第 52 卷 第 5 期：2271-2281 高电压技术 Vol.52, No.5: 2271-2281
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250433

长油隙下多元混合绝缘油的雷电冲击放电特性

叶文郁[1]，郝　建[2]，刘广良[1]，廖瑞金[2]
（1. 中国矿业大学电气工程学院，徐州 221116;
2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044）

摘　要：多元混合绝缘油长油隙下的雷电冲击放电特性是评估其绝缘性能的重要参数，对变压器结构优化设计具有重要指导意义，是其能否在高电压等级、大容量变压器中安全可靠应用的关键依据。该文开展了 25~105 mm 间隙下多元混合绝缘油的雷电冲击击穿特性研究，研究了多元混合绝缘油的放电发展速度、流注发展形貌、放电击穿电压及威布尔分布。结果表明：由于多元混合绝缘油中酯类绝缘油流注存在加速效应，其长油隙下的雷电冲击放电发展速度比矿物油更快；短间隙条件下，多元混合绝缘正负极性流注形貌分别呈现多分支细丝状和细丝状，长间隙条件下，多元混合绝缘油正负极性流注形貌分别呈现灌木丛状和树枝状，在放电发展过程中存在明显的发光和二次流注现象；多元混合绝缘油正极性雷电冲击击穿电压略低于矿物油，显著高于酯类绝缘油，与二元混合绝缘油和三元混合绝缘油相差不大，多元混合绝缘油负极性雷电冲击击穿电压比现有混合绝缘油高 16%~50%，在 85~105 mm 间隙下与矿物油基本相当。

关键词：多元混合绝缘油；雷电冲击；长油隙；放电特性；变压器

Lightning Impulse Discharge Characteristics of Multi-component Mixed Insulating Oil Under Long Oil Gaps

YE Wenyu[1], HAO Jian[2], LIU Guangliang[1], LIAO Ruijin[2]
(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology(School of Electrical Engineering, Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract：The lightning impulse breakdown properties of multi-component mixed insulating oil under long oil gaps are crucial parameters for evaluating its insulation performance. These characteristics provide valuable guidance for optimizing transformer structure design and serve as a key foundation for ensuring the safe and reliable operation of high-voltage and large-capacity transformers. This study investigates the lightning impulse discharge characteristics of long oil gaps in multi-component mixed insulating oil, focusing on the discharge point development speed, streamer development morphology, breakdown voltage, and Weibull distribution under oil gap lengths ranging from 25 mm to 105 mm. The findings reveal that, due to the acceleration effect of ester insulating oil flow within the multi-component mixture, the development speed of lightning impulse discharge under long oil gaps is significantly faster than that of mineral oil. Under short-gap conditions, the discharge point development speed of multi-component mixed insulating oil is also higher for both positive and negative electrodes compared to mineral oil. The streamer morphologies under positive and negative polarities exhibit multi-branched filaments and single filaments, respectively. For long-gap conditions, the streamer morphologies are bush-like for positive polarity and tree-like for negative polarity. In terms of breakdown voltage, the positive polarity lightning impulse breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil is slightly lower than that of mineral oil but significantly higher than that of ester insulating oil. Furthermore, it is comparable to binary and ternary mixed insulating oils. The negative polarity lightning impulse breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil is 16%~50% higher than that of existing mixed insulating oils. Specifically, it aligns closely with mineral oil at gaps between 85 mm and 105 mm.

Key words: multi-component mixed insulating oil; lightning impulse; long oil gap; discharge characteristics; transformers

基金资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金(2025QN1118)。
Project supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(2025QN1118).

0 引言

为了解决化石燃料的过度消耗的威胁，实现我国“碳达峰”和“碳中和”的伟大目标，电网主设备的绿色环保、智能化面临巨大的技术挑战。工业和信息化部等五部门联合印发加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划的通知，油浸式电力变压器等关键核心电力设备，应向高电大容量、绿色环保、安全低碳型方向发展。电网在运 1 700 多万台变压器中，矿物油变压器占比超 90%以上。传统矿物油变压器在电网中使用已超百年[1]，矿物油纸绝缘系统在冲击电场作用下的绝缘性能和经济性优，但其易老化、阻燃性及生物降解率差，严重制约着变压器安全运行水平[2]。目前，我国电网日益凸显的问题是运行 15 年及以上老旧矿物油变压器数量呈快速增长态势，且老旧矿物油变压器处于其故障率“浴盆曲线”的急速上升阶段，导致电网安全运行面临巨大压力。性能优异的绝缘油是保障油浸式变压器安全可靠运行的前提[3]。特高压、大容量电力设备和绿色电网的发展对绝缘油的综合性能提出了更高的要求，绝缘油应该同时具备优异绝缘性能、散热性能、防火性能和环保性能等。

近年来，围绕矿物绝缘油替代，国内外的研究主要聚焦于天然酯、合成酯和混合绝缘油等方面[4-6]。与矿物油相比，天然酯阻燃性和热稳定性强且可再生，其工频/直流击穿特性优异，可以改善变压器内电场分布，延缓绝缘纸老化[7-8]。但是，天然酯存在介质损耗因数和黏度高、氧化安定性差等缺点，无法实现新旧矿物油变压器的再填充，需要根据其性能参数对变压器的结构进行改造，这大幅度提高了天然酯应用的成本。合成酯氧化安定性比天然酯更优，但其黏度较大且成本较高，合成过程的工艺效果较难控制，仍未广泛推广[9]。此外，莫文雄和C.Tran Duy等人研究发现酯类绝缘油在长油隙下(≥25 mm)的雷电冲击绝缘性能显著低于矿物油[10-11]。高电压等级、大容量变压器的结构尺寸更大，出线端电场集中[12]，对绝缘介质的绝缘击穿强度要求更高；场分布的不均匀性，造成局部电场强度增大；长油隙的流注发展路径更长、更复杂，其放电特性更具特殊性。因此，酯类绝缘油无法直接解决老旧矿物油变压器数量、故障率持续增长的难题，其直接应用于现有矿物油高电压等级的变压器中将存在一定风险[13]。

混合绝缘油可以统筹兼顾不同绝缘油分子的优缺点，是未来发展的重要方向。混合绝缘油的研究最早起源于 2001 年，液体电介质委员会主席 I.Fofana 教授团队首次提出了混合绝缘油的概念，确定了合成酯和矿物油的最优体积配比 20:80[14-15]。C.Perrier 和 A.Beroual 等研究指出体积分数 80%矿物油+20%合成酯组成的二元混合油能有效提高油品的工频击穿电压[16]。西安交通大学徐阳教授等通过试验方式制备出的矿物油+FR3 二元混合绝缘油与单一矿物油相比，在工频击穿电压、防火性能得到了提升[17]。中国电科院寇凌峰等人进行了不同比例下矿物油和植物油的复配，指出植物油含量的增大可有效提高闪点、燃点等指标，但其介损和黏度会相应增大[18]。A Beroual 等人研究发现天然酯/合成酯与矿物油混合后，能够显著提高混合绝缘油的交/直流击穿电压，介电强度远高于矿物油本身[19]。G.Mahidhar 等研究了合成酯和矿物油按照体积比 2:8 组成的混合绝缘油雷电冲击穿特性，发现混合绝缘油的雷电冲击穿电压在正负极性下均高于合成酯但低于矿物油[20]。重庆大学廖瑞金团队将橄榄油和矿物油进行复配，得到一种氧化安定性强、环保性能优、工频击穿电压高的二元混合油[21]。但现有的二元混合绝缘油的性能参数均不满足变压器用矿物油的标准。2019 年，重庆大学廖瑞金团队将 3 种绝缘油进行不同比例的混合，在国际上率先研制出一种性能参数满足 IEC60296-2012 标准要求的新型三元混合绝缘油[22]。该油品可以提升油纸体系的工频击穿电压和沿面闪络电压[23-25]，具有延缓绝缘纸老化的能力[25]。2019 年至今，三元混合绝缘油已经在 10~110 kV 新旧矿物油变压器应用[26]，运行状态良好。但其在针-板电极下负极性雷电击穿电压仅为矿物油的 60%~70%[27]，其应用于更高等级、大容量的变压器将面临挑战。

在本团队先前二元混合绝缘油和三元混合绝缘油研究成果基础上[21-22]，基于绝缘油“结构-性能”的构效关系[28-29]，研制了一种由矿物油和多种酯类绝缘油组成的多元混合绝缘油[30]。与先前的混合绝缘油相比，多元混合绝缘油的基础理化性能和热稳定性优势显著，其性能参数满足 IEC60296-2020 标准要求，但其长油隙下的雷电冲击放电性能研究尚属空白。绝缘油的雷电冲击放电特性是评估其绝缘性能的重要参数[12, 31]，对变压器结构优化设计具有重要指导意义[13]，是大型电力变压器绝缘设计的主

要依据。由于多元混合绝缘油中酯类绝缘油的含量较高，研究多元混合绝缘油在长油隙下的雷电冲击击穿特性可以为多元混合绝缘油应用于 220 kV 及更高等级变压器中提供理论指导。因此，本文在 25~105 mm 间隙下开展了多元混合绝缘油长油隙的雷电冲击击穿特性，研究了多元混合绝缘油的放电发展速度、流注发展形貌、放电击穿电压及威布尔分布。本文为多元混合绝缘油在高压、大容量变压器中应用提供理论依据和数据支撑。

1　雷电冲击击穿试验

1.1　试验样品

本文选择多元混合绝缘油为试验研究对象，其组成成分 25 号矿物油、大豆油、月桂酸乙基己酯和月桂酸异辛酯的体积比为 65：10：20：5[30]。并将矿物油、大豆基天然酯、棕榈基 PFAE、二元混合绝缘油以及三元混合绝缘油作为对比组，对比其雷电冲击放电特性。试验前，将多元混合绝缘油按照一定比例充分搅拌、加热和混合，将其注入双级真空滤油机，在 60 ℃下过滤 6~8 h，降低其中的水分和杂质。处理后的多元混合绝缘油静置一段时间后没有分层现象，其主要性能参数见表 1 所示。

1.2　试验平台及方法

多元混合绝缘油的雷电冲击试验平台如图 1 所示，主要包括冲击电压发生器、电容分压器、油罐、电脑控制端和示波器。所用冲击电压发生器为 DY-600 kV 六级冲击电压发生器，额定输出电压为 600 kV，能够产生标准雷击波形。产生的波形信号通过电容分压器传输至采集系统和示波器。采用针-板电极模拟绝缘油在高度不均匀电场中的击穿现象。板电极的直径为 20 cm；针电极尖端曲率半径为 100 μm。在油罐两侧安装高速摄像机和光源，用于观测多元混合绝缘油的雷电冲击放电过程。本实验采用日本 NAC Image Technology 公司生产的 Memrecam ACS M60 系列高速摄像机，配备 60 G 像素/s 的高速摄像系统。根据流注现象的时间需求和试验效果，选择 20 万帧/s 的帧率，分辨率为 336×288 像素。触发方式采用相机内置感光触发机制，通过在观测窗一侧放置光源对电极结构进行纹影成像，在绝缘油形成完整流注放电通道时瞬间触发，记录触发前后 2 s 影像。

根据 IEC 60897 导则，试验温度为 30 ℃，采用逐级升压法测定多元混合绝缘油的雷电冲击放电

表 1　多元混合绝缘油的性能参数

Table 1　Parameters of the multi-component mixed insulating oil

参数	单位	数值	
		多元混合绝缘油	矿物油
密度(20 ℃)	kg/m³	881	890
水分质量分数	10^{-6}	28	11
倾点	℃	–57	–35
击穿电压(2.5 mm)	kV	80.9	70
运动黏度(40 ℃)	mm²/s	8.739	9.2
介质损耗(90 ℃)		0.004 8	0.001
酸值	mg KOH/g	0.008	0.008
闪点	℃	154	135

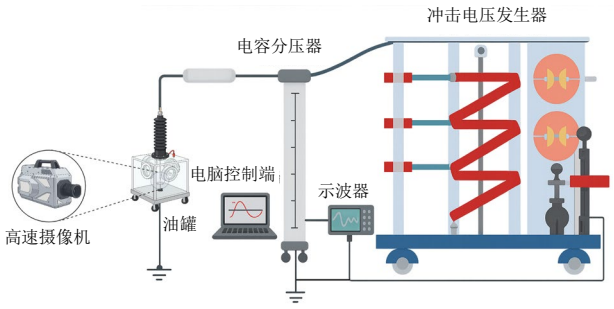


图 1　月桂酸改性酯雷电冲击试验平台

Fig.1　Test platform for lauric-acid-modified ester lightning impulse

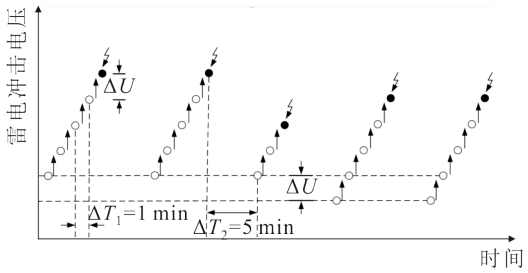


图 2　逐级升压法示意图

Fig.2　Schematic of stepwise voltage increment method

特性，逐级升压法过程如图 2 所示。具体步骤如下：调整发生器的电阻和电容，生成标准的雷电冲击电压波形；根据预估击穿电压和油隙间距合理选择起始电压值(U_{i1})和级电压(ΔU)；从起始电压开始，以级电压为步长逐级升压至击穿。要求每次升压需间隔 1 min，若发生击穿，需对油样进行搅拌并静置 5 min，以减少击穿产物及残余电荷对后续试验造成的干扰。每次升压过程中，要求试样至少承受 3 次冲击电压而不发生击穿，否则，需降低起始电压至 U_{i2} 重新试验。试验的油隙宽度为 25~105 mm，每

个绝缘油样品进行 10 次击穿，测试结果采用 Weibull 分布函数进行拟合。完成 10 次击穿后更换新油样。

2 试验结果分析

2.1 电流和电压波形

图 3 绘制了多元混合绝缘油雷电冲击放电发展过程的电压和电流波形，从形状上来看不同油隙宽度和正负极性下的波形均属于标准的雷电波形。其中 U_{pak} 为雷电冲击电压波峰值，绝缘油样品在击穿过程中外施电压的最大值，即为绝缘油样品的雷电冲击击穿电压；t_c 为雷电冲击击穿放电发展时间，即从开始加压至击穿的时间段；I_{max} 为雷电冲击击穿电流峰值，电极间形成放电通道，电流达到峰值；I_{min} 为雷电冲击击穿反向电流峰值，放电回路的电感会使电流反向，形成反向电流峰值。图 3 结果表明：相同间隙下负极性击穿过程的放电发展时间比正极性更长，负极性的电流最大峰值高于正极性；放电发展时间差异会导致放电发展速度的不同；在负极性长油隙的条件下，放电过程电流最大值越大，表明击穿所需要能量越高。

2.2 平均放电发展速度

若将流注发展过程视为匀速传播，提取示波器上的放电发展时间，根据式(1)可以计算出绝缘油雷

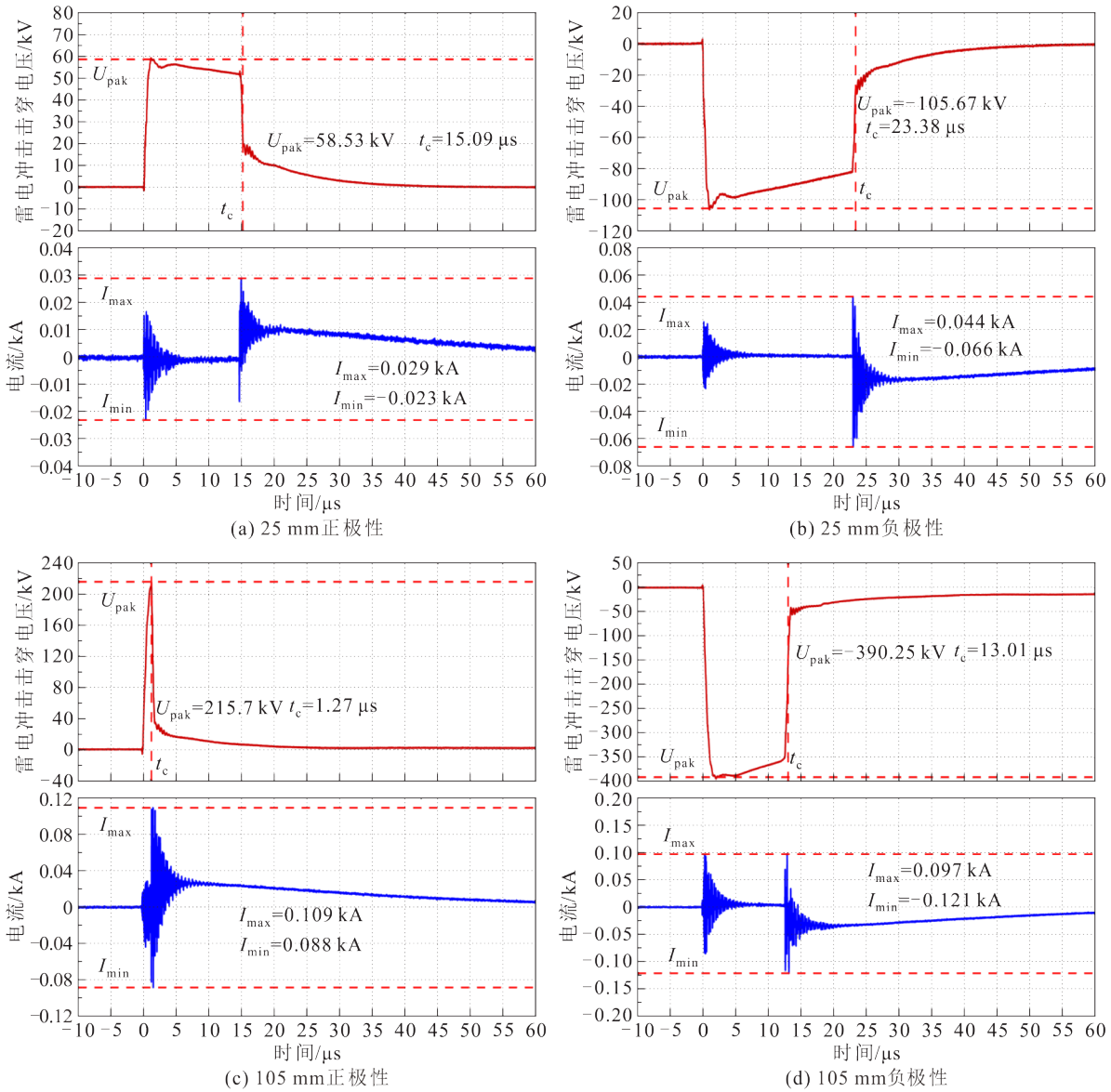


图 3 针-板电极下多元混合绝缘油雷电冲击放电过程中电压和电流波形

Fig.3 Voltage and current waveform during lightning impulse discharge of multi-component mixed insulating oil under pin-plate electrode

电冲击过程中的平均放电发展速度[27,32]，式中 t_c 为放电发展时间，l_{oil} 为油隙宽度。

$$v = l_{oil}/t_c \tag{1}$$

图 4 为不同油隙距离下多元混合绝缘油和矿物油雷电冲击平均放电发展速度的变化。在正极性条件下，油隙宽度为 25~65 mm 间两种绝缘油的平均放电发展速度相差不大，在 1.59~3.08 km/s 之间，属于慢速流注；当油隙宽度增大至 85~105 mm 时，多元混合绝缘油的平均放电发展速度显著增大，此时多元混合绝缘油为快速流注，约为矿物油放电发展速度的 7.76 倍。多元混合绝缘油中含有几种酯类绝缘油，酯类绝缘油在正极性、长油隙条件下击穿电压与加速电压基本一致[12]。相比于矿物油，酯类绝缘油分子的电离能、激发能和能隙更小，导致酯类绝缘油分子在电场作用下更容易电离并产生电子，促进电子崩和流注的形成，从而加快了多元混合绝缘油的平均放电发展速度[29]。此外，长油隙下较高的外施电压导致针板电极电场畸变更强，油中局部场强增大，此时酯类绝缘油分子的电离能、激发能等微观参数与矿物油的差异更显著，导致多元混合绝缘油在长油隙下的平均放电发展速度远大于矿物油。因此，当外施电压达到或超过酯类绝缘油的加速电压时，多元混合绝缘油中的酯类绝缘油流注发生加速现象，导致多元混合绝缘油在油隙间距为 85~105 mm 下出现快速流注。

在负极性条件下，油隙宽度在 25~65 mm 的范围内，矿物油的平均放电发展速度和多元混合绝缘油相差不大，流注发展速度在 1.17~1.81 km/s，均属于慢速流注；当油隙距离为 105 mm 时，多元混合绝缘油的平均放电发展速度显著增大，约为矿物油的 2.54 倍，此时两种绝缘油的流注均属于快速流注。

2.3　放电发展形貌

为消除背景光源对流注形貌观测的影响，本文将多元混合绝缘油流注形貌黑白原始图像进行伪彩色处理，流注图像中颜色越亮的地方越红，颜色越暗的地方越蓝，处理前后的效果如图 5 所示。

图 6(a)和 6(b)为 25 mm 间隙下多元混合绝缘油在正负极性下放电发展的全过程，图中 0 μs 为相机通过感光触发捕捉到流注放电通道形成的时刻，0 μs 之前为流注放电发展的起始过程，0 μs 之后的为流注通道形成后电荷消散的过程。针-板电极作用下，针尖处电场畸变严重，多元混合绝缘油的流注在针尖处更浓密。多元混合绝缘油流注从针尖处起

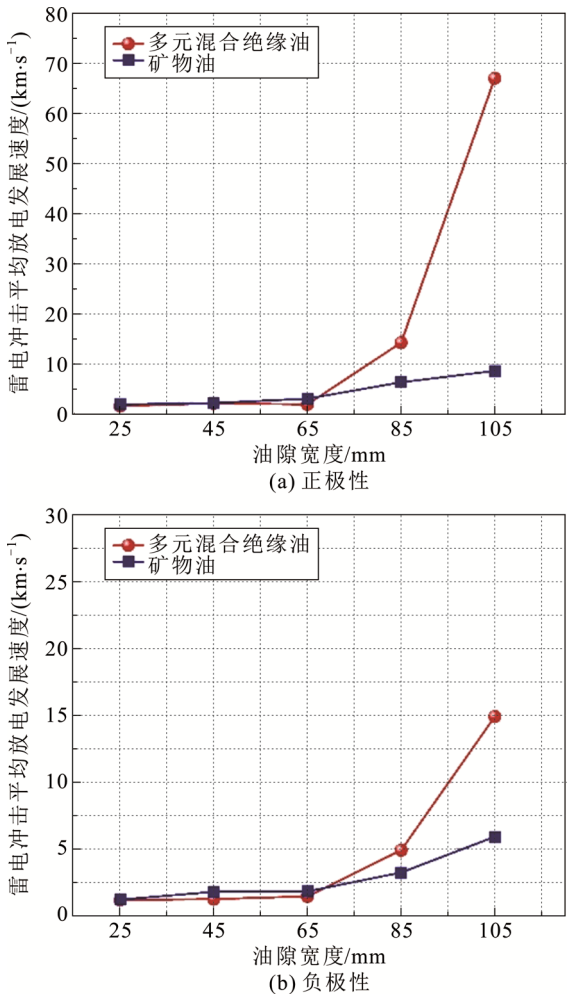


图 4　多元混合绝缘油和矿物油雷电冲击平均放电发展速度

Fig.4　Average lightning impulse discharge development rate of multi-component mixed insulating oil and mineral oil

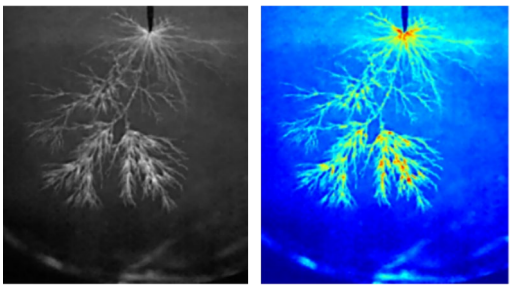


图 5　绝缘油处理前后流注图像

Fig.5　Streamer of insulating oil before and after processing

始，不断向前发展和延伸。正极性条件下，多元混合绝缘油针尖部分的流注形貌呈现发散性多分支细丝状，当能量积聚到一定程度时，流注很快地从针电极发展到平板电极形成明亮的放电通道，发光通道内的电子密度相对较高；在放电通道形成之后，出现了发光和二次流注现象，该区域残存气相通道

出现绝缘油分子的激发和光子的电离从而促进二次电子崩的形成[33]，这为二次流注提供有利条件；最终，放电通道逐渐消散并伴随着颗粒和气泡的产生。负极性条件下，多元混合绝缘油起始阶段的流注分支较少，呈现细丝状，二次流注现象较弱。

由于在更高外加电压条件下无法保证高速摄像机的安全，本文以间隙 65 mm 为例拍摄了多元混合绝缘油长间隙的雷电冲击放电发展过程，如图 6(c)和 6(d)所示。正极性下，多元混合绝缘油流注形貌的分散性和发射性更强且呈现灌木丛状；负极性下，多元混合绝缘油流注形貌呈现树枝状，主干和分支更粗。但值得注意的是，65 mm 间隙下多元混合绝缘油正负极性下的放电通道形成后，都出现了明显二次流注现象。因此，在长间隙的条件下分子的激发过程和光子的电离是不可忽略的重要影响因素。

2.4 雷电冲击击穿电压

图 7 计算了多元混合绝缘油击穿电压的平均值，并与市面主流的绝缘油(矿物油、大豆基天然酯、棕榈基 PFAE)进行对比。纵向对比发现，多元混合绝缘油在正极性条件下的雷电冲击击穿电压均低于负极性。主要原因在于多元混合绝缘油正极性条件下的流注呈多分支细丝状或灌木丛状，其负极性条件下流注呈较粗树枝状且主干较粗、分支较少。正、负极性条件下流注形貌相比，正极性流注的分散性更强，可以形成多重放电路径，从而加快了平均放电发展速度，降低了多元混合绝缘油在正极性雷电冲击下的绝缘水平。

对于不同的绝缘油，在正极性、25~65 mm 油隙距离条件下，多元混合绝缘油与矿物油的平均放电速度相当，因此两者的平均雷电击穿电压相差不大；但在正极性、105 mm 油隙距离下，多元混合绝缘油的平均放电发展速度显著增大且远大于矿物油，导致其平均击穿电压比矿物油低约 16.98%；与大豆基天然酯和 PFAE 相比，任意油隙宽度下多元混合绝缘油的平均雷电冲击击穿电压均更高，比大豆基天然酯和 PFAE 分别高约 5.53%~50.75%和 8.19%~71.68%。

在负极性的条件下，多元混合绝缘油在 25 mm 油隙宽度下的平均雷电冲击击穿电压仅为矿物油的 54.42%；随着油隙宽度的增大，多元混合绝缘油和矿物油的平均雷电冲击击穿电压差异显著缩小，当油隙宽度为 105 mm 时二者平均雷电冲击击穿电压基本相当。与两种酯类绝缘油相比，任意间隙下多

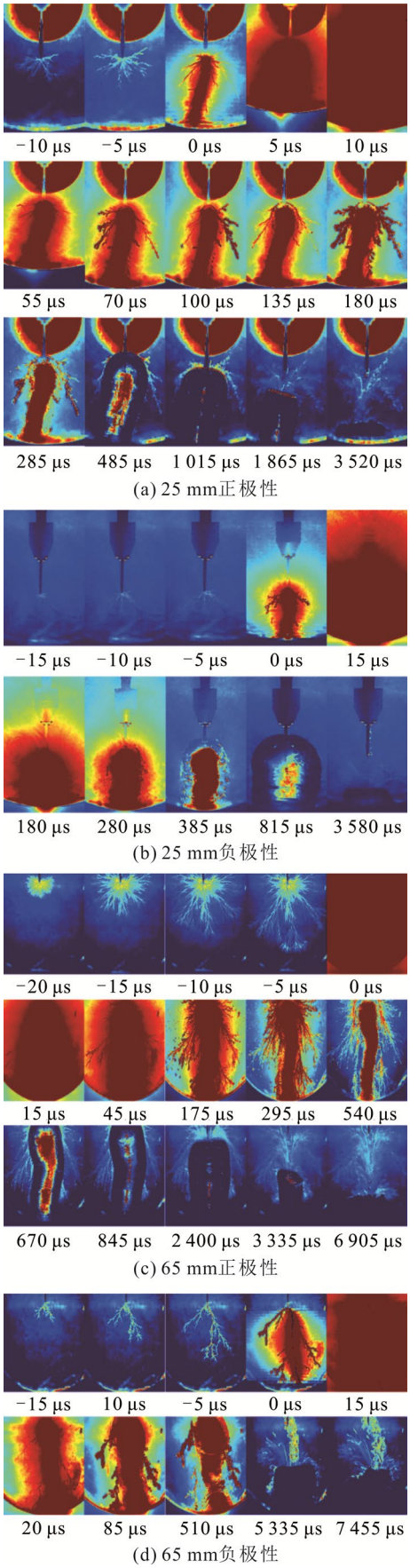


图 6 多元混合绝缘油雷电冲击放电击穿全过程

Fig.6 The whole process of multi-component mixed insulating oil lightning impulse discharge breakdown

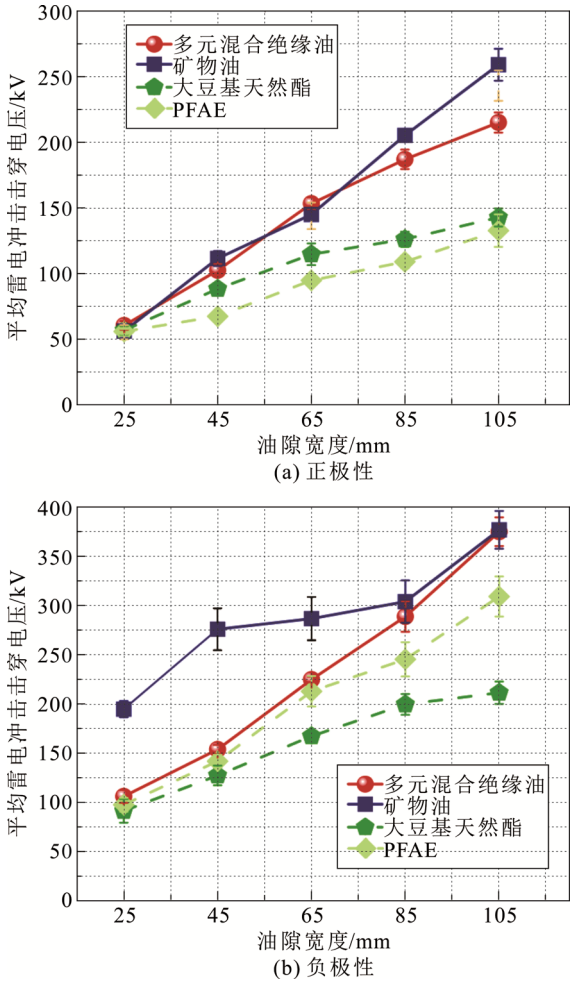


图 7　多元混合绝缘油和 3 种主流绝缘油的雷电冲击击穿电压

Fig.7　Lightning impulse breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil and three main insulating oils

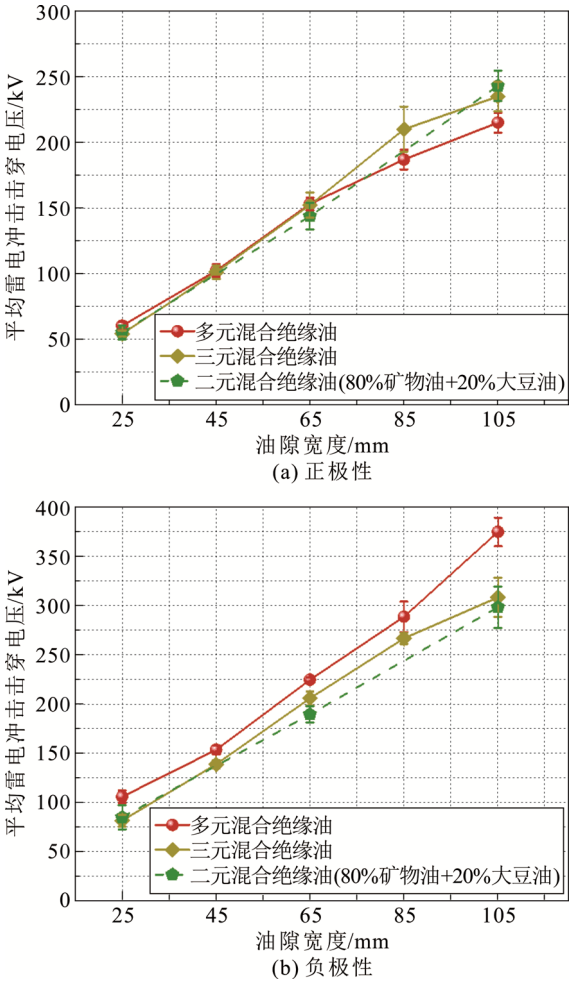


图 8　二元、三元和多元混合绝缘油的雷电冲击击穿电压

Fig.8　Lightning impulse breakdown voltage of binary, ternary and multicomponent mixed insulating oil

元混合绝缘油平均雷电冲击穿电压均高于两种酯类绝缘油，当油隙宽度为 105 mm 时，分别比大豆基天然酯和 PFAE 高 77.44%和 21.29%。整体来看，长油隙条件下多元混合绝缘油的雷电冲击击穿电压与矿物油相差不大但远高于酯类绝缘油。

图 8 对比了多元混合绝缘油、三元混合绝缘油和二元混合绝缘油的平均雷电冲击击穿电压。正极性条件下，间隙较短时 3 种混合绝缘油的平均雷电冲击击穿电压相差不大，随着油隙的增大，多元混合绝缘油的平均雷电冲击击穿电压略低于其余两种混合绝缘油。负极性条件下，多元混合绝缘油的平均雷电冲击击穿电压在任意间隙下均高于三元混合绝缘油和二元混合绝缘油，高 3.33%~29.63%。

2.5　击穿电压威布尔分布

图 9 绘制针-板电极下多元混合绝缘油和矿物油雷电冲击击穿电压的威布尔分布图，根据威布尔分布公式计算了在失效概率 1%和 90%条件下 2 种绝缘油的雷电冲击击穿电压，如表 2 和表 3 所示。2 种绝缘油的威布尔分布图与上述平均击穿电压的相关结论一致。

正极性条件下，在失效概率为 1%、63.2%和 90%和 25 mm 油隙条件下，多元混合绝缘油的雷电冲击击穿电压分别比矿物油高 9.63 kV、3.5 kV 和 1.8 kV；当油隙宽度增长至 65 mm，多元混合绝缘油在 3 种失效概率时雷电冲击击穿电压比矿物油分别低 1.01 kV、高 9.39 kV 和高 11.51 kV；当油隙宽度为 105 mm 时，多元混合绝缘油在失效概率为 1%、63.2%和 90%时雷电冲击击穿电压比矿物油分别低 16.62%、21.02%和 21.83%。在 25~65 mm 条件下，在不同失效概率下多元混合绝缘油击穿电压和矿物油相差不大甚至略高于矿物油；但在 65~105 mm 条件下，矿物油在不同失效概率下的击穿电压高于

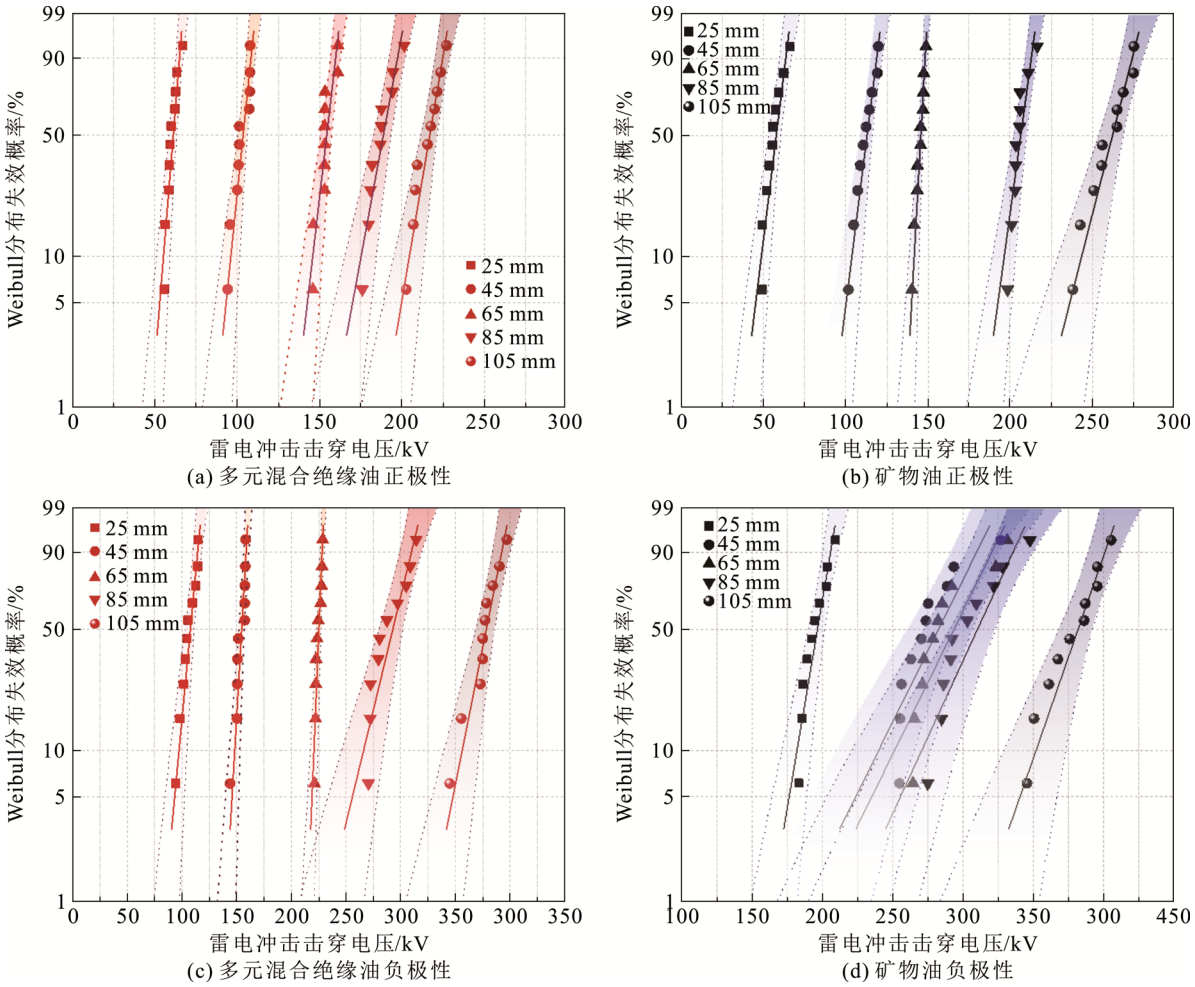


图 9 针-板电极下多元混合绝缘油和矿物油雷电冲击击穿电压威布尔分布

Fig.9 The Weibull distribution of lightning impulse breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil and mineral oil under pin-plate electrode

表 2 正极性不同失效概率下多元混合绝缘油和矿物油的击穿电压

Table 2 Breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil and mineral oil under different fault probabilities of positive polarity

失效概率/%	25 mm 油隙下的击穿电压/kV		65 mm 油隙下的击穿电压/kV		105 mm 油隙下的击穿电压/kV	
	多元混合绝缘油	矿物油	多元混合绝缘油	矿物油	多元混合绝缘油	矿物油
1	48.35	38.72	135.65	136.66	189.77	221.31
63.2	62.02	58.52	155.73	146.34	218.94	264.96
90	64.87	63.07	159.68	148.17	224.69	273.75

表 3 负极性不同失效概率下多元混合绝缘油和矿物油的击穿电压

Table 3 Breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil and mineral oil under different fault probabilities of negative polarity

失效概率/%	25 mm 油隙下的击穿电压/kV		65 mm 油隙下的击穿电压/kV		105 mm 油隙下的击穿电压/kV	
	多元混合绝缘油	矿物油	多元混合绝缘油	矿物油	多元混合绝缘油	矿物油
1	85.23	165.03	215.17	204.28	329.91	316.95
63.2	109.04	198.77	226.17	297.60	381.68	385.97
90	114.03	205.59	228.23	318.62	391.89	400.00

多元混合绝缘油。

负极性条件下，25 mm 油隙条件时多元混合绝缘油在失效概率为 1%、63.2%和 90%的雷电冲击击穿电压分别仅为矿物油的 51.64%、54.86%和 55.46%；当油隙宽度为 65 mm 时，多元混合绝缘油在失效概率为 1%、63.2%和 90%时雷电冲击击穿电压比矿物油分别高 10.89 kV、低 71.43 kV 和低 90.39 kV；当油隙宽度为 105 mm 时，多元混合绝缘油在失效概率为 1%、63.2%和 90%时雷电冲击击穿电压比矿物油低 12.96 kV、4.29 kV 和 8.11 kV。可以看出，在 25~65 mm 油隙宽度下，多元混合绝缘油在不同失效概率下的击穿电压显著低于矿物油；但在 65~105 mm 条件下，多元混合绝缘油在不同失效概率下的击穿电压同矿物油的差异显著降低。

不同失效概率下的击穿电压在变压器结构设计中起着至关重要的作用。图 10 拟合了多元混合绝缘油和矿物油在 1%、63.2%和 90%失效概率下的击穿电压拟合曲线。可以看出，描述击穿电压 U 与油隙距离 d 关系的经验公式可以用幂函数的形式表示，这与前人的研究结果一致[34-35]。综合上述分析可知：当变压器中油隙宽度在 85~105 mm 时，多元混合绝缘油正负极性下的冲击绝缘性能与矿物油相当。在多元混合绝缘油应用于高压大容量变压器时，应该依据本文实验数据并结合多元混合绝缘油变压器的冲击试验来对变压器进行结构优化。

3　讨论

目前，国内外多依靠传统的实验方式制备混合绝缘油，不仅消耗大量的成本，而且缺乏充分的理论依据和理论指导，限制了混合绝缘油综合性能的提升。本团队通过仿真指导、试验验证和仿真与试验相结合的方法优选油品组分，并确定各组分的混合比例，最终制备了多元混合绝缘油[31]。多元混合绝缘油由矿物油、天然酯、改性天然酯组成，各组

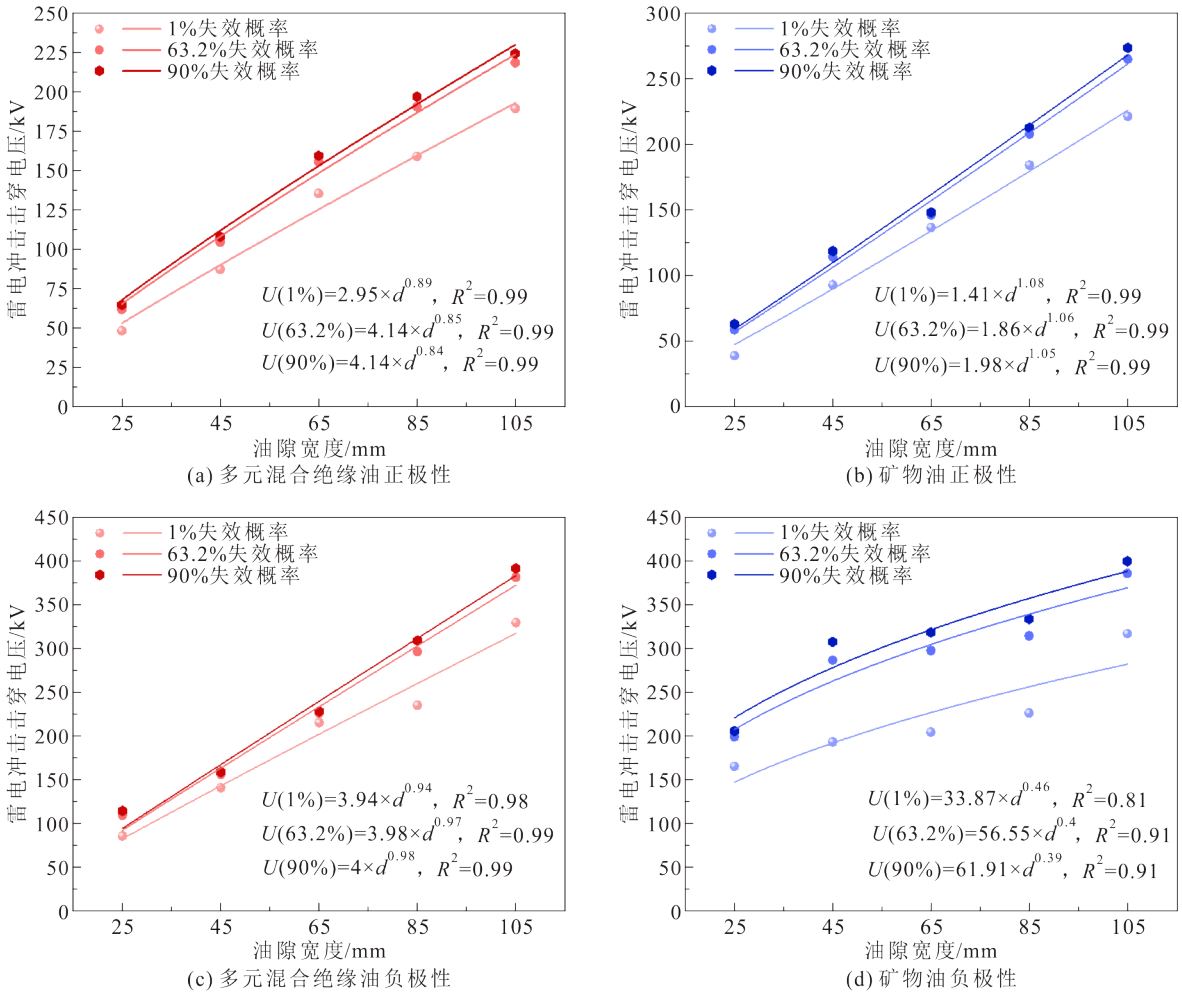


图 10　针-板电极多元混合绝缘油和矿物油不同失效概率雷电冲击击穿电压的经验拟合公式

Fig.10　Empirical fitting formula of lightning impulse breakdown voltage of multi-component mixed insulating oil and mineral oil under different failure probabilities under pin-plate electrode

分无毒，安全性高。经济性方面，矿物油的价格为10 元/L，大豆油为 20 元/L，改性天然酯为 30 元/L，多元混合绝缘油预估成本为 16 元/L。多元混合绝缘油的成本介于矿物油和大豆油之间，经济性较优。环保性方面，多元混合绝缘油中矿物油占比为65%，减少了矿物油的使用，同时提高了混合绝缘油的降解率(生物降解率较矿物油提高 20%~30%)。

本文拟合得到了多元混合绝缘油在不同失效概率下击穿电压与油隙距离关系的经验公式，基于公式能够准确描述击穿电压与油隙距离的关系，使得变压器研发人员可以根据实际的结构尺寸，精确计算出所需的绝缘电压等级。这有助于合理设计绝缘裕度，确保变压器的绝缘可靠性，同时避免过度设计导致的成本增加，缩短研发周期。基于经验公式，设计人员可以针对不同油隙宽度下的绝缘特性，优化变压器的绝缘结构。

在多元混合绝缘油雷电冲击放电过程中，残存的剩余电荷会导致电场畸变、杂质迁移和介质劣化影响其雷电冲击绝缘性能。在未来的研究中，应充分关注并测量剩余电荷对多元混合绝缘油雷电冲击放电特性的影响。多元混合绝缘油预期在 220 kV 变压器中挂网运行，通过对多元混合绝缘油变压器长期性能追踪测试与性能评估，更好地发挥其性能优势，使其在更高电压等级的变压器中得到广泛应用，从而推动电力设备向绿色环保方向发展。

4 结论

1）在正极性条件下，油隙宽度为 25~65 mm 时，多元混合绝缘油和矿物油放电发展速度相差不大，在 1.59~2.21 km/s 之间，属于慢速流注；当油隙宽度为 85~105 mm 时，由于酯类绝缘油的流注加速现象，多元混合绝缘油的放电发展速度显著激增为快速流注。在负极性条件下，油隙在 25~65 mm 的范围内，多元混合绝缘油和矿物油放电发展速度相差不大，流注发展速度在 1.17~1.81 km/s；当油隙距离为 105 mm 时，多元混合绝缘油的放电发展速度约为矿物油的 2.54 倍。

2）短间隙条件下，多元混合绝缘油正极性流注形貌呈现多分支细丝状，其负极性流注形貌呈现细丝状。长间隙条件下，多元混合绝缘油正极性流注形貌呈现灌木丛状，其负极性流注形貌呈现树枝状。在击穿过程中，存在明显的发光和二次流注现象。

3）在针-板电极 25~105 mm 间隙下，多元混合绝缘油正极性雷电冲击击穿电压略低于矿物油，显著高于酯类绝缘油，与现有的混合绝缘油相差不大；多元混合绝缘油负极性雷电冲击击穿电压比现有混合绝缘油高 16%~50%，在 25~85 mm 间隙下与矿物油相差较大，105 mm 间隙下与矿物油相当。多元混合绝缘油长油隙下的雷电冲击击穿电压数据为多元混合绝缘油变压器结构优化提供数据支撑。

参考文献 References

[1] 侯嘉琛，孟 旋，孙 源，等. 直流电压下绝缘油中杂质集聚特性及其影响因素[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4717-4725.
HOU Jiachen, MENG Xuan, SUN Yuan, et al. Law and factors of movement and accumulation of impurities in insulation oil under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4717-4725.

[2] 程 祥，陶霰韬，叶 刚，等. 连续雷电冲击下的变压器油纸绝缘老化特性[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1958-1966.
CHENG Xiang, TAO Xiantao, YE Gang, et al. Aging characteristics of transformer oil-paper insulation under continuous lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1958-1966.

[3] 张钧奕，郝 建，张静文，等. 三元混合绝缘油雷电冲击流注放电发展特性仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5435-5448.
ZHANG Junyi, HAO Jian, ZHANG Jingwen, et al. Development Characteristics of Lightning Impulse Discharge Streamer of Three-element Mixed Insulation Oil Based on Simulation Research[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5435-5448.

[4] 廖瑞金，李博凡，成 立，等. 油纸绝缘中气体输运机理的数值模拟与试验研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3940-3957.
LIAO Ruijin, LI Bofan, CHENG Li, et al. Review on numerical simulation and experimental study of gas transport mechanisms in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3940-3957.

[5] RAO U M, SOOD Y R, JARIAL R K. Performance analysis of alternate liquid dielectrics for power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2475-2484.

[6] 郑含博，杨 杭，风永吉，等. 雷电冲击下天然酯的长间隙击穿特性仿真研究[J]. 电工技术学报，2023，38(23)：6451-6460.
ZHENG Hanbo, YANG Hang, FENG Yongji, et al. Simulation study on long gap breakdown characteristics of natural ester under lightning shock[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6451-6460.

[7] 蔡胜伟，李华强，黄芝强，等. 天然酯绝缘油变压器技术发展及应用概况[J]. 绝缘材料，2019，52(11)：9-16.
CAI Shengwei, LI Huaqiang, HUANG Zhiqiang, et al. Development and application of natural ester insulating oil-immersed transformer technology[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 9-16.

[8] 胡小博，李 坤，陈 荣，等. 天然酯绝缘油在油纸界面放电故障条件下的分解产气特性研究[J]. 绝缘材料，2019，52(11)：70-74.
HU Xiaobo, LI Kun, CHEN Rong, et al. Gas generation characteristics of natural ester under discharge fault at oil-pressboard interface[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 70-74.

[9] ROZGA P, BEROUAL A, PRZYBYLEK P, et al. A review on synthetic ester liquids for transformer applications[J]. Energies, 2020, 13(23): 6429.

[10] MO W X, SONG H Y, HUANG Q D, et al. Differences in characteristics of long-gap lightning impulse breakdown between vegetable and mineral insulating oil[J]. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2021, 22(3): 301-309.

[11] TRAN DUY C, LESAINT O, DENAT A, et al. Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1582-1594.

[12] 林 翔. 植物绝缘油长油隙雷电冲击放电特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2017.
LIN Xiang. Research on the characteristics of large oil gap discharge

in natural ester under lightning impulse[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2017.
[13] SHEN Z J, WANG F P, WANG Z Q, et al. A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110783.
[14] FOFANA I, BORSI H, GOCKENBACH E. Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1040-1047.
[15] FOFANA I, WASSERBERG V, BORSI H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. 1. Investigation of mixed liquids[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 18-31.
[16] PERRIER C, BEROUAL A, BESSEDE J L. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3): 556-564.
[17] YU H C, CHEN R, HU X B, et al. Dielectric and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-4.
[18] 寇凌峰，王金丽，宋祺鹏，等. 不同混合绝缘油性能的试验研究[J]. 绝缘材料，2017，50(2)：76-80.
KOU Lingfeng, WANG Jinli, SONG Qipeng, et al. Experimental study on properties of different mixed insulating oils[J]. Insulating Materials, 2017, 50(2): 76-80.
[19] BEROUAL A, KHALED U, MBOLO NOAH P S, et al. Comparative study of breakdown voltage of mineral, synthetic and natural oils and based mineral oil mixtures under AC and DC voltages[J]. Energies, 2017, 10(4): 511.
[20] MAHIDHAR G D P, SOMASUNDARAM KARTHIKEYAN A, SARATHI R, et al. Dielectric properties of mixed mineral and synthetic ester oil[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(9): 704-714.
[21] 廖瑞金，梁帅伟，李　剑，等. 矿物油和天然酯混合绝缘油的理化特性和击穿电压研究[J]. 中国电机工程学报，2009，29(13)：117-123.
LIAO Ruijin, LIANG Shuaiwei, LI Jian, et al. Study on the physics and chemistry characteristics and breakdown voltage of a mixed insulation oil composed of mineral oil and natural easter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 117-123.
[22] LIAO R J, FENG D W, HAO J, et al. Thermal and electrical properties of a novel 3-element mixed insulation oil for power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 610-617.
[23] FENG D W, HAO J, LIAO R J, et al. Power frequency breakdown characteristics of new 3-element mixed insulation oil and oil-impregnated pressboard[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1885-1893.
[24] FENG D W, HAO J, YANG L J, et al. Comparison of AC breakdown characteristics on insulation paper (pressboard) immersed by three-element mixed insulation oil and mineral oil[J]. High Voltage, 2020, 5(3): 298-305.
[25] CHEN X, HAO J, LIAO R J, et al. Ac surface flashover and gas generation difference of the cellulose insulation pressboard immersed in novel 3-element mixed oil and mineral oil[J]. IEEE Access, 2019, 7: 147048-147059.
[26] FENG D W, HAO J, LIAO R J, et al. Comparative study on the thermal-aging characteristics of cellulose insulation polymer immersed in new three-element mixed oil and mineral oil[J]. Polymers, 2019, 11(8): 1292.
[27] HAO J, FENG D W, LIAO R J, et al. A novel three-element mixed insulation oil and its application in 10 kV distribution transformer[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 74-77.
[28] 陈　鑫，郝　建，冯大伟，等. 三元混合式绝缘油和矿物油的雷电冲击击穿及产气特性对比分析研究[J]. 电工技术学报，2020，35(4)：906-918.
CHEN Xin, HAO Jian, FENG Dawei, et al. Comparative study on lightning impulse breakdown and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil and mineral oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 906-918.
[29] YE W Y, HAO J, GAO C Y, et al. Discharge mechanism difference analysis between natural ester and mineral oil under impulse electric field: a DFT investigation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1803-1810.
[30] YE W Y, HAO J, ZHANG J Y, et al. Atomic scale microparameter analysis of modified natural ester molecules related to impulse discharge characteristics under electric field[J]. Renewable Energy, 2023, 219: 119394.
[31] HAO J, YE W Y, ZHANG J W, et al. Preparation and performance characterization of multi-component mixed insulating oil for transformers based on the structure-activity relationship between molecular structure and impulse discharge performance[J]. Energy, 2025, 319: 135023.
[32] 赵　涛，律方成，刘云鹏，等. 纤维素颗粒物对变压器油冲击击穿特性影响的试验研究[J]. 电工技术学报，2018，33(7)：1626-1633.
ZHAO Tao, LÜ Fangcheng, LIU Yunpeng, et, al. Experimental study of cellulose particles effect on impulse breakdown in transformer oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1626-1633.
[33] 陈修萍. 植物油纸绝缘雷电冲击放电特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2018.
CHEN Xiuping. Research on the characteristics of discharge in vegetable oil-paper insulation under lightning impulse[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.
[34] 李亚莎，夏　宇，胡豁然，等. 外电场下硅橡胶分子微观参数对陷阱形成及沿面放电的影响[J]. 高电压技术，2022，48(3)：839-847.
LI Yasha, XIA Yu, HU Huoran, et al. Effect of molecular microscopic parameters of silicon rubber on trap formation and surface discharge under external electric field[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 839-847.
[35] LIU Q, WANG Z D. Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 285-294.



叶文郁(通信作者)
1995—，男，博士(后)
主要研究方向为先进电工材料的制备、性能表征及分子机制研究
Email: ywypost@163.com

YE Wenyu
Post-doctorate
Corresponding author



郝　建
1984—，男，博士，教授，博导
主要研究方向：输变电设备运行状态监测及故障诊断、先进绝缘材料研发及工程应用
E-mail: haojian2016@cqu.edu.cn

HAO Jian
Ph.D., Professor

收稿日期　2025-04-03　在线出版日期　2025-08-26　编辑　曹昭君