



·综述·

## 液体介质微/纳秒脉冲放电的特性与机理：现状及进展

李 元, 温嘉烨, 李林波, 郜 晶, 石亚轩, 刘志濠, 张冠军

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 液相放电是高电压与绝缘技术领域持续的研究热点, 深入理解微/纳秒脉冲放电的特性与机理有利于促进液相放电在电气装备设计优化、深远海勘探、先进材料制备等前沿领域的创新与突破。总结梳理了近年来液体介质微/纳秒脉冲流注放电特性与机理研究的进展, 从放电模式与转化、分叉行为、击穿过程等方面阐释了流注放电的基础特性, 归纳了液体电导率、压强、溶解气体、杂质与添加剂等物性参数对流注放电特性的影响规律, 分析了液体介质流注放电起始与发展机制(包括气泡理论、液相直接碰撞电离、场致分子电离、电致伸缩效应等)及其适用范围。在此基础上, 展望了液相放电领域的发展方向和面临的挑战, 为相关领域的基础研究和工程应用提供参考。

**关键词:** 液体介质; 微秒脉冲; 纳秒脉冲; 流注放电; 场致分子电离; 电致伸缩

中图分类号: TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210190

## Characteristics and mechanisms of streamer discharge in liquids under micro/nano-second pulsed voltages: status and advances

Li Yuan, Wen Jiaye, Li Linbo, Gao Jing, Shi Yaxuan, Liu Zhihao, Zhang Guanjun

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The studies on discharges in liquid dielectrics have been continuously gaining great attentions in the field of high voltage and insulation engineering. Profound understandings of the characteristics and mechanism of micro/nano-second pulsed discharge in liquids are prerequisites to the innovation and breakthrough of various cutting-edge applications, e.g., optimized electrical equipment design, deep ocean explorations, advanced material synthesis. In this review, we summarize the recent progress in the investigations of characteristics and mechanisms of micro/nano-second pulsed streamer discharge in liquid dielectrics. Fundamental characteristics of streamer discharge are elucidated including discharge modes and transition, branching characteristic, and breakdown. The contributing factors on the streamer characteristics, such as liquid conductivity, pressure, dissolved gas, impurities and additives, are analyzed. Prevailing mechanisms of initiation and propagation of streamer discharge in liquids as well as their application scenarios are discussed, including bubble theory, direct impact ionization, field molecular ionization, electrostriction, etc. Further, we expect the prospects and challenges of liquid discharge to enlighten fundamental researches and engineering applications in the relevant fields.

**Key words:** liquid dielectrics; micro-second pulse; nano-second pulse; streamer discharge; field molecular ionization; electrostriction

液体介质(典型如绝缘油、去离子水等)是优良的绝缘与储能媒介<sup>[1]</sup>, 由于其绝缘强度高、击穿自恢复性能突出、流动散热性好等特点, 在油浸变压器、互感器等高压电力设备及强流脉冲电子束加速器、高能 X 射线源等脉冲功率装置中都有广泛应用<sup>[2-3]</sup>。近年来, 由于放电瞬态观测与诊断技术的进步, 液体介质放电击穿研究在放电多模式发展特性<sup>[4]</sup>、强电场下复杂流体动力学和相变/形变特征<sup>[5]</sup>、放电气体效应的增强与调控方法<sup>[6]</sup>等方面获得快速发展。液相放电研究的驱动力主要源于两个方面: 一是利用液体介质的高绝缘性能优化器件绝缘结构, 实现电

\* 收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607139, 11635004)

作者简介: 李 元(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事液相放电基础与应用研究。

通信作者: 张冠军(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力设备状态评估、放电等离子体特性及应用研究。

力设备、脉冲功率装备的小型化与高可靠性<sup>[7-8]</sup>；二是利用液相放电产生的等离子体、冲击波/声波、活性粒子等物理化学效应在不同领域开展应用研究<sup>[9]</sup>。在“十四五”战略需求指引下，液相放电在电气绝缘<sup>[1-2]</sup>、海洋勘探<sup>[10-11]</sup>、材料制备<sup>[12-13]</sup>、能源开发与转化<sup>[14-15]</sup>等领域开发应用前景广阔。

长期以来，国内外对液体介质中的放电现象与机理开展了很多研究，但主要以电力设备的各种运行环境为背景。研究集中在直流、工频和雷电冲击等电压激励下的放电现象，发现实验结果受外施电压波形、极性、电极结构、间隙距离等因素的影响很大。微/纳秒脉冲电压(纳秒脉冲电压尤甚)作用时间远小于交/直流稳态电压，一定程度上减弱了电极表面物理化学反应、温度等因素产生的时间累积效应<sup>[16-17]</sup>，与稳态电压及长脉冲下的放电机理差异很大，开展微/纳秒脉冲下的放电研究更有利于揭示液体介质放电的本征特性。

在脉冲功率领域，基于水具有高介电常数和储能密度的特点，研究者将水作为脉冲形成线的储能介质，大幅压缩了脉冲形成线长度，研制了低阻抗、高储能密度的电子束加速器<sup>[18-19]</sup>，推动了闪光照相、惯性约束聚变、高功率微波等应用的快速发展<sup>[20-21]</sup>。进一步提高水线的储能密度，缩小脉冲功率装置的尺寸，要求对脉冲电压下水介质的放电击穿特性、规律与微观机理具有深刻理解<sup>[22-23]</sup>。目前，关于微/纳脉冲下液体放电特性的研究工作还相对较少，已报道的成果多是针对某些特殊情况<sup>[24-25]</sup>，如某种绝缘结构或试验条件，迄今为止还没有全面的研究成果揭示放电微观物理机制。

液体介质放电的形成和发展过程亦称为流注<sup>[4,7]</sup>，大量重要的物理化学现象均发生在此过程之中，一直是高压与绝缘领域研究的热点问题。但与气体流注放电相比，液体介质组成复杂、不定形态，液相放电行为的随机性更大；液体对放电等离子体的部分波段发射光谱有较强的吸收作用，影响了放电瞬态观测和光谱诊断技术的应用效果，液体放电等离子体的经典参数数据库建设也显著落后于气体放电。这些都增加了液体介质放电机理研究的难度。

总体来说，与气体放电领域相对成熟的电离模型和击穿机制相比，液体电介质的放电机理认识水平还远远滞后，尚缺乏合理的放电理论解释实验中的各种复杂现象。近年来，随着高速摄影、多物理量联合测量与多时空尺度放电数值模拟等技术的发展，液相放电的微观物理过程逐渐深入，放电机理的认知水平迅速提升。本文梳理总结了近年来在液体介质脉冲放电特性与机理方面的研究进展，为液体介质放电时空演化与模式转换、放电分叉微观过程、击穿过程物理机制等科学问题的研究提供参考，旨在促进相关领域基础研究和工程应用的创新与突破。

## 1 液体介质流注放电的基本过程

### 1.1 流注放电模式及其转化特性

液体介质放电涉及多种电离机制，不同实验条件下(电压参数、液体性质、电极结构)流注放电模式差异显著。本节从液体性质角度出发，分别针对非极性与极性液体中流注放电模式进行阐述，以揭示液相流注放电的复杂发展特性。

对于环己烷、变压器油等有机烃类非极性液体，单次流注放电的时间尺度约在亚 $\mu\text{s}$ 至 $\mu\text{s}$ 量级( $10^{-7}$ ~ $10^{-5}$  s)，其发展涉及液体、气体介质多种电离，亦伴有气液相变过程，放电的物理机制相当复杂。为阐释不同条件下流注放电的各类现象及其作用机制，研究者多根据流注在形貌、传播速度等特性上的差异，将流注放电划分为几种典型模式。其中，法国学者O. Lesaint提出的流注四级发展模式(1998年)是学术界广泛采用的一种分类方法，如图1所示<sup>[26]</sup>。

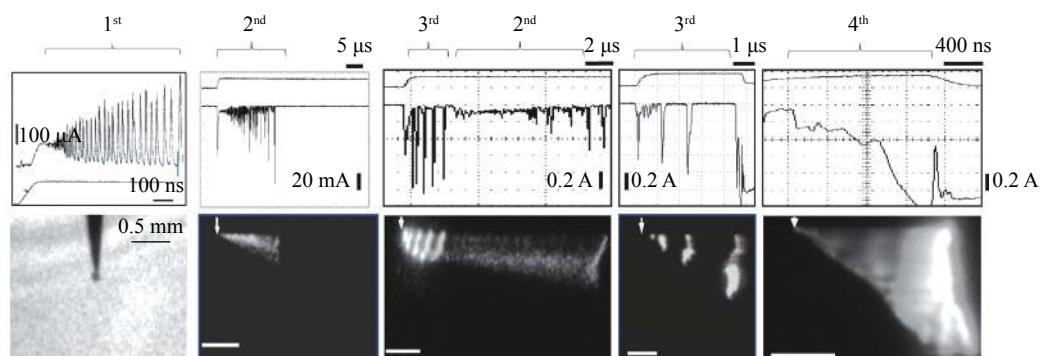


Fig. 1 Four typical modes of streamer discharges in nonpolar liquids<sup>[4]</sup>

图1 非极性液体中流注放电的四类典型模式<sup>[4]</sup>

流注一级模式通常仅在较低外施电压与极小的针尖曲率半径条件下出现(如环己烷中,  $U < 10 \text{ kV}$ ,  $r_p < 5 \mu\text{m}$ , 针板间隙  $d = 2.5 \text{ mm}$ <sup>[4]</sup>)。该模式下流注为呈不规则球形的气相通道(图 1(a)), 此时通道行进速度慢( $< 100 \text{ m/s}$ )且微弱发光, 放电电流脉冲幅值较小( $\sim 100 \mu\text{A}$ )。随外施电压增加, 流注进入二级模式, 放电形貌变化明显, 发展成为具有一定分支的灌木状通道。图 1(b)为天然酯中流注二级模式放电发展过程, 流注速度升至  $1 \sim 3 \text{ km/s}$ , 放电电流增大为毫安级簇状脉冲, 发光强度也显著高于一级模式。二级模式下流注通道内可发生连续的放电熄灭与重燃过程, 而主通道发展速度在此过程中基本保持不变<sup>[26]</sup>。

当外施电压超过液体介质(如天然酯、变压器油<sup>[4]</sup>)的击穿电压时, 三级模式流注形成, 其发展速度跃升至  $10 \text{ km/s}$  以上。与二级模式不同, 三级模式下流注呈现间歇式发展, 电流脉冲幅值迅速攀升至 A 级(图 1(c)~图 1(d))。若继续提高外施电压, 流注发展将不断加速, 直至放电进入四级模式, 发展速度逐渐饱和, 最高可达  $120 \text{ km/s}$ (图 1(e))。四级模式下放电起始后呈现连续发展特征, 直至通道头部到达地电极引发击穿<sup>[27]</sup>。需要指出, 在单次流注发展过程中亦存在不同放电模式的转换, 如图 1(c)中流注起始后为三级模式, 呈间歇式发展, 速度大于  $10 \text{ km/s}$ , 行进一段距离后通道头部电场减弱, 放电转化为二级模式, 以  $\sim 2 \text{ km/s}$  继续向前发展。

极性溶液(如水、乙醇等)在高电场下的电导率往往高于上述非极性液体, 放电时传导电流导致的焦耳热效应使气泡过程更为显著, 所以通常把极性液体的放电模式分为气泡簇放电与丝状流注放电两大类。极性液体的气泡簇放电与非极性液体的一级模式流注类似, 发展速度均为亚音速且多具有球形气泡结构<sup>[28]</sup>。作者结合去离子水中放电的阴影图像、发光图像获取了气泡簇半径随时间的演化特性<sup>[29]</sup>, 如图 2 所示。通过提取气泡半径、发展速度等特征参数, 估算了气泡内部电离系数与气泡表面沉积电荷所承受的静电力。研究表明, 微秒脉冲电压下碰撞电离是诱导去离子水中气泡内弱发光的重要物理机制, 而气-液界面电荷的动态沉积与消散过程是引起气泡不规则形变的主要原因。

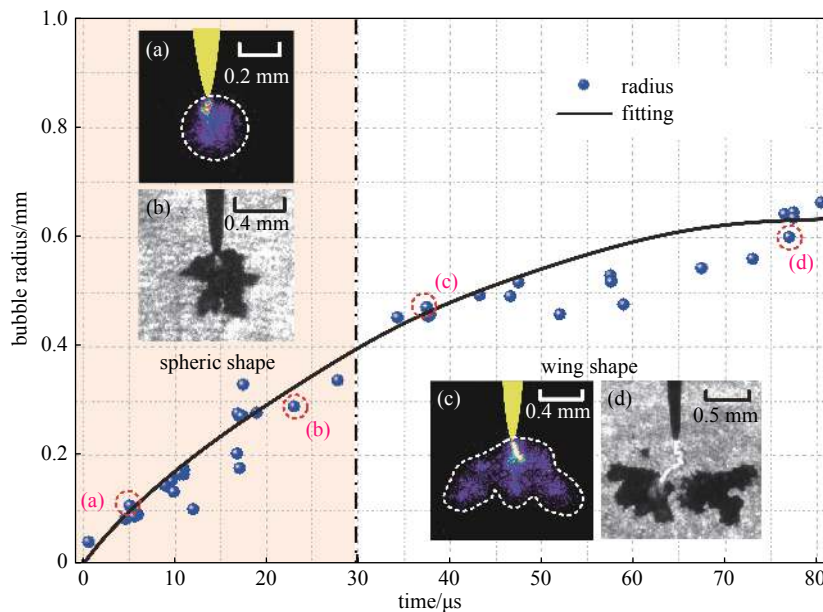


Fig. 2 Bubble radius as a function of time since bubble formation in streamer discharge<sup>[29]</sup>

图 2 水中流注放电产生气泡的半径-时间演化规律<sup>[29]</sup>

极性液体(如去离子水)中的丝状流注放电又分为第一类丝状流注和第二类丝状流注放电<sup>[30]</sup>。第一类丝状流注常具有灌木状结构, 发展速度  $1 \sim 3 \text{ km/s}$ , 而第二类流注多为树枝状结构, 发光强度高, 速度可达  $20 \sim 30 \text{ km/s}$ 。在放电形貌和发展速度上, 极性液体中的第一、第二类丝状流注可分别对应非极性液体的二级、三级放电模式。相同电压幅值下, 水中负极性流注形成的低密度区域比正极性下更大, 负流注通道外侧存在薄气体鞘层, 电离主要发生在气相而非在液相中<sup>[31]</sup>。水中气相区主要是由离子电流(高电导率溶液)或场致电离、场发射过程(低电导率溶液)产生的热量导致。

特别地, 液体流注放电的发展常伴随间歇发光特征, 即放电通道的重燃过程。温小琼等认为, 流注头部与液体介质间存在等离子体鞘层, 鞘层内部场强可达  $400 \sim 800 \text{ kV/cm}$ <sup>[32]</sup>; 当流注发展停滞, 通道头部的正离子在鞘层内累积能量并与液体界面处的水分子发生碰撞电离, 使放电通道继续向前延伸。实验表明<sup>[33]</sup>, 流注的重燃特性与液

体电导率密切相关,通道内部发光间隔正比于界面电荷的弛豫时间,气/液界面电荷的沉积与消散速率是影响间歇发光特性的重要因素。

与微秒放电不同,纳秒脉冲电压作用时间更短,ns时间尺度下液体中离子电流产生的焦耳热可忽略不计。普林斯顿大学 Starikovskiy 等观测到纳秒脉冲下水中放电速度可高达 5000 km/s(约 15% 光速),这一速度远高于微秒脉冲放电<sup>[34]</sup>。纳秒放电过程中气泡尚无足够时间形成,极快脉冲放电(上升沿 ns 甚至 ps)的起始机制将在第 3 节中详细叙述。

## 1.2 流注放电的分叉特性

放电起始与发展的内在驱动力是电场强度,即放电通道总在场强最大处起始(如高压针尖处),但如果仅靠电场驱动,放电通道理论上应沿轴线发展。然而随着流注的发展,电子崩并不一定会沿着相同的方向汇聚,发展至一定长度后,宏观上会呈现出分支状的外形。著名统计物理学家 L. Pietronero 认为,确定性与随机性因素的博弈决定了放电通道分叉的形成<sup>[35]</sup>。

目前,对于放电分叉的研究多集中在气体与固体放电领域。Ute Ebert 等认为在气体放电中通道头部电荷密度的拉普拉斯不稳定性是流注分叉的关键微观机制<sup>[36]</sup>。秋田大学 Yoshimura 等发现水分侵入固体绝缘(聚乙烯、硅橡胶等)后受电场影响发生形变,进而对绝缘材料产生电致应力,使固体内部形成树枝状微通道<sup>[37]</sup>。在液体放电领域,日本学者 Ichiki 等<sup>[38]</sup>利用棱镜巧妙地设计了光路,让放电的不同角度图像进入单台 ICCD 视场,利用立体成像技术重构了放电分支的三维结构。他们的统计结果显示,分支通道的角度随溶液电导率上升而增加,分支平均夹角在  $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。笔者获得了脉冲电压下绝缘油中流注放电的典型光学图像,如图 3 所示。结果显示<sup>[39]</sup>:正流注通道发光强度比负流注高,发展速度也明显快于负流注,外形呈现树枝状分叉结构;负流注多在针尖附近呈现弥散状,局部也存在分叉行为。观测结果与 Akiyama 等研究者提出的液体流注模型<sup>[40]</sup>相符。

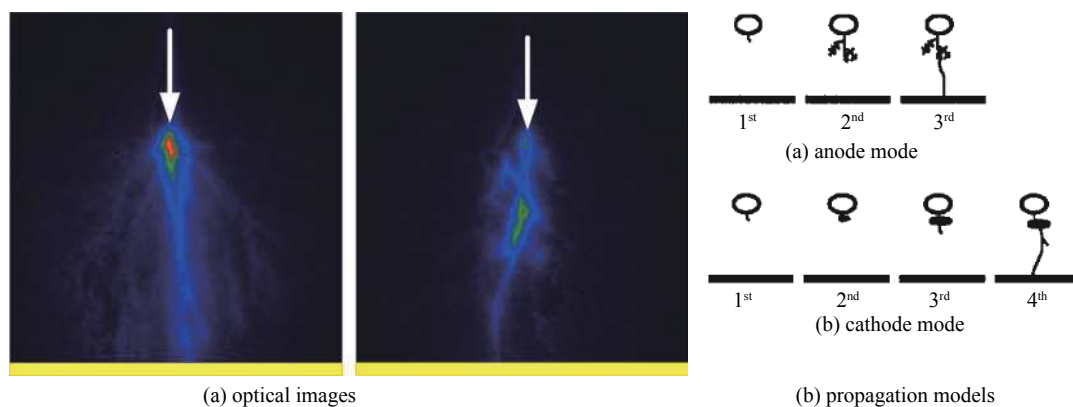


Fig. 3 Optical images and propagation models of positive and negative streamers branching in transformer oil<sup>[39-40]</sup>

图 3 变压器油中正负极性流注分叉的光学图像与发展模型<sup>[39-40]</sup>

在理论计算方面,不同研究团队基于流注通道界面处受力平衡方程对流注表面不稳定状态进行了理论分析<sup>[41-42]</sup>,认为流注分支的形成与通道表面扰动增长速率有关。在较低电场下,流注通道表面张力将使气泡簇放电结构(类球形)向理想球状转变,有利于界面稳定。然而,对于丝状流注放电形成的柱状气相通道,表面张力则会使通道截断形成数个小气泡,反而加剧了通道界面不稳定性。随外加电压增加,界面沉积电荷界面作用力将转化为主导作用力,使流注与液体界面产生突起进而形成分支通道。

在仿真技术方面,瑞士学者 L. Niemeyer 等人<sup>[43]</sup>深入研究了流注通道的分形特性,并基于格子气模型流注发展过程分形模型。该方法认为流注发展与场强值关系密切,通过估算流注在不同节点的发展概率对流注发展轨迹分形系数进行调整,使其与正负极性流注分叉数和形态特征相符。该模型计算电场分布时未考虑空间电荷电场的影响,同时缺乏微观粒子运动过程的描述,无法对微观物理过程进行精确模拟,计算结果与真实情况有一定差距。

近年来,更多的研究者借鉴气体放电仿真的成功经验,开展基于电流体动力学(EHD)方程的液体介质流注仿真,关注放电动态过程中电子密度、能量、电场强度等参量的动态变化,研究流注头部的微观物理过程。美国麻省理工大学 M. Zahn 等开展了油中流注三维建模仿真研究<sup>[44]</sup>,如图 4 所示。这是目前极少的关于液体介质放电的三维辨识成果之一,对于认知放电发展过程具有参考价值。为降低运算的复杂性,其放电通道分叉点是提前预设的,所以在反映放电行为的随机性方面与实际还有一定差距。作者对电介质颗粒影响下的变压器油中流注分叉过程

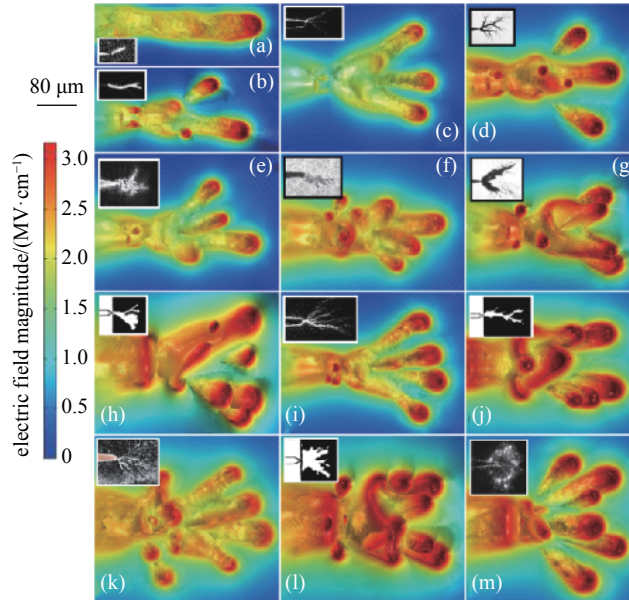


Fig. 4 3D simulation of streamer branching in transformer oil<sup>[44]</sup>

图 4 变压器油中流注分叉三维仿真<sup>[44]</sup>

进行模拟<sup>[45]</sup>,着重考察了流注通道与介质界面的交互作用,仿真结果如图 5 所示。空间电荷与电介质颗粒的分布状况共同决定了电场的分布,进而决定流注附着或脱离电介质表面。当流注形成两个距离较近的分叉通道距离时,其中一个通道往往会逐渐减弱最终消失,优势分支得以继续延伸。

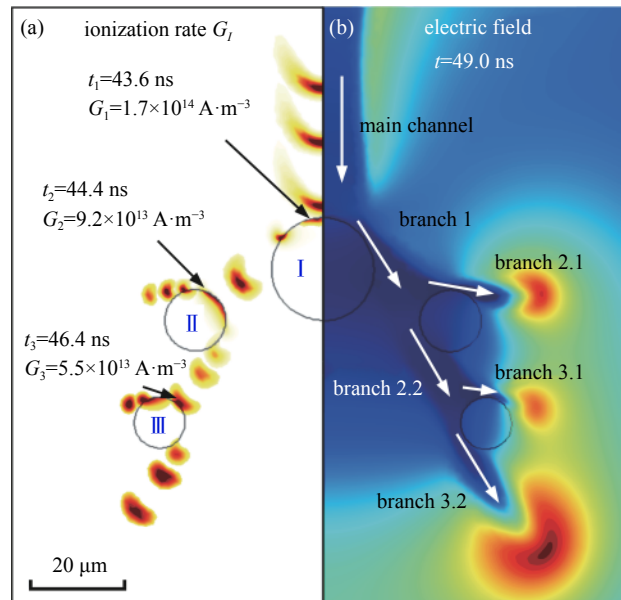


Fig. 5 Streamer branching process in transformer oil due to impurity (2D)<sup>[45]</sup>

图 5 考虑杂质颗粒影响的油中流注分叉过程(二维)<sup>[45]</sup>

### 1.3 液体介质的击穿特性

流注通道发展至地电极时将诱发液体介质击穿的形成,击穿时能量瞬间注入将导致通道急速膨胀,形成强发光现象。研究液体介质的击穿特性不仅对于电力设备的绝缘设计与优化有指导意义,而且对液体放电消毒灭菌、材料合成、能源开采等新兴领域亦具有重要应用价值。目前,针对液体放电击穿过程的研究主要集中在击穿特征参数的统计特性(宏观)与微观物理模型两个方面。

早在 20 世纪 60 年代, Martin 统计了大量微秒脉冲下典型液体的击穿场强实验结果后拟合得到了 Martin 经验公式<sup>[46]</sup>

$$E_{bd} = K t_{eff}^{\alpha} A_{eff}^{\beta} \quad (1)$$

式中:  $\alpha, \beta, K$  均为与液体种类和电压极性有关的常数。公式显示,液体间隙 50% 击穿场强  $E_{bd}$  是电压有效作用时

间  $t_{\text{eff}}$ 、电极有效作用面积  $A_{\text{eff}}$  的函数,可较准确地预测  $0.1\sim 10\ \mu\text{s}$  范围内液体击穿场强(电压)。数十年来,国内外研究者在此基础上考虑了电极间距、液体压强等因素对液体击穿场强的影响,拓宽了 Martin 公式的适用时间尺度<sup>[47]</sup>。

脉冲电压极性不但显著影响放电形貌、发展速度等传播特性,更是决定液体介质击穿特性(击穿电压、时延等)的重要因素。与气体介质击穿的极性效应相似,液体介质在短脉宽( $< 10\ \mu\text{s}$ )脉冲电压下,正极性放电的击穿时延和击穿电压都小于负极性。而 Hogg 等<sup>[48]</sup>发现,水中长脉宽正极性放电(脉宽 $> 10\ \mu\text{s}$ 、水电导率 $\sim 10^{-4}\ \text{S/cm}$ )的击穿时延小于负极性,但击穿电压却显著高于负极性。李显东等<sup>[49]</sup>提取了不同电极间隙条件下水中长脉宽流注放电诱发击穿的特征参数,认为水中流注放电模式的转换是导致击穿极性效应反转的重要原因,并提出了一种适用于水中长脉宽放电的击穿电压预测模型。

在液相放电击穿的物理模型方面,研究者提出多种理论模型来预测击穿后放电通道内温度、压力等参数的演化特性。Cook 等<sup>[50]</sup>考虑了水中击穿的热辐射、分子解离及气相通道的动力学过程,构建了击穿后水中等离子体通道的状态方程组,计算得到的通道半径、压力演化特性与实验测量结果基本一致。Timoshkin 等将水中放电击穿后的等离子体通道发展过程分为两个阶段<sup>[51]</sup>: (1)能量注入阶段,外回路能量迅速注入等离子体通道,引起通道内温度、压力急剧升高;(2)绝热膨胀阶段,回路能量完全注入后,通道则具有明显的气相特征,采用 Rayleigh 方程便可准确描述通道半径的演化特性。黄逸凡等针对高电导率水中放电建立了放电等离子体模型<sup>[52]</sup>,估计等离子体内电子密度 $(0.6\sim 6.5)\times 10^{18}/\text{cm}^3$ ,温度高达  $12000\sim 15000\ \text{K}$ 。需要注意,目前液体放电击穿的物理模型大多假定等离子体通道内压力、温度均匀分布,而实际上这些参数的分布具有时空不均匀性。现有研究表明,高压针电极处水中流注通道内电子密度最高( $10^{18}/\text{cm}^3$  量级)<sup>[53]</sup>,且沿通道轴线方向逐渐减小,而通道中的气体密度则呈相反变化趋势<sup>[54]</sup>。后续研究应继续发展高速成像、先进光谱诊断等多物理量联合测量技术,建立考虑多物理机制协同作用的放电击穿物理模型。

## 2 液体物性参数对流注放电特性的影响

### 2.1 液体电导率

电导率表征了溶液传导电流的能力,取决于液体中离子的浓度和迁移率。强电场下高电导率液体可产生较大的离子电流,生成更多焦耳热加速液体汽化,使液相放电更易从气泡内起始。实验表明,微秒脉冲电压下高电导液体的预击穿电流更高<sup>[40]</sup>,增加液体电导率,液体放电起始电压和击穿电压均迅速降低<sup>[55-56]</sup>。然而,若缩短电压脉宽(如亚微秒脉冲),注入能量减小,液体电导率变化对放电起始的影响减弱。Martin 指出<sup>[46]</sup>,水的亚微秒脉冲击穿场强不受溶液离子含量的影响;Kolb 的实验结果也发现<sup>[57]</sup>,自来水在纳秒脉冲下的击穿场强略高于蒸馏水。

电导率对流注放电发展特性的影响较为明确,电导率增加将导致微秒脉冲放电电流波形的脉宽减小,流注通道长度缩短<sup>[58]</sup>。光谱分析显示,在高电导率液体中,流注通道内电子密度更高<sup>[59]</sup>。液体电导率与放电产生的焦耳热正相关,高电导率溶液中气泡过程更为明显,电荷的迁移、复合反应速率更高,削弱了空间电荷在放电通道发展中的作用。所以,随着电导率升高,放电形貌将从丝状流注逐渐转换为气泡簇形态,如图 6 所示<sup>[60]</sup>。在液相脉冲放电的众多前沿应用中(如海洋勘探、岩石破碎、污水处理等),放电均在富含无机盐的液体中产生,明确电导率对放电起始、发展的影响机制,对于优化放电参数、提高放电效果具有重要意义。

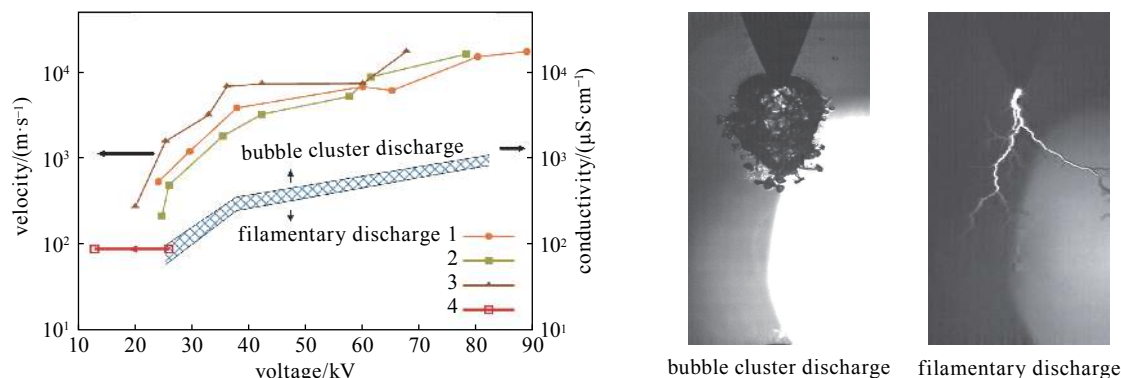


Fig. 6 Correlation between discharge modes and water conductivity under different voltages<sup>[60]</sup>

图 6 不同电压下水中放电模式与电导率的关系<sup>[60]</sup>

## 2.2 液体压强

增加液体压强能对微秒脉冲放电起到抑制作用,导致脉冲击穿电压升高。Abramyan 发现当液体压强从 0.1 MPa 升高到 14 MPa,微秒脉冲下的击穿电压倍增,放电时延从 50~100 ns 增加到 10~20  $\mu\text{s}$ <sup>[58]</sup>。随着脉冲电压的上升率( $dU/dt$ )增加,液体压强的影响显著降低<sup>[61-62]</sup>。在纳秒脉冲下,液体压强几乎不再影响击穿电压。需要指出,液体压强对击穿电压的影响具有明显的极性效应,正极性脉冲击穿电压受液体压强影响相比负极性下小,且在较高压强下(>0.9 MPa)趋于饱和<sup>[63]</sup>。Butcher 指出<sup>[64]</sup>,当变压器油压从 13 332.2 Pa 增加到 101 324.7 Pa,负极性脉冲击穿电压增加 13 kV,而正极性击穿电压仅增加 2 kV。液体压强对流注形貌也有显著影响,流注通道的长度和分支数均随压强增加而减少<sup>[65]</sup>,如图 7 所示。同时,提高液体压强也会压缩流注通道直径,揭示流注通道主体为气相通道。

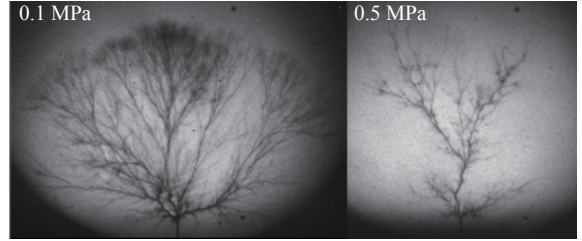


Fig. 7 Image of streamer discharge in transformer oil under different pressure<sup>[65]</sup>

图 7 不同压强下变压器油中流注放电图像<sup>[65]</sup>

## 2.3 液体中溶解气体

溶解于液体中的气体提供了原生低密度区,高场下电子在其中易发生碰撞电离,诱导液相放电起始<sup>[66]</sup>,能够显著降低放电电压和起始时延<sup>[67]</sup>。Tereshonok 观测到溶解气体也会影响放电时流注形貌<sup>[68]</sup>,当水中含气量达 0.1% 时,水中大量低密度区(微气泡)有助于碰撞电离速率提高,气液界面空间电荷场强升高,放电模式由气泡簇放电转换为丝状放电。由于丝状放电的发展速度更快,所以水的击穿时延显著降低。

祛气前后液体放电的光谱存在明显差别。Šimek 等<sup>[69]</sup>拍摄了水中纳秒脉冲放电的紫外-近红外光谱,发现祛气后水中  $H_{\alpha}$  谱线(656 nm)幅值更高,而 OH 谱线(310 nm)幅值下降。两种谱线的变化趋势表明,不同含气量液体的激发、电离反应速率不同。该研究还指出,对于祛气液体,仅初次放电的光谱存在上述区别,后续放电光谱与未祛气液体并无明显差异,表明放电增加了液体中的气体含量。

## 2.4 杂质与添加剂

液体中的杂质与添加剂主要包括杂质微粒、化学添加剂和纳米颗粒。例如,变压器油中杂质微粒有纸纤维、灰尘和铜铁屑等,这些微粒可能影响液体的绝缘性能,引起油中放电,降低击穿电压<sup>[70]</sup>。同时,杂质微粒也会改变油中流注的形貌特征。Sigmond 等<sup>[71]</sup>发现电介质颗粒或导电颗粒可以引导流注的前进方向。作者通过仿真阐释了电介质颗粒导致流注分叉的机制<sup>[45]</sup>,杂质微粒与油界面处的电场分布改变了流注头部电离速率和荷电粒子迁移路径,诱导流注多分叉生长与熄灭,放电随机性明显提高。

在液体中掺杂不同电离能的添加剂会影响液体的放电模式,尤其影响非极性液体一、二级放电模式的转化过程。当添加剂电离能低于液体电离能,流注一级模式向二级模式转化的电压阈值明显降低<sup>[4]</sup>。这是由于添加剂降低了液体电离难度(效果可类比于气体放电中的“彭宁电离”<sup>[72]</sup>),促进二级放电模式形成。化学添加剂还会影响流注的速度和形貌特征,低电离能添加剂使流注产生更多分支,增加放电通道等效半径,降低流注局域电场强度和发展速度<sup>[4]</sup>。

在变压器油中添加纳米颗粒能够有效提高液体的绝缘强度与热传导率。李成榕等向老化的变压器油中添加了  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒,使变压器油脉冲击穿电压和击穿时延分别增加 47% 和 76%<sup>[73]</sup>。Segal 实验观测发现<sup>[74]</sup>,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米变压器油的击穿电压比未改性油提高了两倍,流注速度明显降低。纳米变压器油的优良绝缘性能源于具有大比表面积的纳米颗粒显著提高了纳米油中浅陷阱数量,对电子有“捕获”作用,使油中电荷迁移率大幅降低<sup>[75-76]</sup>。此外,纳米颗粒还提升了油的散热能力,例如掺杂体积分数 0.5% 的  $\text{AlN}$  纳米颗粒可使流体的热导率提高 8%,整体热效率提高 20%。纳米变压器油的应用可改善传统绝缘结构(如油纸绝缘)的散热性能,有效缓解绝缘材料的热老化问题,提高纳米油纸复合系统的使用寿命与运行安全。

## 3 液体介质中流注放电的起始与发展机制

目前,对脉冲电压下液体介质高电场下主导的电离机制认识尚不统一,笔者认为经典电离理论和新兴学说可互为补充。明确放电起始与发展过程中主导机制及其适用范围,将有助于完善流注理论,提高对液体电介质放电机理的认识水平。

### 3.1 气泡理论

气泡理论是解释液相放电机制的一个重要理论,通常用于描述长脉宽( $>100\ \mu\text{s}$ )、较低电场( $<1\ \text{MV}/\text{cm}$ )条件下以气泡扩张与内部碰撞电离为主要特征的流注发展过程,如图8所示。气泡的形成主要有几种原因:(1)如前所述,在电导率较高的液体中,离子电流产生的焦耳热将加热液体使其汽化;在电导率较低的液体中,强电场导致液体分子解离程度加剧,提升了强场区域电导率<sup>[77]</sup>,促进气泡形成;(2)气相低密度区也可由阴极场致电子发射<sup>[78]</sup>、电子俄歇效应<sup>[79]</sup>等过程诱发形成,持续的荷电粒子流在强电场下与液体碰撞交换能量和动量,引发局部汽化形成低密度区;(3)液体中溶解的气泡或电极表面附着的微气泡也是常见气泡来源。气泡为内部气体分子碰撞电离提供了场所,是液体中流注放电形成的前驱过程之一。

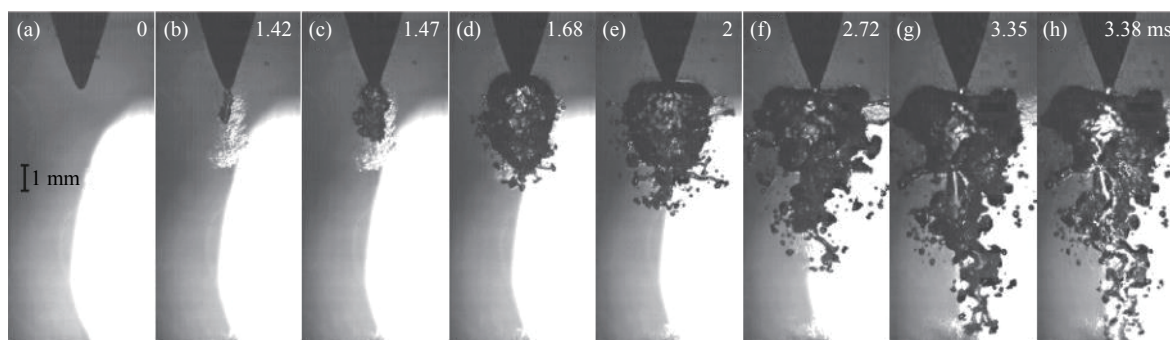


Fig. 8 Propagation of positive streamer in water ( $\sigma=90\ \mu\text{S}/\text{cm}$ )<sup>[60]</sup>

图8 水中正极性流注放电发展过程( $\sigma=90\ \mu\text{S}/\text{cm}$ )<sup>[60]</sup>

### 3.2 液相直接碰撞电离

与上述气泡内碰撞电离不同,液相直接碰撞电离是指电子与液体分子发生碰撞,导致液体分子直接电离的过程。该理论通常用于解释部分非极性液体介质(如液氙、环己烷)中的负极性流注起始过程。在强电场作用下( $>5\ \text{MV}/\text{cm}$ ),阴极场致电子发射为液相直接碰撞电离提供了种子电子。此类液体中电子迁移率相对较高,加速后的电子可电离液体分子导致流注起始。放电起始后,不断注入的能量将导致液体汽化形成低密度区,随后低密度区内的碰撞电离又成为放电的主导电离机制<sup>[78]</sup>。

然而,直接碰撞电离理论对于水这类强极性液体并不适用。自由电子在极性液体中会迅速使液体分子产生取向极化,形成溶剂化电子<sup>[80]</sup>。根据分子动力学仿真结果,自由电子在水中的寿命通常小于1 ps,而溶剂化电子迁移率远小于自由电子,因此种子电子难以在极性液体中加速并引发碰撞电离。

### 3.3 场致分子电离

场致分子电离是在强电场下( $>10\ \text{MV}/\text{cm}$ )<sup>[79]</sup>发生的一种直接电离方式,指液体分子的价电子获得足够高的能量而脱离原轨道形成电子-正离子对的过程。与碰撞电离不同,该理论中荷电粒子的倍增无需种子电子,常用于解释液体中正极性丝状流注放电的发展过程。该理论源于描述固体介质击穿的齐纳电离理论(Zener Ionization)<sup>[81]</sup>,由于液体和固体均为致密介质,分子、原子间距接近,排布也具有相似性,Devins等人将该理论推广应用于阐释非极性液体正流注头部的电离过程<sup>[82]</sup>。液体中电荷产生源项表述为

$$G_1(|E|) = \frac{e^2 n_0 a |E|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{eh^2 |E|}\right) \quad (2)$$

式中: $E$ 为电场强度; $e$ 为电子电量; $h$ 为普朗克常数; $a$ 为分子间距; $m^*$ 为有效电子质量; $\Delta$ 为分子电离能; $n_0$ 为可电离分子数密度。基于该理论,国内外研究者<sup>[83-85]</sup>建立了变压器油中流注放电的电流体动力学模型,求解了流注放电发展的时空演化过程,如图9所示。结果表明,流注头部电场强度是决定其发展速度的根本原因,空间电荷积聚导致通道头部电场增强,使其不断向前推进形成丝状放电通道并最终引起击穿。不同外施电压幅值下,短间隙(1~2 mm)流注发展速度可达2.7~16 km/s,与实验观测到的非极性液体正极性流注

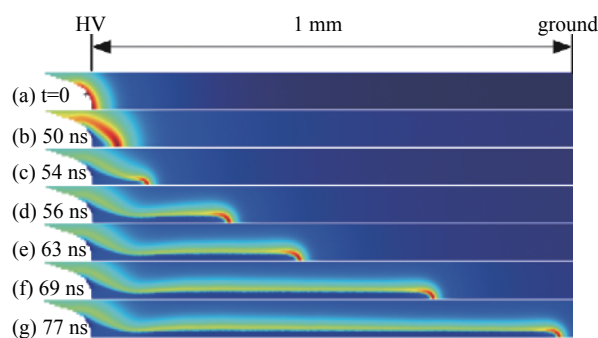


Fig. 9 Simulations of streamer development in transformer oil under pulsed voltages<sup>[83]</sup>

图9 脉冲电压下绝缘油中流注放电的发展过程<sup>[83]</sup>



二级、三级模式相吻合。

需指出,有效电子质量、液体分子电离能等特征参数均随液体性质、电场强度变化<sup>[86]</sup>,而由于对液体物性的认识缺乏(如诸多碳氢化合物电离能的有效估计),现有计算模型将这类参量多设定为常数。未来研究可考虑利用密度泛函理论、分子模拟等量子化学方法,求取不同电场条件下各类液体介质物性参数的动态分布函数,提升数值计算模型精度,使仿真结果更贴近实际放电的物理化学过程。

### 3.4 电致伸缩效应

近年来,有研究报道了在极快脉冲电压下(脉冲上升沿数 ns 甚至 ps 级)水中高压电极处放电发光先于气泡出现的现象。由于水的介电常数很高,电场梯度突变可产生很大的有质动力,拉伸液体向电场更强处(电极)运动,形成了电致伸缩效应。当液体局部拉伸应力超过某一阈值(约 24 MPa<sup>[87]</sup>),液体的连续性被破坏,可产生大量 nm 尺度空腔(极端拉伸应力引发空化也可见于螺旋桨在水中高速旋转形成的空泡<sup>[88]</sup>,又称水力空化)。电致伸缩力诱导空化形成的空腔与水中气泡不同,由局域液体撕裂形成,内部可近似看作真空,电致伸缩形成的空腔半径处于 nm 量级,远小于气泡( $\mu\text{m}$  级甚至更大)<sup>[89]</sup>。空腔为电子在高电场下提供了足够的加速空间成为能量更高的电子<sup>[90]</sup>,引发水分子的碰撞电离,为理解水中纳秒脉冲放电的起始过程提供了新的视角。

作者探究了基于电致伸缩效应的水中纳秒脉冲放电起始的基本物理过程,完整阐述了水中电致伸缩效应、空化过程和随后的液体电离过程:(1)在纳秒脉冲电压作用下,电致伸缩效应导致针尖附近数微米区域内的液体发生空化;(2)由于空腔界面的电场增强效应,空腔壁上水分子发生场致分子电离,不断提供种子电子进入空腔加速;(3)加速后的电子最大可获得约 100 eV 的能量,足以引发水中碰撞电离<sup>[91]</sup>。我们认为,单个空腔可视为一个纳米级电离源,在空化区内,大量空腔共同作用,使针尖区域迅速电离。电致伸缩效应诱导液体电离的机制如图 10 所示。

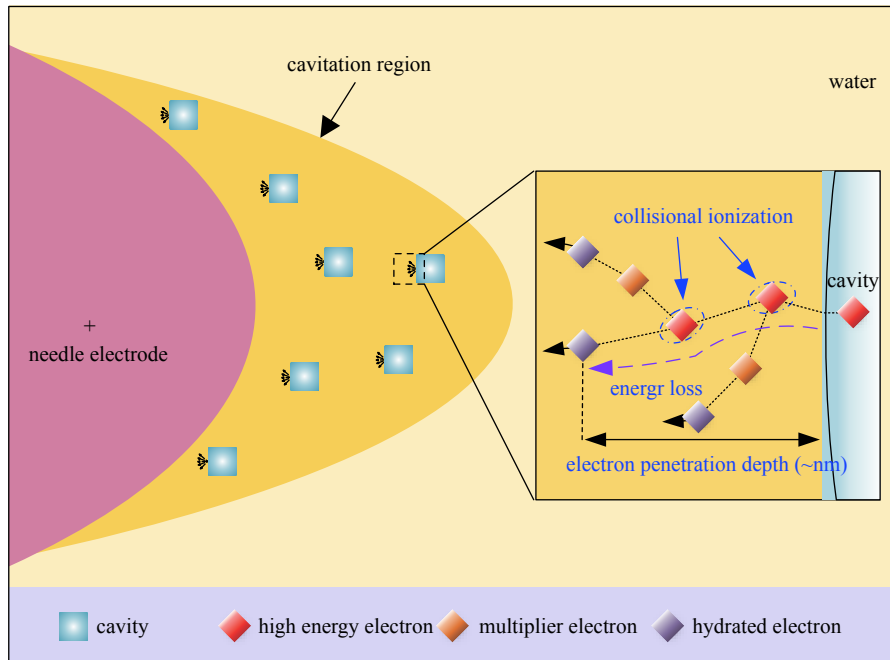


Fig. 10 Schematic of electrostriction-induced liquid ionization<sup>[91]</sup>

图 10 电致伸缩效应诱导液体电离的机制<sup>[91]</sup>

还需指出,电致伸缩是阐释水中纳秒放电起始过程的一种可能机制,加速后的电子射入液体后,其能量将在电子-水分子相互作用的过程中沉积至液体而使水加热(与 3.1 节所述气泡理论的离子电流加热不同)。当局域液体过热形成气相区域,内部发生的碰撞电离可使放电通道进一步发展。

## 4 结论

深刻理解液体介质流注放电起始、发展及击穿特性与机制是指导脉冲功率及电力装备绝缘设计、制造与运行的基础,亦是推动液相放电在能源、材料、生物、环境等新兴领域快速发展与应用的重要前提。本文梳理了近年来在液相放电基础研究领域取得的进展,阐述了液体介质微纳秒脉冲放电的基本特性、影响因素及物理机制,主

要结论与展望如下:

(1)液体流注放电具有多种模式,而且极性和非极性液体的放电模式转化特性差异很大。液体相变(汽化/空化)是影响微/纳秒脉冲放电起始与发展的关键过程,探明两相界面电荷的分布特性及其弛豫过程对于深入理解流注发展过程至关重要,明确这些问题还要大力发展高时空分辨诊断技术和液体中电荷原位测量技术。

(2)液体介质放电的宏观现象往往由多种电离机制协同作用所致,加之液体介质组成复杂,放电理论体系还不完备,导致目前对液相放电的机制认识不清。未来研究有必要细化各放电机理的适用条件(电压波形、介质状况、电极参数、液体性质等),明确不同特性参数对液体中主导电离机制的影响;

(3)液体介质的击穿特性研究对脉冲功率及电力装置绝缘设计与优化等应用领域具有重要参考意义。随着液相放电应用场景的日益多元化,液相放电参数也呈现极端化(超短脉冲、超高重复频率、超高场强等)与跨尺度发展趋势(脉宽 ps 至 ms、重复频率 Hz 至 MHz、场强  $10^5 \sim 10^{10}$  V/m)。如何获得适用于极端条件下放电过程的击穿预测公式,提出更符合实际击穿过程的放电物理模型是未来研究需要解决的问题。

(4)先进的仿真技术是认识液体放电微观物理过程的重要手段,但目前考虑液体相变过程的等离子体仿真与电荷输运参数确定方面仍存在重大挑战,需借助量子化学理论完善液体中粒子微观参数估计(如电子、离子迁移率和吸附时间,分子的本征电离能等),通过热-流体-电磁多物理场耦合仿真实现液相放电准确模拟。

#### 参考文献:

- [1] 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 ester[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(13): 117-123)
- [2] 周游, 江军, 罗颖婷, 等. 变压器油工频电压击穿特性的统计研究[J]. *绝缘材料*, 2015, 48(3): 73-77. (Zhou You, Jiang Jun, Luo Yingting, et al. Statistical analysis of AC breakdown voltage for transformer oil[J]. *Insulating Materials*, 2015, 48(3): 73-77)
- [3] 张适昌, 严萍, 王珏, 等. 民用脉冲功率源的进展与展望[J]. *高电压技术*, 2009, 35(3): 618-631. (Zhang Shichang, Yan Ping, Wang Jue, et al. Development situation and trends of pulsed power sources for civil applications[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 618-631)
- [4] Lesaint O. Prebreakdown phenomena in liquids: propagation 'modes' and basic physical properties[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49: 144001.
- [5] 刘强, 孙鹤鸿. 水中脉冲电晕放电等离子体特性及气泡运动[J]. *高电压技术*, 2006, 32(2): 54-56. (Liu Qiang, Sun Yaohong. Plasma characteristics of pulsed corona discharge in water and moving process of the bubble[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(2): 54-56)
- [6] 孙冰. 液相放电等离子体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (Sun Bing. Discharge plasma in liquid and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [7] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. *高电压技术*, 2016, 42(3): 685-705. (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 685-705)
- [8] 张国伟, 丛培天, 盛亮, 等. 强光一号水开关击穿性能[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 574-578. (Zhang Guowei, Cong Peitian, Sheng Liang, et al. Breakdown performance of water switches in Qiangguang- I facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 574-578)
- [9] 李元, 孙滢, 刘毅, 等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 753-765. (Li Yuan, Sun Ying, Liu Yi, et al. Electrohydraulic effect and sparker source: current situation and prospects[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 753-765)
- [10] 严辉, 黄逸凡, 裴彦良, 等. 等离子体震源及在海洋勘探中的应用[J]. *高电压技术*, 2012, 38(7): 1711-1718. (Yan Hui, Huang Yifan, Pei Yanliang, et al. Plasma seismic source and its application in oceanic seismic exploration[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(7): 1711-1718)
- [11] Sun Ying, Timoshkin I V, Given M J, et al. Impulsive discharges in water: acoustic and hydrodynamic parameters[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2156-2166.
- [12] 李元, 郜晶, 朱光远, 等. 液相等离子体技术制备碳纳米材料的进展与趋势[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(8): 2909-2919. (Li Yuan, Gao Jing, Zhu Guangyuan, et al. Advances and trends of carbon nanomaterial synthesis by liquid-plasma processing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(8): 2909-2919)
- [13] Saito G, Akiyama T. Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 16: 299.
- [14] 韩若愚, 李柳霞, 钱盾, 等. 液体中金属丝电爆炸的研究现状与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 766-777. (Han Ruoyu, Li Liuxia, Qian Dun, et al. Exploding metal wires in liquids: current situation and prospects[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 766-777)
- [15] 孙冰, 信延彬, 朱小梅, 等. 液体燃料醇类重整制氢技术的研究现状分析[J]. *高电压技术*, 2019, 45(12): 4096-4107. (Sun Bing, Xin Yanbin, Zhu Xiaomei, et al. Analysis of technical research status of hydrogen production from reforming liquid fuel alcohols[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(12): 4096-4107)
- [16] 张晋琪, 蒋兴良, 陈志刚. 液体介质快脉冲电压下击穿特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(6): 1053-1056. (Zhang Jinqi, Jiang Xingliang, Chen Zhigang. Characteristics study of short-pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 1053-1056)
- [17] 周中升, 章程, 邵涛, 等. 纳秒脉冲下变压器油绝缘的击穿与闪络特性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 3290-3296. (Zhou Zhongsheng, Zhang Cheng, Shao Tao, et al. Breakdown and flashover characteristics in transformer oil under nanosecond pulses[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10): 3290-3296)

- [18] 张永民, 邱爱慈, 黄建军, 等. 几项新技术在“闪光二号”加速器上的应用[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 876-880. (Zhang Yongmin, Qiu Aici, Huang Jianjun, et al. Application of new techniques to "Flash- II" accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 876-880)
- [19] 陈思富, 黄子平, 石金水. 带电粒子加速器的基本类型及其技术实现[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 045101. (Chen Sifu, Huang Ziping, Shi Jinshui. Basic types and technological implementation of charged particle accelerators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 045101)
- [20] 肖德龙, 丁宁, 王冠琼, 等. Z箍缩聚变及高能量密度应用研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 092005. (Xiao Delong, Ding Ning, Wang Guanqiong, et al. Review of Z-pinch driven fusion and high energy density physics applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 092005)
- [21] 邱爱慈, 孙凤举. Z箍缩和闪光照相用快脉冲功率源技术的发展[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1937-1946. (Qiu Aici, Sun Fengju. Development of fast pulsed power driver for radiography and Z-pinch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 1937-1946)
- [22] 梁川, 章林文, 李欣. 压力水介质脉冲击穿实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 787-790. (Liang Chuan, Zhang Linwen, Li Xin. Research on the pulsed breakdown of the pressured deionized water[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 787-790)
- [23] 张自成, 杨建华, 张建德, 等. 加压水介质耐 $\mu$ s级高电压击穿实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(5): 761-764. (Zhang Zicheng, Yang Jianhua, Zhang Jiande, et al. Investigation of high electrical breakdown for pressurized water dielectric with microsecond charging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(5): 761-764)
- [24] Ni Heli, Zhang Qiaogen, Wu Zhicheng, et al. Alternating streamer propagation in mineral oil under bipolar oscillating impulse voltage[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 072125.
- [25] 丛培天, 蒯斌, 邱爱慈, 等. 脉冲电压下的自击穿水介质开关击穿特性和电路参数实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1414-1418. (Cong Peitian, Kuai Bin, Qiu Aici, et al. Experimental study on circuit parameters and breakdown properties of water switch under pulsed voltage[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(9): 1414-1418)
- [26] Lesaint O, Massala G. Positive streamer propagation in large oil gaps: experimental characterization of propagation modes[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, 5(3): 360-370.
- [27] Duy C T, 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.
- [28] Touya G, Reess T, Pécaostaing L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(24): 5236-5244.
- [29] Wen Jiaye, Li Yuan, Li Linbo, et al. Experimental observations and interpretations of bubble-induced discharges under microsecond pulsed voltages in water[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 425208.
- [30] An W, Baumung K, Bluhm H. Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 053302.
- [31] 李显东, 刘毅, 周古月, 等. 针-板电极下水中亚音速流注形态与发展过程[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1562-1571. (Li Xiandong, Liu Yi, Zhou Guyue, et al. Morphology and development of underwater subsonic streamer under needle to plane electrodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1562-1571)
- [32] Wen Xiaoqiong, Xue Xiaodong. Shock wave release behavior of a pulsed positive streamer discharge in water[J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 075310.
- [33] Lai J, Foster J E. Time-resolved imaging of streamer formation inside gaseous bubbles in liquids[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 025206.
- [34] Starikovskiy A, Yang Yong, Cho Y I, et al. Non-equilibrium plasma in liquid water: dynamics of generation and quenching[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2011, 20: 024003.
- [35] Pietronero L, Erzan A, Evertsz C. Theory of fractal growth[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(7): 861-864.
- [36] Arrayás M, Ebert U, Hundsdorfer W. Spontaneous branching of anode-directed streamers between planar electrodes[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88: 174502.
- [37] Yoshimura N, Noto F, Kikuchi K. Growth of water trees in polyethylene and silicone rubber by water electrodes[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1977, EI-12(6): 411-416.
- [38] Ichiki R, Kanazawa S, Tomokiyo K, et al. Investigation of three-dimensional characteristics of underwater streamer discharges[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51: 106101.
- [39] Li Yuan, Zhu Mingxiao, Mu Haibao, et al. Transformer oil breakdown dynamics stressed by fast impulse voltages: experimental and modeling investigation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(10): 3004-3013.
- [40] Akiyama H. Streamer discharges in liquids and their applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 7(5): 646-653.
- [41] Chen Qiulin, Beroual A, Sima W, et al. Influence of microscopic morphological disturbance on the streamer interface stability in liquid dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(1): 198-206.
- [42] 齐波, 赵晓林, 张书琦, 等. 冲击电压下变压器油中电场特性及电荷运动模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(s1): 218-229. (Qi Bo, Zhao Xiaolin, Zhang Shuqi, et al. Electric field characteristics and charge motion model in transformer oil under impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(s1): 218-229)
- [43] Niemeyer L, Pietronero L, Wiesmann H J. Fractal dimension of dielectric breakdown[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 52(12): 1033-1036.
- [44] Jadidian J, Zahn M, Lavesson N, et al. Stochastic and deterministic causes of streamer branching in liquid dielectrics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 063301.

- [45] Li Yuan, Li Yahong, Wen Jiaye, et al. How cellulose particles influence streamer propagation and branching in transformer oil: a 2D modelling perspective[J]. *Plasma Research Express*, 2020, 2: 025011.
- [46] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. Boston, M A: Springer, 1996.
- [47] Wang Tonglei, Zhang Qiaogen, Ni Heli, et al. Extension of the empirical formula for pulsed electric strength of transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(5): 3175-3181.
- [48] Hogg M G, Timoshkin I V, Given M J, et al. Impulse breakdown of water with different conductivities[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(5): 1559-1568.
- [49] Li Xiangdong, Liu Yi, Zhou Guyue, et al. Polarity effect variation on electrical breakdown of water under sub-millisecond pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111: 164101.
- [50] Cook J A, Gleeson A M, Roberts R M, et al. A spark-generated bubble model with semi-empirical mass transport[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 101(4): 1908-1920.
- [51] Timoshkin I V, Fouracre R A, Given M J, et al. Hydrodynamic modelling of transient cavities in fluids generated by high voltage spark discharges[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(22): 4808-4817.
- [52] Huang Yifan, Yan Hui, Wang Bingzhe, et al. The electro-acoustic transition process of pulsed corona discharge in conductive water[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47: 255204.
- [53] Wen Xiaoqiong, Niu Zhiwen, Hou Bo, et al. Experimental measurement of spatially resolved electron density in a filament of a pulsed positive streamer discharge in water[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 264101.
- [54] Wen Xiaoqiong, Li Shuhan, Liu Jinyuan, et al. Experimental measurement of vapor density in the discharge channel of a pulsed positive streamer discharge in water[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 084104.
- [55] Gasanova S. Aqueous-phase electrical discharges: generation, investigation and application for organics removal from water[D]. Duisburg-Essen: University of Duisburg-Essen, 2013.
- [56] Lubicki P, Cross J D, Jayaram S, et al. Effect of water conductivity on its pulse electric strength[C]//Proceedings of the Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 1996, 2: 882-886.
- [57] Kolb J F, Joshi R P, Xiao S, et al. Streamers in water and other dielectric liquids[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41: 234007.
- [58] Jones H M, Kunhardt E E. The influence of pressure and conductivity on the pulsed breakdown of water[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, 1(6): 1016-1025.
- [59] Šunka P. Pulse electrical discharges in water and their applications[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2587-2594.
- [60] Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, et al. Slow ‘thermal’ and fast ‘streamer-leader’ breakdown modes in conductive water[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51: 354003.
- [61] Kao K C, Mcmath J P C. Time-dependent pressure effect in liquid dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1970, EI-5(3): 64-68.
- [62] 贾伟, 邱爱慈, 孙凤举, 等. 加压去离子水短脉冲击穿特性的初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(4): 693-696. (Jia Wei, Qiu Aici, Sun Fengju, et al. Preliminary study of the breakdown characteristics of the pressurized deionized water under short pulse voltage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 693-696)
- [63] Wang Tonglei, Zhang Qiaogen, Ni Heli, et al. Effect of hydrostatic pressure on the polarity effect of impulse breakdown characteristics of transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(4): 2172-2180.
- [64] Butcher M, Neuber A A, Cevallos M D, et al. Conduction and breakdown mechanisms in transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(2): 467-475.
- [65] Linhjell D, Lundgaard L E, Unge M. Pressure dependent propagation of positive streamers in a long point-plane gap in transformer oil[C]//Proceedings of 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids. 2019: 1-3.
- [66] Bunkin N F, Bakum S I. Role of a dissolved gas in the optical breakdown of water[J]. *Quantum Electronics*, 2006, 36(2): 117-124.
- [67] Hayashi Y, Takada N, Kanda H, et al. Effect of fine bubbles on electric discharge in water[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, 24: 055023.
- [68] Tereshonok D V, Babaeva N Y, Naidis G V, et al. Pre-breakdown phenomena and discharges in a gas-liquid system[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, 27: 045005.
- [69] Šimek M, Hoffer P, Tungli J, et al. Investigation of the initial phases of nanosecond discharges in liquid water[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 064001.
- [70] Dung N V, Hoidalén H K, Linhjell D, et al. Influence of impurities and additives on negative streamers in paraffinic model oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(3): 876-886.
- [71] Sigmond R S, Sigmond T, Rolfseng L, et al. The aiming of the bolt: how a flashover finds the weak spot[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(5): 1812-1818.
- [72] Miller W H. Theory of Penning ionization. I. atoms[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1970, 52(7): 3563-3572.
- [73] Chen Mutian, DuYuefan, Lv Yuzhen, et al. Effect of nanoparticles on the dielectric strength of aged transformer oil[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2011: 664-667.
- [74] Segal V, Hjortsberg A, Rabinovich A, et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite

- nanoparticles[C]//Proceedings of the Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 1998, 2: 619-622.
- [75] Hwang J G, Zahn M, O'Sullivan F M, et al. Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 014310.
- [76] 周远翔, 寇晓适, 杨颖, 等. 纳米改性变压器油制备与绝缘特性研究现状[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(11): 26-35. (Zhou Yuanxiang, Kou Xiaoshi, Yang Ying, et al. Research status on synthesis and insulating properties of nano-modified transformer oil[J]. *Insulating Materials*, 2016, 49(11): 26-35)
- [77] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. (Chen Jidan, Liu Ziyu. *Dielectric physics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.)
- [78] Haidara M, Denat A. Electron multiplication in liquid cyclohexane and propane[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991, 26(4): 592-597.
- [79] Sun Anbang, Huo Chao, Zhuang Jie. Formation mechanism of streamer discharges in liquids: a review[J]. *High Voltage*, 2016, 1(2): 74-80.
- [80] Vanraes P, Bogaerts A. Plasma physics of liquids—A focused review[J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5: 031103.
- [81] Zener C. A theory of the electrical breakdown of solid dielectrics[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1934, 145(855): 523-529.
- [82] Devins J C, Rzad S J, Schwabe R J. Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(7): 4531-4545.
- [83] 李元, 穆海宝, 邓军波, 等. 正极性纳秒脉冲电压下变压器油中流注放电仿真研究[J]. *物理学报*, 2013, 62: 124703. (Li Yuan, Mu Haibao, Deng Junbo, et al. Simulational study on streamer discharge in transformer oil under positive nanosecond pulse voltage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 124703)
- [84] Jadidian J, Zahn M, Lavesson N, et al. Effects of impulse voltage polarity, peak amplitude, and rise time on streamers initiated from a needle electrode in transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(3): 909-918.
- [85] Sima W, Jiang Chilong, Lewin P, et al. Modeling of the partial discharge process in a liquid dielectric: effect of applied voltage, gap distance, and electrode type[J]. *Energies*, 2013, 6(2): 934-952.
- [86] Smalø H S, Hestad Ø, Ingebrigtsen S, et al. Field dependence on the molecular ionization potential and excitation energies compared to conductivity models for insulation materials at high electric fields[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 073306.
- [87] Shneider M N, Pekker M, Fridman A. Theoretical study of the initial stage of sub-nanosecond pulsed breakdown in liquid dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(5): 1579-1582.
- [88] Shneider M N, Pekker M. *Liquid dielectrics in an inhomogeneous pulsed electric field*[M]. Bristol, U K: IOP Publishing, 2016..
- [89] Pekker M, Seepersad Y, Shneider M N, et al. Initiation stage of nanosecond breakdown in liquid[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47: 025502.
- [90] Seepersad Y, Pekker M, Shneider M N, et al. Investigation of positive and negative modes of nanosecond pulsed discharge in water and electrostriction model of initiation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46: 355201.
- [91] 李元, 李林波, 温嘉焯, 等. 基于电致伸缩效应的水中纳秒脉冲放电起始机制[J]. *物理学报*, 2021, 70: 024701. (Li Yuan, Li Linbo, Wen Jiaye, et al. Initiation of nanosecond-pulsed discharge in water: electrostriction effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 024701)