

基于氧负离子PIG源的原子氧产生装置

于金祥^{1;1)} 蔡明辉² 韩建伟²

1 (北京大学重离子物理研究所重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

2 (中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘要 近地轨道能量为5eV的原子氧对航天器表面影响的地面等效模拟,是世界各航天国家竞相研究的重要领域.本文介绍一种基于氧负离子PIG源的原子氧产生装置,本装置由永磁PIG离子源、两电极引出系统、电子过滤器、单透镜、减速电极和样品架组成.目前,这一装置已安装在中国科学院空间科学与应用研究中心小碎片加速器上,并开展了初步实验.当离子源放电电流50mA,在2kV和3kV的引出电压下,引出的氧负离子分别为200 μ A和300 μ A.并开展了减速实验和kapton膜的溅蚀研究.由于原子氧装置和小碎片加速器共用同一个靶室.因此,这一安排还可以同时开展小碎片和原子氧对空间材料的撞击和侵蚀的研究.

关键词 原子氧 负氧离子 PIG离子源

1 引言

近地轨道是各种人造卫星和航天装置密集区,在这一区域富含小碎片和能量为4—5eV的原子氧.高能原子氧对航天器的材料产生氧化和剥蚀,使材料性能变坏,从而影响航天器使用寿命.因此,在地面开展5eV原子氧对航天器表面材料的影响,是世界各航天大国和某些发达国家竞相研究的重要领域.

为了缩短模拟时间,国内外一般采用通量为 $10^{16}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的原子或离子氧产生装置,主要有激光照射、微波(ECR)放电和双箍缩弧放电等离子体源(加速器)三种类型^[1-3].它们的共同特点是能产生的高密度的氧等离子体,并从中提取5—10eV的正氧离子流或原子氧.但这些装置结构复杂、造价高,正氧离子变成原子氧的转换效率较低.本文介绍一种基于氧负离子PIG源的原子氧产生装置,该装置已安装在中国科学院空间科学与应用研究中心小碎片加速器上,并开展了初步实验.当离子源放电电流50mA,在2kV和3kV的引出电压下,引出的氧负离子分别为200 μ A和300 μ A.并开展了减速实验和kapton膜的氧化与剥蚀的初步实验.

此外,由于原子氧装置和小碎片加速器共用同一个靶室.因此,这一安排还可以同时开展小碎片和原子氧对空间材料的撞击和侵蚀的研究.

2 实验装置描述

基于氧负离子PIG源的原子氧产生装置,由产生氧负离子的PIG离子源、两电极引出系统、电子过滤器、单透镜、永磁交叉场分析器、减速电极、束流中和系统和样品架组成.各部分功能简介如下:

2.1 永磁PIG负离子源

用于产生氧负离子的永磁端引出溅射潘宁源^[4],如图1所示.源的外廓尺寸为 $\Phi 80\text{mm}\times 70\text{mm}$,重量1.6kg.源的磁场由 $\Phi(30\text{mm}\times 30\text{mm})$ 的SmCo磁钢产生,在对阴极和阴极之间产生 $\geq 0.10\text{T}$ 的平均约束磁场.磁场强度从对阴极K1到阴极K2逐渐下降,呈单端发散型.因此在阴极表面存在与表面平行,其强度大于0.01T的横向磁场,这一磁场可有效的抑制电子

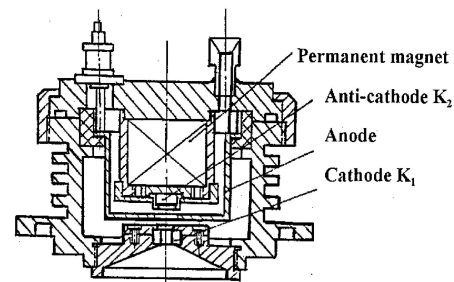


图1 永磁PIG离子源

2008-01-07 收稿

1) E-mail: jxyu@pku.edu.cn

从阴极孔逸出, 通常在引出束流中电子成分仅占 30% 左右. 因此, 无须在离子源内安装减少引出束中电子成分的磁过滤器. 两阴极间距 6mm, 阴极 K1 尺寸为 $\Phi 10\text{mm} \times 4\text{mm}$, 其上开有 $\Phi(2-4)\text{mm}$ 的离子发射孔; 对阴极 K2 为 $\Phi 8\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的圆盘. 为了提高引出流强, 采用 LaB6 和 Al 分别作为对阴极和阴极材料.

2.2 引出系统

引出系统采用小间距两电极系统, 引出间距 2mm, 引出电压 0—3kV 可变.

2.3 电子过滤器

在负离子源的引出束流中, 通常含有大量电子, 为了消除引出束流中的电子成分, 在离子源和引出系统之间, 引入电子过滤器. 其主体为可三维移动条形永磁体, 它可产生与束轴垂直, 强度为 0.01—0.02T 的磁场, 将电子在进入单透镜前从引出束中排除.

2.4 单透镜

通常原子氧产生装置束斑较大, 为了提高 5eV 原子氧在样品表面的通量, 引入三电极单透镜, 在样品架前产生会聚离子束. 单透镜电源 0—2.5kV 连续可调.

2.5 永磁交叉场分析器

在引出束流中, 存在 O^- , O_2^- 和 O_3^- 离子, 其中 O^- 离子所占比例约为 80%. 为了将它们分开采用永磁交叉场分析器, 以便在样品架处得到能量单一的离子或原子. 由于该离子源氧负离子比较高, 因此, 在实验过程中常将其移出系统, 这样可增加样品表面的原子氧通量.

2.6 减速、束流中和系统和样品架

减速系统可将氧负离子能量从 2—3keV 降低到 5eV, 然后以一定角度掠射至重金属 (Mo, Ta) 板或筒, 转变成原子氧. 由于这种转换方式产生的原子氧有一定的能损和离散, 因此, 如条件允许可使减速的氧负离子束穿越一激光照射通道, 通过激光与氧负离子的相互作用, 使其中性化. 这种方式所得到的原子氧能损和离散应较常规方式小. 样品架用于 kapton 膜或其他材料样品的测试.

3 永磁 PIG 离子源的实验研究

用于产生氧负离子的永磁 PIG 离子源, 其引出总束流 I_t 随引出电压 V_{ex} 的变化关系, 在一定条件下可由公式 (1) 给出:

$$I_t = 5.45 \times 10^{-8} \times (A/z)^{1/2} \times (V_{\text{ex}}^{3/2}/d^2) \times S, \quad (1)$$

式中 A 为原子量, z 为离子所带的电荷, d 为引出间距, S 为离子发射面积. 在固定的引出电压下, 为了提高引出总束流, 减小引出间距 d , 增加离子发射孔面积 S , 即增加阴极孔直径, 是最简单可行的办法. 为此, 将引出间距缩短至 2mm, 将引出孔径增加至 3—4mm, 可使在 2—3kV 的引出电压下引出流强显著增加 (图 2, 3).

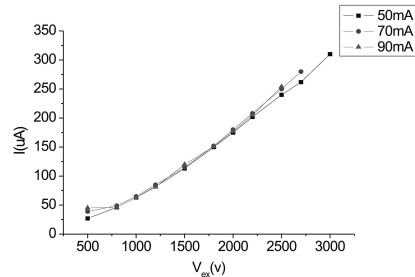


图 2 阴极孔 3mm, 不同放电电流下引出总流 I_t 随引出电压 V_{ex} 的变化关系

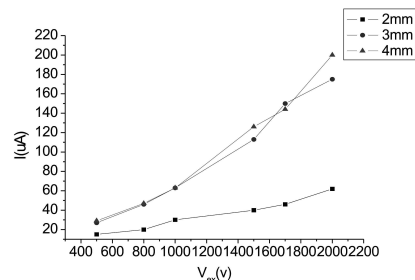


图 3 50mA 放电电流下, 不同引出孔时束流随引出电压的变化关系

为了进一步提高引出流强, 使 5eV 原子氧通量达到 $10^{16}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 这种离子源可以采用冷钛泵的多腔 (N 个) 并联潘宁放电方式 (即多组放电室并联) 增强总的放电电流. 从多 (N) 个阴极孔引出氧负离子流, 从而可使引出流强增加至接近 N 倍. 而这种离子源 (单放电腔) 放电功率仅为数十瓦, 因此这类源即使多腔放电, 总功耗也仅数百瓦, 供电配置也远较其他离子源简单.

4 kapton 膜实验研究

kapton 是高分子聚合物材料, 它密度低、电绝缘性能好, 是用于航天器的重要材料之一. 在近地轨道 5eV 原子氧通量约为 $10^{12}-10^{15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 它对金属及其氧化物影响较小, 但对 kapton 膜产生强烈的氧化和剥蚀, 使其性能变坏, 从而影响相关器件使用寿命. 因此, 开展 kapton 膜原子氧剥蚀的地面模拟是各主要航天国家一些实验室的重要工作之一. kapton 膜在空气中会吸附空气和水蒸气, 在原子氧的剥蚀研究中, 它会

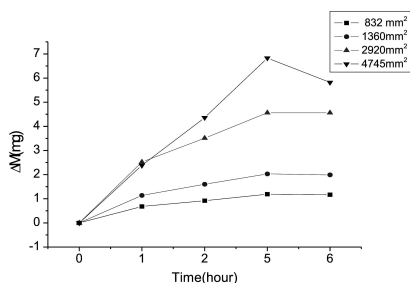


图 4 不同面积的kapton薄膜在真空下质量损失随时间的变化关系

给剥蚀造成的质量损失带来显著干扰. 为此, 我们将不同面积的 kapton 膜置于 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的真空室内, 可以得到 kapton 薄膜在真空条件下质量损失随时间的

变化(图4). 显然, 将 kapton 膜放入样品架前进行真空解吸处理是必要的.

在目前开展的氧负离子减速研究中, 存在着减速装置中聚四氟乙烯绝缘材料的沾污和放电剥蚀, 这些都影响离子或原子氧剥蚀效应的准确测量. 因此, 减速装置的改进和进一步实验正在进行中. 而束流中和系统的选型和设计也在考虑中.

5 结束语

目前的实验表明, 基于氧负离子 PIG 源的原子氧产生装置, 体积小、功耗低、简单易控, 能产生通量为 10^{14-15} 的原子氧. 可用于航天材料的地面模拟实验.

参考文献(References)

- DUO Shu-Wang et al. J. Mater. Sci. Technol., 2004, **20**(6): 759—761
- Chernik V N. Proceedings of the 7th International Symposium on Materl in Space Environment, France, 1997, 237—241
- Caledonia G E et al. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 92-3974
- YU J et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2004, **531**: 341—345

An Atomic Oxygen Device Based on PIG Oxygen Negative Ion Source

YU Jin-Xiang^{1;1)} CAI Ming-Hui² HAN Jian-Wei²

1 (Institute of Heavy Ion Physics, Peking University and Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

2 (Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract It is an important research subject for the spaceflight countries to conduct equivalent simulation of 5eV atomic oxygen effects for the spaceflight material in low earth orbit. This paper introduces an apparatus used for producing atomic oxygen, which consists of a PIG ion source with permanent magnet, two electrodes extraction system, an electron deflector, an einzel lens, an ion decelerating electrode and a sample bracket. At present it has been used on the small debris accelerator in the Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, and the producing experiments of O^- are carried out. 200—300 μA of O^- ions are extracted at the extraction voltage of 2—3kV. The experiments for decelerating of O^- ions and erosion of kapton foil are carried out also. Because of the target room used for both the atomic oxygen device and the small debris accelerator, the facility can be used for small debris impinging and atomic erosion for spaceflight materials simultaneously.

Key words atomic oxygen, oxygen negative ion, PIG ion source