

## 等离子体风洞中释放二氧化碳降低电子密度

刘祥群 刘宇 凌艺铭 雷久侯 曹金祥 李瑾 钟育民 湛明 李艳华

### Electron density depletion by releasing carbon dioxide in plasma wind tunnel

Liu Xiang-Qun Liu Yu Ling Yi-Ming Lei Jiu-Hou Cao Jin-Xiang Li Jin Zhong Yu-Min Shen Ming  
Li Yan-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 145202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212353

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212353>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 等离子体中X射线透过率分析及潜在通信应用研究

X-ray transmission characteristics and potential communication application in plasma region

物理学报. 2019, 68(4): 040401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181973>

#### 超临界二氧化碳类液-类气区边界线数值分析

Numerical analysis of boundary line between liquid-like zone and gas-like zone of supercritical CO<sub>2</sub>

物理学报. 2022, 71(4): 040201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211464>

#### 高超声速类HTV2模型全目标电磁散射特性实验研究

Experimental investigation on all-target electromagnetic scattering characteristics of hypervelocity HTV2-like flight model

物理学报. 2022, 71(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211901>

#### 常压针-板放电等离子体密度演化

Evolution of electron density of pin-to-plate discharge plasma under atmospheric pressure

物理学报. 2021, 70(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201790>

#### 同轴枪正、负脉冲放电等离子体特性的对比

Comparative study of positive and negative pulsed discharge plasma characteristics of coaxial gun

物理学报. 2020, 69(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191321>

#### 电子的非广延分布对等离子体鞘层中二次电子发射的影响

Effects of  $q$ -nonextensive distribution of electrons on secondary electron emission in plasma sheath

物理学报. 2019, 68(18): 185204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190225>

# 等离子体风洞中释放二氧化碳降低电子密度\*

刘祥群<sup>1)</sup> 刘宇<sup>1)2)3)†</sup> 凌艺铭<sup>1)</sup> 雷久侯<sup>1)2)3)</sup> 曹金祥<sup>1)</sup>  
李瑾<sup>4)</sup> 钟育民<sup>5)</sup> 谌明<sup>5)</sup> 李艳华<sup>5)</sup>

1) (中国科学技术大学地球和空间科学学院, 中国科学院近地空间环境重点实验室, 合肥 230026)

2) (中国科学院, 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026)

3) (中国科学技术大学, 行星探索与前瞻性技术前沿科学中心, 合肥 230026)

4) (北京临近空间飞行器系统工程研究所, 北京 100076)

5) (北京遥测技术研究所, 北京 100076)

(2021年12月20日收到; 2022年3月21日收到修改稿)

航天器从近地空间进入大气层过程中, 由于激波加热, 会在航天器外表面形成等离子体鞘套, 导致航天器与地面之间的无线电通信中断, 即“黑障”效应. 为了缓解“黑障”效应, 国内外学者进行了多方面的技术研究, 其中化学物质释放被认为是一种有效的方法. 以往, 主要针对卤族元素和水开展理论和实飞研究. 本文基于二氧化碳不易在高温流场中发生裂解的特性, 利用电弧和高频风洞产生等离子体流场, 主动释放二氧化碳降低等离子体电子密度. 结果表明, 在风洞等离子体中, 释放不同流量的二氧化碳可使电子密度下降1—2个量级, 为解决再入过程中黑障问题提供了一种可行方法.

**关键词:** 等离子体鞘套, 二氧化碳, 电子密度

**PACS:** 07.87.+v, 41.20.Jb, 94.80.+g

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212353

## 1 引言

航天器从近地空间进入到大气层时, 由于表面的激波压缩和大气粘着, 导致飞行器表面温度和压强急速升高, 从而离解、电离飞行器表面气体, 在飞行器表面包裹一层致密的等离子体, 即等离子体鞘套<sup>[1]</sup>. 这种鞘套内的等离子体电子密度通常能够达到、甚至超过  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 对应的等离子体频率可高达 30 GHz, 远超出了当前遥测 S, C, X 等常见频段的覆盖范围<sup>[2,3]</sup>. 常规遥测信号在穿透鞘套的过程中能量会被吸收、散射和反射, 从而导致信号中断, 形成“黑障”效应<sup>[4,5]</sup>. 神舟飞船返回过程

中, 黑障效应造成地面遥测信号中断数分钟, 极大威胁飞行器及航天员安全. 因此开展降低鞘套等离子体电子密度, 缓解黑障效应的研究具有重要应用价值.

以美国 RAM (Radio Attention Measurement) 项目为代表, 各国学者进行了大量主动干预等离子体鞘套研究<sup>[6]</sup>. NASA (National Aeronautics and Space Administration) 成功执行了多次飞行实验, 针对性开展鞘套等离子体电磁波衰减和地空无线电波通信效果的实验验证. 在鞘套等离子体背景下, 考虑不同天线设计的电离效应, 设计等离子体在线诊断技术以及流场剖面参数 (如电子密度) 的诊断方法<sup>[7]</sup>. 同时, 也提出了包括磁窗通信<sup>[3,7,8]</sup>、气动

\* 国家航天局民用航天技术预研项目 (批准号: D020105)、中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2020451)、中国科学技术大学“双一流”研究基金 (批准号: YD3420002002) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: WK3420000011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [yliu001@ustc.edu.cn](mailto:yliu001@ustc.edu.cn)

外形修正<sup>[9]</sup>、提高通信频率<sup>[10]</sup>、释放亲电子物质<sup>[7,11,12]</sup>等多种鞘套等离子体主动干预技术. 其中, 释放亲电子物质在工程上较易实现. 释放水及亲电子物质可以显著降低等离子体密度, 恢复正常测控通信. 水除了可以降低等离子体温度, 还能使电子与离子结合生成中性原子或分子. Gemini 3 载人实验通过释放水有效降低等离子体鞘套的电子密度, 人为产生了一个无线电传输窗口, 对甚高频和 C 波段信号的传输有一定的恢复<sup>[11]</sup>. 除了研究释放水对等离子体鞘套通信的改善效果, 也有实验采用六氟化硫、四氯化碳、三氯乙烯、各类氟利昂、氟碳化合物等电负性物质进行测试. 各类物质通过降低流场温度, 提升等离子体复合效率, 吸附电子形成稳定负离子等途径降低电子密度<sup>[13,14]</sup>.

我们早期也在实验室环境下进行了化学物质释放实验, 利用中国科学技术大学空间等离子体实验 (KSPEX) 装置开展了二氧化碳等化学物质释放实验, 观察到了释放电负性化学物质后电子密度的快速下降过程<sup>[15]</sup>, 利用多种诊断手段测量了电子密度、电子温度、空间电势的三维分布及演化<sup>[16–19]</sup>. 然而, 相比于真实飞行环境, 实验室等离子体碰撞频率较低、压强较小, 且没有流速影响. 因此, 为了尽可能接近真实飞行等离子体鞘套环境, 我们选择在风洞等离子体装置开展二氧化碳释放实验研究, 并定量分析二氧化碳和电子密度降低之间的关系.

## 2 实验设备

图 1 给出了风洞装置、二氧化碳释放系统和诊断设备的安装示意图. 风洞通过电弧放电或高频放电产生等离子体. 放电稳定后, 通过释放系统将二氧化碳注入进本底等离子体. 实验的第一部分是在电弧风洞中进行的, 通过正负电极放电产生大功率电弧, 工作物质被加热到高温高压状态, 经过喇叭

形喷管后急速膨胀, 形成高焓的等离子体流场, 等离子体流速约为 1 Mach<sup>[20]</sup> (1 Mach = 340 m/s). 试验舱的尺寸为 0.6 m × 0.6 m × 0.6 m, 并在一侧的壁面安装玻璃观察窗, 便于光学观察. 电弧风洞等离子体流场能够稳定维持 300 s 以上, 可以满足释放效果实验. 其电子密度只能在  $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  之间, 低于等离子体鞘套的峰值密度 ( $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  量级). 因此, 仅靠电弧风洞, 无法全面探究二氧化碳释放干预鞘套等离子体电子密度的效果.

基于上述原因, 实验的第二部分选择在高频风洞中进行. 高频风洞采用高频感应耦合产生等离子体. 等离子体发生器通过喷管与实验舱相连, 经过喷口加速形成热流场. 高频风洞产生的等离子体流速约为 1 Mach, 电子密度可达  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  量级. 因此, 结合两种类型的风洞, 可以基本覆盖鞘套等离子体电子密度参数范围.

整个实验过程中, 装置本底真空约为 100 Pa. 之后, 将压力高达兆帕量级的压缩空气以 50 g/s 的质量流量通入真空室, 真空室气压升至 2000 Pa, 后续在此状态下开始等离子体放电和释放实验. 压力为  $10^5 \text{ Pa}$  的二氧化碳气体以不同流量通入等离子体, 内外压差有利于二氧化碳气体通过释放装置扩散进等离子体流场.

实验中, 等离子体流速远高于二氧化碳气体流速, 导致二氧化碳难以和等离子体有效掺混. 为了解决该问题, 我们设计了微通道释放模块. 模块表面刻倾斜小孔, 小孔与表面夹角小于  $45^\circ$ , 确保喷洒出射的二氧化碳与流场方向有较大的分速度, 能够最大效果保证掺混均匀.

## 3 等离子体参数诊断

实验使用朗缪尔扫描探针对高焓流场电子密度进行诊断. 探针材料选用具有高熔点和抗氧化性

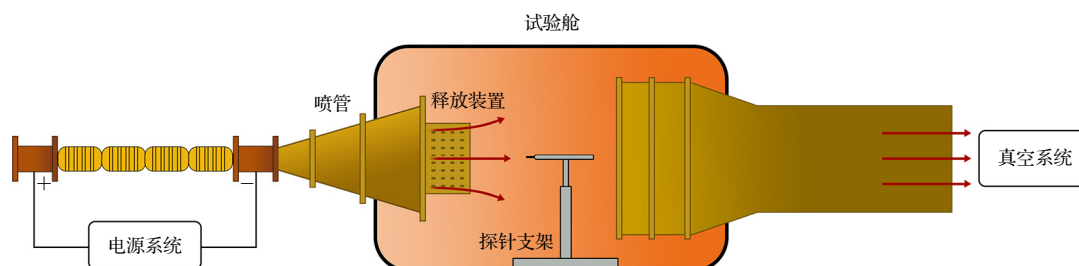


图 1 实验设计示意图

Fig. 1. Schematic of experimental setup.

能的金属铱. 实验中, 朗缪尔探针安装在可上下移动支架上, 置于流场下游. 这样既实现了朗缪尔探针在等离子体区域上下移动, 又能够尽可能探测到电子密度下降区域. 流场稳定后, 上移朗缪尔探针至喷口的中心位置, 再释放二氧化碳. 释放过程中探针位置保持不变, 数据采集系统持续工作, 完整采集二氧化碳释放前后等离子体密度的演化. 释放完成后及时将探针移出流场, 减小流场对探针的烧蚀. 值得说明的是, 上述连续采集释放前后密度变化, 需要较长时间. 在高焓的高频等离子体风洞中易导致探针长度明显变化, 带来诊断误差. 因此高频风洞电子密度数据先采集了释放前的本底电子密度. 朗缪尔探针支架置于无等离子体一侧区, 待流场建立, 移动探针至流场中心进行 1 s 的等离子体密度采集. 之后进行探针更换, 并恢复到原始位置. 采取同样步骤诊断释放后的电子密度, 最后得到图 4 所示的数据. 此外, 受风洞实验条件限制, 实验过程中难以安装步进电机实现等离子体密度分布逐点扫描, 因此未开展朗缪尔探针在不同位置等离子体密度空间分布的测量. 实验中, 探针采用 200 Hz 的三角波信号源供电, 信号采集频率为 200 kHz, 每个数据点为 1 s 内 200 个周期的数据平均值.

## 4 实验结果与讨论

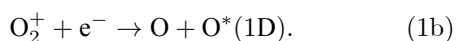
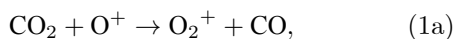
实验选用纯空气作为放电气体, 包含约 78.08% 的  $N_2$  和 20.95% 的  $O_2$ , 以及一些其他微量成分. 首先, 将空气注入电弧室中, 在电弧的作用下使其达到高温和高焓状态. 气体的能级被激发, 发生如下解离、电离反应.

解离反应:  $O_2 \rightarrow 2O$ ,  $N_2 \rightarrow 2N$ ;

原子、分子电离:  $N \rightarrow N^+ + e^-$ ,  $O \rightarrow O^+ + e^-$ ,

$O_2 \rightarrow O_2^+ + e^-$ ,  $NO \rightarrow NO^+ + e^-$ .

根据近似理想高温空气模型, 上述反应生成混合物, 主要组分浓度排序为  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $N$ ,  $O$ ,  $e^-$ ,  $N^+$ ,  $O^+$ ,  $NO^+$ . 二氧化碳释放后, 先与空气中的  $O^+$  反应生成分子离子  $O_2^+$ ,  $O_2^+$  再与电子复合, 实现电子密度降低. 相应的离子化学反应过程表示为



考虑到风洞环境比较复杂, 在实验开始阶段进

行了多次等离子体参数定标, 获得稳定的本底等离子体. 结果表明, 当电弧发生器输入功率为 500 kW, 效率焓值在 4.1 左右时, 本底电子密度可稳定在  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  的量级. 之后再开展二氧化碳释放实验. 图 2 给出了二氧化碳释放前后等离子体电子密度的变化, 横坐标轴代表释放时间, 纵坐标轴表示电子密度. 数据采集从第 3 s 开始, 此时等离子体达到相对稳定状态. 二氧化碳以 8 g/s 的质量流量持续释放, 释放前后电子密度明显降低. 放电中, 空气的注入速度为 50 g/s, 远大于二氧化碳的质量流量; 同时, 朗缪尔探针置于掺混区后方, 尽量降低稀释效应对释放效果的影响.

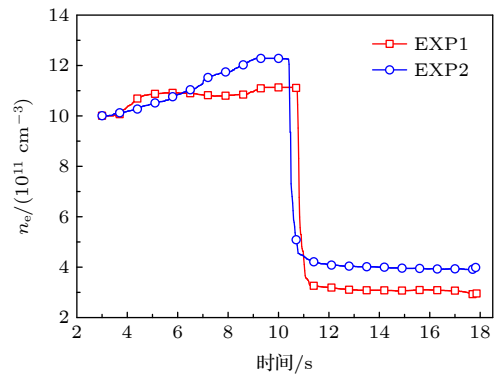


图 2 二氧化碳释放前 (3—10 s) 和释放后 (12—18 s) 电子密度随时间的变化, 展示了两车次实验 (EXP1 和 EXP2)  
Fig. 2. Evolution of the electron density prior (3—10 s) and after the carbon dioxide injection (12—18 s). Two experiments are shown here (EXP1 and EXP2).

图 2 使用不同颜色展示了两个车次结果, 其中红色曲线 (EXP1) 是第一车次的实验结果. 为了描述电子密度降低的大小, 定义下降比例的参数:

$$\eta_{CO_2}(\%) = \frac{n_{e0} - n_e}{n_{e0}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中,  $n_{e0}$  为本底电子密度,  $n_e$  为二氧化碳释放后的电子密度.

3—11 s 表示释放前本底等离子体状态, 电子密度基本稳定在  $11.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , 在 11 s 时刻开始注入二氧化碳. 可以发现, 电子密度从  $11.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  下降到  $3.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . 在低于 1 s 的时间内, 电子密度下降比例为 72.7%. 在随后的释放过程中, 干预效果能够保持稳定, 密度在  $3.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  上下小幅波动. 对应等离子体频率从 9.4 GHz 下降到 4.9 GHz, 在遥测常用 C 波段 (4—8 GHz) 覆盖范围之内. 图 2 蓝色曲线显示了相同条件下的第二次

释放效果 (EXP2), 电子密度从  $13.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  下降到  $4.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , 密度下降比例为 70.4%, 此时对应等离子体频率从 10.4 GHz 下降到 5.68 GHz. 图 2 中两次实验本底电子密度略有差异, EXP2 本底电子密度比实验 1 的峰值密度约高 10%, 这是由于风洞等复杂等离子体环境, 电子密度本身存在一定涨落, 后续多次实验都能看到该现象. 释放后 EXP2 与 EXP1 的电子密度同样有约 10% 的差异. 根据两次实验释放前后的平均值计算, 电子密度下降比例为 71.55%, 这表明二氧化碳具有良好的降低电子密度的能力.

为了充分验证不同状态下的二氧化碳释放效果, 进行了多次重复实验. 图 3 为多次实验的测量结果, 横坐标代表实验车次, 左右纵坐标分别表示等离子体密度和密度下降比例. 如第 3 部分所述, 图中每个数据点都是 1 s 内数据的平均值. 曲线 A 表示释放之前的本底电子密度, 曲线 B 表示释放二氧化碳降低后的电子密度. 随着电弧能量的增加, 本底电子密度在从  $7.13 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  增加到  $1.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  (曲线 A). 在释放二氧化碳后, 电子密度降低至  $3.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  附近 (曲线 B). 曲线 C 计算了每个车次实验的下降比例, 下降比例高达 60%—80%, 这意味着电子密度下降几乎接近 1 个量级. 每一密度点的误差棒是根据 1 s 时间内采集数据的平均值和标准差绘制, 平均误差为 34.04%. 误差同时影响释放前后的密度数据, 基本对实验结果下降比例没有影响. 值得讨论的是, 释放二氧化碳前电子密度的波动值 (A 线) 明显高于释放二氧化碳之后 (B 线), 可能原因是装置持续大功率放电过程中, 电弧电源等设备的性能会发生一

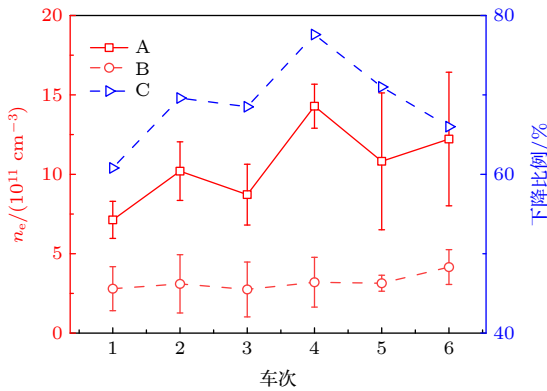


图 3 不同状态下电子密度降低效果  
Fig. 3. Effect of electron density reduction in different states.

定温漂; 导致在设定功率一致的情况下, 实际耦合效率会有一定差异, 从而造成本底电子密度存在一定范围内的涨落. 在释放二氧化碳后密度波动较小. 这是由于二氧化碳和等离子体相互作用后生成产物  $\text{O}_2^+$  附着阈值较低, 进一步吸附电子形成稳定的负离子; 从而等离子体密度整体涨落较小, 这也有利于后续电磁波通信的开展. 重复实验密度下降比例均值为 68.89%, 与图 2 两次实验效果基本一致. 因此, 二氧化碳降低电子密度的结果是可信的.

为了评估更高等离子体密度下的释放效果, 选择在高频风洞中进行后续实验. 之后再根据高密度实验状态进行释放实验. 因此高状态与释放后的低密度数据不在同一组数据内. 图 4 给出了高频风洞开展的释放效果. 图 4 中左侧红线为本底电子密度 (左侧坐标), 右侧蓝色线表示释放后的电子密度 (右侧坐标). 每个数据点从 1000 个采样周期中取平均值, 本底电子密度约  $13.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 对应等离子体频率为 32.6 GHz. EXP1 和 EXP2 释放的流量均为 8 g/s, 两次实验密度曲线的波动同样可归结于不同实验等离子体电子密度内在涨落的影响. 两次实验电子密度均值分别下降到  $5.80 \times 10^{12}$  和  $5.50 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 相应下降比例分别为 56.1% 和 57.9%, 均值为 57.0%, 弱于电弧环境下 70% 左右的下降比例. 这可能是由于高频风洞电子密度达到  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  量级, 在 8 g/s 的释放条件下, 二氧化碳比例过低, 此时反应速率已达平衡, 不足以进一步降低电子密度, 因此, 猜测可以通过增加释放二氧化碳量来进一步降低电子密度.

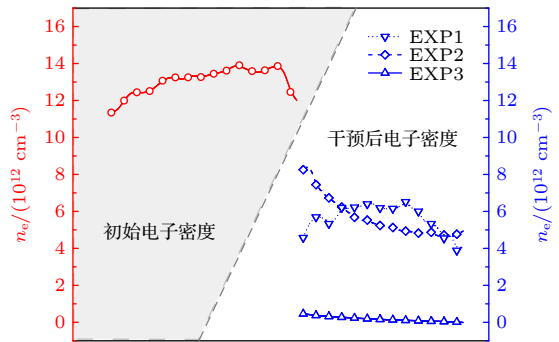


图 4 二氧化碳释放前后电子密度下降  
Fig. 4. Reduction of the electron density in the HF discharge wind tunnel through releasing carbon dioxide.

为验证该判断, 二氧化碳质量流量被增加至 24 g/s. 结果显示, 电子密度下降到  $0.17 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

(EXP3), 对应等离子体频率为 3 GHz. 在此状态下, 常规 S 波段则可能恢复正常测控通信. 在高密度流场环境, 通过增加二氧化碳的释放量可以降低环境电子密度, 这表明二氧化碳具有良好的降低电子密度的能力. 值得说明的是, 实验过程中先形成等离子体流场, 然后进行二氧化碳释放实验. 因此 24 g/s 的释放量不影响本底等离子体的产生. 然而, 与放电空气流量为 50 g/s 相比, 以 24 g/s 速率释放二氧化碳时, 其成分占比不能忽视. 导致下游降低电子密度的方式可能不同, 不能确定探针周围各物质成分所占的比例, 这需要后续结合光谱等其他手段开展进一步研究.

## 5 结 论

本文采用电弧风洞和高频风洞装置模拟等离子体鞘套环境, 并通过释放二氧化碳气体, 降低模拟鞘套环境内的等离子体密度. 结果表明, 在相同背景等离子体流场环境下, 释放不同流量的二氧化碳可使电子密度下降 1—2 个量级, 证明了流场环境下进行耗尽模拟鞘套电子密度的研究是可行的. 实验结果为缓解黑障效应, 恢复可靠测控通信提供了实用依据. 这为进一步研究释放量和鞘套密度降低之间的关系, 以及多种类化学物质降低密度效果比较打下基础. 需要指出的是, 等离子体和电磁波相互作用是一个复杂过程, 除了高密度对电磁波传播引起的截止效应, 还有诸多因素需要考虑. 例如, 鞘套中等离子体鞘套电子密度存在多种尺度的湍动结构, 当这些密度不均匀结构也会反射、散射电磁波, 影响测控通信. 后续实验我们将尝试使用光谱以及微波成像细节开展深入的研究, 探究主动干

预过程前后电子密度结构的形成及对电磁波传播的影响. 在释放效果稳定的基础上, 进一步研究流场流速、碰撞频率等因素对释放效果的影响, 并择机联合开展航天器测控通信实验, 这也将为技术实用化奠定基础.

## 参考文献

- [1] Rybak J P 1970 *Air Force Cambridge Research Laboratory Contractor Report AFCRL-70-0707*
- [2] Fuhs A 1963 *AIAA/Northwestern University Fifth Biennial Gas Dynamics Symposium* **379** 14
- [3] Keidar M, Kim M, Boyd I D 2008 *J. Spacecr. Rockets* **45** 445
- [4] Rybak J P, Churchill R J 1971 *IEEE Tran. Aerosp. Electron. Syst.* **5** 879
- [5] Gregoire D J, Santoru J, Schumacher R W 1992 *Air Force Office Of Scientific Research Report HAC-REF-G8200*
- [6] Akey N D 1971 *NASA Special Publication* **252** 19
- [7] Gillman E D, Foster J E, Blankson I M 2010 NASA/TM-2010-216220
- [8] Hodara H 1961 *Proc. IRE* **49** 1825
- [9] Belov I F, Borovoy V Y, Gorelov V A, Kireev A Y, Korolev A S, Stepanov E A 2001 *J. Spacecr. Rockets* **38** 249
- [10] Reynier P, Evans D 2009 *J. Spacecr. Rockets* **46** 800
- [11] Schroeder L C, Russo F P 1968 NASA TM X-1521 1
- [12] Hayes D T, Herskovitz S B, Lennon J F, Poirier J L 1974 *J. Spacecr. Rockets* **11** 388
- [13] Bernhardt P A 1987 *J. Geophys. Res. A:Space Phys.* **92** 4617
- [14] Scales W A, Myers T J, Bernhardt P A, Ganguli G 1997 *J. Geophys. Res. A: Space Phys.* **102** 9767
- [15] Yu P C, Liu Y, Cao J X, Lei J H, Zhang Z, Zhang X 2017 *AIP Adv.* **7** 105114
- [16] Liu Y, Cao J X, Wang J, Zheng Z, Xu L, Du Y C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 092901
- [17] Liu Y, Cao J X, Xu L, Zhang X, Wang P, Wang J, Zheng Z 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 1413
- [18] Liu Y, Cao J X, Xu L, Zhang X, Wang P, Wang J, Zheng Z 2014 *Geophys. Res. Lett.* **119** 4134
- [19] Zhang X, Cao J X, Liu Y, Yu P C, Zhang Z K 2016 *AIP Adv.* **6** 075304
- [20] Ou D B, Chen, L Z, Dong Y H, Lin X, Li F, Yu X L 2015 *J. Exp. Fluid Mech.* **29** 62 (in Chinese) [欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 林鑫, 李飞, 余西龙 实验流体力学 **29** 62]

# Electron density depletion by releasing carbon dioxide in plasma wind tunnel\*

Liu Xiang-Qun<sup>1)</sup> Liu Yu<sup>1)2)3)†</sup> Ling Yi-Ming<sup>1)</sup> Lei Jiu-Hou<sup>1)2)3)</sup>  
Cao Jin-Xiang<sup>1)</sup> Li Jin<sup>4)</sup> Zhong Yu-Min<sup>5)</sup> Shen Ming<sup>5)</sup> Li Yan-Hua<sup>5)</sup>

1) (*Key Laboratory of Geospace Environment of Chinese Academy of Sciences, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China*)

3) (*Frontiers Science Center for Planetary Exploration and Emerging Technologies, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

4) (*Beijing Institute of Near Space Vehicle System Engineering, Beijing 100076, China*)

5) (*Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China*)

( Received 20 December 2021; revised manuscript received 21 March 2022 )

## Abstract

During the spacecraft from geospace penetrating into the atmosphere, a plasma sheath can be formed around its external surface due to shock heating which subsequently leads the radio communications between the space vehicle and ground-based stations to interrupt, i.e. the blackout problem happens. Many techniques have been developed to mitigate the blackout problem, and the attachment chemicals releasing is considered as an effective method. Previously, halogenides and water have been widely investigated both theoretically and experimentally. In this work, we report the mitigation of the reentry plasma sheath through releasing carbon dioxide, in which the electron density is reduced through different mechanisms and processes from the releasing halogenides. Controlled experiments are performed to investigate the carbon dioxide released in the arc wind tunnel and the high-frequency plasma wind tunnel. Results suggest that the electron density can be significantly reduced in the simulated plasma sheath environment, which provides a potential approach to solving the communication blackout problem encounterin the reentry process.

**Keywords:** plasma sheath, carbon dioxide, plasma density

**PACS:** 07.87.+v, 41.20.Jb, 94.80.+g

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212353

---

\* Project supported by the Pre-research Project on Civil Aerospace Technologies Funded by the National Space Administration, China (Grant No. D020105), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Science, China (Grant No. 2020451), the USTC Research Funds of the Double First-Class Initiative, China (Grant No. YD3420002002), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. WK3420000011).

† Corresponding author. E-mail: [yliu001@ustc.edu.cn](mailto:yliu001@ustc.edu.cn)