

# 微小碎片加速器同轴枪内等离子体轴向速度研究\*

高著秀<sup>1)†</sup> 冯春华<sup>2)</sup> 杨宣宗<sup>2)</sup> 黄建国<sup>1)</sup> 韩建伟<sup>1)</sup>

1) (中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2011年10月26日收到; 2011年12月21日收到修改稿)

等离子体驱动微小碎片加速器是地面模拟空间微小碎片超高速撞击实验的装置, 决定其加速效果的是加速器同轴枪内等离子体轴向速度. 采用发射光谱法研究等离子体轴向速度随放电电压和工作气体压强的变化关系. 实验结果揭示: 轴向速度随着放电电压的增大线性增加, 随工作气压的增大而缓慢减小, 与数值模拟结果符合. 为进一步提高等离子体轴向速度, 优化加速器提供了可靠依据.

**关键词:** 发射光谱, 碎片加速器, 等离子体, 多普勒频移

**PACS:** 52.65.-y, 52.70.Kz, 96.50.Pw

## 1 引言

等离子体驱动微小碎片加速器是利用等离子体同轴枪放电产生高温、高速、高密度等离子体, 再由该等离子体加速微小固体颗粒 (10—1000  $\mu\text{m}$ ) 至超高速 (1—15 km/s), 用于模拟空间微小碎片撞击效应的地面实验装置<sup>[1-3]</sup>, 其工作原理类似于焦点装置<sup>[4-6]</sup>. 加速器核心部件是同轴枪, 其加速原理为: 高压电容器组向同轴电极施加高压, 使同轴枪内充入的气体脉冲在高压下发生击穿放电, 在内外电极间形成等离子体电流, 与其自身产生的磁场相互作用形成的强大磁压力, 使等离子体向前加速运动; 随后这团等离子体进入锥形压缩线圈, 在线圈中等离子体感应出涡形电流形成指向轴心的磁压缩力, 将等离子体径向压缩, 从而形成高速高密度的等离子体射流; 将置于喷嘴处的微粒瞬间喷出形成超高速微粒. 装置如图1所示. 等离子体同轴枪的工作过程复杂, 影响颗粒速度的因素较多, 包括等离子体源、压缩线圈、喷口形状、颗粒材料、尺寸及放置方式等, 其中同轴枪等离子体源的轴向速度是关键, 但是目前轴向速度与放电条件及

参数的依赖关系尚不明确. 基于以上问题, 考虑到同轴枪等离子体是高压放电产生, 持续时间仅有几十微秒, 无法用静电探针进行诊断, 因此采用具有高灵敏时空响应特性又不介入等离子体环境对其产生干扰的光谱诊断方法<sup>[7,8]</sup>, 通过测量离子谱线的多普勒频移, 探索等离子体轴向速度与放电电压和工作气体压强之间的关系, 并结合理论分析和数值模拟, 寻求优化实验装置的有效途径.

## 2 数值模拟

同轴枪等离子体放电过程由4个阶段组成: 击穿阶段、轴向加速阶段、径向箍缩阶段和崩溃阶段. 影响碎片加速效果的主要是轴向加速阶段, 在此阶段等离子体片在洛伦兹力作用下沿轴向加速, 如图2. 此时等离子体运动方程可以用雪耙模型描述. 根据雪耙模型的假设, 等离子体层中所扫过的气体分子被全部电离, 并随等离子体层一起以同样的速度运动, 等离子体的质量在不断增加. 由于驱动等离子体运动的力是洛伦兹力, 因此等离子体鞘层 (圆环) 是空间位置  $(r, z)$  的函数.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10875167) 资助的课题.

† E-mail: gzx018@sohu.com

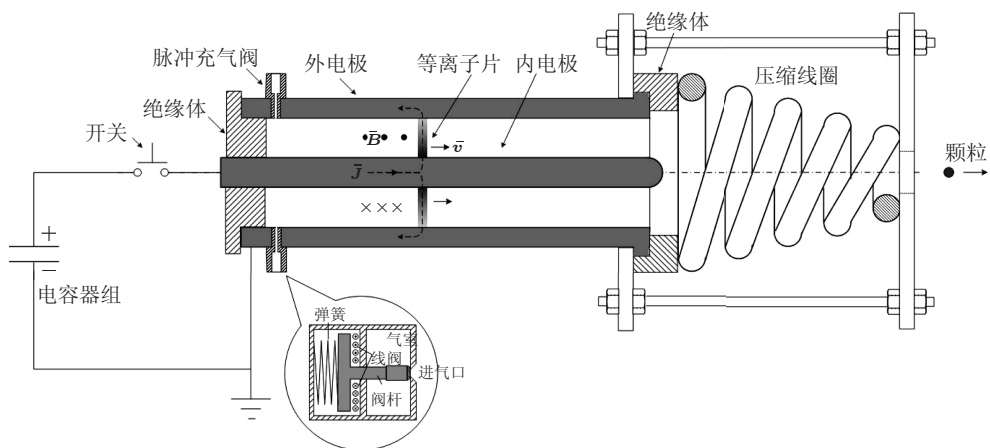


图1 装置示意图

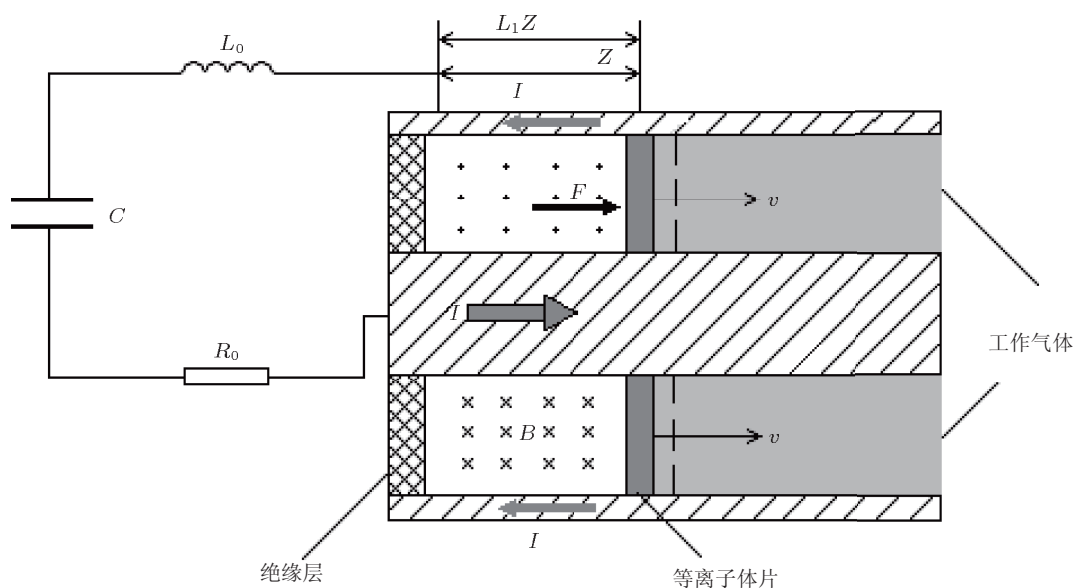


图2 同轴枪物理模型

等离子体片的运动方程为

$$\rho_0 \pi (b^2 - a^2) \frac{d}{dt} \left( z \frac{dz}{dt} \right) = \frac{\mu I_p^2}{4\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right), \quad (1)$$

式中  $t$  是时间 (s);  $z$  是等离子体片运动的位移 (m);  $I_p$  是等离子体放电电流 (A);  $a$  是同轴枪内径 (m);  $b$  是同轴枪外径 (m);  $\rho_0$  是等离子体密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu$  是真空磁导率 ( $\text{N/A}^2$ ).

在不计等离子体电阻情况下 ( $R_p \approx 0$ ) 有如下回路方程:

$$(L_0 + L_p) \frac{dI_p}{dt} + I_p \frac{dL_p}{dt} + R_0 I_p = V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t I_p dt, \quad (2)$$

式中  $C_0$  是电容量 (F);  $V_0$  是充电电压 (V);  $R_0$  是外回路电阻 ( $\Omega$ );  $L_0$  是外电路电感 (H). 方程 (1), (2)

是一个耦合方程组, 在描述运动的方程中受制于放电电流, 而在描述回路的方程中又受运动位置和等离子体片速度的影响.

对方程 (1) 和 (2) 进行变量代换, 方程组可整理为

$$\begin{cases} [L_0 + k_2 z] \frac{d^2 q}{dt^2} + [R_0 + b \frac{dz}{dt}] \frac{dq}{dt} \\ + (1/C) q - V_0 = 0 \\ Z \frac{d^2 z}{dt^2} + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 = k_1 \left( \frac{dq}{dt} \right)^2 \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $k_1 = \frac{\mu \ln(b/a)}{4\pi^2 \rho_0 (b^2 - a^2)}$ ,  $k_2 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left( \frac{b}{a} \right)$ . (3) 式中  $q$  是电容器带电量 (C);  $C$  是电容器电容 (F).

利用 MATLAB 解上述微分方程, 输入的参

数为: 同轴枪内径 (直径) 14 mm, 外径 40 mm, 长 15 cm, 电容器电容 64  $\mu\text{F}$ , 外电路电感 132 nH, 外电路电阻  $r$  为 0.01  $\Omega$ , 得到的数值模拟结果如图 3, 图 4. 图 3 为工作气体压强 (1 atm) 不变的情况下, 轴向速度随放电电压的变化, 从数值模拟结果中可以看出, 等离子体轴向速度随放电电压的增加而线性增长. 图 4 为放电电压 (20 kV) 不变的情况下, 轴向速度随工作气体压强的变化. 可以看到, 等离子体轴向速度与工作气体压强成反比关系, 当气体压强大于一个标准大气压时, 轴向速度呈缓慢下降趋势.

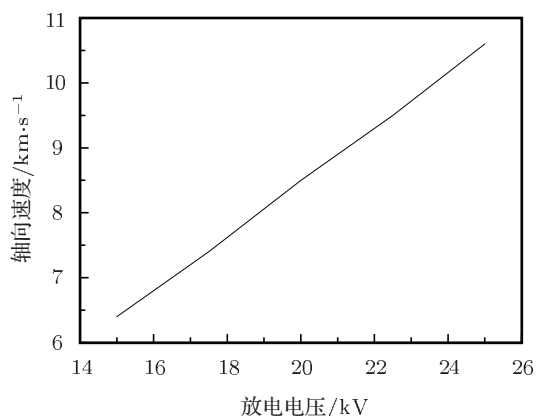


图 3 轴向速度随放电电压变化

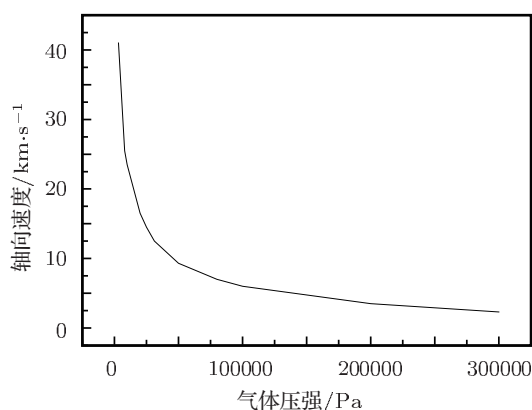


图 4 轴向速度随工作气体压强的变化

### 3 光谱实验

#### 3.1 实验原理

当发光源和受光点二者之间有相对运动时, 受光点得到的光频率和发光源的光频率会有不同, 二

者之差就称为多普勒频移.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{f} &= \frac{f \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} - f \\ &= \frac{\sqrt{c^2 - v^2} - c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} \\ &\doteq \frac{v \cos \theta}{c}, \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中,  $f$  为频率,  $\Delta f$  为频移,  $v$  为光源相对于接收器的移动速度,  $\theta$  为观察点与光源的连线到光源速度方向的夹角.

将 (4) 式转换为波长的变化与速度的关系式为

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v \cos \theta}{c} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (5)$$

(5) 式中,  $\lambda$  为谱线中心波长,  $\Delta \lambda$  为中心波长的变化量.

利用我们装置上与等离子体同轴枪端面平行方向上的玻璃窗口, 在垂直于等离子体定向速度的方向测量离子谱线, 此时  $\theta = 90^\circ$ , 谱线的频移是零. 我们可以此为离子谱线定标, 选定某一特征谱线为研究对象, 根据正面和侧面谱线的频移推算出等离子体轴向速度<sup>[9]</sup>. 由于我们以谱线中心处的频移来推算轴向速度, 因此得到的速度为等离子体的平均速度.

#### 3.2 实验设计

实验原理如图 5. 从同轴枪正面和侧面两路通道采集等离子体发射的光信号, 通过光纤将光信号传输到远离放电装置的光谱仪, 通过触发系统设置适当的延迟时间, 保证光谱仪能够同步接收到光信号, 再由光谱仪配置的 CCD 探测器将光信号转化为电信号输出到计算机系统. 光谱测量采用 HORIBA Jobin Yvon 公司生产的 iHR550 型成像光谱仪, 光谱仪的焦距为 550 mm, 相对孔径为 f/6.4; 成像系统为 TE 制冷型 synapse CCD (1024×256) 面阵. 在 500 nm 处, 用 0.01 mm 狭缝, 2400 gr/mm 光栅, 光谱仪分辨率可以达到 0.0125 nm.

实验中, 我们选择谱线 Ar II 393.25 nm 为目标谱线, 如图 6. 对原始谱线进行高斯拟合, 获得谱线的中心波长, 由正面谱线相对于侧面谱线的频移, 如图 7, 得到等离子体轴向速度. 从图 6 中可以看到正面相对于侧面中心波长的改变量仅为 0.01 nm

左右, 而光谱仪分辨率为 0.0125 nm, 因此我们得到的轴向速度为近似值, 但是不影响对速度随其他因素变化趋势的判断. 另外图中显示同一条谱线正面展宽远大于侧面展宽, 是由于等离子体定向速度正

面分布范围更广, 因此相对于中心频率的频移较宽. 实验中, 由于谱线正面光谱强度远大于侧面光谱, 在拍摄正面谱线的光纤前放置衰减片, 不影响谱线中心位置的确定.

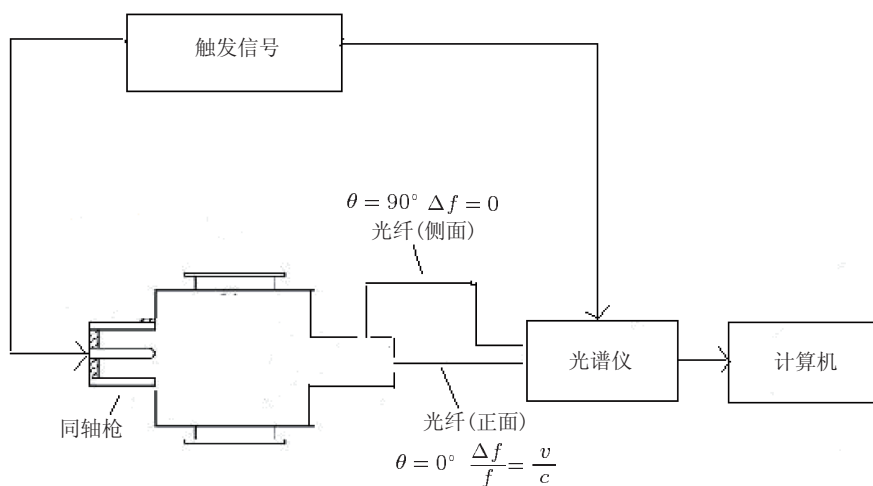


图5 实验设计原理图

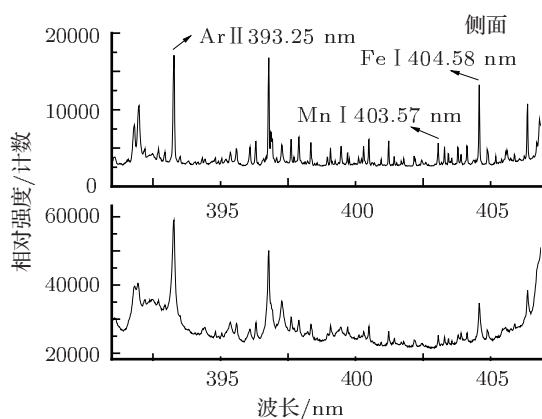


图6 放电电压为 20 kV 时等离子体的正面、侧面谱线对比图

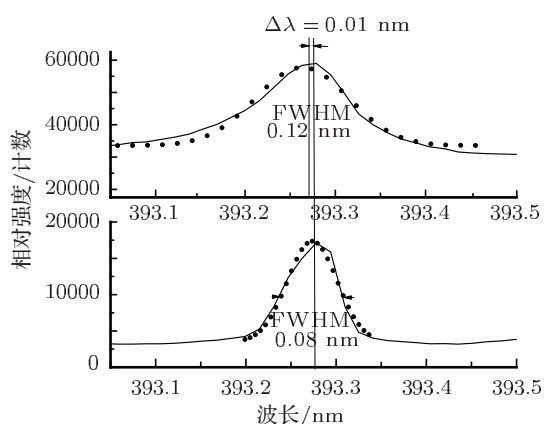


图7 Ar II 393.25 正面侧面谱线展宽对比及频移

### 3.3 实验结果与分析

#### 3.3.1 轴向速度与放电电压的关系

在工作气体压强一定的条件下 (前级气压为 3 个标准大气压, 脉冲充气阀门电压为 1700 V), 改变放电电压, 在 15—25 kV 范围内间隔 5 kV 采集几组光谱数据, 取多组测量的平均值, 由 (5) 式求得等离子体轴向速度. 由于光谱仪有一定的温度漂移,

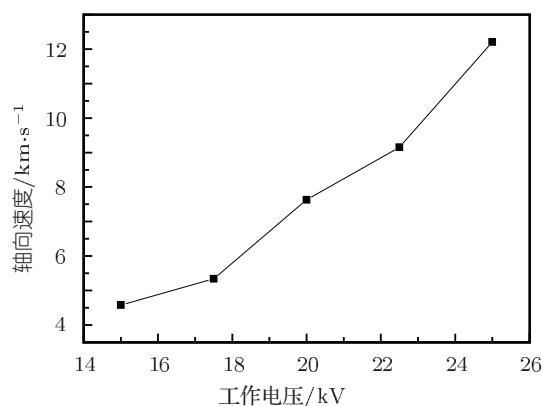


图8 等离子体轴向速度随工作电压的变化

实验中采取缩短采集时间间隔的措施来减小误差. 根据多普勒频移, 测得等离子体的轴向移动速度随放电电压的增加呈线性增长, 如图 8, 表明改变放

电电压可以有效的控制等离子体轴向速度. 对比数值模拟结果与实验结果, 两者的变化趋势是一致的, 但是数值模型中的轴向速度为最大速度, 而光谱实验中为平均速度.

### 3.3.2 轴向速度与工作气体压强的关系

同轴枪内充气的物理过程为: 先给电磁脉冲充气阀门加以一定的电压 (充电电压), 阀门打开瞬间工作气体从前级气室进入同轴枪真空室, 随即圆盘在受压弹簧作用下返回到初始位置, 使阀门关闭. 因此影响同轴枪内工作气体压强的因素有两个: 一个是气室的前级气压, 另一个是充气阀门线圈回路的充电电压 [10]. 图 9 给出了前级气压不变 (2 atm) 的情况下, 充气气压随阀门充电电压的变化, 可以看到在 1400 V 到 1700 V 范围内, 充气气压随阀门充电电压升高而缓慢增大. 图 10 为阀门电压分别为 1400 V 和 1700 V 的情况下, 气室前级气压对充入同轴枪真空室内气体气压的影响, 结果表明充气气压随前级气压单调增加.

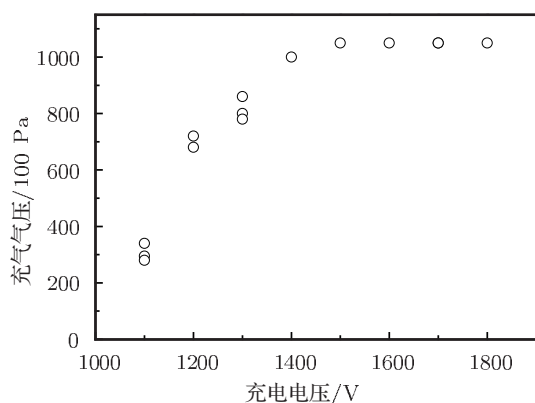


图 9 充气气压随阀门充电电压的变化

为研究工作气体压强对轴向速度的影响, 固定放电电压 (20 kV) 和充气阀门电压 (1700 V), 改变气室前级气压, 在 1—3 atm 范围内间隔 0.5 atm 采集光谱数据, 由频移推算得到等离子体轴向速度随前级气压的变化结果如图 11 所示. 表明在此气压范围内, 轴向速度随前级气压的增大呈缓慢下降趋势, 气体压强的改变对等离子体轴向运动速度的影响不明显.

在气室前级气压保持不变的条件下, 改变充气阀门上的工作电压来改变进入同轴枪内的工作气体压强. 实验中, 气室前级气压为 3 atm, 放电电压为 20 kV, 在阀门工作电压范围内 (1400 V—1700 V), 间隔 100 V 采集光谱数据, 结果如图 12 所示. 由

前面分析可知随着充气阀门电压的升高, 同轴枪内气压也随之缓慢增大, 此时同轴枪内工作气体压强在 1 atm 左右, 从图中可以看到等离子体轴向速度随着气压升高而缓慢下降, 与数值模拟 (图 4) 结果相符. 说明日常选择的气压范围不是等离子体速度的敏感变化范围.

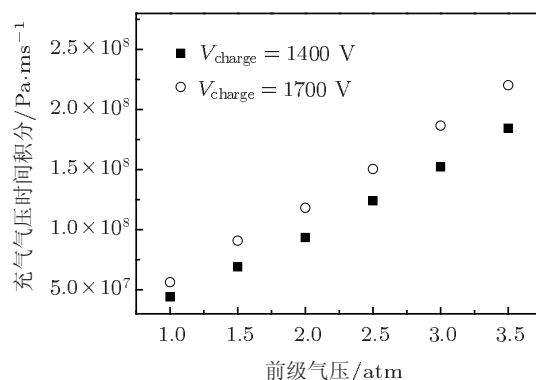


图 10 充气气压随气室前级气压的变化

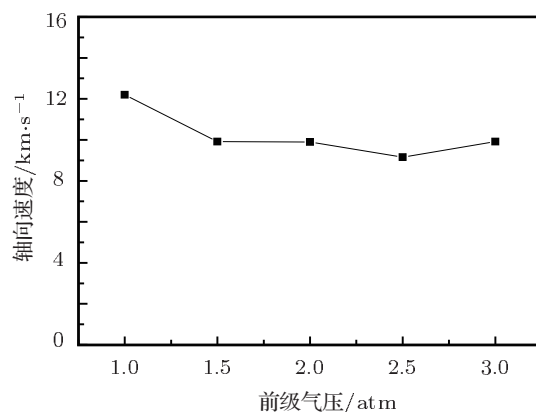


图 11 等离子体轴向速度随工作气体前级气压的变化

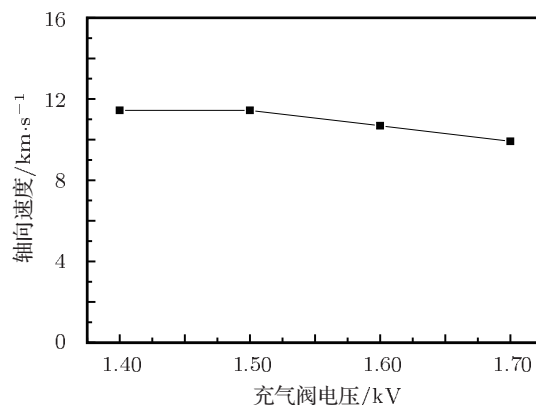


图 12 等离子体轴向速度随充气阀电压的变化

## 4 结论

本文利用发射光谱法, 研究加速器同轴枪在不同放电电压和工作气体压强时等离子体轴向速度的变化. 结果表明: 轴向速度随放电电压单调增加, 而工作气体压强的改变对轴向速度影响不明显, 与数值模拟结果相符合, 因此由放电电压可以有效控制等离子体轴向速度. 研究结果显示目前等离子体

轴向速度较低, 是由于工作气体压强过高, 基本在一个大气压以上, 另外, 由于微粒加速效果跟等离子体的轴向动量直接相关, 如果气体密度较大, 则等离子体速度较低. 气体密度变小, 虽然速度有所提高, 但是等离子体质量变小, 因此必须找到两者的最佳结合点来获取最大的等离子体轴向动量, 还可以考虑选择合适的进气模式, 例如静态充气模式, 来寻找最佳工作气压值, 优化加速效果.

- [1] Igenbergs E B, Shriver E L 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 2177
- [2] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7950 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 蔡明辉, 李小银 2008 物理学报 **57** 7950]
- [3] Li H W, Han J W, Huang J G, Cai M H, Li X Y, Gao Z X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1385 (in Chinese) [李宏伟, 韩建伟, 黄建国, 蔡明辉, 李小银, 高著秀 2010 物理学报 **59** 1385]
- [4] Soto L 2005 *Plasma Physics and Controlled Fusion* **47** A361
- [5] Silva P, Moreno J, Soto L, Birstein L, Mayer R E, Kies W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3269
- [6] Shafiq M, Hassan M, Shahzad K, Qayyum A, Ahmad S, Rawat R S, Zakaullah M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 012801
- [7] Niu T Y, Cao J X, Liu L, Liu J Y, Wang Y, Wang L, Lü Y, Wang G, Zhu Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2330 (in Chinese) [牛田野, 曹金祥, 刘磊, 刘金英, 王艳, 王亮, 吕铀, 王舸, 朱颖 2007 物理学报 **56** 2330]
- [8] Li X C, Yuan N, Jia P Y, Chang Y Y, Ji Y F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034216 (in Chinese) [李雪辰, 袁宁, 贾鹏英, 常媛媛, 嵇亚飞 2011 物理学报 **60** 034216]
- [9] Xiang Z L, Yu C X 1982 *High-Temperature Plasma Diagnostic Techniques* (1st Vol.) (Shanghai: Shanghai Science and Technology Press) p84 (in Chinese) [项志遴, 俞昌旋 1982 高温等离子体诊断技术 (上册)(上海: 上海科学技术出版社) 第 84 页]
- [10] Feng C H, Fang T Z, Wang L, Yang X Z, Huang J G, Chen C F, Han J W, Sun Y C 2011 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **31** 181 (in Chinese) [冯春华, 房同珍, 王龙, 杨宣宗, 黄建国, 陈朝峰, 韩建伟, 孙远程 2011 核聚变与等离子体物理 **31** 181]

# Research on plasma axial velocity generated by small debris accelerator coaxial gun\*

Gao Zhu-Xiu<sup>1)†</sup> Feng Chun-Hua<sup>2)</sup> Yang Xuan-Zong<sup>2)</sup>  
Huang Jian-Guo<sup>1)</sup> Han Jian-Wei<sup>1)</sup>

1) (*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 26 October 2011; revised manuscript received 21 December 2011)

## Abstract

“Plasma driven micro-particle accelerator” is a ground device for simulating impact effects of small debris in space. The particle velocity is determined mainly by axial velocity of plasma in a coaxial gun. Emission spectrometry is used to study the plasma axial velocity at different voltages and gas pressures. The experimental results indicate that axial velocity increases with the increase of discharging voltage, and doesn't change significantly with the pressure of working gas, which is consistent with the result of numerical simulation. This result is useful to improve the plasma axial velocity further, and provides an experimental basis for optimizing the accelerator.

**Keywords:** emission spectroscopy, debris accelerator, plasma, Doppler drift

**PACS:** 52.65.-y, 52.70.Kz, 96.50.Pw

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10875167).

† E-mail: gzx018@sohu.com