



·前沿技术与交叉科学·

# 大气压微波等离子体射流装置放电特性研究\*

潘 惠, 王 舸, 杨 阳

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:** 基于同轴传输线结构设计了两种不同喷嘴结构的大气压微波等离子体射流 (MW-APPJ) 装置, 其工作频率 2.45 GHz, 工作气体为氩气, 分别研究了两种不同喷嘴结构对等离子体放电特性产生的影响。仿真结果表明, MW-APPJ 在气体喷嘴处会产生高强度的电场, 经过优化结构, 实现在频率 2.45 GHz 下, 喷嘴处的场强满足氩气电离的击穿场强阈值要求。同时, 利用多物理场耦合仿真软件对装置的气流分布进行了稳态模拟, 并通过实验对比分析了两种喷嘴结构下大气压氩等离子体射流的基本特性。实验结果表明, 不同的喷嘴结构会影响等离子体装置的反射系数随输入功率的变化规律, 但并不影响等离子体射流长度随输入功率的变化规律和反射功率随进气流量的变化规律; 同时, 在大气压下, 稳态微波等离子体射流呈现出类金属性, 等离子体中的电子只能在很薄的区域中吸收微波能量, 因而造成微波的反射功率较大。

**关键词:** 微波放电; 大气压等离子体射流; 电磁场仿真; 稳态层流仿真; 放电特性

中图分类号: O531

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210277

## Design and study of atmospheric pressure microwave plasma jet

Pan Hui, Wang Ge, Yang Yang

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Two atmospheric pressure microwave plasma jet (MW-APPJ) devices with different nozzle structures are designed which are based on the coaxial transmission line structure. The frequency is 2.45 GHz and working gas is argon. What's more, the effects of two different nozzle structures on the characteristics of plasma discharge have been studied. Based on the electromagnetic field simulation results, the MW-APPJ generates a high-intensity electric field at the nozzle. After optimizing the structure, the field strength at the nozzle have reached the breakdown field strength required for argon ionization under the frequency of 2.45 GHz. Meanwhile, the simulation of the argon flow distribution was carried out under steady-state using multi-physics coupling simulation software. In addition, the basic characteristics of the atmospheric pressure argon plasma jet under the two nozzle structures were compared and analyzed through experiments. The experimental results show that different nozzle structures can affect the variation of reflection parameter with input power, but do not affect the variation of plasma jet length with input power and the variation of reflected power with inlet flow; at the same time, under atmospheric pressure, the steady-state microwave plasma jet exhibits metal-like property and the electrons in the plasma can only absorb microwave energy in a very thin area, which causes large reflected power of the microwave.

**Key words:** microwave discharge, atmospheric pressure plasma jet, electromagnetic field simulation, steady-state laminar flow simulation, discharge characteristics

大气压等离子体射流 (APPJ) 是一项重要的等离子体放电技术, 其独特的结构使其能够在开放空间中产生宏观温度低、化学活性高的非平衡低温等离子体, 在材料表面处理、生物医学应用等方面具有广阔的应用前景, 近年来掀起了对等离子体射流的研究热潮<sup>[1-3]</sup>。当前已开发出了多种等离子体放电技术, 包括直流、电晕、射频、介质阻挡、电感耦合、微波等<sup>[4]</sup>。相较于其他驱动产生等离子体的方式, 微波等离子体具有电子密度高、电离度高和可控性强等优势<sup>[5]</sup>, 因此, 微波激发等离子体射流更能在实际应用中凸显优势, 具有重要的研究意义与价值。

\* 收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-12-30

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目 (2021YFG0265)

联系方式: 潘 惠, 1475963631@qq.com。

通信作者: 杨 阳, yyang@scu.edu.cn。

当前国内外已有关于微波等离子体射流装置研究的报道。韩国 Lee 等人<sup>[6-7]</sup>采用侧馈入微波源的方式设计了一种宽频带工作的大气压微波等离子体射流装置, 主要应用于伤口处理等生物医学方面; 日本 Kim 等人<sup>[8]</sup>基于微带线结构设计了一种工作在 2.45 GHz 的微波激励大气压等离子体射流器件, 在一定功率和气流流量下, 氩气等离子体射流的长度最长达 5 mm。国内多所高校也展开了对微波等离子体射流的研究, 并取得了一定的进展<sup>[9-12]</sup>。清华大学张庆等人<sup>[9]</sup>基于矩形波导设计了一款在 2.45 GHz 谐振产生高场强的微波等离子体炬, 并通过实验对电子密度进行了测量, 但该装置体积较大, 输入微波功率也较大, 产生的等离子体温度很高; 电子科技大学傅文杰等人<sup>[4]</sup>基于双同轴结构设计了一款产生稳定等离子体射流的装置, 该装置在 2.45 GHz 附近可达到 80% 的能量利用率; 中国科学技术大学王瑶瑶等人<sup>[10]</sup>基于同轴谐振腔的结构设计了  $\lambda/4$  波长微波等离子体装置, 并首次搭建了全自动微波等离子体炬系统; 浙江大学任昊等人<sup>[11]</sup>基于流体近似法对微波等离子体炬进行了二维和三维仿真研究, 模拟了等离子体射流的电场、电子密度及电子温度等相关参数。研究显示, 产生射流的装置不同, 射流的物理和化学性质也明显不同<sup>[13-15]</sup>。

本文基于同轴传输线结构设计了两种不同喷嘴结构的微波等离子体射流发生装置, 其工作频率为 2.45 GHz, 利用击穿场强较低的惰性气体氩气作为放电气体, 在大气环境下能实现较小微波功率激发并维持稳定的等离子体射流, 仿真了装置的电场和反射系数并对结构进行了优化, 同时基于 COMSOL 模拟了装置的稳态气流分布, 并通过实验对比研究了两种微波等离子体发生装置的等离子体放电特性。

## 1 理论模型

### 1.1 气体击穿理论

等离子体是由气体电离所产生的整体呈现电中性的物质, 当施加给气体的电压或场强达到气体放电所需的击穿电压或击穿场强, 气体就会被击穿电离产生电子、离子、自由基团、光子等活性成分组成的等离子体。微波等离子体是利用微波能量在腔体结构中产生的电场强度来激发气体放电, 因此, 对于微波等离子体发生装置, 腔体的电场强度必须达到放电气体的击穿场强, 才能在腔体中产生等离子体。

本文所提出的大气压微波等离子体射流结构, 其能在大气压环境下产生定向流动的稳定等离子体射流, 意味着等离子体射流直接与开放环境接触, 在这种情况下, 等离子体的自由电子的扩散作用可忽略。研究显示, 基于实验研究结果近似获得的气体击穿场强的阈值可为<sup>[16]</sup>

$$E_{\text{rms}} = 32[(p/133.322)^2 + 2f^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{rms}}$  表示击穿电场强度阈值, 单位为 V/cm;  $p$  为气压, 单位为 Pa;  $f$  为频率, 单位为 GHz。

研究表明, 在相同条件下, 氩气的击穿场强阈值低于空气的击穿场强阈值, 在标准大气压下, 氩气的理论击穿场强阈值约为  $2.7 \times 10^6$  V/m<sup>[17]</sup>, 空气的理论击穿场强阈值约为  $3 \times 10^6$  V/m。因此, 为了使微波能在大气压下激发氩气放电产生等离子体, 其输入微波功率不能太小, 但功率增加又会引起等离子体温度升高, 因而必须对腔体结构进行设计, 调节微波输入功率和气体流量达到一个相对平衡的状态, 获得大气压下的低温等离子体射流。

### 1.2 结构设计

为了设计小功率激发的低温等离子体射流装置, 本研究基于同轴传输线结构进行设计, 将同轴结构的一端作为微波馈电端口, 另一端开路。为了在开路端聚集微波能量, 在内外导体间隙区域产生高电场集中区域, 对开路端采用同轴压缩的渐变结构, 从而在开路端激发氩气放电产生等离子体射流, 装置结构示意图如图 1 所示。这两种结构喷嘴出口端不同, 其工作频率均为 2.45 GHz, 同轴内导体直径 7 mm, 外导体直径 16 mm, 同轴线长度为  $l_1+l_2$ , 其中, Type I 喷嘴处为内外导体均压缩的渐变同轴结构, 开路端内导体直径  $\Phi_1$ , 外导体直径  $\Phi_2$ , 如图 1(a) 所示; Type II 喷嘴处为外导体压缩的渐变同轴结构, 开路端外导体直径  $\Phi_2$ , 如图 1(b) 所示。两种结构的工作气氩气从进气口通入同轴结构中, 充当同轴介质, 从开路端喷射出来; 微波从底端馈入, 在同轴传输线的引导下达到开路端的喷嘴处, 经过同轴渐变结构在开路端内外导体之间形成高电场集中区域, 击穿氩气放电产生等离子体, 在气流的带动下, 等离子体从开路端喷射而出形成定向射流。

## 2 仿真模拟

### 2.1 电磁场仿真

为了能在大气压下产生低温等离子体, 输入微波功率不能太高, 同时, 大气压下产生的等离子体射流的电子密度较高。为了获得能在较小微波功率下激发并维持低温等离子体射流的发生装置, 本研究基于电磁仿真软件对

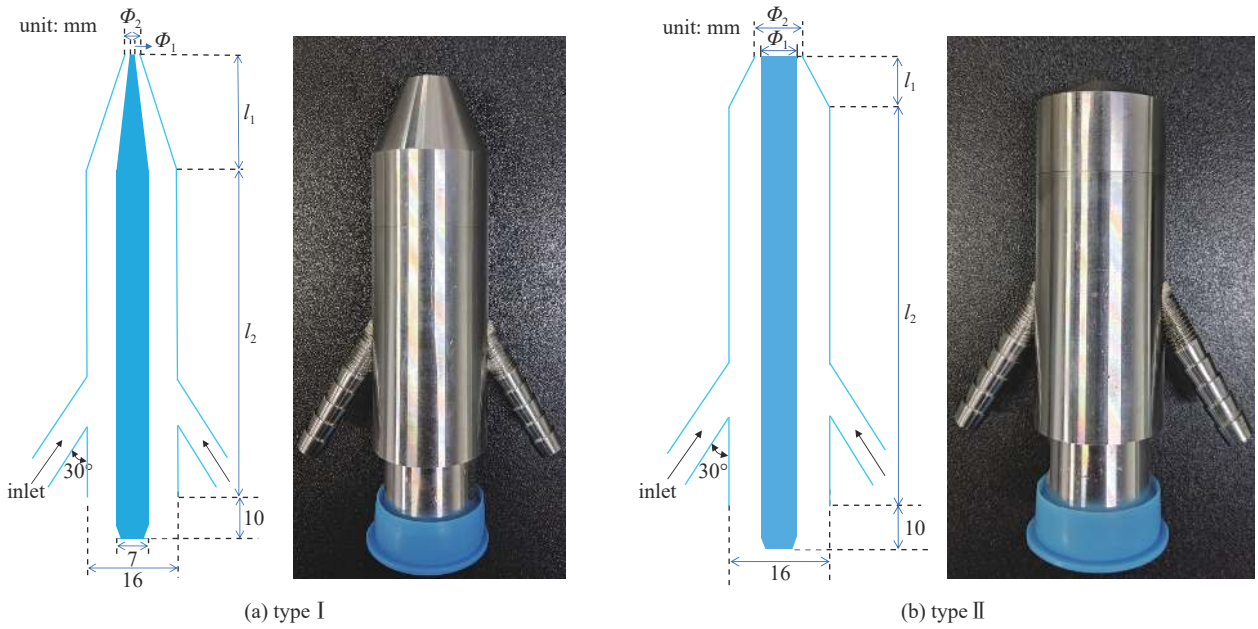


Fig. 1 Structure diagram of plasma jet device  
图 1 等离子体射流结构示意图及实物图

图 1 所示的同轴结构进行了电磁场仿真, 观察了两种结构的电场分布情况和  $S$  参数, 并优化结构的相关参数, 以在较小输入功率下获得一组电磁波传输最佳条件下的解。

由气体击穿理论可知, 氩气激发电离时存在击穿场强阈值, 因此喷嘴处的电场强度决定了该装置是否能激发起等离子体, 只有当喷嘴处的电场强度达到气体的击穿电场, 才能击穿氩气电离放电。喷嘴处的电场强度受同轴喷嘴出口端内外导体半径的影响, 该装置的中心工作频率受装置长度的影响。因此, 对同轴线结构的长度和喷嘴处的内、外导体半径进行参数化扫描, 通过观察两端口传输电磁波时的  $S$  参数, 确保在频率 2.45 GHz 处端口反射较小。同时, 喷嘴出口端的电场强度达到氩气的击穿场强值, 仿真结果如图 2、图 3 所示。

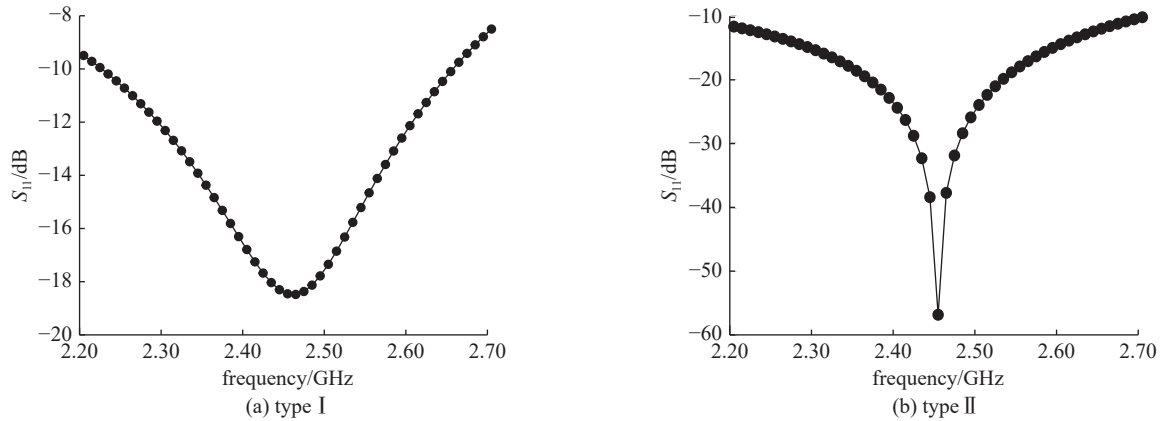


Fig. 2 Dependence of reflection parameter on the frequency  
图 2 反射系数随频率变化的曲线

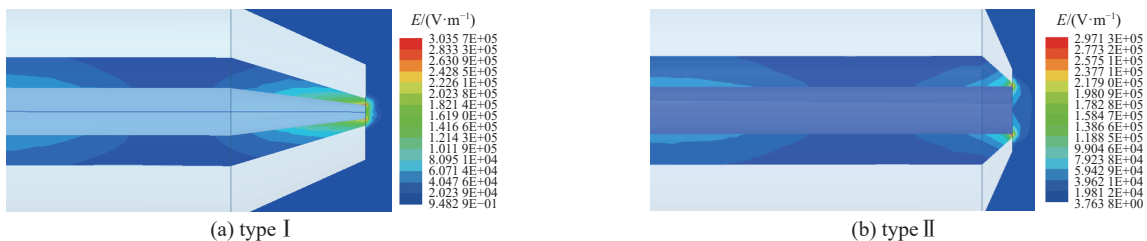


Fig. 3 Electric field distribution of cavity section  
图 3 腔体截面的电场分布

优化后的结构尺寸参数如表 1 所示, Type I 结构同轴线长度  $l_1=20$  mm,  $l_2=77$  mm, 此时, 在频率 2.45 GHz 下, 入射端端口反射系数  $S_{11}=-18$  dB, 反射较小, 喷嘴出口端内导体直径  $\Phi_1=2$  mm, 外导体直径  $\Phi_2=4$  mm, 开路端喷嘴处能产生的最大电场强度为  $3.04\times 10^5$  V/m, 满足氩气的击穿场强值; Type II 结构同轴线长度  $l_1=4.5$  mm,  $l_2=77.5$  mm, 此时, 装置在频率 2.45 GHz 下, 入射端端口反射系数  $S_{11}=-56$  dB, 反射很小, 同时开路端喷嘴处外导体直径  $\Phi_2=9$  mm, 开路端喷嘴处能产生的最大电场强度为  $2.97\times 10^5$  V/m, 能实现对氩气的击穿电离, 仿真结果参数如表 2 所示。

表 1 优化结构尺寸

item	$\Phi_1/\text{mm}$	$\Phi_2/\text{mm}$	$l_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$
type I	2	4	20	77
type II	7	9	4.5	77.5

表 2 仿真结果

item	$f/\text{GHz}$	$S_{11}/\text{dB}$	$E_{\text{max}}/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
type I	2.45	-18.45	$3.04\times 10^5$
type II	2.45	-56.84	$2.97\times 10^5$

## 2.2 稳态气流模拟

对于等离子体射流, 气体流场是影响射流传播的重要因素之一, 气体流场决定了射流传播时的路径, 进气流量的大小分布会对等离子体的形貌和稳定性造成一定影响, 因此, 基于数值模拟的方法对氩气气流分布进行了相关研究。由于本文设计的同轴微波等离子体射流装置体积较小, 进气口管道直径 6 mm, 因而气流量不会太大, 其流体雷诺数低于 2000, 可将气流场视为层流进行流体模拟。基于 COMSOL 对 MW-APPJ 装置进行建模仿真, 在稳态下对层流模块中的质量连续性方程和纳维斯托克斯方程进行求解, 得到在不同进气流量下等离子体域中气流的流速分布情况, 如图 4 所示。

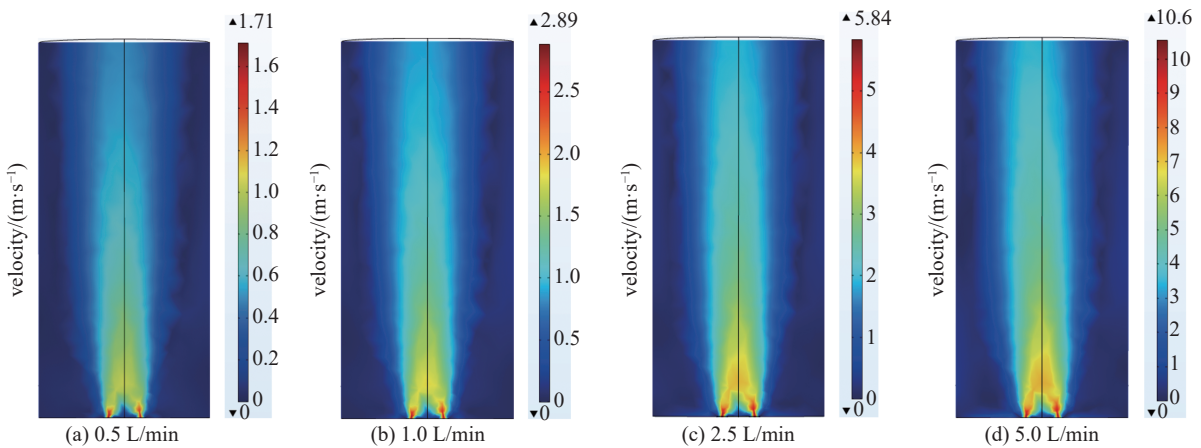


Fig. 4 Velocity distribution under different inlet flow

图 4 不同进气流量下等离子体域的气流流速分布

图 4 气流模拟结果显示, 仿真了进气口气流量在 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 L/min 时, 等离子体域中氩气的流速分布, 可以看出, 氩气气流经喷嘴出来之后, 在沿着轴向传播的同时也会向径向扩散, 氩气气流的速度总体上随着进气流量的增加而增大, 且随流速的增加, 径向速度分量占总速度的比例逐渐减小, 反之, 轴向速度分量占总速度的比例逐渐增大, 这表明经喷嘴喷射出来的氩气气流的径向扩散很小, 绝大部分气流是沿轴向喷射的。由于等离子体射流的传播路径受气体流场决定, 这表明等离子体射流在向前传播的同时也会向径向扩散, 但是等离子体射流的径向扩散较小, 其主要沿轴向向前传播。因此, 可推测随进气流量的增加, 等离子体射流的长度也在逐渐增大。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验系统搭建

根据图 5 所示的系统流程示意搭建微波等离子体射流实验系统, 如图 6 所示, 包括频率在 2.45 GHz 的微波固态源、环形器、双向耦合器、功率计、吸收负载、气体流量计、氩气 (纯度为 99.9%) 以及等离子体发生装置。微波固态源 (WSPS-2450-150) 为等离子体器件提供微波能量, 使用控制面板调节微波工作频率为 2.45 GHz 并设定输入功率, 在微波源旁连接一个环形器和吸收负载用以防止等离子体发生装置的反射功率对固态源造成损坏, 使用双向耦合器和功率计测量输入功率和反射功率, 通过波导-同轴转换器将微波输入功率与等离子体射流装置耦

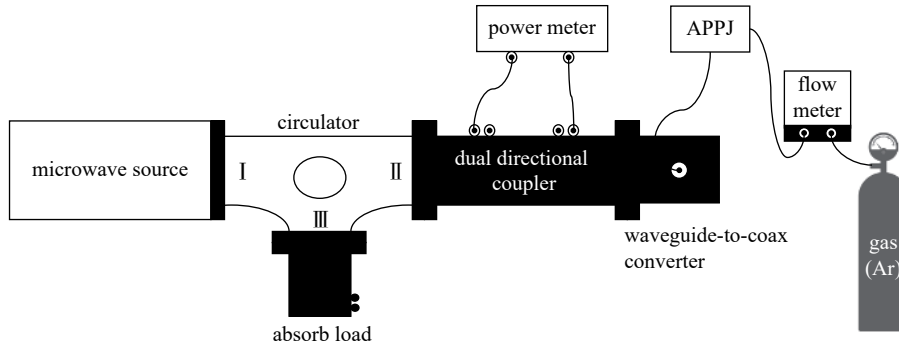


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

图 5 微波等离子体射流实验系统流程示意图

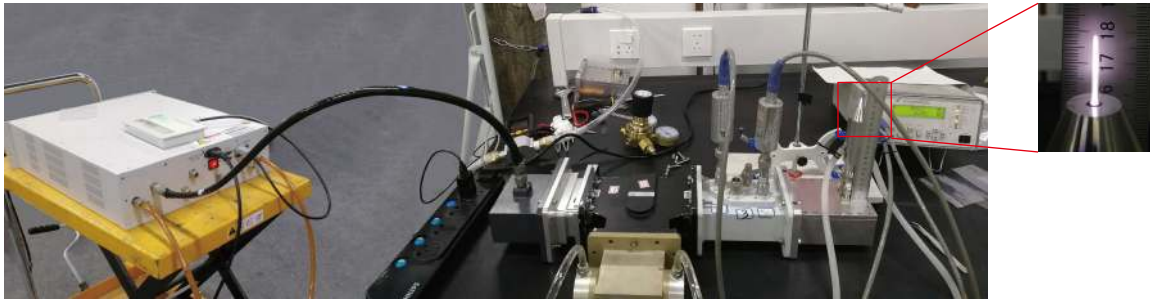


Fig. 6 Photograph of the experimental setup

图 6 微波等离子体射流实验系统图

合起来,并利用气体流量计调节气体进气流量的大小,在喷嘴处产生稳定的低温等离子体射流。

### 3.2 放电特性分析

对于 MW-APPJ 装置,输入的微波功率主要用于等离子体的激发和维持,但由于本文设计的微波等离子体射流发生装置是常压下的开放系统,存在微波能量外泄的可能。因此,输入的微波功率  $P_{in}$  可分为 3 个部分,第一部分是由等离子体的产生和吸收  $P_{plas}$ ,第二部分是从 MW-APPJ 装置的输出端口泄漏  $P_{leak}$ ,第三部分是 MW-APPJ 装置反射的微波功率  $P_{ref}$ ,其余的能量损耗可忽略不计。

$$P_{in} = P_{plas} + P_{leak} + P_{ref} \quad (2)$$

对本文设计的两种微波等离子体发生装置,输入一定微波功率,工作频率为 2.45 GHz,通入氩气流量为 0.5~3 L/min,激发常压状态下的微波等离子体,对其放电特性进行了相关的实验研究。实验中将 MW-APPJ 装置进气口的氩气进气流量调节为约 2.5 L/min 作为气流工作条件,实验观察了不同的微波输入功率下等离子体射流长度及该装置的反射系数  $S_{11}$  的变化情况,得到如图 7、图 8 所示的实验结果。

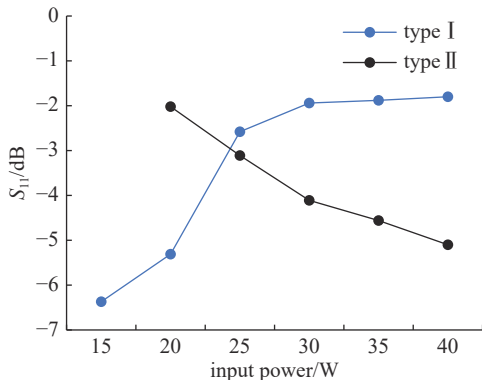


Fig. 7 Dependence of S-parameter on the input power

图 7 反射系数  $S_{11}$  随输入功率变化的曲线

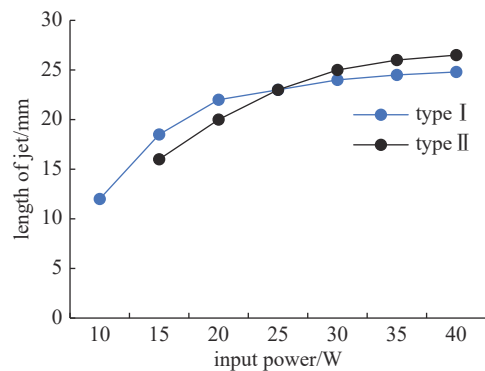


Fig. 8 Dependence of plasma-jet length on the input power

图 8 射流长度随输入功率变化的曲线

从图 7 中可以看出,两种结构的反射系数均较大,可见在大气环境中的等离子体射流是一种类金属导体性的材料。当电磁波随同轴结构行至喷嘴出口处时,受到等离子体射流的金属导体性影响发生反射,较大一部分微波

功率被反射回来。在相同的进气流量条件下, Type I 结构的反射系数随输入功率的增加呈现先增大后稳定的趋势; Type II 结构的反射系数随功率的增大而减小。对于 Type I 结构, 其喷嘴处的口径很小, 产生的等离子体射流几乎覆盖了喷嘴出口端, 而呈现金属导体性的等离子体射流会将微波功率反射回去, 因此, Type I 结构出口端几乎没有功率泄漏。随输入功率的增加, 放电端口聚集的微波电场也逐渐增大, 更多的中性气体粒子吸收微波能量而电离, 等离子体吸收的微波功率逐渐增加, 等离子体内部的带电粒子数也逐渐增大, 等离子体射流呈现出的金属导体性更强, 反射的微波功率也更大, 因而, 反射系数  $S_{11}$  也增大, 当输入功率达到一定值后, 反射功率随输入功率基本呈线性增长, 此时, 反射系数  $S_{11}$  趋于稳定。

对于 Type II 结构, 其喷嘴处的口径较大, 产生的等离子体射流无法覆盖出口端, 因此, Type II 结构存在功率泄漏。由于 Type II 结构喷嘴处的内、外导体口径较大, 产生的等离子体射流在喷嘴处的内导体中心形成一个类金属性的导体棒, 从而形成一根辐射天线, 向周围空间辐射微波能量。随输入功率的增加, 等离子体的带电粒子数也会增加, 等离子体射流的宽度和长度也逐渐增加, 由等离子体射流形成的金属导体棒与同轴内导体之间形成更好的匹配, 因而等离子体射流天线向周围空间辐射的微波能量更多, 因此, Type II 结构出口端泄漏的微波功率随输入功率的增大而增大, 故其反射系数  $S_{11}$  逐渐减小。

等离子体射流的长度决定于放电空间产生的亚稳态粒子和高能电子在电场的作用下在空气中扩展的距离<sup>[18]</sup>。从图 8 可以看到, 随输入功率的增加, 等离子体射流的长度也在不断增大, 但射流长度的增长与微波输入功率不是线性关系, 射流长度的增长趋势随输入功率的增加越来越平缓, 即在同等进气流量的工作条件下, 随输入功率的增加, 等离子体射流的长度也会增大, 但当功率增大到某一临界值后, 等离子体射流长度将不再随输入功率的增加而增大。从原理上进行分析, 当带电粒子处在电场中, 它会受到电场力的作用, 获得一定的动能。随微波输入功率的增大, 喷嘴处产生的电场强度增加, 放电产生的带电粒子增多, 因此随气流扩展到空气中的粒子数量也增多, 随气流传播的距离也会有所延长。但固定气流工作条件下, 固定不变的气体粒子只能吸收部分微波能量, 即当微波输入功率增大到某一临界值后, 等离子体吸收的微波能量已经饱和, 等离子体射流的长度也将逐渐稳定, 此时, 等离子体射流的长度将无法随输入功率的增大再增加。

气流是产生等离子体射流的一个关键因素, 进气流量太大会造成喷嘴处气流流速过大, 致使产生的等离子体射流不稳定; 进气流量太小会造成喷嘴处气流流速过小, 难以带动喷嘴处电离的粒子形成稳定的等离子体射流。因此, 本文通过实验研究了氩气的进气流量对等离子体射流产生的影响, 在固定输入功率的条件下, 对进气流量在 0.3~3.6 L/min 的范围内进行调节, 实验观察了两种装置在不同进气流量下反射功率的变化情况, 得到如图 9 所示的结果。

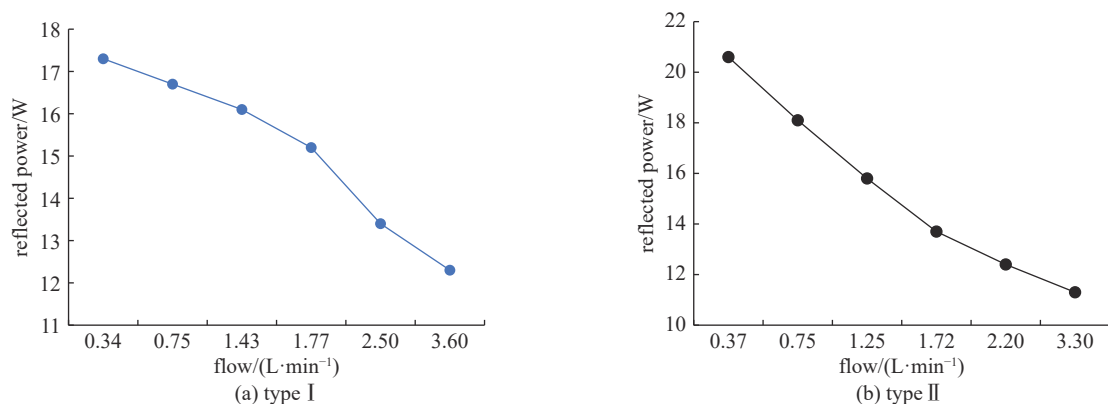


Fig. 9 Dependence of reflected power on the inlet flow

图 9 反射功率随进气流量变化的曲线

由图 9 可以看出, 在输入微波功率不变的情况下, Type I 结构和 Type II 结构的反射功率随进气流量的变化趋势一致, 其反射功率均随着进气流量的增大而减小。对于 Type I 结构, 随进气流量的增大, 在喷嘴处可电离的气体密度增大, 电离所产生的等离子体中的带电粒子数也增大, 等离子体吸收的微波功率也随之增加, 因此, 在输入功率不变的情况下, Type I 结构反射的微波功率将随着进气流量的增大而减小。同样对于 Type II 结构, 随进气流量的增大, 等离子体中的带电粒子数也会增加, 等离子体吸收的微波功率也随之增加, 等离子体射流的宽度和长度也逐渐增加, 由等离子体射流形成的金属导体棒与同轴内导体之间形成更好的阻抗匹配, 因而等离子体射流天线

向周围空间辐射的微波能量逐渐增加,因此,Type II结构出口端泄漏的微波功率随进气流量的增大而增大,在输入功率不变的情况下,其反射功率将随着进气流量的增加呈现逐渐减小的趋势。

## 4 结 论

本文设计了两种不同结构的大气压下微波等离子体射流发生装置,观察了两种结构对等离子体各参数的影响。基于电磁仿真软件对装置进行了建模仿真,对腔体出口端的电场强度和 $S$ 参数进行了分析,为了满足电磁波传输理论和气体击穿场强阈值的指标要求对结构进行了优化设计,并对装置激发起稳态等离子体射流后的放电特性进行了实验研究,观察了微波输入功率和气体进气流量对等离子体射流的长度和结构 $S$ 参数的影响。实验研究结果显示:

(1)大气压环境下放电产生的等离子体射流呈现出金属导体性。

(2)在相同的进气流量下,装置的反射系数随输入功率的变化规律受到不同喷嘴结构的影响。当输入功率增大时,对于喷嘴口径较小的Type I结构,气体吸收更多微波能量电离产生的带电粒子数增加,等离子体射流的金属导体性更强,因此,反射系数增大;而对于喷嘴口径较大的Type II结构,喷嘴处泄漏的功率逐渐增大,反射系数减小。

(3)在相同的进气流量下,不同的喷嘴结构并不影响等离子体射流长度随输入功率的变化规律。随输入功率的增大,两种结构的等离子体射流长度先增大后稳定,即每个进气流量对应一个射流的最长喷射距离。

(4)在相同的输入功率下,微波的反射功率随进气流量的变化规律不受喷嘴结构的影响。当进气流量增大时,气体电离产生的带电粒子数增加,等离子体吸收的微波功率增大,因而反射功率逐渐减小。

该结构设计成功实现了在较低微波功率下,在大气压下击穿氩气放电产生并维持稳定的低温等离子体射流,可实际应用于材料表面处理、生物医学等应用方面。

## 参考文献:

- [1] 李文浩, 褚向前, 赵世奇, 等. 大气压宽径向空气等离子体射流装置的设计、实验和仿真研究[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(5): 420-428. (Li Wenhao, Chu Xiangqian, Zhao Shiqi, et al. Modification of atmospheric pressure air plasma jet: a simulation and experimental study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(5): 420-428)
- [2] Onyshchenko I, De Geyter N, Morent R. Improvement of the plasma treatment effect on PET with a newly designed atmospheric pressure plasma jet[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2017, 14: 1600200.
- [3] Lehmann A, Pietag F, Arnold T. Human health risk evaluation of a microwave-driven atmospheric plasma jet as medical device[J]. *Clinical Plasma Medicine*, 2017, 7/8: 16-23.
- [4] Fu Wenjie, Zhang Chaoyang, Nie Cong, et al. A high efficiency low-temperature microwave-driven atmospheric pressure plasma jet[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114: 254106.
- [5] 李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3697-3727. (Li Heping, Yu Daren, Sun Wenting, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3697-3727)
- [6] Park G Y, Park S J, Choi M Y, et al. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, 21: 043001.
- [7] Choi J, Iza F, Do H J, et al. Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18: 025029.
- [8] Kim J, Katsurai M, Kim D, et al. Microwave-excited atmospheric-pressure plasma jets using a microstrip line[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93: 191505.
- [9] 张庆, 张贵新, 王黎明, 等. 大气压微波等离子体炬的仿真设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 315-318. (Zhang Qing, Zhang Guixin, Wang Liming, et al. Design and experiment of an atmospheric pressure microwave plasma torch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(2): 315-318)
- [10] Wang Yaoyao, Wang Zhongli, Wu Dajun, et al. Design of a fully automatic microwave plasma torch system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 055112.
- [11] 任昊. 基于COMSOL的MPT离子化源等离子体建模仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (Ren Hao. Modeling and simulation of MPT ionization source based on COMSOL[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014)
- [12] Li Shouzhe, Xu Maochun, Zhang Xin, et al. A pulse-modulated nonequilibrium atmospheric-pressure microwave argon plasma discharge preionized by a kilohertz excited plasma jet[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 174101.
- [13] Lu Xinpei, Naidis G V, Laroussi M, et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: generation, transport, and biological effects[J]. *Physics Reports*, 2016, 630: 1-84.
- [14] 张冠军, 詹江杨, 邵先军, 等. 大气压氩气等离子体射流长度的影响因素[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1432-1438. (Zhang Guanjun, Zhan Jiangyang, Shao Xianjun, et al. Influence factor analysis on jet length of atmospheric pressure argon plasma jets[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1432-1438)

- [15] Yue Yuanfu, Pei Xuekai, Lu Xinpei. Comparison on the absolute concentrations of hydroxyl and atomic oxygen generated by five different nonequilibrium atmospheric-pressure plasma jets[J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2017, 1(6): 541-549.
- [16] Woo W, DeGroot J S. Microwave absorption and plasma heating due to microwave breakdown in the atmosphere[J]. *The Physics of Fluids*, 1984, 27(475): 475-487.
- [17] 刘繁, 汪建华, 王秋良, 等. 常压微波等离子体炬装置的模拟与设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1504-1508. (Liu Fan, Wang Jianhua, Wang Qiuliang, et al. Numerical modeling and design of atmospheric pressure microwave plasma jet[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1504-1508)
- [18] 刘文正, 贾凌云, 孔飞, 等. 阵列式等离子体射流特性的研究[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(2): 105-108. (Liu Wenzheng, Jia Lingyun, Kong Fei, et al. Study on the characteristics of array plasma jet[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(2): 105-108)