

文章编号: 1001-4322(2010)02-0315-04

# 大气压微波等离子体炬的仿真设计与实验\*

张 庆, 张贵新, 王黎明, 王淑敏

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 设计了一个低成本、高稳定性的基于 BJ22 矩形波导的微波等离子体炬源。整个系统由 1~10 kW 主频 2.45 GHz 的磁控管微波功率源、环形器、调谐器和微波反应腔体组成。通过特殊设计的调谐装置,在气体喷嘴处产生高幅值的电场强度,使工作气体电离形成大气压开放式微波等离子体炬。对影响电场强度的几个关键因素进行了仿真,得出各个参数对场强的影响规律;根据仿真参数设计了微波反应腔体,该系统可以在大气压下激发和维持开放的稳定氩气、氦气、氮气和空气等离子体炬。对等离子体炬的基本特性和基本参数进行了研究,验证了设计参数的正确性,讨论了其可扩展性及潜在的工业应用。

**关键词:** 微波等离子体炬; 矩形波导; 大气压; 开放式运行

**中图分类号:** O531 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0315

等离子体以其特有的物理和化学特性被广泛应用到纳米材料合成、材料表面处理和杀菌等工业领域<sup>[1-5]</sup>。用微波电磁能量产生等离子体相比电极放电,不存在电极的蒸发污染问题,等离子体的生成空间不受电极间隙的限制,而且产生的等离子体和能量源分离,可以实现大气压开放式等离子体,不需要放电管<sup>[6]</sup>。这些优势使得微波等离子体在工业应用中越来越广泛。微波等离子体炬是一种很重要的等离子体发生形式。目前的发生装置以易电离的惰性气体为工作气体,产生的等离子体炬体积较小,效率较低<sup>[7]</sup>。本文设计了一个低成本、高稳定性的基于 BJ22 矩形波导的微波等离子体炬源,不仅可以产生大气压开放式稳定的氩气、氦气等离子体炬,也可以使难以电离的氮气和空气电离形成等离子体炬,而且体积比较大,性能稳定,微波能量利用率高,可扩展性好。

## 1 微波传输系统与反应腔体设计

实验系统由 1~10 kW 主频 2.45 GHz 的磁控管微波功率源、环形器、可变衰减器、四螺钉调谐器、T 型波导、带有短路活塞的矩形波导终端和微波反应腔体(等离子体腔)组成,如图 1 所示。微波反应腔体由直线矩形波导、调谐装置、短路活塞组成。整个实验系统基于 BJ22 矩形波导,结构尺寸 109.2 mm×54.6 mm,对应的主模频率范围 1.72~2.61 GHz。

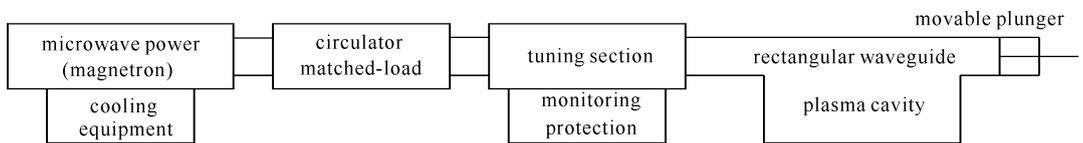


Fig. 1 Transmission, tuning, monitoring and protection systems of an atmospheric pressure microwave plasma

图 1 微波能量传输、调谐监测保护系统框图

微波在直线波导中传输,经过短路活塞,形成反射电磁波,与入射电磁波相互叠加,在直线波导中形成电压驻波和电流驻波,如图 2 所示,其中实线表示的是不同时刻  $t_1 \sim t_5$  的电压驻波,虚线表示相应时刻的电流驻波,图下方的两排数字表示不同调谐位置时的场强(单位:V/m)。可以看到,BJ22 矩形波导微波能量以  $TE_{10}$  模式单模传输,且其传导波长为 147.8 mm。

根据气体击穿理论,当微波电场的有效值达到气体击穿场强时,气体激发形成等离子体。为了在大气压下产生等离子体,必须通过调谐装置调节,使得工作气体喷嘴处产生大于击穿场强的电场,所以调谐装置的结构设计很重要。我们采用大圆柱和顶端逐渐缩小的小圆柱组成的结构,如图 3 所示,大圆柱可以上下调节深入矩

\* 收稿日期:2009-07-17; 修订日期:2009-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50477005);清华大学科研创新基金项目(JCpy2005053)

作者简介:张庆(1980—),男,博士研究生,从事微波等离子体源,等离子体参数诊断及应用研究; q-z06@mails.tsinghua.edu.cn.

通信作者:张贵新(1963—),男,副教授,主要研究等离子体物理,高电压技术,光电测量; guixin@mail.tsinghua.edu.cn.

形波导内的深度,小圆柱可以相对大圆柱上下调节距离直线波导辐射孔的距离,小圆柱末端为半径逐渐缩小的同轴圆柱,这样可以实现微波反应腔阻抗的连续变化,从而找到一个最合适的位置,在小圆柱末端和波导辐射孔处形成高幅值的电场。

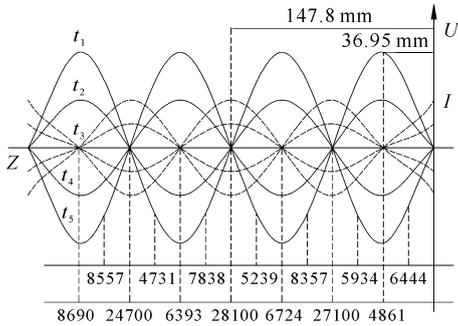


Fig. 2 Voltage and current standing waves inside rectangular waveguide, and electric field at different tuning position away from short-circuit adjuster

图 2 矩形波导中的电压驻波和电流驻波以及不同调谐位置时的场强

另外,整个调谐装置与短路活塞的距离也是影响电场幅值和分布的关键因素,直线波导末端采用短路活塞,且其在一个波导波长范围内可调,这样通过调节活塞位置,驻波波峰或者波节至少可以移动一个波导波长。

## 2 反应腔体电场分布

影响辐射孔处电场幅值和分布的关键因素包括:大小调谐圆柱的半径以及旋入矩形波导的深度、调谐装置到短路调节器的距离、辐射孔径的大小、输入的微波功率和频率。

基于 CST 高频电磁场仿真软件,首先对大小圆柱半径和旋入矩形波导的深度因素进行了仿真,结果表明,其它参数固定,大圆柱的半径由 10 mm 增加到 40 mm,辐射孔处的电场强度变化规律为:先变大后变小,半径为 25 mm 时,电场强度最大。小圆柱半径对电场强度的影响也存在同样的变化规律,对应的最大场强出现在半径为 8 mm 时。固定调谐大圆柱和小圆柱的半径分别为 25 mm 和 8 mm,改变大小圆柱旋入波导的深度,可以发现,大小圆柱旋入矩形波导的深度分别为 23.23 mm 和 38.95 mm 时,辐射孔处的电场强度为最大。另外,辐射孔径的大小也存在一个场强最大点,对应的孔径为 6 mm。

调谐装置到短路调节器的距离对场强影响的仿真结果见图 2,可以看出:调谐装置位于电压驻波波节处(对应于电流驻波波峰处)辐射孔处的电场最大,而在波峰处电场最小,这也和微波的辐射规律是一致的,调谐装置距离短路调节器半个传导波长的整数倍时,得到的电场最大,辐射的微波能量最大。

根据各个关键因素对电场的影响规律,最优参数情况下的仿真结果见图 4,相应的参数:大圆柱半径为 25 mm,小圆柱半径是 8 mm,旋入矩形波导的深度分别为 23.23 mm 和 38.95 mm,辐射孔的半径为 6 mm,整个调谐装置到短路调节器的距离为半个传导波长。从仿真结果可以看到,在辐射孔处每单位微波功率可以产生最大幅值为  $2.71 \times 10^4$  V/m 的电场,平均电场为  $1.5 \times 10^4$  V/m,微波功率越大,产生的场强越大,且分布在一个以辐射孔中心为轴线的圆锥体内,远离圆锥体轴线,电场幅值也随之减小。当偏离上述参数时,最大电场分布在反应腔体内部,而在辐射孔附近的外部区域,平均电场幅值减小到  $2 \times 10^3$  V/m。

另外,由于微波源的频率为  $(2.45 \pm 0.05)$  GHz 的一个频带,反应腔体的设计应该具有一定的频带范围以提高腔体的效率,使频带范围内的微波能量得到有效利用。基于这一点,对上述最优参数的微波反应腔体在 2.41~2.49 GHz 不同频率下的电场分布进行了仿真,如图 5 所示。从仿真结果来看:虽然该频带内的单位微波能量在辐射孔处形成的电场幅值有所减小,但是场强平均幅值都在  $1 \times 10^4$  V/m 以上,说明上述参数的反应腔体在该频带范围内,气体喷嘴处的电场足以电离工作气体,形成等离子体。

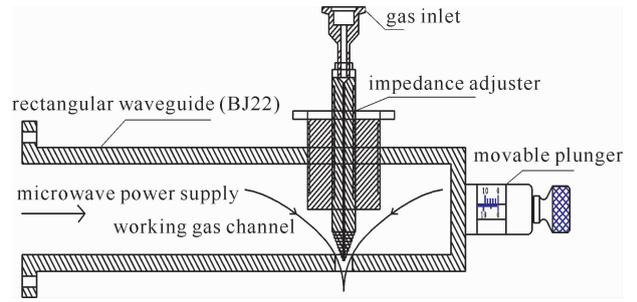


Fig. 3 Schematic diagram of microwave plasma cavity

图 3 微波反应腔体框图

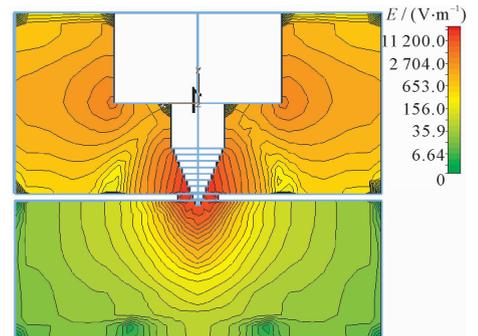


Fig. 4 Distribution of electric field across nozzle plane

图 4 喷嘴截面的电场分布

### 3 实验结果与分析

根据上述仿真得到的最优参数,通过调节短路活塞和调谐装置的位置,在大气压条件下,可以得到开放稳定的微波等离子体炬,如图 6 所示,依次为氩气、氦气、氮气和空气。试验条件:气体流速为  $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,微波功率分别为  $1.0, 0.9, 2.0$  和  $2.0 \text{ kW}$ 。可以看出:不同气体,激发和维持功率是不同的。值得注意的是,微波等离子体炬的激发功率高于维持功率,等离子体炬激发成功后,降低微波功率也可以维持等离子体炬。

对于不同工作气体,等离子体在气体喷嘴处开始激发,瞬间形成明亮的近似炬型的等离子体,炬边缘有不规则的放电通道。随着输入微波能量的增加,等离子体炬体积增大,当微波能量增加到

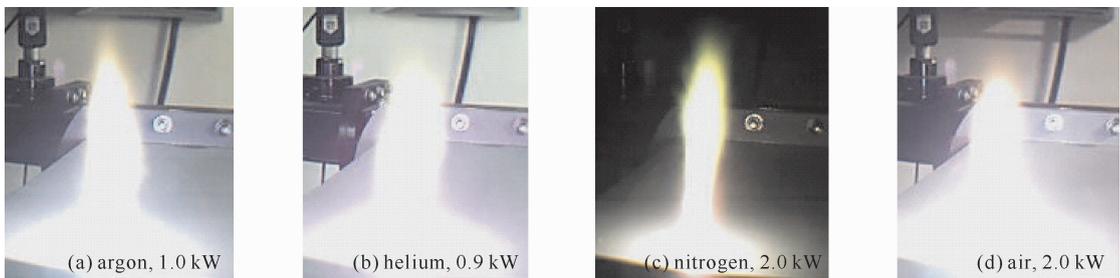


Fig. 6 Argon, helium, nitrogen and air microwave plasma torch

图 6 氩气、氦气、氮气、空气微波等离子体炬

$7 \text{ kW}$  时,氩气等离子体炬的高度可以达到  $300 \text{ mm}$ ,等离子体炬的这种形成过程可以解释如下:由于辐射孔的电场强度最大,且为对称分布,工作气体首先在该处电离,随着微波能量的进一步增加,高场强分布区域体积增加,等离子体区域增大。同时,产生的密集等离子体严重地影响了原来的电场分布,使原来的对称场分布发生了扭曲变形,一方面增加了电场强度的分布区域,另一方面形成了不规则的放电通道,可以从氮气等离子体炬明显看出来。

为了验证等离子体反应腔体设计参数的正确性,进行了下面实验。由于微波源频率固定,调谐圆柱半径固定,反应腔体的辐射孔半径固定,只对可调的参数在微波源额定功率  $10 \text{ kW}$  范围内进行了实验。

调谐装置在矩形波导中的深度是影响激发功率的关键因素。对于流速为  $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$  的氦气,当小圆柱旋入反应腔体深度为  $38.95 \text{ mm}$  时,大圆柱旋入反应腔体内深度在  $21.15 \sim 25.36 \text{ mm}$  之间,都可以产生等离子体炬,但是激发功率由  $4 \text{ kW}$  降到  $0.9 \text{ kW}$  又增加到  $6 \text{ kW}$ ,存在一个“V”型变化,等离子体炬的体积存在相反变化规律。相同实验条件下,固定大圆柱旋入腔体深度为  $23.23 \text{ mm}$ ,小圆柱深度小于  $35.53 \text{ mm}$  时,在  $7 \text{ kW}$  功率范围内没有产生等离子体,在  $35.53 \sim 39.50 \text{ mm}$  之间产生等离子体,激发功率由  $7 \text{ kW}$  下降到  $0.9 \text{ kW}$  又增加到  $6 \text{ kW}$ ,等离子体体积变化规律与激发功率变化规律相反。值得注意的是,当小圆柱旋入深度大于  $39.50 \text{ mm}$  时, $3 \text{ kW}$  的微波功率就可以产生等离子体,但是等离子体产生在反应腔体内部。由以上实验可以得出:调谐装置的位置是影响激发功率和等离子体炬体积以及能否产生等离子体的关键因素。调谐装置的位置直接改变了反应腔体内部的阻抗,如果阻抗很好匹配,可以减少反射功率。

通过短路活塞来调节反应腔体内电流驻波的节点位置以改变辐射孔处的电场强度。对于流速为  $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$  的氦气,在  $36.9 \text{ mm}$  处产生相同体积的等离子体炬需要微波功率  $1 \text{ kW}$ ,在  $34.8 \text{ mm}$  处需要功率为  $7 \text{ kW}$ ,在  $38.8 \text{ mm}$  处需要功率为  $6 \text{ kW}$ 。可以得出:短路活塞位置对于辐射孔处的电场的分布影响特别敏感,在  $(36.9 \pm 2.0) \text{ mm}$  范围内,可以产生等离子体,在此范围外,在  $7 \text{ kW}$  功率内不能产生等离子体。这也验证了仿真的结果:半个传导波长处,辐射孔处电场最大。

在最优参数情况下,利用激光干涉法<sup>[8]</sup>对不同微波功率下的氦等离子体炬中心轴线上的电子密度进行了测量,气体流速为  $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,如图 7 所示。可以看出电子密度随着微波功率增加而增加,微波由  $1.0 \text{ kW}$  增加到  $3.6 \text{ kW}$ ,电子密度相应地从  $3.33 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  增加到  $6.67 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。说明输入微波能量也是影响辐射孔处电场分布的关键因素,同时决定着等离子体炬的电子密度。

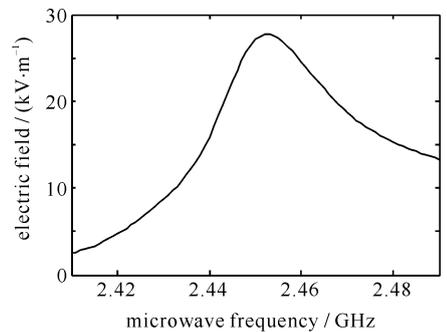


Fig. 5 Relationship between electric field and microwave frequency

图 5 电场随微波频率的变化

从实验结果可以看出:大小圆柱的旋入深度对辐射孔处电场分布的影响具有一定的规律;调谐装置到短路活塞的距离为二分之一波导波长的整数倍时,即电压驻波波节,电流驻波波峰处电场幅值最大且分布区域最大;微波功率对等离子体炬的形状和体积以及电子密度分布影响比较明显。

这套系统在实际应用中具有以下优势:运行效率高,生成的等离子体炬体积大;可以通过进气嘴提供工作气体,直线波导提供保护气体,形成具有特定用途的等离子体炬;形成的等离子体炬没有和气体喷嘴直接接触,避免了高温对喷嘴的烧灼,可以长时间稳定运行;形成的大气压等离子体炬,不需要低压或者密封装置,便于实际应用;可以得到大气压下的氮气和空气等离子体,减少了工作气体的成本。

## 4 结 论

本文基于BJ22 矩形波导成功地产生了大气压开放式稳定的(氩气、氦气、氮气和空气)微波等离子体炬,且体积比较大;通过实验验证了各个参数对电场分布的影响规律,并用激光干涉法对不同微波功率下的氩等离子体炬中心轴线上的电子密度进行了测量,验证了微波功率对等离子体炬参数的影响。该系统可以长时间高效率运行,成本低,经过简单的改装,可以用于杀菌、金属表面处理、制备功能材料、实现传统方法难以实现的化学反应,具有很大的潜在应用价值。

## 参考文献:

- [1] Al-Shamma'a A I, Wylie S R, Lucas J, et al. Atmospheric microwave plasma jet for material processing[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2002, **30**(5):1863-1871.
- [2] Wylie S R, Al-Shamma'a A I, Lucas J, et al. An atmospheric microwave plasma jet for ceramic material processing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **153/154**(10):288-293.
- [3] Shin D H, Bang C H, Kim J H, et al. Treatment of metal surface by atmospheric microwave plasma jet[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2006, **34**(4):1241-1246.
- [4] Uhm H S, Hong Y C, Shin D H. A microwave plasma torch and its applications[J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2006, **15**:26-34.
- [5] Sato T, Fujioka K, Ramasamy R, et al. Sterilization efficacy of a coaxial microwave plasma flow at atmospheric pressure[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2006, **42**(2):399-403.
- [6] Leins M, Schulz A, Walker M, et al. Development and characterization of an atmospheric-pressure microwave plasma torch[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2008, **36**(4):982-983.
- [7] Stonies R, Schermer S, Voges E, et al. A new small microwave plasma torch[J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2004, **13**:604-611.
- [8] Ma Zhiguo, Zou Xiaobing, Wang Xinxin, et al. Evolution of the electrically exploding wire observed with a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **94**:181501.

# Design and experiment of an atmospheric pressure microwave plasma torch

Zhang Qing, Zhang Guixin, Wang Liming, Wang Shumin

(Department of Electrical Engineering and Applied Electronic Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A low-cost and high-stability microwave plasma torch source based on BJ22 rectangular waveguide was developed, which is supplied by the  $(2.45 \pm 0.05)$  GHz frequency microwave source. The entire system consists of a 1~10 kW magnetron power supply, a circulator, a tuning section and a waveguide resonator. Atmospheric open microwave plasma was produced by the interaction of the work gas and the high electrical field, which was generated between the gas nozzle and the waveguide aperture by specific tuning structure. Several key factors were simulated to get the effect of key factors on electric field strength and then the microwave resonator was designed. A variety of gases were used to produce the plasma including argon, helium, nitrogen and air. In this paper, the basic characteristics of the plasma torch is investigated to verify the correctness of the design parameters and potential industrial applications is discussed.

**Key words:** microwave plasma torch; rectangular waveguide; atmospheric pressure; open-air operation

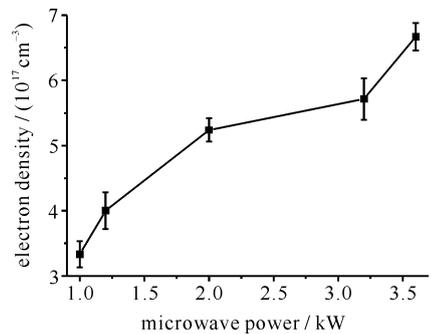


Fig. 7 Dependence of electron density on microwave power at the axial position

图 7 等离子体炬中心轴线上电子密度随微波功率的变化