

# 航天器材料空间环境适应性评价技术

李涛<sup>1</sup>, 易忠<sup>1</sup>, 高鸿<sup>2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 航天器及其使用的材料在轨服役期间要经受真空、热循环、辐照、原子氧及碎片等空间环境的作用, 航天器材料的空间环境适应性是其区别于其它材料的一项重要质量特性, 评价其适应性是航天器材料质量保障工作的重要内容。推进评价技术的发展, 实现航天器材料质量, 可以保证各个环节中对材料空间环境适应性的有效分析、评估与控制, 是促进航天器可靠性提升所面临的一项重大问题。针对原材料选用、认定、复验等环节中的应用需求, 分析了空间环境适应性评价技术目前存在的差距, 并对今后的发展进行了展望。

**关键词:** 空间环境; 适应性; 航天器; 原材料

**中图分类号:** V45      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2012)03-0037-04

## Summarization Space Environmental Worthiness Evaluation Technology for Spacecraft Material

LI Tao<sup>1</sup>, YI Zhong<sup>1</sup>, GAO Hong<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Academy of Space Technologies, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Spacecraft and its material during in-orbit service needed to endure the action of space environmental factors, such as vacuum, thermal circulation, radiation, atomic oxygen, and debris. Space environmental worthiness of spacecraft material is an important quality characteristics and its worthiness evaluation is the important content of spacecraft material quality assurance. Driving the development of evaluation technology, and realizing effective analysis, evaluation and control of material space environmental worthiness in every links of space material quality assurance are important issues to improve spacecraft reliability. According to the application requirements of the links of material selection, cognizance, and verification, the existing problems of space environmental worthiness evaluation technology was analyzed, and future development was prospected.

**Key words:** space environment; environmental worthiness; spacecraft; raw material

航天器所使用的材料与其它材料的重要区别是 是指航天器材料在轨服役期间适应真空、热循环、粒子辐照、太阳辐照、微流星/碎片和原子氧等环境的工作环境与适应性要求不同。材料空间环境适应性

收稿日期: 2012-03-11

作者简介: 李涛(1981-),男,河南许昌人,硕士,工程师,主要从事空间环境试验技术研究。

能力,是航天器材料的一项独特和重要的质量指标。作为组成航天器的最基本单元,航天器材料的性能水平将直接影响航天器在轨的可靠性。

航天器材料的使用有严格的规定,其核心是质量保证管理,主要涉及材料选用、材料认定、材料复验等环节。针对材料质量保证工作的需求开展评价技术研究,并对材料空间环境适应性指标进行分析、评估与控制,是一项重要的课题。

## 1 空间环境对航天器材料的影响

### 1.1 真空

航天器在轨运行期间,大气压力小于 $10^{-5}$  Pa,深空探测航天器运行的轨道空间大气压力最低可以达到 $10^{-18}$  Pa。当气压低于 $10^{-2}$  Pa时,会有气体不断地从材料表面释放出来,这些气体包括材料表面吸附的气体、溶解于材料内部的气体、渗透在固体材料内部的气体;同时,由于“升华”作用,组成材料的分子也可能以气态形式析出。上述过程均会导致材料的质量损失,而且会导致材料机械、电学及光学性能发生一定的变化<sup>[1]</sup>。

### 1.2 温度及热循环

太阳在源源不断地向空间辐射电磁波,其波长覆盖X射线、紫外线、可见光、红外光等波段。按照NASA现行标准,太阳电磁辐射常数为 $1\ 367\ \text{W/m}^2$ 。太阳辐射作用于航天器,将会使其表面达到一定的平衡温度,一般在 $-100\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,最低可达 $-180\text{ }^\circ\text{C}$ 。另外航天器在轨运行期间会频繁地进出地影,导致其表面温度呈现交替的变化。极端的低温或高温环境以及温度的循环变化,会使材料脆化、裂解,进一步影响到材料的机械性能、表面热物性等。

### 1.3 带电粒子

空间带电粒子主要来自地球辐射带、银河宇宙射线、太阳耀斑和太阳风,成分主要有电子、质子、 $\alpha$ 粒子及少量重离子,能量最高可达 $1\ 000\ \text{MeV}$ 。这些粒子会造成航天器表面材料不同程度的辐射损伤,尤其是非金属材料中的高分子材料。宏观上,高分

子材料在经受辐射损伤后会变色(变暗、变黄、变白等)、附着力变差及出现不规则裂纹等<sup>[2]</sup>。

### 1.4 太阳紫外辐射

太阳紫外辐射指波长小于 $0.4\ \mu\text{m}$ 的辐射,仅占太阳总辐射能的8%。紫外线中的单个光子具有一定的能量,足以使许多物质的有机化学键断裂,因此,紫外辐射对材料尤其是非金属材料有一定的破坏作用,特别是对卫星外表面的热控涂层影响较大<sup>[3]</sup>。

紫外辐射能够使多数有机类材料的机械性能及光学性能( $\alpha$ 、 $s$ 、 $\varepsilon$ 、透过率、反射率及其它性能)产生改变,从而影响航天器的整体性能。

### 1.5 原子氧

原子氧是低地球轨道(LEO)的主要空间环境因素,具有较强的氧化性。原子氧本身能量不大,但与航天器的相对撞击速度高达 $8\ \text{km/s}$ <sup>[4]</sup>。原子氧对航天器材料的作用形式有化学腐蚀、剥蚀及溅射等,其影响结果主要表现为材料的质量损失、形貌粗糙化及颜色变化等,进而也会影响到材料的力学性能、热物理性能及导电性。

### 1.6 碎片

随着航天器大量发射,空间碎片的数量越来越多,碎片尺寸范围在微米级至厘米级之间<sup>[5]</sup>,其数量一般随尺寸增加而降低。对于空间材料而言,主要考虑空间微小碎片的作用,其数量众多、空间密度大,与航天器碰撞的频率非常高,尤其是对近地轨道航天器的威胁极大。微小空间碎片对航天器的撞击虽然不会对航天器的结构强度造成直接影响,但累积效应也会使航天器表面材料和器件的性能产生明显改变甚至失效。

### 1.7 污染

航天器在轨运行时,排出的气体若得不到合理处理会导致严重的后果,特别是当气体分子沉积到对污染比较敏感的热控原件表面上时,会严重影响热控材料的热控性能。若工作温度较低的辐射器表面材料受到污染后,其表面辐射率就会降低,表面温度就会上升,严重影响热控系统的在轨性能。

## 2 材料空间环境适应性评价技术

材料空间环境适应性评价主要包含了分析、评估与控制技术,旨在利用地面模拟、飞行试验等手段,对材料在真空、高低温、湿热、辐照、原子氧、碎片等环境中的适应能力进行表征。其涉及的技术主要包括环境条件计算、试验方法、性能退化分析、数据库等。

空间环境适应性作为一项航天器材料特殊的质量特性,对其分析、评估及控制将会直接影响到航天器材料质量保证甚至航天器的系统可靠性。与材料质量保证工作需求相比,空间环境适应性评价技术存在如下差距。

### 2.1 材料选用

材料选用是航天器可靠性保证的基础,目前材料选用实行“谁选用,谁负责”的方式,因此对材料的选用至关重要。

科学的材料选用应以选用目录、数据手册和使用指南为指导。目录的建立是材料选用工作的基础,能够规范航天器设计选材的基本范围。材料试验数据逐步完善可形成数据手册,能够提供星(船)设计材料选用所需的基础数据。原材料数据分析和工程应用经验的积累可以形成使用指南,能够具体指导分系统设计时的材料选用。

针对选用环节的应用需求,目前空间环境适应性评价技术存在以下问题。

1) 环境试验数据分析不足。目前材料空间环境适应性分析多关注数据本身,缺乏材料性能退化对于关键部件、分系统设计影响的分析,极大地影响了材料选用指南(规范)的指导性。

2) 试验手册所需的材料空间适应性数据准确性差。主要原因来自于两个方面:(1)现有的试验标准不够完善,试验对象未能覆盖所有非金属材料,同时试验条件控制也未能覆盖试验全流程;(2)现有的试验设备类型繁多,性能差异较大。

3) 缺乏统一的原材料空间环境适用性数据库。试验数据均分散在不同的试验单位、原材料研制单位或设计师手中,限制了材料实现基础数据的共享,还可能导致应用数据的差异,给型号设计带来

风险。

鉴于上述问题,有必要开展以下研究。

1) 开展针对航天器主要分系统或关键部组件的原材料选用指南(规范)研究,联合设计师队伍,加强原材料空间环境性能退化对设计及可靠性的影响分析研究。

2) 根据原材料选用目录,改进现有的标准体系,扩大其适用范围,同时强化试验标准对试验条件的控制。开展国内同类型地面试验设备的对比研究,对设备类型及主要参数进行控制。

3) 开展航天器原材料数据库数据的准入规范研究,建设统一的原材料空间环境适应性数据平台,实现数据的信息化管理。

### 2.2 材料认定

材料认定是指对未经飞行实验验证的材料,或虽经飞行实验验证但使用状态或使用环境发生了变化材料进行评价,确定材料是否能在航天器上使用。空间环境适应性是材料认定中需要重点关注的内容,对其进行准确评价的关键在于认定方案的合理性和评价方法的有效性。目前在技术上尚存在以下问题。

1) 空间环境模型适用性及航天器原材料在轨使用环境分析能力不足,影响到认定方案的可行性及有效性。目前针对各种空间环境,往往具有多种环境模型,各种模型之间存在着不同程度的差异,如轨道范围、数据来源等,在进行特定飞行任务的空间环境分析时,会产生较大的分析误差,进而使地面模拟试验存在过试验或欠试验的风险。

2) 现有地面模拟试验方法尚不完善,影响到单一环境认定试验结果的准确性。目前的空间环境试验标准对样品的预处理条件、样品的温度条件、地面模拟源的选用以及加速因子的选择要求不明确,这些条件均会对试验结果产生影响。

3) 欠缺基于单因素试验的协和环境评估方法及其原理研究,影响认定试验结果分析的可用性。基于地面单因素试验条件的结果,如何对空间多因素协和效应影响下涂层产品的性能退化结果进行评估,判断星(船)服役寿命期内材料选用是否满足可靠性设计要求,目前尚缺乏损伤机理层面的研究成果的支撑。

鉴于上述差距,应有针对性地开展以下研究。

1) 航天器用材料空间环境暴露剂量分析方法研究。主要基于对国内外现有环境模型的研究,通过模型分析结果与实际在轨探测结果的对比,验证现有环境模型在空间材料空间环境评估中的适用性。在此基础上,研究卫星构型、姿态对星(船)选用的原材料产品在轨期间空间环境暴露剂量的影响,最终获得计算特定产品在特定轨道、特定卫星上的特定位置处遭遇到的环境剂量的能力。

2) 航天器用材料空间环境地面模拟试验方法研究。通过研究产品试验前预处理方法、地面模拟源的适用性分析、产品温度及加速因子对试验结果的影响等内容,对现有的标准体系进行补充,提升其指导性与有效性。

3) 基于地面单因素材料空间环境试验结果的叠加原理研究。主要研究电子、质子、紫外、原子氧、真空/热等空间环境作用下原材料的微观辐照缺陷及其演化和相互作用规律,发现多因素协合效应的本质,掌握用单因素的空间环境试验结果进行叠加的原理。

主要从两个方面开展,首先对各类空间环境导致的材料微观损伤机理进行分析,建立各环境单独作用下微观损伤与材料热物性变化之间的构效关系。以上述构效关系的研究结果为基础,识别材料不同环境损伤效应之间的相互作用机制,发现航天器用材料空间综合环境效应的本质,为基于地面模拟试验的航天器用材料性能评估、认定及产品的复验提供理论支持。

### 2.3 材料复验

材料复验旨在检验原材料性能的一致性,对于保证星(船)材料质量有重要的意义。目前的复验工作仅限于对材料基础理化、力学、热学等常规性能进行测试,但这些功能性指标的测试不足以验证产品的空间环境适应性,这给星(船)产品的可靠性带来隐患。

复验项目的设置与实施要从复验周期、试验可实施性等多方面综合考虑。针对复验环节的应用需求,目前的空间环境适应性评价技术尚存在以下问题:

1) 用于评估材料全寿命期内空间环境适应性的试验周期过长,缺乏用于复验已认定原材料产品的短周期试验评估方法;

2) 行业内相关标准规范不健全或适用性不强。

鉴于上述问题,应有针对性地开展以下研究:

1) 深入开展材料空间环境效应研究,探求可以表征材料的环境效应“敏感度”的关键失效行为;

2) 建立健全用于原材料热循环、排气及可凝性测试等相关标准。

### 3 结语

空间环境适应性评价技术研究与型号原材料选用、认定、复验等工作需要有机结合,一方面有的放矢地强化材料空间环境效应研究,使环境分析方法研究、试验方法研究更加具有针对性,研究成果更具实用性;另一方面对以“统一选用管理、统一复验管理、统一认定管理、统一失效分析管理”为核心的航天器材料质量保证能力进行补充、完善,并最终予以加强。

#### 参考文献:

[1] ASTM-E595-06, Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment[S].

[2] 冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 139—143.

[3] 刘宇明. 空间紫外辐射环境及效应研究[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(6): 359—365.

[4] 李涛, 姜利祥, 郭亮. 空间原子氧环境对太阳电池阵的影响分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 428—433.

[5] 韩增尧. 第36届 COSPAR 会议空间碎片专题综述[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(3): 131—134.

(上接第22页)

业出版社, 2006: 236.

[2] 刘玉岱. 真空测量与检漏[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2007: 31.

[3] 程广河. 浅析航天器的污染及其控制[J]. 航天器环境工

程, 2003, 20(1): 35—39.

[4] 焦子龙, 庞贺伟, 易忠, 等. 卫星真空热试验污染物成分分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(3): 240—243.

[5] 焦子龙, 庞贺伟, 易忠, 等. 航天器真空热试验污染物成分分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 711—714.