

# 变压器油的制备及其电气性能试验研究

张海洪\*, 徐岩峰, 郭莎莎, 韩龙年, 马莉莉  
(中海油炼化化工科学研究院, 北京 102209)

**摘要:**采用高(中)压加氢处理-加氢补充精制、低压加氢脱酸-糠醛精制-白土补充精制 2 种不同工艺,以中海油环烷基常二线馏分油为原料制备变压器油,并进行击穿特性与介电特性研究。结果表明,实验室制备的变压器油成品性能满足 GB 2536—2011 标准要求。在试验测试条件范围内,实验室制备的 3 种变压器油的雷电冲击击穿性能和介电特性满足相关标准要求,与市售参比变压器油的电气性能相当。

**关键词:**环烷基;变压器油;雷电冲击击穿性能;介电特性

**中图分类号:**TE624.431

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2019)07-0176-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.07.036

## Preparation of transformer oil by different processes and study on its electrical property test

ZHANG Hai-hong\*, XU Yan-feng, GUO Sha-sha, HAN Long-nian, MA Li-li  
(CNOOC Research Institute of Refining and Petrochemicals, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The high pressure hydrotreating-hydrofinishing process, the medium pressure hydrotreating-hydrofinishing process and traditional process (low pressure hydrotreating deacidification-furfural refining-clay refining) are respectively employed to prepare transformer oil with atmospheric cut-2 distillate of CNOOC naphthenic base oil as raw material, and the characteristics of breakdown and dielectric properties are also studied. The experimental results show that the performance for production of three kinds of prepared transformer oil by different processes can meet the requirements of China's GB 2536—2011 standard. In the range of test conditions, the breakdown performance and dielectric properties of these three kinds of transformer oil meet the relevant standard requirements, which are comparable with the commercially available transformer oil in electrical property.

**Key words:** naphthenic base; transform oil; lightning impulse breakdown performance; dielectric properties

随着国内输变电路朝着长距离、特高压、直流输电的方向发展,作为重要的变压器配套绝缘材料,变压器油的需求量也呈逐年增加趋势。传统工艺(低压加氢脱酸-糠醛精制-白土补充精制组合工艺)和加氢工艺(加氢处理-加氢补充精制工艺)是目前变压器油生产的 2 种重要工艺。目前,克拉玛依石化公司和中海沥青股份有限公司采用传统工艺生产变压器油,上海高桥石化公司、中海沥青(四川)和(泰州)公司采用加氢工艺生产变压器油<sup>[1-4]</sup>。传统工艺和加氢工艺各有利弊,但采用合适的原料并通过调节工艺参数均可得到满足 GB 2536—2011 等标准的变压器油。变压器油电气性能的好坏将与变压器的安全运行状态息息相关。按照电力系统的常规检测要求,目前一般测试变压器油的击穿性能和介电特性。变压器油的击穿性能主要包括工频击穿和雷电冲击击穿,主要为变压器运行过程中其内部的绝缘材料需要承受正常运行的工频电压和来自雷电等因素导致的雷电冲击电压。介电特性主要是指变压器油的极化性质和介质损耗。为避免取样困

难、损伤绝缘材料等情况出现<sup>[5-8]</sup>,试验采用介电频谱测量技术。

中海油拥有丰富的环烷基原油资源,其中绥中 36-1、秦皇岛 32-6 和锦州 9-3 原油的常二线馏分油是生产变压器油的良好原料<sup>[9]</sup>。笔者以中海油绥中 36-1 常二线馏分油为原料,采用 3 种工艺制备变压器油,并测试其击穿性能和介电特性,考察 3 种变压器油的电气性能,以市售中石油某环烷基 45# 变压器油作为参比油样,进行基础性质与电气性能的分析对比。

## 1 实验部分

### 1.1 原料油的性质分析

以中海油青岛研究中心 50 万 t/a 常减压装置生产的绥中 36-1 常二线馏分油为原料,原料油的典型性质如表 1 所示。

由表 1 中的数据可知,此常二线原料油密度(20℃)为 0.906 1 g/cm<sup>3</sup>,倾点为-39℃,硫氮质量分数较低,是非常典型的环烷基馏分油,采用一定的加

收稿日期:2018-10-16;修回日期:2019-04-09

作者简介:张海洪(1984-),男,硕士,工程师,主要从事润滑油产品的开发与工艺研究工作,通讯联系人,zhanghh3@cnooc.com.cn。

工手段可以生产环烷基变压器油。

表1 原料油典型性质

项目	原料油	试验方法
密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.9061	GB/T 1884
运动黏度(40℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	10.05	GB/T 265
闪点(闭口)/℃	132	GB/T 261
硫质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1800	GB/T 17040
倾点/℃	-39	ASTM D97
氮质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	400	化学发光法
常压馏程/℃		
5%	294.0	ASTM D1078
10%	300.5	
50%	320.0	
90%	350.5	

## 1.2 工艺路线

采用全加氢工艺(加氢处理-加氢补充精制),饱和原料油中一定量的芳烃得到族组成适宜的变压器油基础油;也可采用传统工艺(加氢脱酸、糠醛精制和白土补充精制)除去其中的非理想组分得到变压器油基础油。按照一定的温度蒸馏切割后,加入适量添加剂进行调合,得到变压器油产品。具体工艺路线如图1、图2所示<sup>[10]</sup>。

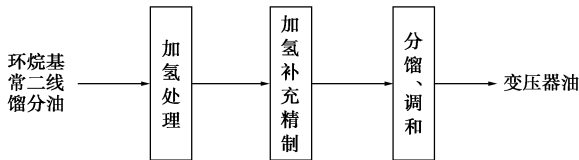


图1 高(中)压加氢工艺生产变压器油工艺路线

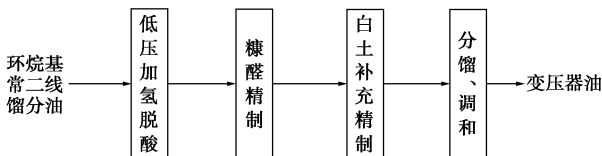


图2 传统工艺生产变压器油工艺路线

## 2 结果与讨论

### 2.1 变压器油的制备

在200 mL固定床加氢试验装置和1 kg/h糠醛精制装置上进行试验。选择常见市售加氢处理催化剂LH23、加氢补充精制催化剂FV-10、加氢脱酸催化剂3936为试验用催化剂,在中试装置上经过大量条件试验得到优化后的工艺条件。在该工艺条件下制备变压器油产品大样。利用3种工艺制备的3种变压器油产品的主要性质如表2所示。由表2中可以看出,在适宜的试验条件下,采用该3种工艺均可

以制备性质满足GB 2536—2011要求的变压器油产品。

表2 3种变压器油性质分析

分析项目	高压	中压	传统	GB 2536—2011 <sup>[11]</sup>
	加氢 (1号)	加氢 (2号)	工艺 (3号)	
试验条件				
反应温度/℃	320	330	—	—
反应压力/MPa	15	8	4	—
萃取温度/℃	—	—	60/80	—
剂油比	—	—	1.5:1	—
分析项目				
运动黏度(40℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	10.17	9.42	8.50	≤12
运动黏度(-30℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1410	1590	1290	≤1800
倾点/℃	-34	-34	-36	≤-30 <sup>①</sup>
闪点(闭口)/℃	142	143	143	≥135
密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.8861	0.8922	0.8890	≤0.8950
碳型分布/%				
C <sub>A</sub>	4.2	5.2	6.6	无要求
介质损耗因数(90℃)	0.0003	0.0005	0.0007	≤0.005
击穿电压(处理)/kV	80	82	81	≥70
酸值/[mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	0.006	0.004	0.006	≤0.01
界面张力/(mN·m <sup>-1</sup> )	42	44	45	≥40
赛博特颜色	+27	+27	+27	无要求
氧化安定性试验(120℃,500 h)				
酸值/[mg(KOH)·g <sup>-1</sup> ]	0.04	0.07	0.08	≤1.2
油泥质量分数/%	0.03	0.02	0.06	≤0.8
介质损耗因数(90℃)	0.0012	0.0022	0.0080	≤0.5

注:①变压器油满足1-20℃变压器油(特殊)GB 2536—2011要求。

### 2.2 电气性能试验

#### 2.2.1 雷电冲击击穿性能试验研究

变压器油具有优异的绝缘性能和散热冷却性能,在变压器内部一般设计为绝缘材料。变压器油的击穿性能试验是检验变压器油实际运行性能的主要手段,通常所述击穿性能试验主要是雷电冲击击穿电压。

雷电冲击击穿电压试验方法为GB/T 21222—2007《绝缘液体雷电冲击击穿电压测定方法》中的参考方法A,鉴于“在发散场中,极性对击穿特性有显著的作用,特别是对针-球形状的电极影响更大。在这种电场分布下,油样的化学组成对负脉冲击穿特性起主要作用”,因此本试验中选择使用负脉冲。基于标准2.5条“与工频击穿电压不同,针-球脉冲击穿基本上与水分、颗粒等杂质无关。因此,只要杂质浓度不超过液体的使用极限,就不采用任何预防

措施来控制这些杂质”,因此本次试验中所有变压器油样品均不进行前处理。测试结果的重复性满足标准中测试值差值<30 kV 的要求<sup>[12-15]</sup>。试验所用的油杯参数如表 3 所示。雷电冲击试验结果如表 4 所示。

表 3 油杯的主要参数

项目	数值
容量/mL	300
保证闪络电压/kV	大于 300
间隙/mm	5、10、15、25(±0.01)
针电极材质	不锈钢
球电极材质	铜
球电极的直径/mm	(13±0.01)

表 4 不同样品试验结果对比

样品	雷电冲击击穿电压/kV					平均值	最大 最小值 差值	相对 误差/ %
	1	2	3	4	5			
1 号	181.0	174.2	179.6	179.5	179.8	178.8	6.8	3.8
2 号	180.4	190.0	188.6	199.6	195.8	190.9	19.2	10.0
3 号	202.0	206.6	213.9	210.6	220.7	210.8	18.7	8.9
4 号 <sup>①</sup>	185.6	200.9	200.6	190.7	186.7	192.9	15.3	7.9

注:①4 号是市售某环烷基 45# 变压器油(下同)。

由以上数据分析可知,4 种变压器油的雷电冲击击穿电压均满足相关要求。

### 2.2.2 介电特性试验研究

作为弱极性电介质,变压器油分子正负电荷中心没有重合。由于分子的不规则热运动和本身具有的偶极矩,因此宏观上偶极矩等于零。当施加外电场时,在电流作用下,变压器油分子会沿着外电场的方向运动,因此出现了宏观上的偶极矩,电介质表面就会出现束缚电荷,产生电介质极化,这种差异一般通过介电频谱表现出来,直观表现为变压器油介电常数实部,而介电常数的虚部表示绝缘材料的电导损耗以及松弛极化引起的能量损耗。本部分试验仅测试介电常数实部,用于表示 4 种变压器油的电介质极化情况<sup>[16-18]</sup>。

本部分试验采用的试验仪器为 Novcontrol Concept 80 介电谱仪。将变压器油倒入液体池内上下电极之间的间隙,通过在上下电极之间施加一定的电压信号,在测量回路采集相应的电信号来进行测试<sup>[19]</sup>。

液体池示意图如图 3 所示。

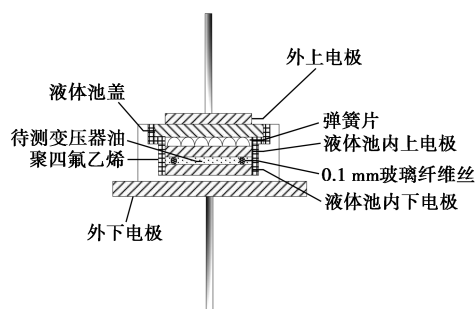
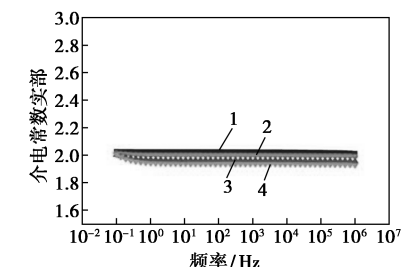
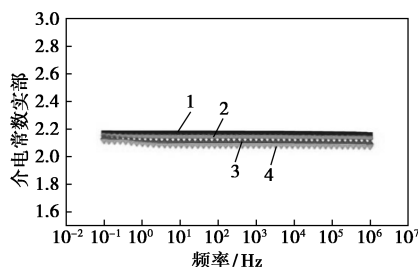


图 3 液体池结构图

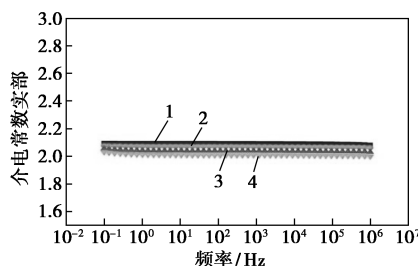
在-10、20、50、80℃ 4 种温度条件下,10<sup>-1</sup>~10<sup>6</sup> Hz 频率段内,4 种变压器油介电常数实部试验结果如图 4 所示。



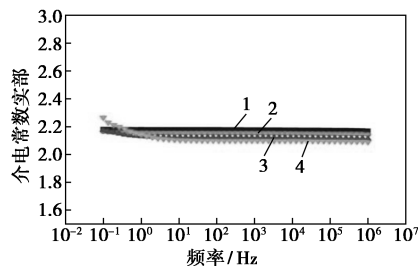
(a) 1 号



(b) 2 号



(c) 3 号

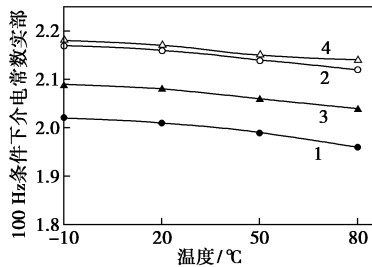


(d) 4 号

1—-10℃; 2—20℃; 3—50℃; 4—80℃

图 4 变压器油介电常数实部测试结果

为了更直观地观察,对4种变压器油在100 Hz不同温度条件下的介电常数实部进行了对比,结果如图5所示。



1—1号;2—2号;3—3号;4—4号

图5 100 Hz不同温度介电常数实部对比

由图4可以看出,同一温度下,在 $10^{-1} \sim 10^6$  Hz范围内,4种变压器油介电常数实部大致相同,均在2.0左右。随着频率的升高,4种变压器油的介电常数实部先逐渐下降后保持平稳,且略有下降的变化趋势。这是由于变压器油中偶极子的转动跟不上外加电场频率的变化,松弛极化并不能充分完成,导致介电常数实部随着频率的升高逐渐降低<sup>[21-22]</sup>。

由图5可以看出,随着温度的升高,4种变压器油介电常数实部均略有降低,这是由于升高温度,变压器油分子的热运动逐渐加剧,导致在外加电场方向上的极化受到阻碍,极化难以形成。频率一定时,温度越高,变压器油的松弛极化完成的越充分,因此介电常数实部降低。

### 3 结论

以中海油环烷基常二线馏分油为原料,采用不同工艺制备了变压器油产品,并进行了电气性能试验,与市售环烷基变压器油进行性质的全面评估对比,得出以下结论:

(1)以绥中36-1常二线馏分油为原料,采用全加氢工艺(高压加氢处理-加氢补充精制、中压加氢处理-加氢补充精制)和传统工艺(低压加氢脱酸-糠醛精制-白土补充精制)均可以制备满足GB 2536—2011标准要求的变压器油,灵活调整工艺参数可制备不同芳烃含量的变压器油产品。

(2)在试验测试条件范围内,4种变压器油工频击穿和雷电冲击击穿性能基本一致,击穿前后油中溶解气体含量较低。

(3)在试验测试条件范围内,4种变压器油介电常数实部大致相同,均在2.0左右,其介电特性随温度和频率变化保持一致。

### 参考文献

- [1] 付玉娥.中国变压器油市场研究[A].2010大连润滑油技术经济论坛论文集,2010:9-12.
- [2] 张海洪,郭莎莎,秦一鸣,等.环烷基馏分油生产变压器油的研究[J].润滑油,2016,31(3):46-49.
- [3] 王会娟,于会民,马书杰,等.不同饱和烃对变压器油性能的影响[J].石油炼制与化工,2017,(9):69-74.
- [4] 郭春梅,马书杰,王会娟,等.变压器油基础油在低热下析出气体性能的研究[J].石油炼制与化工,2012,43(10):77-81.
- [5] 李卫国,曾臣,王健一,等.非环烷基变压器油和环烷基变压器油宽频介电频谱对比分析[J].高电压技术,2017,43(1):218-224.
- [6] 王健一,李金忠,张书琦,等.以天然气为原料的气制变压器油的典型性能分析[J].高电压技术,2016,42(9):2974-2979.
- [7] 曾臣.天然气合成变压器油电气性能及介电特性研究[D].北京:华北电力大学(北京),2016.
- [8] 付玉娥,于恩强,商希红,等.环保橡胶油的研究开发及工业化[J].润滑油,2011,(5):7-11.
- [9] 任建松,马莉莉.环烷基润滑油高压加氢生产技术适应性分析[J].润滑油,2015,30(4):53-57.
- [10] 夏强斌,任建松,郭春梅,等.高压加氢生产环烷基变压器油的中型试验研究[J].石油炼制与化工,2016,47(3):94-97.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会.GB 2536—2011.电工流体变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油[S].北京:中国标准出版社,2012-06-01.
- [12] 李钢.纳米改性变压器油的电气特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [13] 贾国滨.GTL油浸纸板的电气性能研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.
- [14] 于会民,马书杰,张琦,等.变压器油烃组成及添加剂与其介电常数、介质损耗因数和电阻率的关联性研究[J].变压器,2013,50(2):35-39.
- [15] 赵勇进,刘丽岚,张良县.含水量对变压器油介电性能影响的研究[J].高压电器,2017,(11):159-163.
- [16] 廖瑞金,马志钦,郝建,等.水分对变压器油和绝缘纸频域介电谱特性的影响[J].高电压技术,2010,36(12):2869-2875.
- [17] 林春耀,杨贤,马志钦,等.老化和水分对电容性套管绝缘纸频域介电特性的影响[J].南方电网技术,2016,10(1):18-25.
- [18] 吴广宇,王晓剑,李先浪,等.有机酸对油纸绝缘热老化及频域介电谱特性的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1424-1432.
- [19] 齐波,赵晓林,张书琦,等.冲击电压下变压器油中空间电场测量方法及装置[J].中国电机工程学报,2017,37(6):1843-1849.
- [20] 陈庆国,龚细秀,李福祺,等.变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J].高电压技术,2002,28(12):23-25.
- [21] 李海燕,何梦,黄林,等.超高压变压器油中酸类物质的生成规律和变压器热老化状况分析[J].高电压技术,2015,41(6):1959-1964.
- [22] 杨鑫,李卫国,魏斌,等.G/E在液氮和变压器油中的雷电冲击沿面闪络特性对比[J].电工技术学报,2016,31(23):132-140. ■