



激波管中的离子采集器



范秉诚 崔季平 何宇中

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文介绍了工作在分子流区域、用克努曾小孔采样、用法拉第筒收集电荷的离子采集器装置及其实验结果,并肯定了这种采集器的优点及实用价值。

一、引言

低密度离化气体电离度的检测方法有很多种,例如电探针、磁探针、微波技术等。De Bore^[1]曾提出过一种离子收集探针的方法,其探针工作在连续流区域中,在收集探针上加足够强的电场,将进入收集探针中的正负电荷收集在不同的电极上。本文采用不同的原理,采集器工作在分子流区域,用克努曾小孔在气流中采样,用一法拉第筒收集电荷。这样做的好处有二:第一,在分子流区域中工作可以减少气动效应(如附面层效应)和在采集器中进行的二次电离反应等。第二,由于我们在进行正激波前驱电离研究中,力图避免探测器本身受到光辐射时引起的光发射影响,所以采集器工作在分子流区域中,照入克努曾小孔以内的光子打在法拉第筒内,二次发射电子将在等电位区域内运动,最后为筒壁吸收而中和掉,对输出无贡献,因而避免了光发射的影响。

二、原理与装置

克努曾小孔采样技术,目前已被广泛采用。在气流中的采样技术,首先由Kantrowitz-Grey^[2]提出,而在以后大为

发展。用一中空的尖锥或尖楔,尖部或刃部开有克努曾数大于1的边缘尖锐的小孔,在外形上要避免口部的前方出现脱体激波,则可以用来实现无干扰采样,按自由分子流理论^[3],进样流

$$I = \frac{1}{4} A e n_i \bar{c} f(s) \quad (1)$$

$$f(s) = e^{-s^2} + \sqrt{\pi} S (1 + erf s) \quad (2)$$

$$S = \frac{u}{c} = \sqrt{\frac{\gamma}{2}} M$$

其中A为小孔面积, n_i 为*i*种离子的数密度, \bar{c} 为气体分子平均热运动速度,

$$c = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad u \text{ 为气流整体运动速度, } M \text{ 为气流马赫数。}$$

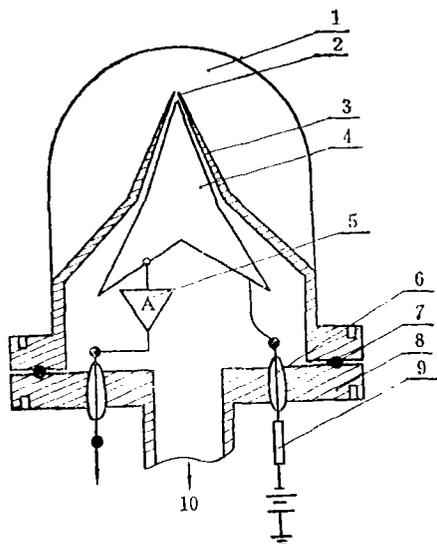
对于正激波后和正激波前,我们分别有

$$I = \begin{cases} A n_i e u & \text{当 } S \gg 1 \text{ (3.1)} \\ (1/4) A n_i \bar{c} & \text{当 } S \ll 1 \text{ (3.2)} \end{cases}$$

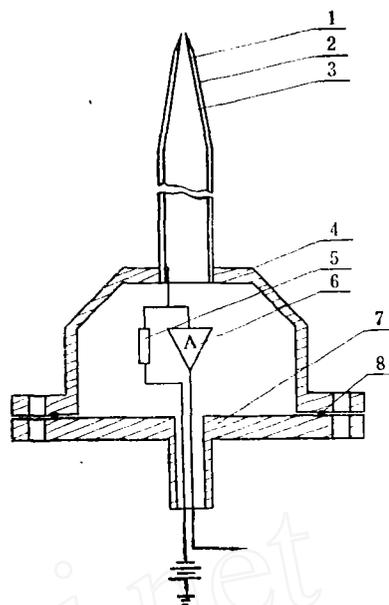
我们进行了两种离子采集器的研制。

第一种,利用本实验室小型质谱计的采样头,其结构为金属尖楔,内张角为 50° ,用一扩散泵抽空,尖楔处的抽速为 10^7 升/秒,采集器内部真空度比外部低两个量级。小孔开在尖楔的刃部,面积为 1×10^{-4} 厘米²,采样器内部装有斗形法拉第筒(如图1),法拉第筒负压偏置, $V = -16.5$ 伏,用

-R=100 千欧的接收电阻,经装在采集器内部的射极输出器输出。第二种采集器(如



1 尖锥形离子采集器
1—导流片 2—入口小孔 3—楔形罩
4—法拉第筒 5—放大输出级
6—绝缘子 7—密封圈 8—法兰
9—偏压电阻 10—抽气管道



2 尖锥形离子采集器
1—玻璃尖锥 2—涂银屏蔽层
3—涂银层(收集极) 4—真空室
5—偏压电阻 6—放大输出级
7—固定法兰 8—密封圈

图 2), 由一个玻璃管控制而成的尖锥和后面一个真空室组成, 采样孔开在尖锥的顶部, 面积为 4×10^{-4} 厘米², 采样器的内壁烤涂一层银浆作为法拉第筒, 外壁烤涂一层银浆并接地作为静电屏蔽。法拉第筒的接收电阻分为三档: 一为低阻, 可直接输出; 二为 100 千欧, 由射随器输出; 三为 1 兆欧, 由源极输出器输出。

用前述两种离子采集器进行了激波管中氩气和空气的前驱电离的测量。对于前驱电离, $u=0$, 用(3.2)式处理数据。用第二种离子采集器测量前驱电离时, 由于前驱电离的电子密度比较低, 所以有较大的 Debye 屏蔽长度, $d \approx 2 \times 10^{-4}$ 厘米, 离子采集器口外将出现一个空间电荷效应鞘层, 按 Child 定律, 对于平板问题, 空间电荷鞘层厚度

$$X - X_0 \approx d \left(\frac{e\Phi}{kT_0} \right)^{3/4} \quad (4)$$

其中 d 为 Debye 屏蔽长度, Φ 为偏置电位, 在前驱电离情况下, 离子温度 T_0 为室温, 此时, $X - X_0$ 之值与口部的入口直径相比不能忽略, 因此, 这一空间电荷鞘层的影响应当计入。采用一简化模型, 认为这一渗出空间电荷鞘层是半球形, 其

球半径为 $d \left(\frac{e\Phi}{kT_0} \right)^{3/4}$, 那么(1)式中的

面积 A 应为半球表面积 $S_{半球}$:

$$S_{半球} = 2\pi \left[d \left(\frac{e\Phi}{kT_0} \right)^{3/4} \right]^2 \quad (5)$$

应当注意到, Child 定律有比较好的物理基础, 我们这里采用的近似, 是由于空间位形上的简化, 可能鞘层外表形状不是半球, 但鞘层的因次为长度, 而沉积区外表面的因次为长度平方, 使用半球模型

可能差一个常数因子。其次要指出的是，在我们讨论的范围内，仍然在自由路程大于或近于鞘层厚度范围之内工作，因而离子进入电场后一次被接收，而无需考虑碰撞的影响，所以用面积 $S_{\text{非区}}$ 代替面积 A 后，可直接用 (3.2) 式进行数据处理。

同时，我们用离子采集器记录了空气激波后的离子浓度^[5]。对于波后的问题，离子采集器的工作特性不同于波前，波后气体温度比波前高一个量级，(4) 式中显含一个因子 $T^{-1/2}$ ，它直接影响空间电荷鞘层的大小，而在 Debye 屏蔽长度的表达式中， $d = 6.9 T^{1/2} n_e^{-1/2}$ ，显含 $T^{1/2}$ 和 $n_e^{-1/2}$ 因子，由于激波压缩，波后比波前浓度大一个量级。由波后温度升高，平衡电离程度将随之呈指数升高，离子浓度将进一步增大。综合起来看，Debye 屏蔽长度至少比波前低一个量级以上。实地计算表明，渗出空间电荷鞘层厚度变得可以不计。那么对于波后离子浓度的测量，在 (1) 式中， A 仍为入口的几何面积。在我们的实验中，波后气流马赫数大于 1.8，因此 $s > 1.5$ (如图 3)，所以对于正激波后离子浓度的测量，用 (3.1) 式处理数据，就能相当好地满足。

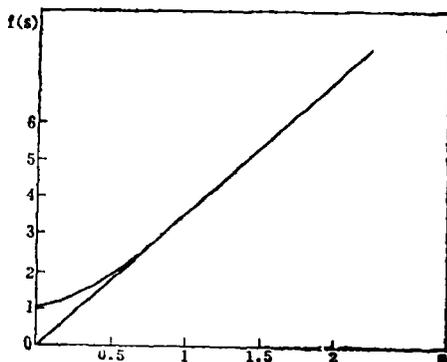


图 3 入口特性

三、实验结果

用离子采集器在 $\phi 800$ 毫米激波管中进行了氩气和空气正激波前驱电离和波后离子浓度的测量。

(1) 在起始压力 $P_1 = 17.3$ 帕 (1.3×10^{-1} 托) 和 $P_1 = 2.5$ 帕 (1.9×10^{-2} 托)、激波马赫数 $M_s = 11-15$ 范围内，测定了空气正激波后离子浓度 n_e ，将波后离子

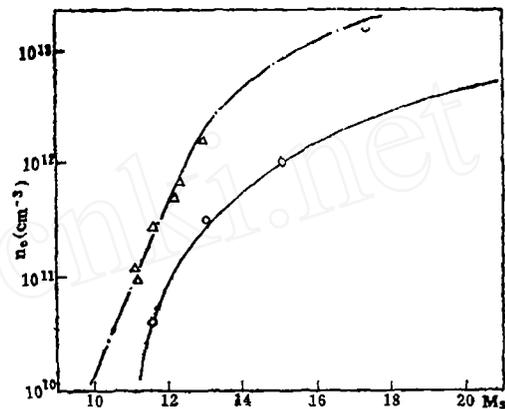


图 4 空气正激波后 $n_e \sim M_s$ 的关系
理论值^[6] — — 17.3 帕 — 2.5 帕
实验值 Δ — 17.3 帕; \circ — 2.5 帕

浓度随激波马赫数的变化画在图 4 中，同时画出了 ПредБодитеЛев 等^[6] 的理论计算结果，彼此之间合理地一致。

(2) 在起始压力 $P_1 = 17.9$ 帕和 $P_1 = 2.0$ 帕两种压力范围内进行了空气正激波前驱电离的测量。波前前驱电离的外形如图 5。我们把激波层看成厚度为 L ，半径为 R ，体发射强度为 I 的透明盘状体发射体，那么辐射通量密度 $J_B(x)$ 为：

$$J_B(x) = \frac{I}{2} R \left\{ (1 + \xi^2)^{1/2} - \left[1 + (\xi_0 + \xi)^2 \right]^{1/2} + \xi_0 \right\} \quad (6)$$

其中, $\xi = \frac{x}{R}$, $\xi_0 = \frac{L}{R}$, x 为测

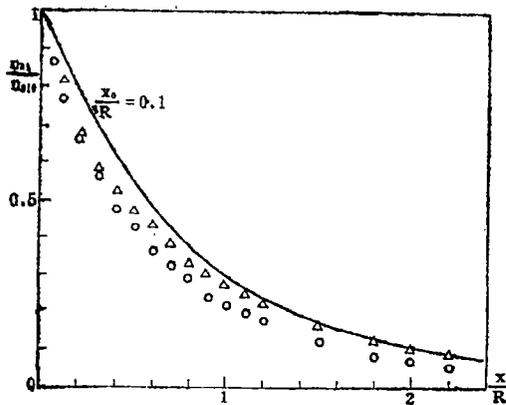


图5 前驱电离外形。实线为(6)式 R 为管半径, x 为测点到波面距离

○ — $P_1 = 17.9$ 帕 △ — $P_1 = 2.0$ 帕

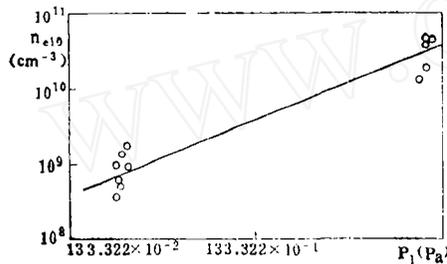


图6 空气正激波前驱电离离子化最大值与起始压强的关系 ($T_a = 16000$ K)

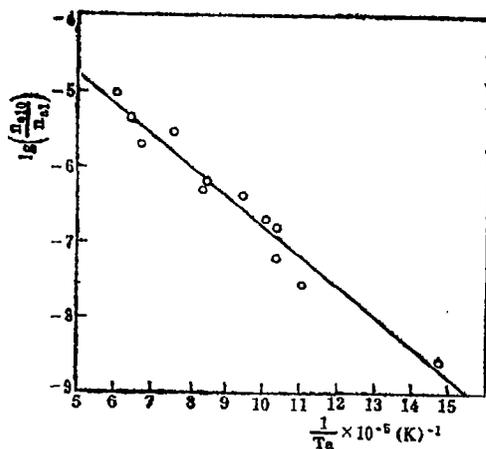


图7 空气前驱电离波面处的电离度与波后冻结温度 T_a 的关系 ($P_1 = 6.7$ 帕)

点到波面的距离。图5中的实线就是(6)式的曲线形式,由图可看出,对于空气,离子浓度随距激波距离的变化与辐射场分布相近。图6示出了空气前驱电离离子化最大值与起始压强的关系,它们成一次方关系。用 $\lg(n_{e10}/n_{a1}) \sim T_a^{-1}$ 作图,见图7,其中 n_{a1} 为波前起始状态下的分子数密度, n_{e10} 为前驱电离离子的数密度, T_a 为波后冻结温度,这一图呈 Arrhenius 型,测定得到激活能为 7.9 电子伏特。

四、结 论

采用工作在自由分子流区域的离子采集器,在动态气流中采样,可以免去激波、边界层等在连续介质中出现的复杂问题,并由小孔的动态进样特性直接测得离子浓度。对于波前前驱离子化问题,它可以避免光发射的影响。

对于激波后离子化空气离子浓度的测量,与理论预期达到合理的一致。前驱电离的电离度与压强成一次方关系。考虑前驱离子化度与激波强度的关系,得到离子化度与波后冻结温度呈 Arrhenius 关系,激活能测定值为 7.9 电子伏特。

参 考 文 献

- [1] De Beer, P. C. T.; *Rev. Sci. Instr.* 37 No. 6, 1966: 775.
- [2] Kantrewitz, A., & Grey, J.; *Rev. Sci. Instr.* 22 (1951): 323.
- [3] Petterson, G. N.; *Molecular Flow of Gases* (1956) Chapman & Hall Chap. 5.
- [4] Sutton, G. W. & Sherman, A.; *Engineering Magnetohydrodynamics*, MCCRAW-HILL (1965) 105
- [5] 程季平等; *力学学报*, Vol. 16, No. 1, 81 (1984).
- [6] А. С. прензентелев; *Таблицы Термодинамических Функций Воздуха*, Анссер Москва (1962).