

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

李文浩 褚向前 赵世奇 方应翠*
(合肥工业大学真空与过程装备系 合肥 230009)

Modification of Atmospheric Pressure Air Plasma Jet: A Simulation and Experimental Study

Li Wenhao, Chu Xiangqian, Zhao Shiqi, Fang Yingcui*
(Department of Vacuum and Process Equipment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract Atmospheric pressure air plasma jet (Air APPJ) was modified mainly by coating the shank of tungsten electrode with a dielectric layer to decrease the discharge voltage and increase the discharge stability. The plasma generation was mathematically modeled, numerically simulated with software COMSOL and experimentally evaluated. The influence of the electrode's geometry and alignment, including the exposed tip-apex curvature radius, shank diameter and electrode spacing, on the discharge behavior was investigated for design optimization. The simulated results show that the tip-apex radius has a major impact. The new air APPJ with the optimized tip geometry was tested. As shown in the measured results, the fairly stable APPJ had a diameter of 3 mm and a length of 17 mm. Moreover, the discharge behavior of the newly-designed air APPJ outperforms argon discharge properties, because of higher discharge power/temperature, longer/wider plasma jet and more suitable for application in active reactions.

Keywords Atmospheric pressure plasma, Plasma jet, Discharge characteristics, Numerical simulation

摘要 大气压空气等离子体射流(空气 APPJ)能够在开放的大气环境中产生高活性低温等离子体,在细菌灭活、材料表面处理和生物医学应用等方面有广泛应用前景,但是目前空气放电击穿电压高,放电稳定性较差,射流长度较短、径向尺寸小等限制了它的应用。为了降低放电电压及维持放电稳定性,本文在高压电极上包裹一层介质,设计出一种介质包覆的针-金属喷嘴结构的空气 APPJ 枪,利用 COMSOL 的静电场模块对枪体的电学特性进行仿真,研究针尖曲率半径、电极间距以及针电极直径等参数对电势和电场的空间分布的影响,发现针尖曲率半径对于场强最大值有较大影响。据此,选择合适的参数,设计并制备了枪体。该枪在交流驱动下能够稳定放电,APPJ 径向尺寸 3 mm 左右、长度达到 17 mm。分析了射流长度、功率和气体温度随气流流速的变化,并与氮气和氩气放电进行了比较,其放电参数与氮气基本相当,与氩气相比,放电功率大,温度高,但射流长且径向尺寸宽,更适合活性反应场合的应用。

关键词 大气压等离子体 等离子体射流 放电特性 数值模拟

中图分类号: TN136; O539 文献标识码: A doi: 10.1443922/j.cnki.cjovst.2019.05.11

大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)是近年来受到广泛重视的等离子体放电技术,它能够在开放空间中产生非平衡低温等离子体,装置结构简单,易于实现,能够对三维不规则形状的物体进行处理,这些特点使得 APPJ 在

表面处理、生物医学应用以及薄膜沉积等领域得到广泛应用^[1-7]。

产生大气压等离子体射流的工作气体通常为氩气、氮气等惰性气体,惰性气体的击穿电压低,能比较容易地产生长度较长、温度较低且具有一定活性

收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(NO. 11674081); 安徽省自然科学基金项目(NO. 1708085MA11)

* 联系人: E-mail: ycfang@hfut.edu.cn

的等离子体射流。近年来人们越来越多地利用氮气或空气产生 APPJ, 相比惰性气体而言, 利用氮气或空气产生等离子体射流的成本大大降低, 而且等离子体中富含多种活性粒子(NO 、 O_3 等), 利于杀菌和表面活化^[8-11]。已有文献报道了空气 APPJ 装置及其灭菌和薄膜沉积等应用^[12-15]。

相比惰性气体, 氮气和空气的击穿电压较高, 放电产生的等离子体温度偏高, 并且空气中含有电负性气体 O_2 , 少量的 O_2 能够吸附大量电子, 降低等离子体的电离度, 加大了放电难度。虽然空气 APPJ 装置的研制比较困难, 人们还是取得了一些研究成果。研究者最开始是利用微空心阴极结构来产生空气 APPJ^[16-18]。微空心阴极结构 APPJ 装置的电极部分由两个作为电极的金属薄片和夹在金属薄片之间的介质板组成, 并由一个直径为微米量级的小孔穿过金属片和绝缘介质, 形成微腔放电区。微空心阴极结构 APPJ 放电产生的热量较高, 通常需要增大工作气体的流速带走大部分热量以降低等离子体的气体温度, 但是流速过高时气体的电离程度和射流中活性粒子的浓度都会受到一定影响; 此外, 微空心阴极结构产生的射流径向尺寸较小, 一般不超过 1 mm。Yu 等^[19] 基于微空心阴极结构设计了一种能在空气和水中两种不同环境下工作的手持式空气等离子体枪, 该装置由 12 V 电池和升压电路供电, 在 100 L/h 的空气流量下, 能产生长 7 mm 的稳定空气 APPJ, 射流末端的气体温度约 330 K, 整个等离子体枪稳定运行下消耗功率为 46.43 W。此外, 该等离子体枪喷嘴直径为 0.5 mm, 使得射流径向尺寸很小。

Pei 等^[20] 研制出电池驱动、手持式、常温空气 APPJ 装置(称为等离子体手电, 其电极结构由 12 根尖端曲率半径约为 50 μm 的不锈钢针阵列组成), 该空气 APPJ 装置同样由 12 V 电池供电, 通过直流升压器将电压升至 10 kV。该装置能够产生温度 20 ~ 28 $^{\circ}\text{C}$ 的空气 APPJ, 等离子体消耗功率约为 60 mW, 且不需要外部电源和供气回路, 使得整个装置小巧、轻便。将等离子体手电应用于生物膜灭活实验, 取得了良好的效果。洪义等^[21] 提出一种交流电源驱动的注射器针-环结构空气 APPJ 装置, 在电压幅值 12 kV、频率 8 kHz、空气体积流量 0.24 L/min 下能够产生温度低至 300 ~ 320 K, 长 25 mm 的空气等离子体射流, 发射光谱中检测到 N_2^+ 、原子 N 和原子 O 等活性粒子, 但由于射流是从注射针中喷出,

因此其径向尺寸也较小(注射针内径为 1.2 mm)。

针-金属喷嘴结构得到研究者广泛关注, Walsh 和 Kong^[22] 基于针-金属喷嘴结构提出一种便携式空气 APPJ 装置, 该装置利用 12 V 电池供电, 高压针电极直径 3 mm, 针尖和喷嘴距离为 5 mm, 在 10 L/min 的空气流量下能产生长 2 cm 的 APPJ, 射流温度为 320 \pm 50 K。Xu 等^[23] 报道了另一种针-金属喷嘴结构的交流驱动便携式空气 APPJ 装置, 高压电极为直径 1 mm 的不锈钢针, 接地电极由内部呈锥形的黄铜制成, 该装置在全波击穿和半波击穿两种放电模式下分别可以产生 12 和 8 mm 的空气 APPJ, 射流气体温度为 40 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 但是该装置的喷嘴直径不超过 1 mm, 因此射流径向尺寸同样很小。

总的来说, 相比惰性气体而言, 目前对于空气等离子体射流的报道并不多, 并且现有文献报道的空气 APPJ 多存在径向尺寸较小的问题。究其原因, 可能主要是因为较小的尺寸下放电功率较小, 使得放电更稳定, 并且喷嘴尺寸小, 更容易获得较大的气体流速而带走放电产生的热量, 使得射流温度更低。但是较小的射流尺寸导致实际应用中处理面积小, 降低了处理效率。为了扩大处理面积, 也有研究者利用射流阵列产生空气 APPJ 并用于灭菌^[24], 但是射流阵列的加工制作更麻烦, 对加工精度要求较高, 阵列中射流单元之间的耦合机制也比较复杂, 相比之下单管射流的构造更简单, 加工更方便, 因此对于空气 APPJ 大部分研究者还是选择单管射流。本文在传统的针-金属型喷嘴结构的基础上设计出一种 APPJ 枪, 利用介质包覆钨针以限制其放电范围, 增强枪体工作稳定性, 利用高压交流电源驱动, 能够在 15 L/min 的空气体积流量下产生长 17 mm, 径向尺寸为 3 mm 左右的射流, 在单管空气等离子体射流尺寸中属于较大值。射流气体温度和前文提及的空气 APPJ 的温度相比偏高, 因此不适合直接作用于人体和活细胞, 但是可用于材料表面处理和灭菌, 其较大的尺寸能提高处理效率。

对于针-金属喷嘴结构, 其基本构型如图 1 所示, 对于几个关键电极参数的选取, 如针尖曲率半径 r 、针电极直径 D 、电极间距 d 和喷嘴直径 d_1 等, 本文通过软件仿真来确定。一般来说, 初始电场强度的最大值越大, 气体越容易击穿放电, 起始放电电压就会越低, 而较低的起始放电电压有利于降低放电功率和提高装置的安全性。因此, 在 COMSOL 软件中建立二维轴对称模型仿真这几个电极参数对于电场

强度最大值的影响,从而取最佳参数得到较大场强值,并将选择的参数值应用到 APPJ 枪中。

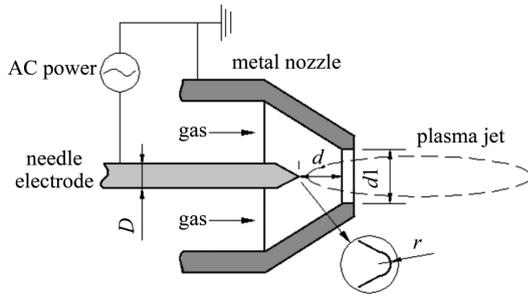


图1 针-金属喷嘴结构以及各参数的示意图

Fig.1 Schematic diagram of the needle-metal nozzle structure

1 APPJ 装置的静电场仿真

本文主要分析未击穿前的电势和电场分布。由于未击穿前没有建立电流通路,符合 COMSOL 中静电场模块的各项边界条件,因此可以利用 COMSOL 中的静电场模块对 APPJ 枪进行电学仿真,分析其电势和电场分布。仿真流程包括建模、设置材料属性、设定边界条件、划分网格、计算、结果处理等步骤。首先在 COMSOL 静电场模块中建立二维轴对称模型,如图2所示,包括钨针、石英管和不锈钢筒3个部分。其中,钨针尖端设置为半球形,其曲率半径在 0.1~0.25 mm 范围内变化。图2中枪体气流间隙 d_0 (石英管外壁和不锈钢筒内壁之间的距离) 约为 2 mm,该气流间隙的值主要通过查找文献来确定^[25-28]。建模之后对各部分施加材料,根据实际情况将电极材料设置为钨,石英管材料设置为石英玻璃,不锈钢筒材料为不锈钢。边界条件的设置主要有高压电极的电压和接地电极,其中钨针的电压设为 5 kV,10 kHz 的交流电,不锈钢筒设为接地,只仿真单个电压周期的变化情况,默认使用电压正半周的峰值点进行分析。

将 r 、 d 以及 D 和 d_1 的初始值分别取为 0.1、2、2 和 3 mm,得到未击穿时的电势和场强分布如图3所示,可以看到电场强度的最大值约为 3.29×10^5 V/cm,位于针尖处,这种针-金属喷嘴结构使得强电场集中于曲率半径很小的针尖附近,能够有效降低气体击穿电压。当两极间电压接近气体击穿电压时,有小部分气体首先在针尖处被击穿,类似于电晕放电,该过程可以为后续的射流放电提供种子电子。进一步增大电压,气体在高压电极和接地电极之间被击穿形成等离子体,在气流和电场的作用下形成等离子体射流。

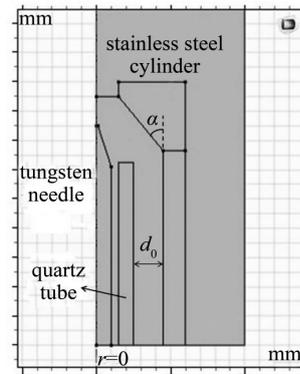


图2 枪体电极结构的二维轴对称模型,其中角 α 为不锈钢筒的锥角 d_0 为气流间隙

Fig.2 Simulation model

对于针-金属喷嘴结构 r 、 d 以及 D 和 d_1 等参数都会对枪体的电学特性产生影响,下面分别改变这4种因素分析场强最大值 E_0 的变化情况。

1.1 改变针尖曲率半径 r

当保持 d 、 D 和 d_1 分别为 2、2 和 3 mm 不变,改变针尖曲率半径 r ,场强最大值 E_0 的变化情况如图4(a)所示,可以看到随着 r 增大 E_0 明显下降,半径从 0.1 mm 增大到 0.25 mm 时,最大场强从 3.29×10^5 V/cm 下降到 1.72×10^5 V/cm,下降了 47.7%。因此将 r 取为 0.1 mm,从而得到最大的场强值。

1.2 改变电极间距 d

保持 r 、 D 和 d_1 分别为 0.1、2 和 3 mm 不变,改变 d 得到最大场强的变化情况如图4(b)所示,当 d 从 1.5 增大到 5 mm 时, E_0 从 3.39×10^5 V/cm 下降至 2.95×10^5 V/cm,只下降 13%,可见 d 的改变对于电极间场强的影响并不大。间距为 1.5 mm 时, E_0 达到最大值,但是 d 为 1.5 mm 时高压电极和接地电极之间的距离太小,针尖在放电过程中容易被烧蚀。2 mm 的间距下 E_0 较大,且结合实验发现针尖不会轻易被烧蚀,因此 2 mm 的电极间距最为合适。 d 增大时, E_0 变化范围很小,射流的起始放电电压也不会有明显改变。

1.3 改变电极直径 D

保持 r 、 d 和 d_1 分别为 0.1、2 和 3 mm 不变,改变 D 得到场强的变化情况如图5(a)所示,随着 D 由 1 增大到 3 mm, E_0 从 3.64×10^5 V/cm 减小到 2.95×10^5 V/cm,下降了 19%。电极直径增大时,电极尖端的锥角也增大,使得最大场强值有所下降。考虑到 1 mm 电极直径较小,产生等离子体的体积也较

小, 以及钨针更易弯曲变形使其与不锈钢筒之间的同轴度难以保证, 因此选择 D 为 2 mm。

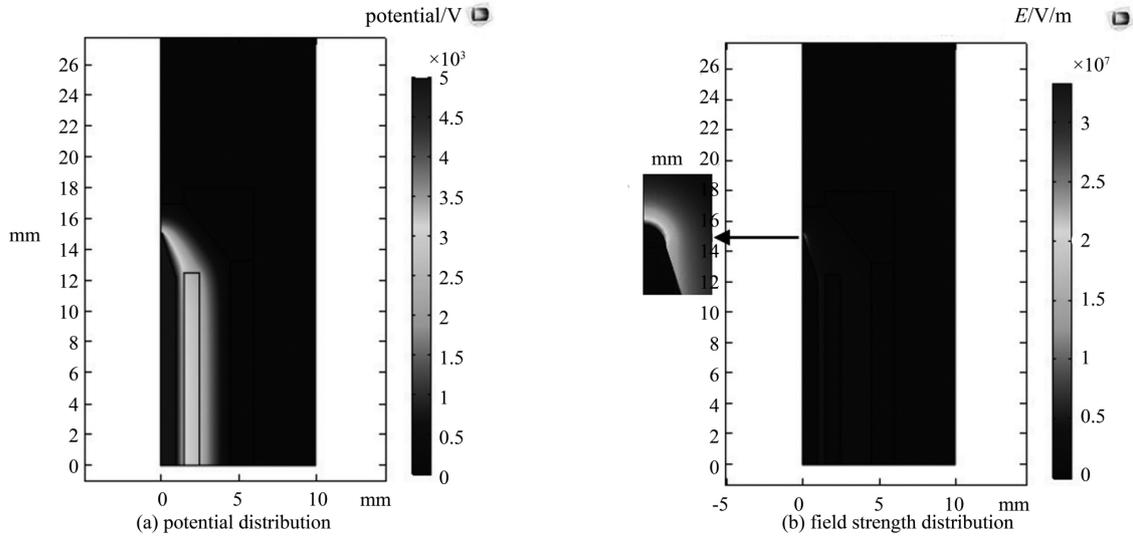


图 3 未击穿前电势和场强分布云图, 插图为针尖处场强分布的放大图

Fig. 3 2D distributions of the potential and field strength in the APPJ gun and a blowup of field strength around the tip apex before the gas breakdown

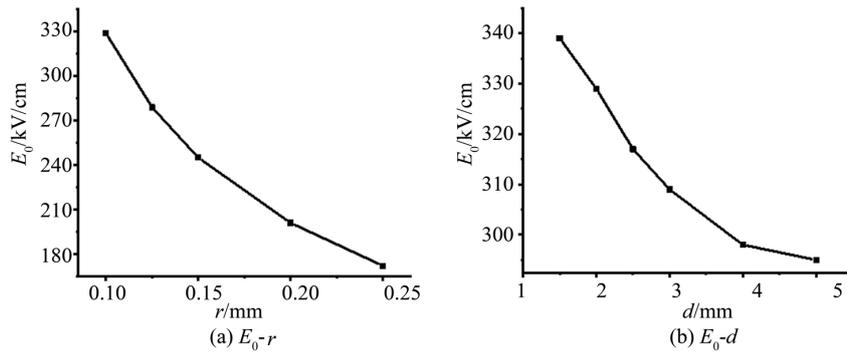


图 4 最大场强随曲率半径和电极间距的变化曲线

Fig. 4 Impact of the tip radius and electrode-spacing on the highest field strength

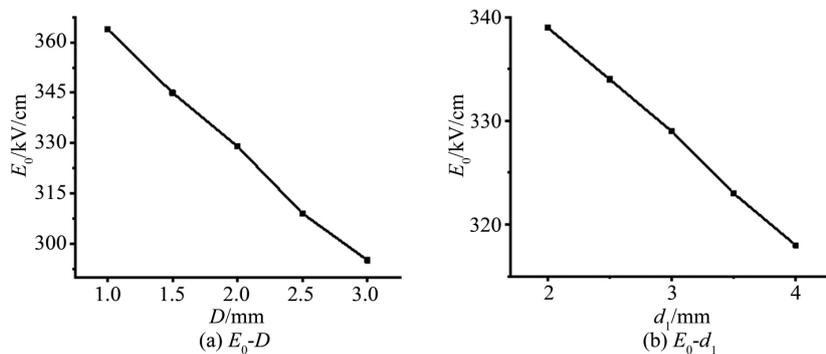


图 5 最大场强随电极直径和喷嘴直径的变化曲线

Fig. 5 Influence of the electrode shank diameter and nozzle diameter on the maximal field strength

1.4 改变喷口直径 d_1

保持 r 、 d 和 D 分别为 0.1、2 和 2 mm 不变, 改变 d_1 得到 E_0 的变化情况如图 5(b) 所示。需要指出的是, 改变 d_1 时气流间隙保持为 2 mm 不变, 因此, 不锈钢筒的锥角 α (见图 2) 随着 d_1 的增大而减小。随着 d_1 由 2 mm 增大到 4 mm E_0 从 3.39×10^5 V/cm 减小到 3.18×10^5 V/cm, 下降了 6.2%, 可见喷口直径的改变, 在实验范围内, 对于最大场强的影响很小。若取 d_1 为 4 mm, 则得到的 APPJ 尺寸应该更大, 但此时要想在喷口处得到和 $d_1 = 3$ mm 时一样的气体流速, 则需要更大的进气流量, 否则气流的冷却效应就会减弱, 射流气体温度会更高, 所以综合看来选 $d_1 = 3$ mm 较适合。

比较以上 4 个参数, 可发现在实验数据范围内针尖曲率半径对于最大场强的值影响最大, 而喷口直径对电场的影响最小。因此, 在放电之前最好要将针尖打磨得比较尖锐, 能够很好地降低气体击穿电压, 即起始放电电压。改变电极间距, 起始放电电压不会有明显改变。而电极直径主要通过改变针尖的锥角影响电场强度。喷口直径的改变对场强最大值影响很小, 但是根据 $Q = v \cdot S$ 可得, 相同进气流速下, 不同喷口直径导致气体体积流量不同 (其中 Q 为体积流量, v 是流速, S 为喷口截面积), 射流长度和气流速度分布也会随之改变, 因此喷口直径的改变会对气流流场的分布造成影响。

通过以上仿真工作, 将 4 个电极参数 r 、 d 、 D 和 d_1 分别确定为 0.1、2、2 和 3 mm, 即保持前文所取的初始值不变。后续对于装置的改进而言, 在实际选择电极参数时, 也应该充分考虑各方面因素, 选择合适的参数得到最优化的结果。

2 实验装置及测量方法

结合上述仿真结果, 本文设计的 APPJ 枪的结构示意图如图 6 所示, 由钨针、石英管、不锈钢筒、聚四氟乙烯帽几个部分组成。高压电极为直径 2 mm 的钨针, 不锈钢筒接地, 同时作为 APPJ 枪的接地电极和喷嘴, 其外径和厚度分别为 14 和 2.5 mm。钨针和石英管位于不锈钢筒的轴线上, 石英管将钨针包裹, 仅露出放电尖端, 其主要作用为将放电区域限制在钨针尖端附近的区域, 使得放电能量集中于针尖附近的区域和喷嘴之间, 而钨针的其他部分基本上不参与放电, 这种结构将介质包覆和尖端放电有效结合起来, 能够降低放电功率, 使得放电更稳定。

钨针尖端和喷嘴的间距 (轴向距离) 约为 2 mm, 喷嘴直径为 3 mm。枪体气流通道的为一个整体, 直接用不锈钢棒加工而成。进气口与主管之间为 45° 夹角, 相比其他装置的 90° 夹角, 气流对内石英管的冲击力减小, 气流流动过程中受到的阻力也减小。气流间隙为 2 mm, 与仿真模型的气流间隙保持一致。

所用实验装置如图 7 所示, 由高频高压交流电源 (配合调压器使用)、APPJ 发生装置和工作气体等几个部分组成。驱动电源采用电压幅值和频率分别为 0 ~ 12 kV, 17 ~ 25 kHz 范围内可调的高频高压交流电源。工作气体的纯度均为 99.999%, 气体体积流量由流量计测得, 等离子体射流的气体温度和射流长度分别由水银温度计和直尺测得。所测得的温度为靠近射流尾部的气体温度, 长度为处于喷嘴外的射流长度。放电的发光图像通过置于与装置平行侧面的数码相机 Canon 500D 拍摄得到, 相机曝光时间为 0.02 s。为了减小误差, 每组实验数据均测量三次以上, 最终结果为所得数据的平均值。

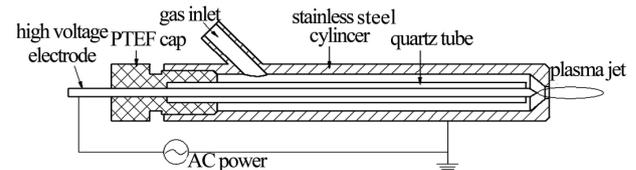


图 6 APPJ 枪体结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the structure of APPJ gun

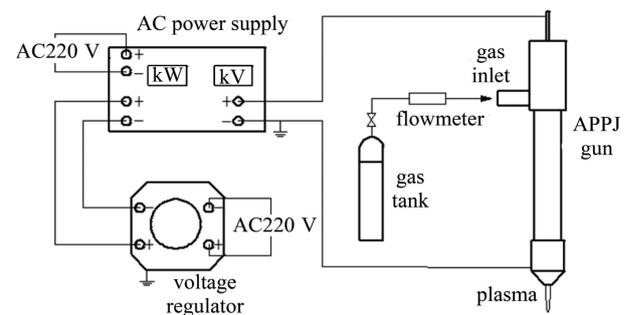


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic representation of the experimental setup

3 实验结果及讨论

利用图 7 中枪体, 分别以空气、氮气和氩气产生 APPJ。实验中固定电源频率为 18 ~ 20 kHz, 缓慢增大调压器的输出电压, 直到工作气体在电极间隙被击穿, 在喷嘴外出现等离子体射流。此时控制调压器的输出电压不变, 改变进气流速, 射流的放电电压

和功率变化都比较小,由此可见放电比较稳定,即形成了稳定的等离子体射流。

图 8 为三种射流的典型发光图像,可以看到空气和 N_2 射流长度相差不多, Ar 射流长度则较小。氮气射流的中心区域较亮,外层为淡紫色;空气射流为亮白色,射流体相比 N_2 射流更粗,而 Ar 射流可以分为两部分,一部分是靠近喷嘴的锥形,为亮白色,另一部分为锥形前方的一束较细的射流,为紫色。当气流量为 15 L/min 左右时,三种射流的长度分别为 17 mm(空气,放电功率 40 W)、19 mm(N_2 , 38

W) 和 13 mm(Ar, 12 W)。对于空气和 N_2 射流,在不同进气流量下(实验数据范围内),当放电功率变化范围较小时,射流长度基本上保持不变,因此可以推测射流长度主要与放电功率有关。当空气体积流量为 15 L/min 时,射流长度为 17 mm,相比其他文献中报道的空气等离子体射流更长^[19-23]。相比介质阻挡放电氩气 APPJ^[29-30],该装置利用 Ar 产生的射流长度较短,而空气和 N_2 产生的射流长度则较长,表明这种针-金属喷嘴结构可能更适用于 N_2 和空气放电。

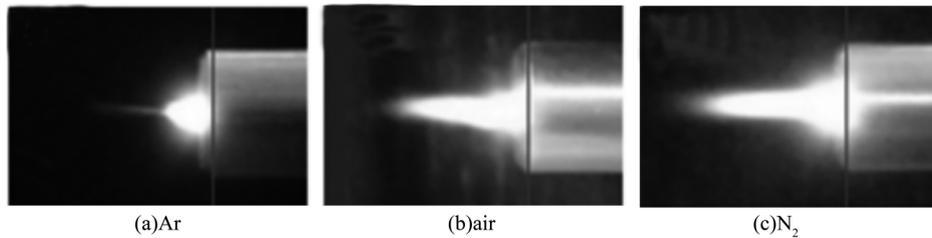


图 8 三种气体放电的典型发光图像

Fig. 8 Photos of the argon, air and nitrogen discharges

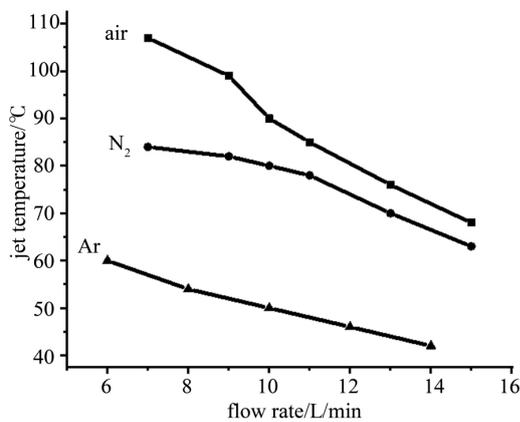


图 9 三种气体射流温度随进气体积流量变化曲线

Fig. 9 Effect of the gas flow rate on the jet temperature

图 9 为三种射流温度随进气体积流量的变化情况,总体上看,射流温度都随着气体流速的增大而显著减小,可见增大气体流速是降低等离子体气体温度的有效方法。当气体流速较小时,空气射流温度明显高于 N_2 射流温度;当流速达到 10 L/min 时,二者温度差距明显减小;当流速达到 11 L/min 及以上,二者温度差距保持一个相对恒定的值,约为 5~7°C。Ar 射流的气体温度则基本上处于 40~60°C 的范围内,与介质阻挡放电产生的 Ar 射流温度相比差

别不大^[28-31]。三种射流最低温度分别为 68°C(空气, 15 L/min)、63°C(N_2 , 15 L/min) 和 42°C(Ar, 14 L/min),为典型的低温等离子体。当 Ar 和 N_2 气流量分别为 14 L/min(放电功率 12 W) 和 15 L/min(放电功率 34 W) 时,射流温度分别为 47°C 和 63°C,手指可以与射流安全接触,没有电击感和明显的灼热感,如图 10 所示。

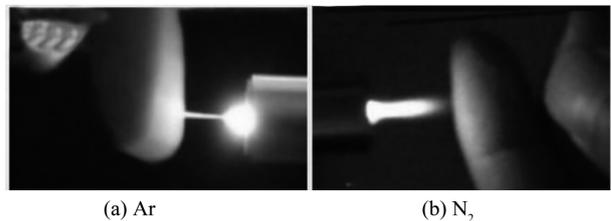


图 10 射流与手指接触的照片

Fig. 10 Photo of the argon and nitrogen plasma jets and a human finger

当形成稳定的等离子体射流之后,改变工作气流量,APPJ 的放电电压和功率的平均值如表 1 所示,可以看到空气和氮气射流的放电电压和功率相差较小,而 Ar 射流的放电电压和功率远低于空气和 N_2 射流。三种气体的击穿电压不同,较高的击穿电

压使得放电功率较高,而放电功率高直接导致等离子体射流的气体温度高。等离子体的产生和电离区域主要位于针尖和喷嘴之间的电场中,电场线不需要像介质阻挡放电(DBD)那样穿过一层介质,因此这种结构相对于DBD而言可以产生更强的电场,能够击穿难以电离的气体(N_2 、空气等)产生APPJ。喷嘴的锥形内壁较光滑,针尖与喷嘴内壁之间的电场分布均匀,使得射流放电比较稳定。

对于Ar射流,如图11所示,当气流量 ≥ 10 L/min时,射流有两部分,分别为喷嘴附近的类似锥体部分和锥体前方一束细长的射流;当气流量 ≤ 8 L/min时,射流明显缩短,只有喷嘴附近有锥体射流,锥体前方的细长射流消失。温度测量显示,细长

射流和喷嘴附近锥体射流的温度相差不大,因此这束细长射流有可能是气流量较大时,随着气流裹挟被吹出来的等离子体。当气流量减小时,气流无法将等离子体带出锥体部分,因此细长射流消失。

表1 稳定放电情况下的平均放电电压和功率

Tab. 1 Average discharge voltage and power under stable discharge conditions

气体	空气	氮气	氩气
流速变化/L·min ⁻¹	7~15	7~15	6~14
电压/kV	2.41	2.33	0.60
功率/W	54	38	9.5

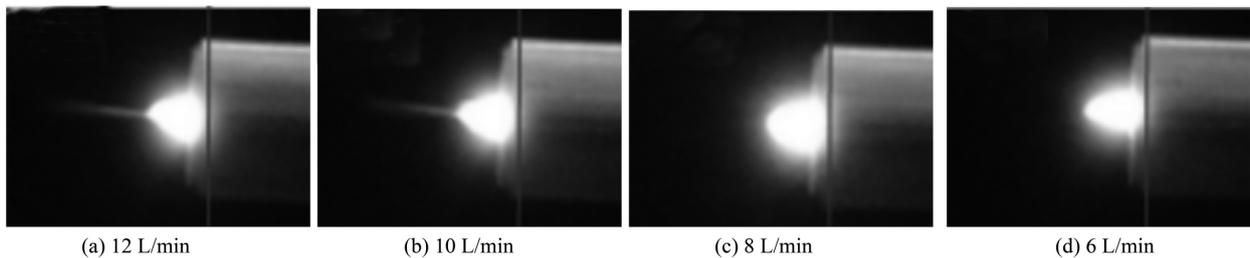


图11 Ar射流随气流量的变化情况

Fig. 11 Dependence of the Ar-jet on the gas flow rate

4 结论

本文通过自行设计和制造的介质包覆型针-金属喷嘴结构的APPJ枪在交流电源驱动下分别利用空气、 N_2 和Ar成功产生了APPJ,并且初步解决了空气等离子体射流径向尺寸较小的问题。首先利用COMSOL的静电场模块对枪体的电学特性进行仿真,得到电势和电场的空间分布,改变针尖曲率半径、电极间距以及针电极直径等参数得到场强最大值的变化情况,发现针尖曲率半径对于场强最大值有较大影响,并选择最佳参数应用到APPJ枪的制备中。产生的空气APPJ在平均功率54 W下具有17 mm的射流长度和68℃的气体温度,该温度对于生物医学应用来说可能偏高,但是对于材料表面处理和微生物灭活,比如二氧化钛膜的亲水性恢复以及大肠杆菌的灭活等,射流中丰富的活性粒子能发挥重要作用。此外,较大的射流尺寸可以提高处理效率,并且较长的长度有利于处理一些沟槽类问题。由此可见,所制备的空气APPJ枪具有较优异的性能,后续会将其用于实际应用中以观察处理效果。

参考文献

- [1] Onyshchenko I, Geyter N D, Morent R. Improvement of the Plasma Treatment Effect on PET with a Newly Designed Atmospheric Pressure Plasma Jet [J]. *Plasma Processes & Polymers* 2017, 11(5): 403–417
- [2] Dimitrakellis P, Gogolides E. Hydrophobic and Superhydrophobic Surfaces Fabricated Using Atmospheric Pressure Cold Plasma Technology: A Review [J]. *Advances in Colloid & Interface Science* 2018, 254: 1–21
- [3] Cheng K Y, Chang C H, Yang Y W, et al. Enhancement of Cell Growth on Honeycomb-Structured Polylactide Surface Using Atmospheric-Pressure Plasma Jet Modification [J]. *Applied Surface Science* 2017, 394: 534–542
- [4] 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
- [5] Schmidt A, Rödder K, Hasse S, et al. Redox-Regulation of Activator Protein 1 Family Members in Blood Cancer Cell Lines Exposed to Cold Physical Plasma-Treated Medium [J]. *Plasma Processes & Polymers* 2016, 13(12): 1–10
- [6] Kuo Y L, Chang K H, Chiu C, et al. Carbon-Free SiO_x Ul-

- trathin Film Using Atmospheric Pressure Plasma Jet for Enhancing the Corrosion Resistance of Magnesium Alloys [J]. *Vacuum* 2017 ,146: 8 – 10
- [7] Stallard C P ,Solar P ,Biederman H ,et al. Deposition of Non-Fouling PEO-Like Coatings Using a Low Temperature Atmospheric Pressure Plasma Jet [J]. *Plasma Processes & Polymers* 2016 ,13(2) : 241 – 252
- [8] Xiao D ,Cheng C ,Lan Y ,et al. Effects of Atmospheric-Pressure Nonthermal Nitrogen and Air Plasma on Bacteria Inactivation [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* , 2016 ,44(11) : 2699 – 2707
- [9] Liu X ,Chen F ,Huang S ,et al. Characteristic and Application Study of Cold Atmospheric-Pressure Nitrogen Plasma Jet [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* ,2015 ,43(6) : 1959 – 1968
- [10] Liu W ,Ma C ,Yang X ,et al. A Study of the Glow Discharge Plasma Jet of the Novel Hamburger-Electrode [J]. *Physics of Plasmas* 2016 ,23(8) :083516
- [11] Naidis G V ,Sosnin E A ,Panarin V A ,et al. Dynamics and Structure of Nonthermal Atmospheric-Pressure Air Plasma Jets: Experiment and Simulation [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2016 ,44(12) : 3249 – 3253.
- [12] Li X ,Bao W ,Jia P ,et al. A Brush-Shaped air Plasma Jet Operated in Glow Discharge Mode at Atmospheric Pressure [J]. *Journal of Applied Physics* ,2014 ,116(2) : 023302
- [13] Ouf S A ,Eladly A A ,Mohamed A A H. Inhibitory Effect of Silver Nanoparticles Mediated by Atmospheric Pressure air Cold Plasma Jet Against Dermatophyte Fungi [J]. *Journal of Medical Microbiology* ,2015 ,64(10) : 1151 – 1161
- [14] Yang Y ,Guo J ,Zhou X ,et al. A Novel Cold Atmospheric Pressure Air Plasma Jet for Peri-Implantitis Treatment: An in Vitro Study [J]. *Dental Materials Journal* 2017 ,37(1) : 157 – 166
- [15] Salem D B ,Carton O ,Fakhouri H ,et al. Deposition of Water Stable Plasma Polymerized Acrylic Acid/MBA Organic Coatings by Atmospheric Pressure Air Plasma Jet [J]. *Plasma Processes & Polymers* 2014 ,11(3) : 269 – 278
- [16] Kolb J F ,Mohamed A A H ,Price R O ,et al. Cold Atmospheric Pressure Air Plasma Jet for Medical Applications [J]. *Applied Physics Letters* ,2008 ,92(24) : 241501
- [17] Yong C H ,Han S U. Air Plasma Jet with Hollow Electrodes at Atmospheric Pressure [J]. *Physics of Plasmas* , 2007 ,14(5) : 013903
- [18] Hao X ,Mattson A M ,Edelblute C M ,et al. Nitric Oxide Generation with an Air Operated Non-Thermal Plasma Jet and Associated Microbial Inactivation Mechanisms [J]. *Plasma Processes & Polymers* 2015 ,11(11) : 1044 – 1056
- [19] Yu S ,Wang K ,Zuo S ,et al. A Handheld Low Temperature Atmospheric Pressure Air Plasma Gun for Nanomaterial Synthesis in Liquid Phase [J]. *Physics of Plasmas* , 2015 ,22(10) : 103522
- [20] Pei X ,Lu X ,Liu J ,et al. Inactivation of a 25.5 μm Enterococcus Faecalis Biofilm by a Room-Temperature , Battery-Operated ,Handheld Air Plasma Jet [J]. *Journal of Physics D Applied Physics* 2012 ,45(16) : 165205
- [21] Hong Y ,Pan J ,Lu N ,et al. Low Temperature Air Plasma Jet Generated by Syringe Needle-Ring Electrodes Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure [J]. *Thin Solid Films* 2013 ,548(12) : 470 – 474
- [22] Walsh J L ,Kong M G. Portable Nanosecond Pulsed Air Plasma Jet [J]. *Applied Physics Letters* ,2011 ,99(8) : 081501
- [23] Xu N ,Cui X ,Fang Z ,et al. A Two-Mode Portable Atmospheric Pressure Air Plasma Jet Device for Biomedical Applications [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* , 2018 ,46(4) : 947 – 953
- [24] Zhang X ,Liu D ,Song Y ,et al. Atmospheric-Pressure Air Microplasma Jets in Aqueous Media for the Inactivation of Pseudomonas Fluorescens Cells [J]. *Physics of Plasmas* 2013 ,20(5) : 053501
- [25] Deng X L ,Nikiforov A Y ,Vanraes P ,et al. Direct Current Plasma Jet at Atmospheric Pressure Operating in Nitrogen and Air [J]. *Journal of Applied Physics* ,2013 , 113(2) : 023305
- [26] Liu K ,Hu H ,Lei J ,et al. Comparison of Pulsating DC and DC Power Air-Water Plasma Jet: A Method to Decrease Plume Temperature and Increase ROS [J]. *Physics of Plasmas* 2016 ,23(12) : 123510
- [27] Lu X P ,Jiang Z H ,Xiong Q ,et al. A Single Electrode Room-Temperature Plasma Jet Device for Biomedical Applications [J]. *Applied Physics Letters* ,2008 ,92(15) : 151504
- [28] Ilik E ,Akan T. Optical Properties of the Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet Generated by Alternative Current (a. c.) Power Supply [J]. *Physics of Plasmas* , 2016 ,23(5) : 053501
- [29] Divya D G ,Joshi N K ,Pal D K ,et al. A Low Power Miniaturized Dielectric Barrier Discharge Based Atmospheric Pressure Plasma Jet [J]. *Review of Scientific Instruments* 2017 ,88(1) : 013505

- [30] 方志,刘源,蔡玲玲.大气压氩等离子体射流的放电特性[J].高电压技术 2012,38(7):1613-1622
- [31] Judée F,Merbahi N,Wattiaux G,et al. Analysis of Ar Plasma Jets Induced by Single and Double Dielectric Barrier Discharges at Atmospheric Pressure [J]. Journal of Applied Physics 2016,120(11):123-741