于晴等^[31]发现大豆油、菜籽油天然酯相比棕榈油天然酯和矿物油, 具有更好的析气倾向(吸收氢气)。大豆油和菜籽油富含不饱和碳碳和碳氧双键, π 键活性大, 因而吸收氢气的能力也强。

蔡胜伟等^[32]研究了适合天然酯产气的分析方法, 发现天然酯中烃类气体的溶解度由大到小排序是乙烷、甲烷、乙烯、乙炔; 非烃类气体的溶解度由大到小排序是二氧化碳、一氧化碳、氢气。天然酯绝缘油变压器投运前也有相应的气体含量限定值。

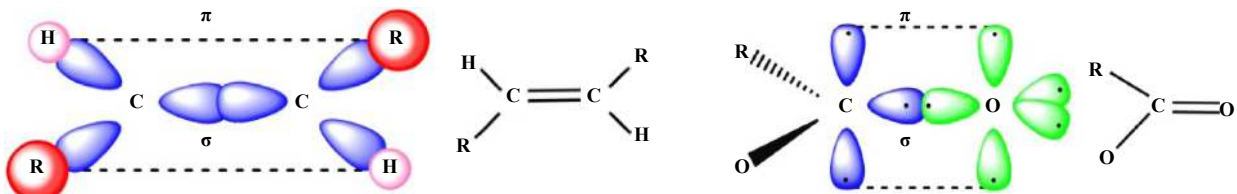


Fig. 4 Molecular orbital of double bond between carbon and carbon, carbon and oxygen^[31]

图 4 碳碳双键和碳氧双键的分子轨道^[31]

表 4 新设备投运前油中气体含量要求
Table 4 Request of oil dissolved gas content

Gas	Content/($\mu\text{L/L}$)
H_2	≤ 30
C_2H_2	0
Total Hydrocarbon	≤ 20

蔡胜伟等^[33]进一步研究了加速热老化试验下,天然酯与矿物油特征气体的对比. 试验发现天然酯热老化过程中产生的特征气体含量顺序为乙烷>二氧化碳>一氧化碳>氢气>甲烷>乙烯. 此外,天然酯在热老

化下的产气速率和产气量远远超过矿物油. 如果天然酯热老化过程中存在氧气,则一氧化碳的产气量和产气速率会下降,其他五种气体相应上升. 微水含量对天然酯产气的影响很小. 杨涛等^[34]也开展了热故障下,天然酯的特征气体分析,天然酯产生的乙烷、二氧化碳、一氧化碳三种气体含量占总量的90%以上,适合矿物油的“三比值”故障诊断方法不适用于天然酯. 现有的矿物油大卫三角形法无需修改可适用于天然酯的击穿、放电等电气故障评判,经过适当修改的大卫三角形法也可适用于天然酯热故障的评判.

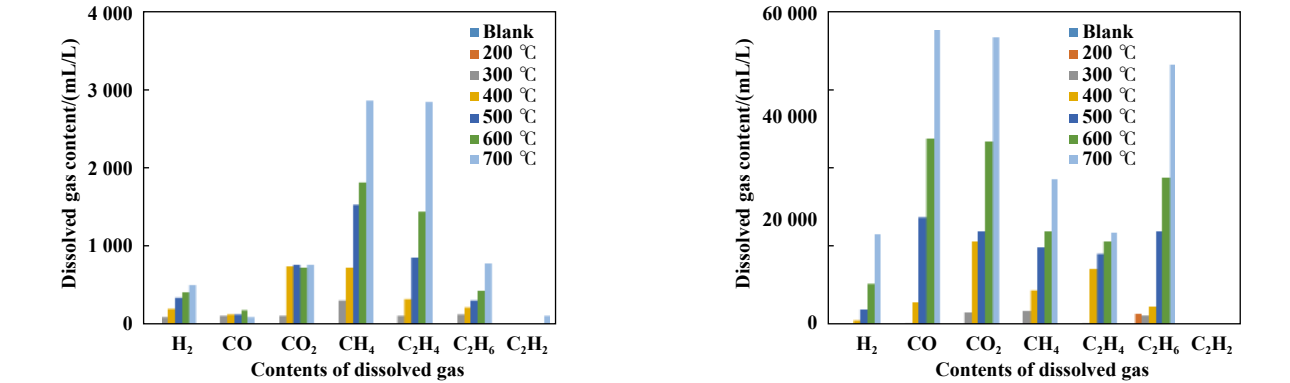


Fig. 5 Contents of dissolved gases in mineral and natural ester insulating oils under thermal faults^[34]
图 5 热故障下矿物油和天然酯溶解气体组分^[34]

3.4 绝缘纸特性

绝缘纸老化程度以聚合度表征,聚合度下降越大,老化越严重,绝缘能力衰退. 矿物油变压器微水含量每上升0.5%,绝缘纸聚合度减少一半. 天然酯变压器运行中的微水含量可达矿物油的20倍,廖瑞金等^[35]研究得出,天然酯在同等热老化条件下,绝缘纸聚合度优于矿物油,聚合度下降趋于稳定的时间仅为矿物油的2/3. 天然酯-纸老化速度减缓的机理主要是天然酯的吸湿性、水解保护和微水消耗. 天然酯相对矿物油具有更大的亲水特性,对水分的吸附可以起到干燥绝缘纸的作用,而通过与纤维素发生酯交换反应能抑制纤维素的水解,绝缘纸聚合度下降减缓. 此外,天然酯自身也会消耗微水来发生水解反应,进一步减少了绝缘纸中的水含量. 绝缘纸整个热老化周期内,天然酯自身的水含量在老化初期达到峰值,这主要是因为老化初期,天然酯从绝缘纸的吸水速率大于天然酯自身水解速率,且这个峰值水含量随着老化温度的升高而变大. 绝缘纸热老化过程中,天然酯总酸值的峰值与水含量峰值出现的时间基本一致,而矿物油总酸值曲线没有拐点,呈现单调上升趋势. 矿物油老化产生

的低分子酸易被绝缘纸吸收,而天然酯的油酸属于高分子酸,不影响绝缘纸的老化. 如果使用热稳定纸匹配天然酯,热老化过程中天然酯水含量呈现单边下降趋势,相对普通绝缘纸,在老化初期的水含量更低.

Fernández等^[36]在参考已有评价天然酯与矿物油对绝缘纸热老化的结论时,提出了更为缜密的试验方案. 天然酯的热点温度最高要高于矿物油20 °C,因而对比两者对绝缘纸老化的结果时应采取不同的热老化温度. 根据新试验条件得出的结论,随着绝缘纸聚合度下降趋于平缓,天然酯绝缘纸热老化程度仍优于矿物油.

综上所述,天然酯绝缘油在电气性能方面总体评价优于矿物绝缘油,但产气规律与矿物绝缘油差异大,实践色谱分析判断故障时需充分考虑两者之间的差异.

4 总结和展望

天然酯绝缘油具有高燃点和绿色环保的优势,其理化特性和电气特性符合变压器应用要求,但在设计和运营维护上有别于矿物绝缘油. 未来天然酯的进一

步研究方向应侧重于如下几个方面:

a. 天然酯的黏度过高, 低温表现和抗氧化性能劣于矿物油, 通过后处理或化学改性改善上述性能是有价值的研究方向。

b. 天然酯绝缘油工业化生产的工艺控制, 目前只有少数几家国外生产厂家掌握, 国内鲜有研究。参照现行的天然酯绝缘油新油标准, 今后生产工艺规范的进一步研究, 应专注于对新油酸值、水含量的控制, 以及对新油高温产气的定量数据统计。

c. 转基因菜籽油、大豆油在食用领域存在争议, 但作为生物绝缘油具有较大优势。应大力推进基于转基因农作物油料发展绝缘油的研究与应用工作。

d. 经济性仍然是制约天然酯绝缘油全面商业化的障碍, 后续应进一步加强对天然酯在变压器中的全寿命周期综合成本进行评价。天然酯废油经过再加工循环利用有可能是提高天然酯绝缘油经济性的有效手段。

e. 现有关于天然酯绝缘油性能考评的试验方法多基于同温度与矿物油的对比。天然酯由于散热性能劣于矿物油, 实际运行热点温度高于矿物油, 实验室内开展的对比试验也应采取不同的温度进行比对。对于 110 kV 以上的大电压等级电力变压器, 需加强对挂网机组的监控和数据积累, 为将来天然酯绝缘油在高电压等级的变压器中的应用做好技术储备。

参考文献

- [1] Qin Caiqing. Progress in research and application of vegetal transformer oil[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2018, 38(3): 5-9 (in Chinese) [覃彩芹. 植物变压器油的研究与应用进展[J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38(3): 5-9]. doi: [10.3969/j.issn.2095-4824.2018.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4824.2018.03.001).
- [2] Sun Yubin, Hu Litian, Xue Qunji. Development and research progress of environmentally friendly lubricating oil additives[J]. Tribology, 2008, 28(4): 381-387 (in Chinese) [孙玉彬, 胡丽天, 薛群基. 环境友好润滑油的发展及其摩擦学研究现状[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(4): 381-387]. doi: [10.3321/j.issn:1004-0595.2008.04.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1004-0595.2008.04.017).
- [3] Rafiq M, Lv Y Z, Zhou Y, et al. Use of vegetable oils as transformer oils—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 308-324. doi: [10.1016/j.rser.2015.07.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032).
- [4] Chen Zhimin. Overview about transformer oils[J]. Synthetic Lubricants, 2018, 45(3): 28-31 (in Chinese) [陈之敏. 变压器油综述[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(3): 28-31]. doi: [10.3969/j.issn.1672-4364.2018.03.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4364.2018.03.009).
- [5] Perrier C, Beroual A. Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester, and silicone oils[J].

- IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(6): 6-13. doi: [10.1109/MEI.2009.5313705](https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5313705).
- [6] Jiang Zeqi, Fang Jianhua, Chen Fei, et al. Tribological properties of rapeseed oil with electromagnetic field impact[J]. Tribology, 2018, 38(1): 44-50 (in Chinese) [江泽琦, 方建华, 陈飞, 等. 电磁场作用下菜籽油的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 44-50]. doi: [10.16078/j.tribology.2018.01.006](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.01.006).
- [7] McShane C P, Corkran J, Rapp K, et al. Natural ester dielectric fluid development[C]. In: 2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Kay Bailey Hutchison Convention Center, Dallas, USA, 2006: 141-147.
- [8] McShane C P, Luksich J, Rapp K J. Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension[C]. In: IEEE-IAS/PCA 2003 Cement Industry Technical Conference. Dallas, TX, USA, 2003: 141-147.
- [9] Stockton D P, Bland J R, McClanahan T, et al. Natural ester transformer fluids: safety, reliability & environmental performance[C]. In: 2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, Charleston, South Carolina, 2007: 1-7.
- [10] Yang Tao, Wang Ji, Wang Zhenyu, et al. Feasibility of directly changing natural ester insulating oil for conventional mineral insulating oil-filled distribution transformer[J]. Insulating Material, 2018, 51(2): 39-43 (in Chinese) [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].
- [11] Hu Yu, Guo Yuguang, Guo Ling. Transformer with natural ester used in yan an river huang project[J]. Shaan Xi Water Resources, 2018, (5): 146-148 (in Chinese) [胡宇, 郭宇光, 郭琳. 天然酯变压器在延安黄河引水工程中的应用[J]. 陕西水利, 2018, (5): 146-148].
- [12] Astm Standard D6871-03. Standard specification for natural (vegetable oil) ester fluids used in electrical apparatus[S]. USA: ASTM, 2003.
- [13] [DL/T 1360. Quality standard of soybean vegetable transformer oil[S]. Beijing: China Standard Press, 2014(in Chinese) [DL/T 1360. 大豆植物变压器油质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014].
- [14] [DL/T 1811. Guide for selection of natural ester insulating oil for power transformer[S]. Beijing: China Standards Press, 2018](in Chinese) [DL/T 1811. 电力变压器用天然酯绝缘油选用导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018].
- [15] Lakhiani V K, Jhala A S. Green transformer-experience in using natural ester fluid in power transformer first time in india[C]. In: The 2nd International Conference on Innovation & Best practice in Transformer Design, Testing and Maintenance, CPRI. 2014: 188-201.
- [16] Li Xiaosong. Study on temperature rise calculation of vegetable oil distribution transformer[J]. Transformer, 2019, 56(1): 5-12 (in Chinese) [李小松. 植物油配电变压器温升计算的研究[J]. 变压

- 器, 2019, 56(1): 5–12].
- [17] Wang Shanshan, Zhou Zhujun, Liang Siyuan. Test study on low temperature characteristics of transformer vegetable insulating oil[J]. *Electrotechnics Electric*, 2014, 12: 48–50 (in Chinese) [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]. doi: [10.3969/j.issn.1007-3175.2014.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3175.2014.05.014).
- [18] Yang Tao, Zhang Hui, Jing Dongdong, et al. Effect of deacidification method on performance of natural ester insulating oil[J]. *Insulating Material*, 2017, 50(3): 54–61 (in Chinese) [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].
- [19] Wilhelm H M, Tulio L, Jasinski R, et al. Aging markers for in-service natural ester-based insulating fluids[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(3): 714–719. doi: [10.1109/TDEI.2011.5931057](https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5931057).
- [20] Liao Ruijin, Hao Jian, Liang Shuaiwei, et al. Choice of antioxidants added in insulation oil and its anti-oxidant synergistic effect[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(1): 124–131 (in Chinese) [廖瑞金, 郝建, 梁帅伟, 等. 绝缘油抗氧化剂的选择及其协同抗氧化作用[J]. *高电压技术*, 2012, 38(1): 124–131].
- [21] Cai Shengwei, Chen Jiangbo, Yin Jing, et al. Discussion on oxidation stability test of natural ester insulating oil[J]. *Insulating Material*, 2016, 49(3): 68–71 (in Chinese) [蔡胜伟, 陈江波, 尹晶, 等. 天然酯绝缘油氧化安定性试验探讨[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(3): 68–71].
- [22] 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) [陈江波, 王飞鹏, 蔡胜伟, 等. 变压器植物油、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].
- [23] George, Frimpong, Stephane, et al. Using vegetable oil as insulating fluid to reduce the risk of transformer fire[J]. *Electrical Manufacturing*, 2014, (5): 27–30 (in Chinese) [Frimpong G, Page S, Carrander K, et al. 用植物油作为绝缘液降低变压器失火风险[J]. *电气制造*, 2014, (5): 27–30].
- [24] Cai Shengwei, Shao Minfeng, Chen Cheng, et al. Fire performance test of natural ester insulating oil-immersed transformer[J]. *Transformer*, 2018, 55(5): 56–60 (in Chinese) [蔡胜伟, 邵崑峰, 陈程, 等. 天然酯绝缘油变压器防火性能试验[J]. *变压器*, 2018, 55(5): 56–60].
- [25] Pukel G J, Schwarz R, Baumann F, et al. Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids[J]. *E & I Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 2013: 1–6.
- [26] Wilhelm H M, Franch V, Tulio L, et al. Compatibility of transformer construction materials with natural ester-based insulating fluids[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(5): 2703–2708. doi: [10.1109/TDEI.2015.004755](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004755).
- [27] Qiu Wubin, Yang Tao, Wang Ji, et al. Research on compatibility between natural ester insulating oil and insulating material in oil-immersed transformer[J]. *Transformer*, 2016, 53(3): 26–29 (in Chinese) [邱武斌, 杨涛, 王吉, 等. 天然酯绝缘油与油浸式变压器绝缘材料相容性研究[J]. *变压器*, 2016, 53(3): 26–29].
- [28] Thomas E W, Fuller R E, Terauchi K. Fluoroelastomer compatibility with biodiesel fuels[J]. *SAE Transactions*, 2007: 947–956.
- [29] 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 ester[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(13): 117–123 (in Chinese) [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]. doi: [10.3321/j.issn:0258-8013.2009.13.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2009.13.019).
- [30] Thien Y V, Azis N, Jasni J, et al. The effect of polarity on the lightning breakdown voltages of palm oil and coconut oil under a non-uniform field for transformers application[J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 89: 250–256. doi: [10.1016/j.indcrop.2016.04.061](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.061).
- [31] Chen Yuqing, Mo Wenxiong, Huang Qingdan, et al. Study on gassing property of vegetable insulating oil[J]. *Insulating Material*, 2018, 51(7): 72–76 (in Chinese) [陈于晴, 莫文雄, 黄青丹, 等. 植物绝缘油析气性研究[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(7): 72–76].
- [32] Cai Shengwei, Chen Jiangbo, Shao Minfeng, et al. Dissolution properties of characteristic gases in nature ester insulating oils for power transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(8): 2608–2613 (in Chinese) [蔡胜伟, 陈江波, 邵崑峰, 等. 电力变压器用天然酯绝缘油中特征气体溶解特性[J]. *高电压技术*, 2017, 43(8): 2608–2613].
- [33] Cai Shengwei, Hu Yuanxiang, Chen Jiangbo, et al. Study on dissolved gas in natural ester insulating oil during accelerated thermal ageing[J]. *Insulating Material*, 2015, 48(4): 30–39 (in Chinese) [蔡胜伟, 胡远翔, 陈江波, 等. 天然酯绝缘油加速热老化时油中溶解气体研究[J]. *绝缘材料*, 2015, 48(4): 30–39]. doi: [10.3969/j.issn.1009-9239.2015.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9239.2015.04.007).
- [34] Yang Tao, Kou Xiaoshi, Pan Haowei, et al. Analysis of dissolved gases in natural ester insulating oil under thermal fault[J]. *Insulating Material*, 2018, 51(3): 74–78 (in Chinese) [杨涛, 寇晓适, 潘好伟, 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].
- [35] Liao R, Liang S, Sun C, et al. A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2010, 20(4): 518–533.
- [36] Fernández I, Delgado F, Ortiz F, et al. Thermal degradation assessment of Kraft paper in power transformers insulated with natural esters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104: 129–138. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.05.020](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.020).