

单极性带电粒子浓度测试方法的研究^{*}

孙 健[†] 白敏冬 毛程奇 白希尧

(大连海事大学物理系, 高气压强电场电离放电辽宁省重点实验室, 大连 116026)

(2006 年 9 月 22 日收到, 2006 年 10 月 12 日收到修改稿)

提出一种新型球形传感器探测仪, 在不同风速、不同激励场强以及不同测试点的情况下对大气压下电晕放电形式产生的带电粒子浓度进行了测量, 并分析了等离子体的空间分布情况, 同时与 DLY 型空气离子测量仪的测试结果进行比较. 实验结果表明, 球形探测仪对带电粒子浓度的测试结果较为理想, 同时, 设备操作简单, 占用空间小, 便于局部定点测量, 为研究等离子体的空间分布提供了条件.

关键词: 等离子体, 带电粒子浓度, 强电场电离放电, 大气压

PACC: 5000, 5150, 5200

1. 引 言

目前, 对大气压下非平衡等离子体的物理研究已经成为新的研究热点, 但对等离子体的产生及运动机理的研究并不完善, 因而在现阶段的研究中, 等离子体测试手段便越来越显示其重要性^[1,2]. 目前测量低温等离子体浓度的主要方法有 Langmuir 探针法、平行板式电荷收集法. 这两种方法的测量过程都是与等离子体直接接触的主动诊断^[3,4]. Langmuir 探针法主要是通过向等离子体中插入一个只有尖端部绝缘的金属针, 并在其尖端加以电压, 从等离子体中引出一个电流, 从 $I-V$ 特性曲线的指数部分可以推断在边缘的等离子体参数^[5]. 国外学者早在上世纪六七十年代, 就对探针法的应用做过许多研究. Lockte-Holtgreven^[6]与 Swift 等人^[7]研究了如何使用静电探针分析等离子体特性; 而国内的研究则较晚一些, 冯玉国等人^[8]做了关于 Langmuir 探针测量等离子体内参数的实验研究, 陈宗柱等人^[9]研究了稳态放电等离子体参数的双探针测量法. 但探针法只适用于低气压及其真空条件下氩气产生的等离子体^[10,11], 对高压下产生的等离子体浓度无法测量. 而平行板式电荷收集法则是根据空气离子专家 Beckett 推荐的 Wesix 平行板式空气离子收集原理研制, 采用电容式收集器收集电荷, 通过微电流计将电

荷转换的电流信号进行表征, 最后通过计算得出离子浓度值. 在实际应用中, 平行板由于其构造的局限性, 采用的是与离子驱进速度垂直的外加电场, 导致风速成为俘获离子的阻力, 因而使测量对象的风速受到了较大的限制, 取样空气的流速最大约为 180 cm/s, 且平行板式离子测量仪的传感器体积较大, 不适用于等离子体速度流场的测量.

本课题结合了探针及平行板式测量方法的特点研制了小型化球型单极性离子浓度测试仪, 特别针对大气压下空气放电产生的等离子体浓度进行有效测量. 采用球形传感器并根据带电粒子在电场作用下碰撞吸附原理收集电荷^[12-14], 克服了平行板式测量方法的缺陷, 使风速成为离子收集的动力, 而非阻力, 大幅度提高了离子的驱进速度, 增大了捕集效率, 从而提高了测量精度; 另外, 设计的球形传感器体积小, 直径仅为 5—8 mm, 便于局部定点的测量, 对分析研究等离子体参数的时空演变规律提供了条件, 也为在飞行器隐身及减阻的风洞实验中测量等离子体浓度提高了较理想的设备条件.

2. 新型球形探测仪原理

本课题研制的新型球形 (ball) 探测仪, 采用球状探头为传感器, 主要用于测试大气压下强电场电离放电产生的高浓度等离子体浓度. DLY 平行板式空

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60471036)资助的课题.

[†] E-mail: shuizi314@sina.com

气离子测量仪及球形探测仪的设备构造原理图分别如图 1、图 2。新型探测仪主要由球型探头、电源、电流信号输出设备(皮安电流表)、接地装置组成。探头直径可在 6 mm 至 15 mm 范围内选择。测试过程中,对球形探头施加单极性直流电压,使传感器产生发散的激励电场,在风力及电场力的作用下带电粒子的驱进速度与气流速度一致,从而趋向球面运动,克服了平行板结构中由于电场方向与气流速度方向垂直而造成的捕集不完全所带来的测量误差问题。

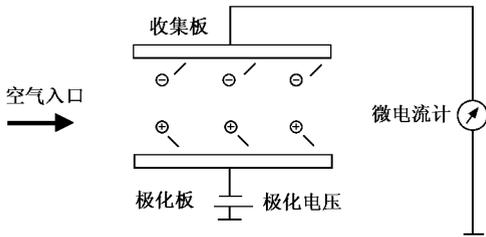


图 1 DLY 空气离子测量仪设计原理图

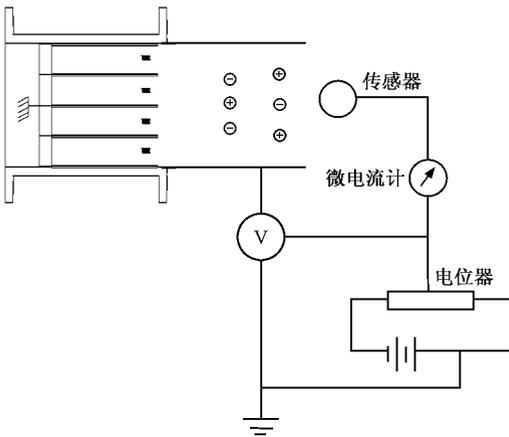


图 2 球形探测仪设计原理图

电荷被球型采集器收集后,转化为微电流信号,流经传感器的无规则热运动产生的电子电流为^[15]

$$I_{e0} = kN_e e \nu_e A, \quad (1)$$

$$N_e = \frac{I_{e0}}{k e \nu_e \pi d^2}, \quad (2)$$

式中, N_e 为单位体积空气中离子数目(cm^{-3}); I_{e0} 为微电流读数(A); e 为基本电荷电量(库伦); ν_e 为取样空气流速(cm/s); d 为球型传感器直径; k 为粒子浓度有效系数; A 为产生电流的电荷的有效散射面积(cm^2)。由于 k 与 A 的确定较为复杂,本实验取理想情况, $k=1$, A 为传感器有效横截面积)。在球形收集器产生的偏置电场作用下,等离子体中的电子及

离子被球形传感器收集,根据电荷转换的微电流信号大小可以根据(2)式计算出等离子体浓度。

3. 实验结果

在大气压下,采用电晕放电形式,施加 12 kV 的直流感电电压,分别在不同测试点、不同激励电场及不同风速的情况下进行定点测量,风速由 MODEL KA22 型热式风速仪(精度 $\pm 2\%$)进行测定,利用 EST122 型皮安电流表(精度 $< 0.5\% - 1\%$)作为微电流计,测量电流信号,计算结果使用 DLY-3 型空气离子测量仪进行校正。

3.1. 等离子体不同漂移距离处的测量结果

从图 3、图 4 可以看出,球形探测仪与 DLY 测试仪测量的离子浓度均随着测试点至离子源距离的增大而呈下降趋势:在风速为 23 m/s 时,随着测试点距离的增大,球形探测仪测得的离子浓度由 $2.9 \times 10^9 / \text{cm}^3$ 减少为 $6.8 \times 10^8 / \text{cm}^3$,而 DLY 测得结果是由 $5.5 \times 10^8 / \text{cm}^3$ 减少为 $9.1 \times 10^7 / \text{cm}^3$ 。在低风速 5 m/s 时,下降趋势一致,不过球形探测仪测得的最高浓度为 $2.1 \times 10^9 / \text{cm}^3$,而 DLY 只能测得 $2.8 \times 10^8 / \text{cm}^3$,即相同条件下,两者测得的离子浓度相差一个数量级左右,可以看出由于球形探测仪的结构特点,使离子的漂移方向与驱进力一致,使球形探测仪对离子的俘获率较 DLY 高出很多。另外,两者均在 10 cm—15 cm 处呈现较明显的下降趋势,15 cm 后下降趋势渐缓,这是由于距离增大到 15 cm 处后,在离子的运输过程中,由于复合率的增大,从而使离子消逝,导致测量结果减小。

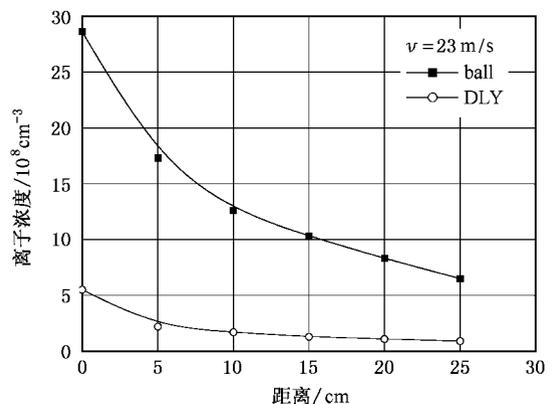


图 3 高速下测试距离对离子浓度的影响

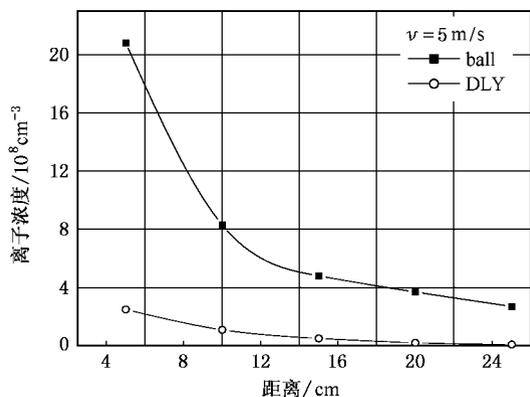


图4 低风速下测试距离对离子浓度的影响

3.2. 不同激励电场下的测量结果

利用 DLY 空气离子测量仪与球形探测仪分别测量强电场下电晕放电形式产生的离子浓度,如图 5 所示,可以看出,在将激励电场从 8.4 kV/cm 调至 10.0 kV/cm 的过程中,两种测量方法测得的离子浓度均呈上升的趋势,其中由球形探测仪测得的离子浓度增加趋势较快,最终可达到 $3.1 \times 10^9/\text{cm}^3$,而由 DLY 测得的离子浓度最大值仅为 $6.0 \times 10^8/\text{cm}^3$. 从两者的结果可以看出电场强度对离子浓度的影响很大,随着外加电场的增大,电晕放电状态经历了电离起始阶段、流光放电区域、辉光放电区域以及火花击穿区域,电离产生的离子浓度也随之变化,在高风速下,由球形探测仪测得的结果明显高于 DLY,且与相同状态下的伏安特性曲线更符合.

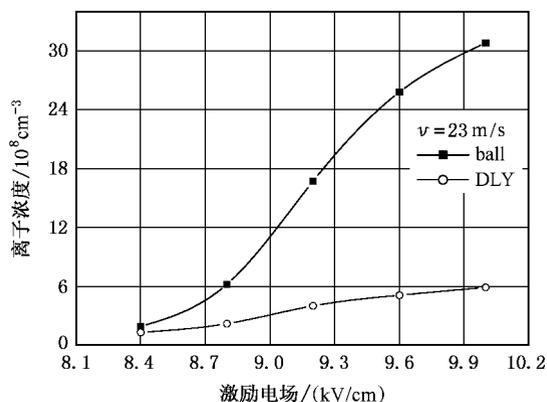


图5 激励电场对离子浓度的影响

3.3. 不同风速下的测量结果

在不同风速下,分布使用 DLY 空气离子测量仪

与球形探测仪对电晕放电产生的离子浓度进行测量,如图 6 所示.从图中可以看出,低风速时,两种测量方法测得结果相差不大,分别为 $1.8 \times 10^8/\text{cm}^3$ 及 $2.7 \times 10^8/\text{cm}^3$,两者尚属于同一数量级;但当风速逐渐增大时,球形探测仪的测量结果显著升高,在风速为 10 m/s 时,曲率最大,离子浓度产生率最高,测得的离子浓度高达 $1.4 \times 10^9/\text{cm}^3$;当风速超过 15 m/s,直至 23 m/s 时,测量结果持续上升,但趋势渐缓,增加速度较慢,离子浓度最终达到 $1.1 \times 10^9/\text{cm}^3$.而在相同条件下,由 DLY 测得的数据结果虽然趋势与前者相同,但变化程度与测得的具体数据差异较大.从图中可以看出,DLY 测得的离子浓度随风速变化情况不明显,整条曲线曲率较小,变化趋势渐缓,风速在 6 m/s—23 m/s 范围变化时,测得的离子浓度最高仅为 $5.0 \times 10^8/\text{cm}^3$.

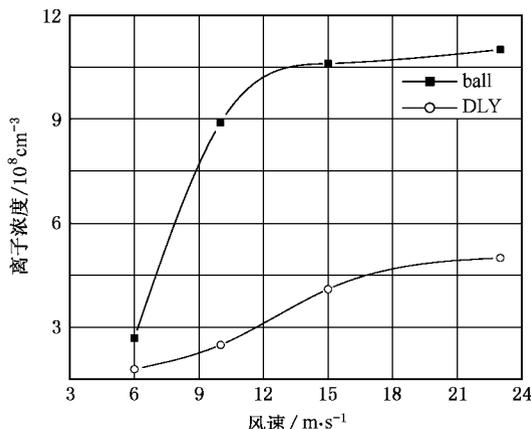


图6 风速对离子浓度的影响

3.4. 等离子体浓度的空间分布测量

如上文所述,球形探测仪的构造由于采用球形金属作为探头,因而占用空间小,便于空间等离子体的定点测量.图 7、图 8 是风速为 23 m/s 时,在距等离子体源出口 80 cm 处利用球形探测仪对等离子体浓度空间分布的测量结果.从图中可以看出,空间离子浓度由中心处(顶点处浓度为 $2.2 \times 10^9/\text{cm}^3$)逐渐向四周扩散,最终消逝,这一过程是等离子体在风力及其自身重力的作用下所形成的.由于采用的电晕式放电离子源出口截面为 $9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$,与 DLY 空气离子测量仪的入口尺寸相当,因此不便实现等离子体浓度的空间局部测量,而球形探测仪的探头直径仅为 6 mm,可在较小的空间范围内进行局部定点测量,为进一步研究等离子体的空间分布问题提高

了较好的前提条件.

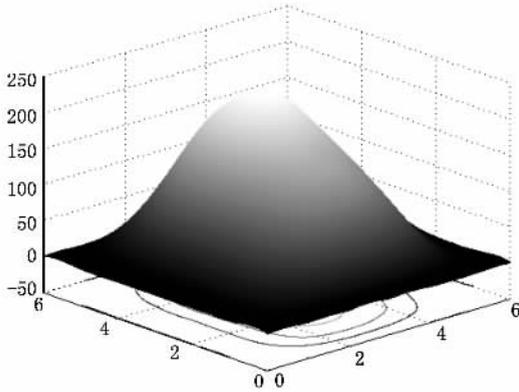


图 7 等离子体浓度空间分布截面图

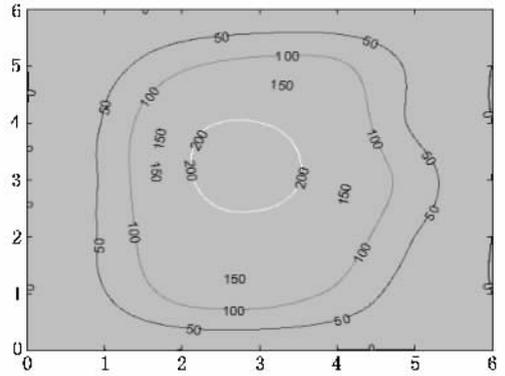


图 8 等离子体空间分布截面等浓度图

4. 结 论

利用新型球形探测仪的收集电荷法,在不同激励电场、不同测量距离以及不同风速下对大气压下电晕放电形式产生的离子浓度进行测量,并以 DLY 空气离子测量仪进行校正.测量结果表明,对于大气压下高风速强电场电离放电形式产生的等离子体浓度的测量,较宜采用球形探测仪.目前广泛使用

的 DLY 型大气离子测量仪因其结构采用平行板式采集电荷,使其受气流速度限制程度较大,而球形探测仪采用球形探头设计原理,使离子最大程度上被捕捉并转化为电流信号,因而摆脱了风速的局限性,且在相同条件下,对等离子体的测量数据较 DLY 理想.另外,其设备简单,占有空间小,极适于定点测量.为研究等离子体的空间分布状况及在飞行器隐身及减阻的风洞实验中测量等离子体浓度提高了较理想的设备条件.

- [1] Ji Z J, Wang J, Wang Y X, Jin Z Z, Liang J S, Sui T B, Wang J M 2003 *China Environment Sanitation* **6**(3) 86 (in Chinese) [冀志江、王 静、王彦勋、金宗哲、梁金生、隋同波、王继梅 2003 中国环境卫生 **6**(3) 86]
- [2] Hao Z Q, Yu J, Zhang J, Yuan X H, Zheng Z Y, Yang H, Wang Z H, Ling W J, Wei Z Y 2005 *Acta Physica Sinica* **54** 1290 (in Chinese) [郝作强、俞 进、张 杰、远晓辉、郑志远、杨 辉、王兆华、令维军、魏志义 2005 物理学报 **54** 1290]
- [3] Wei H L, Liu Z L, Li Z G 1996 *Chinese Physics*. **5**(7) 520—529
- [4] Donné A J H, Translated Na X 2002 *Transactions of fusion science and technology* **41**(2T) 361
- [5] Yang W D, Wang P N, Liu Z P 2002 *Chinese Physics* **11** 260
- [6] Lockte-Holtgreven W 1968 *Plasma diagnostics* (Amsterdam: North Holland) 668
- [7] Swift J D, R. Schwar M J 1970 *Electrical probes for plasma Diagnostics* (London: Iliffe)
- [8] Feng Y G 1990 *Vacuum technology* (1) 1 (in Chinese) [冯玉国

- 1990 真空技术(1) 1]
- [9] Chen Z Z 1995 *Electron device* **18**(2) 90 (in Chinese) [陈宗柱 1995 电子器件 **18**(2) 90]
- [10] Tao M X 2000 *Transactions of Fushan science and technology college* **18**(3) 11 (in Chinese) [陶孟仙 2000 佛山科学技术学院学报 **18**(3) 11]
- [11] Chen Z, He W, Pu Yi K 2005 *Acta Physica Sinica* **54** 2153 (in Chinese) [陈 卓、何 威、蒲以康 2005 物理学报 **54** 2153]
- [12] Zhang T, T K Kwok, Chu P K 2001 *Chinese Physics* **10** 320
- [13] Ma Y Y, Chang W W, Yin Y 2000 *Acta Physica Sinica* **49** 1513 (in Chinese) [马燕云、常文蔚、银 燕 2000 物理学报 **49** 1513]
- [14] Liu M H 2006 *Acta Physica Sinica* **55** 336 (in Chinese) [刘明海 2006 物理学报 **55** 336]
- [15] Xiang X D 2001 *Theoty and Technology of Modern Dust Removal* 180—262 (in Chinese) [向晓东 2001 现代除尘理论与技术 第 180—262 页]

Study on measurement of concentration of uni-polarity particles^{*}

Sun Jian[†] Bai Min-Dong Mao Cheng-Qi Bai Xi-Yao

(*Department of Physics, Dalian Maritime University, Key Laboratory of Strong Electronic-Field Ionization Discharge in Liaoning Province, Dalian 116026, China*)

(Received 22 September 2006; revised manuscript received 12 October 2006)

Abstract

At present, the methods using parallel plates and probes for detecting the plasma in the strong field have some limitations in measuring the charged particles produced by gas with high flow rate at atmospheric pressure. In this paper, a new detector with a spherical probe was proposed and was used to measure the charged particle concentration under the conditions of various gas velocities, electric field intensities and distances, as well as to study the spatial distribution of plasma. The result of the new method when was compared with that of DLY air ion detector indicates that the concentration detected by the former is near to the real value. Moreover, the detector with a spherical probe has advantages of as simple operation, small volume and convenience of local test, which contribute to the research of spatial distribution of plasma.

Keywords : plasma, charged particle concentration, strong field discharge, atmospheric pressure

PACC : 5000, 5150, 5200

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60471036).

[†] E-mail : shuizi314@sina.com