

电气绝缘液与结构材料相容性试验方法标准讨论综述

李紫勇, 宋浩永, 黄青丹, 黄慧红, 王 炜

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘 要: 本文介绍了国内外现有的电气绝缘液与结构材料相容性的试验方法标准, 并分别对变压器、电力电容器、电缆终端和油冷电机中绝缘液与结构材料相容性的试验方法标准进行讨论, 总结了各个标准在试验条件和评定参数等方面的异同, 并分析了现行标准的不足。最后简要介绍了由广东电网有限责任公司广州供电局提出的 IEC 63177《电气绝缘液与结构材料相容性试验方法》标准提案, 该提案将解决现有相容性试验方法的不足。

关键词: 相容性; 标准; 变压器; 电容器; 电气绝缘液

中图分类号: TM214; TM215 DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.09.002

Review in test method standards of compatibility between electrical insulating liquids and structural materials

LI Ziyong, SONG Haoyong, HUANG Qingdan, HUANG Huihong, WANG Wei

(Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: The existing test method standards of the compatibility between electrical insulating fluids and structural materials at home and abroad were introduced, and the test method standards of the compatibility between electrical insulating fluids and structural materials in transformers, power capacitors, cable terminals, and oil cooling motors were discussed respectively. The similarities and differences of test conditions and evaluation parameters in each standard were summarized, and the shortcomings of current standards were analyzed. At last, the standard proposal of IEC 63177 *Test methods for compatibility of construction materials with electrical insulating liquids* proposed by Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd. was introduced compendiously, which will address the shortcomings of existing compatibility test methods.

Key words: compatibility; standard; transformer; capacitor; electrical insulating liquids

0 引言

未来低碳网络 and 智能电网的发展对电力系统设备所使用的绝缘材料性能提出了更高的要求, 以应对设备更加动态和不稳定的运行条件。在电气设备中, 绝缘液起着绝缘、灭弧、散热的作用, 是电气设备中非常重要的绝缘材料^[1-2], 结构材料起着机械支撑、绝缘和密封的作用。绝缘液和结构材料的良好配合为充油电气设备提供了可靠的电气绝缘保障。IEC 60050-212:2010 对材料相容性的定义为“材料共同使用时在各个方面不受任何损害的性能, 是表征几种材料是否适合组合使用的指标”^[3]。电气设备运行过程中, 绝缘液会与电气设备内部的结构材料相接触, 结构材料会影响绝缘液的性能, 同时绝缘液在温度、氧气、水分等物质的作用下也

可能使结构材料的性能发生变化^[4]。电气设备中绝缘液和结构材料的相容性不仅影响电气设备的结构设计和安全容量, 还直接关系到电气设备的使用寿命和安全稳定运行^[5-6]。因此, 制定合适的电气绝缘液与结构材料相容性试验方法, 开展电气绝缘液与结构材料的相容性研究是至关重要的。

随着海上风电和牵引变压器等采用高温绝缘系统场景的应用越来越广泛, 基于 ASTM D3455:2019^[7]的结构材料与绝缘液相容性试验方法所规定的试验温度单一, 大多数为 100℃, 无法涵盖 IEC 60076-14:2013^[8]所定义的所有耐热等级。其次, 现有的相容性试验方法局限于单一绝缘液, 无法同时涵盖天然酯、合成酯和改性酯等多种绝缘液。最后, 在对相容性测试结果的考察上, 现有相容性试验标准均以结构材料对绝缘液的影响作为主要评判依据, 检测项目不包括结构材料的性能, 忽视了绝缘液对结构材料的影响, 事实上结构材料性能劣

化也会对变压器运行产生影响,如密封圈失效会引发变压器漏油等事故。另外,HUANG Q D等^[9]在关于环氧内壁漆与天然酯的相容性研究中发现,当试验时间小于168 h时,浸渍内壁漆的绝缘液介质损耗因数符合在役天然酯变压器的限值要求,即0.15,但当测试时间延长至672 h时,介质损耗因数测试结果超过该限值要求,说明基于ASTM D3455:2019的164 h并不足以发现潜在问题。

随着环境友好型绝缘液在不同领域的应用,现有结构材料与绝缘液相容性试验方法标准不完善带来的潜在风险将更加突出。为了解决现有结构材料与绝缘液相容性试验方法标准的不足,统一和规范各种充油电气设备中的相容性试验方法,广东电网有限责任公司广州供电局提出IEC 63177《电气绝缘液与结构材料相容性试验方法》的标准提案。本文主要对变压器、电力电容器、电缆终端和油冷电机中的绝缘液与结构材料的相容性试验方法标准进行对比讨论,并简要介绍IEC 63177提案。

1 变压器相容性试验方法标准

变压器作为电网中关键部件之一,负责电压的转换和能量的传输,其运行的可靠性至关重要^[10]。矿物油凭借其良好的电气绝缘性能与冷却性能被用于液浸式变压器已有一百多年历史,但随着国内外对于变压器绝缘液防火安全和环境友好特性的关注,燃点为165℃左右且生物降解率低于30%的矿物油难以满足防火与环保的需求,高燃点且可生物降解的替代绝缘液逐渐成为液体电介质研究与应用的新热点。天然酯和合成酯具有良好的环保特性,且燃点高,缺点是黏度高且天然酯的氧化安定性较弱,天然酯和合成酯的分子结构分别如图1、图2所示^[11]。变压器中的结构材料种类繁多,包括绝缘纸板、绝缘垫块、硅钢片、漆包线、漆类、密封圈、绝缘管、绝缘螺栓等^[12]。国内外发布了若干变压器绝缘液与结构材料的相容性试验方法标准,下面对这些标准进行详细介绍。

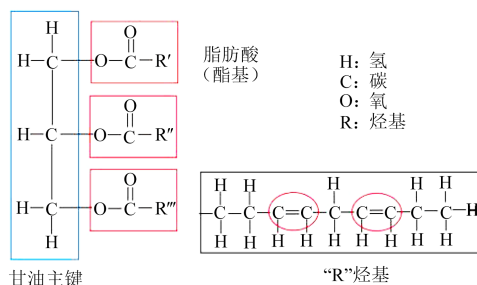


图1 天然酯结构图

Fig.1 Structure diagram of natural ester

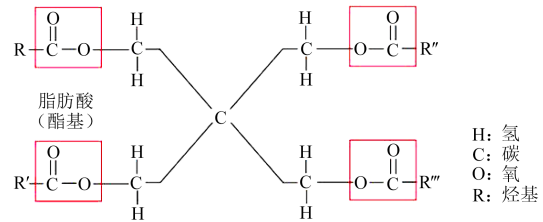


图2 合成酯结构图

Fig.2 Structure diagram of synthetic ester

1.1 试验方法标准

目前,对变压器结构材料与电气绝缘液的相容性试验方法做出规定的主要有7个标准,如表1所示,国际上最常使用和参考的标准是ASTM D3455:2019^[7]。这些标准均是将装有结构材料试样及绝缘液试样的试验容器和单独装有参考绝缘液试样的试验容器同时放置于烘箱中,在特定的温度下加热一段时间后,从烘箱中取出,冷却至室温后测试绝缘液试样或结构材料试样的性能,比较试验绝缘液试样和参考绝缘液试样各项性能的差异并判定相容性优劣。各标准主要在绝缘液类型、绝缘液和结构材料试验比例、材料的预处理、试验温度、试验时间、试验项目及其给定限值上有所区别。

表1 变压器结构材料与电气绝缘液的相容性试验方法标准

Tab.1 Test method standards of compatibility between structural materials and electrical insulating liquids for transformer

序号	相容性试验方法标准	绝缘液类型
1	ASTM D3455:2019 ^[7]	矿物油
2	ASTM D5282:2020 ^[13]	硅油
3	ABNT NBR 16431-2015 ^[14]	天然酯
4	IEC 60588-5:1979 ^[15]	氯代联苯
5	T/CEEIA 437—2020 ^[16]	天然酯
6	T/CEEIA 436—2020 ^[17]	合成酯
7	JB/T 8448.1—2018 ^[18]	矿物油

1.2 标准比较

将表1中的7个相容性试验方法标准进行对比分析,结果如表2所示。从表2可以看出,现有的变压器结构材料与电气绝缘液的相容性试验方法标准试验温度较为单一(大多数为100℃)、试验时间较短(不超过168 h),而且在评定参数上以变压器结构材料对绝缘液的影响作为主要的评判依据,忽略了绝缘液对结构材料的影响。

ASTM D3455:2019^[7]所规范的是矿物绝缘油与电力设备结构材料相容性的试验方法。在试验前,将结构材料放入温度为105℃的烘箱中干燥16 h,

表2 7种变压器结构材料与电气绝缘液的相容性试验方法标准对比分析

Tab.2 Comparison analysis of seven test method standards of compatibility between structural materials and electrical insulating fluids for transformer

项目	ASTM D3455: 2019	ASTM D5282: 2020	ABNT NBR 16431-2015	IEC 60588-5: 1979	T/CEEIA 437—2020	T/CEEIA 436—2020	JB/T 8448.1— 2018
试验温度	100℃	120℃	100℃	100℃	绝缘系统耐热等级温度	绝缘系统耐热等级温度	100℃
试验时间	164 h	168 h	164 h	168 h	164 h	164 h	164 h
介质损耗因数	—	—	—	—	—	—	—
击穿电压	—	—	—	—	—	—	—
酸值	—	—	—	—	—	—	—
色度	—	—	—	—	—	—	—
评定参数	—	—	—	—	—	—	—
界面张力	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

干燥完成后将绝缘液与结构材料放入容积为1 L的试验容器中,向绝缘液中持续通入氮气吹扫10 min,然后密封试验容器开始试验。绝缘液与结构材料的比例在标准中有明确规定,并且指明该比例为实际变压器中结构材料表面积与绝缘液体积比例的4倍。该标准规定的相容性试验温度为 $(100\pm 1)^\circ\text{C}$,试验时间为164 h,评定参数为绝缘液的界面张力、酸值、击穿电压、介质损耗因数和色度,并给出参考油样的限值。该标准所规定的试验温度与矿物油和纤维素纸组成的绝缘系统的耐热等级所对应的温度 105°C 较为接近,但与天然酯和纤维素纸组成的绝缘系统的耐热等级所对应的温度 120°C 、合成酯和热改性纸组成的绝缘系统的耐热等级所对应的温度 155°C 相差较大,不适用于开展结构材料与天然酯、合成酯等环境友好型绝缘液的相容性试验。国内电力行业标准DL/T 1836—2018^[19]还是参考ASTM D3455:2011制定的。

ASTM D5282:2020^[23]考察的是硅油与电力设备用结构材料的相容性。试样的预处理方法与ASTM D3455:2019一致,除了垫片、纤维素纸与绝缘液的比例外,结构材料与绝缘液的比例也与ASTM D3455:2019一致。该标准规定的试验温度为 $(120\pm 1)^\circ\text{C}$,试验时间为168 h。建议评定参数较多,包括绝缘液的燃点、黏度、酸值、击穿电压、介质损耗因数、色度、电阻率和挥发物百分比,标准中还给出了参考油样上述参数的限值。

巴西技术标准协会制定的ABNT NBR 16431-2015^[14]考察的是天然酯绝缘液与电气设备用结构材料的相容性。预处理过程和结构材料比例也与ASTM D3455:2019一致,试验温度为 $(100\pm 1)^\circ\text{C}$,试

验时间为164 h,评定参数为绝缘液的黏度、酸值、击穿电压、介质损耗因数和色度。标准还给出了参考油样和试验油样的限值。

IEC 60588-5:1979^[15]所考察的是多氯联苯与变压器结构材料的相容性,虽然多氯联苯因其毒性已于20世纪60年代停止使用,但是其相容性试验方法仍具有一定的参考价值。该标准规定的试验温度为 $(100\pm 1)^\circ\text{C}$,试验时间为168 h,试样的预处理与生产制造过程中的处理方式保持一致,固体材料和多氯联苯绝缘液有确定的比例并且与实际变压器中两种材料比例的平均值一致。评定参数为绝缘液的酸值、介质损耗因数和色度,并给出了参考油样和试验油样的限值。

由中国电器工业协会标准化工作委员会提出的T/CEEIA 437—2020《天然酯型绝缘油与结构材料相容性试验方法》^[16]和T/CEEIA 436—2020《合成有机酯型绝缘油与结构材料相容性试验方法》^[17]的预处理过程和材料比例也与ASTM D3455:2019一致。试验温度均规定为绝缘系统耐热等级所对应的温度,试验时间为164 h。T/CEEIA 437—2020规定的相容性试验后的评定参数为天然酯的外观、击穿电压、运动黏度、介质损耗因数和酸值。T/CEEIA 436—2020规定的相容性试验后的评定参数为合成酯的外观、酸值、击穿电压和介质损耗因数。两个标准均给出了空白油样和试验油样上述评定参数的限值。

JB/T 8448.1—2018《变压器类产品用密封制品技术条件 第1部分:橡胶密封制品》^[18]规定了密封制品与变压器用矿物绝缘油的相容性试验方法。预处理过程和材料比例也与ASTM D3455:2019一致,

相容性试验温度为 100°C ,试验时间为164 h。该标准建议的评定参数为变压器绝缘油的介质损耗因数,并给出了与丁腈基橡胶、丙烯酸酯橡胶、氟橡胶和氟硅橡胶等6种橡胶老化试验后介质损耗因数的限值。另外,该标准还规定了密封制品浸渍变压器油后的压缩永久变形和耐变压器油性能试验方法。

现有的关于变压器结构材料与绝缘液的相容性试验方法标准,主要是针对矿物油和硅油,ABNT NBR 16431-2015虽然考察的是天然酯,但其试验温度和试验时间均与矿物油的测试标准 ASTM D3455:2019一致,其试验温度与天然酯的耐热等级对应温度相差较大;T/CEEIA 437—2020和T/CEE-IA 436—2020虽然将试验温度提高到绝缘系统的耐热等级所对应的温度,但其测试时间较短,在天然酯与内壁漆的相容性试验研究中发现,测试时长小于168 h时不足以发现潜在的不相容风险^[9]。关于变压器结构材料与天然酯、合成酯等替代绝缘液之间的相容性试验亟需开展进一步研究。

2 电力电容器相容性试验方法标准

电力电容器是用于电力网络的电容器,是一种静止的无功补偿设备,其主要作用是向电力系统提供无功补偿,提高功率因数,减少输电线路输送的电流,起到减少线路能量损耗和压降、改善电能质量和提高设备利用率的重要作用。液体介质浸渍剂作为电容器的主要绝缘介质之一,可以填充固体介质中的空隙,提高介质的电气强度,改善局部放电特性和散热条件等^[20]。国内外广泛使用的浸渍剂有烷基苯(AB油)、苯基二甲苯基乙烷(简称PXE,又称S油)、苯基乙烷基乙烷(PEPE)、单/双苯基甲苯(简称M/DBT,又称C101)^[21]。我国电容器行业目前最常用的是苯基甲苯类浸渍剂。电容器结构材料包括聚丙烯薄膜、橡胶垫片、绝缘管、绝缘螺栓等^[22]。电容器结构材料和浸渍剂的相容性好坏直接影响着电容器的性能。

IEC 60588-6:1979^[23]所规范的是氯化联苯浸渍液与电容器结构材料的相容性试验方法。虽然多氯联苯因其毒性已被禁用,但该方法仍具有参考价值。该方法规定了结构材料纸、塑料薄膜、铝箔、纸板及可溶性材料与多氯联苯的具体试验比例,明确了纤维素类材料需要在 105°C 烘箱预处理16 h。试验过程中将包含400 mL氯化联苯与结构材料试样的试验油样和参考油样放入老化烘箱中,试验温度为 $(100\pm 1)^{\circ}\text{C}$,试验时间为168 h,试验结束后对油样的介质损耗因数进行测定。该标准对试验油样和空白油样的介质损耗因数均给出了限值。

IEC 60674-3-1:2021^[24]中8.7节提到了电容器薄膜和浸渍剂的相容性试验方法。标准中建议根据供需双方商定的方法进行相容性试验,例如可根据薄膜在浸渍液中的溶胀或溶解性,或根据薄膜或浸渍液受污染的特性来确定薄膜和浸渍剂的相容性。标准注明鉴于目前可供使用和正在开发的用于电容器的浸渍剂种类繁多,未规定具体的试验方法和限值。

JB/T 11052—2010《电容器用压嵌式绝缘套管技术条件》^[25]中4.16.1节介绍了橡胶垫片的相容性试验方法。将800 mL试验油样与2.5 g橡胶垫片放入试验容器中,之后将试验油样和参考油样放入温度为 $(100\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中,试验时间为96 h。该标准要求测试试验前后油样的介质损耗因数和击穿电压,并建议试验前后介质损耗因数的变化率不超过15%。另外,该标准在4.16.2节考察了绝缘液对固体材料的影响,规定将厚度压缩到一定比率的橡胶垫与800 mL油样在 $(100\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中,历时96 h后,测试橡胶垫质量变化,并观察外观变形情况,规定质量变化率不超过10%。

上述电容器结构材料和浸渍剂的相容性试验标准均给出了具体试验步骤和要求,试验温度均为 100°C ,试验时间最长为168 h,各标准均对油样的介质损耗因数进行判定,而对结构材料的性质关注较少。

3 电缆终端相容性试验方法标准

随着我国经济的快速发展,城市用电急剧增加,电网的建设及改造更新项目日益增多,高压电缆在输电线路上的使用也越来越广泛。与高压电缆本体相比,受电缆终端本身结构、制作、连接及运行条件复杂性的影响,电缆终端属于相对薄弱环节,电缆终端和接头发生的故障在电缆运行故障中占较大比例^[26-27]。电缆终端套管与应力锥之间一般充以硅油、聚丁烯或聚异丁烯绝缘油作为绝缘填充剂^[28],应力锥材料主要有硅橡胶和三元乙丙橡胶^[29]。为保证电缆长期运行的可靠性,除了绝缘填充剂和应力锥性能需要满足设计要求外,电缆终端油与电缆终端内部结构材料应有良好的相容性。

GB/T 11017.3—2014《额定电压110 kV($U_m=126\text{ kV}$)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第3部分:电缆附件》^[30]中规定:高压电缆附件内的液体绝缘填充剂应与相接触的绝缘材料及结构材料相容。对乙丙橡胶应力锥推荐采用硅油或聚异丁烯作为绝缘填充剂,对硅橡胶应力锥推荐采用聚异丁烯或高黏度硅油作为绝缘填充剂。然而,国内外均无测定电缆终端油和结构材料相容性的具体试验方法

标准,需求方一般结合供货方的技术条件书和以往经验来进行试验。因此,制定电缆终端油和结构材料相容性的试验方法标准尤为迫切。

4 油冷电机相容性试验方法标准

因能源危机和环境问题愈演愈烈,电动汽车产业得到快速发展,电动汽车将成为未来汽车产业发展的方向,目前已有荷兰、德国、英国等国家,以及我国海南省等地区明确了禁售燃油汽车时间表。电机作为电动汽车的三大核心部件之一,对车辆的安全驾驶和运行寿命具有重要影响^[31]。对于油冷型电动车电机,电机绝缘材料与自动变速箱油(ATF油)直接接触,因此用于变速箱的油品需要与电机结构材料具有良好的相容性。电机的主要结构材料有绝缘浸渍树脂、电磁线、柔软复合材料、槽楔、橡胶密封件、绝缘软套管、绑扎带等^[32]。下面介绍润滑油及ATF油与油冷电机结构材料的相容性相关标准。

4.1 润滑油与橡胶的相容性试验方法标准

电机中大部分密封件和衬垫由橡胶制成,如果橡胶与润滑油不相容,则会导致润滑油泄漏。国内外关于橡胶和润滑油相容性的试验方法标准有很多。这些标准均是在特定温度下,将橡胶在润滑油中浸渍一段时间,对橡胶浸渍前后某些参数的变化进行评定。

GM 6297M:1995^[33]为通用公司于1995年制定的用于评定DEXRON-III ATF油性能的标准,其中包括该油与多种橡胶相容性的试验要求。该标准建议试验温度为(150±1)℃,试验时间为70 h,评定

参数为橡胶浸渍前后的体积变化和硬度变化,并给出了多种橡胶的限值。

ASTM D4289:1997^[34]规定了润滑酯和液体润滑剂与橡胶的相容性试验方法,评定参数为橡胶的体积变化、硬度变化和密度变化,试验温度为(100±2.5)℃(氯丁橡胶)或(150±2.5)℃(丁腈橡胶),试验时间为(70±0.5)h。标准还特别提到若橡胶制品面临较大挠曲、温度及应力苛刻的应用场合,应增加其评定参数,如拉伸强度、断裂伸长率,才能更加真实地反映橡胶的相容性。国内石油化工有限公司标准SH/T 0429—2017^[35]就是参照ASTM D4289:1997制定的。

欧洲协调委员会制定的CEC-L-39-96规定了4种橡胶与车用润滑油的相容性试验方法。其中氟橡胶、丙烯酸酯橡胶、硅橡胶的试验温度为(150±2)℃,丁腈橡胶的试验温度为(100±2)℃,试验时间为168 h,评定参数为体积、硬度、拉伸强度和断裂伸长率。国内石油化工有限公司标准NB/SH/T 0877—2014^[36]就是参考该标准制定的。

表3为润滑油与橡胶相容性试验方法标准。表中所列标准均将橡胶体积和硬度作为评定参数,ASTM D2000:2018^[37]和CEC L-39-96增加了拉伸强度和断裂伸长率作为评定参数,ASTM D4289和SH/T 0429增加了密度作为评定参数。ISO 1817^[38]、ISO 13226^[39]和ASTM D471^[40]均将质量、体积、硬度、拉伸强度和断裂伸长率作为评定参数。对比表3所有列举标准,其中ISO 1817考察的橡胶参数最多,相容性评判标准最为苛刻。

表3 润滑油与橡胶相容性试验方法标准测试参数对比

Tab.3 Comparison on testing parameters of compatibility test method standards between lubricating oil and rubbers

项目	ISO 1817	ISO 13226	ASTM D471	GM 6297M	ASTM D2000	ASTM D4289	CEC L-39	SH/T 0429	NB/SH/T 0877
质量	√	√	√	×	×	×	×	×	×
体积	√	√	√	√	√	√	√	√	√
硬度	√	√	√	√	√	√	√	√	√
拉伸强度	√	√	√	×	√	×	√	×	√
断裂伸长率	√	√	√	×	√	×	√	×	√
密度	×	×	×	×	×	√	×	√	×
表面积	√	×	×	×	×	×	×	×	×
尺寸	√	×	√	×	×	×	×	×	×
单面液体接触试验前后质量	√	×	√	×	×	×	×	×	×
析出可溶性物质百分比	√	×	√	×	×	×	×	×	×

4.2 ATF油与油冷电机结构材料的相容性试验方法标准

目前国内外尚无已发布的ATF油与油冷电机

结构材料相容性试验方法的相关国家标准。各主要生产厂商所参照的相容性试验方法与评判标准均不相同,主要区别在于:试验时间的长短、油中是

否需要添加水分、试验容器内部压力的大小、试验温度的选取、结构材料和ATF的评定参数以及限值大小。中国电器工业协会标准化工作委员会所提出的T/CEEIA 415—2019^[41]《新能源汽车驱动电机绝缘结构技术要求》对ATF油与油冷电机结构材料的相容性试验方法进行了规范。由中国汽车工业协会车用电机电器电子分会提出的《车用直接油冷电机及其材料相容性技术要求与验证方法》团体标准也对ATF油与油冷电机结构材料的相容性试验方法进行了规定,该标准目前还没有发布。

5 IEC 63177提案

机械支撑、电气绝缘和密封是结构材料在电气设备中的主要功能。在液浸式变压器中,结构材料在近几十年内大多采用基于矿物油的绝缘系统,随着高温绝缘系统的发展与应用,高闪点高可靠性的硅油、合成酯和天然酯类产品均已商品化,关于变压器结构材料如密封圈、漆包线、内壁漆等与天然酯、合成酯等绝缘液间的相容性测试也亟待展开研究。此外,用于电动汽车的油冷电机为了满足散热的要求也增加了电气结构材料接触不同绝缘液的可能性。因此,对于液浸式变压器、油冷电机和电力电容器等液浸式电气设备,迫切需要一种测试多种电气绝缘液与结构材料相容性的试验方法。

广东电网有限责任公司广州供电局开展了一系列不同结构材料与矿物油、天然酯、合成酯及改性酯等多种绝缘液间的相容性试验研究,并在2020年2月提出了《电气绝缘液与结构材料相容性试验方法》的IEC标准新提案。该提案中按照变压器、电容器和油冷电机三类设备规范了结构材料和绝缘液的相容性试验方法,适用于矿物油、硅油、合成酯、天然酯和改性酯等多种绝缘液。试验温度为绝缘系统耐热等级所对应的温度(变压器可根据绝缘系统耐热等级选择105、120、130、155℃,油冷电机可根据绝缘系统耐热等级选择155℃或180℃),满足IEC 60076-14:2013^[8]所定义的高温绝缘系统的应用需求;试验时间建议每168 h为1个循环,测试4个循环。该标准除了测试绝缘液的性能外,对结构材料的测试项也进行了规定,其中变压器绝缘液的测试项目为界面张力、酸值、击穿电压、介质损耗因数、色度和外观,并建议将水分含量作为可选项进行测试;结构材料给出了漆包线和密封圈等的建议测试项。该标准确保了全球电气设备行业将通过公认且统一的方法进行结构材料与电气绝缘液的相容性测试。

6 结束语

根据目前国际上较为常用的电气绝缘液与结构材料的相容性试验方法标准可以看出:现行相容性试验方法标准所涉及的绝缘液主要是传统绝缘液,没有包括合成酯、天然酯及改性酯等新型绝缘液;试验温度较为单一,无法涵盖IEC 60076-14:2013中所定义的所有耐热等级;测试时间较短,大部分在168 h以内,不容易发现某些潜在问题;在对相容性测试结果的考察上,缺少对结构材料试验项目的具体要求,忽视了绝缘液对结构材料的影响。

由广东电网有限责任公司广州供电局牵头制定的IEC 63177改善和解决了现有相容性试验方法标准的不足,该标准已于2022年7月发布了第三稿技术委员会草案,下一步将发布征求意见草案,预计于2025年前发布。

参考文献:

- [1] 李德志,寇晓. 电力变压器油色谱分析及故障诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [2] 蔡胜伟,陈江波,邵茂峰,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.
- [3] International Electrotechnical Commission. International Electrotechnical Vocabulary - Part 212: Electrical insulating solids, liquids, and gases: IEC 60050-212:2010[S]. Geneva,Switzerland: IEC,2010.
- [4] 王白梅. 植物绝缘油与充油变压器绝缘材料相容性研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [5] 凡勇,周竹君,吴义华,等. 植物绝缘油与变压器材料相容性的研究[J]. 绝缘材料,2013,46(5):29-32.
- [6] 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.
- [7] American Society for Testing and Materials International. Standard test methods for compatibility of construction material with electrical insulating oil of petroleum origin: ASTM D3455:2019[S]. West Conshohocken,US:ASTM Committee,2019.
- [8] International Electrotechnical Commission. Power transformers - Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials: IEC 60076-14: 2013[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2013.
- [9] HUANG Q D, SONG H Y, LI Z Y, et al. Compatibility test of coatings with natural ester at elevated temperature for transformers[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Denver,USA:IEEE,2022.
- [10] RAFIQ M, LÜ Y Z, ZHOU Y, et al. Use of vegetable oils as transformer oils - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,52(1):308-324.
- [11] MALDE J, DAGHRAH M, GVORE A. Natural and synthetic ester liquids - how they differ, what they deliver[J]. Transformer Technology,2020,5(1):56-67.
- [12] PERRIER C, LCOULIBALY M, MARUGAN M. Compatibility

- tests between solid and liquid materials for reliable transformers [C]//2020 E-session Papers and Proceedings. Paris, Franch:CI-GRE,2020.
- [13] American Society for Testing and Materials International. Compatibility of construction material with silicone fluid used for electrical insulation: ASTM D5282:2020[S]. West Conshohocken,US:ASTM Committee,2020.
- [14] Brazilian Electricity Committee. Electrical equipment - Determination of compatibility of materials employed with insulating vegetable oil: ABNT NBR 16431-2015[S]. Rio de Janeiro, Brazil:ABNT,2015.
- [15] International Electrotechnical Commission. Askarels for transformers and capacitors. Part 5: Screening test for compatibility of materials and transformer askarels: IEC 60588-5:1979[S]. Geneva, Switzerland:IEC,1979.
- [16] 中国电器工业协会.天然酯型绝缘油与结构材料相容性试验方法:T/CEEIA 437—2020[S].2020.
- [17] 中国电器工业协会.合成有机酯型绝缘油与结构材料相容性试验方法:T/CEEIA 436—2020[S].2020.
- [18] 全国变压器标准化技术委员会.变压器类产品用密封制品技术条件 第1部分:橡胶密封制品:JB/T 8448.1—2018[S].北京:机械工业出版社,2018.
- [19] 全国电气化学标准化技术委员会.矿物绝缘油与变压器材料相容性测定方法:DL/T 1836—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [20] 任双赞,蒲路,黄国强,等.电力电容器浸渍剂及电容器极对壳的局部放电测量研究[J].绝缘材料,2015,48(2):72-76.
- [21] 张文斌.电力电容器浸渍剂应用概况与预测[J].电器工业,2002(7):48-49.
- [22] 肖果,贾征.电容器用绝缘件与苯基甲苯油相容性试验研究[C]//电网节能与电能质量技术论文集.2018.
- [23] International Electrotechnical Commission. Askarels for transformers and capacitors. Part-6: Screening test for effects of materials on capacitor askarels: IEC 60588-6:1979[S]. Geneva, Switzerland:IEC,1979.
- [24] International Electrotechnical Commission. Plastic films for electrical purposes - Part 3: Specifications for individual materials - Sheet 1: Biaxially oriented polypropylene (PP) films for capacitors: IEC 60674-3-1:2021[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2021.
- [25] 全国电力电容器标准化技术委员会.电容器用压嵌式绝缘套管技术条件:JB/T 11052—2010[S].北京:机械工业出版社,2010.
- [26] 李新平,刘守功,曹晓琬,等.高压电缆终端结构设计的进展[J].电线电缆,2002(3):11-14.
- [27] 周多军.220kV高压电缆终端头工艺差错分析及防范措施[J].电气技术,2014(8):44-47.
- [28] 王伟.交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础[M].西安:西北工业大学出版社,2011.
- [29] 余欣,钱艺华,张英,等.电缆终端内绝缘带与绝缘油相容性试验研究[J].广东电力,2020,33(3):96-102.
- [30] 全国电线电缆标准化技术委员会.额定电压110kV($U_m=126kV$)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第3部分:电缆附件:GB/T 11017.3—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [31] 巩智利,李强军,张晓晶,等.电动汽车电机用绝缘材料与变速箱油相容性研究[J].绝缘材料,2022,55(6):45-50.
- [32] CHAPMAN M, NANCY F, RUDOLF B. Insulation systems for rotating low-voltage machines[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada:IEEE,2008.
- [33] General Motors Corporation. DEXRON®-III Automatic Transmission Fluid:GM 6297M:1995[S]. Detroit, US:GM,1995.
- [34] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for elastomer compatibility of lubricating greases and fluids: ASTM D4289:1997[S]. West Conshohocken, US: ASTM Committee,1997.
- [35] 石油燃料和润滑剂标准化技术委员会.润滑脂和液体润滑剂与橡胶相容性测定法:SH/T 0429—2007[S].北京:中国石化出版社,2007.
- [36] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会石油燃料和润滑剂分技术委员会.润滑油橡胶相容性测定法:NB/SH/T 0877—2014[S].北京:中国石化出版社,2014.
- [37] American Society for Testing and Materials International. Standard classification system for rubber products in automotive applications: ASTM D2000:2018[S]. West Conshohocken, US: ASTM Committee,2018.
- [38] ISO Technical Committee. Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of the effect of liquids:ISO 1817:2015[S]. Geneva, Switzerland:ISO,2015.
- [39] ISO Technical Committee. Rubber - Standard reference elastomers (SREs) for characterizing the effect of liquids on vulcanized rubbers: ISO 13226:2018[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
- [40] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for rubber property - Effect of liquids[S]. West Conshohocken,US:ASTM Committee,2015.
- [41] 中国电器工业协会.新能源汽车驱动电机绝缘结构技术要求: T/CEEIA 415—2019[S].2019.

收稿日期:2022-11-10 修回日期:2022-12-13

作者简介:李紫勇(1989-),男(汉族),江西吉安人,工程师,博士,主要从事新型电气绝缘材料及器件的研究;宋浩永(1985-),男(汉族),河南许昌人,高级工程师,主要从事电气化学和电力新技术的研究。