0254-6124/2011/31(4)-503–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Hongwei, Cai Minghui, Han Jianwei, Huang Jianguo, Li Xiaoyin, Yu Jinxiang, Gao Zhuxiu, Liu Danqiu. Research of combined effect of small space debris and atomic oxygen. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 503-508

微小空间碎片与原子氧协同效应研究 *

李宏伟[1] 蔡明辉[1] 韩建伟[1] 黄建国[1]
李小银[1] 于金祥[2] 高著秀[1] 刘丹秋[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(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)

摘 要 利用等离子体驱动微小碎片加速器和潘宁源的原子氧模拟装置在中国首次开展了微小碎片撞击与原子氧协同作用对 Kapton 膜和镀铝 Kapton 膜的侵蚀效应研究. 实验结果表明, 碎片撞击能明显加剧原子氧对 Kapton 和镀铝 Kapton 膜的侵蚀效应, 对航天器的寿命及可靠性构成威胁, 制约中国长寿命高可靠性航天器的发展.

关键词 原子氧, 微小碎片, 协同效应

中图法分类号 V 41

Research of Combined Effect of Small Space Debris and Atomic Oxygen

LI Hongwei[1] CAI Minghui[1] HAN Jianwei[1] HUANG Jianguo[1]
LI Xiaoyin[1] YU Jinxiang[2] GAO Zhuxiu[1] LIU Danqiu[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education*; *Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract Using plasma drag particulate accelerator and atomic oxygen device based on PIG ion source, the first experiment was carried out about the combined effect of small debris and atomic oxygen on both the standard Kapton and Kapton with aluminum film. The result indicates that hypervelocity impact by particulate can accelerate the erosion effect of atomic oxygen on both Kapton and Kapton with aluminum film. The combined effect of hypervelocity impact and atomic oxygen is more important on Kapton with aluminum film than Kapton without film. This is because the impact by hypervelocity particles can destroy the aluminum film which prevents the atomic oxygen from eroding Kapton. So when consider the atomic oxygen effect on Kapton with aluminum film, the combined effect of hypervelocity impact by space debris and atomic oxygen should not be neglected. As a result, this effect is a threat to the life-span and credibility of spacecraft, which will restrict the

* 国家高技术研究发展计划项目资助 (2006AA04Z412)
2010-01-07 收到原稿, 2011-02-24 收到修订稿
E-mail: lhw651@163.com

development of high credibility and long life spacecraft.

Key words Atomic oxygen, Small space debris, Combined effect

1 引言

空间碎片 (Space debris) 是空间环境中威胁低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 航天器安全、可靠运行的最重要因素之一 [1]. 其中, 微小空间碎片数量巨大, 航天器在轨运行期间将不可避免会遭受其频繁撞击, 引起航天器相关表面材料结构损伤、化学污染、凹陷剥蚀或断裂等, 从而降低材料性能甚至影响航天器的寿命和可靠性, 对航天活动产生威胁. 据文献报道, 俄罗斯和平号空间站, 经过 15 年的空间微小碎片和微流星体等微粒撞击以及空间站内部化学物品腐蚀, 其 70% 的外体遭到腐蚀, 坚固性下降了约 60%; 美国的长期暴露装置 (LDEF) 在轨运行 5.75 年后回收, 地面检测其撞击坑达 34 000 个 [2]. 针对空间碎片对航天器的威胁, 国际上相关机构建立了等离子体加速器、轻气炮、激光驱动飞片装置等设备, 用于地面模拟研究空间碎片撞击效应 [2−4].

原子氧是 LEO 大气环境的主要成分, 由氧分子在太阳辐射的光致分解作用下形成. 航天器在轨飞行时, 原子氧与其相对速度约为 8 km/s, 相当于原子氧以 5 eV 的能量撞击航天器表面材料, 其作用相当于 4 万度以上的高温 [5], 再加上原子氧自身的化学活性很高, 导致暴露材料被剧烈侵蚀, 进而引起暴露材料光、热、电、机械等各方面性能的退化. 美国、俄罗斯、欧空局针对原子氧侵蚀效应开展了大量飞行实验, 例如航天飞机 (STS)、原子氧效应研究计划 (EOIM)、长期暴露装置 (LDEF)、搭载探测航天器 (HST) 等. 在中国, 近年来北京航空航天大学 [6]、中国科学院金属研究所 [7]、北京卫星环境工程研究所 [8]、兰州物理研究所 [9] 等单位建立了多种原子氧地面模拟设备, 用于地面模拟研究原子氧对航天器相关材料和部件的侵蚀效应.

由于空间环境异常复杂, 空间材料将同时遭遇空间碎片、原子氧、紫外、带电粒子辐射等多种环境因素的共同作用, 并且这些因素相互促进、相互制约. 因此, 只有研究多种空间环境效应的协同作用规律, 才能更为准确、可靠地评估空间环境对材料的影响. 原子氧和紫外辐射的协同作用已经得到大量实验的证实, 但是对于微小空间碎片和原子氧的协同作用研究及防护则刚刚起步. 最近, 以色列 Ronen Verker 研究小组 [10] 对原子氧和微小碎片的协同作用开展了初步的地面模拟实验研究, 证实碎片撞击将加剧原子氧的侵蚀.

聚酰亚胺 (Kapton) 是空间应用非常广泛的一种聚合物材料, 可用于航天器的结构、热控及绝缘部件, 如天线系统的结构件、太阳电池的固定底座等. 本文以 Kapton 和镀铝 Kapton 为例, 利用等离子体驱动微小碎片加速器和潘宁源原子氧模拟器, 研究微小碎片和原子氧对空间材料协同作用的基本规律, 为空间材料的防护设计提供基本依据和实验数据.

2 实验方案设计

2.1 微小空间碎片加速器

中国科学院空间科学与应用研究中心建立了中国第一台等离子体微小空间碎片加速器 [2,11], 用于地面模拟微小空间碎片撞击实验. 加速器主要由等离子体加速电极、微粒操纵设备、微粒测速设备和超高速撞击靶室构成, 其总体示意如图 1 所示. 其中, 等离子体加速电极是该装置的核心部分, 由同轴电极、压缩线圈、等离子体喷嘴、脉冲进气阀、充电电容器组和充放电控制电路组成. 等离子体加速工作时, 大容量充电电容器组脉冲触发气体放电产生等离子体, 通过同轴电极以及磁压缩线圈的加速和压缩, 形成高速高压等离子体团, 驱动置于喷嘴处的微粒, 获得超高速微粒. 通过控制放电参数 (电容器的充电电压、电容大小), 可以调节等离子体的参数, 实现对微粒速度的调节. 目前, 该装置能够将 10∼1000 μm 的微小颗粒加速至 1∼15 km/s.

2.2 原子氧模拟器

原子氧发生装置 [12] 主要以潘宁离子源为核心部件, 在 2000∼3000 V 下引出 O^- 离子, 同时利用永久磁铁过滤掉电子成分, 经过聚焦、减速后将 5 eV 的 O^- 离子束流打到样品架上. 束斑直径约为 4 cm, 最高等效原子氧通量可达 $6.0 \times 10^{15}\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$. 本装置的组成结构如图 2 所示.

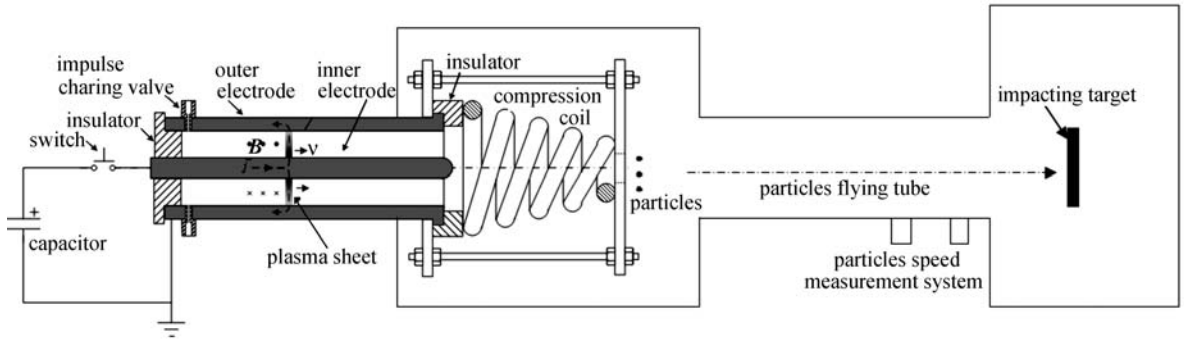


图 1 等离子体微小空间碎片加速器总体示意

Fig. 1 Sketch map of plasma drag small space debris accelerator

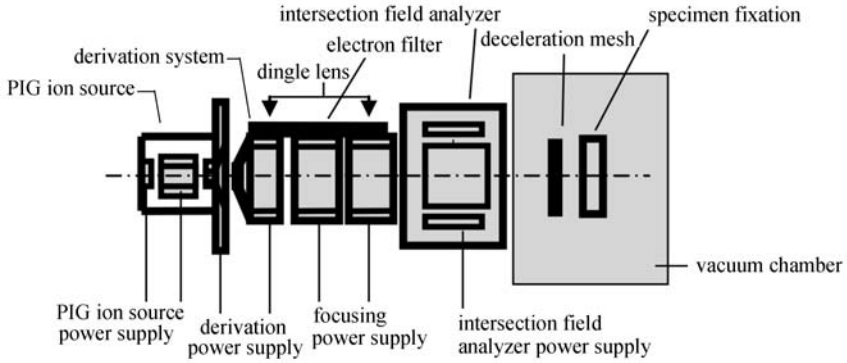


图 2 原子氧装置

Fig. 2 Sketch map of atomic oxygen simulator

2.3 实验条件

(1) 微小碎片加速器工作条件

电容器选用两组 (每组电容器的电容为 64 μF), 放电电压为 15 000 V; 系统工作时真空度为 4×10^{-3} Pa; 加速微粒为直径 200 μm 的刚玉颗粒.

(2) 原子氧模拟器工作条件

离子源放电电压为 550 V, 放电电流为 50 mA, 功率约为 27 W; 真空度为 2×10^{-3} Pa; 引出电压 2200 V, 聚焦电压 1700 V; 辐照面积约为 12 cm^2; 原子氧能量大约 5~10 eV.

(3) 样品处理

选用美国杜邦公司的 HN 型 Kapton 材料, 在微小碎片撞击和原子氧辐照前利用无水乙醇清洗表面, 并在真空下进行解吸处理, 测得样品真实质量, 实验后进行同样处理. 利用真空溅射设备在 Kapton 样品表面镀 1 μm 厚的金属铝作为原子氧防护涂层.

3 实验结果分析

3.1 质量变化

利用德国赛多利斯的精密天平 CP225D 分别对微小碎片撞击前后、原子氧辐照前后的质量进行测量. 结果示于表 1 和表 2.

从表 1 可以看到, 微小碎片撞击使得 Kapton 质

表 1 微小碎片撞击引起的 Kapton 质量变化

Table 1 Quality change of Kapton by small space debris impact

实验样品	实验前质量/mg	实验后质量/mg	质量损失/mg	碎片大小/μm	碎片速度/(km·s^{-1})
Kapton 1	401.32	400.28	1.04	200	3.7
Kapton 2	372.79	372.21	0.58	200	2

表 2 原子氧辐照引起的 Kapton 质量变化

Table 2 Quality change by atomic oxygen erosion

样品编号	实验样品	微小碎片撞击与否	实验前质量/mg	实验后质量/mg	原子氧辐照引起的质量损失/mg	等效注量/cm^{-2}
1	标准 Kapton	否	194.12	190.88	3.24	1.1×10^{20}
2	标准 Kapton	是	189.29	185.85	3.44	1.1×10^{20}
3	镀铝 Kapton	否	172.23	172.22	0.01	1.1×10^{20}
4	镀铝 Kapton	是	164.86	164.01	0.75	1.1×10^{20}

量变小, 且碎片速度越快, 质量损失越大. 主要原因是碎片高速撞击在靶材料中产生激波, 并在撞击区域导致极高的压力和温度 [13]. 在如此高的压力和温度下, 碎片及靶会发生碎裂、熔化甚至汽化, 使一定体积的靶物质被抛射出来形成弹坑, 并在弹坑周围一定范围内造成形变及结构破坏.

从表 2 可以看到, 同样的原子氧通量下, 碎片撞击后的 Kapton 以及镀铝 Kapton 样品质量损失要明显大于未受撞击 Kapton 以及镀铝 Kapton 样品的质量损失. 而且, 镀铝 Kapton 在未受到碎片撞击的情况下, 具有很好的抗原子氧侵蚀能力. 在原子氧等效注入通量为 $1.1\times10^{20}\,cm^{-2}$ 时, 其质量损失很小, 而受到碎片撞击之后, 其抗原子氧侵蚀能力显著下降, 在原子氧等效注入通量为 $1.1\times10^{20}\,cm^{-2}$ 时, 其质量损失比较大.

3.2 形貌变化

利用扫描电子显微镜分别对标准 Kapton 样品、撞击后的 Kapton 样品、镀铝 Kapton 样品受原子氧辐照前后进行了表面形貌测试.

图 3 为标准 Kapton 样品受到原子氧侵蚀前后的表面形貌. 其中, 图 3(a) 为未受原子氧侵蚀的标准 Kapton 样品在扫描电子显微镜下放大 10 000 倍后的表面形貌图. 从图中可以看出其表面平整均匀. 图 3(b) 为受到原子氧侵蚀后的标准 Kapton 样品在扫描电子显微镜下放大 30 000 倍后的表面形貌图. 从图 3 可以看出受到侵蚀之后样品表面呈现出疏松的地毯状形貌.

图 4 为标准 Kapton 样品受碎片撞击和原子氧侵蚀后表面形貌的扫描电镜图. 图 4(a) 为放大 600 倍时看到的完整撞击坑及其周围样品的形貌图. 可以看出, 撞击坑中心区域样品形貌发生严重变化, 出现了穿孔以及明显的裂纹等结构破坏, 而在撞击坑周围出现了以撞击坑为中心的海岸线形态的侵蚀区域. 图 4(b) 所示为放大 10 000 倍时撞击坑周围海岸线形态的侵蚀区域细节. 可以看出, 在靠近撞击坑的区域, 由于碎片撞击形成的局部高温以及撞击形成的冲击波使得材料的结构发生破坏, 抗原子氧侵蚀性能明显降低; 此外, 在图 4(b) 中可以明显看出, 靠近撞击坑

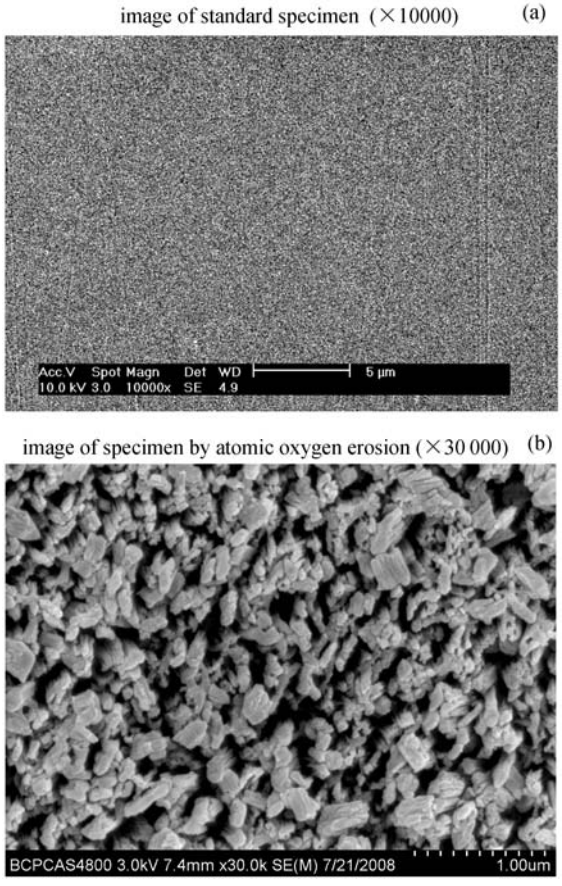


图 3 标准 Kapton 样品受原子氧侵蚀前后表面形貌的扫描电镜图

Fig. 3 Image of standard Kapton specimen in SEM before and after atomic oxygen erosion

的区域样品表面颜色更深, 这主要是由撞击过程中形成的溅射物质沉积在样品上形成的. 图 4(c) 为放大 10 000 倍时, 撞击坑附近撞击形成的裂纹及原子氧侵蚀后的形貌图. 在图 4(c) 中, 可以看到一条明显的裂纹由撞击坑中心向外扩展. 微粒超高速撞击过程中形成的冲击波以及局部高温所导致的材料结构破坏可能是导致其抗原氧侵蚀能力降低的主要原因.

图 5 为镀铝 Kapton 样品受到碎片撞击和原子氧侵蚀后的表面形貌. 图 5(a) 为碎片撞击及原子氧侵蚀后镀铝 Kapton 样品在放大倍数为 600 时的表面形貌. 从图 5(a) 中可以看到明显的撞击穿孔穿透了整个样品, 在撞击穿孔周围形成了一个较大的铝被撞击所形成冲击波剥蚀掉的区域, 此外能够看到, 剥蚀后暴露的 Kapton 材料由于受到原子氧侵蚀, 表面变得不平整. 图 5(b) 为镀铝 Kapton 材料受到碎片撞击后, 在放大倍数为 10 000 倍时撞击坑周围的形貌. 从图 5(b) 可以看出, 碎片撞击后, 在撞击坑周围出现了镀铝层剥蚀的区域, 在剥蚀区域 Kapton 材料暴露出来, 并且在 Kapton 材料表面沉积有撞击形成的溅射颗粒. 图 5(c) 所示为碎片撞击及原子氧侵蚀后镀铝 Kapton 样品在放大倍数为 30 000 时的表面形貌. 从图 5(c) 可以看出, 碎片撞击使得撞击坑附近的镀铝层被剥蚀后暴露的 Kapton 材料受原子氧侵蚀十分严重, 而在镀铝层遮挡层下的 Kapton 材料受到侵蚀的效果不明显.

镀铝 Kapton 样品由于受到碎片撞击造成其表

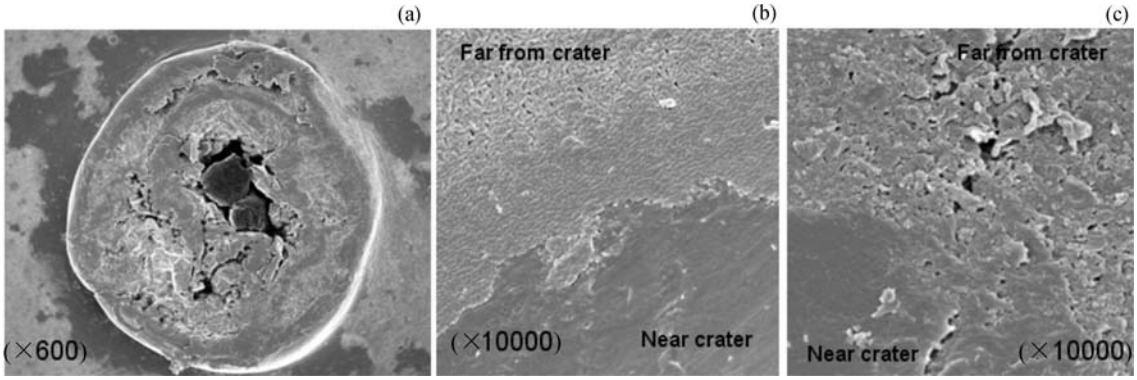


图 4 Kapton 样品受到碎片撞击和原子氧侵蚀后表面形貌的扫描电镜图

Fig. 4 Image of Kapton after small space debris impact and atomic oxygen erosion in SEM

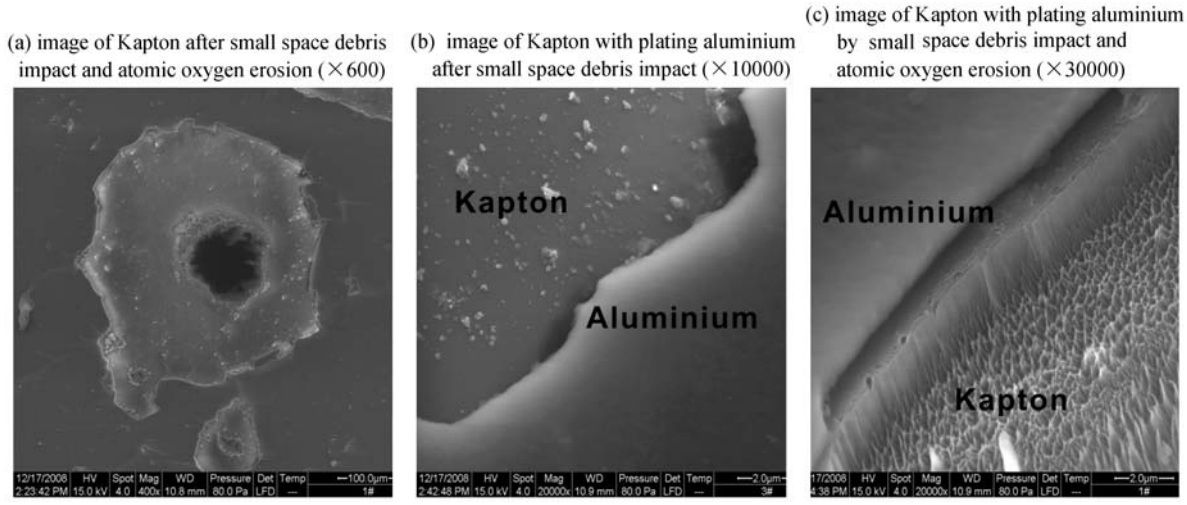


图 5 镀铝 Kapton 样品受到碎片撞击和原子氧侵蚀后表面形貌的扫描电镜图

Fig. 5 Image of Kapton with plating aluminium after small space debris impact and atomic oxygen erosion in SEM

面抗原子氧的镀铝层脱落或剥蚀, 使得 Kapton 材料直接暴露在原子氧环境之中, 可能是导致镀铝 Kapton 材料在受到碎片撞击与原子氧协同作用后, 其质量损失远大于未受碎片撞击而仅受原子氧侵蚀时质量损失的原因, 也是使得镀铝 Kapton 材料抗原子氧侵蚀性能严重下降的关键因素.

4 结语

微小碎片和原子氧都是影响空间材料应用及寿命最主要的空间环境要素之一, 两者的协同作用将大大加剧空间材料遭遇的侵蚀效应. 以空间常用材料 Kapton 为例, 利用等离子体微小碎片加速器和原子氧模拟器研究了微小碎片和原子氧对空间材料协同作用的基本规律. 实验结果显示, 微小碎片撞击能够加剧原子氧对标准 Kapton 材料和镀铝 Kapton 材料的侵蚀效应, 且对镀铝 Kapton 材料的影响更明显, 揭示了微小空间碎片与原子氧协同作用对 Kapton 材料的影响. 此外, 碎片撞击还会形成材料局部区域的结构损伤, 对航天器安全性和可靠性构成威胁. 对于长寿命航天器来说, 热控涂层、绝缘部件、太阳电池的固定底座等暴露部件必然遭遇微小碎片和原子氧的协同侵蚀作用, 因此在考虑原子氧侵蚀效应时, 必须考虑碎片与原子氧的协同效应.

参考文献

[1] Finckenor M M, Edwards L D, *et al*. Test and analysis capabilities of the space environment effects team at Marshall space flight center [R]. NASA/TP-2002-212076

[2] Han Jianwei, Zhang Zhenlong, Huang Jianguo, Li Xiaoyin, Chen Zhaofeng, Quan Ronghui, Li Hongwei. Launching of hypervelocity micro space debris by plasma accelerator [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2006, **23**:205. In Chinese (韩建伟, 张振龙, 黄建国, 李小银, 陈赵峰, 全荣辉, 李宏伟. 利用等离子体加速器发射超高速微小空间碎片研究 [J]. 航天器环境工程, 2006 , **23**:205)

[3] Zhang Wei, Guan Gongshun, Pang Baojun, Zhang Zehua. Research on hypervelocity impact acceleration technology and applications [J]. *J. Harbin Inst. Tech.*, 2005, **37**: 1324. In Chinese (张伟, 管公顺, 庞宝君, 张泽华. 超高速撞击加速技术及其应用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**:1324)

[4] Zhang Wenbing, Gong Zizheng,Yang Jiyun, Tong Jingyu, Xiang Shuhong. The laser-driven flyer system for space debris hypervelocity impact simulations [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2007, **24**:148

[5] Tong Jingyu, Liu Xiangpeng, Zhang Chao, Xiang Shuhong, Duo Shuwang, Li Meishuan. The space atomic oxygen environment erosion on spacecraft surfaces and its protection techniques [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2009, **26**:1. In Chinese (童靖宇, 刘向鹏, 张超, 向树红, 多树旺, 李美栓. 空间原子氧环境对航天器表面侵蚀效应及防护技术 [J]. 航天器环境工程, 2009, **26**:1)

[6] Shen Zhigang, Zhao Xiaohu, Chen Jun, Wang Zhongtao, Xing Yushan, Ma Shulin. Ground based atomic oxygen effects simulation facility with the filament discharge and bound of magnetic fiel [J]. *Acta Aeron. Astron. Sinica*, 2000, **21**:425. (沈志刚, 赵小虎, 陈军, 王忠涛, 邢玉山, 麻树林. 灯丝放电磁场约束型原子氧效应地面模拟试验设备 [J]. 航空学报, 2000, **21**:425)

[7] Shuwang Duo, Meishuan Li, Yaming Zhang. A simulator for producing of high flux atomic oxygen beam by using ECR plasma source [J]. *J. Mater. Sci. Tech.*, 2004, **20**:759

[8] Tong Jingyu, Li Jinhong, Liu Feng. A compact atomic oxygen simulator with microwave plasma [J]. *Chin. Space Sci. Tech.*, 1995, **4**:60. In Chinese (童靖宇, 李金洪, 刘峰. 一种微波等离子体原子氧模拟装置 [J]. 中国空间科学技术, 1995, **4**:60)

[9] Wang Jingyi, Yu Zhizhan, Cai Chun, Li Hong, Zhang Jingqin. Coaxial atomic oxygen simulation facility and its properties [J]. *Chin. Space Sci. Tech.*, 1998, **5**: 50. In Chinese (王敬宜, 于志战, 蔡纯, 李红, 张景欣. 同轴源原子氧地面模拟装置及其性能 [J]. 中国空间科学技术, 1998, **5**: 50)

[10] Verker R, Grossman1 E, Gouzman I, *et al*. Synergistic effect of simulated hypervelocity space debris and atomic oxygen on durability of poss-polyimide nanocomposite [OL]. Space Environment Group, Soreq NRC. http://www.soreq.gov.il/pdf/pirsumim/pirsimimfull/1535.pdf

[11] Huang Jianguo, Han Jianwei, Li Hongwei, *et al*. Mechanism and operation parameters of a plasma-driven microparticle accelerator [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(2):150. In Chinese (黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 等. 等离子驱动微小碎片加速器机理及运行参数 [J]. 科学通报, 2009, **54**(2):150)

[12] Cai Minghui, Han Jianwei, Yu Jinxiang. An LEO atomic oxygen device based on PIG negative oxygen ion source [J]. *Nuc. Tech.*, 2008, **31**(4):265. In Chinese (蔡明辉, 韩建伟, 于金祥. 基于负离子潘宁源的低地球轨道原子氧模拟装置 [J]. 核技术, 2008, **31**(4):265)

[13] Gerhard Drolshagen. Impact effect from small size meteoroids and space debris [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**:1123