



重频吉瓦级高功率微波源硬管化技术研究

荀涛*, 孙晓亮, 樊玉伟, 杨汉武, 张自成, 张军, 张建德, 钟辉煌

(国防科技大学前沿交叉学科学院 长沙 410073)

【摘要】针对磁绝缘线振荡器(MILO)微波源负载,在高真空工艺的基础上,研制了一种强流二极管陶瓷真空界面绝缘结构;通过对阴、阳极屏蔽、均压等电极形状和尺寸的优化,使陶瓷沿面电场和阴、阳极三结合点场强均得到了有效控制。模拟结果显示:陶瓷沿面电场分布均匀,阴、阳极三结合点场强小于30 kV/cm;同时,建立了微波源器件的瞬态抽气模型,应用分子流Monte-Carlo方法,模拟了脉冲放气后微波源内部真空压强在不同时刻下的三维分布和演化规律;并以此为基础优化了内置气体捕集器的真空拓扑结构。最后,在HEART-50脉冲功率源上开展了5 Hz实验测试,陶瓷真空界面能耐受超过600 kV的脉冲电压,沿面平均绝缘场强达到40 kV/cm,重频运行可靠;微波源在脱离地面泵组后实现了重频吉瓦级输出,脉冲串间的真空恢复时间小于1 min,平衡压强小于 5×10^{-2} Pa,微波平均功率大于3 GW、脉宽大于40 ns。

关键词 陶瓷真空界面; 高功率微波源; 绝缘结构; 重频运行; 瞬态气源; 保真空
中图分类号 TM89 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2018004

Progress in a Hard-Tube, Gigawatt-Class, Repetitively Operated High-Power Microwave Source

XUN Tao*, SUN Xiao-liang, FAN Yu-wei, YANG Han-wu, ZHANG Zi-cheng, ZHANG Jun, ZHANG Jian-de, and ZHONG Hui-huang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology Changsha 410073)

Abstract A compact L-band sealed-tube magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) has been developed that does not require bulky external vacuum pump for repetitive operations. A special designed ceramic insulated vacuum interface was designed and the flashover was well controlled. A dynamic 3-D Monte-Carlo (MC) model for the molecular flow movement and collision was setup for the MILO chamber. The pulse desorption, gas evolution and pressure distribution were exactly simulated. In the 5 Hz repetition rate experiments, using a ~ 30 GW pulse modulator, the average radiated microwave power for 25 shots is about 3 GW in 40 ns pulse duration and the maximum equilibrium pressure is below 4.0×10^{-2} Pa. This sealed-tube MILO device is useful for compact and portable high-power microwave applications.

Key words ceramic-vacuum interface; high-power microwave source; insulation structure; repetitive operation; transient pulse desorption; vacuum sealing

高功率微波的实用化进程要求系统能够重频、多次运行,在此基础上,做到紧凑、可靠、可适应于移动平台^[1-4]。这类系统中,磁绝缘线振荡器(MILO)由于无需外加磁场,易于实现紧凑化和高功率运行^[5-10]。实现吉瓦级MILO在脱离地面机组、保真空条件下的重频运行是高功率微波系统实用化的基础之一,其核心在于高功率微波器件的硬管化封装,包括强流陶瓷真空界面设计和脉冲气源下的保真空设计等。硬管化高功率微波源具有模块化、紧凑化和长寿命等优点^[11-14]。与大功率微波管硬管化不同的是,高功率微波源真空封装界面通常

需要耐受数百千伏级脉冲高电压,同时还需在空间、供电等有限条件下处理冷阴极、阳极等在多个脉冲过程中的高气载脉冲气源。故此,国内外关于吉瓦级高功率微波源的硬管化报道并不多见,国内曾成功研制了硬管化虚阴极以及硬管化MILO,但都为单次运行。文献[14]经特殊设计的硬管化虚阴极实现了大于100 Hz的重频运行,但输出功率仅有100 MW量级。

本文在高真空工艺的基础上,针对一种长寿命、高效MILO,研制了重频强流二极管陶瓷真空界面绝缘结构;同时,建立了微波源器件的瞬态抽

收稿日期:2018-01-02;修回日期:2019-09-24

基金项目:国家自然科学基金(51677190, 61871390);装备预研重点实验室基金(614260502010417)

作者简介:荀涛(1982-),男,博士,副研究员,主要从事强流相对论真空电子学及光导微波电子学等方面的研究。E-mail: xtao_0301@hotmail.com

气模型,应用分子流 Monte-Carlo(MC)方法,模拟了脉冲放气后微波源内部真空压强在不同时刻下的三维分布和演化规律;并以此为基础优化了内置气体捕集泵的真空拓扑结构。最后,在 HEART-50 脉冲功率源上开展了 5 Hz 实验测试,陶瓷真空界面能耐受超过 600 kV 的脉冲电压,沿面平均绝缘场强达到 40 kV/cm,重频运行可靠;微波源在脱离地面泵组后实现了重频吉瓦级输出,平衡压强小于 5×10^{-2} Pa,微波功率大于 3 GW、脉宽大于 40 ns。

1 硬管总体设计

吉瓦级 MILO 硬管化总体设计如图 1 所示,它是文献 [8] 中 MILO 的改进型。为满足重频运行保真空要求,采取了以下设计要点:部件之间的密封连接均采用不锈钢刀口和无氧铜垫圈;真空界面绝缘子由有机高分子替换为陶瓷金属焊接封装件^[15],重点是解决真空绝缘的问题;为了降低脉冲放气量并提高器件寿命,阴极由传统的天鹅绒阴极升级为碳纤维绒阴极^[16]。

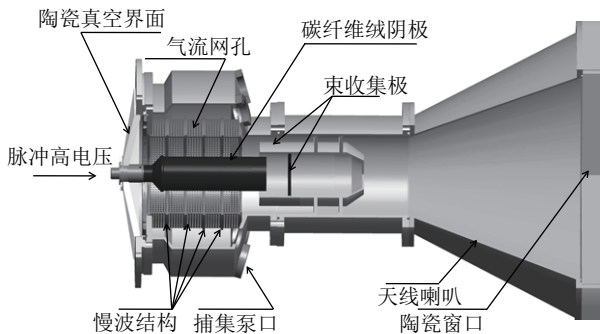


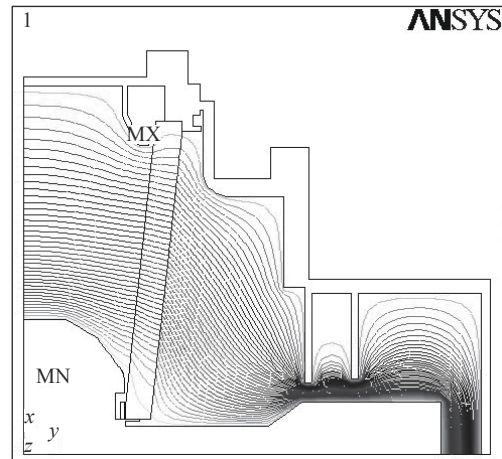
图 1 吉瓦级 MILO 硬管化结构示意图

为了增加排气流导,设计了一种特殊的、蜂巢网状结构应用于慢波结构中,该结构既保证了 MILO 的电磁结构,同时提高了阴极局部区域的抽速。在阳极外壳内放置了吸气单元^[13],能够在对器件进行静态真空维持的同时,捕集脉冲放气,维持微波源在有限次重频运行过程中的高真空环境。封装好的硬管需经过一系列特殊处理,其中包括长时间高温烘烤排气,以确保真空本底压强在 10^{-6} Pa 量级。

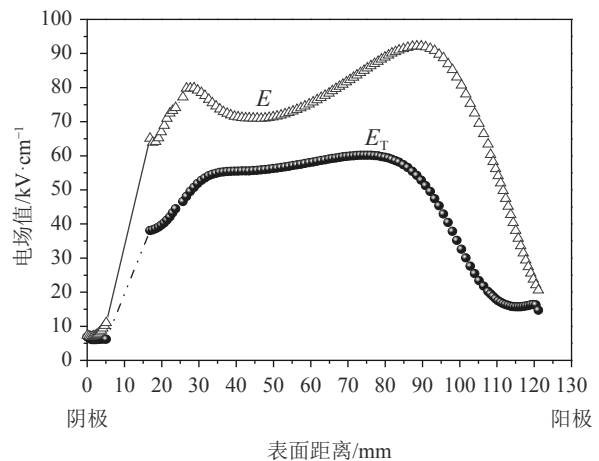
2 重频强流陶瓷真空界面

针对上述要求,图 2 给出了一种基于陶瓷-金属封接、针对 MILO 负载的陶瓷真空界面结构及其电场仿真结果,陶瓷两侧分别为 SF_6 气体和真空。

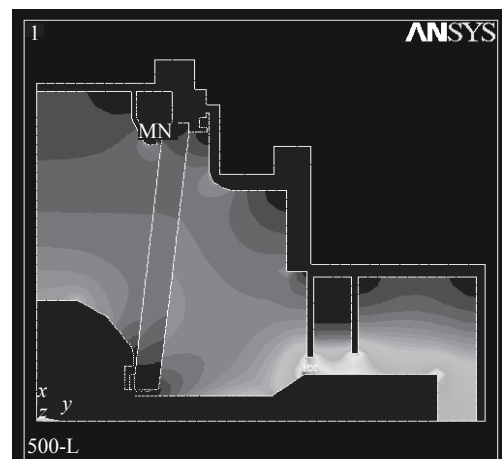
它的技术特点有:陶瓷采用“负锥”结构,能够较好地承受机械应力;采用屏蔽环对阳极和阴极的封接焊料进行了屏蔽;采用气侧均压环对陶瓷真空侧沿面电场进行匀化。内部结构中涉及到的所有尖角均采用了圆角处理,避免电场集中。



a. 等势线分布



b. 陶瓷沿面总电场 (E) 及切向分量电场 (E_T) 分布



c. 电场分布

图 2 绝缘结构模型及静电场模拟结果

图 2a 为等势线分布, 相邻等势线电势差为 26 kV; 图 2b 为陶瓷真空侧表面总电场和沿面电场分量; 图 2c 为陶瓷真空界面的电场分布。模拟结果显示, 绝缘体沿面电场分布较为均匀, 650 kV 外加电压时, 总场强最大值小于 100 kV/cm, 沿面分量最大值小于 70 kV/cm。阴、阳极三结合点区域的平均场强得到了有效控制, 均小于 30 kV/cm。

3 基于 MC 方法的瞬态放气模拟

吉瓦级微波源重频运行保真空的研究重点之一是获得脉冲气源演化规律^[17-18]。MILO 中, 脉冲放气后的气团扩散主要受随机性的影响, 在分子流真空环境下, 气体分子到达泵口并被抽走也属于随机过程, 故 MC 模拟方法适用于 MILO 瞬态抽气行为的研究^[19]。模拟中, 放气量为:

$$N_p = \frac{\int (P_t - P_b) S_e dt}{kT} \quad (1)$$

吸气剂吸气行为表达式为:

$$dP_t = \frac{1}{V} (-P_t(t) S_e(t) dt + Q_p dt) \quad (2)$$

式中, N_p 为放气量; P_t 为瞬态压强; P_b 为系统本底压强; S_e 为系统有效抽速; V 为系统容积; Q_p 为气体吸附量; k 为玻尔兹曼常数; T 为开氏温度。

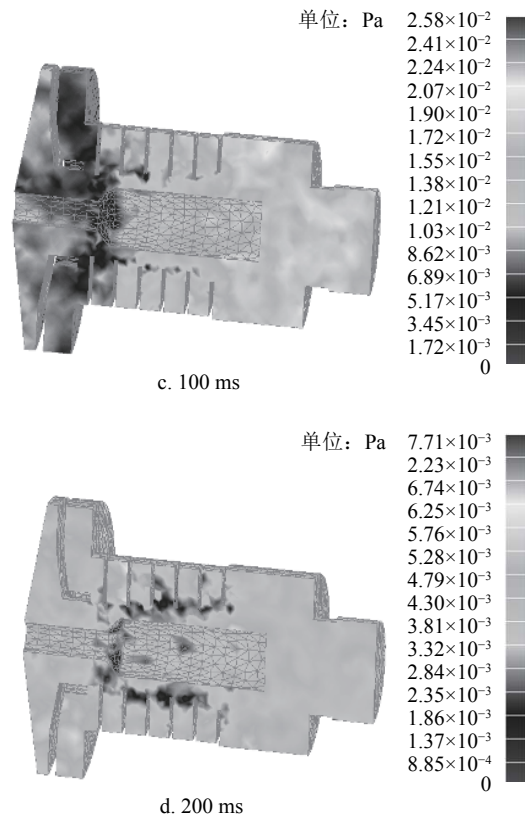
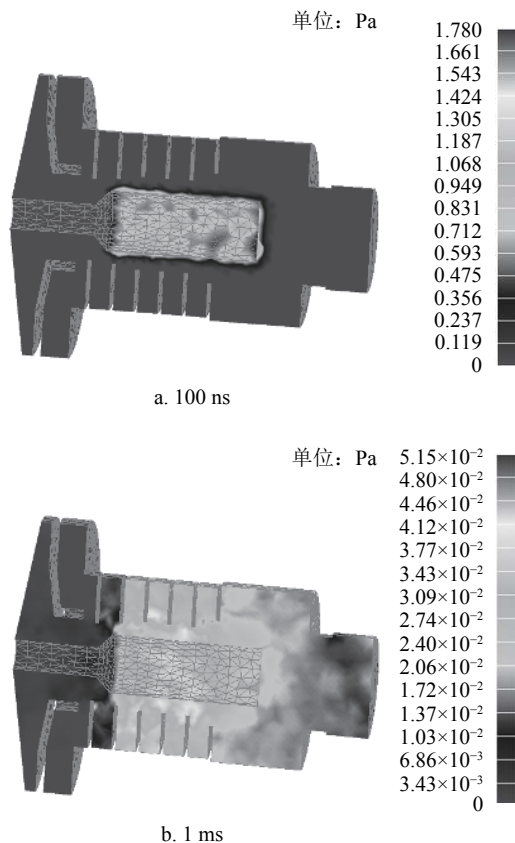


图 3 MILO 三维瞬态放气及抽气动态模拟

模型模拟结果如图 3 所示。100 ns 电脉冲后, 如图 3a 所示, 脉冲气源主要集中于阴极附近, 局部最大压强接近 1 Pa 量级, 而器件其他区域仍保持本底压强。随着气源的随机扩散, 气压成梯度扩散规律, 1 ms 后, 慢波区压强由 10^{-6} Pa 升至 10^{-2} Pa 量级, 如图 3b 所示。当气体分子到达吸气剂表面时, 它们将被吸附。100 ms 后, 如图 3c 所示, 由于吸气剂的吸气效果, 慢波区的压强开始下降, 压强最大区域出现在阳极附近。当 200 ms 后, 慢波区附近的压强进一步降低, 到达 10^{-4} Pa 量级, 器件气压区域如真空界面以及阳极、模转区也回落到平均 10^{-3} Pa 水平, 如图 3d 所示。由 MC 动态模拟可知, 从保真空的角度, 硬管 MILO 能够运行的重频水平不低于 5 Hz。

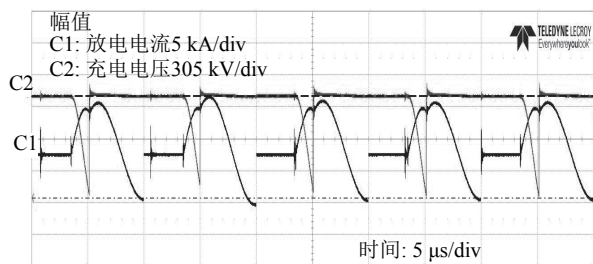
4 实验测试

本文在 HEART-50 脉冲驱动源上开展了陶瓷界面重频绝缘、保真空以及保真空条件下的微波功率水平测试。实验中, 二极管电流采用内置 Rogowski 线圈测量, 脉冲驱动源形成线电压和二极管电压采用伞状电容分压器; 真空度采用自制真空实时采集

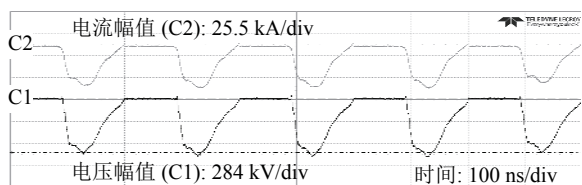
系统；微波功率采用满足远场条件的 10 路张角喇叭阵列测量。

典型初级放电电流波形、形成线充电电压波形以及二极管电压、电流波形如图 4a 和图 4b 所示。测试炮数超过数百炮次，二极管运行稳定，平均电压等级 630 kV、电流 48 kA，平均耐受电脉宽 87 ns。

典型保真空气压历史曲线如图 5 所示。在 200 ms 两个脉冲间隔内，气压呈锯齿状上升和下降，5 Hz 运行 1 s 后，真空计实测压强接近 10^{-2} Pa，气压再次恢复到近本底的时间小于 45 s。图 6 给出了保真空条件下 MILO 以 5 Hz 运行 25 个脉冲时的辐射微波波形，其中，每 5 个脉冲间隔时间约为 50 s。微波平均功率大于 3 GW、脉宽大于 40 ns，频段为 L 波段。在多脉冲运行过程中，未见脉冲缩短现象发生。



a. 脉冲功率源初级放电电流及形成线充电电压典型波形



b. 二极管电压及电流典型波形

图 4 陶瓷真空界面重频典型实验结果

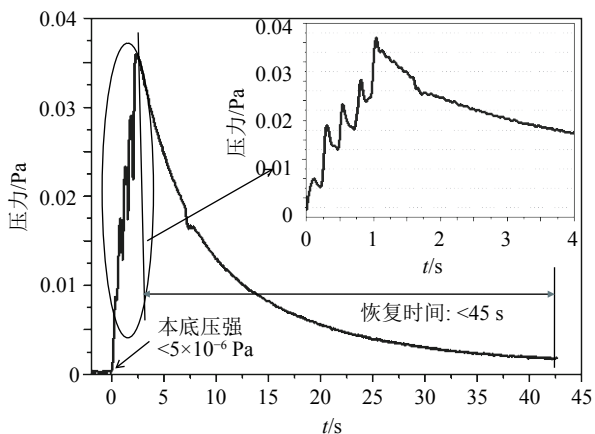
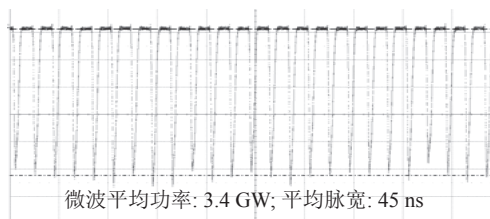
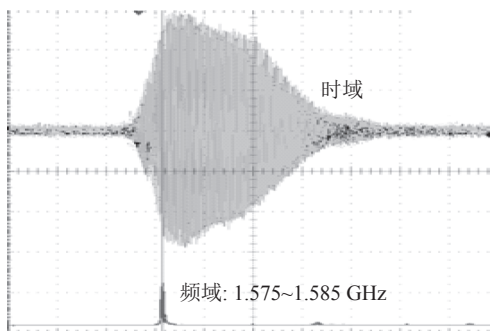


图 5 重频运行保真空气压历史曲线



a. 25个微波脉冲波形(序列模式)



b. 25个微波脉冲频率波形(层叠模式)

图 6 保真空条件下典型微波脉冲及频率波形 (5 Hz)

5 结束语

重频吉瓦级高功率微波源的硬管化是高功率微波系统实用性关键技术之一。本文针对 MILO 器件，在传统硬管工艺基础上研制了满足强场、重频运行的强流二极管陶瓷真空界面绝缘结构；建立了微波源器件的瞬态抽气模型，应用分子流 MC 方法模拟了脉冲放气后微波源内部真空压强在不同时刻下的三维分布和演化规律；并以此为基础优化了内置气体捕集泵的真空拓扑结构。在 HEART-50 脉冲功率源上进行了 5 Hz 实验测试，陶瓷真空界面能耐受超过 600 kV 的脉冲电压，重频运行可靠；微波源在脱离地面泵组后实现了重频吉瓦级输出，脉冲串间的真空恢复时间小于 1 min，平衡压强小于 5×10^{-2} Pa，微波功率大于 3 GW、脉宽大于 40 ns。

参考文献

- [1] BENFORD J, SWEGLE J A, SCHAMLOGULU E. High power microwaves[M]. 3th ed. New York: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2015.
- [2] LEVINE J S, HARTENECK B D. Repetitively pulsed relativistic klystron amplifier[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(17): 2133-2135.
- [3] BLUHM H. Pulsed power systems: Principles and applications[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [4] ELSAYED M A, NEUBER A A, DICKENS J C, et al. An explosively driven high-power microwave pulsed power system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(2): 024705.
- [5] SHIFFLER D, HAWORTH M, CARTWRIGHT K, et al.

- Review of cold cathode research at the air force research laboratory[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(3): 718-728.
- [6] FAN Yu-wei, ZHONG Hui-huang, LI Zhi-qiang, et al. Repetition rate operation of an improved magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(8): 083102.
- [7] JU Jin-chuang, FAN Yu-wei, SHU Ting, et al. Proposal of a gigawatt-class L/Ku dual-band magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(10): 103104.
- [8] FAN Yu-wei, ZHONG Hui-huang, ZHANG Jian-de, et al. A long-pulse repetitive operation magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(5): 053512.
- [9] ZHANG Xiao-ping, DANG Fang-chao, ZHANG Jun, et al. Preliminary investigation of an improved metal-dielectric cathode for magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(2): 024705.
- [10] FAN Yu-wei, WANG Xiao-yu, ZHONG Hui-huang, et al. A dielectric-filled magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 093501.
- [11] PARSON J M, LYNN C F, MANKOWSKI J J, et al. Conditioning of carbon fiber cathodes in UHV-sealed tubes at 200 A/cm²[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(8): 2007-2014.
- [12] WATER J W, LYNN C F, DICKENS J C, et al. Operation of a sealed-tube-vircator high-power-microwave source[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(6): 1618-1621.
- [13] ZHAO Xue-long, XUN Tao, LIU Lie, et al. Maintenance of high vacuum level in a compact and lightweight sealed hard-tube magnetically insulated line oscillator system[J]. *Vacuum*, 2015, 111: 55-59.
- [14] PARSON J M, LYNN C F, SCOTT M C, et al. A frequency stable vacuum-sealed tube high-power microwave vircator operated at 500 Hz[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(5): 508-510.
- [15] 荀涛, 杨汉武, 张建德. 一种重复脉冲同轴馈电型陶瓷真空界面[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(1): 015012.
- XUN Tao, YANG Han-wu, ZHANG Jian-de. Application of a ceramic vacuum interface for a repetitive operated pulsed power source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(1): 015012.
- [16] LI An-kun, FAN Yu-wei. Preliminary experimental study of a carbon fiber array cathode[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(6): 065105.
- [17] XUN Tao, ZHANG Jian-de, YANG Han-wu, et al. A distributed pumping model for a repetitive operated magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(16): 164505.
- [18] 荀涛, 杨汉武, 张建德, 等. 磁绝缘线振荡器重复频率运行真空系统优化[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 1003-1008.
- XUN Tao, YANG Han-wu, ZHANG Jian-de, et al. Optimization of a pumping system for a repetitive operated magnetically insulated transmission line oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 1003-1008.
- [19] BIRD G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows[M]. London: Clarendon Press, 1994.

编辑 漆蓉