第 49 卷 第 6 期：2625-2633 高电压技术 Vol.49, No.6: 2625-2633
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220688

重复脉冲电压下变频牵引电机绕组绝缘的电树枝特性

唐艳霞[1,2]，刘学忠[1]，王景娜[1]，郭玉柱[1]，刘 嬿[3]，李 丹[3]
（1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049；2. 广东电网有限责任公司广州供电局，广州 510620；3. 中车永济电机有限公司，西安 710016）

摘 要：变频牵引电机在快速发展的轨道交通运输中起重要作用，其在运行时需要承受高频脉冲电压的冲击，且绕组的绝缘温升较高，需采用高耐热性绝缘浸渍漆和绝缘带构成的复合绝缘系统。为此选用了两种常用的 C 级耐热浸渍漆，配合 3 种绝缘带构成层状复合绝缘电树枝试样，在不同重复率的双极性方波脉冲电压下，试验实时观测了电树枝的引发、形态特征和生长过程，对比研究了不同层状复合绝缘的电树枝化特征和破坏机理。试验对比和研究分析表明：电树枝在聚丁二烯树脂浸渍漆中的引发时间较长，径向生长速率明显更快，而有机硅树脂浸渍漆中的电树枝更容易引发，但引发后生长速度较慢；随脉冲电压重复率提高，电树枝更易引发，径向生长速率更快，但两种浸渍漆中电树枝的形态变化不同；3 种绝缘带对电树枝的生长都具有显著的界面阻碍作用，且玻璃布补强云母带与聚酰亚胺薄膜和聚酰亚胺薄膜补强云母带相比，对电树枝生长的抑制效果最突出，更适用于高频脉冲电压作用下的变频电机或高频变压器绝缘系统。

关键词：电树枝；变频牵引电机；重复脉冲电压；聚丁二烯树脂；有机硅树脂

Electrical Tree Characteristics in Winding Insulation for Inverter-fed Traction Motor Under Repetitive Impulse Voltages

TANG Yanxia[1,2], LIU Xuezhong[1], WANG Jingna[1], GUO Yuzhu[1], LIU Yan[3], LI Dan[3]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Guangzhou Power Supply Company, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510620, China;
3. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The inverter-fed traction motor plays an important role in the rapidly developing railway transportation, and needs to withstand the impact of high-frequency pulse voltage; moreover, its temperature rise of winding insulation during operation is high, which requires a composite insulation system composed of high heat-resistant insulating impregnating varnish and insulating tape. In this paper, two commonly used impregnating varnishes with the thermal class of C are selected, and three kinds of insulating tapes are composed to prepare different layered composite insulation samples of electrical tree. In order to study the electrical tree characteristics and failure mechanism in different composite insulations, the initiation and morphological characteristics and growth process of electrical tree under the bipolar square wave impulse voltage with different repetitive rates were experimentally investigated and observed with a real-time microscope digital imaging system. By comparison of experiments and research analysis, it is shown that the initiation time of electrical trees in polybutadiene impregnating varnish is much longer than that of the silicone impregnating varnish, and the radial growth rate is significantly faster. The electrical trees in silicone impregnating varnish are more easy to initiate, however, their growth rates after the initiation are slower. With the increase of the impulse voltage repetitive rate, the electrical trees are more easy to initiate and the radial growth rate is faster, whereas, the morphological changes of the electrical trees in two impregnating varnishes are different. The three kinds of insulating tapes have excellent interfacial hindering effect on the growth of electrical trees. Among them, the glass cloth reinforced mica tape, compared with the polyimide film and polyimide film reinforced mica tape, has the most prominent inhibitory effect on the growth of electrical tree, so it is more suitable to be used for the insulation system of the inverter-fed traction motor or high-frequency transformer, which endures the high repetitive impulse voltage.

Key words: electrical tree; inverter-fed traction motor; repetitive impulse voltage; polybutadiene resin; silicone resin

0 引言

随着电力机车向载重高、速度快的方向发展，对变频牵引电机提出了增大功率、缩小体积以及提升可靠性的要求。变频牵引电机绝缘系统的性能直接影响着电机的安全运行，要求其绝缘系统应具备耐高温、介电性能好、厚度薄、散热好等特点。变频牵引电机的主绝缘广泛采用绝缘带包绕股线的真空压力浸渍工艺，经高温固化后形成层状复合绝缘结构，其中的浸渍清漆是电机绝缘结构的关键材料，其性能对电机绝缘的影响至关重要。目前，国内外采用的绝缘浸渍体系主要包括不饱和聚酯体系、环氧酸酐体系、环氧树脂体系以及有机硅体系等；采用的绝缘带主要为聚酰亚胺薄膜、聚酯薄膜、云母带以及玻璃丝带等[1]。

电树枝是高分子聚合物材料中的主要老化放电形式[2-5]。层状复合绝缘结构虽然能从根本上提高变频牵引电机的绝缘强度，但在工程制造过程中不可避免的会产生绝缘薄弱点，电树枝易从电机绕组主绝缘或匝间绝缘的气隙、导电杂质和裂纹等局部电场集中处引发并发展。变频牵引电机广泛采用脉宽调制(PWM)变频电源，使得电机主绝缘长期承受具有陡峭脉冲沿的高频脉冲过电压冲击，加上机械振动和高温等因素的联合作用，更容易发生电树枝放电，严重破坏电机绝缘性能[6]。因此，研究变频牵引电机用层状复合绝缘体系在重复脉冲电压下的电树枝生长特性，可以指导电机主绝缘材料的选择以及浸渍漆与绝缘带的配合，对提高变频牵引电机安全、稳定运行具有重要意义。

近年来，国内外学者对直流、工频、交直流叠加以及脉冲电压下的电树枝特性进行了大量研究，且主要在环氧树脂、聚乙烯、聚丙烯、硅橡胶和有机硅凝胶等材料中进行试验，关于电机用浸渍漆及与绝缘带的复合结构在脉冲电压下的电树枝研究很少。王鹏等人研究了脉宽调制电压的上升时间和载波频率、脉冲电压的频率和占空比对环氧树脂中电树枝引发及生长特性的影响，发现脉宽调制电压的上升时间越短，电树枝的引发概率越高，且电树枝引发后的生长特性主要受载波频率影响[7]；电树枝在脉冲电压下受直流电压平稳过程和上升、下降时间处极性翻转的共同作用，使其引发率和长度约为相同幅值和频率的正弦电压下的 3 倍，当脉冲电压幅值或者频率升高时，电树枝更易生长、树枝主干更粗[8]；随占空比增加，电树枝形态由丛林状、稠密枝状向稀疏枝状变化，较小占空比有利于针尖至环氧树脂的电子注入和积累[9]。杜伯学等人研究了温度对环氧树脂在脉冲电压下的电树枝生长特性的影响[10]，发现电树枝的发展在低温环境中会受到抑制，但脉冲电压幅值和频率对电树枝生长的影响效果与室温下相似，脉冲幅值和频率增大均会加速电树枝生长[11]。

关于层状复合绝缘材料中的电树枝特性，最早由 Cooper 等人进行了试验研究，发现屏障对聚合物中的电树枝生长具有抑制作用，且表面能高的屏障对电树枝生长的抑制效果更好[12]。在此基础上，Auckland 等人发现，屏障对电树枝生长的阻碍效果取决于屏障材料与树脂基体之间的粘结强度以及屏障材料的热性能和机械性能，与树脂基体结合力强、熔点高和断裂韧性高的材料对电树枝发展的阻碍能力更强，且颗粒物材料对电树枝的阻碍能力与颗粒的粒径相关，粒径越大阻碍能力越强[13]。Uehara 等人发现当聚合物中的电树枝生长到屏障层后，电树枝在屏障处的生长受阻，电树枝会穿透薄膜或沿薄膜边缘生长，这取决于薄膜的种类和厚度[14]。Vogelsang 等人发现，试验用绝缘材料的种类会影响屏障界面对电树枝的阻碍作用，环氧树脂与屏障材料之间的化学键类型和剪切强度决定了电树枝沿屏障材料的生长特性[15-18]。

刘学忠等人对风力发电机绝缘系统常用的环氧和亚胺改性聚酯浸渍清漆，配合聚酰亚胺薄膜、聚酯薄膜补强云母带、玻璃布补强云母带制作了绝缘带-浸渍清漆复合的层状绝缘试样，对比研究了工频和重复脉冲电压下风力发电机用复合绝缘体系中的电树枝引发、生长、沿界面延伸和击穿过程，发现电树枝在重复脉冲电压下更容易引发和生长，大多呈单支状快速生长至绝缘带，且在不同绝缘带附近呈现的形态差异较大。重复脉冲电压波形的陡上升沿峰值对电树的引发生长起着关键作用，电压幅值、电压波形、脉冲重复率、复合材料构成等因素均对电树枝形态及发展影响显著[19-22]。

综上，本文选取了轨道交通变频牵引电机常用的C级耐热环保浸渍漆——聚丁二烯和有机硅树脂浸渍漆，配合聚酰亚胺薄膜、聚酰亚胺薄膜补强云母带和玻璃布补强云母带，分别在不同重复率的双极性方波脉冲电压下，对上述材料构成的复合绝缘试样进行电树枝试验和显微观测。对比两种浸渍漆

中电树枝的生长特性，研究不同绝缘带对电树枝生长的界面阻碍效应，分析脉冲电压重复率对电树枝引发、形态特征、生长特性的影响。

1 试验

1.1 试验材料

变频牵引电机长期运行会产生很高的绝缘温升，因此要求绝缘浸渍漆应具备高耐热性。本文选用的聚丁二烯和有机硅树脂浸渍漆均属于C级耐热浸渍漆，能够较好地承受变频牵引电机在运行中产生的大幅温升。此外，绝缘浸渍漆的动力黏度不能超过 3000 mPa·s，粘度过大时对绝缘带的渗透能力会相对减弱，造成电机绝缘的电、热和机械性能降低。两种浸渍漆的基本性质如表 1 所示，可以看出两种浸渍漆均符合真空压力浸渍的要求。

聚酰亚胺薄膜的导热性、耐热性以及电气性能优越，但表面过于光滑，绝缘浸渍漆不易附着，使得层状绝缘粘合强度不够。云母粉是理想的耐局部放电材料，因此在聚酰亚胺薄膜中添加云母粉可构成耐电性能优异的聚酰亚胺薄膜补强云母带。玻璃布是由纵横交错的玻璃纤维构成，增强了绝缘带与浸渍漆之间的粘合程度，并且玻璃纤维在介电性能、耐热性能与化学稳定性等方面表现优异，是优异的绝缘补强材料。本文中选用的商用绝缘带分别为：0.025 mm 的聚酰亚胺薄膜、0.09 mm 的聚酰亚胺薄膜补强云母带以及 0.11 mm 的玻璃布补强云母带。为了尽可能消除绝缘带厚度对电树枝击穿特性的影响，将聚酰亚胺薄膜用浸渍漆粘合为 4 层，厚度达到 0.10 mm，使得 3 种绝缘带的厚度相当。

1.2 试样制备

层状复合绝缘试样由绝缘浸渍漆、绝缘带以及针–板电极构成，试样结构及尺寸如图 1(a)所示。针尖曲率半径以及针尖与板电极间的距离均会影响电树枝尖端的电场强度，从而影响电树枝的引发和生长过程，因此本文采用针尖曲率半径为(3±1) μm 的不锈钢针，保持针–板距离为(1.5±0.3) mm，使针尖到绝缘带的距离为 1 mm 左右，绝缘带与板电极间的距离为 0.5 mm 左右，以模拟电机绕组绝缘结构的真实厚度。为保证针电极、浸渍漆和绝缘带之间紧密贴合，制样时先把绝缘带预埋在图 1(b)所示的模具底部，将针电极固定在模具夹口处，再将反复抽真空后的浸渍漆注入模具中，最后将整个模具置于真空烘箱中进行高温固化处理，得到层状复合电树枝试样。为了能够清晰地观察试样中电树枝的生长形态，还需要对试样表面进行打磨抛光。

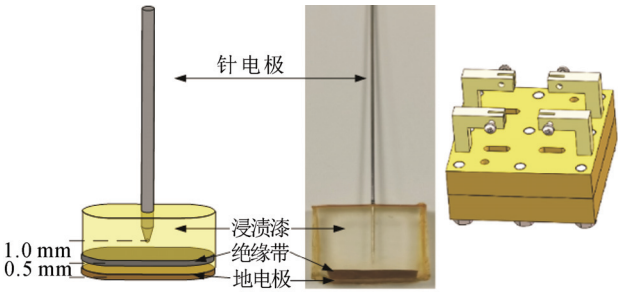
1.3 试验装置及方法

为观察电树枝的生长过程，搭建了如图 2 所示的电树枝引发和生长实时观测试验平台，主要由试样装置盒、电源系统和显微图像记录系统构成。显微图像记录系统由体式显微镜、LED 冷光源、摄像头和计算机组成，其中摄像头安装在显微镜上方，并通过数据线与外部计算机相连，将摄取的电树枝图像传输给计算机。试样装置盒由硅油器皿和试样电极组成，试样电极由聚四氟乙烯框、铜电极和弹簧组成。试验时将试样固定在弹簧夹中，LED 冷光源通过硅油器皿底部的透光玻璃为试样观测提供透

表 1 绝缘浸渍漆基本性质

Table 1 Basic properties of insulating impregnating varnishes

检测指标	检测条件	检测结果	
		聚丁二烯	有机硅
外观	目测	淡黄色透明液体	无色透明液体
耐热等级		C 级，无溶剂	C 级，无溶剂
密度/(g·cm^{-3})	(23±2) ℃	1.1	1.13
粘度/(mPa·s)	(23±2) ℃	406	1380
击穿强度/(MV·m^{-1})	常态/工频	25.1	23.4
介质损耗因数/%	室温/2 kHz	0.48	0.14



(a) 电树枝试样 (b) 制样模具

图 1 电树枝试样及模具

Fig.1 Structures of sample and mold for electrical tree

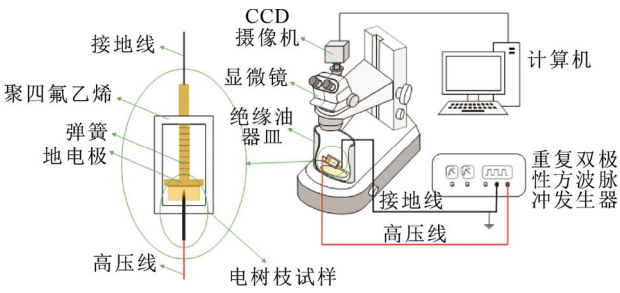


图 2 电树枝实时显微测试平台[19]

Fig.2 Diagram of real-time microscope digital imaging system for electrical tree[19]

射光。为了避免试样沿面闪络和外部放电，硅油器皿中的绝缘油需浸没试样，每次试验结束后清理试样盒并更换绝缘油。

变频牵引电机运行时承受的脉冲电压上升时间约为 1 μs，频率为 2 kHz 左右，幅值在 1.5~2 kV 之间，因此试验时采用高频脉冲电源为试样施加具有陡上升沿的双极性高频方波脉冲电压。试样的针电极通过高压线与脉冲电源输出端相连，试样盒的地电极严格接地。为加速电树枝生长，取脉冲电压幅值 U_p 为 7 kV(峰值)，重复率在 0.5~2 kHz 可调，图 3 为脉冲电压重复率为 0.5 kHz 时电源输出的重复脉冲电压波形。试验在室温下进行，每种试样在每种重复脉冲电压下至少进行 5 次有效试验，以保证试验的准确性。从施加电压开始至试样击穿，每隔 30 s 利用实时显微测试平台采集一次电树枝显微照片，根据照片分析不同脉冲电压重复率下电树枝的引发时间、形态特征、生长曲线以及不同绝缘带对电树枝生长的界面阻碍效应。

2 试验结果与分析

2.1 电树枝的引发特性

定义电树枝的径向长度 r 为：任意方向上，针尖到电树枝末端的最长距离。当电树枝径向长度生长至 10 μm 时认为电树枝引发，则电树枝引发时间为从施加电压至电树枝引发所用时间。由于电机绝缘系统的电树枝通常在绕组绝缘最外层，且在绝缘性能较弱的浸渍漆中引发，为了观测浸渍漆中电树枝引发过程，试样的针尖与绝缘带界面之间留有约 1 mm 的间距，因此在电树枝引发前后，绝缘带对针尖附近的电场几乎没有影响。因此，试样在浸渍漆中的电树枝引发与绝缘带种类无关，研究复合试样中电树枝的引发特性时不区分绝缘带种类。电树枝在浸渍漆中的引发时间具有分散性，取 5 次重复试验的平均引发时间进行对比。不同重复率(即 0.5、1 和 2 kHz)的 7 kV 双极性方波脉冲电压下，聚丁二烯和有机硅树脂浸渍漆中电树枝的平均引发时间如表 2 所示。

可以看出，有机硅树脂中电树枝均在施加电压 1 min 内引发，平均引发时间远小于聚丁二烯树脂中电树枝的引发。电树枝引发为多重因素下的电腐蚀过程，受电荷的注入–抽出、局部高温、局部放电、物理变形和化学分解等因素的影响，目前尚未有单一的系统理论可以解释电树枝的引发，只能综合试

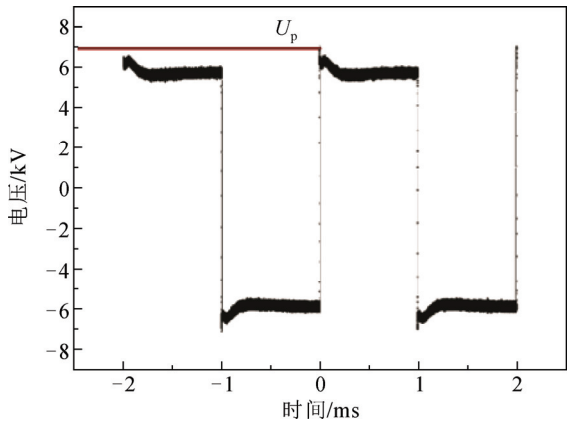


图 3 双极性重复脉冲电压波形

Fig.3 Waveform of bipolar repetitive impulse voltage

表 2 不同重复率下两种浸渍漆中电树枝的引发时间

Table 2 Initiation time of electrical tree under different repetitive rates

浸渍漆种类	脉冲重复率/kHz	平均引发时间/min
聚丁二烯树脂	0.5	288.5
	1.0	124.3
	2.0	3.9
有机硅树脂	0.5	1.0
	1.0	0.9
	2.0	0.8

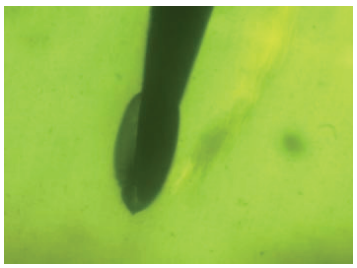


图 4 有机硅树脂中的针尖空气气隙

Fig.4 Air gap of needle tip in silicone resin

验现象进行分析[23]。在高频电压下，聚丁二烯树脂的介质损耗因数大于有机硅树脂的，相同时间内将产生更多的热量，但却更不易引发电树枝。这是因为，试样制备时浸渍漆需要与钢针同时在模具中进行热固化，但浸渍漆与钢针的热膨胀系数不同，使得针尖处存在一定的机械应力而产生气隙。如图 4 所示，试验发现有机硅树脂试样的针尖处更易因残存机械应力而出现明显气隙(为避免气隙对电树枝引发生长产生影响，试验时舍弃了存在气隙的试样)。机械应力造成材料中弱联系分子链更容易被打破，电树枝通道内的局部放电更剧烈[24]，从而加速试样中电树枝的引发，因此有机硅浸渍漆中电树枝

易引发现象与针尖处残存的机械应力有关。

随脉冲重复率增加，聚丁二烯树脂中电树枝的引发时间大幅减小，有机硅树脂中电树枝的引发时间也略有缩短，说明脉冲重复率的提高使得各试样中的电树枝更容易引发。这与针尖在强电场下感生出的麦克斯韦电–机械应力有关，此应力的累积会使绝缘薄弱处产生裂纹，而绝缘缺陷在足够高的电场下会发生局部放电，引发电树枝[2]。聚合物材料在相同时间内受到的脉冲个数随着脉冲重复率的增加而增多，使得电–机械应力的破坏作用更加明显。此外，在更高的脉冲重复率下，相同时间内电荷的注入–抽出频率更高，使得针尖附近绝缘材料承受的电子轰击更加频繁，加速了电树枝的引发[25]。

2.2 电树枝的形态特征

聚丁二烯和有机硅树脂在不同重复率(0.5、1 和 2 kHz)的 7 kV 双极性方波脉冲电压下的电树枝典型形态分别如图 5 和图 6 所示。在聚丁二烯树脂中电树枝呈枝状生长，脉冲电压重复率越高电树枝越稠密。在 0.5 kHz 下，聚丁二烯树脂中的电树枝以枝状发展，主通道周围有很多细小的分支，树枝主通道颜色较深；在 1 kHz 和 2 kHz 下，电树枝在刚引发时呈现稠密枝状，随加压时间增加，某一分支或某几分支会加速生长，最后呈单枝状生长至地电极。而在有机硅树脂中，60%的电树枝最开始呈丛状，随电压的持续作用，某几个分支生长速度变快，逐渐发展为藤枝状与丛状的混合状；40%的电树枝开始为稠密藤枝状，随后生长快的树枝呈现稀疏藤枝状。随着脉冲电压重复率的升高，有机硅树脂中电树枝的密度有所减小。0.5 kHz 下，电树枝一直以稠密藤枝状甚至近似于丛状生长，横向与纵向发展程度较为均匀；1 kHz 和 2 kHz 下，电树枝起初形状与 0.5 kHz 下的电树枝相似，为稠密藤枝状，但随着脉冲电压重复率的增大，电树枝沿电场方向的发展占据优势，某几个分支生长速度加快呈现稀疏藤枝状达到地电极。通过对有机硅浸渍漆中电树枝通道的颜色进行观察，发现电树枝通道实际呈现白色或透明色，只是在试样击穿瞬间因剧烈的局部放电发生碳化而转变为黑色，图 6 中所呈现的黑色电树枝通道是由于光的折射造成的。

电树枝在聚合物中的发展，不仅与聚合物材料本身的结构有关，还与外施电压和环境因素有关。聚丁二烯树脂中电树枝呈枝状，引发后生长速度较快，随着脉冲电压重复率的增大，电荷的注入和抽出过程更加频繁，使得树枝尖端的局部放电次数增加，由局部放电带来的高气压以及局部高温等现象进一步加剧了电场的畸变。局部放电对电树枝通道的促进方向具有随机性，使得电树枝的形状随着脉冲电压重复率的增加变得更加复杂[26]。电树枝在有机硅树脂中的生长并非呈现枝状而是近似丛状的稠

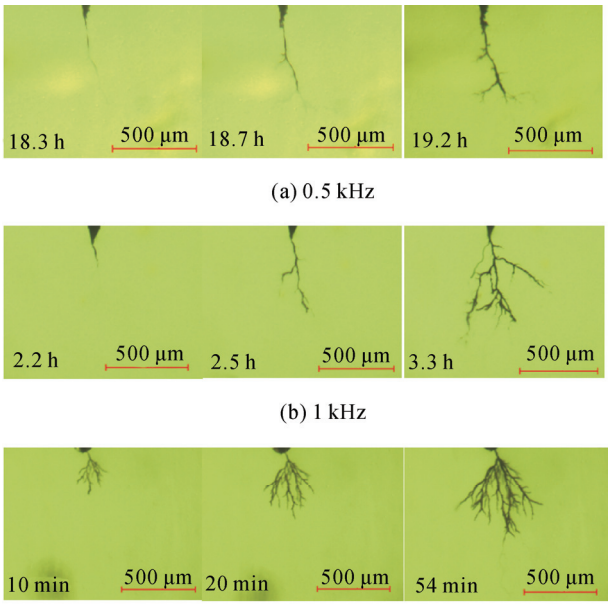


图 5 不同重复率下聚丁二烯树脂中电树枝典型形态

Fig.5 Typical features of electrical tree in polybutadiene resin under different repetitive rates

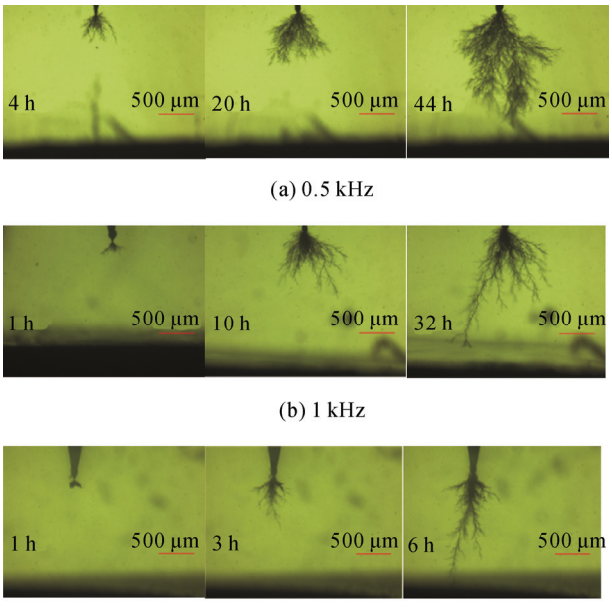


图 6 不同重复率下有机硅树脂中电树枝典型形态

Fig.6 Typical features of electrical tree in silicone resin under different repetitive rates

密藤枝状，藤枝状电树枝的生长存在滞长期。电树枝在滞长期的纵向长度基本不变，但会长出很多分枝，使得电树枝更加稠密，树枝通道密度增大，这与文献[27]中丛林状电树枝存在滞长期的结论一致。根据试验现象统计发现，低频下电树枝的滞长期更长，这是由于低重复率下电树枝通道内电荷的注入–抽出过程不如高频下频繁，电树枝通道的发展过程较为平缓。随着脉冲电压重复率的增大，高频加速了电树枝通道的生长，劣化加速使得滞长期缩短，从而减小了电树枝的密度。

2.3 电树枝的生长曲线

在不同重复率(0.5、1 和 2 kHz)的 7 kV 双极性方波脉冲电压下，聚丁二烯和有机硅树脂中电树枝径向长度随时间的变化曲线如图 7 所示。由于电树枝引发前及生长至绝缘带后径向长度不会发生变化，因此图 7 中仅画出电树枝径向生长速率不为零($d r/d t \neq 0$)的部分。有机硅产品的主链是硅氧键(Si—O)，键能为 370 kJ/mol；聚丁二烯树脂主链中碳碳单键(键能为 345.6 kJ/mol)和碳碳双键(键能为 610 kJ/mol)交替出现，因此有机硅树脂的分子主链更容易受到电荷的撞击而断裂，但从图 7 中看出，聚丁二烯树脂中电树枝的生长速率是远高于有机硅树脂的。这可能是因为有机硅树脂中碳的含量远低于聚丁二烯树脂，且局部放电过程中产生的碳与空气中含有的氧气以及有机硅树脂分子中释放出的氧气反应变成气体被排出，所以有机硅树脂中的电树枝通道不是碳化通道而是导电性很低的硅的化合物。这也解释了聚丁二烯浸渍漆中电树枝通道生长到地电极后会快速击穿，而在有机硅浸渍漆中却会经过很长一段时间后才击穿的现象。

聚丁二烯树脂中的碳化通道的导电性较高，电树枝通道内部的电压降较小，电荷在注入和放电后仍沉积在电树枝尖端，使得电树枝尖端的局部电场强度较大。有机硅树脂中硅的化合物的电树枝通道导电性校低，电树枝通道内部的电压降较大，局部放电产生的电荷沉积在电树枝内部，使得局部电场降低至局部放电终止电场之下，因此每次局部放电结束后，电荷的积聚抑制了下次的局放[28]。为了验证以上推测，选取聚丁二烯和有机硅树脂的未击穿试样，分别对其中的电树枝通道进行显微观察和拉曼光谱分析。如图 8 所示，发现聚丁二烯树脂的电树枝通道内壁上附着有沉积的团状物质，通过拉曼光谱分析，确定此沉积物为碳。两种浸渍漆电树枝

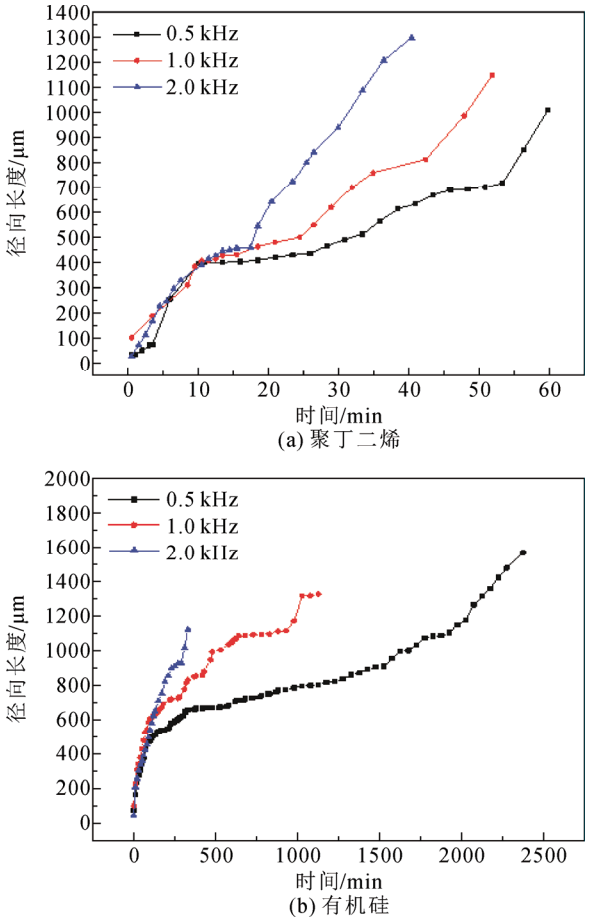


图 7 不同重复率下两种浸渍漆中电树枝径向长度变化

Fig.7 Radial length of electrical tree in two impregnating varnishes vs time under different repetitive rates

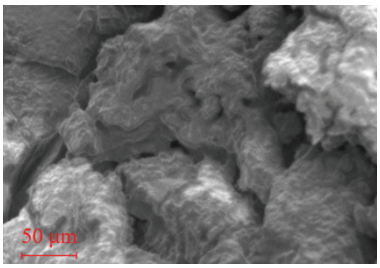


图 8 聚丁二烯树脂中电树枝通道显微放大图

Fig.8 Microscopic magnification of electrical trees channel in polybutadiene resin

通道的拉曼光谱如图 9 所示，图 9(a)中红色线框内即为碳元素的峰，而在未击穿的有机硅浸渍漆试样中，其电树枝通道的拉曼光谱中无碳元素的峰，由此证明有机硅树脂中电树枝通道的导电性低于聚丁二烯树脂的。另一方面，聚丁二烯树脂中电树枝的枝状形态决定了其生长速率比有机硅树脂中藤枝状电树枝的发展速度更快，因为树枝密度较大时，电树枝通道最前端注入高聚物材料的电荷分布相对均

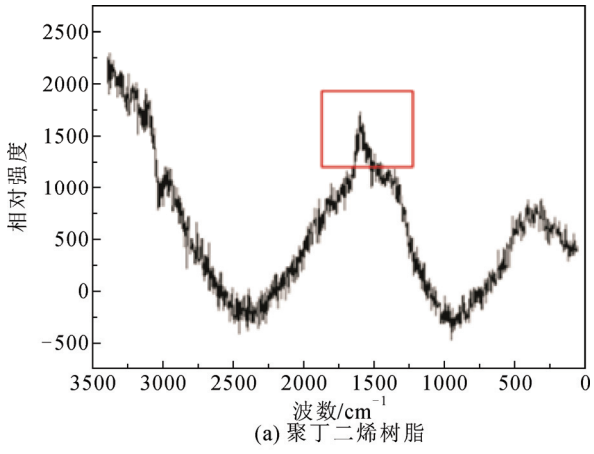
匀，使得电树枝尖端的电场均匀化，削弱了局部电场的强度。

随脉冲电压重复率增加，两种浸渍漆试样中电树枝的径向生长速率均明显变大，且脉冲频率越高，电树枝生长至绝缘带的时间越短，这与电树枝通道中电荷的注入–抽出有关，获得足够能量的电荷会攻击聚合物的分子链并引发局部放电。当脉冲电压的重复率升高，电荷的注入–抽出过程更加频繁，使得有更多的热电子撞击聚合物大分子链，局部放电次数增多，同时产生的气体增多，局部高气压和局部高温作用增强，加速了电树枝的发展。从图 7 中看出，两种浸渍漆中电树枝生长至绝缘带时的径向长度与频率之间呈现不同的关系，这主要与电树枝的形态特征有关。随脉冲重复率增大，聚丁二烯树脂中的电树枝在垂直电场方向上的分支更多，电树枝沿电场和垂直电场方向同时生长，达到绝缘带时的径向长度更大；而有机硅树脂中的电树枝在更高重复率的脉冲电压下，其垂直电场方向的分支较少，达到绝缘带时电树枝的径向长度更短。

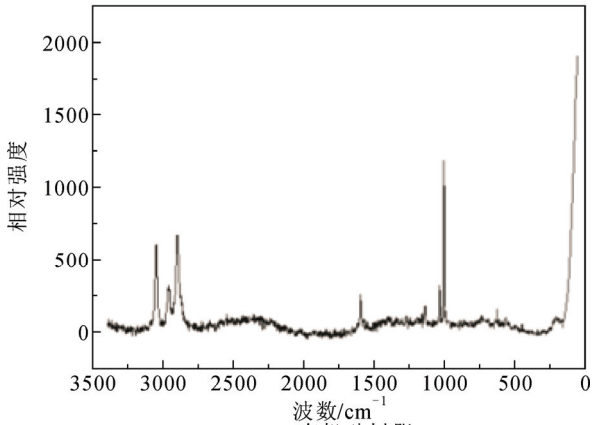
2.4 不同绝缘带对电树枝生长的界面阻碍效应

为研究不同绝缘带对电树枝生长的阻碍效应，分析聚丁二烯树脂配合聚酰亚胺薄膜、聚酰亚胺薄膜补强云母带以及玻璃布补强云母带制作层状复合试样，在 7 kV/2 kHz 的双极性方波脉冲电压下的电树枝特性。聚丁二烯树脂与 3 种绝缘带分别构成的层状复合绝缘试样在击穿前最后时刻的电树枝典型形态如图 10 所示。可以看出，3 种绝缘带附近电树枝的生长形态相似。由于绝缘带对电树枝的生长具有阻碍作用，发展速度快的分枝达到绝缘带后会继续撞击绝缘带的大分子链试图穿过绝缘带，此后电树枝通道直径逐渐变粗，通道的颜色逐渐加深，并且会沿着绝缘带横向延伸以寻找绝缘薄弱点；此时仍未生长至绝缘带的电树分枝会加速发展至绝缘带，进一步使电树枝在绝缘带上的延伸长度增加，待分枝生长到绝缘带后，其直径也开始逐渐加粗，颜色变深。

定义电树枝沿绝缘带延伸长度为距离绝缘带 50 μm 内，电树枝在行于板电极方向的最大长度，电树枝沿绝缘带延伸速率为延伸长度随时间的变化速率。对以上 3 种层状复合试样，测量从电树枝生长至绝缘带到复合试样击穿过程中，电树枝沿绝缘带界面延伸的长度(电树枝横向延伸率不为零的部分)，取 5 次重复试验的平均值，绘制出电树枝沿绝缘带界面横向延伸长度的时间曲线，如图 11 所示。



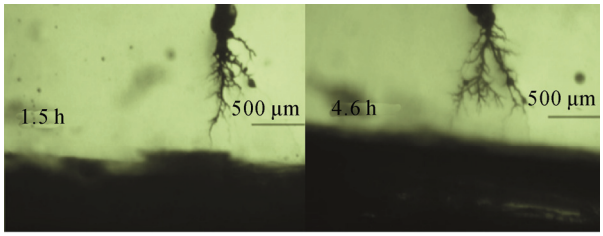
(a) 聚丁二烯树脂



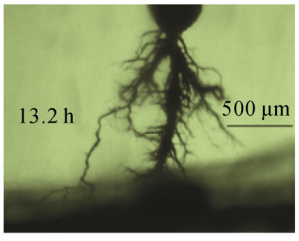
(b) 有机硅树脂

图 9 两种浸渍漆中电树枝通道的拉曼光谱图

Fig.9 Raman spectra of electrical tree channels in two impregnating varnishes



(a) 聚酰亚胺薄膜　　(b) 聚酰亚胺薄膜补强云母带



(c) 玻璃布补强云母带

图 10 不同绝缘带界面附近电树枝形态

Fig.10 Electrical tree morphology near the interface of different insulating tapes

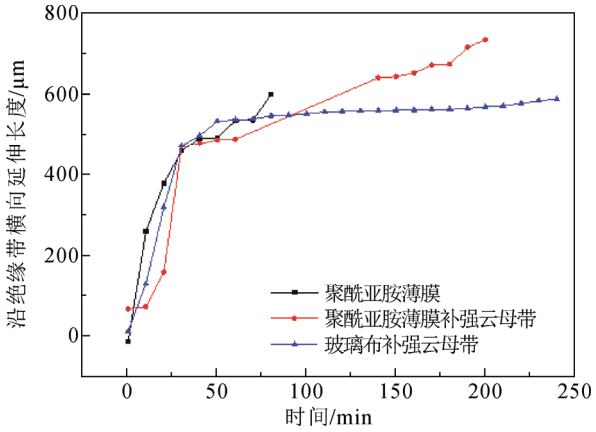


图 11 电树枝沿绝缘带延伸长度与时间的关系

Fig.11 Extension length of electrical tree along three insulation tapes vs time

通过对电树枝沿绝缘带界面横向延伸长度的曲线进行拟合，计算电树枝沿绝缘带的平均横向延伸速率，定义电树枝生长至绝缘带到试样击穿的时间为绝缘带对电树枝的耐受时间，各试样在 5 次重复试验中的平均生长速率和平均耐受时间如表 4 所示。对比可知，电树枝沿聚酰亚胺薄膜界面的平均延伸速度最快且耐受时间最短；沿聚酰亚胺薄膜补强云母带界面的平均延伸速率以及耐受时间居中，这与云母粉的加入有关。云母粉有良好的耐热性能、电气性能以及机械性能，在绝缘带中添加云母粉，可以提高材料的耐热性能和介电常数，改善电压的分布特性，减弱电荷对绝缘带的破坏作用。玻璃布补强云母带界面附近，电树枝延伸速率最慢，绝缘带对电树枝的耐受时间最长，是 3 种绝缘带中对电树枝生长抑制能力最好的，这是因为玻璃布纵横交错的纤维纺织结构易于浸渍漆的附着，使得在浸渍固化时可被聚丁二烯树脂充分渗透并紧密结合，粘结强度相对较大，从而能够抑制电树枝沿绝缘带的生长。此外，玻璃布的介质损耗小，在电树枝发展时产生的热量较少，而玻璃纤维具有高耐热性，因此电树枝沿玻璃布界面生长时，玻璃纤维可以承受局部放电产生的热量，并保持原有的机械性能，抑制了电树枝的进一步发展。这两个方面的协同作用增强了玻璃布补强云母带对电树枝的耐受能力。

3 结论

1）在 3 种脉冲电压重复率下，聚丁二烯树脂中电树枝的引发时间均较长，但径向生长速率更快，电树枝呈枝状；有机硅树脂中电树枝均在 1 min 内引发，但引发后生长速率较慢，电树枝大多呈现藤枝状。电机绕组绝缘应优先采用电树枝生长速率较小的浸渍漆，以最大程度延长电机使用寿命。

表 4 电树枝沿绝缘带界面的延伸与击穿特性

Table 4 Extension and breakdown characteristics of electrical tree along insulating tape interface

绝缘带	延伸速率/(μm·min^{-1})	耐受时间/min
聚酰亚胺薄膜	5.74	45
聚酰亚胺补强云母带	2.61	231
玻璃布补强云母带	1.21	750

2）随脉冲重复率增加，两种浸渍漆中电树枝的引发时间缩短，径向生长速率增大，生长至绝缘带时的径向长度与电树枝形态有关。聚丁二烯树脂中电树枝的稠密程度随脉冲电压重复率提高而增大，但有机硅树脂中电树枝的稠密程度随脉冲重复率提高而减小。

3）在 7 kV/2 kHz 的脉冲电压下，聚丁二烯树脂浸渍漆与 3 种绝缘带构成的层状复合试样中，电树枝沿绝缘带界面生长形态相似，但电树枝的横向延伸速率及耐受时间差异较大。其中，玻璃布补强云母带与聚酰亚胺薄膜和聚酰亚胺薄膜补强云母带相比，对电树枝生长的抑制效果最突出。

参考文献 References

[1] 刘冠芳，王 晶，吉永红，等. 牵引电机绝缘材料的现状与发展趋势[J]. 绝缘材料，2016，49(9)：10-13.
LIU Guanfang, WANG Jing, JI Yonghong, et al. Status and development trend of insulating materials for traction motor[J]. Insulating Materials, 2016, 49(9): 10-13.

[2] IEDA M, NAWATA M. A consideration of treeing in polymers[C]// Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1972. Buck Hill Falls, USA: IEEE, 2016: 143-150.

[3] 赵 鑫，韩 涛，马婷婷，等. 交直流叠加电压下硅橡胶内电树枝特性[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3173-3180.
ZHAO Xin, HAN Tao, MA Tingting, et al. Characteristics of electrical tree in silicone rubber under DC superimposed with AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3173-3180.

[4] 马婷婷，杜伯学，韩 涛，等. 温度梯度下 SIR/EVA 共混对电缆附件电树枝生长的抑制研究[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4229-4235.
MA Tingting, DU Boxue, HAN Tao, et al. Suppression method of SIR/EVA blends on the growth of electrical tree in cable accessories under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4229-4235.

[5] 项佳宇，崔 翔，李学宝，等. 工频电压下有机硅凝胶的电树枝发展规律及其局部放电特性[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1796-1804.
XU Jiayu, CUI Xiang, LI Xuebao, et al. Propagation of electrical tree and characteristic of partial discharge in silicone gel used for the encapsulation in power module[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1796-1804.

[6] 何恩广，周 升，刘学忠，等. PWM 变频电机绝缘技术的研究进展[J]. 绝缘材料，2002，35(4)：18-25.
HE Enguang, ZHOU Sheng, LIU Xuezhong, et al. Development of research on the insulation failure of PWM inverter-fed motor[J]. Insulating Materials, 2002, 35(4): 18-25.

[7] 秦玉文，王 鹏，任俊文，等. 脉宽调制电压对环氧树脂电树引发及生长特性影响研究[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3273-3282.
QIN Yuwen, WANG Peng, REN Junwen, et al. Impact of pulse width modulation voltage on electrical tree characteristics in epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3273-3282.

[8] 杨 能，王 鹏，吴 琦，等. 重复脉冲电压频率对环氧树脂电树枝引发特性的影响[J]. 绝缘材料，2019，52(12)：58-64.
YANG Neng, WANG Peng, WU Qi, et al. Effect of repetitive impulse voltage frequency on initiation characteristics of electrical tree in epoxy resin[J]. Insulating Materials, 2019, 52(12): 58-64.

[9] 惠苏新，王 鹏，吴 琦，等. 重复脉冲占空比对环氧树脂电树生长特性影响研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(16)：5383-5391.
HUI Suxin, WANG Peng, WU Qi, et al. Study of the Influence of repetitive impulse voltage duty cycle on the treeing characteristics of epoxy resin[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5383-5391.

[10] DU B X, XUE J S, SU J G, et al. Effects of ambient temperature on electrical tree in epoxy resin under repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1527-1536.

[11] 杜伯学，张苗苗，姜惠兰，等. 环氧树脂在低温环境下的电树枝生长特性[J]. 高电压技术，2016，42(2)：478-484.
DU Boxue, ZHANG Miaomiao, JIANG Huilan, et al. Growth characteristics of electrical tree in epoxy resin under low temperature[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 478-484.

[12] COOPER J M. The effect of barriers on electrical treeing[C]// 1988 Fifth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Canterbury, UK: IEEE, 1988: 238-241.

[13] AUCKLAND D W, RASHID A, VARLOW B R. Effect of barriers on tree growth in solid insulation[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1995, 142(4): 283-287.

[14] UEHARA H, KUDO K. Barrier effect of treeing in composite insulating materials with heat-adhesive interfaces of different polymers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1266-1271.

[15] VOGELSANG R, BRUTSCH R, FROHLICH K. How imperfections in mica tape barriers influence tree growth and breakdown time[C]// 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Albuquerque, USA: IEEE, 2003: 657-660.

[16] VOGELSANG R, BRUTSCH R, FARR T, et al. Electrical tree propagation along barrier-interfaces in epoxy resin[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2002: 946-950.

[17] VOGELSANG R, BRUTSCH R, FROHLICH K. The effect of tape overlappings in winding insulations on tree growth and breakdown time[C]// The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004. Boulder, USA: IEEE, 2004: 294-297.

[18] VOGELSANG R, FARR T, FROHLICH K. The effect of barriers on electrical tree propagation in composite insulation materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 373-382.

[19] ZHANG R, LIU X Z, ZHANG T L, et al. Electrical tree propagation in composite insulation for wind turbine generator under repetitive impulse voltage[C]// 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada: IEEE, 2016: 1007-1010.

[20] ZHANG R, LIU X Z, WANG M, et al. Comparison of electrical tree propagation in epoxy composite insulation for WTG under repetitive impulse and AC stresses[C]// 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Xi'an, China: IEEE, 2017: 511-514.

[21] ZHANG R, LIU X Z, HAN J B, et al. Effect of repetitive rates of impulse voltage on electrical treeing in epoxy and barrier composited insulations[C]// 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Fort Worth, USA: IEEE, 2017: 781-784.

[22] LIU X Z, WANG J N, ZHANG R, et al. Electrical tree characteristics under AC and repetitive pulse voltages in wind turbine generator composite insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 1007-1014.

[23] 李盛涛，郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
LI Shengtao, ZHENG Xiaoquan. Electrical trees in polymers[M]. Beijing, China: Machinery Industry Press, 2006.

[24] 郑晓泉，CHEN G. 机械应力与电压频率对 XLPE 电缆电树的影响[J]. 高电压技术，2003，29(4)：6-8.
ZHENG Xiaoquan, CHEN G. The influence of residual mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 6-8.

[25] TANAKA T. Charge transfer and tree initiation in polyethylene subjected to AC voltage stress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 424-431.

[26] DENSLEY R J. An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1979, EI-14(3): 148-158.

[27] 郑晓泉，CHEN G，DAVIES A E. 交联聚乙烯中的滞长型丛林状电树枝特性研究[J]. 绝缘材料，2003，36(3)：25-27.
ZHENG Xiaoquan, CHEN G, DAVIES A E. Study on the characteristics of electrical tree with bush structure and growing very slowly in low frequency[J]. Insulating Materials, 2003, 36(3): 25-27.

[28] 郑晓泉，CHEN G，DAVIES A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的导电和非导电型电树枝[J]. 中国电机工程学报，2004，24(3)：140-144.
ZHENG Xiaoquan, CHEN G, DAVIES A E. Conducting and non-conducting electrical trees in XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 140-144.



TANG Yanxia

唐艳霞
1995—，女，硕士生
主要从事电力设备电气绝缘性能测试研究
E-mail: tangyx2015@163.com



LIU Xuezhong
Ph.D., Professor
Corresponding author

刘学忠(通信作者)
1962—，男，博士，教授，博导
主要从事电机绝缘故障诊断与寿命评估、电力设备腐蚀与防腐等方面的研究工作
E-mail: xliu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2022-05-07 修回日期 2022-10-18 编辑 曹昭君