

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.008

变压器植物、矿物绝缘油的微生物降解机制及差异

陈江波¹, 王飞鹏², 蔡胜伟¹, 李剑², 何妍¹, 文刚²,
陈程¹, 范帆², 吴俐亚², 刘芮彤³

(1.中国电力科学研究院 武汉 43007;2.重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,
重庆 400044;3.国网辽宁省电力公司电力科学研究院,沈阳 110006)

摘要:采用《快速生物降解性:密闭瓶法实验》的方法,研究了菜籽植物绝缘油(RDB)、FR₃ 变压器绝缘油(FR₃)和 25[#] 变压器绝缘油的微生物降解性能。实验结果表明:RDB、FR₃ 和 25[#] 变压器绝缘油的微生物降解率分别为 98.87%、99.57%和 37.73%。根据《新化学物质危害评估导则》(HJ/T 154—2004),说明 RDB 和 FR₃ 属于易生物降解的化学物质,而 25[#] 变压器绝缘油属于难生物降解的化学物质。造成植物绝缘油与矿物绝缘油降解差异主要是因为构成物质的种类不同、不饱和和化学键的含量不同。而植物绝缘油之间的降解差异研究甚少,笔者从水解动力学的角度,揭示不同植物绝缘油降解差异性的机制。

关键词:生物降解;化学键;水解动力学;植物绝缘油;矿物绝缘油

中图分类号:TM214

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)02-061-08

Microbial degradation mechanisms and differences of plant and mineral insulating oil of transformers

CHEN Jiangbo¹, WANG Feipeng², CAI Shengwei¹, LI Jian², HE Yan¹,
WEN Gang², CHEN Cheng¹, FAN Fan², WU Liya², LIU Ruitong³

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, P.R.China; 2. State key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, P.R.China)

Abstract: The microbial degradation performance of rapeseed plant insulating oil (RDB), FR₃ transformer insulating oil (FR₃) and 25[#] transformer insulating oil is studied by methods in *Rapid Biodegradability: Closed Bottle Test*. The results show that the degradation rates of RDB, FR₃ and 25[#] transformer insulating oil are 98.87%, 99.57% and 37.73%, respectively. According to the *New Chemical Hazard Assessment Guidelines* (HJ/T 154-2004), RDB and FR₃ are biodegradable chemicals, while 25[#] transformer insulating oil belongs to chemicals difficult to biodegrade. The degradation difference between plant and mineral insulating oil is mainly because the types of constituent substances and the content of

收稿日期:2017-07-31

基金项目:国家电网公司科技项目(植物绝缘油变压器环保性评估)。

Supported by State Grid Corporation of science and technology projects(Environmental Assessment of Plant Insulation Oil Transformer).

作者简介:陈江波(1977—),男,教授高级工程师,主要从事高压电器实验及故障诊断技术研究,(E-mail)chenjiangbo@epri.sgcc.com.cn。

unsaturated chemical bonds are different. As the research on the degradation difference of different kinds of plant insulating oil is very limited, the degradation mechanisms of different kinds of plant insulating oil are revealed from the perspective of hydrolysis kinetics in this paper.

Keywords: biodegradability; chemical bond; hydrolysis kinetics; plant insulating oil; mineral insulating oil

绝缘油是一种优良的液体绝缘材料,主要应用于变压器、断路器、电流和电压互感器、套管等高压设备中^[1-4]。填充绝缘油的目的不仅能消除设备中存在的气隙,而且还能有效改善设备的散热性能,起到了提高电气设备绝缘强度的作用^[5]。

目前,电力系统中广泛应用的液体绝缘材料是从天然石油中炼制的矿物绝缘油。矿物绝缘油具有优良的绝缘性能、较为低廉的成本等特点。但是矿物绝缘油难以生物降解,其广泛分布在农村、水源附近、城市街道等地方的油浸式电力变压器,一旦发生泄漏将会对自然环境造成严重的污染。2009年,俄罗斯萨扬—舒申斯克水电站发生重大事故,近 100t 矿物绝缘油泄漏造成叶尼赛河流域严重污染^[6]。吴维中等^[7]研究表明残留在土壤中的矿物绝缘油,不仅改变土壤正常的结构和功能,影响植物生长,而且通过食物链进入人体,对人体的健康造成不可估量的影响。不仅如此,当变压器绝缘油流入到土壤中,与土壤中含有重金属铜协同作用时,会造成更深一步的复合污染^[8]。

随着环境污染问题愈加突出,开发满足环保要求的绝缘油已成为新的课题。自 20 世纪 90 年代以来,植物绝缘油作为液体绝缘介质的研究受到更多科学工作者的重视^[9-11]。植物油来源于天然的油料作物,经过精炼处理后的植物绝缘油不仅具有优良的电气绝缘性能,而且来源广泛,具有可再生性。除此之外,植物绝缘油燃点高于 300℃。目前,大量实验和理论研究表明植物绝缘油具有良好的电气性能。作者实验室炼制^[12]的 RDB 植物绝缘油能满足 GB/T7595—2000《运行中变压器油质量标准》的要求^[13]。它将可能替代矿物绝缘油成为绿色环保型变压器绝缘油。

目前,通常采用快速生物降解的方法评价绝缘油的环保性能。快速生物降解是指在特定的时间内,接种微生物对受试物的降解能力^[14],能够有效地鉴别物质对环境的破坏性和持久性,同时也是评价和控制环境风险的基本指标^[15]。如果通过标准方法得到该受试物能被微生物迅速的降解,则列为“易生物降解”类物质。国际上普遍采用经济合作与发展的 6 种经典快速生物降解性测试方法^[16]。目前,快速生物降解方法主要应用于矿物油、纤维素、油脂等方面的研究,但对于变压器绝缘油的生物降解方面研究尚属于空白。

按照国家标准 GB/T 21831—2008《快速生物降解性:密闭瓶法实验》进行实验,研究 3 种不同变压器绝缘油的生物降解性能以及降解机理^[17]。

1 实验

1.1 实验材料

(1) 微生物菌种

实验用菌源取自重庆市污水处理厂初级沉降池,所取菌液的生物活菌水平(CFU)为 $(4.0 \sim 9.5) \times 10^5$ CFU/mL(CFU 为菌落形成单位,Colony forming unit),并保存于 6℃左右的冰箱中。

(2) 实验样品

菜籽植物绝缘油(RDB):由作者实验室炼制。

FR₃ 植物绝缘油(FR₃):库伯公司生产。

25# 变压器绝缘油:采购中石油化工厂。

参比基准物:苯甲酸钠(生物降解性能优异的分析纯苯甲酸钠)。

(3) 试剂

99.5% KH₂PO₄,购自重庆川东化工有限公司;99% Na₂HPO₄·2H₂O,99% K₂HPO₄,96% NH₄Cl,购自上海化学试剂总厂;98% MgSO₄·7H₂O,96% FeCl₃·6H₂O,购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;99% Na₂EDTA·2H₂O 和 99% C₆H₅COONa,购自武汉无机盐化工厂,以上均为分析纯。

(4) 仪器

不锈钢手提式压力蒸汽灭菌器、超净工作台、美国 Ohaus 数显电子天平、pH 计 PHS-3C、溶解氧测定仪、美

国哈希 HQ40 d、恒温培养箱、日本三洋 MIR-253、塞 BOD 瓶、冰箱、PH 计 PHS-3C、摇床。培养基的制备如下:

a) 磷酸盐缓冲液: 8.50 g 磷酸二氢(KH_2PO_4)、21.75 g 磷酸氢二钾(K_2HPO_4)、33.40 g 二水合磷酸氢二钠($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和 0.5 g 氯化铵(NH_4Cl),用纯水溶解,定容至 1 L, pH 为 7.4。

b) 氯化钙溶液: 27.5 g 无水氯化钙(CaCl_2),用水溶解,定容至 1 L。

c) 硫酸镁溶液: 22.50 g 七水合硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$),用水溶解,定容至 1 L。

d) 氯化铁溶液: 0.25 g 六水合氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),用水溶解,定容至 1 L。加入 0.4 g/L EDTA 二钠盐缓冲溶液保存。

取磷酸盐缓冲液、氯化钙溶液、硫酸镁溶液和氯化铁溶液各 1 mL 于 800 mL 实验用水中,定容至 1 L。

1.2 实验方法与过程

为考察本实验方案的可行性,实验过程中选用某已知降解率的苯甲酸钠作为参比油进行本方案的降解实验,以验证实验方案的可行性。毒性对照物,以验证实验浓度下 RDB、FR₃、25[#] 变压器绝缘油对接种物(即菌液)中微生物是否具有毒性。

将 36 只 BOD 瓶分组并编号:受试物(即测试样品)组 I 号 8 只,受试物组 II 号 8 只,受试物组 III 号 8 只,空白对照组 4 只,以排除接种物中有机物对实验的影响;程序对照组 2 只,以验证接种物在实验条件下是否具有活性;毒性对照组 I 号 2 只,毒性对照组 II 号 2 只,毒性对照组 III 号 2 只。其中:

① 受试物组 I 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL RDB 贮备液和 0.3 mL 接种物;

② 受试物组 II 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL FR₃ 贮备液和 0.3 mL 接种物;

③ 受试物组 III 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL 25[#] 变压器绝缘油贮备液和 0.3 mL 接种物;

④ 空白对照组: BOD 瓶中加入 0.3 mL 接种物;

⑤ 程序对照组: BOD 瓶中加入 1.5 mL 1.0 mg/mL 苯甲酸钠贮备液和 0.3 mL 接种物;

⑥ 毒性对照组 I 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL RDB 贮备液、1.5 mL 1.0 mg/mL 苯甲酸钠贮备液和 0.3 mL 接种物;

⑦ 毒性对照组 II 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL FR₃ 贮备液、1.5 mL 1.0 mg/mL 苯甲酸钠贮备液和 0.3 mL 接种物;

⑧ 毒性对照组 III 号: BOD 瓶中加入 1.5 mL 25[#] 变压器绝缘油贮备液、1.5 mL 1.0 mg/mL 苯甲酸钠贮备液和 0.3 mL 接种物。

将 300 mL 培养液分别加入各 BOD 瓶中,塞好瓶塞后,放置在恒温摇床避光培养 28 d。设置摇床的温度为 30℃,摇床的转速为 180 r/min。

因本实验方案是通过检测碳氢化合物含量变化来表征该植物绝缘油的生物可降解性,故实验过程中所有玻璃仪器均用洗液洗涤,以确保仪器内壁不含有碳氢类化合物。

为了研究 RDB、FR₃ 和 25[#] 变压器绝缘油的微生物降解性能,实验以 RDB、FR₃ 和 25[#] 变压器绝缘油为研究对象,以苯甲酸钠为参比物,以废水处理出水为接种物进行微生物降解实验。在 28 d 培养期中,每隔一段时间用溶解氧测定仪测定溶解氧气体量(DO)值。

1.3 生物降解率的计算

以测得的 DO 值计算生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD),再通过 BOD 值除以化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)即得到生物降解率,计算公式如下:

$$BOD = \frac{m_1 - m_2}{m_3}, \quad (1)$$

$$D = \frac{BOD}{COD} \times 100, \quad (2)$$

式中: m_1 为受试物氧消耗量, mg; m_2 为空白对照氧消耗量, mg; m_3 为空白对照氧消耗量, mg; COD 为在强酸并加热条件下,一定量的重铬酸盐氧化水样中还原物质所消耗氧化剂的量,可表示为每毫克受试物消耗的氧气毫克数(mg/mg)。

2 结果与讨论

2.1 实验可行性分析

为了确保实验结果的可信度,根据 GB/T 21831—2008《快速生物降解性:密闭瓶法实验》中规定实验进行到 14 d 时,程序对照组和毒性对照组的降解率不低于 60%,则说明实验方法是可行的。由表 1 和式(1)和式(2)计算可得,程序对照组和毒性对照组的生物降解率均大于 60%,说明所选接种物具有活性,且在该实验浓度下的 RDB、FR₃ 和 25[#] 变压器绝缘油对接种物中的微生物没有毒性,因此,采用本实验方法是可行的。

表 1 DO 值随时间的变化

天数/d	空白 对照组	程序 对照组	毒性对照 组 I 号	毒性对照 组 II 号	毒性对照 组 III 号
0	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51
3	8.32	2.36	2.22	2.30	2.38
7	8.01	2.01	1.89	1.98	2.11
10	8.01	2.01	1.87	1.90	2.09
14	7.88	1.99	1.85	1.88	2.05

2.2 培养期内绝缘油的生物降解

在 28 d 微生物培养期内,空白对照组、RDB、FR₃ 和 25[#] 变压器绝缘油试样中 DO 值随时间的变化如表 2 所示。

表 2 DO 值随时间的变化

天数/d	空白 对照组	RDB	FR ₃	25 [#] 矿物 绝缘油
0	8.51	8.51	8.51	8.51
3	8.32	2.56	2.53	7.31
7	8.01	2.18	2.16	6.18
10	8.01	1.79	1.75	6.13
14	7.88	1.59	1.53	6.13
21	7.86	1.43	1.38	6.11
28	7.86	1.42	1.37	6.10

根据表 2 中空白对照组和受试物组的数据以及式(1)和式(2)计算出 RDB、FR₃ 和 25[#] 矿物绝缘油的生物降解率,结果如图 1(a)所示。在 0~3 d 内植物绝缘油呈现一个快速降解的过程,RDB、FR₃ 的生物降解率从 0 分别增加到 86.3%、87.2%。这是因为微生物处于对数生长期和稳定期,微生物生长代谢旺盛、酶系活跃,消耗氧量大大所致。在 4~28 d 内,FR₃、RDB 的生物降解缓慢直到最后趋于稳定,主要是因为受试物含量不足导致。从图 1(b)可以看出在整个生物降解过程中,RDB 与 FR₃ 的降解趋势一致,但是 RDB 的降解率始终低于 FR₃ 的降解率。28 d 时 RDB 和 FR₃ 的微生物降解分别是 98.9% 和 99.6%。与 RDB 与 FR₃ 的降解趋势不同,25[#] 矿物绝缘油在 0~10 d 内生物降解比较平稳,到第 10 d,其生物降解率达到 37.1%。在 11~28 d 内,25[#] 矿物绝缘油的降解率只增加了 1.3%,并且根据曲线可以看出降解率最终趋于稳定。根据《新化

学物质危害评估导则》(HJ/T 154—2004)中以降解率 60%为分界点,当降解率大于 60%属于易降解化学物质,反之则属于难降解化学物质。因此,FR₃、RDB 属于易降解化学物质,25# 矿物绝缘油属于难降解化学物质。

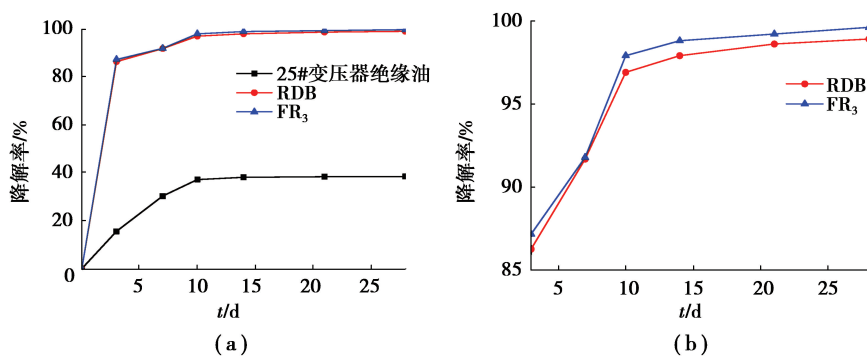


图 1 RDB、FR₃ 和 25# 变压器绝缘油的降解变化曲线

Fig.1 The degradation curves of RDB、FR₃ and 25# mineral insulating oil

通过重复上述实验 3 次减少实验过程中产生的偶然误差。表 3 可以看出 3 次实验结果其方差均小于 3%,实验结果有较好的稳定性。

表 3 RDB、FR₃ 和 25# 变压器绝缘油的平均降解率

Table 3 The average degradation rate of RDB、FR₃ and 25# mineral insulating oil

%

	第 1 次实验降解率	第 2 次实验降解率	第 3 次实验降解率	平均降解率
RDB	99.2	98.5	98.9	98.87
FR3	99.6	99.4	99.7	99.57
25# 变压器绝缘油	38.4	37.1	37.7	37.73

3 降解机理

生物降解性是指在微生物作用下,受试物经过酶的催化作用最终分解为二氧化碳,水或组织中间体,并以一定条件下、一定时间内受试物被微生物降解的百分率来量度。生物降解过程包含 3 种,即酯的水解、长链碳氢化合物的氧化和芳烃的氧化开环,3 种生化降解过程都与受试物的活化能密切相关^[18]。结果表明,25# 变压器绝缘油的降解率远远低于植物绝缘油的降解率,这主要是因为其由异构烷烃、环烷烃和少量芳香烃构成,其难与水发生水解反应,而且不饱和和化学键含量甚低,难以受微生物发生攻击氧化;而植物绝缘油的主要成分是甘油三酯,其在碱性、酸性甚至中性条件下可发生水解反应^[19]。而植物绝缘油之间降解性存在差异这可能是由于两种绝缘油具有不同的水解能力。物质的组成与水解能力存在密切的关系。FR₃ 是库伯公司通过大豆油精炼而成,而 RDB 是作者实验室通过菜籽油精炼而成。大豆油和菜籽油来源于天然的油料作物,其主要成分是甘油三酯。植物油碘值的测定是参照 GB/T5532—1995,菜籽油的碘值为 120(lg/100 g),大豆油的碘值为 130(lg/100 g)。随着碘值的增大,水解活化能逐渐降低^[20-20],同时水解活化能与水解速率满足 Arrhenius 定律可以写成如下形式^[21-23]:

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right), \quad (3)$$

式中: K 为反应温度 T 时的表观速率系数; A , Ea 为与温度和浓度无关的常数; R 为摩尔气体常量; A 称为指前系数; Ea 称为表观活化能。由于后者处于指数位置而显得更为重要, Ea 较小的差异就会导致 K 相当

大的不同,相比之下可以忽略 A 的影响。由公式可知水解速率随表观活化能的降低而增高,用 Arrhenius 经验定律的对数形式 $\ln K = \ln A - E_a/RT$, 关联各反应温度下植物绝缘油的水解速率常数 K , 水解速率测定方法参照文献^[24], 即以 $\ln K$ 对 $1/T$ 作图, 如图 2 所示。

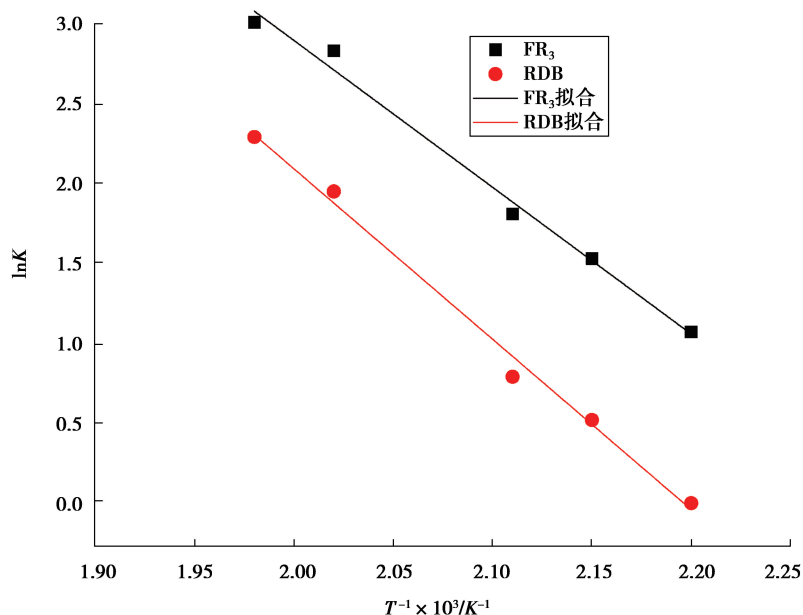


图 2 不同植物油脂水中水解反应的 Arrhenius 关联

Fig.2 Arrhenius plots for hydrolysis of vegetable oils

从图 2 可以看出,从斜率可计算得到 RDB、FR₃ 的水解活化能分别为 31.2~37.7 kJ/mol。因此,大豆油的水解能力大于菜籽油的水解能力^[22]。同时随着碘值的增加,水解活化能逐渐降低。可以得出,随着碘值的增加,植物绝缘油越容易水解。

同时,植物油水解产物包含饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、双不饱和脂肪酸、三不饱和脂肪酸。表 4 列出了菜籽油和大豆油经水解后脂肪酸含量。大豆油中包含的双不饱和脂肪酸和三不饱和脂肪酸的含量分别高达 51% 和 6.8%, 远远高于菜籽油中包含的双不饱和脂肪酸和三不饱和脂肪酸含量 22.1% 和 11.1%, 而剩余部分为饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸。大豆油不饱和化学键高于菜籽油不饱和化学键, 不饱和化学键越多越易受微生物攻击发生氧化。因此,大豆油不仅水解速率高于菜籽油, 而且大豆油含有更多的不饱和化学键, 更容易受微生物攻击氧化, 使它具有更强的生物降解能力。综上所述,FR₃ 较 RDB 有较高的降解率。

表 4 植物油主要脂肪酸组成

Table 4 Fatty acid content of plant oil %

脂肪酸含量	菜籽油	大豆油
饱和脂肪酸	7.9	14.2
单不饱和脂肪酸	55.9	22.5
双不饱和脂肪酸	22.1	51
三不饱和脂肪酸	11.1	6.8

4 结 论

实验通过《快速生物降解性:密闭瓶法实验》的方法,研究了RDB、FR₃和25[#]变压器绝缘油的生物降解性能。结果表明RDB、FR₃和25[#]变压器绝缘油的微生物降解率分别为98.87%、99.57%和37.73%。在3种变压器绝缘油当中,25[#]变压器绝缘油降解率较低是因为其由烷烃构成,难与水发生水解反应,而且不饱和化学键含量甚低,难以受微生物发生攻击氧化。然而植物油主要成分油甘油三酯容易水解。FR₃较RDB生物降解率高,因为FR₃不仅更容易水解,而且不饱和化学键含量高更易受微生物攻击发生氧化。根据《新化学物质危害评估导则》(HJ/T 154—2004),说明RDB和FR₃属于易生物降解的化学物质,而25[#]变压器绝缘油属于难生物降解的化学物质。因此,RDB和FR₃与25[#]变压器油相比,它们的易降解特性使得在变压器绝缘方面的应用将更加环保。

参考文献:

- [1] 陈伟根,杨剑锋,凌云,等.变压器油纸绝缘沿面放电特性及其产气规律[J].重庆大学学报,2011,34(1):94-99.
CHEN Weigen, YANG Jianfeng, LING Yun, et al. Surface discharge characteristics and gas generation law in oil-paper insulation of transformer[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(1):94-99(in Chinese)
- [2] 杨丽君,黄加佳,许佐明,等.高压交流套管的油纸绝缘热老化特性及寿命模型研究[J].电工技术学报,2016,31(5):144-151.
YANG Lijun, HUANG Jiajia, XU Zuoming, et al. Investigation on thermal aging characteristics and lifetime model of oil-paper insulation for HV AC bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(5):144-151.(in Chinese)
- [3] Subroto C, Suwamo. Modelling of dry lightning impulse test on 145 kV oil impregnated paper bushing for high voltage transformer[C]//Power Engineering and Renewable Energy. IEEE,2017.
- [4] 何毅帆.倒置式电流互感器非故障状态下绝缘油中氢气异常的机理分析[J].高压电器,2013,49(12):110-115.
HE Yifan. Mechanism analysis of hydrogen abnormality in insulation oil under non-fault condition in the invented current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(12):110-115.(in Chinese)
- [5] Qi B, Zhao X, Zhang S, et al. Measurement of the electric field strength in transformer oil under impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation,2017,24(2):1256-1262.
- [6] 王国秉.关于俄罗斯萨扬·舒申斯克水电站事故的思考[J].山西水利科技,2010(2):1-5.
WANG Guobing. Some thoughts about the Sayano-Shushenskaya hydropower plant incident in Russia[J]. Shanxi Hydropower,2010(2):1-5.(in Chinese)
- [7] 吴维中,孙铁珩,洪丽华,等.沈抚污水灌区的矿物油污染与综合防治[J].农业环境科学学报,1983(6):10-14.
WU Weizhong, SUN Tieheng, HONG Lihua. Mineral oil pollution and integrated control in Shen Fu sewage irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science,1983(6):10-14.(in Chinese)
- [8] 王大业.矿物油及其与铜的复合污染效应研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.
WANG Danye. Study on the combined pollution effects of mineral oil and copper[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2009.(in Chinese)
- [9] 刘光祺,钟力生,于钦学,等.植物绝缘油研究现状[J].绝缘材料,2012,45(3):34-39.
LIU Guangqi, ZHONG Lisheng, YU Qinxue, et al. Research situation of vegetable insulating oil[J]. Insulating Materials,2012,45(3):34-39.(in Chinese)
- [10] 李剑,党剑亮,杨丽君,等.三种植物绝缘油的理化与电气性能的比较[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(9):42-45.
LI Jian, DANG Jianliang, YANG Lijun, et al. Comparison on physical and chemical characteristics and electric properties of three types of vegetable insulating oil[J]. Journal of Chongqing University,2007,30(9):42-45.(in Chinese)
- [11] 胡婷,吴义华,周竹君,等.植物绝缘油碱炼工艺的优化[J].绝缘材料,2012(4):60-63.
HU Ting, WU Yihua, ZHOU Zhujun, et al. Optimization of Alkali Refining Process for Vegetable Insulating Oil[J]. Insulating Materials,2012(4):60-63.(in Chinese)

- [12] 李晓虎, 李剑, 孙才新, 等. 植物油中提取的环保液体绝缘材料[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(1): 36-41.
LI Xiaohu, LI Jian, SUN Caixin, et al. Environment friendly dielectric fluid refined from vegetable oil[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(1): 36-41. (in Chinese)
- [13] 李剑, 姚舒瀚, 杜斌, 等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 353-363.
LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 353-363. (in Chinese)
- [14] 刘刚. 化学品测试方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
LIU Gang. Chemical Testing Methods[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013. (in Chinese)
- [15] Liu Y H, Zhang S H, Ji G X, et al. Occurrence, distribution and risk assessment of suspected endocrine-disrupting chemicals in surface water and suspended particulate matter of Yangtze River (Nanjing section) [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2017, 135: 90-97.
- [16] He M, Mei C F, Sun G P, et al. The Effects of Molecular Properties on Ready Biodegradation of Aromatic Compounds in the OECD 301B CO₂, Evolution Test[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2015, 71(1): 1-13.
- [17] 国家标准化管理委员会. GB/T 21857—2008 化学品快速生物降解性密闭瓶法实验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Standardization Administration of China GB/T 21857—2008 Quick biodegradable chemicals closed bottle method test[S]. Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese)
- [18] 丁建华, 方建华, 江泽琦, 等. 可生物降解润滑油综述[J]. 合成润滑材料, 2017, 44(2): 38-43.
DING Jianhua, FANG Jianhua, JIANG Zeqi, et al. Overviews of biodegradable lubricants[J]. Synthetic Lubricants, 2017, 44(2): 38-43. (in Chinese)
- [19] Xiao H, Li Y, Wang H. A stochastic kinetic study of preparing fatty acid from rapeseed oil via subcritical hydrolysis[J]. Applied Energy, 2017(204): 1084-1093
- [20] Pandit A B, Joshi J B. hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(19): 3440-3442.
- [21] Van B M, Roskam G J, Penninger J M L. Thermal hydrocracking of indan. Effects of the hydrogen pressure on the kinetics and Arrhenius parameters[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2017, 7(3): 351-362.
- [22] 孙辉, 吕秀阳, 陈良. 不同植物油脂在近临界水中水解反应动力学的比较[J]. 化工学报, 2007, 58(4): 925-929.
SUN Hui, LYU Xiuyang, CHEN Liang. Comparison of hydrolysis kinetics of different vegetable oils in near-critical water[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2007, 58(4): 925-929. (in Chinese)
- [23] 孙大贵, 杨凤, 刘作华, 等. 植物绝缘油的制备及电气性能研究[J]. 中国油脂, 2010, 35(11): 36-39.
SUN Dagui, YANG Feng, LIU Zuohua, et al. Preparation of insulating oil from vegetable oil and its electrical characteristics[J]. China Oils & Fats, 2010, 35(11): 36-39. (in Chinese)
- [24] 邹平. 植物绝缘油的油纸浸渍与水解动力学特征及纳米改性方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZOU Ping. Insulation oil impregnated paper and hydrolysis kinetics characteristics and nano-modified methods [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)

(编辑 王维朗)