

大气压射流等离子体温度空间分布

李永辉 董丽芳

(河北大学物理科学与技术学院 河北 保定 071002)

摘要 利用空心针-板放电装置,在大气压环境下,得到了 1.6 cm 长的氩气射流等离子体弧。利用射流等离子体的发射光谱,研究了等离子体转动温度、分子振动温度及电子激发温度的空间分布。沿等离子体弧采集了空间不同位置的 300~800 nm 范围内的发射光谱,光谱主要成份为氩原子谱线及氮分子第二正带系谱线,另外还包括微弱的氮分子离子以及 OH⁻ 谱线。利用 LIFBASE 数据库对 OH⁻ 谱线进行拟合,得到了转动温度,结果表明,沿着等离子体弧转动温度基本不变。利用氮分子第二正带谱线计算了振动温度,发现振动温度从弧根到弧梢先降低然后逐渐升高。利用氩原子谱线计算了电子激发温度,电子激发温度空间分布与振动温度相同。

关键词 光谱学;射流等离子体;转动温度;振动温度;电子激发温度

中图分类号 O461.2; O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0430003

Spatial Distribution of Atmospheric Plasma Jet Temperature

Li Yonghui Dong Lifang

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

Abstract A 1.6 cm long argon plasma jet torch is generated by using hollow needle to plate discharge device working in atmosphere. Rotational temperature, vibration temperature and electron excitation temperature are studied by using optical emission spectrum. Optical emission spectrum is collected from 300~800 nm, which consists of strong Ar I lines, N₂ second positive band system, weak OH⁻ around 309 nm and N₂⁺ lines. Rotational temperature is obtained by simulating the spectrum shape of OH⁻ radical band with program of "LIFBASE". Gas temperature is 500 K and keeps a constant number at different positions along the plasma. Vibration temperature is calculated using N₂ second positive band system, electron excitation temperature is obtained using spectral line intensity ratio. Spatial distributions of the above two kinds of temperatures are similar; they decrease firstly and then increase with the increase of the distance from the arc root.

Key words spectroscopy; plasma jet; rotational temperature; vibration temperature; electron excitation temperature

OCIS codes 300.2140; 300.6170; 300.6190; 300.6210

1 引 言

气体放电产生的低温等离子体在材料表面处理^[1]、臭氧合成^[2]和生物医学^[3]等方面有着广阔的应用前景。低温等离子体一般是在低气压环境中产生的,昂贵的真空设备限制了其工业应用。射流等离子体利用流动气体可以在大气压环境下产生低温等离子体,因此射流等离子体成为近期研究的热点^[4,5]。

等离子体温度是重要的等离子参数。低温等离子体处在非平衡态,气体温度和电子温度不相等。气体温度是低温等离子体工业应用的一个重要标准,如果温度过高,在材料表面处理过程中,就会导致热敏材料的损毁。另外电子温度也是等离子体的一个重要参量,电子温度高低决定着产生的活性粒子的多少。电子温度很难直接测量^[6,7],但电子激发温度和振动温度可间接反映电子能量^[8]。本文利

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(10975043, 11175054)、河北省自然科学基金(A2010000185)和廊坊市科技局项目(2012011024, 2012011025, 2012011026)资助课题。

作者简介: 李永辉(1978—),男,博士研究生,主要从事介质阻挡放电方面的研究。E-mail: Liy_hui@yahoo.com.cn

导师简介: 董丽芳(1963—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事介质阻挡放电斑图方面的研究。

E-mail: donglf@hbu.edu.cn(通信联系人)

用空心针-板放电装置,导入流动的氩气,在开放的环境中得到了 1.6 cm 长的射流等离子体。利用射流放电的发射光谱,研究了转动温度、分子振动温度、电子激发温度的空间分布情况,对于射流等离子体应用具有一定的参考价值。

2 实验装置

实验装置图如图 1 所示,实验装置主体为空心针-板放电装置。空心不锈钢针外径 1.3 mm、内径 1 mm,串联一个 50 Ω 的小电阻接地,另一电极为直径 8 cm、高 6 cm 的圆柱形铜块,在其上覆盖一层厚度 1.5 mm 的玻璃板,铜块与高压(HV)电源的高压输出端连接,空心针-板之间间距为 3.5 cm。工作气体为氩气,通过空心针导入。高压电源输出频率为 40 kHz 的正弦交流(AC)电,峰值电压 0~12 kV 可调,输出电压通过高压探头(Tektronix P6015A 1000X)测量,放电电流通过串联的 50 Ω 小电阻测量,电压、电流信号通过示波器(Agilent, DSO6054A, 500 MHz)观测记录。放电发光通过焦距 10 cm 的透镜成像后通过光纤进入光谱仪(ACTON SP 2758,光栅 300 line/mm,狭缝宽度 50 μm, CCD 的分辨率为 1340 pixel×400 pixel)采集,采集光谱通过计算机存储处理,光谱仪的光纤探头固定在滑轨上,滑轨移动最小刻度 0.5 mm,通过移动光纤探头可以采集空间不同位置的光谱。

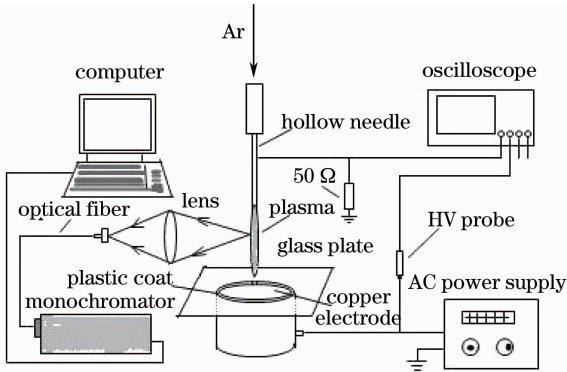


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 实验结果与讨论

3.1 谱线强度空间分布

调节氩气流量到 9 L/min,当外加正弦交流电压峰值升高到 9 kV 时,1.6 cm 长的等离子体弧从空心针管中喷出,如图 2 所示。其电压、电流波形如图 3 所示。

实验采集了从等离子体弧根到弧梢 9 个不同位

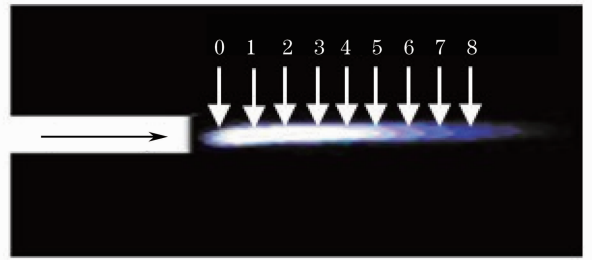


图 2 射流等离子体照片($U_p = 9$ kV),数字代表 0~8 代表选取的 9 个空间位置

Fig. 2 Photograph of the discharge ($U_p = 9$ kV), numbers indicate the positions selected in equal interval from arc root to arc tip

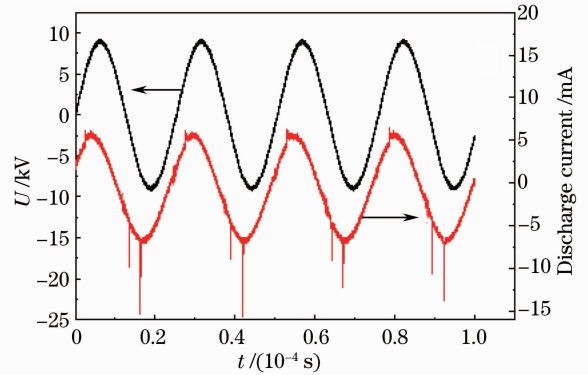


图 3 电压、电流波形

Fig. 3 Waveforms of applied voltage and discharge current

置处 300~800 nm 范围内的发射光谱,如图 4 所示,其主要成份为氩原子谱线、氮分子第二正带系谱线,另外包括微弱的 OH^- 和氮分子离子谱线。选取了 337 nm 氮分子谱线、772 nm 氩原子谱线、309 nm OH^- 谱线和 391.4 nm 氮分子离子谱线四条谱线,研究了四条谱线强度的空间分布情况(谱线经过 Origin 软件去除噪声,谱线强度选取谱线峰值处相对强度),结果如图 5 所示。氩原子谱线强度沿等离子体弧迅速减小,弧根处谱线强度约是弧梢处强度的 40 倍;氮分子谱线强度先增加,在距离弧根 8 mm 处达到最大值,然后逐渐减小; OH^- 谱线强度分布与氮分子谱线类似,也是先增加后减小,在 8 mm 处达到最大值;氮分子离子谱线在弧根附近没有出现,只在弧梢附近 6 mm 范围内有微弱分布。气体流速、气体成分是影响放电强度的重要原因,沿着等离子体弧氩气流速逐渐降低,氩气含量逐渐减少,混入到氩气中的空气成分逐渐增多,因此氩原子谱线沿着等离子体弧强度迅速减小。氮分子谱线是由空气中的氮分子激发产生的, OH^- 谱线是空气中的水分子被激发电离产生的,沿着等离子体弧氩气含量逐渐减

少,参与反应的空气含量逐渐增加,因此氮分子谱线和 OH^- 谱线强度逐渐增加,但是由于氩气和空气之间的“潘宁效应”,混合气体当中氩气含量也会影响氮分子谱线与 OH^- 谱线的强度,这就导致这两条谱线的强度在等离子体弧中部出现最大值。氮分子离子谱线是由高能电子激发产生的,高能电子数目越多,则氮分子离子谱线强度越大,而氮分子离子谱线只在等离子体弧末端出现,意味着在这个位置电子能量高,因此接下来对等离子体温度分布进行了研究,电子激发温度和振动温度的空间分布结果也验证了这一结论。

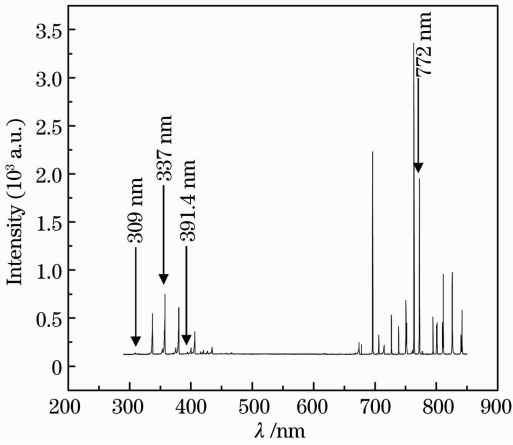


图4 射流等离子体 300~800 nm 范围发射光谱
Fig. 4 Emission spectrum of the discharge in the wavelength range of 300~800 nm

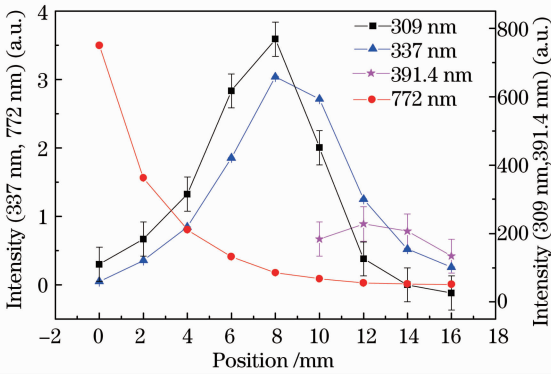


图5 发射光谱中 OH^- , N_2 , Ar 和 N_2^+ 谱线强度的空间分布

Fig. 5 Relative intensities of emission spectra of OH^- , N_2 , Ar and N_2^+ at different positions

3.2 转动温度、振动温度、电子激发温度的空间分布

利用射流等离子体的发射光谱,研究了等离子体的转动温度、振动温度、电子激发温度的空间分布。利用 309 nm 附近 OH^- 谱线的轮廓研究了等离子体弧的转动温度。将不同位置采集的 OH^- 谱

线归一化,进行比较,如图 6 所示。不同位置的 OH^- 谱线归一化之后轮廓基本重合,这说明沿着等离子体弧转动温度保持不变。选取了距离弧根 8 mm 位置处的 OH^- 谱线,利用 LIFBASE 数据库^[9]对 OH^- 谱线进行了拟合,拟合温度约 500 K,如图 7 所示。

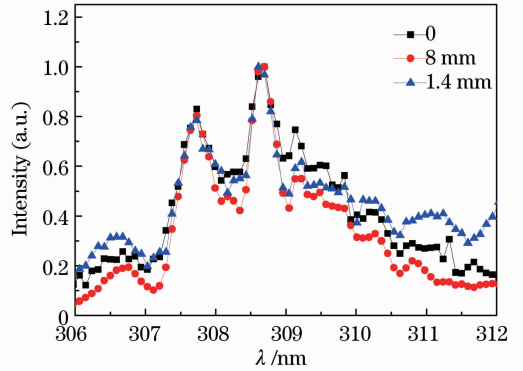


图6 0、8 mm 和 1.4 mm 处归一化的 OH^- 谱线
Fig. 6 Normalized emission spectra of OH^- at 0, 8 mm and 1.4 mm

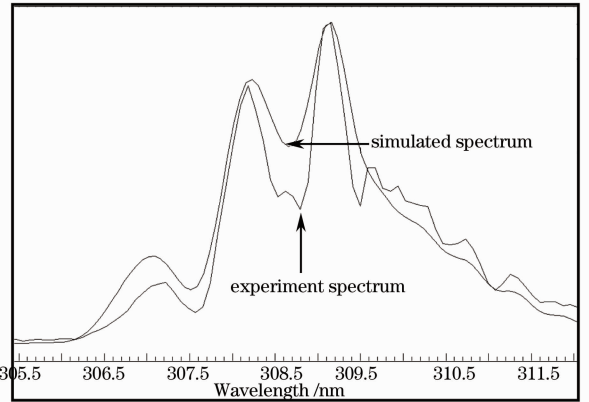


图7 309 nm 附近 OH^- 实验谱线与拟合谱线
Fig. 7 Experiment spectrum and simulated spectrum of OH^- around 309 nm

选取氮分子第二正带系中(0-2、0-3、1-2、1-3)四条谱线,通过拟合程序^[10],计算了空间不同位置的振动温度。另外选取 763 nm 和 772 nm 两条氩原子谱线,利用谱线强度比法^[11],计算了氩原子的电子激发温度。振动温度和电子激发温度的空间分布如图 8 所示,二者变化趋势相似,均为沿着等离子体弧先减小后增加,在距离弧根 2 mm 位置处减小到最小值,然后随着远离弧根振动温度和电子激发温度都逐渐增大。振动温度与电子激发温度的空间分布与本实验中射流放电的特点相关。由电压、电流波形可以看出,放电主要发生在外加电压的负半周,此时金属空心针为阳极,空心针周围的气体被电离,电子向着空心针移动,而正离子由于质量大,就会堆

积在针管附近。在空间电荷与阳极之间,空间正电荷形成的附加电场方向与外电场方向相反,因此净电场就会减弱,而在空间电荷与阴极之间的净电场就会加强。由于电场分布的变化,所以振动温度和电子激发温度先减小然后增加。沿着等离子体弧电子能量逐渐增加,因此在等离子体弧末端区域出现了少量氮分子离子谱线。

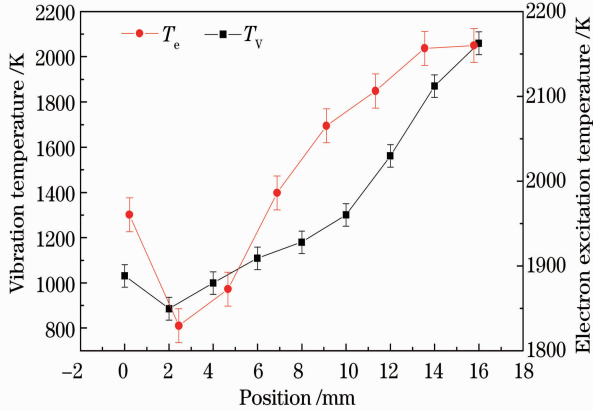


图 8 振动温度和电子激发温度的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of vibration temperature and electronic excitation temperature in the plasma

等离子体弧中气体温度均匀分布,活性离子 OH^- 在等离子体弧中部粒子数最多,电子能量在等离子体弧梢位置最大。以上结论对于大气压氩射流等离子体的应用具有指导意义。

4 结 论

在大气压环境下,利用空心针-板放电装置,得到了 1.6 cm 长的氩气射流等离子体弧。通过射流等离子体的发射光谱,研究了不同谱线的强度分布情况,结果发现沿着等离子体弧,氩原子谱线强度迅速减小,氮分子谱线强度先增加后减小, OH^- 谱线在等离子体弧中间最强,而氮分子离子谱线只在等离子体弧梢附近出现。另外还研究了转动温度、振动温度、电子激发温度的空间分布,沿着等离子体弧转动温度基本不变,约为 500 K,振动温度和电子激发温度分布相似,都是先减小后增加,在距离弧根 2 mm

位置处出现最小值。

参 考 文 献

- 1 G. Fridman, A. Gutsol, A. B. Shekhter *et al.*. Applied plasma medicine [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2008, **5**(6): 503~533
- 2 M. Laroussi, T. Akan. Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: a review [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, **4**(9): 777~788
- 3 A. Fridman, A. Chirokov, A. Gutsol. Non-thermal atmospheric pressure discharges [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(2): R1~R24
- 4 Sun Ja Kim, T. H. Chung, S. H. Bae. Striation and plasma bullet propagation in an atmospheric pressure plasma jet [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, **17**(5): 053504
- 5 J. L. Walsh, F. Iza, N. B. Janson *et al.*. Three distinct modes in a cold atmospheric pressure plasma jet [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(7): 075201
- 6 Li Xiafen, Zhou Weidong, Qian Huiguo *et al.*. Electron temperature and density of soil plasma generated by laser ablation fast pulse discharge spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1130001
李霞芬,周卫东,钱惠国等. 激光烧蚀脉冲放电激发的土壤等离子体电子数密度和温度的研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1130001
- 7 Wang Qi, Liang Yunxian, Chen Xinglong *et al.*. Experimental investigation on pre-ablation dual-pulse laser-induced Fe plasmas [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1215001
王 琦,梁云仙,陈兴龙等. 预烧蚀双脉冲激光诱导 Fe 等离子体发射光谱的实验研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1215001
- 8 Dong Lifang, Liu Weiyan, Yang Yujie *et al.*. Study on vibrational temperature and gas temperature in a hollow needle-plate discharge plasma [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(9): 2309~2311
董丽芳,刘为远,杨玉杰等. 空心针板放电等离子体气体温度和振动温度研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(9): 2309~2311
- 9 J. Luque, D. R. Crosley. LIFBASE: Database and Spectral Simulation [R]. SRI International Report No. MP 99-009. 1999
- 10 Li Xuechen, Niu Dongying, Yuan Ning *et al.*. Investigation of the vibrational temperature and gas temperature in gas discharge generated by plasma needle [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 589~601
李雪辰,牛东莹,袁 宁等. 等离子体针放电的振动温度和气体温度研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3): 589~601
- 11 Chen Junying, Dong Lifang, Li Yuanyuan *et al.*. Plasma parameters of square superlattice pattern in a dielectric barrier discharge [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(7): 075211
陈俊英,董丽芳,李媛媛等. 大气压介质阻挡放电超四边形斑图的等离子体参量 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(7): 075211

栏目编辑: 李文洁