

郭永怀先生牺牲 50 周年纪念专刊

一个改进的电磁波传输激波管实验¹⁾熊 壮^{*,†} 张勇勇^{*,†} 王 苏^{*,†,2)} 李进平^{*} 陈 宏^{*,†} 范秉诚^{*} 崔季平^{*}^{*}(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)[†](中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 在中国科学院力学研究所 $\Phi 800\text{ mm}$ 高温低密度激波管上进行电磁波在等离子体中传输机理研究时, 低密度和强激波条件下, 由于气体解离和电离等非平衡过程, 使得激波后 2 区宽度显著减小; 同时由于边界层效应造成激波衰减和接触面加速, 使得激波后 2 区长度进一步减小. 这两个效应导致激波管 2 区实验观测时间减小, 2 区气体处于非平衡状态, 增加了观察数据的不稳定性和数据分析的难度. 本文提出在 $\Phi 800\text{ mm}$ 高温低密度激波管中采用氩气 (Ar) 和空气 (Air) 混合气替代纯空气作为激波管实验介质气体. 利用 Ar 不解离和难电离的特性, 减小激波前后压缩比, 从而增加激波后 2 区实验时间和气体长度. 采用 Langmuir 静电探针和微波透射诊断技术测量激波后电子密度, 同时利用探针测量激波后 2 区实验时间. 结果显示, 在 Ar+Air 混合气实验中, 激波波后电子密度可达与纯 Air 同样的 10^{13} cm^{-3} 量级. 在与纯 Air 相同的电子密度和碰撞频率条件下, 采用 95%Ar+5%Air 和 90%Ar+10%Air 两种混合气, 激波后 2 区实验时间和气体长度约为纯 Air 条件下的 5~10 倍, 其中 2 区实验时间为 300~800 μs , 2 区气体长度 1~1.5 m. 在 $\Phi 800\text{ mm}$ 激波管中采用 Ar+Air 介质气体进行电磁波传输实验, 获得了比在纯 Air 介质中与理论预测更一致的结果.

关键词 激波管, 等离子体, Langmuir 静电探针, 微波透射诊断

中图分类号: O354.7, O53 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-18-284

AN IMPROVED EXPERIMENT FOR ELECTROMAGNETIC WAVE TRANSMISSION IN SHOCK TUBE¹⁾Xiong Zhuang^{*,†} Zhang Yongyong^{*,†} Wang Su^{*,†,2)} Li Jinping^{*} Chen Hong^{*,†} Fan Bingcheng^{*} Cui Jiping^{*}^{*}(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)[†](School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the study of the transmission mechanism of electromagnetic wave in plasma in $\Phi 800\text{ mm}$ high temperature and low density shock tube in the Institute of Mechanics, CAS, under conditions of low density and strong shock, the experimental time at region 2 behind shock is significantly reduced due to the non-equilibrium processes such as gas dissociation and ionization. At the same time, the boundary layer effect leads to both the attenuation of the shock wave and the acceleration of the contact surface towards the shock front. Therefore, the experimental time at region 2 will be further reduced. These two effects lead to the reduction of the experimental observation time and the non-equilibrium state of test gas at region 2, resulting in the instability of data observation and the difficulty of data analysis. A mixture of argon and air is used to replace the pure air as the experimental test gas in $\Phi 800\text{ mm}$ shock tube. Since argon does not dissociate

2018-08-31 收稿, 2018-11-15 录用, 2018-11-15 网络版发表.

1) 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室资助项目.

2) 王苏, 研究员, 主要研究方向: 高温气体特性激波管实验. E-mail: suwang@imech.ac.cn

引用格式: 熊壮, 张勇勇, 王苏, 李进平, 陈宏, 范秉诚, 崔季平. 一个改进的电磁波传输激波管实验. 力学学报, 2018, 50(6): 1328-1336
Xiong Zhuang, Zhang Yongyong, Wang Su, Li Jinping, Chen Hong, Fan Bingcheng, Cui Jiping. An improved experiment for electromagnetic wave transmission in shock tube. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1328-1336

and is difficult to ionize, the compression ratio of shock is significantly reduced, thereby the test time and the gas length at region 2 are largely increased. The electron densities behind shock were measured with both the Langmuir electrostatic probe and the microwave transmission attenuation method. Meanwhile, the test times at region 2 were measured with the Langmuir probe. The results show that the electron densities in the mixtures of argon and air are in the same order of 10^{13}cm^{-3} as in the pure air. Under the same electron density and collision frequency conditions, the test times and the gas lengths at region 2 in two mixtures of 90%Ar+10%Air and 95%Ar+5%Air are about 5-10 times than those in the pure air. The test times at region 2 are about 300~800 μs , and the gas lengths at region 2 are about 1-1.5 meter. In electromagnetic wave transmission experiments in $\Phi 800\text{mm}$ shock tube by using the argon and air mixture as the test gas, the results are more consistent with the theoretical prediction than those in the pure air.

Key words shock tube, plasma, Langmuir electrostatic probe, microwave transmission diagnosis

引 言

高超声速飞行器再入大气层时, 由于激波压缩和粘性阻滞产生高温, 导致空气中的气体分子振动激发、发生解离及电离过程. 当飞行器耐热材料烧蚀时, 烧蚀产物中还包含一些影响空气电离的物质, 使飞行器周围形成一个由电子、正负离子和中性粒子组成的等离子鞘层. 等离子鞘层能够对通过的电磁波产生衰减和反射等作用, 甚至导致飞行器通信中断产生“黑障”现象^[1-9]. 随着在临近空间高超声速飞行器的不断发展, 电磁波在等离子体中传输机理研究受到更多的重视.

电磁波在等离子体中传输机理研究除了理论分析和模拟计算, 大量通过地面模拟设备进行等离子体参数诊断和电磁波传输特性实验研究. Boyer 等^[10-11]利用多路面状探针对高超声速激波风洞平板模型周围的电离鞘层进行了实验研究, 获得了面状探针电子密度测量的经验公式. Chadwick 等^[12]在 Calspan 高超声速激波风洞上开展了高超声速飞行器等离子体鞘套对射频微波传输特性影响的实验研究. Destler 等^[13]在等离子体中利用 10GHz 高功率微波脉冲研究了电磁波在等离子体中衰减现象. 国内多个单位也开展了相关实验研究^[14-18].

激波管是一种可以获得高温等离子体的地面模拟设备, 利用气动方法可以方便地改变等离子体参数. 中国空气动力研究与发展中心的马平等^[19]在 $\Phi 80\text{mm}$ 激波管上开展了电磁波在等离子体气体中传输特性的实验研究, 获得了等离子体气体中的电磁波透射率、电子密度和碰撞频率的关系. 于哲峰等^[20]特别针对薄层等离子体中电磁波传输特性在激波管上进行了详细研究. 竺乃宜等^[21]在力学研究所 $\Phi 800\text{mm}$ 低密度高温激波管上, 实验获得了电磁波

在等离子体中衰减系数与电子密度、碰撞频率、电磁波工作频率、等离子体厚度之间关系. 结果表明, 当碰撞频率较小和高电子密度时, 电磁波衰减系数激波管实验值远小于理论计算值.

采用 $\Phi 800\text{mm}$ 高温低密度激波管进行在空气介质等离子体中电磁波传输实验研究时, 在低密度和强激波条件下, 由于真实气体效应和边界层效应, 激波后 2 区气体实验时间和长度显著减小. 特别是在为了获得高电子密度的强激波条件下, 2 区气体实验时间小于 100 μs , 2 区气体长度只有 10cm 量级. 即使采用电磁波聚焦天线的情况下, 电磁波束斑直径为 5~10cm, 已经与 2 区气体长度相当, 并且其中非平衡的松弛区占比很大, 激波管这种实验状态已经难以用于电磁波传输实验.

本研究提出在激波管实验中不采用纯空气作为实验介质, 而是在大量氩气 (Ar) 中掺入少量空气, 以此混合气体作为激波管实验介质气体. 利用 Ar 不解离和难电离的特性, 使得激波前后压缩比从空气的 10~20 减小到 Ar 的 5 左右, 从而增加激波后 2 区气体长度和 2 区实验时间. 同时大量 Ar 存在增加了分子之间的碰撞效率, 有利于在激波后空气快速达到解离和电离平衡. 在与纯空气实验相同的空气初压下加入了大量 Ar 后, 提高了激波管运行压力, 减小了管壁边界层厚度, 从而提高了激波管实验区流场品质. 因此, 本文提出在大量 Ar 中添加少量空气作为 $\Phi 800\text{mm}$ 激波管的工作介质, 期望能够达到与纯空气接近的电子密度, 并在提高激波后 2 区气体长度和实验时间的条件下进行电磁波传输实验.

首先在 $\Phi 800\text{mm}$ 低密度高温激波管上, 对 Ar+Air 混合气的电离特性进行研究. 采用 Langmuir 静电探针和微波透射诊断技术测量激波后 2 区电子

密度和 2 区实验时间, 获得 Ar+Air 混合气激波后 2 区电子密度、2 区实验时间与激波 Mach 数、气体初始压力、混合气体中 Air 比例之间的关系, 并与纯 Air 介质进行比较. 在此基础上, 采用 Ar+Air 混合气代替空气作为实验气体, 在 $\Phi 800$ mm 高温低密度激波管进行电磁波传输实验.

1 实验

实验在中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室 $\Phi 800$ mm 高温低密度激波管上进行. 激波管高压段长 1.6 m、内径 220 mm, 低压段长 18 m、内径 800 mm, 低压段中充入 Ar+Air 混合气. 低压实验段极限真空度达到 10^{-5} Torr, 漏率不大于 0.01 Torr/h. 激波运行速度通过安装在低压段管壁不同位置的电离探针进行测量, 实验装置示意图如图 1 所示.

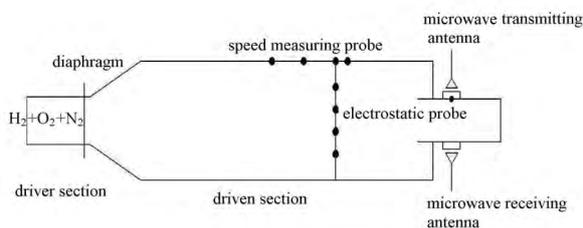


图 1 $\Phi 800$ mm 激波管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the $\Phi 800$ mm shock tube

在距离激波管膜片下游 14.3 m 同一轴向的不同径向位置处放置 4 个铂铱合金探针, 其中 Pb1 和 Pb2 探针直径 0.025 mm, Pb3 和 Pb4 探针直径 0.05 mm, 所有探针长度均为 6 mm, 探针水平安装在探针支架上并迎风排列. 为了避免彼此之间的影响, 探针之间距离 80 mm. 为了避免边界层的影响, Pb1 和 Pb4 距离激波管壁超过 250 mm.

在激波管低压段尾部安装了一个 38×38 cm 的矩形截取实验段, 并在侧壁上装有 $\Phi 300$ mm 聚四氟乙烯微波测量窗口, 用于电磁波传输实验. 为了排除激波管壁对电磁波测量的干扰, 在聚四氟乙烯窗口外安装了 $40 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ 的屏蔽舱, 屏蔽舱内衬吸波材料, 将发射天线放置在屏蔽舱内.

选取 95% Ar+5% Air 和 90% Ar+10% Air 两种比例实验气体, 实验气体初始压力为 0.2, 0.4, 0.8 torr (torr=133.322 Pa), 激波马赫数 7~11, 以考察 Ar+Air 混合气电离特性与激波马赫数、初始气体压力的关系.

1.1 Langmuir 静电探针

Langmuir 静电探针是一种经典的等离子体参数诊断方法 [22-25]. 当探针半径远小于气体分子平均自由程, 即探针工作在自由分子流区域时, 探针测量的电流密度与等离子体电子密度存在简单关系. 根据本文实验状态, 激波后气体温度 5 000~6 000 K, 平均分子自由程约为 0.1 mm. 实验探针直径分别为 0.025 mm 和 0.05 mm, 满足探针处于自由分子流工作条件.

实验中探针设置为恒定的负偏置, 探针收集到的是饱和离子电流. 本实验条件下, 激波后 2 区的正离子主要为空气电离的 NO^+ , 其数密度等于电子数密度. 在本实验中探针处于自由分子流区, 同时离子是自由沉积, 根据 Langmuir 探针理论, 探针测量的电流密度 j_i 与气体电子密度 n_e 的关系为 [25]

$$n_e = 9.42 \times 10^{15} T^{-\frac{1}{2}} j_i \quad (1)$$

其中, n_e 单位是 cm^{-3} , j_i 单位是 A/cm^2 . 由于本实验气体含有大量 Ar, 认为波后气体快速处于热平衡, 所以本实验中可以认为平动温度与电子温度相等, 即 $T = T_e$.

图 2 是在 90% Ar+10% Air 介质中, 激波管实验条件 $P_1 = 0.8$ torr, $Ma = 9$, $N_e = 8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 时电子探针信号记录, 横轴是时间 (ms), 纵轴是电子探针电流在采样电阻上的电压信号 (V). 图中显示激波来临时探针信号突升并逐渐升高达到平衡值, 当分界面来临后探针信号消失, 此时间区域为探针测量的 2 区实验时间. 其中 Pb1 和 Pb2 以及 Pb3 和 Pb4 两组尺寸探针信号各自基本吻合. 图中显示 2 区实验时间约为 0.5 ms, 探针信号显示电离平衡区约占 2 区时间的 1/3 至 1/2. 本实验根据探针信号后期平衡值确定激波后的电子密度.

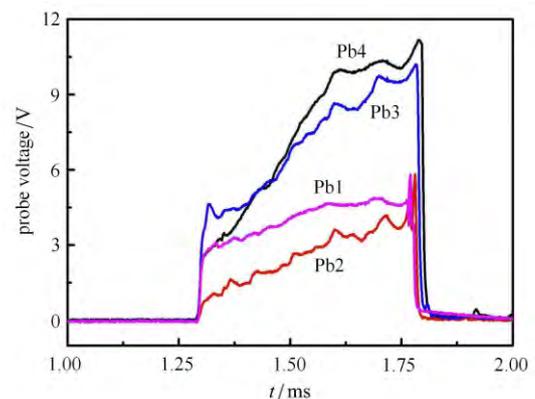


图 2 在 Ar+Air 中 Langmuir 静电探针采集信号

Fig. 2 Signals collecting by Langmuir probes in Ar+Air

图 3 是在 Φ 800mm 激波管中以纯 Air 为介质时，位于激波管实验段同一位置探针测量电子密度的信号记录，激波管实验状态 $P_1 = 0.0165$ torr, $Ma = 21$, $N_e = 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. 图 3 显示，当激波来临时探针信号缓慢增加，到达最大值后又逐渐减小，没有观察到在 Ar+Air 介质中出现的平衡区，2 区实验时间约为 60 μs .

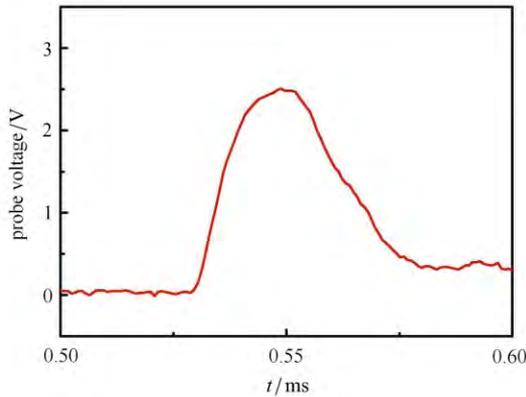


图 3 在 Air 中 Langmuir 静电探针采集信号
Fig. 3 Signals collecting by Langmuir probe in Air

1.2 微波透射诊断

微波透射诊断技术是一种非介入式的测量技术，且微波功率很小，对等离子体状态不产生影响。其原理是通过测量电磁波在等离子体中的衰减值，推算等离子体的电子密度 [26-27].

按照电磁波传输理论，电磁波在尺度足够大且均匀等离子体中的衰减系数

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \left\{ - \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

$$\omega_p = \left(\frac{n_e q^2}{m \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (3)$$

其中， ω 为入射电磁波角频率， ω_p 为等离子体频率， ν 为等离子体中电子与中性分子的碰撞频率。

Ar+Air 混合气体中，电子与中性分子碰撞频率

$$\nu = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_e}} (Q_{Ar} x_{Ar} + Q_{air} x_{air}) \frac{P}{k_B T} = 6.01 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{T}} (Q_{Ar} x_{Ar} + Q_{air} x_{air}) \quad (4)$$

其中， k_B 为玻尔兹曼常数， m_e 为电子质量， Q 为气体的碰撞截面， x 为各组分气体摩尔分数。

本实验激波后温度约为 5000~6000 K. 崔季平等 [28] 在 Φ 800mm 激波管中，通过磁探针实验测得 5000 K 时平衡空气 $Q_{air} = 1.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$. Ar 碰撞频率随温度变化不敏感，采用 Massey 等 [29] 的结果 $Q_{Ar} = 3.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$.

本实验采用安捷伦 N5224A 矢量网络分析仪测量电磁波在激波管 2 区等离子体中衰减，并根据高温等离子体中电子与气体分子的碰撞频率，推出 2 区电子密度. 本实验选择电磁波工作频率为 27 GHz，通过改变激波管初始压力和激波马赫数，获得不同状态参数的等离子体.

2 结果与讨论

2.1 静电探针测量 2 区气体实验时间和长度

实验中改变 Ar+Air 混合气体初始压力、激波马赫数和混合气体组成，采用探针测量激波后 2 区气体电子密度，同时也测量激波后 2 区气体的实验时间和长度. 图 4 为两种实验组成气体激波后 2 区实验时间随马赫数的变化. 图中显示，随着激波马赫数增加，激波后 2 区实验时间逐渐减小；实验气体中空气比例增加，2 区实验时间减小；本文实验中 2 区实验时间约为 0.3~0.8 ms.

利用探针测量 2 区实验时间并计算出 2 区气体速度，即可得出 2 区气体长度. 图 5 为实验气体组成为 90%Ar+10%Air 时，探针测量 2 区气体长度结果. 本文实验中 2 区气体长度约为 1~1.5 m，相比较纯 Air 条件下的 2 区气体长度增加了 5~10 倍.

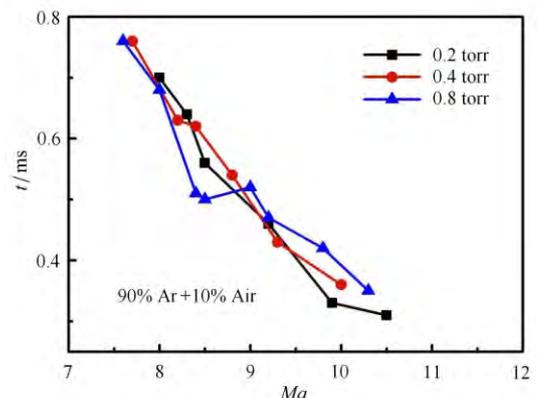
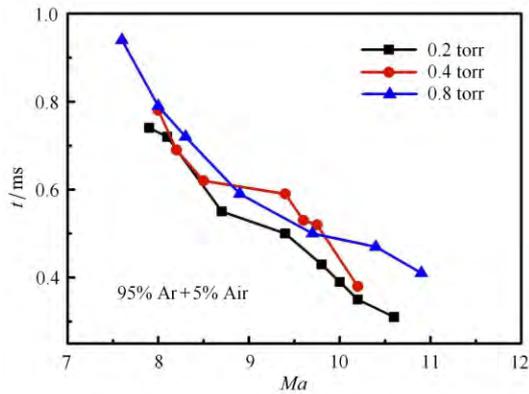


图 4 激波后 2 区实验时间随激波马赫数变化
Fig. 4 Variation of the test time at region 2 behind shock with Mach number



(b)

图 4 激波后 2 区实验时间随激波马赫数变化 (续)
Fig. 4 Variation of the test time at region 2 behind shock with Mach number (continued)

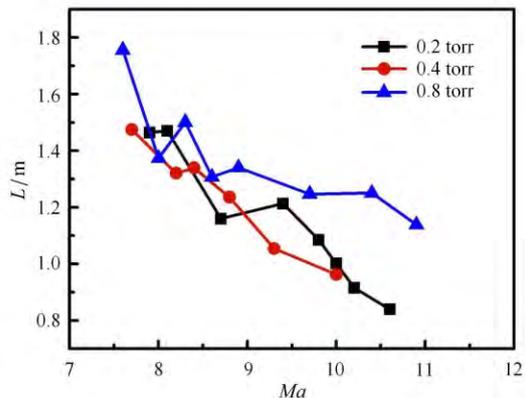
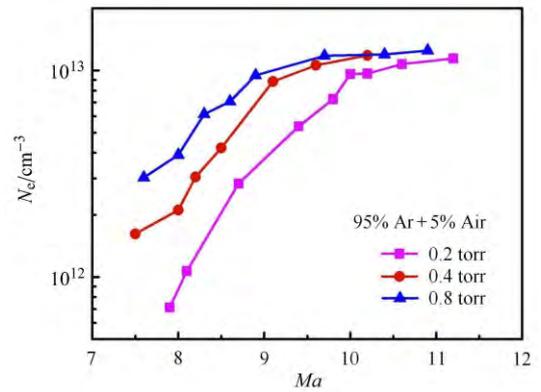


图 5 2 区气体长度随激波马赫数变化

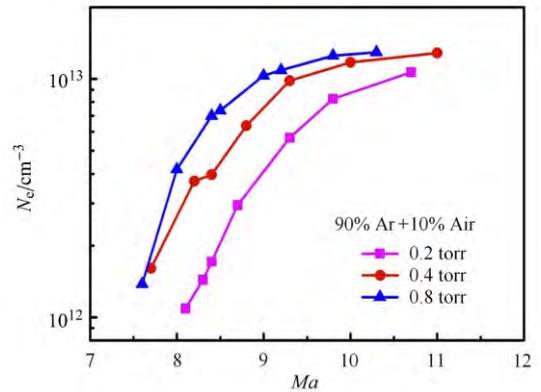
Fig. 5 Variation of the gas length at region 2 with Mach number

2.2 激波后 2 区电子密度

实验中探针测量激波波后 2 区电子密度结果如图 6 所示. 在电磁波频率 27 GHz, 采用微波诊断方法测量电子密度结果如图 7 所示. 图 6 和图 7 都显示, 激波后电子密度随激波马赫数升高而增大, 逐渐趋于一定值. 波后电子密度随气体初始压力升高而增加, 本实验状态下波后电子密度约为 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 量级. Center^[30] 在研究 95%Ar+5%Air 混合气电离特性的激波管实验中, 在 $P_1 = 0.2 \text{ torr}$ 时探针测量波后电子密度约 10^{12} cm^{-3} 量级. 本文通过改变混合气初始压力、混合气组成和激波强度, 获得了 10^{13} cm^{-3} 电子密度, 达到了与纯 Air 电离度相同的电子密度量级.

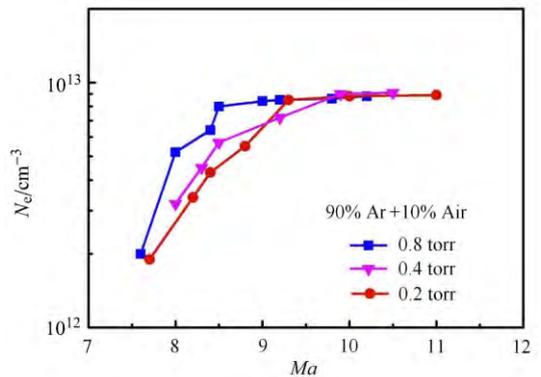


(a)



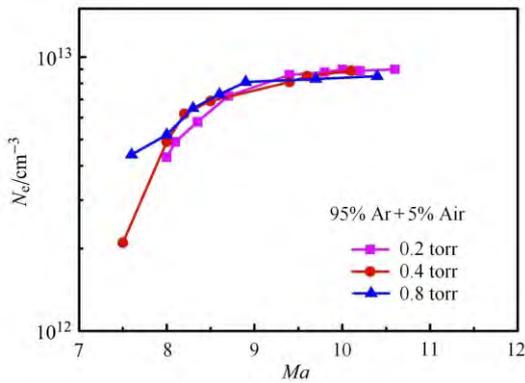
(b)

图 6 Langmuir 探针测量电子密度随激波马赫数变化
Fig. 6 Variation of electron density measured by Langmuir probe with Mach number



(a)

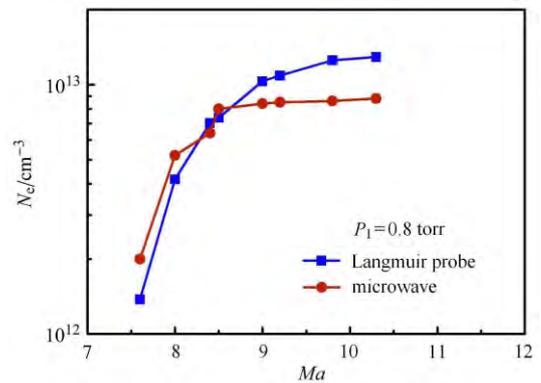
图 7 微波透射测量电子密度随激波马赫数变化
Fig. 7 Variation of electron density measured by microwave transmission with Mach number



(b)

图 7 微波透射测量电子密度随激波马赫数变化 (续)

Fig. 7 Variation of electron density measured by microwave transmission with Mach number (continued)



(c)

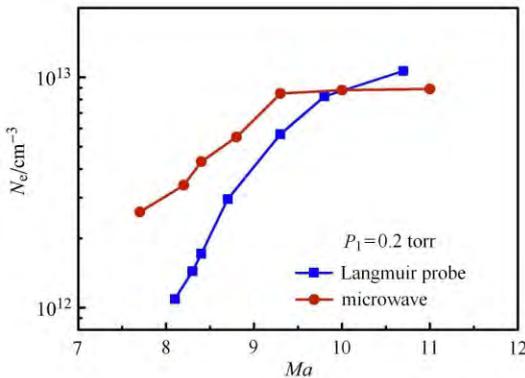
图 8 探针和微波方法测量电子密度结果比较

Fig. 8 Comparison of electron densities measured by the probe and microwave methods

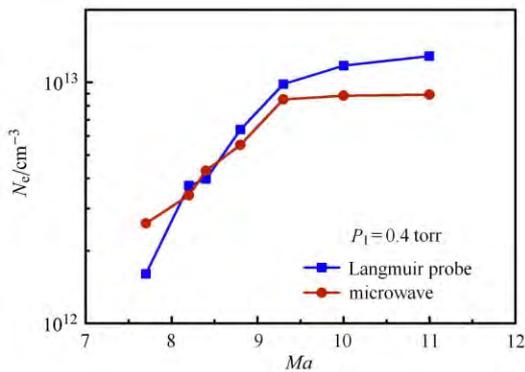
2.3 静电探针与微波透射测量电子密度比较

实验气体组成为 90%Ar+10%Air, Langmuir 静电探针与微波透射两种测量方法获得的电子密度结果对比如图 8 所示.

图中显示, 初始压力 $P_1 = 0.4, 0.8$ torr, 两种测量方法的电子密度在马赫数较小时基本一致. 随着马赫数增大, 微波测量电子密度逐渐接近该微波工作频率对应的截止电子密度而基本保持不变, 而探针测量电子密度缓慢增大. 初始压力 $P_1 = 0.2$ Torr, 低马赫数时微波测量值大约是探针测量值 2 倍左右, 导致这一现象的原因是在较低气体密度时真实气体效应的热非平衡所致. 本文在探针数据分析时, 假定了激波管 2 区气体电子温度基本与重粒子平动温度一致. 在较低气体密度时真实气体效应的热非平衡影响不能忽略. 这种条件下, 需要对探针偏置电压进行扫描, 实验测量电子温度. 在较高气体密度 ($P_1 = 0.4, 0.8$ torr) 和低电子密度时两种方法测量结果一致较好, 验证了实验中近似认为平动温度与电子温度相等的假设.



(a)



(b)

2.4 等离子体参数对比

在 $\Phi 800$ mm 激波管中, 采用本文相同的测量方法, 以 Air 为实验介质, 本实验室进行了大量 Air 电离和电磁波传输实验 [17,25]. 电子密度和碰撞频率是描述电磁波在等离子体中传输性质两个最重要的参数. 本文提出采用 Ar+Air 混合气代替纯 Air 作为激波管实验气体, 需要考察在 Ar+Air 混合气实验条件下是否能够模拟在纯 Air 条件下所产生的等离子体参数. 纯 Air 和 Ar+Air 混合气典型实验状态下等离子体电子密度和碰撞频率值列在表 1 和表 2 中.

通过 Air 与 Ar+Air 两种实验介质气体等离子参数对比, 两种实验气体电子密度最高都可以达到

表 1 Air 等离子体参数

Table 1 Parameters of plasma in air

P_1/torr	Ma	v/s^{-1}	N_e/cm^{-3}
0.022	15.3	1.0×10^9	1.0×10^{12}
0.620	11.7	1.0×10^{10}	1.0×10^{12}
0.020	21.0	1.0×10^9	5.0×10^{12}
0.580	12.3	1.0×10^{10}	5.0×10^{12}
0.017	24.0	1.0×10^9	1.0×10^{13}
0.620	13.2	1.0×10^{10}	1.0×10^{13}

表 2 90%Ar+10%Air 等离子体参数

Table 2 Parameters of plasma in 90%Ar+10%Air

P_1/torr	Ma	v/s^{-1}	N_e/cm^{-3}
0.2	7.7	4.0×10^8	1.0×10^{12}
0.8	7.6	1.0×10^9	1.0×10^{12}
0.2	8.3	4.0×10^8	5.0×10^{12}
0.8	8.0	1.0×10^9	5.0×10^{12}
0.2	10.7	6.0×10^8	1.0×10^{13}
0.8	9.8	2.0×10^9	1.0×10^{13}

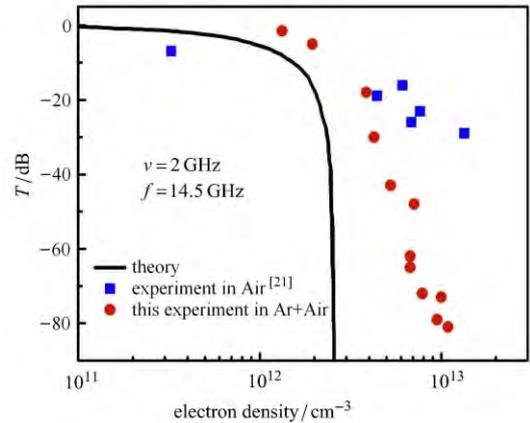
10^{13}cm^{-3} 量级; Air 实验等离子体碰撞频率可以达到 1~10 GHz, 而 Ar+Air 实验碰撞频率最大可以达到 2 GHz. 因此可以采用 Ar+Air 混合气模拟 Air 低碰撞频率状态下的电磁波传输实验.

2.5 在 Ar+Air 混合气中电磁波传输实验

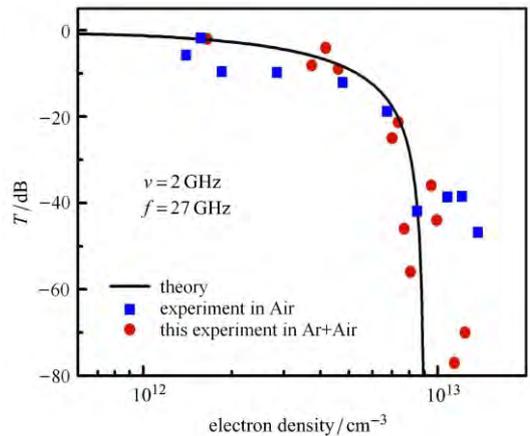
在 $\Phi 800\text{mm}$ 低密度高温激波管 38 cm 厚度的截取实验段中, 以 90%Ar+10%Air 混合气为实验介质气体, 进行了电磁波传输特性的激波管实验, 采用 Langmuir 静电探针测量波后电子密度. 电磁波工作频率为 14.5 GHz 和 27 GHz, 分别使用低频和高频两组聚焦天线, 低频和高频聚焦天线焦斑直径分别为 10 cm 和 5 cm. 在波后碰撞频率恒定为 2 GHz 条件下, 在 90%Ar+10%Air 和纯 Air 两种实验介质气体中, 激波管实验获得电磁波衰减随电子密度变化结果如图 9 所示. 其中, 在 14.5 GHz 的 Air 实验数据选自同样在 $\Phi 800\text{mm}$ 激波管实验的文献值 [21].

图 9 显示, 在 Ar+Air 介质气体中, 激波管传输实验获得了比在纯 Air 介质中与理论预测更一致的结果. 本文结果表明, 激波管实验中波后 2 区气体长度和气体电离度对电磁波传输实验结果有直接的影响, 在保证 2 区气体长度远大于电磁波束斑直径并对气体电离度有准确预测的情况下, 才能获得可靠

性高的实验结果.



(a)



(b)

图 9 在两种介质气体中电磁波透射系数激波管实验结果

Fig. 9 The experimental results for electromagnetic wave transmission for two test gases in shock tube

3 结 论

在中科院力学所 $\Phi 800\text{mm}$ 高温低密度激波管中进行电磁波传输实验时, 采用在大量惰性气体 Ar 中掺入少量 Air 的混合气体作为激波管实验介质气体, 利用 Ar 不解离和难电离特性, 减小强激波前后压缩比, 增加激波后 2 区气体长度和实验时间, 同时混合气中大量 Ar 有利于 Air 更快达到电离平衡.

静电探针和微波透射测量显示, 在 Ar+Air 混合气中激波后 2 区电子密度可达 10^{13}cm^{-3} 量级. 在 Ar+Air 混合气中, 能够获得与纯 Air 相同的电子密度, 但碰撞频率小于纯 Air. 在与纯 Air 作为实验介质气体相同的电子密度和碰撞频率条件下, 在 Ar+Air

混合气中激波后 2 区实验时间和长度约为在纯 Air 中的 5~10 倍, 其中 2 区实验时间为 0.3~0.8 ms, 2 区气体长度 1~1.5 m. 在 Ar+Air 介质气体中, 激波管传输实验获得了比在纯 Air 介质中与理论预测更一致的结果.

参 考 文 献

- Anderson JD. Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989
- Dunn MG, Kang SW. Theoretical and experimental studies of reentry plasmas. NASA-CR2232
- Hartunian RH, Stewart GE, Ferguson SD. Cause and mitigation of radio frequency (RF) blackout during reentry of reusable launch vehicle. ATR-20075309
- Iamesp R, Rybak J, Churchill W. Progress in reentry communications. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(1): 879-894
- 刘铁军. 国外再入通讯中断研究重要文献集. 王柏懿译. 北京: 航天工业部预研局, 1983 (Liu Tiejun. Important Literature on Reentry Communication Interruption. Wang Baiyi, Transl. Beijing: Institute of Aerospace Industry, 1983 (in Chinese))
- 吴承康, 卞荫贵. 再入通讯可行途径研究//乐嘉陵主编, 空气动力学获奖成果汇编. 1991 (Wu Chengkang, Bian Yinggui. A study of possible approaches to reentry communications//Le Jialing, ed. Compilation of Aerodynamics Award-winning Results, 1991 (in Chinese))
- 乐嘉陵. 再入物理. 北京: 国防工业出版社, 2005 (Le Jialing. Reentry into Physics. Beijing: National Defense Industry Press, 2005 (in Chinese))
- Kim M, Keidar M, Boyd ID, et al. Analysis of an electromagnetic mitigation scheme for reentry telemetry through plasma. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2008, 45(6): 1223-1229
- Keidar M, Kim M, Boyd I. Electromagnetic reduction of plasma density during atmospheric reentry and hypersonic flights. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2008, 45(2): 445-453
- Boyer DW, Tournyan KJ, Russo AJ. Experimental and numerical studies of flush-mounted electrostatic probes in hypersonic ionized flows. AIAA-72-0104, 1972
- Russo AJ, Tournyan KJ. Experimental and numerical studies of flush electrostatic probes in hypersonic ionized flows. II - Theory. *AIAA Journal*, 2015, 10(12): 1675-1678
- Chadwick KM, Boyer DW, Andre SN. Plasma and flowfield induced effects on the re-entry vehicles for L-band near-broadside aspect angles. ADA317594, 1996
- Destler WW, Degrange JE, Fleischmann HH, et al. Experimental studies of high-power microwave reflection, transmission, and absorption from a plasma-covered plane conducting boundary. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(9): 6313-6318
- 袁忠才, 时家明, 汪家春. 大气中固体燃烧等离子体与微波相互作用实验研究. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5): 707-710 (Yuan Zhongcai, Shi Jiaming, Wang Jiachun. Experimental study on the interaction between plasma and microwave in atmospheric solid combustion. *Intense Laser and Particle Beam*, 2005, 17(5): 707-710 (in Chinese))
- 王柏懿. 铱丝静电探针及其在高温风洞中应用. *力学学报*, 1982, 18(1): 100-106 (Wang Baiyi. Iridium wire electrostatic probe and its application in high temperature wind tunnel. *Acta Mechanica Sinica*, 1982, 18(1): 100-106 (in Chinese))
- 曹金祥, 赵红波, 林毅君等. 多道扫描探针系统在电弧风洞中的应用. *宇航学报*, 1999, 20(1): 83-87 (Cao Jinxiang, Zhao Hongbo, Lin Yijun, et al. Application of multi-channel scanning probe system in arc wind tunnel. *Journal of Astronautics*, 1999, 20(1): 83-87 (in Chinese))
- Zhu NY, Li XF, Huang LS, et al. An investigation of electromagnetic wave propagation in plasma by shock tube. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(2): 212-218
- 郑灵, 赵青, 罗先刚等. 等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究. *物理学报*. 2012, 61(15): 343-349 (Zheng Ling, Zhao Qing, Luo Xiangang, et al. Theory and experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in plasma. *Acta Physics Sinica*, 2012, 61(15): 343-349 (in Chinese))
- 马平, 曾学军, 石安华等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性实验研究. *实验流体力学*. 2010, 24(5): 51-56 (Ma Ping, Zeng Xuejun, Shi Anhua, et al. Experimental study on electromagnetic wave transmission characteristics in high-temperature plasma gas. *Experimental Fluid Mechanics*, 2010, 24(5): 51-56 (in Chinese))
- 于哲峰, 马平, 张志成等. 微波在薄层等离子体中传输效应研究. *实验流体力学*, 2013, 27(2): 60-64 (Yu Zhefeng, Ma Ping, Zhang Zhicheng, et al. Study of microwave transmission effect in thin plasma. *Experimental Fluid Mechanics*, 2013, 27(2): 60-64 (in Chinese))
- Zhu NY, Huang LS, Wu B, et al. Transmission characteristics of EM wave in a finite thickness plasma. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(1): 189-195
- 陈熙. 高温电离气体的传热与流动. 北京: 科学出版社, 1993 (Chen Xi. Heat Transfer And Flow Of High-Temperature Ionized Gas. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese))
- Swift JD, Schwar MJR. Electrical probes for plasma diagnostics. *Analytical Chemistry*, 1971, 42(14): S73-S74
- 王苏, 崔季平, 何宇中等. 钠离子与电子非平衡复合电离动力学的激波管研究. *力学学报*, 2001, 33: 472-477 (Wang Su, Cui Jiping, He Yuzhong, et al. Shock tube study of sodium ion and electron non-equilibrium combined ionization dynamics. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 33: 472-477 (in Chinese))
- Wang S, Cui JP, Fan BC, et al. Measurement of electron density profile behind strong shock waves with a Langmuir probe//Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves, Beijing, July, 2004: 82

- 26 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播. 北京: 科学出版社, 1978 (Kentzberg. *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma*. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese))
- 27 Auciello O, Flamm DL. 等离子体诊断. 郑少百, 胡建芳, 郭淑静等译. 北京: 电子工业出版社, 1994 (Auciello O, Flamm DL. *Plasma Diagnosis*. Zheng Shaobai, Hu Jianfang, Guo Shujing, et al. transl. Beijing: Electronic Industry Press, 1994 (in Chinese))
- 28 崔季平, 何宇中, 范秉诚. 用磁探针测定慢电子平均散射截面. 核聚变与等离子体物理, 1984, 4(1): 24 (Cui Jiping, He Yuzhong, Fan Bingcheng. Determination of slow electron average scattering cross section by magnetic probe. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 1984, 4(1): 24 (in Chinese))
- 29 Massey HSW, Burhop EHS, Morse PM. Electronic and ionic impact phenomena. *Physics Today*, 1953, 6(1): 15
- 30 Center RE. Measurement of electron density behind shock waves by free-molecular Langmuir probes. SAMS0-TR-69-369, 1969