

合成酯作为轨道交通变压器油的必要性

贾玉玉¹, 徐前进^{1,2}

(1. 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 麦特汽车服务股份有限公司, 山东 烟台 264006)

摘要:本文详细介绍了目前轨道交通变压器油方面的防火标准,主要从合成酯的防火安全性、环保性、耐湿性及后期换油维护方面阐述了合成酯作为轨道交通变压器油的必要性。

关键词:合成酯;轨道交通;变压器油;防火

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)03-0049-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.03.008

Necessity of Synthetic Ester as Transformer Oil for Rail Transit

JIA Yuyu¹, XU Qianjin^{1,2}

(1. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. MIT Automobile Service Company Limited, Yantai 264006, China)

Abstract: In this paper, the current fire protection standards of transformer oil for rail transit were introduced in detail. The necessity of synthetic ester as transformer oil for rail transit was described mainly from the aspects of fire safety, environmental protection, moisture resistance, and later oil change maintenance.

Key words: synthetic ester; rail transit; transformer oil; fire protection

0 引言

轨道交通车辆是一种客流量大、线路大多处于相对密闭空间、无序人员密集的场所,在发生灾难时逃生与救援都比较困难。列车如果发生火灾事故,会导致人员伤亡和严重财产损失,因此世界各国对轨道交通车辆可能存在的消防安全隐患不断提出更高的防范标准。轨道交通车辆中的电气设备是整个系统的核心枢纽,需定期复查以保证其运行安全。而电气设备中的牵引变压器是列车的心脏,是整个机车的动力来源,其运行状况直接影响着电气化轨道交通车辆系统的安全及高效运营。

牵引变压器油作为电力牵引系统中的重要组成部分应用于变压器箱体及套管等高压电气设备中,它主要是对牵引变压器的固体绝缘材料进行浸渍和保护,填充绝缘空隙中的气泡,防止空气或湿气侵入,延缓绝缘材料老化,保证其可靠的电气绝

缘特性;因为牵引变压器油具有良好的流动性及较大的热容,它还能对变压器铁芯及线圈起到很好的冷却作用。当变压器油受到氧化、潮湿、高温、阳光、强电场和杂质的作用时,其理化特性、电气特性会逐渐降低,引发各种故障,严重时启动变压器的轻、重瓦斯保护或防爆装置,使变压器退出运行,对运输造成严重影响。因此,牵引变压器油的选择十分严格,必须按照相关行业标准对牵引变压器油的稳定性及安全性进行严格的测试。而轨道交通车辆用牵引变压器处在特殊的工作环境中,因此对轨道交通车辆用牵引变压器油较一般的电力变压器油提出了更高的要求^[1]。

合成酯作为高端润滑材料,本身具有优异的热氧化安定性、润滑性、低毒、原料可再生、易生物降解等优良性能,广泛应用于现代工业^[2]。马琳桥^[3]采用相转移法合成了具有广泛发展前景的“绿色”天然表面活性剂——蔗糖多酯(SPE),合成的蔗糖多酯在具有良好表面性能的同时,还具有以石油化工产物为原料的表面活性剂所欠缺的可再生性、安全性、温和性及生物降解性。鞠超等^[4]以航空发动机基础油季戊四醇多元醇酯(5750)与双三氟甲烷磺

收稿日期:2020-04-28 修回日期:2020-07-21

作者简介:贾玉玉(1985-),女(汉族),山东济南人,讲师,主要从事精细化学品的开发及应用;徐前进(1988-),男(汉族),山东烟台人,工程师,主要从事合成酯及特种精细化学品的开发及应用。

酰亚胺锂(LiTFSI)为原料,通过“原位”法制备了一系列合成酯型离子液体,具有更优异的热稳定性。孟杰等^[5]将合成酯绝缘油与矿物油的绝缘性能进行分析比较,结果发现合成酯不但具有良好的散热和绝缘性能,同时还具有耐湿性、阻燃性、生物降解性、高燃点、低倾点以及对环境友好等一系列优点。虽然合成酯作为变压器油在国外电力系统各个领域已获得了广泛应用,但是在国内对合成酯变压器油的性能特征还缺乏了解,尤其在轨道交通领域,目前仅有中车公司部分项目应用合成酯变压器油进行试验,实际的规模化应用仍需时日。

1 轨道交通变压器油标准

我国高铁的总体特点是速度很高、客流量大且集中,对列车的安全系数要求高,所以对列车的一些防火安全标准提出了更高的要求。我国虽然制定发布了一些机车车辆防火标准,但整体上的适用范围不全面、规定内容零散不统一,尚未形成适用于多类型铁路机车车辆的防火标准体系,如CJ/T 416—2012适用于地铁、轻轨、单轨、有轨及磁浮等车辆的防火标准,参考了德国标准DIN 5510-1988;TB/T 3138—2006针对速度等级在200 km/h以下的动车组用材料作了防火规定,TB/T 3237—2010对200 km/h以上的动车组用材料作了防火规定,二者均参考了UIC 564-2:1991与NF F 16-101:1988。目前DIN 5510系列标准和NF F 16系列标准已完全被EN 45545系列标准代替,该系列标准统一并形成了机车车辆的防火和验证要求,是当前国内外最完整的铁路机车车辆防火标准。我国铁路车辆正在高速发展中,应以国际铁路车辆的防火标准(EN 45545)为基础,建立完善、统一、合理、适用于我国铁路车辆的防火标准。

BS EN 45545-2 2013第33页明确规定:铁路车辆上的电工用绝缘液体着火危险等级最小在K级,BS EN 61039:2008、GB/T 5169.24—2008以及IEC/TS 60695-1-40:2002都对绝缘液体的等级标准做了明确规定:将燃点 $>300^{\circ}\text{C}$ 的绝缘液体定位K级。也就是说,只有绝缘液体的燃点 $>300^{\circ}\text{C}$ 才允许在铁路车辆上使用。而矿物油的燃点一般在 150°C 左右,所以,欧洲早已停止矿物油在铁路车辆电气设备上的使用,全部采用燃点 $>300^{\circ}\text{C}$ 的绝缘液体作为牵引变压器用绝缘油。

2 合成酯

合成酯作为一种介电绝缘液体最早由英国通用电气公司于1976年成功开发并首先应用于军工类产品,自开发至今已使用了近40年,在铁路市场也已应用多年,符合欧盟EN45545及IEC 61099系列国际标准要求^[6],其主要客户有西门子、庞巴迪、阿尔斯通、中国中车等。从企业社会责任角度,客户都明确要求使用具备环保性、耐低温性、耐湿性、防火阻燃性及耐高温性等特点的合成酯绝缘液作为所有轨道交通等公共设施上的绝缘油。

合成酯绝缘油是一种用于变压器以及电力设备的绝缘油,符合IEC 61099:1992要求,被归为T1类型,即一种无卤素季戊四醇酯。合成酯绝缘油的特性可参考表1。

由于合成酯易于生物降解且阻燃,燃点高于 300°C ,被定义为K级防火绝缘液体,应用范围较广。在欧洲市场,合成酯不但在铁路行业得到广泛应用,而且在风能、海洋、输配电、船舶等领域也开始逐渐替代矿物油成为变压器的重要绝缘液,在深海钻探、大功率电力元件冷却等领域合成酯的应用也在同步开发。由于合成酯特殊的可靠性和优越的防火性能,可直接代替矿物油,近年来其市场需求量逐年增加,根据多年使用经验及多方面测试,市场对合成酯的肯定度越来越高。以西子公司为例,除轨道交通上用的车载及线路供电牵引变压器外,包括海上风电变压器、海上油台特种变压器、户内或接近民居的变电站、220 kV无灭火设施地下水力发电站升压变压器,甚至400 kV的英国伦敦市中心利用变压器余热供暖的户内环保型高压电力变压器等都采用合成酯作为绝缘油。

3 合成酯作为轨道交通变压器油的必要性

3.1 防火安全性能

在变压器油应用领域,合成酯闪点可达到 260°C ,燃点则高于 300°C ,而矿物油闪点为 150°C ,燃点为 170°C 。合成酯在防火方面最显著的特点是具有自熄灭特性,不会使变压器发生爆炸,而矿物油一旦发生火灾,变压器爆炸的可能性较大。另外合成酯还通过了SGS、UL、FM等国际权威防火认证^[7]。实践表明,变压器发生火灾后,其火势会迅速蔓延,将导致高昂的损失。合成酯为变压器火灾风险提供了一个完美的解决方案,在世界范围内得到了重视,在过去20多年的合成酯使用过程中,没有

表1 合成酯绝缘油的基本参数(参考IEC 61099-2010)^[7]

Tab.1 Basic parameters of synthetic ester insulating oil (on the basis of IEC 61099-2010)			
特性	测试方法	指标值	合成酯值
颜色	ISO 2211-1973	最大200	125
外观	IEC 61099.2-2010	无杂质	无杂质
密度(20℃)/(kg/m ³)	ISO 3675-1998	≤1 000	970
运动黏度(20℃)/(mm ² /s)	ISO 3104-1996	≤35.0	28
运动黏度(-20℃)/(mm ² /s)		≤3 000	1 400
闪点/℃	ISO 2719-2002	≥250	275
燃点/℃	ISO 2592-2017	≥300	322
折射率(-20℃)	ISO 5661-1983	1.33~1.70	1.4555
倾点/℃	ISO 3016-1994	≤-45	-60
结晶情况	IEC 61099.9-2010	无结晶	无结晶
合成酯中音速/(m/s)	—	—	1 385
水含量/(mg/kg)	IEC 60814-1997	≤200	50
中和值/(mgKOH/g)	IEC 61099.11-2010	≤0.03	<0.03
氧化稳定性	IEC 61125-1992	≤0.30	0.01
酸性物质总含量-污泥总含量		≤0.01	0
低热值/(MJ/kg)	ASTM D 240-02(2007)	<32.0	31.6
击穿电压/kV	IEC 60156-2018	≥45	>75
90℃、50Hz下的介质损耗因数(tanδ)	IEC 60247-2004	≤0.03	<0.03
直流体积电阻率(90℃)/(GΩ·m)	IEC 60247-2004	≥2	>50

发生过一次火灾。

绝缘油的抗引燃性测试方法如下:将氧乙炔焊枪火焰(超过2 000℃)直接置于金属浅盘子中的绝缘油液表面,将热电偶置于盘子底部用于检测离油液表面较远端的油液温度。一旦焊枪点燃,便开始记录油液的温度。合成酯和矿物油的抗引燃性测试结果如图1所示。从图1可以看出,矿物油的温度迅速上升,仅过了4 min便开始燃烧。即使移走火源,矿物油还会继续燃烧并产生浓烈的黑烟。相对而言,合成酯温度升高的速度要缓慢许多,70 min后温度才超过260℃,但仍旧没有被点燃。这是因为合成酯的热容高,且热导率大,燃点也高。

3.2 烟雾指数

通过 Tewarson 测试仪检测变压器油燃烧产生的烟量,测试仪上安装有光源和感光器。对3种变

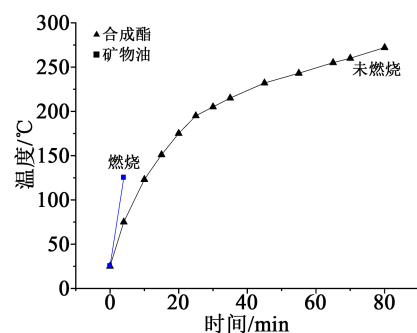


图1 合成酯和矿物油抗引燃性比较
Fig.1 Comparison of ignition resistance between synthetic ester and mineral oil

压器油(合成酯、硅油、矿物油)的烟密度测试发现,合成酯的烟雾指数比硅油和矿物油要低,合成酯达到最大烟雾密度需要17 min,而矿物油只需要4 min,硅油需要8 min。同时合成酯燃烧时只产生白色稀

薄烟雾,硅油产生白色浓密烟雾且含有有机硅氧化物粒子,而矿物油则产生黑色浓烟。发生火灾时,相较于采用硅油和矿物油的变压器,采用合成酯的变压器将为人们留出更多的逃生时间。

3.3 环保性能

研究表明,合成酯是可生物降解的产品^[9],并且对水体无污染。采用微生物分解测试其生物降解能力,结果如图2所示。从图2可以看出,合成酯在28 d内降解率高达89%,而同样条件下硅油的降解率仅为3.1%,矿物油的降解率为9.7%,后两者被认定为非生物降解产品。合成酯不仅易生物降解,而且即使泄漏到河道中,在极高的浓度下(1 000 mg/L),也不会抑制活化泥的呼吸作用,不会对水生生物造成危害。

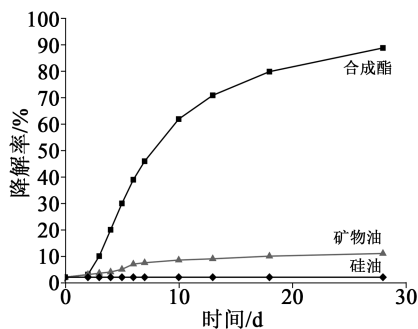


图2 绝缘油的生物降解性测试结果

Fig.2 Test results of biodegradability for insulating oil

3.4 耐湿性

合成酯具有极好的耐湿性,意味着其可吸收更多的水分,同时保证其优越的介电性能,这对变压器,尤其是机车牵引变压器来说尤为重要。20℃时3种绝缘油击穿电压与水分含量的关系如图3所示。从图3可以看出,合成酯的水分含量达到 600×10^{-6} 时,其击穿电压仍能保持在75 kV以上,而矿物油的水分含量超过 30×10^{-6} 时,其击穿电压就会骤降至35 kV以下。硅油的耐湿性也比合成酯油的低,当水分含量超过 100×10^{-6} 时,其击穿电压就会骤降至35 kV。当绝缘油中水分过高时,矿物油和硅油击穿性能下降较多,不能满足变压器运行要求,需及时进行处理,这无形中增加了维护成本。

绝缘纸的老化速度与含水量有直接的关系,研究表明,纤维素的含水量每增加1%,绝缘纸的寿命将缩短10%。纤维素的分解会释放出水分,加剧绝缘纸的老化,所以应尽可能确保绝缘纸的干燥。与硅油和矿物油相比,合成酯可以捕获更多的水分,

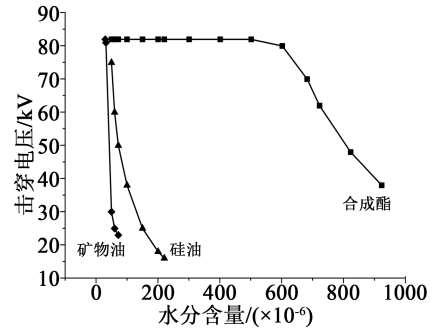


图3 20℃时绝缘油击穿电压与水分含量的关系

Fig.3 Relation between breakdown voltage and water content of insulating oil at 20℃

减少绝缘纸的含水量,因此绝缘纸的老化速度也会降低^[9]。

在过载条件下,绝缘纸包裹的导体温度上升,会提高产生气泡的风险。若绝缘纸的含水量为2.6%,则气泡产生的温度为130℃;若含水量为1.1%,则气泡产生的温度为165℃,而气泡的产生会降低绝缘油体系的电气性能。合成酯能吸收更多的水分,确保绝缘纸的干燥,因此,在过载条件下,其吸收水分的阈值更高。

3.5 抗氧化性能

氧气会加速变压器油的老化,进而导致沉积和油液基本性能的劣化。此外,高温条件下氧化会加剧,即使在密闭系统内,油液也会老化。特别是在呼吸式变压器如牵引变压器中,其变化的负载及紧凑型设计会使变压器油应力增加。

采用ASTM D2112-2015中的加压容器氧化实验,通过检测氧耗时间来检测油液的氧化反应。图4为绝缘油的加压容器氧化稳定性测试结果。一般而言,压降一定时,耗时越长表明油液的氧化稳定性越高。由图4可知,合成酯在测试中耗时最长,说明其氧化稳定性最佳^[7]。

3.6 低温稳定性

西门子用MIDEL合成酯做了-50℃恶劣气温环境下的实验^[10],结果表明,-50℃下合成酯仍能保证变压器的正常运行。此外,该公司还在-50℃的极度寒冷条件下,采用环保、黏度较矿物油稍高的合成酯对15MVA变压器进行了一周的试验测量,结果表明,合成酯可以保证变压器在低温条件下稳定运行,使用安全可靠,可以在加拿大、俄罗斯、中国内蒙古和斯堪的纳维亚地区使用,这些地区的温度可以达到-40℃甚至-50℃。

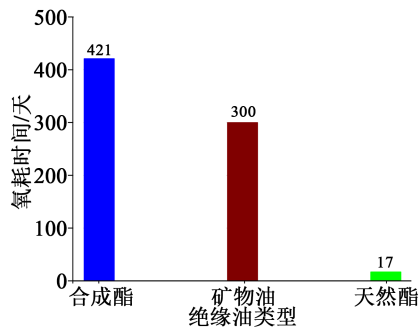


图4 加压容器氧化稳定性测试结果

Fig.4 Test results of oxidation stability for insulating oil in pressurized vessel

3.7 后期维护

合成酯的高性能优势使其售后维修成本降低,不需要经常更换或过滤,而矿物油则需要定期检测、过滤,由此带来停工等问题。硅油也会因为易受潮而需要定期检查,防止其因受潮而导致击穿电压下降。

4 结论

合成酯作为轨道交通变压器油有着无可替代的优势,相对于矿物油有着明显的防火安全性,相对于硅油具有良好的生物可降解性。但受制于成本因素,合成酯在轨道交通变压器油方面的应用并

未广泛开展,随着工艺条件的改进及成本优化以及各国对于安全环保方面的重视,未来合成酯在轨道交通变压器油方面的应用将越来越受到重视。

参考文献:

- [1] 燕乃涛,赵其敏,董涛. 高速铁路动车牵引变压器及用油分析[J]. 工程技术,2015(27):249.
- [2] 张伟,刘东志. 合成酯类润滑油的发展与现状[J]. 化学推进剂与高分子材料,1988(5):8-10.
- [3] 马琳侨. 日化用蔗糖多酯的合成和应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [4] 鞠超,马瑞,李维民,等. 耐高温合成酯型离子液体润滑剂的制备及性能研究[J]. 润滑与密封,2018,43(10):28-32.
- [5] 孟杰,孙国亮,李基成. MIDEI合成酯绝缘油性能特征以及与浇注树脂和矿物油绝缘特性的比较[J]. 变压器,2010,47(5):40-49.
- [6] 胡贵,龙谷宗,吴勇. 200km/h动车组牵引主变压器的国产化设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2014(4):16-18.
- [7] M&I Materials Ltd. MIDEI[MIDEI7131 kinematic viscosity[EB/OL]. (2017-03-14). <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEI-7131-Product-Brochure.pdf>.
- [8] 刘月峰. 酯型变压器油的研制[J]. 合成润滑材料,2016,43(2):4-6.
- [9] 马海红,马瑞,李维民,等. 合成酯类润滑油水解性能研究现状[J]. 石油学报,2016,32(5):1075-1082.
- [10] BACHINGER F, HAMBERGER P. Thermal measurement of an ester-filled power transformer at ultralow temperatures: Steady state[J]. Procedia Engineering,2017,202:130-137.