

文章编号: 1000-6893(2001) 03-0235-05

# 空间用聚四氟乙烯材料的原子氧、 温度、紫外辐射效应的试验研究

赵小虎, 沈志刚, 王忠涛, 邢玉山, 麻树林

(北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ATOMIC OXYGEN, TEMPERATURE, ULTRAVIOLET RADIATION EFFECTS ON A SPACECRAFT MATERIAL-POLYTETRAFLUOROETHYLENE

ZHAO Xiao-hu, SHEN Zhi-gang, WANG Zhong-tao, XING Yu-shan, MA Shu-lin

(Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**摘 要:** 在 IFM 原子氧剥蚀效应地面模拟设备中对空间常用材料聚四氟乙烯进行了原子氧剥蚀效应试验, 试样温度升高对原子氧效应的影响以及原子氧与紫外辐射复合效应试验, 对试验前后试样的质量及表面形貌进行了比较, 得出了材料在设备中的反应特点以及温度升高、紫外辐射对材料的原子氧效应的影响规律。对原子氧与材料的反应机理也做了相应的分析。同时还测量比较了原子氧暴露试验前后、原子氧与紫外辐射复合作用前后试样的反射率、透射率等光学性质。

**关键词:** 原子氧效应; 地面模拟试验; 紫外辐射; 光学性质

中图分类号: V255 文献标识码: A

**Abstract:** Spacecraft, running in Low-Earth-Orbit (LEO), will react with environmental conditions, such as atomic oxygen, thermal cycling and ultraviolet radiation, which may severely affect the longevity of spacecraft. Fluorination has lower erosion rate than other materials in space flight exposure tests. So the interactions between this kind of material and environment are of great interest to the aerospace engineering community. Polytetrafluoroethylene (PTFE Teflon) is a commonly used spacecraft material, on which experiment are constructed in this paper to investigate the atomic oxygen erosion effects, the impact of the temperature change on the atomic oxygen effects and the ultraviolet radiation effects with atomic oxygen effects ground-based simulation facility. The sample material before and after the experiments is compared in mass and surface morphology. The reaction characteristics of the material in the facility and the impact of temperature change and ultraviolet radiation on atomic oxygen effects were acquired. Through analyzing the reaction mechanism between atomic oxygen and PTFE Teflon, it was concluded that the collision of energetic particles may be an important factor of PTFE Teflon mass loss. Optic properties, such as reflectivity and transmissivity, before and after experiments were measured and compared.

**Key words:** atomic oxygen effects; ground-based experiment; ultraviolet radiation; optical properties

低地球轨道(LEO)环境中空间飞行器面临各种轨道环境效应的严峻考验, 早期的航天飞行活动已观察到飞行器与空间环境相互作用而产生的一些现象, 有时飞行器表面材料会有显著变化, 并影响飞行器的使用寿命<sup>[1-4]</sup>。研究表明这主要是由 LEO 中的主要组分原子氧(AO)引起的。除原子氧效应外, 飞行器在 LEO 环境中运行还会受到高温、低温、紫外辐射等其它环境效应的影响。LEO 环境中飞行器受到的是交变温度的影响, 热

交变过程可能会引起材料的热疲劳, 导致材料表面出现微裂纹, 对材料与原子氧之间相互作用产生影响, 国外对此作了一定的研究<sup>[5,6]</sup>。只占太阳整个波长辐射量 8% 的紫外辐射(UV, 波长为 100 ~ 400nm), 特别是 100 ~ 200nm 波长范围的真空紫外辐射(VUV), 可能会引起有机物内部各种化学键的断裂, 使有机物材料表面脆化, 出现裂纹, 并有可能使力学性能发生变化<sup>[7,8]</sup>。

聚四氟乙烯材料在空间有非常广泛的应用, 空间飞行暴露试验得出其剥蚀率约为 0.03 ~ 0.5 × 10<sup>-24</sup> cm<sup>3</sup>/atom<sup>[5,9,10]</sup>, 而且含氟化合物的剥蚀率普遍要小, 因此对这种材料的结构和剥蚀机理

收稿日期: 2000-04-03; 修订日期: 2000-09-07

基金项目: 国家 863 高技术航天领域资助项目(863-2-2-1-22)

文章网址: <http://www.cnki.net/acta/2001/03/0235/>

Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

的研究有助于进一步发展可抵抗原子氧剥蚀的新型聚合物材料,为此国外做了大量的地面模拟试验,然而地面试验所得到的剥蚀率结果却比空间结果大得多,对这种材料深入的研究对于正确理解原子氧与不同材料的作用机理有很大的帮助。

## 1 试验设备

试验设备为自行设计的 IFM 原子氧效应地面模拟设备<sup>[11]</sup>。本次试验中为使设备能够进行原子氧、温度变化、紫外辐射效应试验,增加了电加热系统和紫外辐射系统。试样表面温度是通过一试样加热器来加以控制,紫外辐射系统由紫外光源氙灯和灯的电源两部分组成。氙灯的紫外辐射强度与太阳的辐射强度比较曲线见图 1。

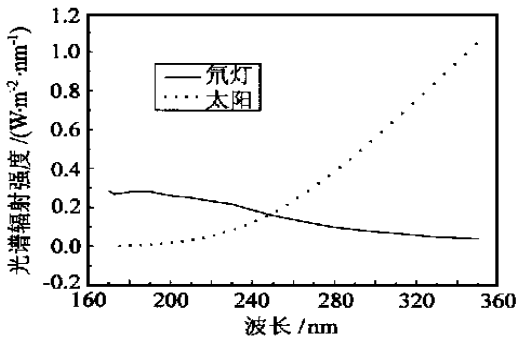


图 1 氙灯紫外辐射与太阳紫外辐射的能量谱线

Fig. 1 Deuterium lamp and solar energy spectral line in ultraviolet

## 2 试验结果及分析

由于原子氧通量的准确测量问题目前尚未解决,因此本文中仍用相同放电条件下标准材料 Kapton 的质量损失推算得到的等效通量作为计算聚四氟乙烯材料剥蚀率的标准。

### 2.1 原子氧效应试验结果与分析

在许多文献中都谈到空间环境中含氟化合物

表 1 聚四氟乙烯试样的原子氧暴露试验质量损失结果( $\rho=2.75\text{g}/\text{cm}^3$ , 暴露时间  $t=10\text{h}$ )

Table 1 Mass loss of samples after AO exposure experiment (exposure time= 10h)

参数	样品号	
	7	15
试验前质量/g	0.09410	0.08085
试验后质量/g	0.08320	0.07105
质量损失 $\Delta M_2/\text{g}$	0.01090	0.00980
同条件下 Kapton 材料的质量损失 $\Delta M_1/\text{g}$	0.00515	0.00560
等效瞬时通量/ $(\text{atoms} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$8.51 \times 10^{15}$	$9.26 \times 10^{15}$
剥蚀率 $E_y/(\text{cm}^3 \cdot \text{atom}^{-1})$	$3.23 \times 10^{-24}$	$2.6 \times 10^{-24}$
平均剥蚀率/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{atom}^{-1})$	$2.945 \times 10^{-24}$	
文献的剥蚀率结果	飞行试验/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{atom}^{-1})$ < $0.05 \times 10^{-24}$ <sup>[13]</sup> , $0.03 \sim 0.5 \times 10^{-24}$ <sup>[9, 10]</sup> , $0.56 \times 10^{-24}$ <sup>[12]</sup>	
地面模拟/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{atom}^{-1})$	$3.2 \times 10^{-23}$ <sup>[14]</sup> , $1.33 \times 10^{-24}$ <sup>[14]</sup>	
	$0.4 \times 10^{-24} \sim 1.9 \times 10^{-24}$ <sup>[13]</sup> , $0.8 \times 10^{-24} \sim 4.77 \times 10^{-24}$ <sup>[15]</sup>	

的剥蚀率要比普通碳氢化合物小得多<sup>[5, 9, 10, 12]</sup>。表 1 是 IFM 设备中聚四氟乙烯试样的原子氧暴露试验结果,由试样与 Kapton 的质量损失比推算得到的平均剥蚀率为  $2.945 \times 10^{-24} \text{cm}^3/\text{atom}$ ,比空间暴露试验结果大,但却与国外其它地面模拟设备中的结果相当<sup>[13~15]</sup>。表 2 是以氩气为工作气体时,聚四氟乙烯材料暴露在氩等离子体中的质量损失结果,由于氩为惰性气体,氩原子不会与材料发生反应,因此这种试验安排可以定性地研究离子在聚四氟乙烯的质量损失中能起到的作用。试验指出,与 Kapton 相比,聚四氟乙烯材料在离子碰撞作用下质量有较大的变化。而在等离子体地面模拟设备中,除了  $0.04\text{eV}$  的低能原子氧以外,还有通量达  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  的高能离子(其能量约为  $10 \sim 20\text{eV}$ )的碰撞作用,这些粒子的能量远高于聚四氟乙烯中  $5.5\text{eV}$  的 C-F 键键能,高能粒子的碰撞可能会使材料的化学键断裂形成小分子的挥发性产物,也为材料与原子氧的反应提供了更多的机会<sup>[15, 16]</sup>。高能粒子的碰撞可能是聚四氟乙烯材料产生质量损失的一个重要因素,也是地面模拟设备中聚四氟乙烯的剥蚀率远远高于空间结果的主要原因之一。

图 2 是原子氧暴露试验前聚四氟乙烯试样的扫描电镜照片,图 3(a), (b) 分别对应于经不同等效原子氧累计通量暴露试验后试样的 SEM 照片(等效通量为  $7.13 \times 10^{19}$ ,  $3.07 \times 10^{20} \text{atoms}/\text{cm}^2$ ),可以看出试验前材料表面非常光滑,在小通量暴露后表面形貌变化不大,只有很少量的地方出现了一些点状物质,而经较大通量的原子氧暴露后,表面形貌变化比较明显,高低起伏呈沟壑状,且点状物增多,说明放电室内氧等离子体对聚四氟乙烯材料的剥蚀还是比较严重的。

表2 聚四氟乙烯试样在氩等离子体中的试验结果(暴露时间  $t = 4\text{h}10\text{min}$ )

Table 2 Mass loss of samples after Ar plasma exposure experiment(exposure time= 4h10min)

参数	样品号	
	聚四氟乙烯	Kapton
气压/Pa	$1.0 \times 10^{-1}$	
放电电压/V	120	
放电电流/mA	160	
瞬时离子通量/(ions · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	$5.47 \times 10^{14}$	
试验前质量/g	0.08455	0.02235
试验后质量/g	0.08420	0.02235
质量损失/g	0.00035	0.0

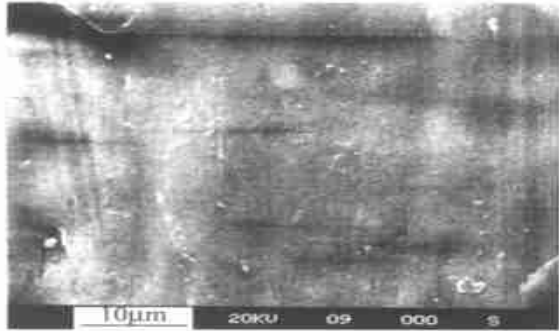


图2 原子氧暴露试验前的聚四氟乙烯试样  
Fig.2 SEM of sample before AO exposure experiment

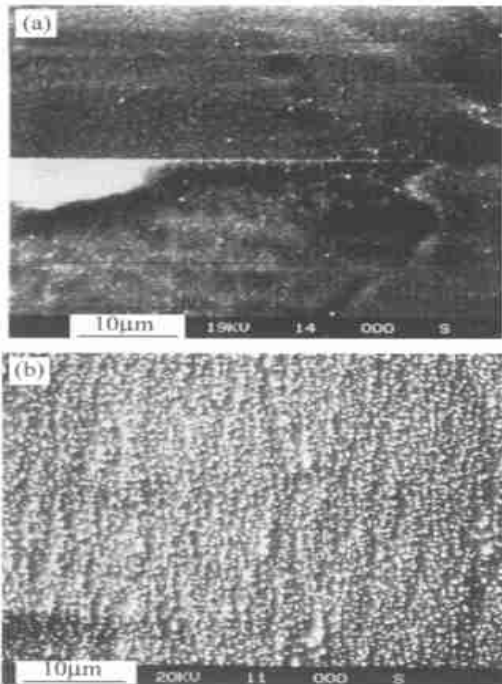


图3 原子氧暴露试验后的聚四氟乙烯试样  
(a) 累计通量=  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>;  
(b) 累计通量=  $3.07 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>2</sup>

Fig.3 SEM of sample after AO exposure experiment

(a) fluence =  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>;  
(b) fluence =  $3.07 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>2</sup>

$3.07 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的暴露试验前后的反射率、透射率曲线, 可知材料在原子氧暴露试验后反射率、透射率都没有什么大的变化。

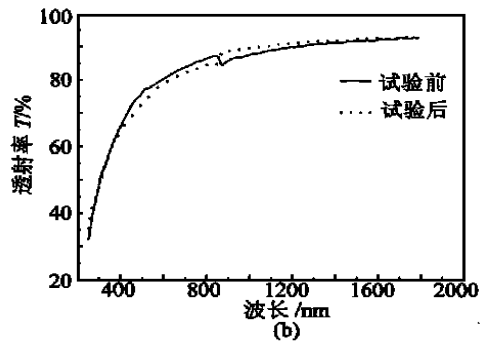
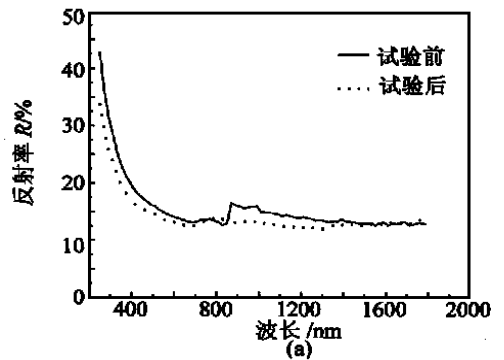


图4 聚四氟乙烯试样原子氧暴露试验前后的反射率与透射率曲线(累计通量为  $3.07 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>2</sup>)

Fig.4 Reflectivity and transmissivity of sample before and after AO exposure experiment

## 2.2 原子氧与温度复合效应试验结果与分析

表3是材料的原子氧与温度复合效应试验的质量损失结果, 由表知随温度的升高, 材料的质量损失有较大幅度的增大。

图5是原子氧与温度复合效应试验后聚四氟乙烯试样的SEM照片, 与图3(a)相比, 可看到剥蚀要更明显, 说明温度的升高不仅引起试样质量损失的增大, 也给表面形貌带来一定的变化。

图4是聚四氟乙烯在等效原子氧累计通量为

表3 聚四氟乙烯材料的原子氧与温度复合效应试验的质量损失结果(暴露时间  $t=10\text{h}$ )

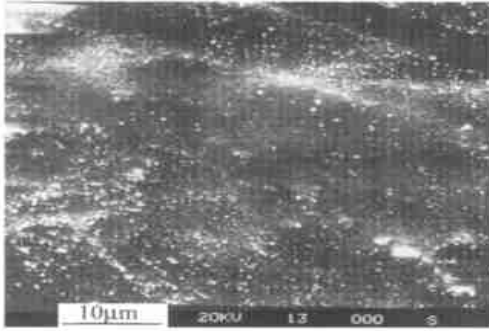
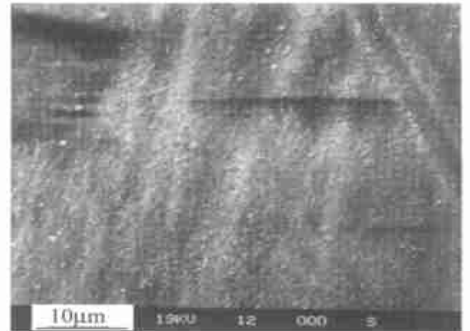
Table 3 Mass loss of samples after AO and temperature synergistic experiment (exposure time= 10h)

参数	样品号			
	6	5	23	22
样品温度/	70	110	70	130
等效瞬时通量/(atoms · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	6.20 × 10 <sup>15</sup>		1.98 × 10 <sup>15</sup>	
试验前质量/g	0.08525	0.08000	0.09020	0.09225
试验后质量/g	0.07350	0.06715	0.08525	0.08610
质量损失/g	0.01175	0.01285	0.00495	0.00615

表4 聚四氟乙烯材料的原子氧与紫外辐射复合效应试验的质量损失结果(暴露时间  $t=10\text{h}$ )

Table 4 Mass loss of samples after AO and ultraviolet synergistic experiment (exposure time= 10h)

参数	样品号		
	23	22	21
试验状态(温度/ )	AO 暴露(70)	AO 与温度复合(130)	AO 与紫外复合(130)
等效瞬时通量/(atoms · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.98 × 10 <sup>15</sup>		
试验前质量/g	0.09020	0.09225	0.10030
试验后质量/g	0.08525	0.08610	0.09410
质量损失/g	0.00495	0.00615	0.00620

图5 原子氧与温度复合作用后的试样  
(累计通量 =  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>)Fig. 5 SEM of sample after AO and temperature synergistic experiment, fluence =  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>图6 原子氧与紫外辐射复合作用后的试样  
(累计通量 =  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>)Fig. 6 SEM of sample after AO and ultraviolet synergistic experiment, fluence =  $7.13 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>2</sup>

### 2.3 原子氧与紫外辐射复合效应试验结果与分析

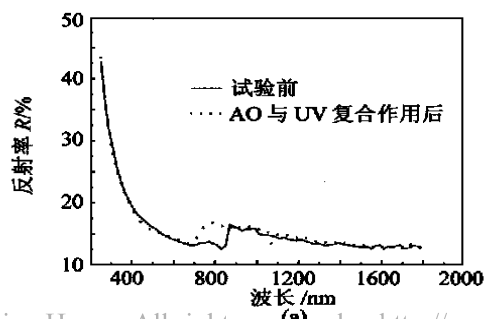
表4是聚四氟乙烯材料的原子氧与紫外辐射复合效应试验后的质量损失结果,在同样的温度和原子氧条件下,紫外辐射对材料的质量损失没什么影响,这与文献[16]中的试验结果相一致。但文献[9,17]指出空间、地面试验中真空紫外辐射对材料可能会产生较为严重的影响,而试验中,可能是由于UV辐射波长短(与VUV相比),能量较小,因此没有发生这种现象,图6是原子氧与紫外复合效应试验后聚四氟乙烯试样的SEM照片,与图5相比,可以看到紫外辐射与原子氧的复合给表面形貌带来了显著的影响。

图7是聚四氟乙烯在原子氧与紫外辐射复合作用后的反射率与透射率曲线,可以看到原子氧与紫外的复合作用对材料的光学性质略有影响。

### 3 结论

(1) 聚四氟乙烯材料在IFM地面模拟设备中剥蚀较为严重,得到的材料剥蚀率数据比空间飞行暴露试验结果大得多,可能是设备中存在的大量高能带电粒子的碰撞造成的。

(2) 随试样温度的升高,聚四氟乙烯的质量损失增大,而且表面形貌也有一定的变化。



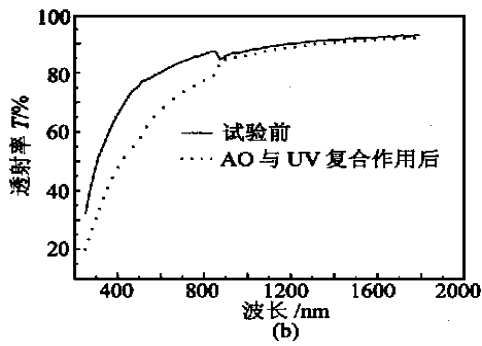


图7 聚四氟乙烯试样在原子氧与紫外辐射复合效应试验前后的反射率与透射率曲线

Fig. 7 Reflectivity and transmissivity of sample before and after AO and ultraviolet synergistic experiment

(3) 原子氧与紫外辐射的复合有明显影响。

(4) 聚四氟乙烯材料在原子氧暴露、紫外辐射与原子氧复合效应试验后其反射率、透射率的变化都不大。

### 参 考 文 献

- [1] Coulter D R, Liang R H. O-Atoms degradation mechanisms of materials[R]. N87-26178, Pasadena: NASA, 1987. 39 ~ 46.
- [2] Leger L J. Low earth orbit atomic oxygen effects on surfaces[R]. AIAA 84-0548, Houston: AIAA, 1984.
- [3] Leger L J, Mason B S. Review of LEO flight experiment [R]. N87-26174, Houston: NASA, 1987. 1 ~ 10.
- [4] Lee A L, Rhoads G D. Prediction of thermal control surface degradation due to Atomic Oxygen interaction[R]. AIAA-85-1065, Sunnyvale: AIAA, 1985.
- [5] Silverman E M. Spacecraft environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide[R]. N96-10860, Redondo: NASA, 1996. 1-1 ~ 14-19.
- [6] de Groh K K, Smith D C. Investigation of Teflon FEP embrittlement on spacecraft in low earth orbit[A]. Proceeding of the 7th International Symposium on "Materials in Space Environment"[C]. Toulouse, France: ESA SP-399, 1997. 255 ~ 266.
- [7] Dever J A, Bruckner E J, Rodriguez E. Synergistic effects of ultraviolet radiation, thermal cycling and atomic oxygen on altered and coated Kapton surfaces[R]. AIAA92-0794, Cleveland: AIAA, 1992.
- [8] Stiegman A E, Brinza D E, Anderson M S, et al. An investigation of the degradation of fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer thermal blanketing materials aboard LDEF and in the laboratory [R]. N93-25078, Pasadena: NASA, 1993. 1 ~ 18.
- [9] Koontz S L, Leger L J, Visentine J T, et al. EOIM-III mass spectrometry and polymer chemistry: STS46, July-August 1992 [J]. Journal of Spacecraft and Rockets,

1995, 32(3): 483 ~ 495.

- [10] Packirisamy S, Schwam D, Litt M H. Atomic oxygen resistant coatings for Low Earth Orbit space structures[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 308 ~ 320.
- [11] 沈志刚, 赵小虎, 王忠涛, 等. 灯丝放电电磁约束型原子氧效应地面模拟设备[J]. 航空学报. 2000, 21(5): 425 ~ 430.
- [12] Leger L J. Oxygen atom reaction with shuttle material at orbital altitudes—data and experiment status [R]. AIAA-83-0073, Houston: AIAA, 1983.
- [13] Cazaubon B, Paillous A, Siffre J, et al. Mass spectrometric analysis of reaction products of fast oxygen atoms-material interactions[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(6): 797 ~ 804.
- [14] Ferguson D C. The energy dependence and surface morphology of Kapton degradation under atomic oxygen bombardment[A]. 13<sup>th</sup> Space Simulation Conference: the Payload-Testing for Success [C]. Orlando, Florida, 1984. 205 ~ 211.
- [15] Rutledge S K, Banks B A, Cales M. A comparison of atomic oxygen erosion yields of carbon and selected polymers exposed in ground based facilities and in Low Earth Orbit[R]. AIAA-94-2628, Cleveland: AIAA, 1994.
- [16] Rutledge S K, Banks B A. A technique for synergistic atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation durability evaluation of materials for use in LEO[R]. N96-29654, Cleveland: NASA, 1996. 1 ~ 19.
- [17] Cross J B, Koontz S L. Ground-based simulation of LEO environment: investigations of a select LDEF material - FEP Teflon [R]. N94-31039, Los Alamos: NASA, 1994. 379 ~ 389.

### 作者简介:



赵小虎 男, 26岁, 博士研究生。研究方向: 空间环境中原子氧与材料相互作用的现象与机理以及在地面设备中如何对其进行模拟; 流体力学在工程上的应用。电话: 82317516; E-mail: ltiger\_z@263.net。



沈志刚 男, 42岁, 教授, 博士生导师。研究方向: 低地球轨道空间环境对空间飞行器的影响, 空间环境原子氧剥蚀效应研究, 空间环境地面模拟试验研究; 超细颗粒的制备技术研究, 固体废料的处理、开发与应用等。电话: 82317516; E-mail: shenzg@public.fh-net.cn.net

王忠涛 男, 26岁, 硕士研究生, 2000年毕业。电话: 82317516。

邢玉山 女, 49岁, 高级实验师。研究方向: 实验流体力学与测控技术。电话: 82317516。

麻树林 男, 41岁, 高级工程师。研究方向: 实验力学, 应用技术开发。电话: 82317516。