

文章编号:1671-6833(2012)04-0125-04

# TiO<sub>2</sub> 纳米粉体对变压器油工频击穿性能的影响

陈志强<sup>1</sup>,牛田野<sup>2</sup>,李洪波<sup>2</sup>,田凤兰<sup>2</sup>,王长义<sup>2</sup>

(1.白鸽磨料磨具有限公司,河南 郑州 450006;2.郑州供电公司,河南 郑州 450000)

**摘要:** 纳米半导体晶体表面存在大量的本征表面态,当晶体与变压器油接触时可生成能够有效捕获电子的表面态.考察了不同浓度 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子对变压器油的改性作用,并以具有不同表面修饰状态的纳米二氧化钛粉体为改性剂,对克拉玛依 25 号变压器油进行改性,研究了纳米粉体表面修饰种类对改性油绝缘性能的影响.击穿性能测试和拟合结果表明:TiO<sub>2</sub> 半导体纳米粉体可以提高变压器油的击穿性能,在一定浓度范围内,TiO<sub>2</sub> 纳米粒子浓度越大,改性变压器油的工频绝缘性能越好;TiO<sub>2</sub> 纳米粉体的表面修饰成分会影响变压器油的击穿性能,乙酸、丙酸和丙酸+己胺的改性作用依次增大;修饰物分子非极性链的越长,对变压器油击穿性能的改善越好.

**关键词:** 变压器油;纳米粒子;二氧化钛;工频击穿

**中图分类号:** D611.61

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2012.02.029

## 0 引言

随着国内输电距离、输送容量的增长,既要求变压器性能好、技术先进,还要保证运行安全、可靠、经济,因此变压器油作为变压器绝缘和冷却的重要介质,其性能要求随着变压器的发展不断改进<sup>[1]</sup>.当前有研究使用具有磁性的导电纳米粒子来提高变压器油的绝缘强度<sup>[2]</sup>,因为纳米半导体晶体表面存在大量的本征表面态,当晶体与变压器油接触时,表面态通常以羟基化形式存在,在纳米 TiO<sub>2</sub> 粒子的羟基化表面上存在着大量晶格氧离子(OL<sub>2</sub>-H<sup>+</sup>)和羟基钛(Ti-OH),这些粒子均可生成能够有效捕获电子的表面态<sup>[3-8]</sup>.笔者考察了不同浓度 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子对变压器油的改性作用,并以具有不同表面修饰状态的纳米二氧化钛粉体为改性剂,对克拉玛依 25 号变压器油进行改性,研究不同修饰成分对改性油绝缘性能的影响.

## 1 试验方案及测试方法

### 1.1 不同浓度 TiO<sub>2</sub> 纳米粉体对变压器油工频击穿性能试验

取相同质量的纯二氧化钛粉体,采用超声波振荡法将其分别充分溶于克拉玛依 25 号变压器

油中,制备纳米二氧化钛粉体质量浓度为 0.006, 0.01, 0.03 g/L 的改性变压器油.

在相同条件下静置于干燥皿 14 h 以上,再进行工频击穿测试.

### 1.2 不同修饰剂 TiO<sub>2</sub> 纳米粉体对变压器油工频击穿性能试验

用超声波振动法<sup>[9]</sup>制备乙酸包覆的纳米二氧化钛粉体,丙酸包覆的纳米二氧化钛粉体,丙酸+己胺包覆的纳米二氧化钛粉体.

取制备好的相同质量的二氧化钛粉体,采用超声波振荡法将其分别充分溶于克拉玛依 25 号变压器油中,制备纳米二氧化钛粉体浓度为 0.01 g/L 的改性变压器油.

在相同条件下静置于干燥皿 14 h 以上后进行工频击穿测试.

### 1.3 测试方法

根据国家绝缘油击穿电压测定法 GB/T507—2002<sup>[10]</sup>,为了保证所得数据的准确性并满足统计要求,每次击穿测试取 30 个有效击穿数据,并对数据进行 Weibull 统计分析,计算出所有样品 50% 击穿概率时的击穿电压值.

## 2 试验结果与分析

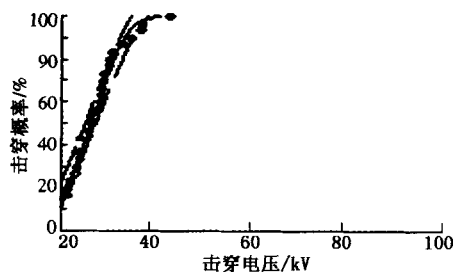
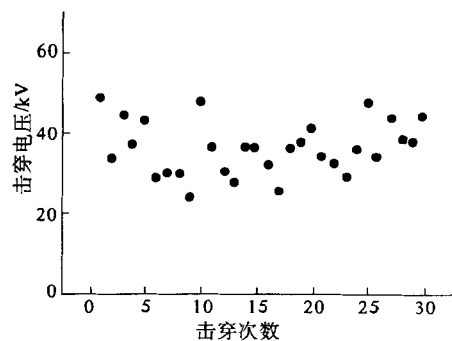
### 2.1 不同浓度 TiO<sub>2</sub> 对变压器油的改性作用

利用纯 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子对变压器油进行改性,

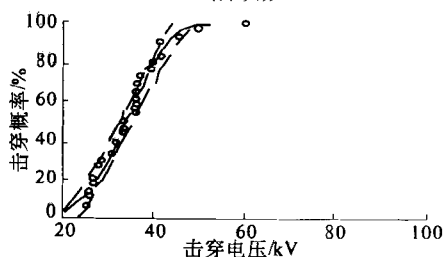
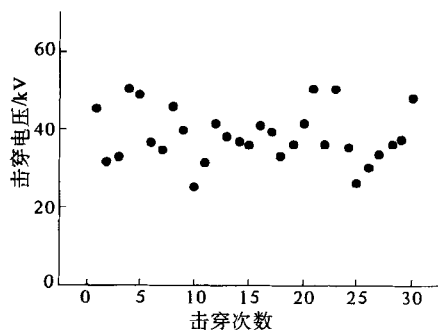
收稿日期:2012-01-28;修回日期:2012-04-09

作者简介:陈志强(1965-),男,河南郑州人,白鸽磨料磨具有限公司工程师,主要从事变配电运行、检修及试验方面的工作,E-mail: czq0035@sina.com.

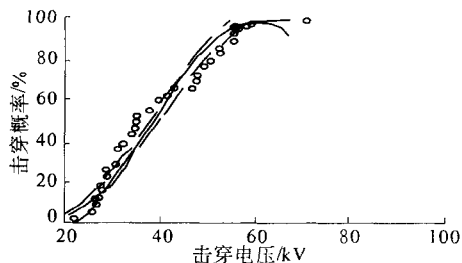
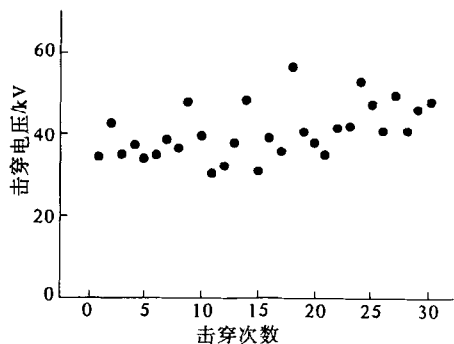
研究了纳米粉体不同用量对变压器油击穿性能的影响,测试结果如图1所示,其中上图为每次试验击穿数据分散图,下图为Weibull统计分析图.



(a) 纳米粉浓度 0.006 g/L



(b) 纳米粉浓度 0.01 g/L



(c) 纳米粉浓度 0.03 g/L

图1 不同  $\text{TiO}_2$  纳米粉体浓度变压器油的击穿电压

Fig.1. The breakdown voltage of transformer oil with  $\text{TiO}_2$  nanopowder at different dose

由图1可以看出,经过  $\text{TiO}_2$  纳米粒子改性过的变压器油的击穿电压数据分散性较小. 根据 Weibull 拟合结果, 纳米  $\text{TiO}_2$  粉体浓度为 0.006 g/L 的改性变压器油的击穿电压为 36.36 kV; 纳米  $\text{TiO}_2$  粉体浓度为 0.01 g/L 的改性变压器油的击穿电压为 38.41 kV; 纳米  $\text{TiO}_2$  粉体浓度为 0.03 g/L 的改性变压器油的击穿电压为 40.51 kV. 不同  $\text{TiO}_2$  纳米粉体浓度变压器油的 50% 击穿电压和 1% 击穿电压见表1所示.

表1 不同  $\text{TiO}_2$  纳米粉体浓度变压器油的 50% 击穿电压和 1% 击穿电压

Tab.1 The 50% and 1% breakdown voltage of transformer oil with  $\text{TiO}_2$  nanopowder at different dose

试验样品	50% 击穿电压/kV	1% 击穿电压/kV
纯油	37.30	14.60
$\text{TiO}_2$ (0.006 g/L)	36.36	14.23
$\text{TiO}_2$ (0.01 g/L)	38.41	23.78
$\text{TiO}_2$ (0.03 g/L)	40.51	24.06

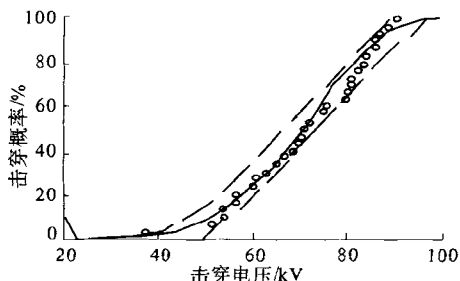
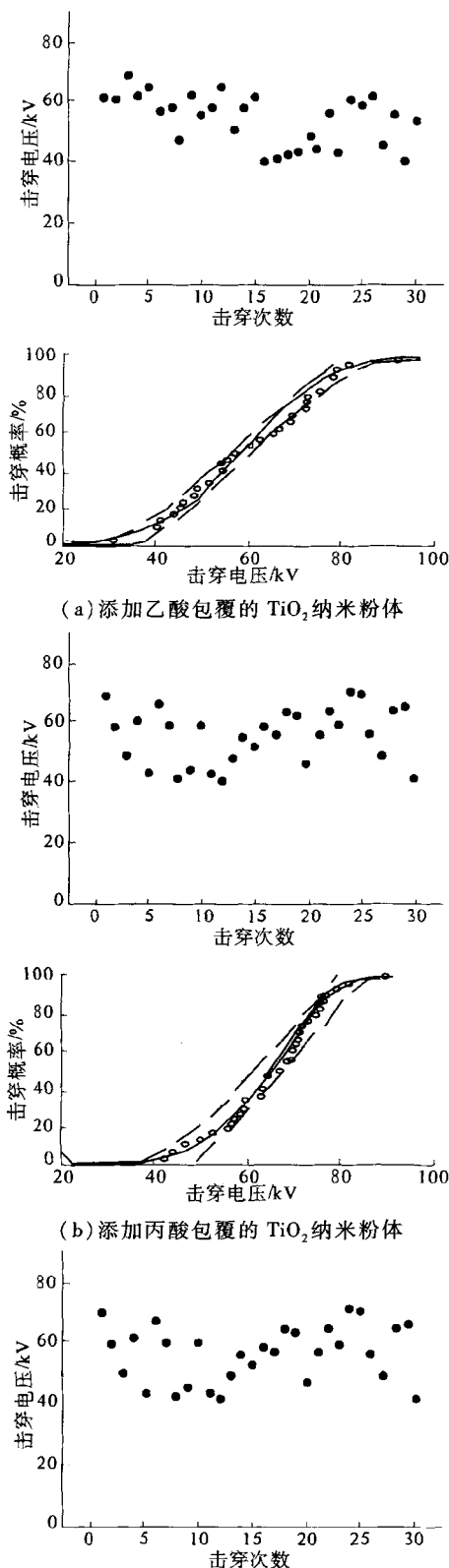
从表1可知:与纯油相比,当  $\text{TiO}_2$  纳米粉体浓度为 0.006 g/L 时,击穿电压会有所下降,约 2.5%;浓度为 0.01 g/L 时,击穿电压升高约 3%;当浓度增大至 0.03 g/L 时,击穿电压提高约 8.6%. 这说明在一定浓度范围内,  $\text{TiO}_2$  纳米粒子会提高变压器油的工频绝缘性能.

## 2.2 不同修饰剂 $\text{TiO}_2$ 纳米粉体对变压器油的改性作用

不同修饰剂包覆的  $\text{TiO}_2$  纳米粒子对变压器油进行改性测试结果如图2所示,其中上图为每次试验击穿数据分散图,下图为 Weibull 统计分析图.

由图2可以看出,经过添加不同修饰剂包覆的  $\text{TiO}_2$  纳米粒子改性过的变压器油的击穿电压分散性较大. 根据 Weibull 拟合结果,当纳米  $\text{TiO}_2$  粉体浓度为 0.01 g/L 时,经乙酸包覆的纳米  $\text{TiO}_2$  粉体改性过的变压器油的击穿电压数值为 54.87

kV;经丙酸包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>粉体改性过的变压器油的击穿电压数值为 55.78 kV;经丙酸 + 己胺包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>粉体改性过的变压器油的击穿电压数值为 57.8 kV. TiO<sub>2</sub>纳米粉体不同修饰物对变压器油的 50% 击穿电压和 1% 击穿电压的影响见表 2.



(c) 添加丙酸 + 己胺包覆的 TiO<sub>2</sub> 纳米粉体

图 2 不同修饰剂包覆的 TiO<sub>2</sub> 纳米粉体后变压器油的击穿电压

Fig. 2 The breakdown voltage of transformer oil with TiO<sub>2</sub> nanopowder coated by different modifier

由表 2 可知,与纯油相比,不同种类的修饰剂在相同浓度(0.01 g/L)下,乙酸包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>粉体配制的油样,击穿电压提高约 3%;丙酸包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>粉体配制的油样,击穿电压增加达到 7.5%;丙酸 + 己胺包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>粉体配制的油样,击穿电压增加达到 11.3%。通过分析认为:丙酸比乙酸多一个甲基,增加了位阻,修饰后提高了 TiO<sub>2</sub>分子的非极性,从而提高了变压器油的击穿电压;与丙酸相比,丙酸 + 己胺包覆的纳米 TiO<sub>2</sub>分子的非极性更大,在油中的分散性更好,击穿电压更高。

表 2 TiO<sub>2</sub> 纳米粉体不同修饰物对变压器油的 50% 击穿电压和 1% 击穿电压的影响

Tab. 2 Influence on 50% and 1% breakdown voltage of transformer oil with different modifier

试验样品	50% 击穿电压/kV	1% 击穿电压/kV
纯油	51.91	20.31
乙酸包覆 TiO <sub>2</sub> (0.01 g/L)	54.87	24.55
丙酸包覆 TiO <sub>2</sub> (0.01 g/L)	55.78	34.82
丙酸 + 己胺包覆 TiO <sub>2</sub> (0.01 g/L)	57.8	34.28

### 3 结论

(1) TiO<sub>2</sub> 半导体纳米粒子加入变压器油,可以提高改性后变压器油的介电性质,在一定浓度范围内, TiO<sub>2</sub> 纳米粒子浓度越大,改性变压器油的工频绝缘性能越好。

(2) 随着 TiO<sub>2</sub> 分子表面修饰物分子非极性链增长,改性后变压器油的击穿性能越好,用丙酸包覆纳米二氧化钛粉体改性效果比乙酸包覆的纳米二氧化钛粉体改性效果好,而采用丙酸 + 己胺包覆的纳米二氧化钛粉体改性效果最好。

(3)  $\text{TiO}_2$  米粉体的表面修饰成分会影响  $\text{TiO}_2$  纳米粉体在变压器油中的分散性, 可以通过引入互溶有机物的表面修饰物, 提高  $\text{TiO}_2$  分子在油中的分散性, 以达到提高变压器油击穿性能的作用。

### 参考文献:

- [1] 张文亮, 张国兵. 特高压变压器油技术指标及若干问题探讨[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 1-6.
- [2] 袁志雄. 浅谈电力变压器油质劣化原因和防范措施[J]. 青海电力, 2006, 25(4): 50-52.
- [3] 万达. 油中颗粒度与油隙击穿电压关系[M]. 南京: 江苏电力科学研究院, 2008: 169-183.
- [4] 王乾, 杨立新. 变压器油电气性能的影响因素分析[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 61-65.
- [5] VLADIMIR ARNE H, ARNOLD R, et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles [J]. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1998.
- [6] 邹玲, 乌学东, 陈海刚, 等. 表面修饰二氧化钛纳米粒子的结构表征及形成机理[J]. 物理化学学报, 2001, 17(4): 305-309.
- [7] 吴金星, 曹玉春, 李泽, 等. 纳米流体技术研究现状与应用前景[J]. 化工新型材料, 2008, 36(10): 10-12.
- [8] 付姚, 曹望和, 田莹.  $\text{TiO}_2$  纳米薄膜电极中光生载流子传输特性研究[J]. 化学学报, 2006, 64(17): 1761-1764.
- [9] 卢倩, 向礼琴, 黄景兴, 等.  $\text{TiO}_2$  油基纳米流体的制备和流变性能[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 500-504.
- [10] 中国电力企业联合会. GB/T 507-2002 绝缘油击穿电压测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

## Effect of $\text{TiO}_2$ Nano-powder on the Industrial Frequency Power Breakdown

### Properties of Transformer Oil

CHEN Zhi-qiang<sup>1</sup>, NIU Tian-ye<sup>2</sup>, LI Hong-bo<sup>2</sup>, TIAN Feng-lan<sup>2</sup>, WANG Chang-yi<sup>2</sup>

(1. White Dove (Group) Company Limited, Zhengzhou 450006, China; 2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** There are plenty of intrinsic cation states on the surface of nano-semiconductor crystals. When the crystals contact the transformer oil, surface states that can capture electrons easily are formed. In this paper,  $\text{TiO}_2$  nano-powders with different surface modifications have been used to improve the property of transformer oil (Kelamayi 25). The modification effects of nano-power's on insulating property of transformer oils have been investigated. And the modifying effects of  $\text{TiO}_2$  nano-powder with different concentrations on transformer oil have been studied. The breakdown property tests and fitting results show that  $\text{TiO}_2$  nano-powder can improve the breakdown properties of transformer oil and within some concentrations, the higher the concentration of  $\text{TiO}_2$  nano-powder, the better the power frequency insulating property of modifying transformer oil. Besides, The modifying agents play a key role in the dispensability of  $\text{TiO}_2$  nan-powder in the transformer oil. With the increasing of nonpolar segment in the modifying agent, the breakdown property of the modified oils gets more enhancements.

**Key words:** transformer oil, nano-powder,  $\text{TiO}_2$ , breakdown properties