



·电离辐射环境、效应与防护·

基于强电磁辐照移除危险空间碎片的机理性实验研究*

黄诺慈^{1,2}, 闫二艳^{1,3}, 杨浩¹, 鲍向阳¹, 刘星辰^{1,2}, 何琥¹

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院研究生院,
四川绵阳 621999; 3. 先进激光与高功率微波全国重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 针对当前空间碎片数量急剧增长问题, 探究基于强电磁辐照的主动清除手段的可行性, 以多层隔热结构作为典型危险空间碎片模型, 重点关注其电磁响应敏感的金属镀层部分, 通过构建复杂多环境因素物理场, 在 S 波段强电磁辐照和真空环境下进行了验证实验。实验结果表明, 在 10^{-3} Pa 量级的真空环境下, 强电磁脉冲与多层隔热结构金属镀层发生相互作用, 引发放电现象并产生等离子体, 同时伴随着宏观动力学特性的改变。通过观察和分析, 我们探讨了可能的物理过程, 包括强场击穿导致材料点放电、面闪络引起材料网状放电和镀层损伤、粒子吸收微波能量导致材料变形以及等离子体烧蚀引起材料损毁等。该研究为利用强电磁脉冲辐照主动移除危险空间碎片提供了重要的技术支持。

关键词: 电磁辐照; 空间碎片; 隔热材料; 放电损伤

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230372

Experimental study on mechanism of removing hazardous space debris based on strong electromagnetic irradiation

Huang Nuoci^{1,2}, Yan Eryan^{1,3}, Yang Hao¹, Bao Xiangyang¹, Liu Xingchen^{1,2}, He Hu¹

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of CAEP, Mianyang 621999, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Laser and High Power Microwave, Mianyang 621900, China)

Abstract: This study aims to address the issue of the rapidly increasing quantity of space debris by investigating the feasibility of active debris removal by strong electromagnetic irradiation. A multi-layer insulation structure was employed as a typical model for hazardous space debris, and feasibility validation experiments were conducted in a complex physical environment incorporating multiple environmental factors under strong electromagnetic irradiation in the S-band and vacuum conditions. The experimental results demonstrate that, in a vacuum environment at the order of 10^{-3} Pa, strong electromagnetic pulses interact with the multi-layer insulation structure, triggering discharge phenomena and generating plasma, accompanied by changes in macroscopic dynamic characteristics. Through observation and analysis, possible physical processes were explored, including strong field breakdown leading to point discharge in materials, surface flashover causing mesh discharge and coating to damage, particle absorption of microwave energy resulting in material deformation or expansion, as well as plasma ablation leading to material destruction. This study provides important technical support for the active removal of hazardous space debris using strong electromagnetic irradiation.

Key words: electromagnetic irradiation, space debris, heat insulation material, discharge damage

航天器工作于复杂极端的太空环境, 考验众多, 其中就包括不容忽视的危险空间碎片威胁。随着人类空天活动增加, 空间碎片数量也随之剧增, 碎片碰撞事件已成为航天器机械毁损的主要原因, 对空天资产及活动构成重大威胁。对碎片的监测和治理已引起各航天大国的高度关注, 并成为当务之急。空间碎片主要来源于进入太空的火箭部段、卫星及其解体过程中的爆炸和碰撞事件, 其材质、大小不一, 形态多种多样, 以片状膜材料为主。针对不

* 收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2024-03-22

基金项目: 预先研究共用技术 (50909020502)

联系方式: 黄诺慈, hnc@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 闫二艳, yaneryan_2002@163.com。

同大小量级的碎片,减缓撞击威胁的措施各有侧重,其中1~10 cm的碎片对空天活动威胁最大^[1],因此针对性的太空碎片清理技术备受期待。目前已提出的空间碎片主动清除手段,包括捕获离轨、推移离轨、增阻离轨、服务后重用清除以及自主离轨清除等方式^[2-6],各种方法适用范围和应用前景有所不同,呈现多样化发展趋势。航天器在太空中正常工作需要热环境保障,而多层隔热结构作为隔热材料典型结构,常被选用于保证航天器内部器件在地面制造、发射升空及在轨服役期间处于正常运行温度范围^[7]。典型多层隔热结构主要由面膜、交替迭合的高反射率反射屏和低导热率间隔层组成^[8]。间隔层常采用矿物或疏松纤维、纤维布等网状织物;面膜一般指的是在表面一层相对较厚的反射屏上沉积金属薄膜;而用于反射屏的材料主要有两类,一类为纯金属箔,如铝箔、金箔、不锈钢箔等;另一类为表面蒸镀金属层的塑料薄膜,如聚酯薄膜或聚酰亚胺薄膜等^[9]。多层隔热结构作为航天飞行器表面大量存在的膜材料,理所当然大概率转化为空天活动产生的空间碎片。基于此,本文选择以典型多层隔热结构为研究对象,在大气等离子体实验平台上开展了空间环境中强电磁辐照对隔热片状材料移除的实验研究。

1 实验研究

1.1 实验平台及参数

实验在大气等离子体实验平台上开展,如图1所示。反应腔体为直径150 cm、长度270 cm的柱状大气环境模拟室,采用峰值功率~MW的S波段微波辐射产生强辐射场区,实验区域场强量级为100~1000 V/cm。反应腔体通过热沉温度的方式实现温度-40~20 ℃可调,腔体内置高清摄像头并进行多点温度监控,内置光探测器联接光电倍增管进行光学测量,侧面设有透明观察窗,平台上配置多个密封法兰,用于各种监测线缆(直流电缆、微波电缆、光纤以及供电电缆等)的穿舱接入和输出。

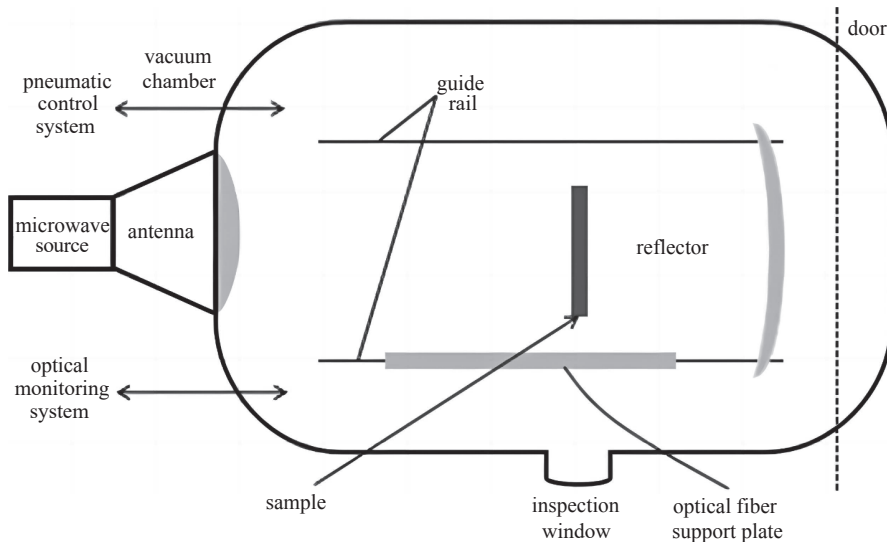


Fig. 1 Experimental platform diagram

图1 实验平台示意图

1.2 实验对象

研究注意到,在多层隔热结构中,反射屏中的薄膜塑料和隔热层纤维材料对电磁辐照不敏感,重点需要观察考虑的是金属镀层。本文实验对象包括打孔镀铝聚酯膜和单面镀铝聚酰亚胺膜。前者厚度在几微米量级,后者厚度在几十到百微米量级。考虑危险空间碎片富集于空天活动频繁的近地轨道,实验中参考近地高真空环境,综合航天器环境考核真空度指标一般要求为低于 6.65×10^{-3} Pa,设定实验模拟气压为 10^{-3} Pa量级。

采用如图2所示悬挂方式,片状膜材料被统一裁剪成10 cm×15 cm的方形样品,用轻质棉线悬于真空腔中心强场区。实验可通过大气等离子体实验平台,模拟空间碎片所处强电磁辐照、低气压的宇宙环境。开启大气环境模拟室气压控制系统,抽取气压至设定区间后,打开微波源待预热完成,满足实验条件后开始实验。

1.3 实验结果

针对同电磁参数的强电磁辐照环境,不同气压条件下膜损伤模式存在差异。对比膜样品在室温室压条件下与 10^{-3} Pa气压量级的实验现象,两者存在明显差异。室温室压下样品目测无反应,试后对其性能,包括表面电阻率、吸收率、发射率进行测试,均与测前无明显差异。真空受试条件下可以清晰看到放电现象,出现时间在秒量

级,可持续数十秒之久。损伤出现在样品金属镀层表面,放电呈点状或面状,同时伴随有区域等离子体发光,如图3所示,发光随微波脉冲呈不稳定闪烁状。



Fig. 2 Photo of experimental platform

图2 实验平台照片



Fig. 3 Plasma glow

图3 等离子体发光实验图

打孔镀铝聚酯膜样品轻薄,损伤响应明显,样品从边缘中段开始朝另一侧熔断,熔断现象剧烈且迅速,在数秒内即可完成,伴随严重的蜷曲形变与晃动。单面镀铝聚酰亚胺膜作为最为常用的隔热材料,损伤响应现象则更典型,损伤响应时间较长可达数十秒,损伤发展过程较打孔镀铝聚酯膜更为清晰;进一步观察,可以发现镀铝面出现明显的网状损伤纹路,实验前后样品出现明显质量损失。如图4、图5所示,通过光学放大镜对损伤纹路进行微观观察,可以发现材料实验前表面并不是很平整光滑,而是有一些突起,受试后损伤纹理呈树杈状,损伤处铝气化消失显露出基底。

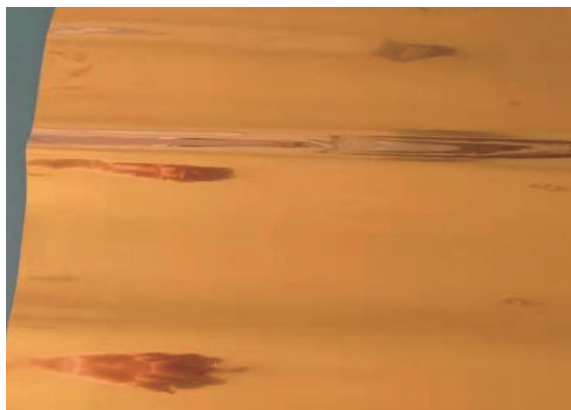


Fig. 4 Morphology of sample before experiment

图4 样品实验前形貌

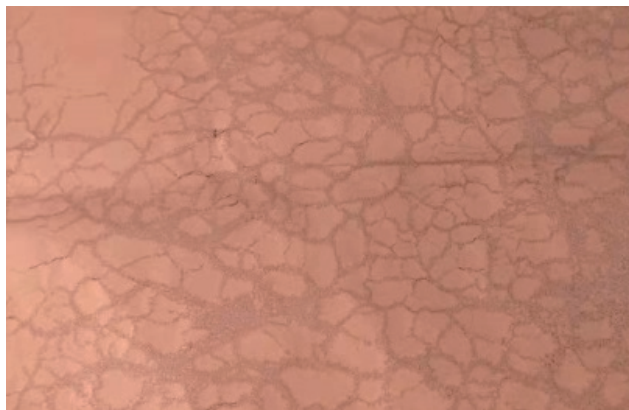


Fig. 5 Morphology of sample after experiment

图5 样品实验后形貌

将样品用双根轻质棉线悬挂受试,样品镀层面朝向来波方向,伴随着受强电磁辐射出现放电损伤甚至损毁时,样品均产生沿微波传播方向的轻微摆动,但幅度极小,样品底部位移不到毫米量级。以单面镀铝聚酰亚胺膜为例,为观察到在强电磁辐照下更为明显的动力学效应,先采取了在真空腔内加光学反射罩进行微波聚焦的方式,将单面镀铝聚酰亚胺膜改为单线悬挂于受试区。微波辐照下观察到样品沿面由上至下发生放电,同时样品出现周期性的转动,如图6所示,从(a)到(f)为按时序排列,同一物品受强电磁辐照后从侧观察窗拍摄到的运动状态图。待样品全面均经过沿面放电后,后续微波辐照则不能再引起明显转动,但仍存在沿微波方向的轻微晃动。

2 结果分析

实验结果显示,环境气压在强电磁辐照隔热材料的损伤过程中起重要作用,对比常压下表现,强电磁辐照通过高频趋肤效应对材料温升的影响较小,而低气压下辐照生成的等离子体吸收微波能量后升温造成隔热材料损伤的机制应为主导因素。相较于常规大气放电,高真空中的放电过程更多地依赖于场致发射和二次电子发射等机制,稀薄释气集中在材料表面,击穿形成等离子体,且处于真空隔热状态下,易形成烧蚀效应。而普通气压下,气体分子密度高,辐射能量主要用于电离气体分子形成放电通道,难以加载到材料表面,同时常压下气体流动,热量在空

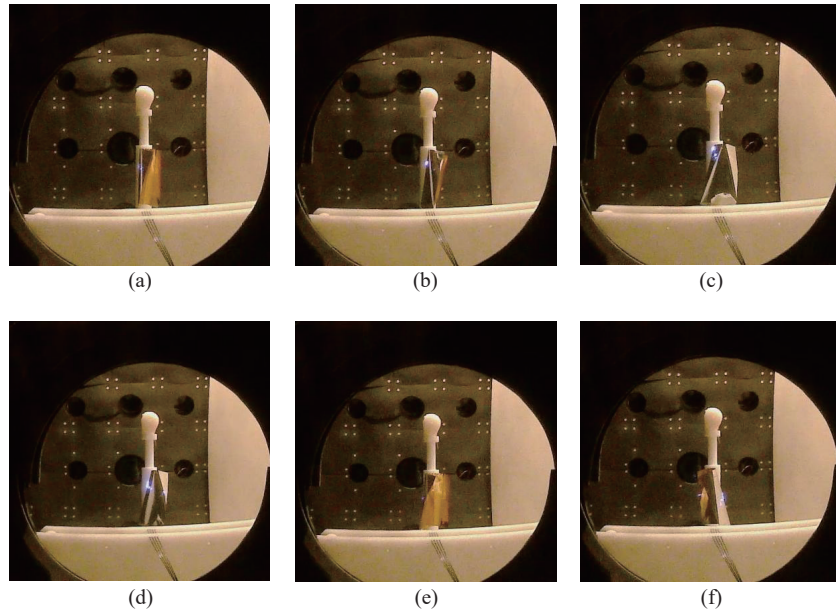


Fig. 6 inetic process of the sample

图 6 样品动力学运动过程

间中更易耗散,也有一定的影响。

在具体的损伤特征方面,材料表面形貌损伤多为网状、树枝状,符合典型场效应击穿的特征。主要考虑金属镀层,损伤模式如下:

在强电磁辐照下,金属镀膜表面发生场致电子发射^[10-11],膜表面开始累积正电荷。

发射的初级电子在微波场的作用下反轰材料并生成二次电子,同时材料表面吸附的气体发生退吸附^[12-13]。

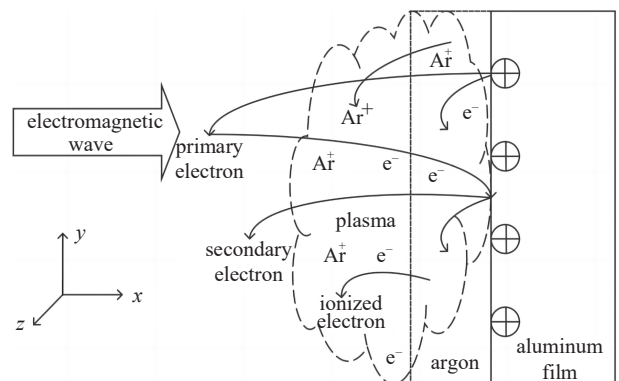
场致发射电子、二次电子和退吸附的气体分子发生碰撞^[14-15],在外加电场与材料表面累积电场的共同作用下,发生雪崩电离,形成等离子体。

强电磁场与等离子体相互作用,导致等离子体内的微波能量升温并加载到金属镀膜上,同时粒子对材料的轰击不断加剧。最终导致隔热材料损伤。

数值仿真方面,北京应用物理与计算数学研究所的工作中,张芳、李尧等^[15]利用 PIC-MCC 方法构建了模型以研究真空环境下电磁辐照对金属铝膜材料释气效应的影响。如图 7 所示,该模型全面模拟了场致电子发射、次级电子倍增及释气雪崩电离的过程。模拟结果表明,当铝膜的释气密度超过一定阈值时,表面释气导致的碰撞电离过程增强,触发表面雪崩电离并生成等离子体。这一等离子体能吸收电磁波能量,导致其离子和电子的总能量显著增加,进而可能对金属铝膜材料造成损伤。这一发现与本文中实验观察到的材料损伤过程演化一致。

总结发现,样品发生放电损伤时的电磁参数存在差异,可能与其样品质量、镀层厚度与材料性质差异有关。打孔镀铝聚酯膜厚度薄,质量轻,且结构上存在微小的孔洞,这些孔洞会导致电磁场与等离子体相互作用时,产生更大的局部电场,进而引发更剧烈的放电损伤。而单面镀铝聚酰亚胺膜表面无孔洞,损伤经金属镀层保护相对局限于材料表面,相对来说不容易观察到材料整体的烧蚀或破裂。

实验中可以明确看到强电磁脉冲作用于单面镀铝聚酰亚胺膜后对其运动状态改变的作用,同时伴随有质量损失。当微波能量与等离子体中的自由电子碰撞时,电子会吸收能量并获得动能。这些高能电子在与材料内的原子或分子碰撞时会引起非弹性碰撞,将其动能转移给材料,致使材料损伤变形。等离子体的动力学效应同时使目标获得一定量的冲量并运动,等离子体中带电粒子受到变化的电磁场的驱动,与电磁场互作用,致等离子体扩散,进

Fig. 7 Schematic diagram of the outgassing and ionization process of aluminum films irradiated by electromagnetic waves^[15]图 7 电磁波辐照铝膜释气电离模型示意图^[15]

而施加冲量到目标样品上,使其产生运动。此与时兴的非接触式推移离轨清除碎片的需求相吻合,充分证明了强电磁脉冲移除典型危险空间碎片的可行性。

对于强电磁脉冲与典型材料相互作用动力学特性与电磁参数、材料表面特性、温度等的关联规律,还待后续进一步的实验定量说明。

3 结 论

强电磁辐照对多层隔热结构的损伤过程受环境气压的影响较大。在低气压条件下,辐照生成的等离子体吸收微波能量后升温会导致隔热材料损伤,而常压下的损伤效应较小。在强电磁辐照下,金属镀层表面发生场致电子发射,并形成等离子体。强电磁场与等离子体相互作用,导致等离子体内的微波能量升温并加载到金属镀层上,从而造成隔热材料的损伤。不同类型的样品,在强电磁辐照下表现出不同的损伤特征。打孔镀铝聚酯膜损伤响应最为明显,而单面镀铝聚酰亚胺膜的损伤纹路典型,具有网状损伤纹路。强电磁脉冲对单面镀铝聚酰亚胺膜的作用可以改变其运动状态,证明了强电磁脉冲对移除典型危险空间碎片具有可行性,为进一步研究和开发利用强电磁脉冲清除太空中的空间碎片提供了重要的参考依据。然而,关于强电磁脉冲与典型材料的相互作用动力学特性、电磁参数的关联规律等方面仍待更深入地研究。

参考文献:

- [1] 吴冀川, 赵剑衡, 黄元杰, 等. 基于脉冲激光的空间碎片移除技术: 综述与展望[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011006. (Wu Jichuan, Zhao Jianheng, Huang Yuanjie, et al. Removal of space debris by pulsed laser: Overview and future perspective[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011006)
- [2] Kitamura S. Large space debris reorbiter using ion beam irradiation[C]//The 61st International Astronautical Federation. 2010: 725-735.
- [3] Aslanov V S, Ledkov A S. Dynamics and control of space debris during its contactless ion beam assisted removal[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1705: 012006.
- [4] Ishige Y, Kawamoto S, Kibe S. Study on electrodynamic tether system for space debris removal[J]. *Acta Astronautica*, 2004, 55(11): 917-929.
- [5] Andrenucci M, Pergola P, Ruggiero A, et al. Active removal of space debris - expanding foam application for active debris removal[R]. Affiliation: European Space Agency, Advanced Concepts Team, 2011.
- [6] Bennett J C, Sang J, Smith C H, et al. Accurate orbit predictions for debris orbit manoeuvre using ground-based lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(11): 1876-1887.
- [7] Elizabeth S. Spacecraft materials development programs for thermal control coatings and space environmental testing[J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2000, 7(1): 73-83.
- [8] 李鹏, 肖译娟, 程惠尔. 空间多层打孔隔热材料热分析数值方法研究[J]. *中国空间科学技术*, 2006, 26(5): 17-20,36. (Li Peng, Xiao Zejuan, Cheng Huier. Numerical model study of thermal analysis on multilayer perforated insulation material in orbit[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2006, 26(5): 17-20,36)
- [9] 赵一搏, 杨汝平, 邱日尧, 等. 多层隔热结构研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(4): 29-34. (Zhao Yibo, Yang Ruping, Qiu Riyao, et al. Recent progress on multi-layer insulation structures[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(4): 29-34)
- [10] 李尧. 真空条件下航天器热控层材料的电磁辐照效应研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022. (Li Yao. Study on electromagnetic radiation effect of thermal control layer in a vacuum[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022)
- [11] 元光. 场发射理论研究进展[J]. *真空电子技术*, 2012(6): 30-34. (Yuan Guang. Theoretical progress in field electron emission[J]. *Vacuum Electronics*, 2012(6): 30-34)
- [12] 蔡利兵, 王建国. 介质表面高功率微波击穿数值模拟[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3268-3273. (Cai Libing, Wang Jianguo. Numerical simulation of the breakdown on HPM dielectric surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3268-3273)
- [13] 董焯, 董志伟, 周前红, 等. 释气对介质沿面闪络击穿影响的粒子模拟[J]. *物理学报*, 2014, 63: 027901. (Dong Ye, Dong Zhiwei, Zhou Qianhong, et al. Particle-in-cell simulation on effect of outgassing on flashover and breakdown on dielectric surface in high-power microwave environment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 027901)
- [14] 蔡利兵, 王建国. 介质表面高功率微波击穿中释气现象的数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2011, 60: 025217. (Cai Libing, Wang Jianguo. Numerical simulation of outgassing in the breakdown on dielectric surface irradiated by high power microwave[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60: 025217)
- [15] 李尧, 范杰清, 张芳, 等. 电磁辐照金属铝膜材料释气效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 123008. (Li Yao, Fan Jieqing, Zhang Fang, et al. Study on outgassing effect of electromagnetic radiation on aluminum film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 123008)