



·特种电源技术·

## 紧凑小型脉冲功率源 ARC-01/02 及其应用\*

张自成<sup>1,2</sup>, 李典耕<sup>1,2</sup>, 刘世飞<sup>1,2</sup>, 杨汉武<sup>1,2</sup>, 王俞卫<sup>1,2</sup>, 樊玉伟<sup>1,2</sup>, 张建德<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410073)

**摘 要:** 脉冲功率技术的重要发展方向是高功率密度、紧凑小型化和高稳定可靠。液体介质由于具有绝缘强度高、易流动、快恢复、散热性好等方面的特点, 广泛应用于脉冲形成线型紧凑小型脉冲功率源的电容储能器件作为储能介质。主要围绕紧凑小型脉冲功率源 ARC 系列的技术难题, 开展了关键技术、系统研发及其工程应用等方面的工作。首先, 提出了基于液体介质和慢波结构的形成线, 采用场均匀和绝缘配合技术, 研制出紧凑小型脉冲功率源 ARC-01 和 ARC-02, 输出功率 1~2 GW、脉冲宽度 5~30 ns、重复频率 1~100 Hz, 紧凑化水平较国际先进同类装置最多提高了 2 倍。之后, 以紧凑小型脉冲功率源为核心搭建液体介质击穿测试平台, 针对变压器油、蓖麻油、甘油、碳酸丙烯酯等常见液体介质, 开展了微秒脉冲击穿特性研究, 采用统计分析方法建立了数据库, 以“低成本”换取“高可靠性”; 并采用超高速光学诊断方法, 将击穿瞬间流注、冲击波、亚微观断裂面产生、传播、截止过程与张力理论结合, 建立了液体介质击穿物理模型。最后, 成功将紧凑小型脉冲功率源应用于驱动宽带/窄带微波产生、碳纤维阴极稳定性及寿命测试。

**关键词:** 脉冲功率源; 脉冲功率技术; 紧凑; 小型; 液体介质

中图分类号: TM214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210534

## Compact small-sized pulsed power sources ARC-01/02 and their applications

Zhang Zicheng<sup>1,2</sup>, Li Diangeng<sup>1,2</sup>, Liu Shifei<sup>1,2</sup>, Yang Hanwu<sup>1,2</sup>,  
Wang Yuwei<sup>1,2</sup>, Fan Yuwei<sup>1,2</sup>, Zhang Jiande<sup>1,2</sup>

(1. College of Advanced Disciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Development trends of pulsed power technology is high power density, compactness and high reliabilities. Liquid dielectric, because of its high insulation, easy flow, fast recovery and good heat dispersion, is widely used in the pulse power source based on liquid pulse forming line as energy storage medium. Research focuses are put on the key techniques of the ARC series of pulse power sources. Studies are carried out on pulsed breakdown characteristics, system development and its application. Firstly, a pulse formation line is proposed based on high-energy-density-storage liquid dielectric and slow wave structure. By using the method of electromagnetic field uniformity and insulation technology to solve the high-voltage insulation problems, the compact pulse power sources ARC-01/02 are developed. They can output 1–2 GW power, 5–30 ns duration, 1–100 Hz rep-rate, and their maximum compact level is increased by 2 times that of the international advanced similar devices. Through the research on the pulsed insulation characteristics of liquid dielectric in the microsecond regime, the database is established by statistical analysis method. And then, by using the ultrafast camera optical diagnosis method, based on the images of generation, propagation, cut-off for shock wave, sub-microscopic fracture surface, a liquid dielectric breakdown model is established, combined with amorphous energy band and Griffith tension theory. Finally, the pulsed power source is applied to drive wide band/narrow band microwave source and test the stability and life of carbon fiber cathode.

**Key words:** pulsed power source, pulse power technology, compactness, small-sized, liquid dielectric

\* 收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51677190); 湖南省杰出青年基金项目 (2017JJ1005)

联系方式: 张自成, zczhang@nudt.edu.cn。

通信作者: 李典耕, diangengli@163.com。

脉冲功率技术的重要发展方向是高功率密度、紧凑小型化和高稳定可靠<sup>[1-4]</sup>。电容储能型技术路线采用脉冲形成线作为储能器件,具有输出波形质量高、可较高重复频率运行的特色,其关键技术是储能<sup>[5-8]</sup>。液体介质绝缘强度高、易流动、快恢复、散热性好,作为储能介质广泛地应用于脉冲形成线<sup>[9-11]</sup>。其技术难点在于绝缘强度的提升和绝缘结构的优化。常用的液体储能介质主要有油、水、水基混合液、碳酸丙烯酯等<sup>[12-13]</sup>,其中油介质主要包括变压器油和电容器油等矿物质油、蓖麻油等植物油;水介质常用去离子水;水基混合液主要包括乙二醇/去离子水混合液、甲醇/去离子水混合液、乙醇/去离子水混合液等;碳酸丙烯酯温度适应范围广,凝固点低至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且可添加碳酸乙烯酯提高脉冲储能特性及温度适应范围。本文主要围绕紧凑小型脉冲功率源 ARC 系列的技术难题,开展了关键技术、系统研发及其工程应用等方面的工作。

## 1 脉冲功率源研发

### 1.1 脉冲电源工作原理

液体形成线型紧凑小型脉冲功率源的电路和实物图分别如图 1、图 2 所示,主要由初级能源 PES、初级电容 PC、初级半导体开关 PS、脉冲变压器 TT、脉冲形成线 PFL、气体火花隙主开关 SGS、传输线 TL(形成线 PFL 和负载 RD 之间)组成,其中脉冲变压器 TT 内置于脉冲形成线 PFL。初级能源为系统提供初始能量,起始时刻,初级电容  $C_1$  上初始充电电压为  $U_0$ 。当初级气体开关导通后,初级电容向脉冲变压器初级电感充电,经脉冲变压器提升至数百 kV 后对梳状形成线进行充电。当形成线充电电压达到主开关击穿阈值后,主开关导通,梳状形成线上储存的能量经主开关向水电阻负载释放,从而在电阻负载上获得近似方波的高电压输出。

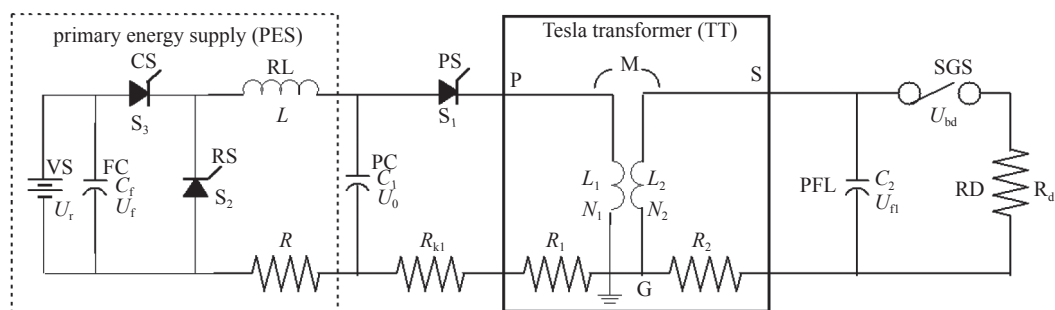


Fig. 1 Electric circuit of compact repetitive pulsed power source based on liquid dielectric

图 1 液体介质基紧凑重频脉冲功率源电路图

### 1.2 脉冲电源分部件构成

Tesla 变压器和同轴 PFL 一体化结构主要特点有: Tesla 变压器内嵌于同轴 PFL,使得装置非常紧凑;开环磁芯的使用,使得耦合系数达 0.9 以上(接近 1),有利于高重频运行;大变比的特点使得初级电压降低到 1 kV 以下,方便绝缘、控制和操作。负载上方波脉冲的重复频率运行稳定性能受限于开关工作气体介质的恢复速度,方波脉冲的上升时间主要取决于火花隙开关的结构尺寸和工作气压。火花隙开关采取施加高压的措施,以提高重复频率运行性能和减小上升时间。电阻性负载充当脉冲发生器的假负载,为发生器输出实验调试提供条件。该电阻性假负载与传输线连接,内外筒之间灌油以冷却散热,该负载由大功率无感电阻并联组成,直流电阻  $10\ \Omega$ 。

紧凑重复频率 Tesla 变压器型脉冲发生器结构如图 3 所示。为实现紧凑脉冲功率源的重复频率运行,初级能源 PES 采用功率半导体开关器件和高储能密度高功率电容器,以实现智能化、长寿命运行。初级能源主要由功率电路和智能控制单元两大部分组成,其中功率电路控制开关采用晶闸管开关,以提高重复频率运行的稳定性和寿命,重复频率运行运用能量回收机制和被动稳压方法,以提高能量利用效率,并具有电路简单的优点。

电压测量采用电容分压器,它由厚 0.2 mm 的双面覆铜的介质薄膜制作而成,分别用来测量 PFL 充电电压  $U_{C2}$  和脉冲功率发生器输出电压  $U_D$ ,其中  $U_{C2}$  测量示波器采用高阻。初级电容电压  $U_{C1}$  采用低阻电阻分压器测

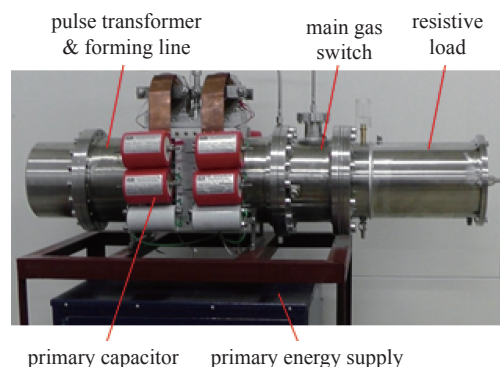
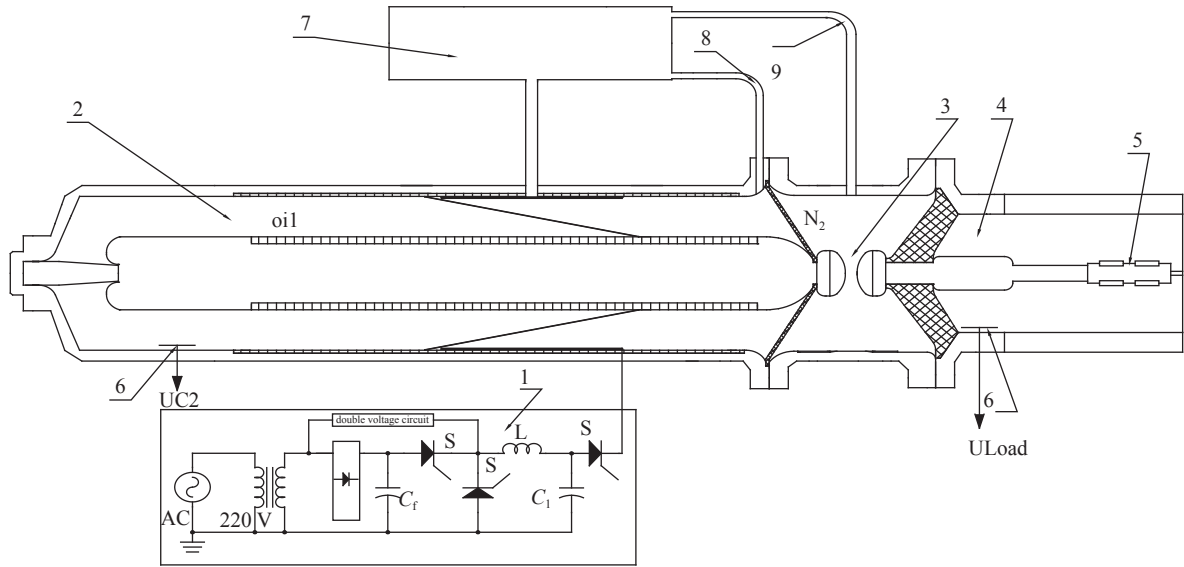


Fig. 2 Compact pulsed power source ARC-01

图 2 紧凑小型脉冲功率源 ARC-01



1—PES, 2—Tesla transformer built in a coaxial PFL, 3—main gas switch, 4—transmission line, 5—resistive load, 6—capacitive dividers, 7—oil conservator, 8—oil pipe, 9—gas pipe.

Fig. 3 Structure diagram of compact Tesla transformer pulse generator

图3 紧凑重复频率 Tesla 变压器型脉冲发生器结构图

量,分压比为 1000,以避免测量时对初级电容电压  $U_{C1}$  的影响,以及确保测量用电阻分压器高压臂电阻的功率容量。电流测量采用示流电阻,通过测量串接在负载  $10\ \Omega$  回路中  $0.1\ \Omega$  小电阻两端的电压来得到负载电流。输出功率为负载电压和负载电流的实时乘积。

### 1.3 脉冲电源系统调试

提出了基于液体介质和慢波结构的形成线,采用场均匀和绝缘配合技术,研制出紧凑小型脉冲功率 ARC-01 和 ARC-02,直径  $0.2\ \text{m}$ 、长度  $1.0\ \text{m}$ ,其中 ARC-02 如图 4 所示。采用甘油储能介质,在  $10\ \Omega$  负载下进行  $100\ \text{Hz}$  重复频率实验研究,紧凑小型脉冲功率源 ARC-02 输出电压、电流和功率的典型波形如图 5 所示。该驱动源单脉冲输出功率  $1\ \text{GW}$ ,电脉宽 (FWHM)  $30\ \text{ns}$ 、上升沿  $5\ \text{ns}$ 。

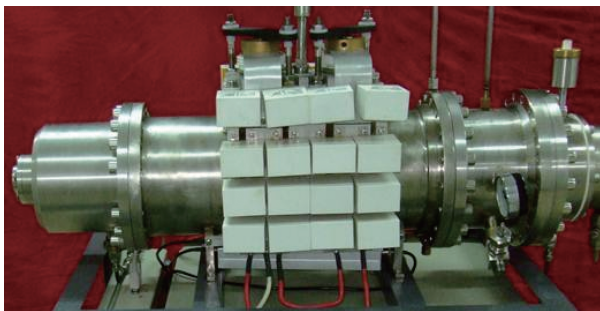


Fig. 4 Compact pulsed power source ARC-02

图4 紧凑小型脉冲功率源 ARC-02

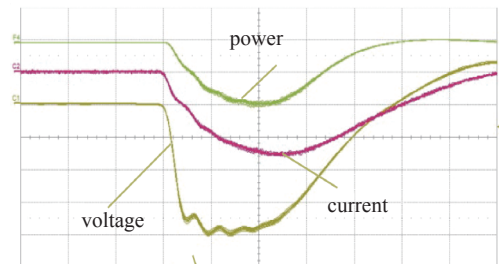


Fig. 5 Output waveforms of ARC-01 in  $100\ \text{Hz}$

图5 重复频率  $100\ \text{Hz}$  下 ARC-01 输出波形

储能介质分别采用变压器油、蓖麻油、甘油等液体介质,紧凑小型脉冲功率源输出参数如表 1 所示。紧凑小型脉冲功率源 ARC-01 输出功率  $1\sim 2\ \text{GW}$ ,脉冲宽度  $5\sim 30\ \text{ns}$ ,重复频率  $1\sim 100\ \text{Hz}$ <sup>[14]</sup>,与国际先进同类装置 SINUS-160 输出功率  $0.9\ \text{GW}$ 、脉冲宽度  $4.5\ \text{ns}$ 、重复频率  $100\ \text{Hz}$ <sup>[15]</sup> 相比,ARC-01 紧凑化水平 ( $12.5\ \text{W/kg}$ ) 较 SINUS-160 ( $4.1\ \text{W/kg}$ ) 最多提高了 2 倍。

## 2 液体介质脉冲击穿特性

对常见液体介质的脉冲击穿特性开展研究。通过建立液体介质击穿实验平台,获取击穿实验数据;采用统计分析方法,对微秒储能液体介质进行对比;采用添加添加剂、加载静压等方法,有效提高液体介质的储能密度。

### 2.1 液体介质脉冲击穿强度概率统计分析

建立了液体介质脉冲击穿实验研究平台,开展了液体介质脉冲击穿特性研究,运用 Weibull 概率分布的统计分

表 1 紧凑脉冲功率源 ARC-01/02 的输出参数  
Table 1 Output parameters of compact pulse power source ARC-01/02

No.	pulse power source	medium	power/GW	pulse width/ns	impedance/ $\Omega$	repetition frequency/Hz
1	ARC-01	transformer oil	1	5	30	100
2	ARC-01	castor oil	1~2	10	20	100
3	ARC-02	glycerinum	1	30	10	100

析方法处理击穿实验数据, 获取有效时间归一化条件下液体介质击穿场强的概率分布, 为脉冲形成线设计提供指导和参考, 以“低成本”换取“高可靠性”。

采用液体脉冲击穿系统进行微秒脉冲击穿实验, 系统示意如图 6 所示。图中 Rec 为半波整流器; Thy 为主控晶闸管;  $C_1$  为初级电容;  $L_1, L_2$  分别为初次级电感; PFL 为脉冲形成线; Cell 为击穿试件; CVD 为电容分压器; OSC 为示波器。系统以市电为起始电源, 经半波整流后可以给初级电容充电; 当控制主控晶闸管导通时, 初级电容会经 Tesla 变压器升压后向脉冲形成线进行放电; 击穿试件和测量单元与脉冲形成线并联, 当试件两端的电压达到或超过液体介质击穿阈值时, 液体发生击穿, 试件导通。试件两端脉冲电压上升的速度可通过改变初级电容的初始充电电压进行调节。

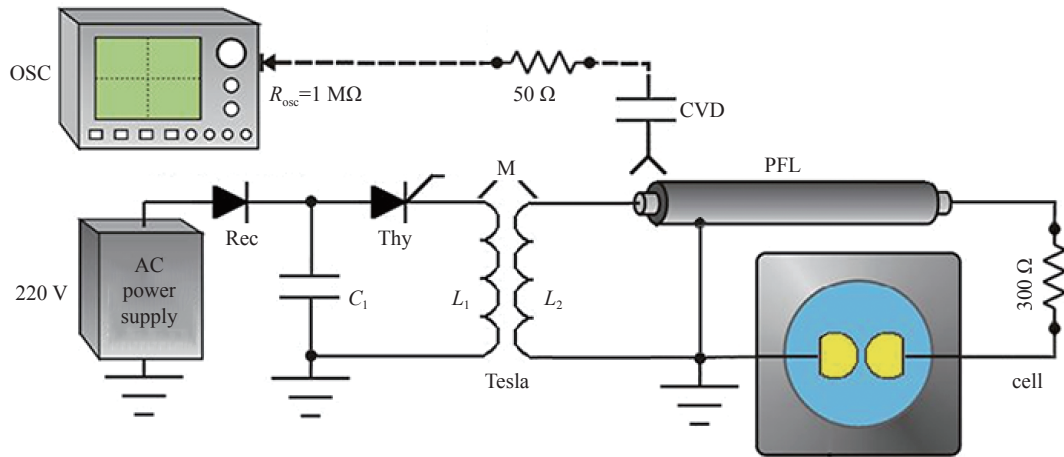
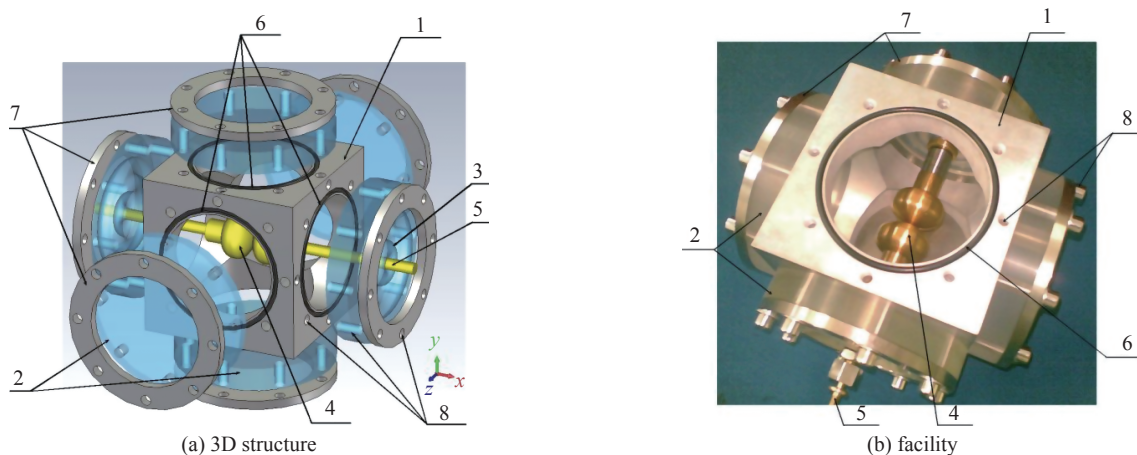


Fig. 6 Schematic of breakdown setup for liquid dielectric  
图 6 液体介质脉冲击穿系统示意图

系统采用基于标准油杯改装的击穿试件作为液体介质盛装容器, 图 7 分别给出了击穿试件的立体结构图和敞口实物图。试件主体采用不锈钢六面开口结构, 可分别加装盖板进行密封, 试件最高可承受压力为 2 MPa; 试件组



1—stainless steel frame, 2—plexiglass cover plate, 3—corrugated insulation board, 4—electrode, 5—connecting rod, 6—sealing ring, 7—fastening flange, 8—fastening screw

Fig. 7 Schematic and facility of test cell

图 7 试件结构示意和实物图

装后的外观尺寸约为 20 cm×20 cm×20 cm; 试件有一对盖板内部加装电极, 电极间距可进行精确调节, 调节的范围 0~5 mm; 通过加装不同类型盖板, 试件经盖板可连接气体进出管道、真空灌油的进出通道、气压表接口等结构单元。所有击穿实验均采用黄铜球电极, 场增强因子约为 1。调节初级充电电压从 150~600 V, 对应击穿试件所受实际电压范围 30~120 kV, 击穿时间为 0~10  $\mu$ s。

## 2.2 液体介质击穿特性

常见液体介质储能特性如表 2 所示, 通过对液体介质加载静压、添加添加剂, 可以显著提高液体介质的储能密度。在去离子水中添加乙醇(酒精)或乙二醇构成水基混合液, 在碳酸丙烯酯中添加碳酸乙烯酯形成混合液, 对去离子水、水基混合液、蓖麻油、碳酸丙烯酯等多种液体介质加载静压。

表 2 常见液体介质储能特性参数  
Table 2 Characteristic parameters of the liquid dielectrics

liquid dielectric	permittivity	breakdown strength/(kV·cm <sup>-1</sup> )	energy density/(kJ·m <sup>-3</sup> )
transformer oil	2.25	500	25
deionized water	80	600	1274
glycol	37	1200	2358
propylene carbonate	65	600	1035

研究结果显示: 当电极的表面粗糙度从  $R_a=1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$  经抛光后提升到  $R_a=0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$ , 击穿场强(绝缘强度)提升 10%~20%, 水介质的储能密度提升 20%~40%<sup>[16]</sup>; 在去离子水中添加乙醇(酒精)构成乙醇/水混合液, 使得脉冲绝缘性能得到有效提升, 同时介电常数下降较少, 总体而言脉冲储能特性可提高 1/4, 在碳酸丙烯酯中添加碳酸乙烯酯形成混合液使得相对介电常数由 65 增加到 80, 脉冲绝缘性能稍有增强, 从而脉冲储能特性有效提高 1/5; 加载静压可有效提高液体介质的脉冲绝缘性能, 液体介质脉冲绝缘水平随静压以 1/8(甚至 1/4)的指数关系增加, 典型的击穿电压波形如图 8 所示<sup>[17-18]</sup>。

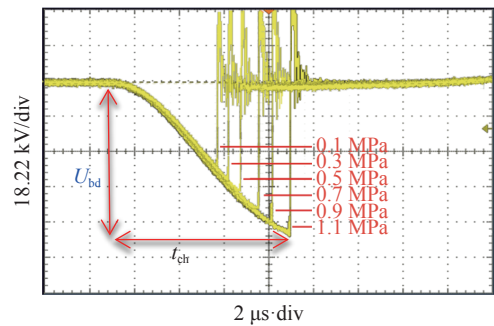


Fig. 8 Typical breakdown voltage waveform for pressurized liquid dielectric

图 8 加压液体介质典型击穿电压波形图

## 3 脉冲击穿物理机制

目前液体介质的主要击穿机理包括经典电子模型、经典热模型、质子传输理论、气泡击穿模型等。在脉冲功率领域, 液体介质属微秒脉冲储能介质, 击穿机制主要为气泡击穿模型。通过加压、除气、加添加剂、抛光、纳米改性等手段可以显著提升液体介质耐压。

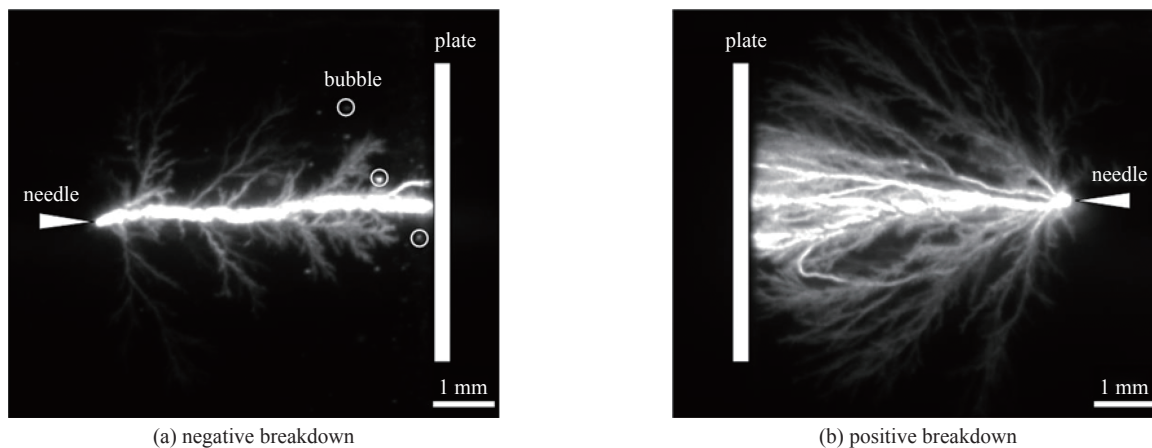
### 3.1 液体介质击穿光学诊断分析

在气泡击穿模型中, 气泡的各类参数如产生位置、数量、体积都对液体介质的击穿过程产生较大的影响。采取光学诊断方法获取液体介质击穿图像, 如图 9 所示, 正极性击穿流注呈现丝状、稠密似伞状, 负极性击穿流注呈现少枝、稀疏似树干, 对比结构和光强发现正极性流注更高能。

结合液体介质击穿图像, 分析击穿过程中的气泡行为, 加压可以抑止气泡的出现和形成, 降低介质击穿的概率; 气泡的形成和其可能位置, 可通过考虑对气泡形成时间有贡献的离子和电子预击穿电流的分布估算得到; 阴极附近场致发射电流提供必要的热量加热晶核形成气泡, 气泡首先电离发生击穿, 进而导致整个液体的击穿。气泡击穿机制可用来解释加压、除气、加添加剂对液体介质脉冲绝缘性能影响, 具体原因为: 加压和除气分别使液体中的气泡体积减小和数量减少; 加添加剂是因为两种互溶的物质微观结构发生了改变, 化学键结合更加紧密<sup>[19]</sup>。

### 3.2 纳米液体介质击穿物理机理

立足于 Lewis 的电机机械应力模型<sup>[20]</sup>, 考虑电机机械子系统能量守恒, 运用虚功理论推导液体介质内部电场力密度; 将 Griffith 张力理论拓展至高介电常数液体介质中, 即从理论上证明了流注预计穿过高储能密度液体介质中微观断裂面的形成, 建立起液体介质电场电机机械应力模型<sup>[18]</sup>。



(a) negative breakdown (b) positive breakdown

Fig. 9 Comparison of negative and positive breakdown for high-energy-storage liquid dielectric

图 9 高储能密度液体介质正负极性击穿对比

在常温下,液体介质内部存在亚微观断裂面(腔),由于液体介质本身的内聚力,这些腔在短时间内会形成聚合。通过分析液体介质在电场作用下的宏观受力,发现电场将在液体介质内部产生垂直于电场方向的机械应力,其与液体介质自身内聚力方向相反,延长了腔存在时间。在电极附近,由于电场较大,腔持续增长,且密度也相应较大;当腔生长到一定程度时,将导致宏观断裂面(流注)的传播,液体介质局部密度降低,自由电子的平均自由程加大,足以从电场中获得足够的能量开始预击穿过程。

在纳米液体中,纳米粒子对电子主要起到捕获与散射的作用,纳米改性碳酸丙烯酯流注发展过程如图 10 所示。在负极性流注中,纳米粒子对电子进行有效捕获,当纳米粒子达到电荷饱和之后,在库仑阻塞效应下,纳米粒子将主要对电子进行散射,增大了高压电极能量释放的难度,导致主流注分支增多,提高了基液负极性绝缘强度。在正极性流注中,纳米粒子将显著提高阳极附近的空穴密度,空穴在电场的作用下加速进入液体介质内部,扩展了基液主流注分枝,使分枝体积变大,使得更多的分枝可以发展到阴极,加速了能量释放,在一定程度上削弱了基液正极性绝缘强度<sup>[21]</sup>。

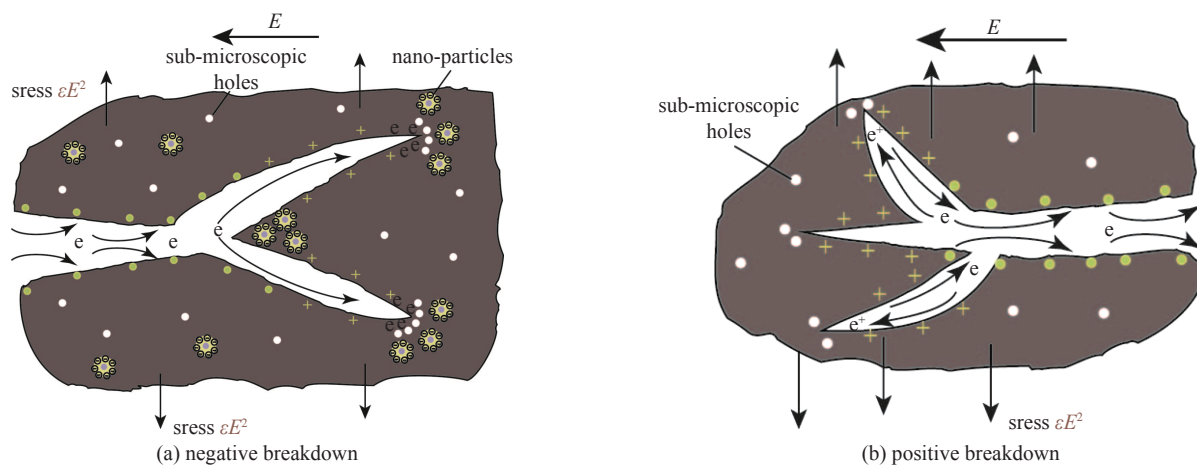


Fig. 10 Streamer schematic diagram of nano-modified propylene carbonate

图 10 纳米改性碳酸丙烯酯流注示意图

## 4 紧凑小型脉冲功率源应用

### 4.1 微波产生

紧凑小型脉冲功率源 ARC-01 可用于驱动返波管产生 X 波段微波,主要技术指标为:峰值功率 200 MW 以上,脉宽 5 ns,重复频率 100 Hz 以上。采用辐射功率组件进行微波测量,得到单脉冲运行下和重复频率 150 Hz 运行 150 个脉冲下典型波形如图 11 所示。单脉冲运行下,二极管电压 380 kV,脉宽 8.4 ns,微波功率 300 MW,半高脉宽 5 ns;重复频率 150 Hz 运行 150 个脉冲情形,二极管电压 320 kV,微波辐射功率 200 MW。

紧凑小型脉冲功率源 ARC-01 可用于驱动旋磁非线性传输线产生宽带微波,主要技术指标为:中心频率

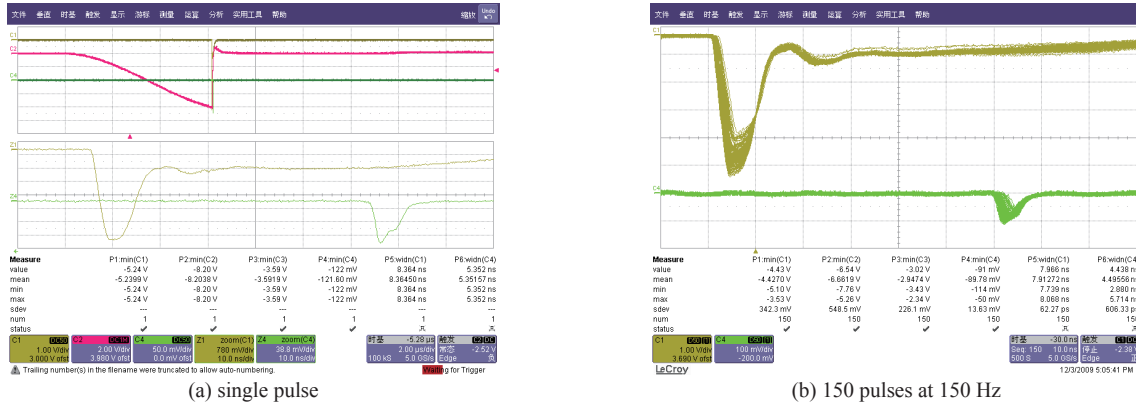


Fig. 11 Narrowband microwave typical waveform by ARC-01

图 11 ARC-01 驱动产生窄带微波典型波形

1.2~1.8 GHz, 可调控; 重复频率 $\geq 10$  Hz; 持续运行时间 $\geq 10$  s。旋磁非线性传输线利用铁氧体材料回旋共振特性, 主要由内导体、外导体、铁氧体材料、励磁螺线管和励磁电源构成。内导体和外导体组成同轴传输线; 高性能铁氧体材料填充在内导体和外导体之间; 励磁螺线管绕制在外导体外部, 并采用励磁电源供电, 电流流过励磁螺线管时产生稳恒偏置磁场。铁氧体材料在输入激励脉冲磁场和稳恒偏置磁场共同作用下, 对输入激励信号直接调制, 产生宽谱电磁脉冲信号。由于铁氧体回旋共振频率与偏置磁场有关, 输出宽谱电磁脉冲中心频率通过改变励磁电源馈入励磁螺线管的电流进行调控。系统以重复频率 100 Hz 运行 100 个脉冲下典型波形如图 12 所示, 系统辐射 100 个脉冲的峰值功率平均值为 500 MW, 微波中心频率约 1.27 GHz, 脉冲宽度约 2.9 ns。

#### 4.2 新型阴极材料测试

紧凑小型脉冲功率源 ARC-02 应用于驱动径向二极管产生径向电子束, 主要开展径向碳纤维阴极运行稳定性和寿命的研究。

二极管所采用的阴极是径向碳纤维阴极; 二极管阳极的内部掏空成一个水槽, 水槽进、出水口与增压泵相连接以促进水循环。这是因为在实验过程中, 重复频率多脉冲工作时电子束打在阳极内壁上会有较多的能量沉积而产生较大热量, 循环水可以加速散热, 保护实验平台。二极管电压、电流分别由 1 个电容分压器和 1 个 Rogowski 线圈测量, 二极管腔体内气压由 1 个机械泵和分子泵组成的真空系统维持在  $10^{-3}$  Pa。

紧凑小型脉冲功率源产生的二极管电压约 100 kV、电压脉宽(半高宽)约 30 ns、电功率约 1 GW, 分别进行了单脉冲、20 Hz 重复频率 5~100 个脉冲实验。实验中获得典型电压、电流波形如图 13 所示。可见, 电压、电流波形具有非常好的一致性和可重复性, 说明脉冲功率源具有非常理想的稳定性。二极管有效寿命约在 10 000 个脉冲, 该脉冲功率源适合于径向碳纤维阴极二极管重复频率运行。

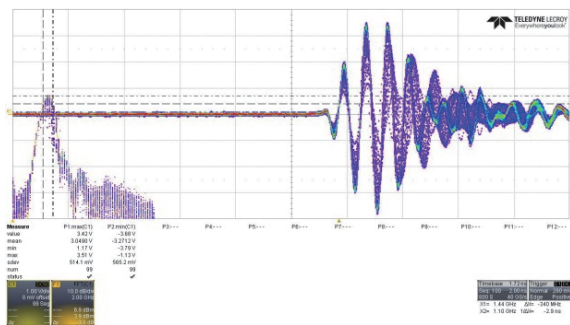


Fig. 12 Wideband microwave radiation waveform at 100 Hz

图 12 100 Hz 宽带微波辐射波形

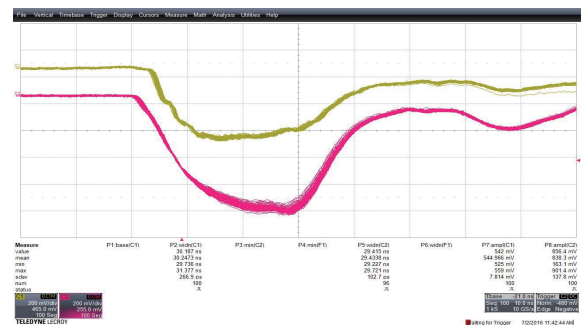


Fig. 13 Voltage and current waveforms of vacuum diode for compact pulse power source ARC-02 in 20 Hz rep-rate with 100 pulses

图 13 20 Hz 重复频率 100 个脉冲下电压电流波形

## 5 结论

论文主要围绕紧凑小型脉冲功率源 ARC 系列的技术难题, 开展了关键技术、系统研发及其工程应用等方面的工作: 基于液体介质和慢波结构的形成线, 应用场均匀和绝缘配合技术, 研制出紧凑小型脉冲功率源, 输出功率 1~2 GW、脉冲宽度 5~30 ns、重复频率 1~100 Hz; 在微秒脉冲下测量了变压器油、蓖麻油、甘油、碳酸丙烯酯等常见

液体介质的绝缘强度,建立了微秒击穿数据库,之后分别开展了液体介质添加添加剂、加载静压的研究,发现通过添加剂、静压等手段均提高了液体介质储能密度;运用光学诊断获取液体介质击穿流注图像,结合气泡击穿机理,成功解释加压、除气、添加剂对液体介质脉冲绝缘性能影响,并且将击穿瞬间流注、亚微观断裂面产生、传播、截止过程与张力理论结合,建立了液体介质击穿物理模型;成功将紧凑小型脉冲功率源应用于驱动宽带/窄带微波产生、碳纤维阴极稳定性及寿命测试。

#### 参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008: 1-45. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 1-45)
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003: 1-60. (Zeng Zhengzhong. Introduction of practical pulse power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003: 1-60)
- [3] Martin J C, Martin T H, Guenther A H, et al. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum Press, 1996: 1-35.
- [4] Martin J C. Nanosecond pulse techniques circuit and electromagnetic system design[R]. SSWA/TCM/704/49, 1970.
- [5] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1000 PPS high-voltage nanosecond pulse generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(2): 258-265.
- [6] Gubanov V P, Gunin A V, Korovin S D, et al. Periodically pulsed high voltage generator based on Tesla transformer and spiral forming line[C]//Proceedings of PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas: IEEE, 2001: 336.
- [7] Korovin S D, Gubanov V P, Gunin A V, et al. Repetitive nanosecond high-voltage generator based on spiral forming line[C]//Proceedings of the PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas: IEEE, 2001: 1249-1251.
- [8] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, 21(2): 197-209.
- [9] Kristiansen M, Hatfield L L, Lojewski D. High voltage water breakdown studies[R]. Alexandria: Defense Special Weapons Agency, 1998.
- [10] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998, 26(3): 874-881.
- [11] 杨霄, 杨建华, 钱宝良, 等. 甘油介质在同轴形成线中的击穿特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015017. (Yang Xiao, Yang Jianhua, Qian Baoliang, et al. Breakdown characteristics study of glycerol medium in coaxial pulse forming line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015017)
- [12] Zhang Hua, Zhang Zicheng, Yang Hanwu. Repetitive pulses insulating properties of castor oil in microsecond range[C]//The 13th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Suzhou: 2010.
- [13] 徐健, 张自成, 杨汉武, 等. 微秒脉冲下碳酸丙烯酯的击穿特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 065005. (Xu Jian, Zhang Zicheng, Yang Hanwu, et al. Breakdown characteristics of propylene carbonate under microsecond pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 065005)
- [14] 张自成, 杨汉武, 张建德, 等. 紧凑重频Tesla变压器型调制器的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(8): 1392-1396. (Zhang Zicheng, Yang Hanwu, Zhang Jiande, et al. Experimental studies on repetitive pulsed power modulator with compact Tesla transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(8): 1392-1396)
- [15] Andreev Y A, Gubanov V P, Efremov A M, et al. High-power ultrawideband radiation source[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, 21(2): 211-217.
- [16] 张自成, 杨建华, 张建德, 等. 抛光电极表面对加压水介质耐压的影响[J]. *高电压技术*, 2005, 31(10): 52-54. (Zhang Zicheng, Yang Jianhua, Zhang Jiande, et al. Influence of polished surface of electrodes on high electrical breakdown in pressurized water dielectric[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(10): 52-54)
- [17] 张自成, 张建德, 杨建华, 等. 加压乙二醇/水混合液耐 $\mu$ s级高电压击穿实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1201-1204. (Zhang Zicheng, Zhang Jiande, Yang Jianhua, et al. Investigation of high voltage electrical breakdown of pressurized glycol/water mixture with microsecond charging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1201-1204)
- [18] Liu Hongwei, Hou Yanpan, Zhang Zicheng, et al. Abnormal polarity effects of streamer discharge in propylene carbonate under microsecond pulses[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34: 077701.
- [19] Lewis T J. A new model for the primary process of electrical breakdown in liquids[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, 5(3): 306-315.
- [20] Hou Yanpan, Liu Zhenxiang, Yang Lijia, et al. Analysis of back electromotive force in RCML[C]//Proceedings of the 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. La Jolla: IEEE, 2014: 1-6.
- [21] Hou Yanpan, Zhang Jiande, Zhang Zicheng. Enhanced dielectric breakdown performances of propylene carbonate modified by nano-particles under microsecond pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119: 244307.