

纳秒脉冲火花放电等离子体发射光谱特性研究

李威¹, 王志新¹, 史莉²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
2. 上海纳杰电气成套有限公司, 上海 201111)

摘要: 等离子体合成射流控制作为一种新型的主动流场控制技术, 具有激励器结构简单、响应快、无运动部件、工作频带宽、喷射强度高等优点, 已为业界所关注。因此, 有必要研究纳秒脉冲火花放电等离子体发射光谱特性, 该研究涉及电压激励参数和环境气压, 包括电压极性及幅值、重复频率、单个脉冲前沿时间及脉宽等。利用光谱图谱线的拟合计算得到各种条件下电子的温度, 获得放电过程中电子温度的变化规律。理论计算与实验结果表明, 负极性、高幅值、20 ~ 1000 Hz 重复频率、快前沿、窄脉宽电压波形能够产生微观上电子温度较高的等离子体合成射流; 气压在 50 ~ 60 kPa 时, 需要适当改变电压激励参数以维持电子温度的稳定, 从而维持合成射流喷射的稳定。

关键词: 等离子体发射光谱; 电压激励参数; 环境气压; 电子温度

中图分类号: O657.3; TP602 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2016)11-0029-08

1 引言

等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系, 广泛存在于宇宙中, 常被视为物质的第四态, 被称为等离子态, 或者“超气态”, 也称“电浆体”^[1]。在纳秒脉冲高幅值电压作用下, 激励器内发生火花放电, 迅速加热腔内气体, 气体急剧升温膨胀, 腔内气体压强迅速升高, 气体在出口处高速喷出, 形成高速高能合成射流。喷射出的合成射流能够广泛应用于工业、生物医学和航空航天等领域。已经成为目前研究的热点和焦点^[2-8]。

随着航空领域中亚音速和超音速飞行器的应用越来越广泛, 普通飞行器已经无法满足高速下飞行平稳的要求。解决这一问题的两个思路是采用改良翼型和采用流动控制技术。作为流动控制技术发展的核心问题之一, 流动控制激励器的设计水平和性能直接决定了流动控制技术的应用方向和应用效果。近年来, 等离子体激励器以其结构简单、响应迅速、工作频带宽、适应多工况等优点正受到越来越多的关注, 极有可能成为流动控制技术的新突破^[6]。等离子体流场控制是一种新型的主动流场

控制技术, 其利用等离子体在电磁场力的作用下运动和气体放电引起温度压力变化的特性, 具有响应迅速、激励频带宽、无运动部件等优势, 可以显著地提升飞行器和发动机的气动性能。

本文以纳秒脉冲火花放电等离子体发射光谱为研究对象, 考虑了电压激励参数和环境气压这两大因素的影响, 电压激励参数方面的研究包括电压极性、电压幅值、重复频率、单个脉冲前沿时间及脉宽这四个因素; 然后利用光谱图进行谱线的拟合计算得到各种条件下的电子温度; 最后结合放电过程中电子温度的变化规律, 深入了解纳秒脉冲等离子体火花放电时腔体内的温度信息, 为优化合成射流性能, 提高能量利用率提供数据基础。

2 实验平台

如图 1 所示, 实验平台主要由重复频率纳秒脉冲发生器、激励器、低气压实验舱和光谱测量系统组成。等离子体激励电压由重复频率纳秒脉冲发生器提供, 在激励器上产生火花放电, 通过对低气压实验舱抽气使舱内气压降低, 电学测量系统记录脉冲电压波形和脉冲电流波形, 光学测量系统记录测得的

收稿日期: 2016-03-18
基金项目: 上海市教育发展基金项目(2015LM11)、上海市闵行区产学研合作计划项目(2014MH103)
作者简介: 李威(1993-), 男, 江苏籍, 硕士研究生, 主要从事高电压技术和智能电网方面的研究;
王志新(1964-), 男, 上海籍, 研究员, 博导, 主要从事风力发电和光伏发电方面的研究。

发射光谱。

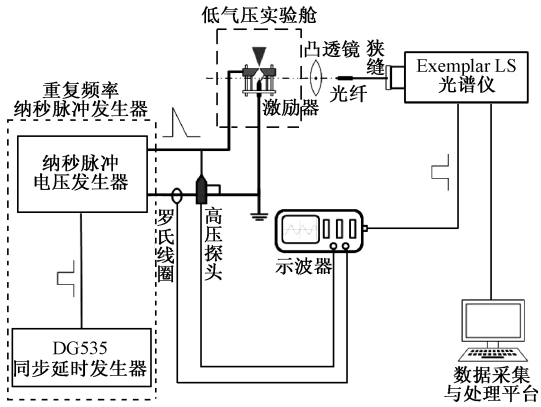


图1 实验平台的原理图

Fig.1 Schematic of experimental platform

2.1 重复频率纳秒脉冲发生器

重复频率纳秒脉冲发生器电压上升率高,持续
时间短,有利于产生大面积稳定的等离子体。重复
频率纳秒脉冲电压发生器主要由软启动充电模块、
初级储能模块、IGBT 及其控制驱动电路、可饱和脉
冲变压器和磁开关脉冲压缩回路等部分组成^[9,10]。
系统结构的拓扑示意图如图 2 所示。

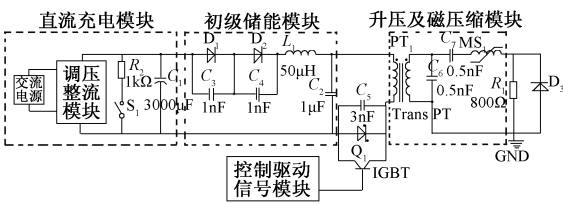


图2 重复频率纳秒脉冲电压发生器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of nanosecond pulse and
repetition frequency voltage generator

系统的工作原理为:交流电压经软启动充电模
块整流后得到约 310V 的稳定直流电压,该电压经
过串联谐振充电过程对初级储能脉冲电容器 C_2 充
电,并在 LC 谐振过程中经钳位倍压过程在可饱和
脉冲变压器原边形成直流压降。IGBT 在控制及驱
动模块控制下导通,使得冲击电容 C_2 通过可饱和脉
冲变压器的原边放电并在副边感应出脉冲高压。脉
冲高压对次级储能电容器 C_6 和 C_7 充电,经过参数
匹配,在 C_5 充满电后使得脉冲变压器磁心刚好饱
和,变压器副边电感急剧减小,电容 C_4 两端电压迅
速翻转,实现再次对脉冲电压的加倍升压。加倍叠
加的脉冲电压使得磁开关饱和,由于磁开关的压缩
和陡化作用,最终在负载电阻上形成纳秒级的脉冲
电压,通过增加二级磁开关可以产生前沿更短、脉宽

更窄的纳秒脉冲电压,二级磁压缩回路如图 3 所示。
因为负载上形成的脉冲电压是双极性脉冲,使用高
压二极管消去反向电压即可得到预期的单极性纳秒
脉冲电压。

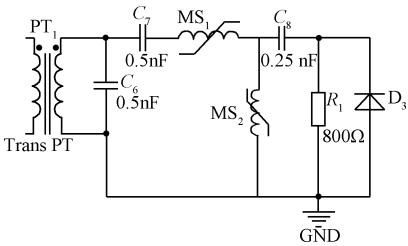


图3 增加二级磁开关后的升压及磁压缩模块

Fig.3 Boost and magnetic compression module after
adding secondary magnetic switch

输出的电压范围为 0 ~ 30kV,频率范围为 0 ~
2kHz。慢前沿脉冲的上升前沿为 128ns,半高宽为
220ns,快前沿脉冲的上升前沿为 34ns,半高宽为 70ns。

2.2 合成射流激励器结构

实验采用的合成射流激励器结构为带有封闭腔
体和喷射孔的针板电极,电极材料为不锈钢,结构示
意图如图 4 所示。其中板电极中央开孔直径为
0.5mm,为减少射流出口转角对喷射气流的阻碍,喷
射口道设计为锥形,顶角为 90°,板电极厚度为
2mm,喉道下直径为 4.5mm。针电极尖端曲率半径
为 0.5mm,间隙距离通过螺纹调节。放电腔体由内
径 4mm、外径 10mm 的石英玻璃管制成,板电极和底
座之间用尼龙拉杆进行固定。

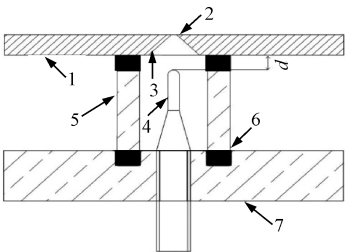


图4 激励器结构示意图

Fig.4 Structure diagram of actuator

2.3 低气压实验舱

低气压实验舱的主体是圆柱体,在圆柱的镜像
方向分别安装四个圆形观察窗,主体圆柱高度为
330mm,外径为 400mm,内径为 320mm,壁厚为
3mm。观察窗外径为 215mm,内径为 159mm。为了
能够观察到放电现象和拍摄到光谱,在前后观察窗

上安装有厚度为 5mm 的透明石英玻璃视窗, 在左右观察窗上安装有气密性 BNC 电缆接头, 用于引出电流信号。由于激励器放置在实验舱内并进行密封, 为了使激励器能在合适高度便于拍摄光谱, 在舱内加入一个直径为 100mm 的升降平台。主体圆柱上盖中间须加不锈钢电极来引入电压, 并加有机玻璃套管用于绝缘。

2.4 电学参数测量系统

电学参数包括调压器的输入电压、纳秒脉冲的电压波形、回路中的电流波形。调压器的输入电压直接由量程为 250V 的交流电压表测量。纳秒脉冲的电压波形即施加在间隙两端的电压波形, 采用型号为 Tektronix P6015A 的高压探头测得, 探头的频带宽度为 75MHz, 分压比为 1000:1, 最高测量电压为 40kV。回路中的电流波形由 Person 罗氏线圈测得, 频带宽度上限为 100MHz, 伏安比为 1V/A, 连线时通过电缆头穿过观察窗, 并经过电缆和 10:1 的衰减器连接到高性能示波器上。

2.5 光谱参数测量系统

采用低杂散光全息光路微型 CCD 光谱仪 Exemplar LS 进行拍摄。该装置的光谱测量范围为 180 ~ 1100nm, 光谱分辨率能达到 0.1nm, 触发方式为外触发。

3 实验结果

实验中固定尖板电极间隙距离为 4mm, 对比标准组为: 标准大气压下, “负尖正板”接法, DG535 同步延时发生器的重复频率为 1kHz, 纳秒脉冲电压发生器未加二级磁开关, 产生的波形为慢前沿、宽脉宽的电压波形, 调压器输入电压统一为 180V (即输出电压峰值为 25.5kV)。

3.1 电压极性的影响

通过改变电压的极性, 得到正负极性下电压电流波形, 利用软件调节拍摄时间 (即积分时间) 为 1ms, 拍摄到正负极性下光谱如图 5 所示。

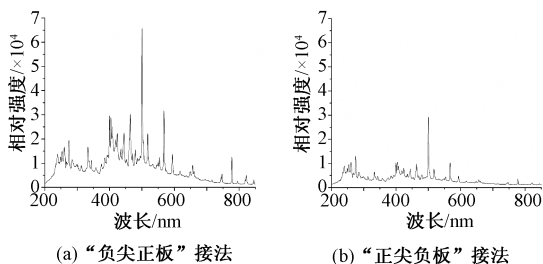


图 5 正负极性下拍摄到的光谱图

Fig. 5 Spectrum taken when electrode is positive/negative

等离子体发射光谱在负极性下的相对光强明显比正极性下强。由参考波形可知, 两种接法下放电电压电流波形的形态基本一致, 都是在上升沿击穿后发生阻尼振荡, 原因是整个回路存在等效电容和导线电感。但是两者的击穿电压略有差别, 在负极性下, 击穿电压为 18.1kV, 正极性下, 击穿电压为 17.6kV。原因可以解释为极不均匀场下空气放电的“极性效应”, 即由于空间电荷畸变的影响, 在尖板构成的不均匀不对称电场中, 正尖负板的火花放电电压小于负尖正板的火花放电电压。

3.2 电压幅值的影响

通过改变调压器的输入电压来改变输出电压幅值, 在一次实验中进行缓慢、匀速升压, 可以得到等离子体发射光谱随电压幅值的变化, 如图 6 所示。

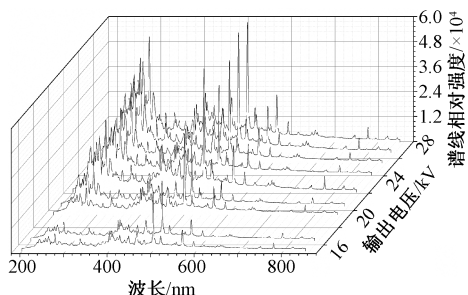


图 6 发射光谱随电压幅值的变化图

Fig. 6 Variation diagram of emission spectrum when voltage changes

所得光谱图均在一次实验中记录, 所得的谱线相对强度可以进行比较。可以看出, 在紫外波段 (波长 200 ~ 400nm 范围内), 谱线相对强度增加明显, 在波长为 500nm 左右的谱线相对强度有所增加。随着输出电压幅值增加, 产生的火花放电沉积能量增加, 相应的光谱谱线的相对强度也增加。而紫外波段主要是 Fe 的谱线, 随着电压幅值的增加, 放电电流增加, 对电极的加热作用增强, 电极烧蚀增强, 等离子体中铁蒸气含量增加, 所以 Fe 的谱线相对强度增加明显。

3.3 电压重复频率的影响

通过改变 DG535 的参数来改变重复频率, 为了方便又具有区分度, 选取 8 个频率 (10Hz、20Hz、50Hz、100Hz、200Hz、500Hz、1kHz 和 2kHz) 分别进行光谱的拍摄。

等离子体发射光谱随电压重复频率的变化如图 7 所示, 可以看出:

(1) 实验得到的发射光谱随电压重复频率变化

的分散性较大,这与等离子体火花放电的放电形态有关。因为激励器板电极中间存在喷射孔,所以火花放电的击穿点在喷射孔周围一圈的任意位置,这就给确定光纤探头的位置带来了困难,而且频率越高,分散性越大。

(2)在 1kHz 及以下光谱图中的紫外波段较弱,2kHz 光谱的紫外波段相对强度较大。对此现象的解释如下:重复频率为 2kHz 时,单次放电的平均功率大,对电极的烧蚀更严重,等离子体中铁蒸气含量高,谱线的相对强度高。

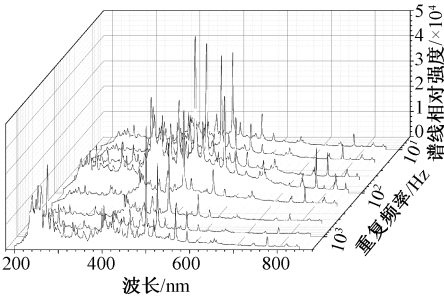


图 7 等离子体发射光谱随电压重复频率的变化图
Fig. 7 Variation diagram of emission spectrum when repetition frequency changes

3.4 脉冲前沿和脉宽的影响

通过增加一个 6 匝的二级磁开关,并联一个 0.25nF 的电容,能够产生上升前沿为 34ns、半高宽为 70ns 的快前沿、窄脉宽的脉冲波形。施加慢前沿和快前沿的脉冲电压,拍摄到的光谱如 8 图所示。

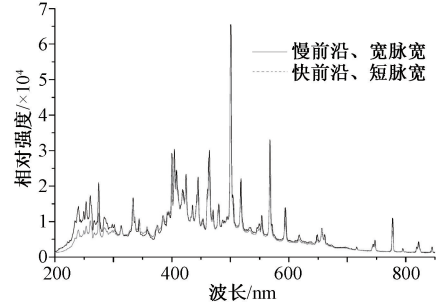


图 8 施加慢前沿和快前沿的脉冲电压拍摄到的光谱图
Fig. 8 Spectrum taken when leading edge time is slow/fast

由图 8 可知,分别施加快、慢前沿脉冲电压,得到的光谱形态相似,不同处集中在紫外波段,施加慢前沿、宽脉冲电压得到的发射光谱在 200 ~ 300nm 的相对强度较大,这是因为在慢前沿、宽脉冲电压的作用下,电极由于电加热作用时间较长,造成的电极烧蚀也较严重,所以发射光谱中紫外波段相对谱线强度大。

3.5 环境气压的影响

纳秒脉冲等离子体合成射流在航空航天领域的主要应用是在大气层中的流场控制,而大气层又分为对流层、平流层、中间层、电离层和外层。因为对流层以上空气密度很小,对于飞行器的扰动可以忽略,所以飞行器在大气层遇到的气流扰动也主要集中在对流层。

为此,设计了一个低气压实验舱,其结构和尺寸已在 2.3 节叙述。实验过程中,通过真空泵和电子气压计配合来提供低气压环境。具体操作中先用真空泵对低气压实验舱抽气到 10kPa,再通过气阀放气调节气压。实验中发现,在气压很低时,整个间隙发生的是辉光放电,放电形态会随着气压的变化而变化。

通过气阀来改变气压,拍摄等离子体发射光谱随气压的变化图像,如图 9 所示。

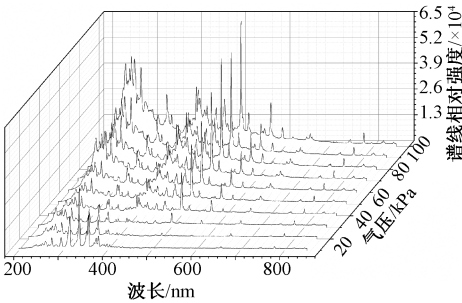


图 9 等离子体发射光谱随环境气压的变化图
Fig. 9 Variation diagram of emission spectrum when barometric pressure changes

在气压为 10kPa 时,拍摄到紫外波段的光谱左右不对称,为分子光谱。所以,在低气压条件下,放电光谱谱线主要以分子谱为主,观测到的分子谱主要以氮分子的第二正带系 $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ 的谱线为主。随着气压升高,离子谱和原子谱及连续谱逐渐增强。

4 电子温度计算

为了计算得到电子温度和电子密度,需要确定分立谱线的元素和电离态。由于谱线具有一定展宽,不同谱线中心波长相距较近时,谱线会发生叠加,使得所测得的光谱是多种谱线叠加的结果。因此,为了得到分立谱线,需要进行多峰拟合。

4.1 多峰拟合与谱线识别

多峰拟合函数主要有 Gauss 和 Lorentz 峰函

数^[11]。Gauss 多峰拟合适用于分立谱线的展宽窄, 相对强度高的情况, Lorentz 多峰拟合适用于分立谱线的展宽、相对强度较小的情况。就本实验的光谱结果来看, 采用 Lorentz 多峰拟合的效果更好。

利用 Origin 软件中的 Multiple Peak Fit, 选择峰函数类型为 Lorentz, 通过选取分立光谱峰值的大致位置可以得到多峰拟合的结果, 如图 10 所示。

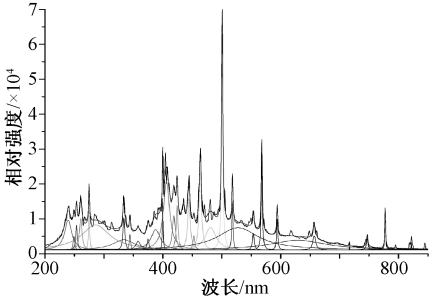


图 10 利用多峰拟合得到的分立谱线

得到分立光谱后, 就得到了各谱线的中心波长, 然后再进行谱线的识别。首先, 先明确火花放电时空间中存在的主要元素, 由于空气中大部分为氮气和氧气, 电极材料为不锈钢, 因此, 主要元素有 N、O、Fe。查阅 NIST 物理数据库^[12], 可得出主要分立谱线的元素种类和电离态。用上述方法分析典型光谱图, 标出元素种类和电离态, 如图 11 所示。

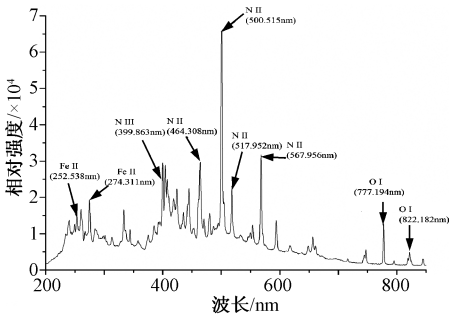


图 11 典型光谱图的谱线识别

Fig. 11 Spectral line recognition of typical spectrum

4.2 电子温度的计算

电子温度是表征等离子体性质的重要参数。等离子体处于热平衡态时, 电子温度等于宏观温度, 处于非热平衡态时, 电子温度的变化趋势反映了宏观温度的变化趋势。发射光谱法作为一种等离子体诊断技术, 因其所使用的仪器相对简单, 并采用非接触测量, 灵敏度高, 响应速度快, 可广泛应用于各种等离子体性质的研究和参数的诊断^[13]。电子温度的高低反映了等离子体中电子平均动能的大小。

多谱线斜率法是目前等离子体温度测量中采用最为广泛的方法。由原子发射理论可知^[14], 假定被测等离子体处于局部热平衡 (LTE) 状态, 选取相同元素的同种原子或离子的多条谱线, 获得其强度 I , 结合光谱参数表中跃迁概率、统计权重等参数, 按照式(1)绘制出关于 E 的 Boltzmann 图。

$$\ln \frac{I\lambda}{gA} = -\frac{E}{kT_e} + C$$

(1)

式中, I 为光谱谱线的相对强度; λ 为谱线的中心波长 (nm); g 为谱线的上能级统计权重; A 为跃迁概率 (s^{-1}); E 为上能级谱线的激发态能量 (J); k 为玻尔兹曼常数 ($1.3806505 \times 10^{-23} J/K$); T_e 为等离子体电子激发温度 (K); C 为常数。

式(1)表示 $\ln[I\lambda/(gA)]$ 和 E 呈线性关系, 使用相同元素的同种原子或离子的若干条谱线, 测得它们的相对谱线强度, 绘成直线图求其斜率, 由此可以计算出等离子体的电子温度。

用多谱线斜率法测等离子体温度时, 由于应用了多条谱线的信息, 因此测温精度较高。选取负极性, 调压器输入电压 180V 即输出电压峰值为 25.5kV, 电压重复频率为 1kHz, 脉冲电压波形为慢前沿、宽脉宽, 环境气压为一个大气压作为典型情况进行计算, 具体计算过程如下。

(1) 首先, 计算电子温度, 选取 N II 的四条谱线, 并查阅 NIST 数据库, 获取上述计算中所需要的数据、计算 $\ln[I\lambda/(gA)]$ 的值, 结果如表 1 所示。

表 1 N II 谱线各参数值						
Tab. 1 Parameters of Spectral line N II						
谱线成分	中心波长 λ/nm	跃迁概率 A/s^{-1}	统计权重 g	上能级激发能量 E/eV	相对强度	$\ln[I\lambda/(gA)]$
N II	464.308	4.39E+07	3	18.48	22353.49	-2.54
N II	500.515	1.14E+08	9	20.65	64140.88	-3.46
N II	517.952	1.07E+08	10	27.74	13982.07	-5.00
N II	567.956	4.96E+07	7	18.47	27115.73	-3.12

(2)根据表 1 描出点,通过线性拟合绘制关于 E 的 Boltzmann 图,如图 12 所示。

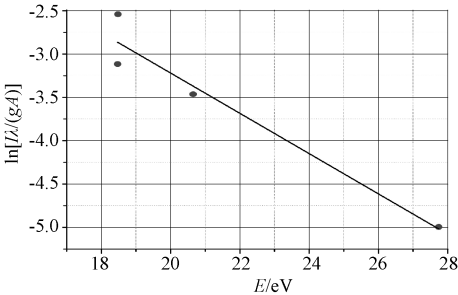


图 12 线性拟合后关于 E 的 Boltzmann 图
Fig. 12 Boltzmann figure of E after linear fitting

(3)线性拟合得到直线斜率为 $a = -0.24443$,由多谱线斜率法的公式,带入各参数数值,可得: $T_e = -5040/a \approx 20619\text{K}$ 。由文献[3]可知,等离子体电子温度在 $10000 \sim 20000\text{K}$ 左右,考虑到分辨出的 N II 谱线较少,拟合时会出现误差,该结果能够接受。

4.3 计算结果

计算正极性下的电子温度。得到关于 E 的 Boltzmann图中直线的斜率 $a = -0.23381$, $T_e = -5040/a \approx 21555.96\text{K}$,说明负极性下的电子温度比正极性下的要稍高一些,表明负极性下电子平均动能大。在负极性电压作用下,尖板间隙的击穿电压峰值更高,此时的放电沉积能量增大,转化为电子平均动能后使得等离子体的电子温度升高,所以宏观温度高。

通过计算得到电子温度随施加电压的变化如图 13 所示。

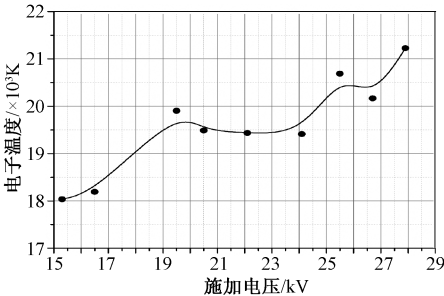


图 13 电子温度随施加电压的变化关系
Fig. 13 Relationship between electron temperature and applied voltage

由图 13 可见,排除放电分散性的影响,电子温度随施加电压变化总体趋势是增加的。在 $20 \sim 25\text{kV}$ 的范围内,电子温度变化不大。原因是随着

施加电压幅值的增大,火花放电的沉积能量变大,从而使等离子体的电子温度升高,宏观温度也相应升高。

通过计算得到重复频率随施加电压的变化如图 14 所示。

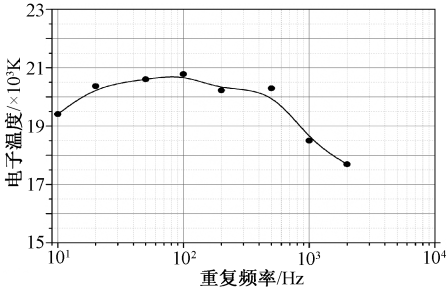


图 14 电子温度随重复频率的变化关系
Fig. 14 Relationship between electron temperature and repetition frequency

当频率较低时,火花放电后,电极有比较充裕的时间与外界进行热交换,此时电极上的温度不是太高,所以等离子体的温度不高。而随着重复频率的增加,电极散热的时间减少,高温电极势必会影响等离子体的温度。但是若重复频率再增加,高温电极的热辐射作用影响也不明显,电子温度一直维持在 20500K 左右。当重复频率增加到 $1 \sim 2\text{kHz}$ 时,电子温度有明显的下降,原因是在高频下绝缘强度的恢复时间变小,击穿电压相对降低,合成射流的沉积能量变小,导致电子温度降低。

下面分析电压脉冲前沿和脉宽对电子温度的影响。依然利用上述方法,得到负极性下,输入电压为 180V ,重复频率为 1kHz ,脉冲波形为快前沿、窄脉宽时直线斜率为 -0.23157 ,电子温度为 21764.48K 。电子温度比慢前沿、宽脉宽时得到的电子温度要稍高,这说明快前沿、窄脉宽的放电沉积能量要稍大一些,原因是快前沿、窄脉宽电压波形中的副峰会增加放电沉积能量。

利用 4.2 节方法计算电子温度,得到电子温度随环境气压变化的关系图,如图 15 所示。由图 15 可知,等离子体中的电子温度在 22000K 左右,说明气压对电子温度的影响较小,且在气压为 $50 \sim 60\text{kPa}$ 时,电子温度有比较明显的下降。这是因为 40kPa 之前,光谱主要是分子谱, $50 \sim 60\text{kPa}$ 时分子谱减弱,离子谱增强,分子电离度增加,对电子能量吸收增大,使得电子能量减小,造成电子温度的下降。

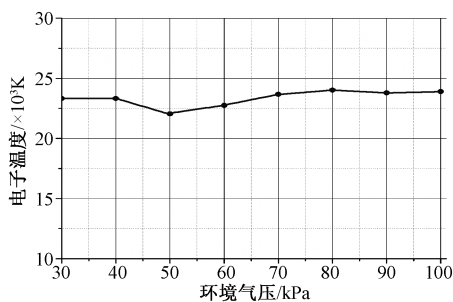


图 15 电子温度随环境气压的变化关系

Fig. 15 Relationship between electron temperature and barometric pressure

5 结论

(1) 输出电压极性对等离子体发射光谱形态的影响不大; 在负尖正板的情况下, 电子温度略高。

(2) 电压幅值对于等离子体发射光谱的谱线相对强度影响较大, 且随着电压幅值的增加, 在紫外波段(波长 200 ~ 400 nm), 谱线相对强度增加明显, 在波长为 500 nm 左右的谱线相对强度有所增加。电子温度随电压幅值的升高呈现上升趋势。

(3) 等离子体发射光谱随电压重复频率变化的分散性较大, 且在 1 kHz 及以下光谱图中的紫外波段较弱, 2 kHz 光谱的紫外波段相对强度较大。重复频率低于 10 Hz 和高于 1 kHz, 电子温度有明显的下降, 在 10 Hz ~ 1 kHz 之间, 电子温度维持在 20500 K 左右。

(4) 等离子体发射光谱在慢前沿和快前沿脉冲电压下的光谱形态相似, 不同处集中在紫外波段, 施加慢前沿、宽脉冲电压得到的发射光谱在 200 ~ 300 nm 的相对强度较大, 在快前沿、窄脉冲下的电子温度略微升高。

(5) 低气压下, 放电光谱谱线主要以分子谱为主, 随着气压的升高, 离子谱和原子谱以及连续谱逐渐增强。在 50 ~ 60 kPa 时分子谱减弱, 离子谱增强, 分子电离度增加, 对电子能量吸收增大, 使得电子能量减小, 造成电子温度的下降。其它压强下, 电子温度在 22000 K 左右。因此, 当大气压在 50 ~ 60 kPa 时, 需要适当改变电压激励参数以维持电子温度的稳定, 从而维持合成射流喷射的稳定。

参考文献 (References):

[1] 刘万东 (Liu Wandong). 等离子体物理导论 (Introduction to plasma physics) [M]. 北京: 中国青年出版

社 (Beijing: China Youth Press), 1979. 110-115.

- [2] B G Deblauw, E Lazar, N Kale, et al. Flow and thermal properties induced by electric arc plasma actuators [A]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition [C]. Orlando, Florida, USA, 2011. 2011-734.
- [3] A Belinger, N Naudé, J P Cambronne, et al. Plasma synthetic jet actuator: Electrical and optical analysis of the discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47 (34): 1-11.
- [4] K R Grossman, B Z Cybyk, D M VanWie. Sparkjet actuators for flow control [A]. 41th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]. 2003. 2003-57.
- [5] 贾敏, 梁华, 宋慧敏, 等 (Jia Min, Liang Hua, Song Huimin, et al.). 纳秒脉冲等离子体合成射流的气动激励特性 (Characteristic of the spark discharge plasma jet driven by nanosecond pulses) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (6): 1493-1498.
- [6] 王林, 罗振兵, 夏智勋, 等 (Wang lin, Luo Zhenbing, Xia Zhixun, et al.). 等离子体合成射流能量效率及工作特性研究 (Energy efficiency and performance characteristics of plasma synthetic jet) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 2013, 62 (12): 1-10.
- [7] H Zong, W Cui, Y Wu, et al. Influence of capacitor energy on performance of a three-electrode plasma synthetic jet actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 222: 114-121.
- [8] Di Jin, Yinghong Li, Min Jia, et al. Experimental characterization of the plasma synthetic jet actuator [J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15 (10): 1034-1040.
- [9] 庞磊, 陈纲亮, 何堃, 等 (Pang Lei, Chen Gangliang, He Kun, et al.). 紧凑型重复频率高压纳秒脉冲电源及其仿真模型 (Compact repetitive high voltage nanosecond pulse generator) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2012, 24 (4): 898-902.
- [10] 李军浩, 王晶, 王颂, 等 (Li Junhao, Wang Jing, Wang Song, et al.). 一种亚纳秒高压脉冲源的研制 (Development of subnanosecond high-voltage pulsed source) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (1): 77-80.
- [11] 金哲, 朱哲松 (Jin Zhe, Zhu Zhesong). 基于 Origin 软件的多峰实验曲线拟合与数据处理 (Multi-peak experimental curve fitting and data processing based on the Origin software) [J]. 延边大学学报 (自然科学版)

(Journal of Yanbian University (Natural Science)), 2008, 34 (3): 200-202.

[12] Y Ralchenko. NIST atomic spectra database [EB/OL]. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines-form.html>.

[13] 吴蓉, 李燕, 朱顺官, 等 (Wu Rong, Li Yan, Zhu Shunguan, et al.). 等离子体电子温度的发射光谱法诊断 (Emission spectroscopy diagnostics of plasma electron temperature) [J]. 光谱学与光谱分析 (Spectroscopy and Spectral Analysis), 2008, 28 (4): 731-735.

[14] 辛仁轩 (Xin Renxuan). 等离子体发射光谱分析 (Plasma emission spectrographic analysis) [M]. 北京: 化学工业出版社 (Beijing: Chemical Industry Press), 2005.

Emission spectrum characteristics of nanosecond pulsed spark plasma

LI Wei¹, WANG Zhi-xin¹, SHI Li²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Najie Complete Electric Co. Ltd., Shanghai 201111, China)

Abstract: Plasma synthetic jet control is a new type active flow control technology. Because of its simple structure, quick response, wide frequency band and strong injection, it has become the focus of current research. In order to improve the efficiency, the temperature information of the spark discharge plasma in the chamber is obtained by utilizing plasma emission spectrum. So it is necessary to research on the emission spectrum of the spark discharge under a nanosecond-pulse voltage, including the influence of voltage excitation and ambient pressure. In terms of voltage excitation parameters, there are four factors: voltage polarity, voltage amplitude, repetition frequency, and the leading edge time and width of a single voltage pulse. By fitting and calculating the spectrum, the electron temperature in different conditions can be obtained. Finally, we combine the variation rules of the electron temperature to offer the data for optimizing the synthetic jet performance and increasing the energy efficiency. According to the result of experiment and calculation, it is concluded that a negative, high amplitude, repetition rate between 20 to 1kHz, fast leading edge and narrow width voltage waveform can produce a plasma synthetic jet with high electron temperature. Moreover, when the pressure is between 50kPa to 60kPa, it is wise to change the voltage excitation parameters to maintain the stability of electron temperature, so that the plasma synthetic jet can be stable.

Key words: plasma emission spectrum; voltage excitation parameter; ambient pressure; electron temperature