

# 环氧固封和硅橡胶的空间原子氧效应分析

姜利祥 李 涛 冯伟泉 孟海江 刘向鹏 郭 亮

(中国空间技术研究院总装与环境工程部)

**摘 要** 对磁力矩器用环氧固封和硅橡胶材料进行原子氧和真空效应评价试验,利用新型的原子氧环境模拟设备及其它分析手段对试样的质量损失率 (SAML) 和表面形貌的变化进行研究。试验结果表明,真空环境会导致材料产生质量损失,两种材料中真空质损最大相差 2.5 倍;原子氧作用导致聚合物材料发生颜色变化,且造成材料的质损,两种材料的质损率最大相差 25 倍;原子氧与硅橡胶中的有机硅反应能够形成保护层,可以抑制原子氧对材料内部的进一步侵蚀。

**关键词** 环氧固封 硅橡胶 原子氧 真空 质量损失

航天器在轨服役期间将受到各种空间环境因素的强烈作用,研究表明,空间环境因素会破坏航天器上高分子材料的化学键,使材料产生质量损失<sup>[1-2]</sup>、表面析气现象<sup>[6]</sup>,机械性能恶化<sup>[3-5]</sup>。距地球表面 200~700km 的近地轨道(LEO)空间环境恶劣,主要包括高能电子流、高活性原子氧、太阳紫外辐射、温度交变循环,微流星体及空间碎片等,所有这些因素都会对空间材料产生影响,它会直接影响载人航天器正常的运行和在轨服役寿命。其中空间原子氧是危害 LEO 航天器在轨性能的主要空间环境因素之一。当强氧化性、大通量、高能量的原子氧作用在飞行器表面时,将会造成表面材料的剥蚀和性能退化,并会影响到飞行器的使用寿命。由于绝大多数的载人航天器均运行在 LEO 轨道,因此对空间原子氧环境的适应性设计就显得尤为重要。

磁力矩器如果安装在载人航天器的外部,磁力矩器用聚合物材料将受到太阳电磁辐射、空间带电粒子辐照、原子氧等环境因素的作用,而原子氧的侵蚀作用是总体设计中必须重点关注的内容。为保证磁力矩器在轨期间的正常工作,需对其所使用的聚合物材料进行地面模拟试验,以掌握和了解其抗原子氧能力,进而为磁力矩器的防护设计提供参考依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验设备及材料

该原子氧源利用微波的波导传输和耦合原理以及电磁场产生不对称轴向磁镜场,使离子在磁镜场的作用下扩散到中性化靶,经过加速、撞击、反射、中性化等一系列物理过程,从而产生原子氧束流。试验设备参数:原子氧通量密度  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ AO cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,束流能量 5~10eV,束流均匀性 15%,均匀辐照区  $\Phi 150 \text{ mm}$ ,工作真空度  $10^{-2} \text{ Pa}$ 。

试验材料:T1-环氧固封 E-44,T2-硅橡胶 GD414。

### 1.2 试验方法

用专用工具将试样切割,尺寸为  $\Phi 15 \text{ mm}$ 。辐照前试样用无水乙醇清洗,固定在专用夹具内,有效暴露区  $\Phi 10 \text{ mm}$ 。将夹具固定在靶台上,同时非暴露区安装对比试样,用于真空质损对比测试。原子氧通量密度  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ AO cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,工作真空度  $10^{-2} \text{ Pa}$ ,积分通量分别选取  $0.1 \times 10^{21} \text{ AO cm}^{-2}$ ,  $0.5 \times 10^{21} \text{ AO cm}^{-2}$ ,  $1.0 \times 10^{21} \text{ AO cm}^{-2}$ ,  $1.5 \times 10^{21} \text{ AO cm}^{-2}$ 。

使用赛多利斯 ME215S 专业分析天平(精度  $10^{-5} \text{ g}$ )测量原子氧辐照前后试样的质量变化,每件试样称重时测量三次,取其算术平均值,质量损失率 (SAML,单位  $\text{g/m}^2$ )计算公式为:

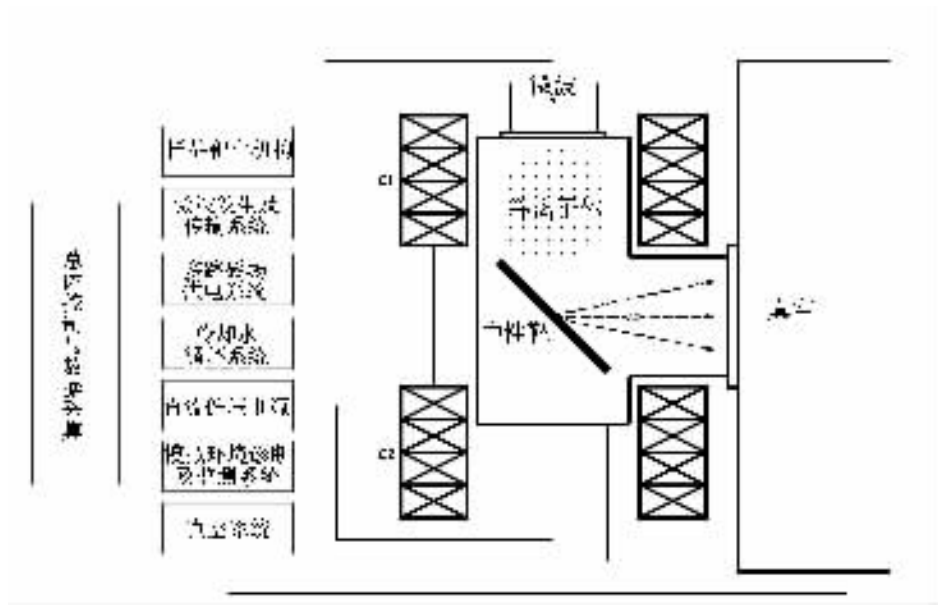


图 1 原子氧环境模拟设备原理图

$$SAML = (\Delta m_1 - \Delta m_2) / S$$

式中  $\Delta m_1$  为试样辐照前后的质量损失, 单位 g;  
 $\Delta m_2$  为真空所引起的对比试样的质量损失, 单位 g;  
 $S$  为暴露面积, 单位  $m^2$ 。

采用 OLYMPUS GX51-322D 型倒置式显微镜观察原子氧辐照前后试样表面的宏观形貌变化, SEM 测试在 HITACHI-S520 扫描电镜上进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 真空对质量损失的影响

图 2 为试样 T1、T2 质量损失与真空暴露时间的关系。由图中可见, 在真空暴露初期, 试样的质量损失均呈现上升趋势, 试样 T2 的变化幅度最大; 在真空暴露 10 小时后, 试样 T1 的质量损失变化趋于平

缓(图 2 中曲线 1), 而试样 T2 的质量损失还呈现上升趋势(图 2 中曲线 2); 在真空暴露 50 小时后, 试样的质量损失变化均趋于平缓; 在真空暴露 100 小时后, 试样 T1 的质量损失略有增加, 而试样 T2 的质量损失开始下降。试样 T2 的质量损失下降可能是出气产生的可凝挥发物凝聚在试样表面或者测量误差所致, 具体原因还需要进一步研究。在真空暴露期间, 试样 T2 的质量损失最大。与试样 T1 相比, 试样 T2 的质量损失是试样 T1 的 2.5 倍。

### 2.2 原子氧对质量损失率(SAML)的影响

图 3 所示为 T1 的 SAML 与原子氧积分通量的关系。由图 3 可见, 随着原子氧积分通量的增大, 试样 T1 呈现线性上升的趋势(图 3 中曲线 1)。

图 4 为原子氧和真空对试样 T2 质量损失的影响

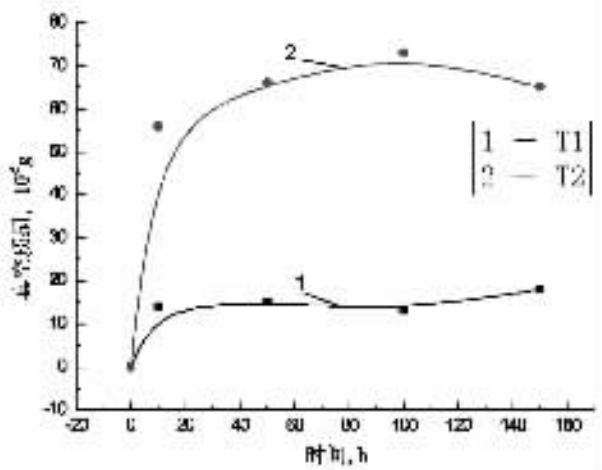


图 2 质量损失与真空暴露时间的关系

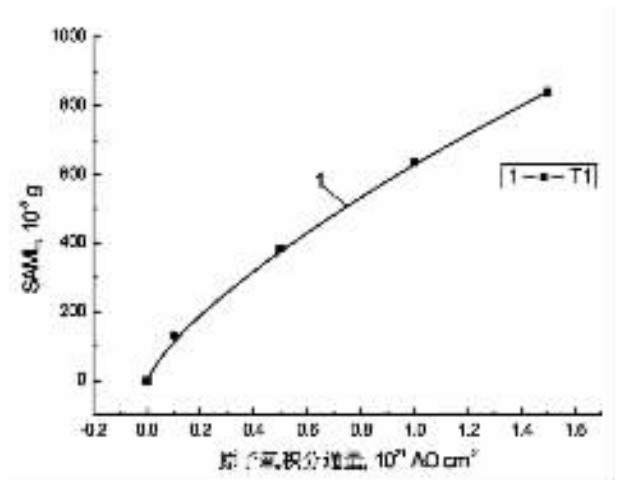


图 3 试样 T1 的质量损失率(SAML)与原子氧积分通量的关系

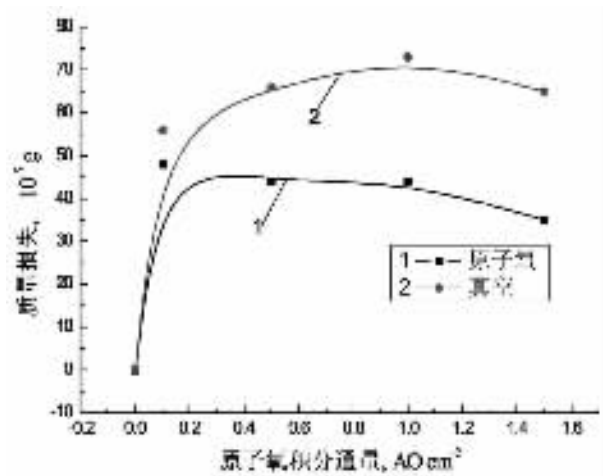


图 4 原子氧和真空对试样 T2 质量损失的影响

响。试样 T2 的质量损失表现出与试样 T1 不同的变化趋势(如图 4 所示),并且真空作用下的质量损失大于原子氧。由图中可见,原子氧积分通量为  $0.1 \times 10^{21} \text{AO cm}^{-2}$  时(真空暴露时间 10h),试样 T2 的质量损失大幅度上升,图 4 中曲线 1 和曲线 2 的上升幅度比较接近,这可能是由于试样固化中残留的小分子等物质挥发所致;原子氧积分通量为  $0.5 \times 10^{21} \text{AO cm}^{-2}$  时(真空暴露时间 50h),原子氧作用下试样 T2 的质量损失趋于平缓(图 4 中曲线 1),真空作用下试样 T2 的质量损失上升幅度也开始降低(图 4 中曲线 2);原子氧积分通量为  $1.0 \times 10^{21} \text{AO cm}^{-2}$  时(真空暴露时间 100h),原子氧和真空作用下试样 T2 的质量损失均呈现下降趋势。上述现象的出现可能有以下方面的原因:暴露初期,原子氧和真空作用下试样的质量损失增加,尤其是工艺过程中的残留物更易挥发,导致质量损失迅速上升;随着暴露时间的延长,易挥发物质减少,质量损失趋于平缓;随着暴露时间的进一步增加,质量损失略微下降,可能是出气物重新聚集在试样表面或者空气暴露以及测量误差所致,原因还有待于进一步研究。原子氧和真空分别作用下,试样 T2 的质量损失变化趋势基本相同,表明上述的两个过程可能同时进行,并且暴露初期真空效应占据主导地位。图 4 中曲线 1 的质量损失低于曲线 2 表明,原子氧与试样 T2 表面物质易发生氧化反应,形成了一层抗原子氧的保护层从而抑制了真空出气造成的质量损失,导致原子氧环境下的质量损失低于真空环境。

虽然试样 T2 的真空质量损失大于试样 T1,但是原子氧作用下的质量损失远远小于试样 T1。与试样 T2 相比,原子氧作用下试样 T1 的 SAML 增加了近 25 倍。由此表明,试样 T2 具有良好的抗原子氧性能,而试样 T1 的抗原子氧性能较差。

### 2.3 原子氧对宏观形貌的影响

图 5 为原子氧作用前后试样表面的宏观形貌。由图中可见,两种材料外观均发生了不同程度的变化,其中试样 T1 颜色变深,表面出现白色颗粒状粉末(图 5 中 T1-b),试样 T2 亮度增加且颜色由白色变为淡黄色,表面出现玻璃状凝聚物(图 5 中 T2-a 和 T2-b)。

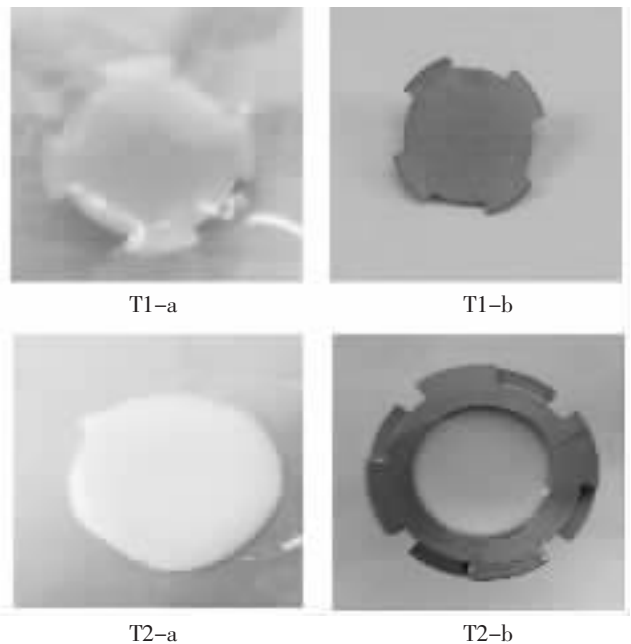


图 5 原子氧对宏观形貌的影响

a-原子氧作用前; b-原子氧作用后

试样 T1 表面的白色粉末可能是原子氧的剥蚀作用所致,这也说明试样 T1 抗原子氧性能较差;试样 T2 表面的玻璃状凝聚物可能是由于原子氧和硅橡胶密封胶中的硅反应所致;而原子氧与试样的化学反应是导致试样颜色变化的主要原因。

### 2.4 扫描电子显微镜(SEM)形貌

图 6 为两种材料试验前后的表面 SEM 形貌。通过对比可以看出,T1 样品表面出现了大量三维网状结构,表面粗糙度明显增加;T2 样品表面呈玻璃状且出现了大量的裂纹。

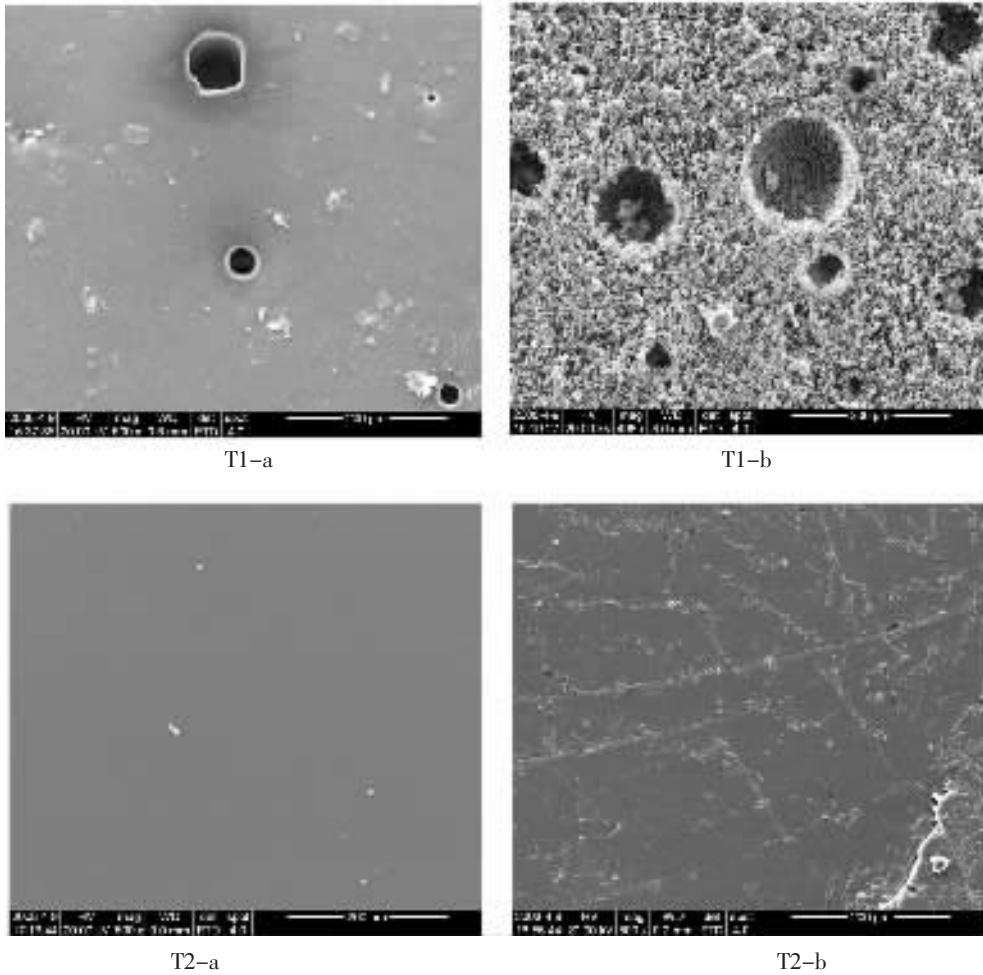


图 6 原子氧作用前后 T1 和 T2 表面的 SEM 形貌  
a-原子氧作用前； b-原子氧作用后

### 3 结论

(1) 在真空环境下, 试样 T1 的真空质损稳定性优于试样 T2; 与试样 T1 相比, 真空作用下试样 T2 的质量损失最大增加了 2.5 倍。

(2) 在原子氧环境下, 试样 T2 具有良好的抗原子氧性能, 而试样 T1 的抗原子氧性能较差; 与试样 T2 相比, 原子氧作用下试样 T1 的 SAML 增加了近 25 倍。

(3) 试样 T2 的表面物质是硅和原子氧反应形成氧化层, 可以抑制原子氧对材料的进一步侵蚀, 降低材料的质量损失。

(4) 原子氧作用导致 T1 和 T2 试样的颜色发生变化, 试样 T1 表面出现白色颗粒状粉末, 并出现了大量三维网状结构; 试样 T2 表面出现玻璃状凝聚物且出现了大量的裂纹。◇

### 参 考 文 献

[1] JIANG lixiang, HE Shiyu, LI Chundong, YANG Dezhuang. A study on resistance to VUV irradiation of nano-TiO<sub>2</sub> modified Carbon/Epoxy composites. *Journal of Materials Research* Vol.18, No.3, Mar. 2003, p654-658

[2] JIANG lixiang, HE Shiyu, LI Chundong, YANG Dezhuang, LIU Shuyun, He Song. A study on resistance to VUV and charged particles for TiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites. *Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment*. 16~20 June 2003 Noordwijk, The Netherlands, 681~686.

[3] 姜利祥, 何世禹, 盛磊. 真空紫外辐射对碳/环氧复合材料性能的影响. *强激光与粒子束*. 2005, 17(1): 131~134

[4] 姜利祥, 盛磊, 陈平等. 环氧树脂 648 和 TDE-85 的质子辐照损伤效应研究. *航天器环境工程*. 2006, 23(3): 134~137

[5] 姜利祥, 盛磊, 童靖宇, 冯伟泉. 空间级环氧树脂浇注体的电子辐照效应研究. *航天器环境工程*. 2004, 21(3): 49~54

[6] 姜利祥, 何世禹, 杨德庄. 纳米 TiO<sub>2</sub> 改性 M40/EP648 抗真空紫外辐照性能研究. *材料研究学报*. 2003, 17(4): 427~431