

空气放电特性参数间相关性分析

张信华^{1,2,3}, 贺 华³, 蔡小红², 常志东⁴, 吴 桐²

(1. 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213032; 2. 苏州恩奇医疗器械有限公司, 江苏 苏州 215011;
3. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071; 4. 嘉兴恩奇医疗器械有限公司, 浙江 嘉兴 314022)

摘要:通过对同轴圆筒结构在非平衡状态下进行放电实验研究,并对实验数据进行线性拟合分析,探究常温空气放电过程中各特性参数之间的联系。实验发现,在电压满足阈值条件时,频率变化是直接影响等离子射流的主要因素,频率改变会引起射流长度相应的变化。频率的连续变化过程中,因电场驻波的影响存在突变点;而射流温度与频率变化虽受驻波影响,存在极值跳变,但射流长度与射流温度基本成对应关系;在满足阈值条件下,射流温度与电压之间呈线性增长关系;气体流速小于 1 L/min 时,流速变化对射流温度影响较大;当流速在 1~4 L/min 时,射流温度随气流速度变化较小。

关键词:空气放电;大气压等离子体;射流;特性参数;关联性

中图分类号:O53;N34 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)04-0234-06

等离子射流作为一种新兴的等离子体放电技术,近年来受到广大科研学者热切关注并进行了深入研究,其发展速度之快,技术类型之多,在凝聚态物理学领域尤为突出;就等离子体放电技术而言,如辉光放电、电晕放电、介质阻挡放电、射频低温等离子体放电、射流低温等离子体放电等,应用于不同领域,取得了长足的进步,其中最为热门的属于低温等离子医学方面的研究^[1-3]和工业等离子体技术等^[4-6]。

在这些应用中,同轴型电晕放电因其结构简单且容易加工等特点,应用广泛。它利用电极间电场极其不均匀的特征,直接在大气压下产生等离子体射流^[7],广泛应用在杀菌消毒^[8-9]、材料处理^[10-11]、静电除尘等方面^[12-13]。利用同轴圆筒结构中非平衡条件下,电晕放电产生的等离子体从筒口喷出,向外界环境做定向运动,形成等离子射流^[14]。这种结构在很大程度上克服了平行板型耦合放电装置在表面处理的局限性^[15-16],使其应用更加广泛。

随着大量科研团队在等离子射流技术领域的研究和探索,越来越多的理论与微观现象被深入挖掘。这些研究中,国内外大多数科研学者利用稀有气体(如氦气)作为等离子产生的气体^[17-18],进而研究放电

的机理;而对于利用空气放电,不少科研工作者也进行了探索,从微观的角度对空气放电中电子运输参数进行了详细分析与计算^[16-24],然而很少有学者对低温空气等离子体射流技术相关宏观物理特性参数与微观参量之间的联系进行探讨,也鲜有相关总结及可用于工业产业化的经验指导见诸报道。

本文利用同轴圆筒结构进行放电实验,针对其中的射流长度与频率、射流温度与频率、射流温度与电压、气体流速与射流温度之间的关系进行了较为全面实验测试。从宏观上总结出相关线性关系,结合微观上提出存在机理,解释相关变量间的物理联系。这可为相关科研工作者在开发和应用等离子技术上,提供良好的经验指导和参考。

1 实验装置

射流放电发生器装置如图 1(a)所示,该装置采用同轴圆筒结构。图 1(b)是手持式成品外观图,是本次实验装置的整体外形,其携带方便,便于实验测试。

射流装置工作机理:在高频高压脉冲电场作用下,通过引入一定流速空气,由于快速变化电场引起电子雪崩效应,在两个电极之间空气会被击穿而

收稿日期:2020-11-24

基金项目:姑苏创新创业领军人才专项(ZXL2018192)。

作者简介:张信华(1981—),男,浙江余姚人,常州工学院光电工程学院,讲师,博士,研究方向为表面等离子体与量子态的控制;贺华(1971—),女,陕西西安人,西安电子科技大学机电工程学院,副教授,硕士,研究方向为信息管理;蔡小红(1996—),男,贵州遵义人,苏州恩奇医疗器械有限公司,研发工程师,研究方向为电子工程;常志东(1984—),男,陕西西安人,嘉兴恩奇医疗器械有限公司,研发工程师,研究方向为电子工程;吴桐(1996—),男,江苏苏州人,苏州恩奇医疗器械有限公司,研发工程师,研究方向为电子与通信。

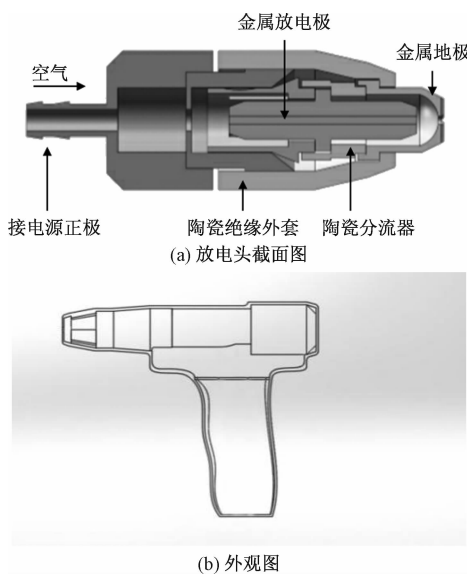


图 1 射流装置

放电,在气流带动下产生稳定的等离子射流。相对于业界当前普遍以稀有气体产生等离子射流技术手段,该装置直接利用发生器内空气放电产生低温等离子体射流,避免了稀有气体资源浪费,实现了环保等离子体技术方案。特别需要指出的是,通过调节放电特性参数,本装置可以很好地控制电晕放电过程中臭氧的产生($<1\%$),这在当前业界是一个相当大的改进。相关机理探索不在本文赘述。

图 2 是本次实验研究等离子射流图,测试过程中几乎不产生臭氧,在暗室条件下等离子射流明显,放电效果良好。该发生器几何参数如图 3、图 4 所示。

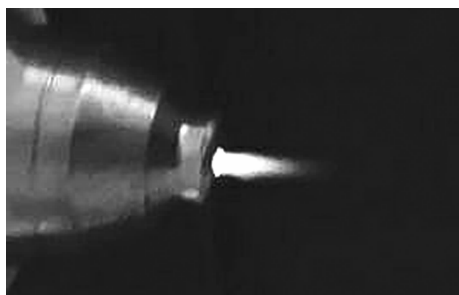


图 2 等离子射流图

图 3、图 4 分别是放电装置的放电金属头和金属地极。其中放电金属头为 TC80 紫铜材质。陶瓷绝缘外套如图 1(a)中所示,长 33 mm,前端内径 13 mm,后端内径 19 mm。金属地极采用 LGK-63 型号康铜(镍合金,由 55%铜和 45%镍合成,具有不易随温度变化而改变其性质,且电阻率高)。陶瓷

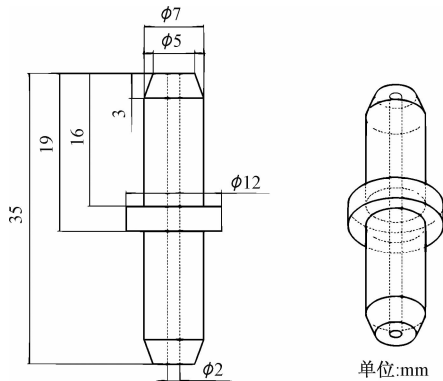


图 3 等离子放电金属头

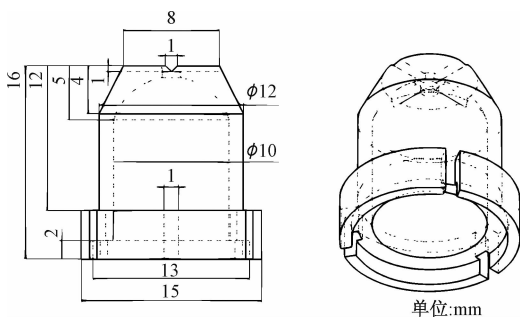


图 4 等离子发生器金属地极

流器为 60A 型。

2 参数分析

2.1 射流长度与频率之间关系分析

在电压足够高的条件下(达到放电阈值电压),放电频率反映了整个等离子体激发所在空间电磁场交变次数快慢,即传递能量到粒子上的快慢,是单位时间内产生离子数量的决定性因素。通过调研发现,放电频率和等离子射流的关系很少有人深入研究。本实验测试中,通过数次重复实验发现,频率是影响射流长度与射流温度最直接原因,它们之间存在必然联系。具体实验数据(以其中一组为例)如图 5 所示。

大气压下,同轴圆筒结构在非平衡条件下的电晕放电中,实验外加频率按照递增方式变化,测试电压固定为 12 V(按输入输出比,放电电压 720 V),流速固定为 3.5 L/min。等离子射流长度变化如图 5 所示。

由等离子体产生的条件判据可知^[24],外加电场频率增加时,单位时间内,空气放电电场交变次数加快,粒子间碰撞阻尼频率增大,导致等离子体振荡难以维持,从而使射流长度受影响而变短。当固定放电频率不变时,则实际观察到电晕放电中的射

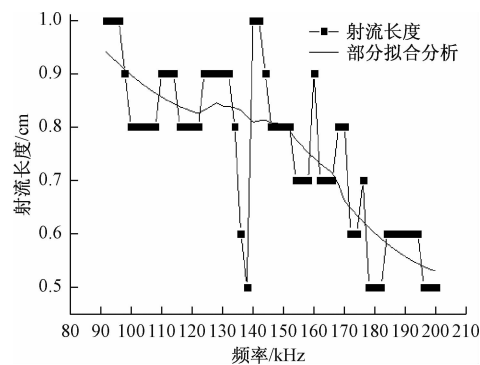


图 5 频率与射流长度的关系

流长度无明显变化,可见,频率是影响非平衡条件下该类型结构等离子体发生器放电的直接因素。

由图 5 可知,当频率接近 140 kHz 时,出现一组反差较大数据,而该频率所对应的射流长度偏差很小。推测这是由于激发空气使之电离产生等离子体的高频脉冲电压在两级之间形成电场,由于各种粒子的运动模式差异产生的波形复杂,导致声波、电磁波以及它们的混杂波与反射波之间形成驻波。这些电磁波在波形上会形成波腹,即图中最低点,从而出现等离子体射流湮灭致使无法观测到射流产生。这种影响在同轴型等离子体空气放电过程中重复出现,后续相关实验数据从不同角度验证了该现象。

按照上述放电频率在等离子体中反映的现象,当电磁场在没有驻波影响条件下(理想条件),射流长度与放电频率之间应该呈线性增长关系,而图 5 中如不考虑波腹点,却表现为线性减小的关系。这是由于当增大频率 f 时,空间电磁场交变加快导致等离子体间的碰撞频率 ν_c 加快。而等离子体产生振荡维持的频率 f_p 必须满足^[25]

$$f_p > \nu_c \tag{1}$$

这个条件表示,电子不可能通过与中性粒子碰撞来耗散振荡能量以使等离子体振荡能维持,其中 ν_c 为碰撞阻尼频率,表示维持电荷分离的因素。如果不满足式(1),电子与中性粒子碰撞频繁,则等离子体运动几乎是由普通流体力学的所支配,而不是电磁力支配。实验结果很好地证明,当增大外加频率 f ,电子与中性粒子之间碰撞频率增加,碰撞阻尼频率大于等离子体维持振荡的频率 f_p 。此时等离子体发生器表现为射流长度减小,如图 5 所示,实验结果与之吻合^[24]。

驻波是频率相同、传输方向相反的两列波沿传输线形成的一种分布状态,其中一个波通常是另一

个波的反射波^[25-26]。这种波无法传播能量,像一个停驻波,称为驻波。由两列波引起振动同相,相互加强的点称为波腹;两列波引起振动反相,相互抵消的点称为节点。而在电磁场中,驻波中波腹相当于在波导当中传播的模式,在一定程度上会影响电场中粒子的电离强度。这在本实验的其余测试中均体现了这一影响^[27]。

2.2 射流温度与频率之间关系分析

等离子射流温度是等离子研究中的重要参数。在浓密的等离子体内,温度升高导致粒子间热运动明显,粒子间平均距离减小,碰撞迅速增加,静电相互作用明显,等离子体各成分之间建立了热力学平衡,此时可以用热力学温度统一表征。在非平衡状态下,等离子温度是一个不确切状态参量,各类粒子有自身温度数值,因此各离子成分用其对应的能量单位分别来描述,电子伏特(eV)的换算关系为^[24] $1\text{ eV}=kT, 1\text{ eV}=1.602\times 10^{-19}\text{ J}$,玻尔兹曼常数值 $k=1.380\times 10^{-23}\text{ J/K}$,1 eV 相当于 116 00 K(开尔文温度)。

其中射流温度是因变量,当电压和工作气体气压一定时,频率变化在整个空气放电中占据主要影响因素。改变射流频率,测得射流温度变化,如图 6(a)所示。

图 6(b)表示将数据进行部分线性拟合后射流温度随频率变化的关系图。通过和图 5 比较,发现射流长度与射流温度基本成对应关系,即当射流因频率的原因变短时,其在宏观空间的温度也随之降低;反之亦然。这与 2.1 节中提到的观点一致。宏观温度实际上是电离强度的体现,当一定频率的电磁场激发工作气体时,其存在一定的模式(波腹、波节),反映到对空气的电离强度和离子浓度的综合作用,宏观上以等离子体射流的温度体现出来。如在 135~140 kHz,不少电场模式处于波节状态,使得电场对空气的电离处于一个相对较小的值,从而影响电离程度,使得所激发的等离子体射流温度变低;而在 160 kHz 附近,多数电场模式处于波腹状态,导致空气被电离的程度大大加强,宏观上体现为等离子体的温度上升,且射流长度增长。而在 200 kHz 点处,推测是因为外加电场频率已经超过碰撞阻尼频率,从而导致射流长度变短但实际离子能量由于更加剧烈的电磁作用变得更高。

2.3 射流温度与电压之间关系分析

温度是反映射流的重要参数^[28]。对于不同结构的等离子射流设备放电区间所对应放电电压有

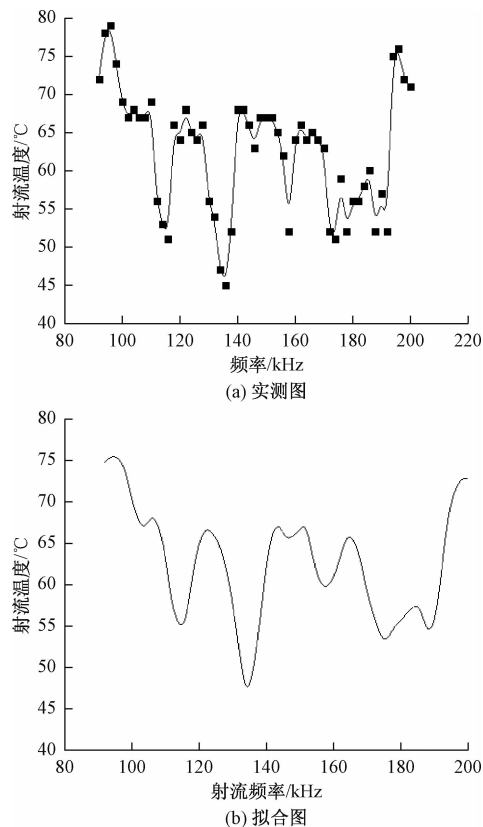


图6 射流温度随频率变化关系图

所差异。实验测试中保持一定频率(70.7 kHz)不变,气体流速为 1 L/min。测量射流温度距离为 20 mm(测量温度仪器为 TM-902C 便携式数字测温仪),改变电场电压大小,测得射流温度随电压变化,如图 7 所示。

由图 7 可知,在一定放电频率范围内,大气压下非平衡等离子放电射流温度与电压之间呈线性增长关系。增大电压即增加腔体之间电场强度,等离子获得更多能量,浓度增加,宏观上表现为等离子体发光强度更强,射流温度变化上升^[28]。

2.4 气体流速与射流温度关系分析

除电压与射流温度的关系之外,进一步探讨气体流速与射流温度关系。这些实验数据是在频率一定、电压一定且射流正常的情况下进行测定的,通过改变气流流速,测量射流温度变化,输入电压固定为 12 V,输出电压为 720 V,频率稳定输出为 70.7 kHz,具体数据如图 8 所示。

由图 8 可知,在等离子射流正常放电区间范围内,在标准大气压下,推测气流流速增大加快了粒子间的碰撞次数,等离子体浓度增大,射流温度随之升高。当气体流速超过 1 L/min 时,腔体内气压减小,分子数密度越小,造成等离子体间的碰撞次数

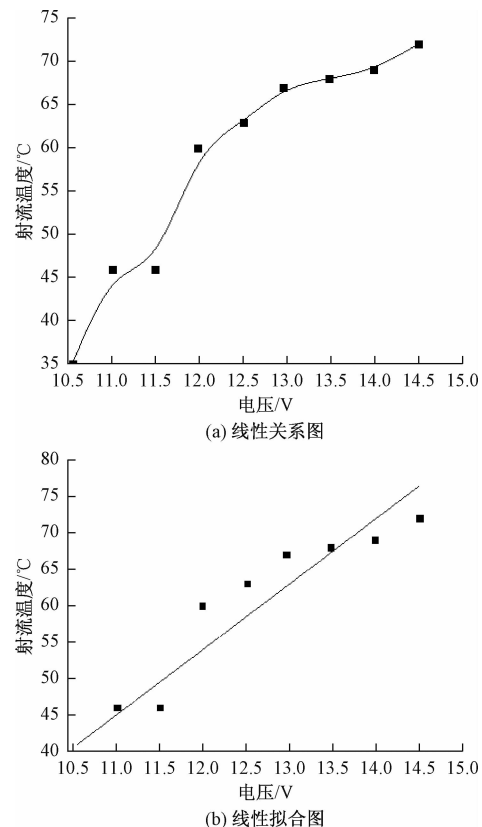


图7 电压与射流温度的关系

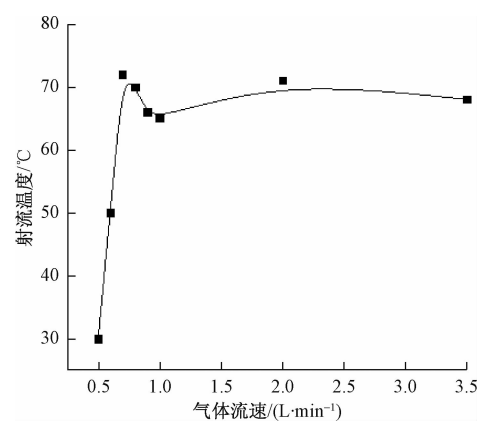


图8 射流温度随气体流速变化图

减弱,宏观上体现射流温度稍稍减小,最终在一个阈值区间摆动。测试中,等离子射流长度从宏观上测量,几乎不变。

实际上,前人实验研究表明,射流长度变化与气体流速大小存在关系^[29-30]。从气体流动层流、过渡态和湍流 3 个阶段分析^[29]。当流动处于层流阶段时,随着流速增加,径向速度与摩尔分数分量相对逐渐减小,射流长度变长。当流动处于湍流时,径向空气速度与摩尔分数分量陡然上升,流动趋于不稳定状态,导致射流长度变短^[24]。气体流速在

0.5~1.0 L/min 阶段,本实验中放电结构决定了层流占主导;而在气体流速超过 1.0 L/min 后,放电结构中湍流的影响上升,致使层流和湍流基本维持在一定的比例,从而表现为射流长短基本保持不变的现象。

由等离子放电理论中气体分子密度 N 与压强 P 、温度 T 之间关系为^[24]

$$P = NKT \quad (2)$$

分子或原子之间单位长度上的碰撞次数可用平均自由程 $\bar{\lambda}$ 倒数表示^[21],所以每秒钟碰撞频率为 $\nu = \bar{v}/\bar{\lambda}$ 。本实验测试时吹入的空气看作理想气体,利用同种气体中平均自由程结果将式(1)换算为

$$\frac{\bar{v}}{v} = \frac{KT}{4\sqrt{2}\pi r^2 P} \quad (3)$$

式中, r 为同种气体中的粒子半径。

当气体流速过快,式(3)中左边结果变小,等离子体所处环境压强变小,则式(3)右边温度应该升高,宏观上表现为开始一段时间射流温度随气体流速加快而升高。然而图中后半段却出现了下降并最后保持在一定范围内抖动曲线图,原因和粒子迁移率有关。因粒子间发生大量碰撞时,带电粒子平均漂移速度与气体浓度、电场强度有关,而带电粒子的运动状态用单位强度电场作用下的飘逸速度来表征(即迁移率)。

在电场作用下,带电粒子所受到的力可以表示为^[24]

$$F = eE = m \frac{dV_d}{dt} \quad (4)$$

$$V_d = \int \frac{eE}{m} dt \quad (5)$$

式中: e 为电荷量为 e 的电荷; E 为电场强度; m 为电荷质量; V_d 表示真空中离子速度,而粒子的迁移率 μ 是该速度与电场强度的比值,即

$$\mu = \frac{V_d}{E} \quad (6)$$

由于带电粒子与周围各种粒子发生碰撞,导致方向改变的同时损失了粒子能量,当气流速度越大,粒子间存在大量碰撞,损失大量能量。而气流达到湍流阶段时不稳定,导致射流温度先下降。由于湍流阶段压强相对变小,故射流温度先下降后保持在一定范围波动^[30],这与气体3个阶段分析^[30]论述所得结论一致。

3 结论

实验采用同轴圆筒型结构,探究在大气压下非平衡等离子放电特性参数之间的相关性,得到以下

结论:

1)射流长度相对于频率成反比增长线性关系,其中因为电磁波驻波影响,在波形变化上会表现为出现一到两个波腹,导致出现偏差较大数据点。在放电阈值电压范围内,射流长度随频率增大而减小。

2)射流温度与频率变化曲线由于驻波中波腹和波节的影响,存在极值跳变,宏观上的数据显示有偏差。但射流长度与射流温度基本成对应关系,即当射流因频率的原因变短时,其在宏观空间的温度也随之降低;反之亦然。

3)等离子射流温度与电压之间呈线性增长关系,宏观上表现为射流温度随电压增大而升高,微观上体现出电压增加导致粒子间平均动能变大,表现为射流温度升高。射流长度与电流之间也类似呈线性增长关系,原因是电流与电压之间符合伏安特性变化规律。

4)在一个标准大气压以内,气体流速对射流温度影响较大,呈线性增长关系。当气体流速大于 1 L/min 时,射流温度在一定区间范围上下波动,宏观上影响不大。而当气体流速在 1 L/min 内,射流长度几乎不变。

参考文献

- [1] 熊紫兰,卢新培,邹长林,等. 大气压低温等离子体射流及其生物医学应用[J]. 科技导报,2010,28(15):97-105.
- [2] 王厦. 纳秒脉冲放电等离子体及其皮肤医学应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [3] 高文旭,戴庞鹏,倪维元,等. 大气压低温空气刷型微等离子体在生物医学应用[J]. 低温物理学报,2016,38(2):117-121.
- [4] 陈江,刘建阳,章旭明. 非热等离子体净化挥发性有机废气研究进展[J]. 科技广场,2012(2):94-98.
- [5] 赵阳,朱锦鹏,郝振华,等. 感应等离子体球化热喷涂粉体材料研究进展[J]. 表面技术,2020,49(5):81-90.
- [6] 董红英,陈晓东,贾朋伟,等. 放电等离子技术连接铬酸钼陶瓷[J]. 稀有金属材料与工程,2020,49(2):634-638.
- [7] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社,1988.
- [8] 沈瑾,王佳奇,张茜,等. 低温等离子体活化水消毒相关性研究[J]. 中国消毒学杂志,2017,34(4):300-302.
- [9] 倪盈,陈永昌,王明连,等. 低温等离子体杀菌的实验研究[J]. 环境工程学报,2009,3(11):1951-1955.
- [10] VIVET L, BENOIT B, FALZON M F, et al. XPS, ToF SIMS and wettability analyses on Ni surfaces after Ar-H₂ RF plasma treatment: An efficient and optimized plasma treatment approach[J]. Surface and Coatings Technology, 2020,398:126094.
- [11] BARANOV O, BAZAKA K, KERSTEN H, et al. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for

- plasma flux management in material treatment and nano-synthesis[J]. *Applied Physics Reviews*, 2017(4):041302.
- [12] 郭威. 大气压下电晕放电发射光谱及放电应用的研究[D]. 保定:河北大学,2014.
- [13] 安徽工业大学. 一种等离子体粉尘荷电及静电除尘一体装置:CN201711349791.9[P]. 2018-06-01.
- [14] 杨欢,刘汝兵. 等离子体射流及其发生器研究进展[J]. *机电技术*, 2013(5):147—148.
- [15] NOH J H, HONG K B, NOH I, et al. Surface modification of polytetrafluoroethylene using atmospheric pressure plasma jet for medical application[J]. *Surface and Coating Technology*, 2007, 201(9/10):5097—5101.
- [16] WAISHJ L, KONG M G. Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(11):111501.
- [17] 侯世英, 罗书豪, 孙韬, 等. 大气压放电氩气等离子体射流特性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(4):1207-1213.
- [18] WANG S, LIU D X, WANG Z F, et al. Interfacial current distribution between helium plasma jet and water solution [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29(6):065007.
- [19] 刘兴华, 何为, 杨帆, 等. 空气放电中电子输运参数的计算与分析[J]. *高电压技术*, 2011, 37(7):1614—1619.
- [20] 李克林. 湿度和气压对直流电晕放电模式转换的影响研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
- [21] 刘兴华. 基于流体—化学反应混合模型的空气放电机理及特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [22] WAIDEN W O, WEI H, SMITH B W, et al. Microsecond-pulse glow discharge atomic emission[J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 1996, 355:442—446.
- [23] WAGATSUMA K. Characteristics of the transient signal from pulsed glow discharge plasma for atomic emission analysis[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2020, 55(1):76—86.
- [24] 武占成, 张希军, 胡有志. 气体放电[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [25] 蔡妍, 苏波, 李雯玥, 等. 单管及双管驻波特性的探究[J]. *科技创新与应用*, 2020(12):79—81.
- [26] MELDE F. Akustische Experiment aluntersuchungen[J]. *Annalen Der Physik*, 1884, 257:452—470.
- [27] BLACKSTOCK D T. Fundamentals of Physical Acoustics [M]. New York:Wiley,2000.
- [28] 骆阔彦. 大气压低温等离子体射流放电特性的仿真和实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [29] 邵先军, 张冠军, 詹江杨, 等. 气体流速对大气压氩气等离子体射流影响的实验与仿真[J]. *高电压技术*, 2011, 37(6):1499—1504.
- [30] 李作召, 张大伟. 气体流速对等离子体射流长度的影响[J]. *成组技术与生产现代化*, 2016, 33(1):60—62.

Correlation Analysis of Characteristic Parameters in Air Discharge

ZHANG Xin-hua^{1,2,3}, HE Hua³, CAI Xiao-hong², CHANG Zhi-dong⁴, WU Tong²

(1. School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu 213032, China;
2. Suzhou A G Medical Equipment Co., Ltd., Suzhou Jiangsu 215011, China; 3. School of Mechchano-Electronic Engineering,
Xi Dian University, Xi'an 710071, China; 4. Jiaxing A G Medical Equipment Co., Ltd., Jiaxing Zhejiang 314022, China)

Abstract: Through the discharge experiment of coaxial cylinder structure under non-equilibrium state, and the linear fitting analysis of the experimental data, the relationship between various characteristic parameters in the process of normal temperature air discharge is explored. The results show that the variation of frequency is the main factor directly affecting the plasma jet when discharge threshold voltage is satisfied. Adjusting the frequency leads to the change of jet length. Attributed to the standing waves of the electric field, there exists mutation point of the plasma jet length. Although the relation between jet temperature and frequency is affected by the standing waves even leading to some mutation point, however the jet temperature and the jet length exists good linear relation. Also, experimental result demonstrates a linear relation between jet temperature and discharge voltage when threshold is met. When the gas flow rate is within 1 L/min, the variation of flow rate has a great influence on the jet temperature; While the flow rate is between 1 L/min to 4 L/min, it has less impact on jet temperature.

Key words: air discharge; atmospheric pressure plasma; plasma jet; characteristic parameters; correlation