

生物降解油浸绝缘纸特征产物及微观结构研究

王杰¹, 吴晓晖², 胡仕红¹, 兰新生¹, 张力¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:为研究微生物对油浸绝缘纸降解,文中将试样油纸质量比按10:1制样,采取自然污染、人工接种、高温杀菌方法预处理对照试样,试样3~4中加入金属铝,试样5中加入金属铜,选择微生物最适宜生长环境温度为15~35℃下进行生物降解试验。通过高效液相色谱仪、气相色谱仪、扫描电子显微镜等仪器,检测分析微生物降解油浸绝缘纸产物及气体产物含量变化趋势并观察试验前后绝缘纸纤维素微观结构变化。试验结果表明,经微生物降解后,产生了糠醛、CO和CO₂特征产物,绝缘纸纤维素结构破坏。CO和CO₂含量随微生物降解先增后减,然后再增加,最后趋于稳定;绝缘纸纤维素微观形貌发生了改变,纤维素结晶区纤维表面变粗糙、部分松散或断裂,非结晶区出现小的孔隙,结晶区与非结晶区连接不够紧密。降解特征产物及其气体产物变化特征为辨识非运行电力设备绝缘纸是否发生生物污染提供重要参考依据。

关键词:微生物;降解;油浸绝缘纸;特征产物;微观结构

中图分类号:TM 216 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0064-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220512

Study on Characteristic Products and Microstructure of Biodegradable Oil-impregnated Insulation Paper

WANG Jie¹, WU Xiaohui², HU Shihong¹, LAN Xinsheng¹, ZHANG Li¹

(1.State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2.State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In order to study the degradation of oil-impregnated insulation paper by microorganisms, the mass ratio of oil-paper sample is about 10 : 1, and the comparative samples are pretreated by natural pollination, artificial inoculation and high temperature sterilization. Metal aluminum is added into samples 3 and 4, and metal copper is added into sample 5. The biodegradation test is carried out at 15~35℃ which is the most suitable ambient temperature. The products of biodegradable oil-impregnated insulation paper and the change trend of gas content are analyzed by high performance liquid chromatography, gas chromatography and other instruments, and the changes of microstructure of oil-impregnated insulation paper before and after the test are observed by scanning electron microscope (SEM). The test results show that after the biodegradation, characteristic products are generated such as furfural, CO and CO₂, but the structure of cellulose of insulation paper has been damaged. The contents of CO and CO₂ increases first then decreases, and then increases, and finally it tends towards stability with microbial degradation. The SEM shows that the crystals and amorphous structures of cellulose have changed, the crystalline region of cellulose surface becomes rough, loose and fractured, the amorphous region occurs small pores, and the crystalline region is not closely connected with the amorphous region. Characteristic products of degradation and the variation characteristics of their gas product are important reference basis for distinguishing whether microbial contamination occurs in insulation paper of non-operating power equipment.

Key words: microorganism; degradation; oil-impregnated insulation paper; characteristic product; microstructure

0 引言

绝缘纸的主要成分是纤维素,在热、电场、水及氧作用下,易老化降解生成水、酸、CO、CO₂等物质^[1-2],结构破坏、形貌改变等^[3-8]。在工程应用中时常发现一些电容式电力互感器(capacitor voltage transformer, CVT)、变压器中性点套管等少油设备绝缘油中CH₄、H₂、CO和CO₂含量异常增高现象,试验室用电、热及化学方法进行试验验证,均未查出原因。

纤维素降解除受物理、化学因素外,生物作用也是纤维素降解的一个重要因素。微生物生化过程比较复杂,研究表明,微生物降解纤维素的基本过程是微生物分泌的纤维素酶使纤维素分子中的氢键断裂,产生葡萄糖单体,进一步降解生成更小分子物质,如氢气、甲烷等^[9-11],这些物质的产生使得纤维素结构破坏^[12]。文献[13]对纤维素酶降解机制及纤维素酶分子结构和功能进行研究时,提出并证实了氢键断裂是微生物降解纤维素过程的初始阶段。自然界中微生物种类繁多、分布广泛,适宜的环境为微生物生长增殖提供了有利条件,生物降解作用有利于促进环境修复,创造美好生活,但微生物降解破坏作用巨大。近年来,电力科研工作者越来越重视微生物对绝缘油污染及其影响的研究,常温环境下,微生物能够在绝缘油中进行生长增殖^[14],研究发现枝动菌能利用绝缘油为唯一碳源进行生长增殖,代谢产生癸二酸,增大了绝缘油介质损耗因数^[15]。常温、密闭环境下,微生物对浸绝缘纸降解的有关研究未见报道,特别是对产物、变化趋势及微观结构状态改变的研究。下面结合 CVT、变压器中性点套管等少油设备的生产、存放的环境条件,对存在微生物污染的可能性进行模拟生物降解油浸绝缘纸试验。从宏观特征产物及其变化趋势和微观结构状态改变研究微生物对油浸绝缘纸的降解,为在工程应用中遇到类似现象提供分析参考。

1 生物降解试验

1.1 试验仪器及材料

1) 试验仪器:试验装置(自制)

气相色谱仪型号为 301B,生产厂家为河南中分仪器股份有限公司。

卡尔费休库伦法水分测试仪型号为 CA-100,生产厂家为日本三菱公司。

Titoch 自动电位滴定仪型号为 916,生产厂家为 Swissmade 公司。

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)分析仪型号为 JSM-5900LV,生产厂家为日本 JEOL 公司。

高效液相色谱仪型号为 1120,生产厂家为 Agilent 公司。

2) 试验材料

绝缘油为 25 号环烷基绝缘油,产自克拉玛依。

绝缘纸为魏德曼绝缘纸。

铝导线直径为 3.1 mm,铜导线直径为 1.8 mm。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示。

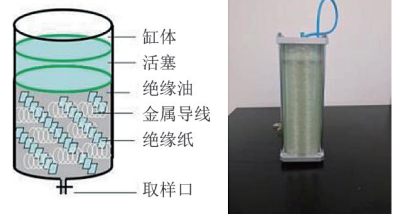


图 1 试验装置

1.3 试验方法及检测

1.3.1 试样制备

将绝缘纸剪成面积为 10 cm² 正方形纸片(利于被绝缘油浸透),金属铝和铜用 800 目砂纸打磨成光亮备用。绝缘油和纸按 CVT 中油纸质量比 10:1 计,用电子天平分别称取 25 号环烷基绝缘油、绝缘纸片,总质量约为 1.9 kg,置于试验装置内,用玻璃棒不断搅拌,使绝缘纸与绝缘油充分接触,密封好试验装置,排除气泡,密闭静置 3 d,待绝缘纸完全浸透。将 6 段约 10 cm 长的金属铝绕成螺旋状,分别加入试样 3~4 中;将 3 段约 10 cm 长的金属铜绕成螺旋状,加入试样 5 中,制成 5 个对照试样如表 1 所示。

表 1 试样组成

试样	试验样品组成
1	空白绝缘油
2	绝缘油+绝缘纸
3	绝缘油+绝缘纸+铝导线
4	绝缘油+绝缘纸+铝导线
5	绝缘油+绝缘纸+铜导线

1.3.2 试验方法

自然污染:按照 CVT 制造过程中存放的环境条

件,将试样置于阴暗、湿度 65% 处放置 1 d。

人工接种: 在无茵台上, 用接种针从培养好的培养皿中挑取微生物菌苔, 点接在试样中不同位置, 使菌种在绝缘油中均匀分布。

高温灭菌: 将试样在 160~170 °C 温度下保持 1 h, 利用热辐射杀灭微生物及其芽孢。

生物降解试验: 为增强对比试验效果, 试样 1 高温灭菌、试样 2 自然污染、试样 3 和试样 5 人工接种、试样 4 在 100 °C 下杀菌 30 min, 部分微生物及其芽孢被杀灭; 然后, 将 5 个对照试样置于微生物最宜生长环境温度 15~35 °C 下进行生物降解试验; 最后, 试验 15 d、30 d、84 d、160 d、282 d 后, 分别取样检测绝缘油中组分并观察试验前后的绝缘纸纤维素微观形貌。

1.3.3 产物分析

微量水分测定: 用 10 ml 注射器抽取待测试样, 然后用卡尔费休库伦法水分测试仪测定试样中微量水分。

酸值测定: 用天平称取 3.0 g 氢氧化钾加入到 1000 ml 的异丙醇中, 微沸 10 min, 冷却后塞住烧瓶口, 把溶液在暗处静置 2 天; 然后, 通过孔径为 5 μm 的薄膜过滤上层清液, 滤液储存在棕色瓶子中; 最后, 用 0.1 mol/L 的标准溶液滴定氢氧化钾异丙醇溶液, 用自动电位滴定仪测定试样中的酸值。

糠醛测定: 设置液相色谱仪参数, 检测器波长 277 nm, 流动相比比例纯水: 甲醇 = 1:1, 流速为 1 mL/min。保留时间定性识别糠醛色谱峰, 单点校正外标法定量计算糠醛含量。根据分配定律和物料平衡原理, 油中糠醛含量按式(1)计算。

$$C_o = 0.19 \times \frac{h_{ext}}{h_s} \times C_s \quad (1)$$

式中: C_o 为油中糠醛浓度, mg/L; h_{ext} 为甲醇萃取液中糠醛色谱峰高, mAU; C_s 为标样中糠醛浓度, mg/L; h_s 为甲醇标样中糠醛峰高, mAU。

气体组分测定: 用 100 ml 玻璃注射器在全密封状态下取用 40 ml 绝缘油, 注入 5 ml 氮气后置于机械振荡仪内, 设置温度为 50 °C、振荡时间为 20 min、静置时间为 10 min。将脱出的气体转移至 5 ml 注射器内, 用气相色谱仪检测溶于试样中气体组分。

1.3.4 微观形态结构分析

首先, 用石油醚清洗掉绝缘纸片上的大部分绝缘油; 然后, 用真空干燥箱除去残存绝缘油; 最后, 对

表面喷金处理, 用 JSM-5900LV 扫描电镜观察其微观形态结构。

2 绝缘纸纤维素结构

2.1 绝缘纸化学结构

绝缘纸主要成分为纤维素, 其分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$, 结构式如图 2 所示。

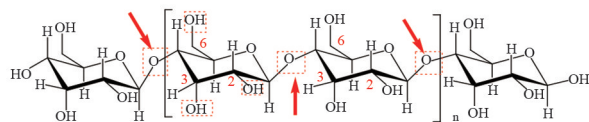


图 2 纤维素结构式

由图 2 可知: 纤维素为 D-吡喃葡萄糖基 1-4 糖甙键连接起来的链状高聚物, 每个葡萄糖单体上有 3 个自由存在的羟基, 3 个羟基所处位置不同, 活性也不同, 发生化学反应类型也不同。C₂、C₃ 位 2 个仲醇基是形成水的潜在根源; C₆ 位上的伯醇基具有一定的极性和亲水性, 易被极性分子吸附包围氧化成醛基, 醛基氧化成羧基; 大分子中甙键易受到破坏而断裂, 与水分子形成两个羟基, 一个羟基具有还原性; 另一羟基具有氧化性, 键接的氧原子和葡萄糖环上的氧原子能够形成分子内和分子间氢键, 同时还参与降解反应^[16-19]。

2.2 绝缘纸微观形态结构

图 3 为绝缘纸降解前 SEM 照片。

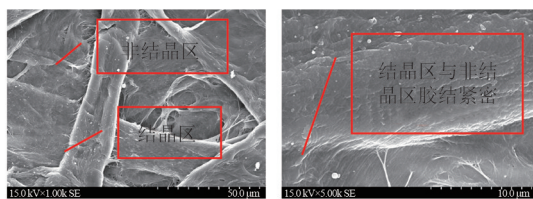


图 3 绝缘纸降解前 SEM 照片

由图 3 可知: 绝缘纸是由结晶和非结晶区纤维素形成的二相体系, 二者交替排列, 紧密连接, 结构完整。结晶区分子排列规则、紧密、表面光滑。非结晶区中大分子排列较紊乱、堆砌较疏松、密度较低、规则性较差, 但整体结构完整。

3 试验结果与分析

3.1 产物

3.1.1 水分和酸

试验 282 d 后, 试验前后各试样中水分和酸值

如表2所示。

表2 各样品中的水分和酸值

试样	试验前		试验后	
	微水质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	酸值 ^① / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	微水质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	酸值 ^① / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	13.8	0.010	14.2	0.010
2	18.0	0.010	30.8	0.013
3	19.6	0.010	35.4	0.011
4	16.7	0.010	29.4	0.012
5	25.6	0.010	38.2	0.015

①是指中和1g油脂中游离脂肪酸所需氢氧化钾的质量(mg),以mg/g表示。

表2结果显示:试样1的水分含量和酸值未有明显增加,其他各试样的水分含量和酸值均增加。试样中微生物种类、含量、生长增殖情况等不同,降解产物量有所不同;试样3与试样5采用相同的人工接种方式,产生的酸值不同是由于产生的有机酸与金属铝反应,减少了试样3中酸含量。水分和有机酸是微生物降解纤维素的产物^[20-21],纤维素分子中2个自由的仲醇基在纤维素酶作用下断裂生产水,生成的水分促使纤维素进一步降解,产生更多的水分。水解物质进入微生物细胞,在胞内酶作用下,将纤维素中伯醇基氧化成醛基,进而氧化成羧基^[22]。

3.1.2 糠醛

糠醛是一种五元杂环化合物,又称呋喃甲醛,它是由纤维素大分子中的甙键断裂,生成葡萄糖单体,葡萄糖单体环化生成含氧杂环化合物^[23]。通常状态下绝缘纸不会产生糠醛,糠醛及含量的多少是判断绝缘纸纤维结构是否破坏及程度的重要指标^[24-27]。各试样糠醛色谱图如图4所示,含量如表3所示。

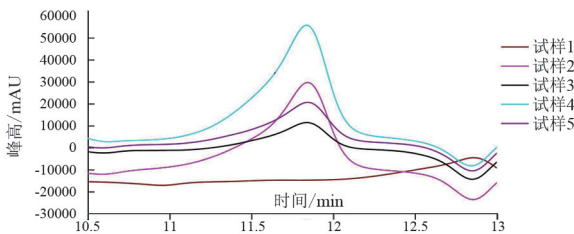


图4 糠醛含量液相色谱

表3 绝缘油中糠醛含量

试样	糠醛含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	0
2	0.025
3	0.005
4	0.034
5	0.010

由图4及表3可知:空白试样1的色谱图为一平滑线,未检出糠醛;其他试样均有明显的糠醛特征色谱峰,检出糠醛,表明绝缘纸在微生物作用下其纤维碳架结构已被破坏。

3.1.3 气体组分及含量变化趋势

1) 气体组分

试验86d后,用气相色谱仪检测溶于绝缘油中气体组分及含量,结果见表4。

表4 绝缘油中气体组分含量

试样	油中溶解气体组分含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
1	1.40	0.06	0.00	0.00	0.00	34	460
2	1.73	0.08	0.00	0.00	2.20	74	1593
3	1.87	0.13	0.13	0.00	14.51	97	3953
4	1.74	0.08	0.09	0.00	12.74	44	1041
5	1.80	0.14	0.00	0.00	1.78	57	3130

由表4可知:与试样1对比,对对照样中产生了CH₄、C₂H₄、H₂、CO、CO₂及部分试样产生了C₂H₆气体,无C₂H₂气体产生。这与绝缘油及绝缘纸在电和热作用下产生气体特征产物不同^[28],是辨识微生物降解的重要特征^[29-31]。试样3~4中H₂含量高于试样2,试样5是由于降解产生的有机酸与金属铝反应所致,进一步验证了微生物降解油浸绝缘纸产生有机酸。

2) 组分含量变化趋势

由图5—图8可知:4个对对照样产生的CH₄、H₂、CO和CO₂气体含量随微生物降解时间呈先增后减,然后再增加,最后趋于稳定。其变化趋势与绝缘纸理化降解的气体含量持续增加趋势不同^[32]。在试验初始阶段,试样中微生物种类繁多,降解产物的生成速率快,随着装置内氧气含量减少,好氧型微生物生长受到抑制,降解减缓,产物量减少,此时能够适应当前环境条件生长的微生物大量繁殖,产物含量随之增加。随着微生物在生长增殖过程中不断的消耗掉硫、磷和氮以及金属等赖以生长的微量元素,生长受到抑制,降解减缓,故气体含量趋于稳定。该变化特征是由微生物生长的特定环境决定,为辨识微生物降解油浸绝缘纸提供重要依据。

3.2 微观结构形态

由图9可知:对对照样SEM照片中的纤维素结晶区和非结晶区微观形貌均发生较大变化,结晶区内纤维素分子间键断裂,结晶体之间变得松散、致密度降低、表面粗糙、部分纤维断裂、长度下降等;非结晶区有的地方出现较大孔隙。结晶区与非结晶区连接

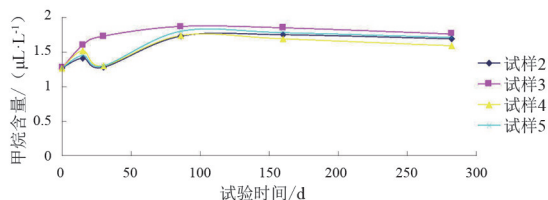
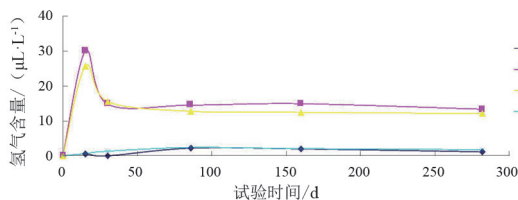
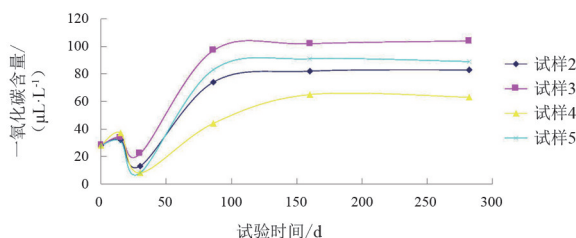
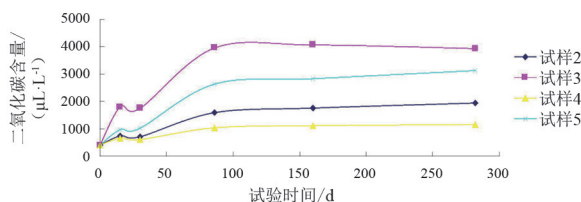
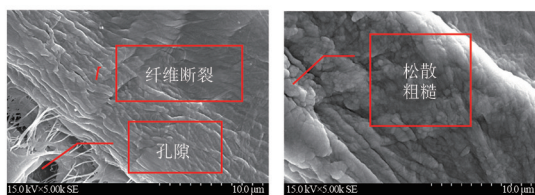
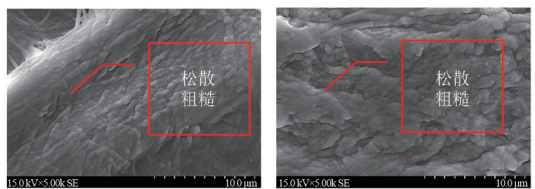
图 5 CH₄ 气体含量变化趋势图 6 H₂ 气体含量变化趋势

图 7 CO 气体含量变化趋势

图 8 CO₂ 气体含量变化趋势

(a) 试样 2

(b) 试样 3



(c) 试样 4

(d) 试样 5

图 9 绝缘纸降解后 SEM 照片

变得疏松,但绝缘纸微观结构仍保持原有两相共存的微细结构^[33-34]。绝缘纸纤维素微观结构形貌的变化直观反映出微生物对绝缘纸纤维碳架结构破坏的状态。

4 结 论

油浸绝缘纸在微生物作用下,生成了一些特征产物和微观形态结构发生了改变,结论如下:

1) 油浸绝缘纸在微生物作用下,纤维素降解产生了水、酸、糠醛及 CH₄、C₂H₄、H₂、CO 和 CO₂ 特征产物,无 C₂H₂ 气体产生,绝缘纸纤维素碳架结构遭到破坏。

2) CH₄、H₂、CO 和 CO₂ 含量随微生物降解时间呈先增后减,然后再增加,最后趋于稳定。该变化特征是由微生物生长的特定环境决定。

3) 绝缘纸纤维素结晶区与非结晶区微观面貌均发生了较大的变化,SEM 照片显示出了纤维素碳架结构破坏的状态。

4) 利用微生物降解油浸绝缘纸的特征产物及其变化趋势的特征可辨识非运行电力设备绝缘结构是否发生微生物污染。

参考文献

- [1] 廖瑞金,汪可,尹建国,等.初始水分含量对油纸绝缘热老化特性的影响[J].高电压技术,2012,38(5):1172-1178.
- [2] 陈伟根,蔚超,孙才新.变压器油纸绝缘气隙放电特性及其产气规律[J].高电压技术,2010,36(4):849-855.
- [3] 沙彦超,周远翔,孙清华,等.直流电压分量对复合电场下油纸绝缘沿面闪络的影响规律[J].高电压技术,2013,39(6):1337-1343.
- [4] 陈义龙,齐波,李成榕,等.油浸层压纸板在低场强下空间电荷的积聚特性[J].高电压技术,2013,39(4):987-992.
- [5] 周远翔,王明渊,张云霄,等.雷电冲击电压下典型油纸缺陷局部放电特征[J].高电压技术,2015,41(11):3783-3789.
- [6] 聂德鑫,王明渊,周远翔,等.操作冲击电压下油纸针板缺陷局部放电研究[J].高电压技术,2015,41(3):918-924.
- [7] 张健文.电气设备故障诊断技术[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 廖瑞金,严家明,杨丽君,等.局部放电对油浸绝缘纸表面损伤特性研究[J].中国机电工程学报,2011,31(10):129-135.
- [9] 黄忠水,纪威,李淑艳,等.国外生物柴油的应用[J].节能环保技术,2003(1):38-41.

- [10] 吴小武,刘荣厚. 农业废弃物厌氧发酵制取沼气技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(26): 227-231.
- [11] LU L, REN N Q, ZHAO X, et al. Hydrogen production, methanogen inhibition and microbial community structures in psychrophilic single-chamber microbial electrolysis cells[J]. Energy & Environmental Science, 2011(4): 1329-1336.
- [12] 林燕,张伟,华鑫怡,等. 纤维素酶水解能力的影响因素及纤维素结构变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4): 39-43.
- [13] 高培基. 纤维素酶降解机制及纤维素酶分子结构与功能研究进展[J]. 自然科学进展, 2003, 13(1): 21-28.
- [14] 王杰,刘虹,唐平,等. 变压器绝缘油中微生物生长研究[J]. 四川电力技术, 2014, 37(1): 92-94.
- [15] 梅子青,王海晶,王丰,等. 电器绝缘油中枝动菌代谢物脂肪酸的分离、纯化及结构鉴定[J]. 吉林大学学报, 2004, 42(1): 116-120.
- [16] 杨腾腾,周宏,王霞,等. 微生物降解纤维素的新机制[J]. 微生物学通报, 2015, 42(5): 928-935.
- [17] 文少白,李勤奋,侯宪文,等. 微生物降解纤维素的研究概况[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 231-236.
- [18] 刘树立,王华,王春艳,等. 纤维素酶分子结构及作用机理的研究进展[J]. 食品科技, 2007(7): 12-15.
- [19] VARAPRASAD Kokkarachedu, RAGHAVENDRA Gownolla Malegowd, JAYARMUDU Tippabattini, et al. Nano zinc oxide-sodium alginate antibacterial cellulose fibres [J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2017, 135: 349-355.
- [20] 黄海涛,刘畅,马超,等. 纤维素及其衍生物材料的应用研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 75-80.
- [21] 余多慰,袁生. 绿色木霉纤维素酶分子内氢键特征的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(4): 544-547.
- [22] 迟雪,李建政,艾斌凌. 一株发酵纤维素产丁酸菌及其代谢动力学特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 232-237.
- [23] 梅雪婷,朱宝龙,张郁晨,等. 半纤维素制备糠醛的研究进展[J]. 化工时刊, 2015, 29(9): 34-37.
- [24] 徐志强,刘阳,赵敏乔,等. 油中糠醛浓度判定变压器固体绝缘劣化程度的研究[J]. 电子建设, 2010, 2(2): 36-38.
- [25] 张欲晓,李胜利,王梦君,等. 变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2458-2463.
- [26] 向彬,廖瑞金,杨丽君,等. 变压器矿物油中糠醛的稳定性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 85-87.
- [27] 张欲晓,李胜利,李婷,等. 变压器油中糠醛浓缩萃取新技术[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1390-1395.
- [28] 齐波,魏振,李成榕,等. 交直流复合电压作用下油纸绝缘典型缺陷放电现象及特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 639-646.
- [29] 徐琰,张茂林,杏艳,等. 纤维素类生物质厌氧发酵产氢的研究[J]. 化学研究, 2005, 16(2): 6-8.
- [30] 田鑫,廖强,张攀,等. 光合细菌生物膜反应器葡萄糖降解及产氢特性实验[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2346-2350.
- [31] 杏艳,赵金安,樊耀亭,等. 含纤维素类生物质的生物制氢[J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 656-660.
- [32] 廖瑞金,冯运,杨丽君,等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 142-147.
- [33] 贾士儒,欧竑宇,马霞,等. 细菌纤维素结构与性质的初步研究[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(3): 25-29.
- [34] 胡舰. 基于分子模拟的变压器绝缘纸无定型区老化微观机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- 作者简介:
王杰(1979),男,硕士,高级工程师,主要从事电网绝缘化学研究。(收稿日期:2022-07-04)
- 缘油纸复合体系沿面放电特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(1): 52-61.
- [10] 黄超,魏本刚,任晓明,等. 基于不同放电模型的变压器局部放电光学特性研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 108-113.
- [11] 张显聪,徐洋,王勇,等. 电容式套管局部放电的末屏地线 UHF 传感[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 62-67.
- [12] 胡长猛,程林,王辉,等. 含典型缺陷的变压器套管局部放电检测试验研究[J]. 电磁避雷器, 2021(2): 107-115.
- 作者简介:
何宇航(1990),男,硕士,工程师,从事电力设备状态检测及在线监测技术研究。(收稿日期:2022-04-25)

(上接第 63 页)

- [6] GILLES J, TRAN G, OSHER S. 2D empirical transformers wavelets, ridgelets and curvelets revisited[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014, 7(1): 157-186.
- [7] BRUNT R J Van. Physics and chemistry of partial discharge and corona-recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 11(5): 761-783.
- [8] 司文荣,李军浩,黎大健,等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 21-25.
- [9] 陈鑫,郝建,高晨煜,等. 针-板电极结构下三元混合绝