

# 大气压冷等离子体喷枪气体温度的比较研究

贾鹏英, 李雪辰, 袁 宁

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

**摘 要** 采用介质阻挡放电等离子体喷枪装置, 在大气压下流动气体(氩气和痕量氮气)中产生了稳定的喷射等离子体。通过拍摄喷枪发光照片, 研究了喷射等离子体长度随气体流量的变化关系。利用高分辨率光谱仪采集等离子体羽处的发射光谱, 通过对发射光谱中  $N_2^+$  的第一负系( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm)谱线拟合得到了射流等离子体的转动温度。利用该方法研究了不同电压下的气体温度, 发现气体温度随着外加电压增加而增大。通过温度计直接测量气体温度随外加电压的变化关系, 发现喷射等离子体的气体温度也是随外加电压增加而增大。对两种测量方法获得的气体温度存在的差别进行了解释。

**关键词** 介质阻挡放电; 气体温度; 光学发射谱; 比较研究

中图分类号: O565 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)08-2032-04

## 引 言

气体放电产生的低温等离子体具有非常广泛的应用, 例如工业领域用于薄膜生长, 臭氧合成等; 环境保护领域的尾气处理、废气的脱硫脱氮; 生物医疗上可用于伤口杀毒消毒, 牙齿疾病的治疗; 光源与显示方面可制作等离子体灯, 等离子体显示器, 气体激光器等; 军事上可用等离子体实现飞行器的隐身, 可以利用等离子体对生化战争中产生的芥子气等毒气进行处理等<sup>[1]</sup>。

低温等离子体一般产生在低气压下, 这就需要真空设备和随之而来的高昂维护费, 同时由于真空装置的存在不利于实现大规模流水线作业。显然大气压等离子体能解决上述问题, 但传统方式下产生的大气压等离子体需要相对较高的击穿电场, 这使得放电间隙很窄, 大约为几个毫米。这样窄的低温等离子体源显然限制了待处理的工件尺度, 因此窄放电间隙成为了大气压等离子体的应用瓶颈问题。

大气压等离子体喷枪由于使得等离子体产生区和应用区分离, 能有效的解决上述大气压等离子体的不足, 因此有非常广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。Jeong 等利用传统的同轴电极等离子体射流装置, 在射频电源驱动下产生了氩和氧混合气体中大气压冷等离子体喷枪, 并用于刻蚀材料<sup>[3]</sup>。研究发现该等离子体是通过放电区产生的活性粒子随流动气体运动到放电区域之外而形成的。为了解决射频等离子体喷枪需要匹配网络

问题, 詹如娟等人利用介质阻挡沿面放电制作了等离子体喷枪, 该喷枪可以工作在几千到几十千赫兹电源频率下<sup>[4]</sup>。Yang 等利用同轴介质阻挡放电喷枪在 10.2 kHz 驱动频率下在氩气、氦气、氮气中分别产生了大气压等离子体喷枪<sup>[5]</sup>, 对等离子体的长度随输入功率、气体流速等的关系进行了研究。但由于以上放电模式为丝状放电, 因此对辉光模式下的介质阻挡放电喷枪的特性还不十分清楚。

针对于此, 本工作利用特殊设计的同轴介质阻挡放电装置产生大气压辉光放电, 研究辉光模式下等离子体喷枪的特性。具体研究了等离子体羽长度和放电气体温度随气体流速的变化。利用两种方法研究了喷枪产生的等离子体气体温度随外加电压的变化关系, 并对其进行了分析。

## 1 实验装置与原理

图 1 给出了等离子体喷枪的实验装置图, 通过采用介质阻挡放电来产生等离子体喷枪, 该介质阻挡放电包含两个电极: 钨棒电极和外围的水电极。作为水电极的水利用两层玻璃管限制, 这两层玻璃管和钨电极共轴放置。通过接入水泵可以使得水电极中的水和外界交换, 从而带走放电中产生的热, 冷却整个放电系统。实验表明, 采用这种结构会使放电更加稳定。实验中两层玻璃管中靠近钨电极的管内径为 7 mm, 该管内通入氩气和痕量氮气的混合气体作为工作气体。钨棒电极直径约为 1 mm, 水电极外围的玻璃管内径约为 1

收稿日期: 2010-09-01, 修订日期: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(10805013), 河北省自然科学基金项目(A2007000134, A2009000149), 教育部重点科技项目(210014)和河北大学博士后项目资助

作者简介: 贾鹏英, 女, 1976 年生, 河北大学物理科学与技术学院硕士研究生 e-mail: plasmlab@126.com

cm。两层玻璃管的厚度均为 1 mm，长度均为 12.8 cm。实验装置电路内电极钨接高压输出，外电极接地。工作气体通过喷嘴喷出，喷嘴直径为 2 mm。高压电源输出可以在 0~10 kV 内连续调节，频率从 30 kHz 到 60 kHz 可调。利用高压探头(泰克 P6015A, 1000X)来测量高压电源的输出并通过示波器(泰克 DPO5054B)来存储。利用光电倍增管(滨松 H7826-01)来探测放电的发光信号，通过在放电回路中串联的小电阻(阻值为 50  $\Omega$ )，利用电阻上的电压来计算放电电流。放电发光信号和放电电流信号都通过数字示波器监测和存储。等离子体喷枪的发射光信号可以通过凸透镜聚焦，进入光纤后导入高灵敏光谱仪(ACTON SP-2758, CCD: 1 340  $\times$  400 像素)，该光谱仪与计算机相连，因此可以通过计算机实现光谱信号的采集与存储。

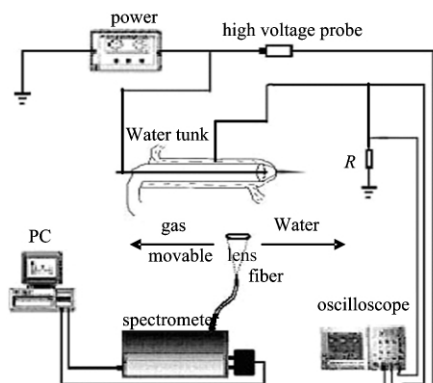


Fig 1 Schematic diagram of the experiment setup

## 2 实验结果和讨论

图 2 是同轴介质阻挡放电喷枪产生的均匀等离子体羽的照片。可以看到通过工作气体的流动等离子体从喷嘴处吹出，形成非常均匀的发光等离子体。等离子体在喷嘴处很亮，是白色的，如图中 A 点所示。随着远离喷嘴，发光亮度有所减弱，并且在等离子体尾部发光颜色为蓝色，如图中 B 点所示。

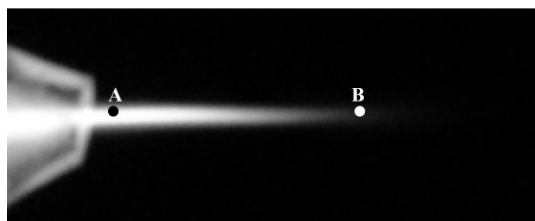


Fig 2 Image of the plasma jet

图 3 还给出了等离子体羽随气流的变化关系，可以看出气体流量在 2~4  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$  区间随着氩气流速的加大，等离子体羽长度呈上升趋势，在  $Q=4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  左右等离子体羽长度有个极大值，此后呈下降趋势。分析认为，喷嘴外的等离子体形态是因放电产生的等离子体衰减造成的。气体流速增大会使得等离子体在衰减时间内能被带到更远的距离，因此等离子体羽长度会随着流速而增加。但当流速大于 4  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$  后由于流速过大而产生了湍流，从而使得等离子体羽长度减

小。

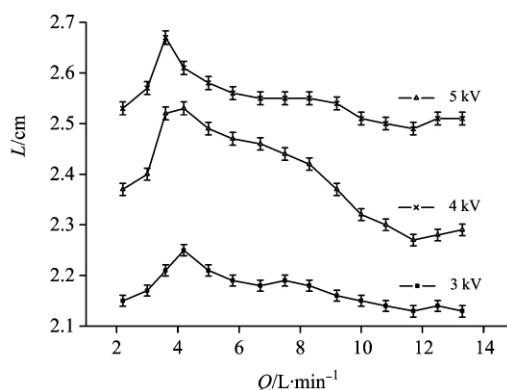


Fig 3 The plasma length as a function of the gas flow rate

对于工作气体的流速为 3  $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，外加电压峰值为 3 kV 的喷枪工作参数下，可以采集的等离子体喷枪产生的羽处发光的光谱，图 4 给出了光谱在 300~500 nm 范围的谱线。从图 4 可以看出该光谱中有  $\text{N}_2^+$  的第一负系( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm)谱线。利用 lifbase 软件(<http://www.sri.com/psd/lifbase/>)，拟合  $\text{N}_2^+$  的第一负系( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm)谱线，可以得到喷射等离子体的气体温度，如图 5 给出了实验数据和相应的拟合图。在实验数据拟合中产生的误差约为 5%。

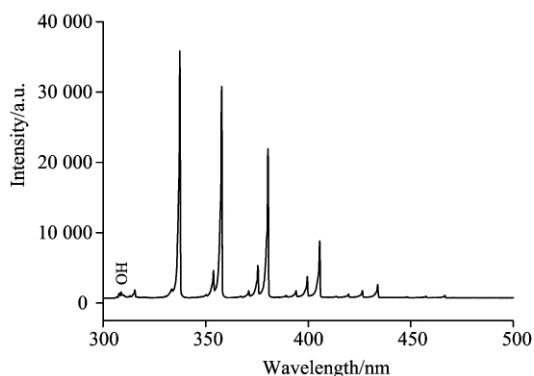


Fig 4 The emission spectrum of plasma plume (300~500 nm)

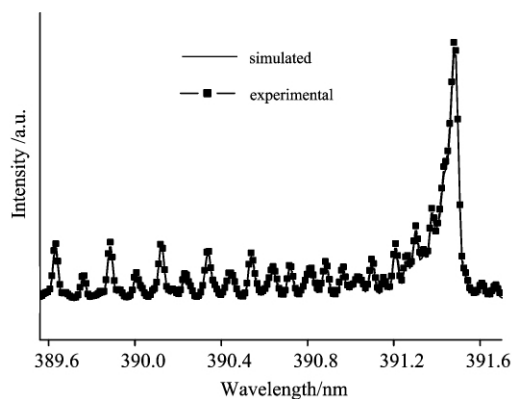


Fig 5 The fitting curve of the simulated and the experiment emission spectrum of first negative band of  $\text{N}_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm)

在大气压放电等离子体中,可以认为分子转动温度近似等于气体温度<sup>[6]</sup>,因而利用谱线拟合的方法可以确定喷枪放电等离子体羽的气体温度。在本文中,利用这种谱线拟合的方法计算了不同条件下的气体温度。图 6 是气体温度随着外加电压的变化关系,显然随着外加电压增加,气体温度也增大。

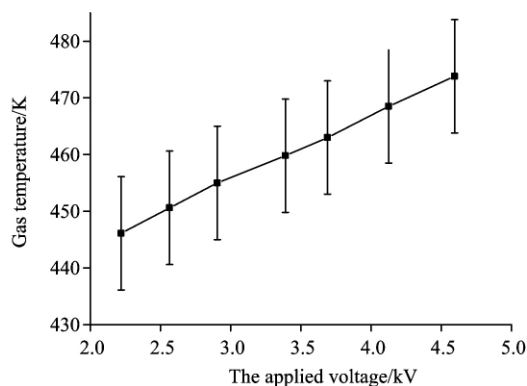


Fig 6 Gas temperature as a function of the applied voltage obtained by optical method

实验还采用普通的温度计对喷枪喷嘴处等离子体的气体温度进行了直接测量。结果如图 7 所示。可见利用普通温度计测量的结果和利用光谱方法测量的结果类似,都是气体温度随着外加电压增大而增大。但二者在数值上存在一定差异,利用普通温度计测量的温度比相同条件下利用光谱拟合的温度低 110 K。这个差别应该是由如下原因造成的。由于我们的辉光放电喷枪运行于准连续模式,即喷枪产生的等离子体是脉冲性的,等离子体喷射出来后早期是发光的,但随着时间会熄灭,当下一个周期放电产生等离子体到来后,再次发光。而光谱拟合的方法获得的温度应为喷枪产生等离子体发光时刻的温度,普通温度计只能获得时间平均的温度。

即普通温度计测量的是发光时刻的温度和不发光时间的平均温度。由于等离子体是随着时间衰减的,所以等离子体温度也应该是发光时刻的温度高于不发光时刻的温度。这样使得光谱拟合的方法获得的温度高于温度计直接测量的温度。

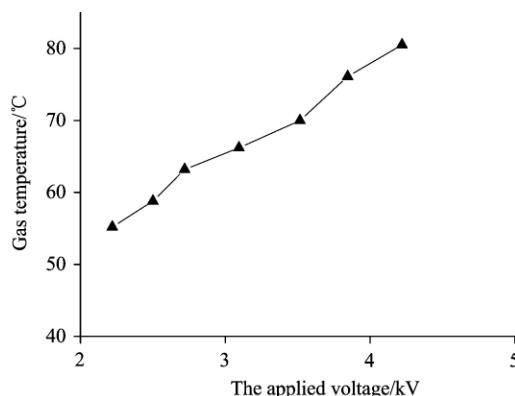


Fig 7 Gas temperature as a function of the applied voltage obtained by thermometer

### 3 结 论

采用介质阻挡放电等离子体喷枪装置,在大气压下流动气体(氙气和痕量氮气)中产生了等离子体喷枪。通过拍摄喷枪发光照片,研究了喷射等离子体长度随气体流量的变化关系。利用高分辨率光谱仪采集等离子体羽处的发射光谱,通过对发射光谱中  $N_2^+$  的第一负系( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm)谱线拟合得到了射流等离子体的转动温度。利用该方法研究了不同电压下的气体温度,发现气体温度随着外加电压增加而增大。通过温度计直接测量等离子体温度随外加电压的变化关系,发现喷射等离子体的温度也是随外加电压增加而增大。对两种测量方法获得的气体温度存在的差别进行了解释。

### References

- [1] DONG Li-fang, RAN Jun-xia, YIN Zeng-qian, et al(董丽芳,冉俊霞,尹增谦,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(8): 1184.
- [2] Ni T L, Ding F, Zhu X D, Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 1503.
- [3] Jeong J Y, Babayan S E, Tu V J, Plasma Sources Sci. & Technol, 1998, 7: 282.
- [4] Xu L, Liu P, Zhan R J. Thin Solid Films, 2006, 506: 400.
- [5] Chen G L, Chen S H, Zhou M Y, Plasma Sources Sci. & Technol, 2006, 15: 603.
- [6] James M W, Peter B, Biswa N G. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37: 1658.

# Comparative Study on the Gas Temperature of a Plasma Jet at Atmospheric Pressure

JIA Peng-ying, LI Xue-chen, YUAN Ning

College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

**Abstract** A plasma jet of a dielectric barrier discharge in coaxial electrode was used to produce jet plasma in flowing work gas (argon mixed with trace nitrogen) at atmospheric pressure. The relation between the plasma length and the gas flow rate was obtained by taking the images of the jet plasma. A high-resolution optical spectrometer was used to collect the optical emission spectrum. The emission spectra of the first negative band of  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ , 390~391.6 nm) were used to estimate the rotational temperature of the plasma plume by fitting the experimental spectra to the simulated spectra. The gas temperature was investigated by this optical method and results show that the gas temperature increases with increasing the applied voltage. For comparison, a thermometer was used to measure the temperature of the gas emitted from the jet. The results also show that the gas temperature increases with increasing the applied voltage. The gas temperatures obtained by the two methods are consistent. The difference was analyzed.

**Keywords** Dielectric barrier discharge; Gas temperature; Optical emission spectrum; Comparative study

(Received Sep. 1, 2010; accepted Dec. 6, 2010)

## 《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者，本刊要求作者重写，这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文，要求言简意明、确切地论述文章的主要内容，突出创新之处。
2. 应拥有与论文同等量的主要信息，包括四个要素，即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素，例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下，英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围，以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据，如检测限、相对标准偏差等；结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。
3. 句型力求简单，尽量采用被动式，通常应有 2000 个印刷字符，300 个英文单词为宜，不能太短；也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。
4. 摘要不应有引言中出现的内容，换言之，摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论，不得简单重复题名中已有的信息；不用非公知公用的符号和术语；不用引文，除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号，除相邻专业的读者也能清楚地理解外，在首次出现时必须加以说明，例如用括号写出全称。