

# 航天材料空间环境效应损伤机制及关联性研究

沈自才 姜海富 徐坤博 丁义刚 刘宇明

(北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

**文 摘** 基于航天材料在轨将遭遇多种空间环境的作用且不同空间环境对航天材料的损伤存在一定的关联性,本文首先对航天材料的空间环境及效应进行了介绍,接着对真空、温度、微重力、等离子体、粒子辐射、太阳电磁辐射、空间大气、空间碎片及微流星体、空间污染、空间动力学、腐蚀及空间生物等环境对航天材料的损伤机制及不同损伤机制之间的关联性进行了研究,最后对需要进一步研究和关注的方向进行了讨论并给出了发展建议。

**关键词** 航天材料,空间环境,损伤,机制

中图分类号: V25

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.001

## Damage Mechanisms and Their Correlations of Spacecraft Materials in Space Environments

SHEN Zicai JIANG Haifu XU Kunbo DING Yigang LIU Yuming

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

**Abstract** Spacecraft materials will encounter different space environments in space and there are relevance between damage mechanism of different space environments on spacecraft materials. In this paper, space environments and their effects on spacecraft materials are introduced firstly, then damage mechanism and their relevance of space environments such as vacuum, temperature, microgravity, plasma, particle radiation, solar electromagnetic irradiation, space atmospheres, space debris and micrometeoroid, space contamination, spatial dynamics, erosion, space biology, etc, on spacecraft materials are studied. At last, the developing trends and problems of the spacecraft materials are commented.

**Key words** Spacecraft materials, Space environment, Damage, Mechanism

### 0 引言

材料是构成航天器的基元,空间环境对航天器的作用归根结底是空间环境与航天材料间的相互作用,航天器的在轨故障与损伤也可以归结为材料及其结构、器件的损伤。在单一或多种空间环境的作用下,航天材料、结构或器件会发生性能退化或失效,引起航天器的功能丧失或在轨故障,导致航天器任务终结或寿命缩短。

随着我国航天技术的不断发展,航天器功能日益

增强,集成度提高,表面敏感部件和活动部件增多,空间环境及其效应对航天器造成的损害已日渐突出,成为影响航天器长寿命、高可靠的关键因素。同时,我国空间站的建设为航天新材料的开发和材料性能的空间环境效应评价提供了平台和机遇。

航天材料在轨期间将遭受多种环境的协同作用,不同空间环境对航天材料的影响是存在相互关联的<sup>[1-2]</sup>。当前,我国开展航天材料空间环境与效应评价研究主要以单一因素空间环境效应为主,对空间环

收稿日期:2015-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41174166)

作者简介:沈自才,1980年出生,博士,主要从事航天器空间环境效应及深空探测技术研究。E-mail:zicaishen@163.com

境下航天材料的性能退化机理开展了初步研究<sup>[3-7]</sup>,但尚未对不同环境下航天材料的损伤机制及其关联性进行系统研究。

本文首先对航天材料的空间环境及其效应进行简要介绍,进而对航天材料在不同空间环境下的损伤机制进行探讨,最后给出了航天材料空间环境效应适应性评价的建议。

### 1 空间环境与效应

航天材料所经历的环境包括航天器在制造、发射、在轨飞行以及返回再入过程中所遇到的环境,可以分别称为地面环境、发射环境、在轨环境以及返回再入环境<sup>[8]</sup>。

地面环境主要指制造、运输和储存过程中遇到的温度、湿度、大气、生物、运输、试验等环境;对火箭发动机来说,包括液体燃料腐蚀环境;对临海发射场和航天器总装基地以及海运过程,则包括海风及盐雾环境。

发射环境主要指航天器发射、级间分离、抛去整流罩、变轨等过程中产生的振动、噪声、冲击、加速度等力学环境以及随着航天器升空高度的增加而产生的低真空环境等。

在轨环境主要是指航天器在轨运行过程中所遇到的自然环境和人工环境,包括高真空环境、冷黑环境、太阳电磁辐射、带电粒子辐射、中性大气、空间碎片与微流星体、等离子体、微振动、微重力、人工辐射(核爆炸辐射和激光辐射等)以及载人密封舱内的细菌、湿度等环境。在深空探测过程中,还需要考虑月球月尘、火星尘暴、金星酸性大气等。

返回再入环境主要是指航天器在返回再入过程中的调姿、制动、再入、着陆等遇到的气动力加热与力学环境,如高温冲击、剧烈震动与撞击等。

不同的空间环境可引起不同的效应,主要空间环境引起的航天器损伤效应见图1。

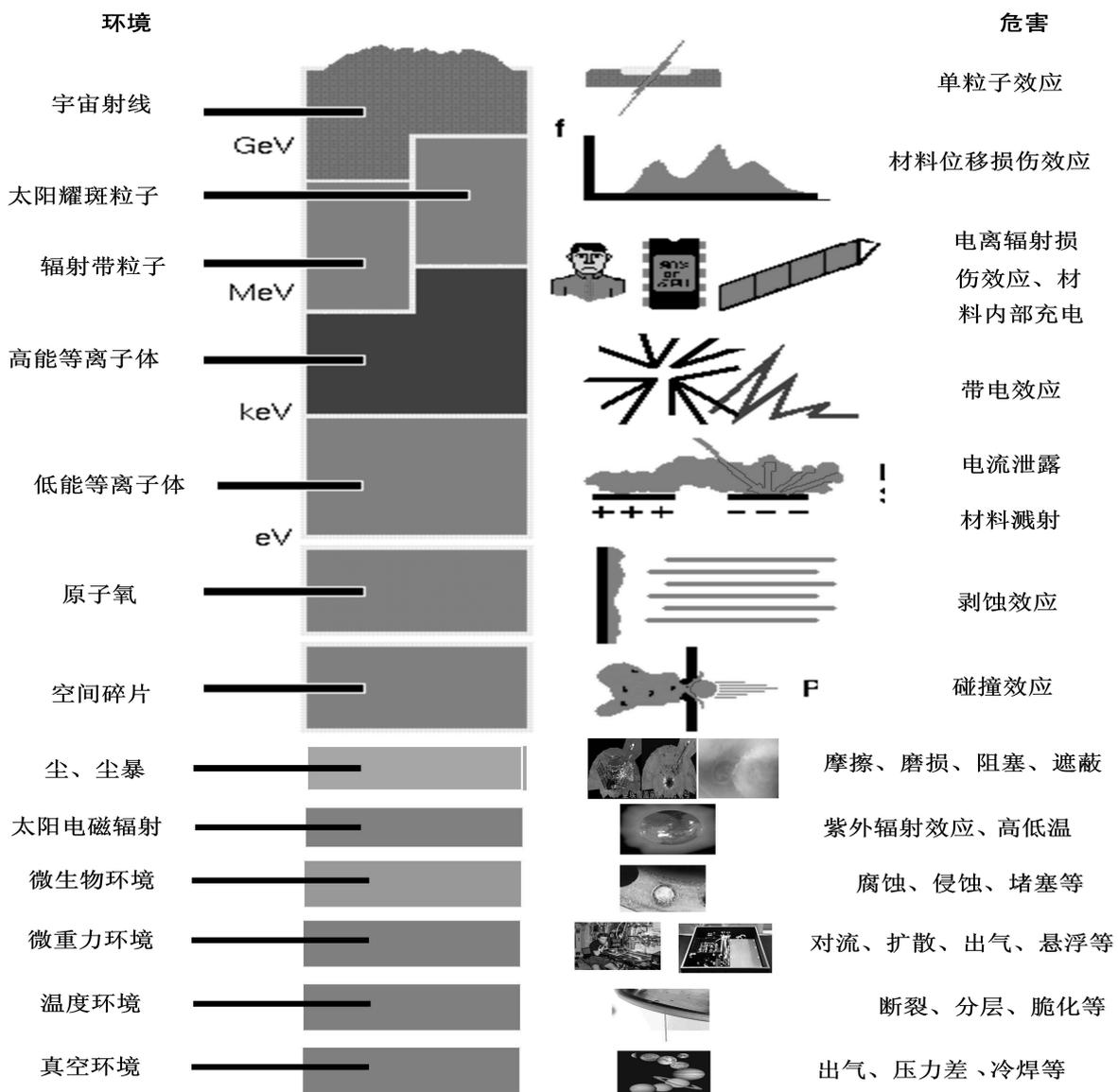


图1 空间环境对航天器的影响

Fig. 1 Influence of space environments on spacecraft

## 2 航天材料空间环境效应损伤机制

下面将分别探讨不同空间环境下航天材料的损伤机制,并分析不同空间环境效应间的关联性。

### 2.1 航天材料真空环境效应损伤机制

航天器在发射及在轨运行过程中,将经历从低真空到超高真空的环境。当航天器进入到低真空环境后,航天材料及其结构将受真空的影响,产生一系列

效应<sup>[8]</sup>,如压力差效应、黏着和冷焊效应、出气效应、真空放电效应等,造成航天器结构变形或损坏、改变热光性能、电学性能、力学性能等。

此外,真空环境可对航天材料的其他环境效应带来影响,如空间粒子辐射与电磁辐射效应、原子氧效应、空间碎片撞击效应以及微重力效应等。航天材料真空环境损伤机制及关联性见图2。

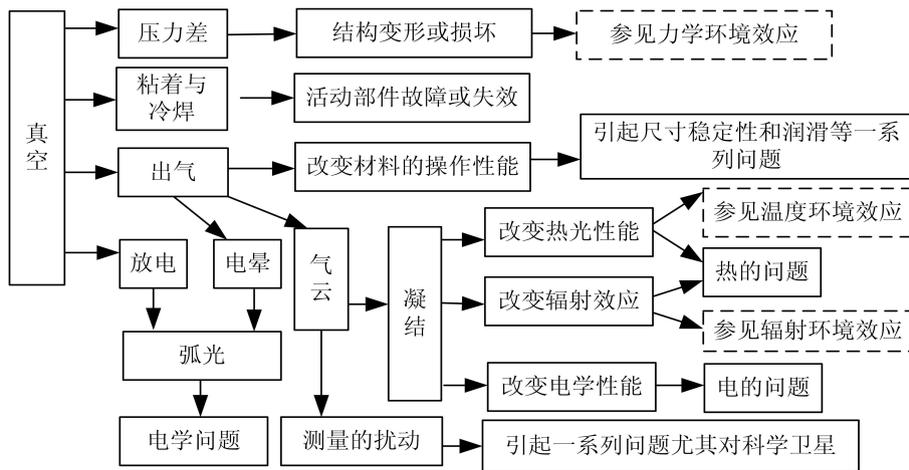


图2 航天材料真空环境效应损伤机制

Fig. 2 Damage mechanism of spacecraft materials in vacuum environments

### 2.2 航天材料温度环境效应损伤机制

空间温度及高低温的交变环境可引起航天材料发生分子降解、疲劳损伤、出气污染等,造成材料的可操作性能、电学性能、力学性能和光学性能等发生变化。航天材料温度环境效应损伤机制及与其他环境效应的关联性见图3。

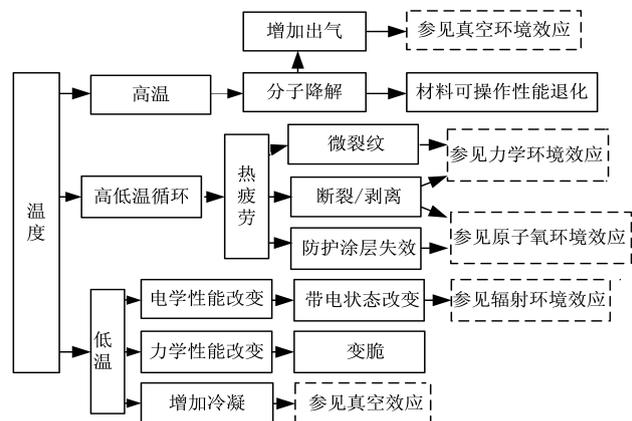


图3 航天材料温度环境效应损伤机制

Fig. 3 Damage mechanism of spacecraft materials in thermal environments

当航天器返回再入过程中,以超高的速度进入大气层,引起航天器材料与大气层的剧烈摩擦,发生一系列化学反应和动态压力,其损伤机制见图4。

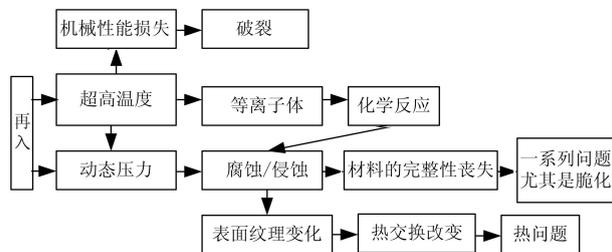


图4 航天材料再入环境效应损伤机制

Fig. 4 Damage mechanism of spacecraft materials in reentry environments

### 2.3 航天材料微重力环境效应损伤机制

由于空间中的微重力远远低于地球表面的重力,从而表现出与地球表面不同的物理、化学及生物学等效应,主要包括一些力学效应、扩散效应、燃烧效应以及生物学效应等<sup>[8-9]</sup>,微重力对航天材料的损伤机制及与其他环境效应的关联性见图5。

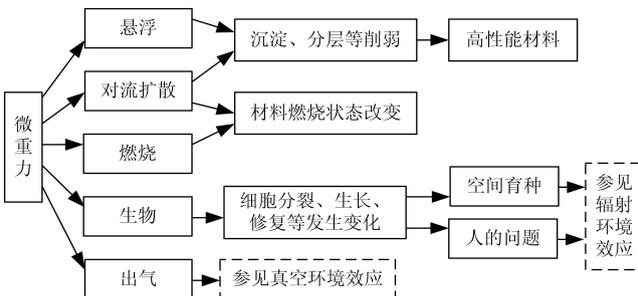


图5 航天材料微重力环境效应损伤机制

Fig. 5 Damage mechanism of spacecraft materials in microgravity environments

## 2.4 航天材料等离子体环境效应损伤机制

航天器在轨运行期间,处于低能等离子体环境的包围之中,其主要成分为低能电子和质子,主要来源于日冕物质抛射的太阳风。等离子体的粒子通量、能量等与太阳活动、光照、地球磁场、轨道空间位置等相关,其损伤机制及与其他环境效应的关联性见图6。

等离子体环境将与航天器的表面材料相互作用,使航天器表面积累电荷。表面充电分为表面绝对充电和表面差异充电,可造成航天器表面不同位置会有约千伏的差异电位<sup>[10]</sup>,见图7。进而造成供电系统烧毁、短路,破坏卫星能源系统;静电放电会击穿元器件,破坏卫星电子系统;放电产生的电磁脉冲干扰,会造成电路器件翻转;静电放电会击穿表面材料,影响材料性能;卫星带电会导致结构电位漂移,影响测量系统;卫星材料表面带电还会增强表面污染,影响传感器、窗口玻璃、镜头等性能。

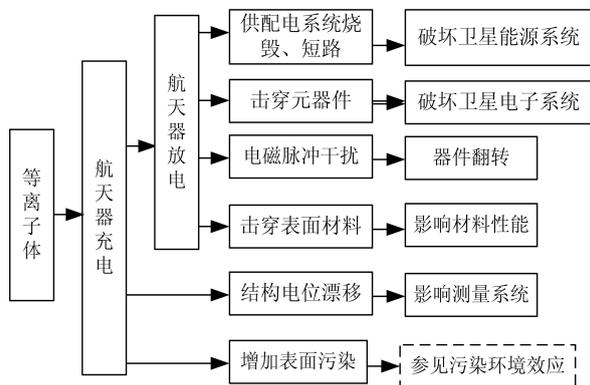


图6 航天材料等离子体环境效应损伤机制

Fig. 6 Damage mechanism of spacecraft materials in plasma environments

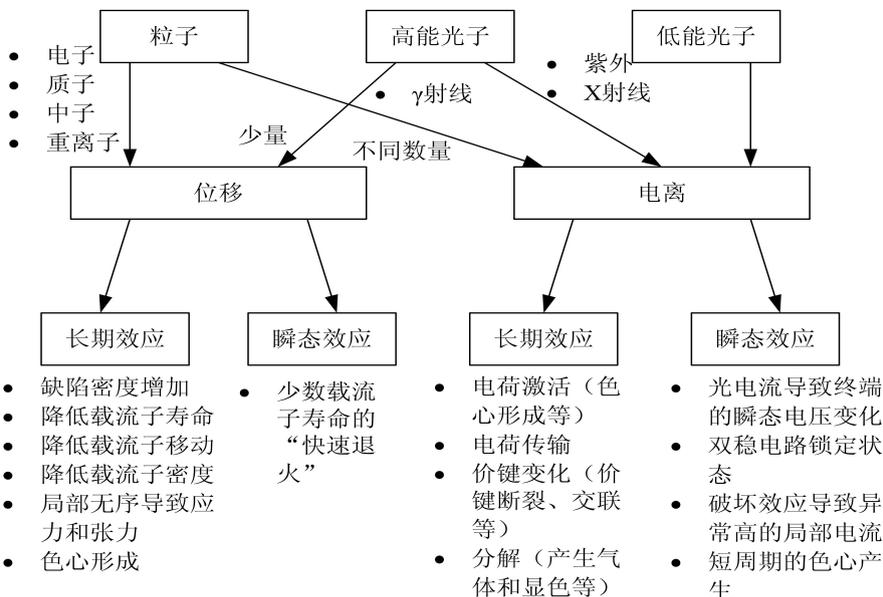


图8 空间辐射环境诱导损伤效应关系图

Fig. 8 Damage effects induced by space radiation environments

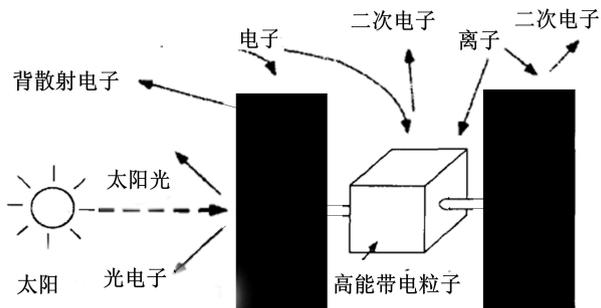


图7 航天材料与周围环境的相互作用

Fig. 7 Interaction between spacecraft and surrounded environments

## 2.5 航天材料粒子辐射环境效应损伤机制

空间辐射环境中的高能带电粒子或高能光子作用于航天器,可引起航天材料或器件的暂时性损伤或永久性故障。从损伤机制上,可以分为电离损伤和位移损伤;从是否累积效应,则可分为瞬态效应和长期效应,见图8。

从材料的分子层面上分析,空间粒子辐射可引起材料分子的分解,增加出气,导致热光性能、电学性能和力学性能的改变,进而引起真空环境的效应、温度环境的效应、原子氧环境效应等,不同空间环境效应间的关联性见图9<sup>[11-12]</sup>。

空间辐射环境对航天器的辐射损伤主要包括电离损伤和位移损伤等。空间粒子辐射可引起航天材料及由航天材料研制的元器件产生单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应、表面充放电效应和内带电效应等<sup>[13-14]</sup>。

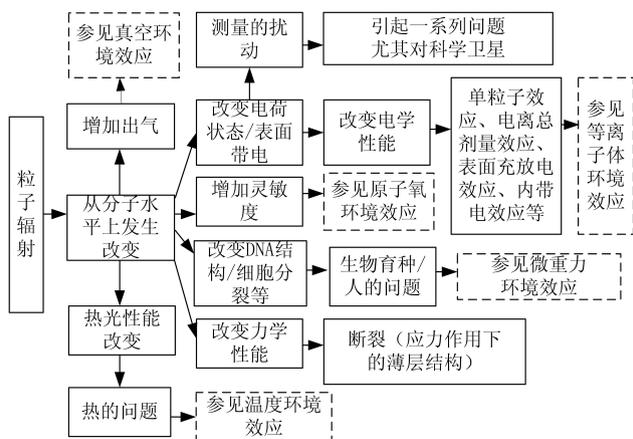


图9 航天材料粒子辐射环境效应损伤机制

Fig. 9 Damage mechanism of spacecraft materials in particle radiation environments

## 2.6 航天材料太阳电磁辐射环境效应损伤机制

太阳电磁辐射对航天器的在轨运行具有重要的影响,尤其是紫外波段,虽然其能量比例较低,但由于其光子能量较高,可对航天器在轨运行带来严重的威胁<sup>[15-17]</sup>。高能光子对航天材料的效应影响机制及与其他环境效应的关联性见图10。

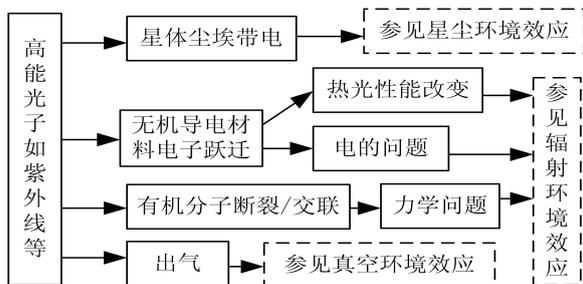


图10 航天材料高能光子辐射环境效应损伤机制

Fig. 10 Damage mechanism of spacecraft materials in high energetic photo radiation environments

紫外辐照对高分子材料有2种不同效应:瞬态效应(剂量率效应)和累积效应(总剂量效应)。其中瞬态效应是可逆的,当外界紫外辐照撤掉后,高分子材料的性能基本保持不变;累积效应则是不可逆的,高分子材料在长期紫外辐照后发生成分和结构的变化,造成材料性能退化。

## 2.7 航天材料空间大气环境效应损伤机制

在200~700 km高度的轨道高度上,气体总压力为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$  Pa,环境组分有 $N_2$ 、 $O_2$ 、Ar、He、H及O等,相应的粒子密度约为 $10^6 \sim 10^9/cm^3$ 。原子氧在残余大气中占主要成分。

原子氧在轨道上的热动能并不高,一般为0.01~0.025 eV,对应温度一般为1000~1500 K。但是,轨道上航天器的典型速度为8 km/s,其与原子氧粒

子的碰撞动能为5.3 eV。同约 $5 \times 10^4$  K的原子氧与表面作用等效。因此,这种原子氧以罕见的高温氧化、高速碰撞与材料表面作用的结果是非常严重的,可引起材料的侵蚀、剥离和氧化层的存在。航天材料原子氧环境效应损伤机制及与其他环境效应的关联性见图11<sup>[18]</sup>。

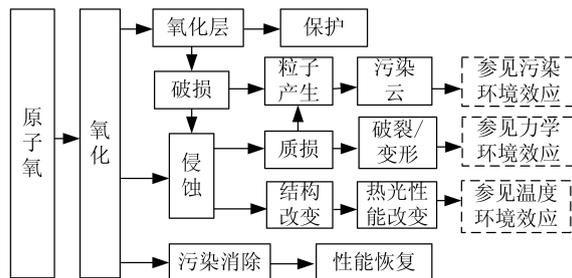


图11 航天材料原子氧环境效应损伤机制

Fig. 11 Damage mechanism of spacecraft materials in atom oxygen environments

在高度为20~100 km的临近空间区域,中性大气主要包括水汽、臭氧等。其臭氧的产生原理和低地球轨道氧原子的产生原理有相似之处。

对载人航天器来说,航天员乘用舱内要充满适合航天员生存的保障气体,成分主要为氧气和排出的二氧化碳等,此外,还要有一定的湿度和温度,即存在一定的水汽。同时,由于温度、水、氧气和二氧化碳等的存在,乘用舱内还可能生存着一定数量的细菌群体,这些细菌可能存在舱壁材料上或者漂浮在保障气体中。生活保障气体与航天器舱内材料作用,将引起一系列的反应,其关系图见图12。

航天员在轨生活过程中将排出一定的废气,以及在轨燃烧产生的废气等有毒气体,可能引起材料功能退化或者对航天员产生损伤,引起航天员生理出现不适或者航天器出现故障。而生活保障气体与航天员乘用舱的微生物发生作用,产生副产物毒素和气体,可引起航天员不适甚至生病。

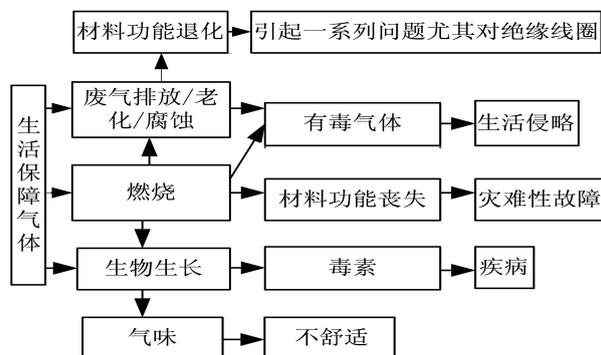


图12 航天材料生命保障气体环境效应损伤机制

Fig. 12 Damage mechanism of spacecraft materials in life-support gas environments

航天器上升或再入过程中,与周围的气体发生剧烈的摩擦,这些气体主要为星体轨道附近的大气,摩擦产生高温。在高温和气体成分的作用下,航天器的表面材料可能与其发生化学反应,从而产生新的气体成分。

## 2.8 航天材料空间碎片及微流星体环境效应损伤机制

航天器发射入轨后,即处于空间碎片与微流星体环境之中,其中低地球轨道主要为空间碎片环境。空间碎片与航天器的平均撞击速度高达每秒 10 km,严重威胁着在轨航天器的安全运行。可引起航天材料与器件发生一系列粒子撞击损伤效应。其中,0.1 mm 以下的空间碎片撞击长期累积导致表面砂蚀,光敏性部件下降、辐射性能改变,0.1 ~ 10 mm 的碎片撞击可导致舱壁成坑或穿孔,使密封舱或压力容器泄漏,10 ~ 100 mm 空间碎片撞击可导致航天器舱壁穿孔、破裂的危险,100 mm 以上空间碎片对航天器存在毁灭性危害<sup>[19]</sup>。航天材料空间碎片环境效应损伤机制及与其他环境效应间的关联性见图 13。

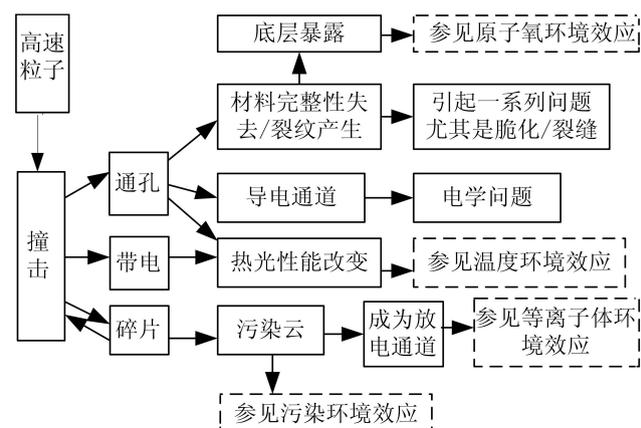


图 13 航天材料空间碎片环境效应损伤机制

Fig. 13 Damage mechanism of spacecraft materials in space debris environments

## 2.9 航天材料空间污染环境效应损伤机制

在空间环境作用下,航天材料将发生出气等污染效应,以分子污染为主;在深空星体表面,如月球、火星等,月尘、火星尘等将对航天材料带来严重的污染效应和阻塞、磨损等各种效应,从而对航天材料及其构件带来严重威胁<sup>[20]</sup>。航天材料空间污染环境效应损伤机制及与其他环境效应的关联性见图 14。

羽流引起的分子污染在航天器敏感材料或器件表面沉积,引起热光性能改变,进而导致温度环境效应问题;若引起导电材料电学性能改变,可能引起电的问题。

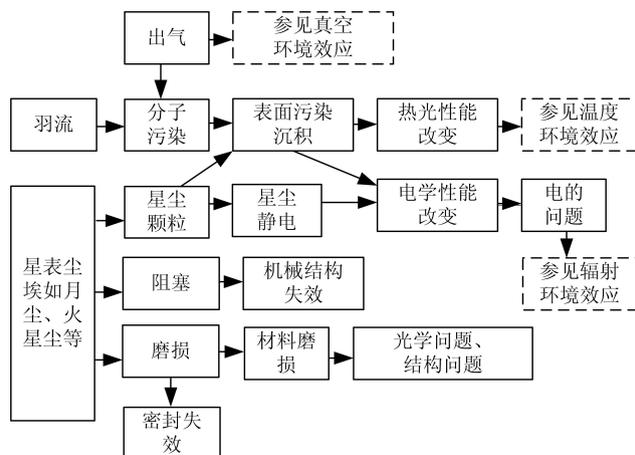


图 14 航天材料空间污染环境效应损伤机制

Fig. 14 Damage mechanism of spacecraft materials in space contamination environments

月尘造成的环境效应包括污染、磨损、阻塞、静电等,如何防止或者减少这些效应所造成的影响以及消除影响所造成的后果成为一个十分重要的课题。

## 2.10 航天材料空间动力学环境效应损伤机制

在航天器受到的动力学环境效应中,航天器的结构及有效载荷受到力学应力而引起破坏或者功能失效<sup>[21]</sup>。航天材料动力学环境效应关系见图 15。

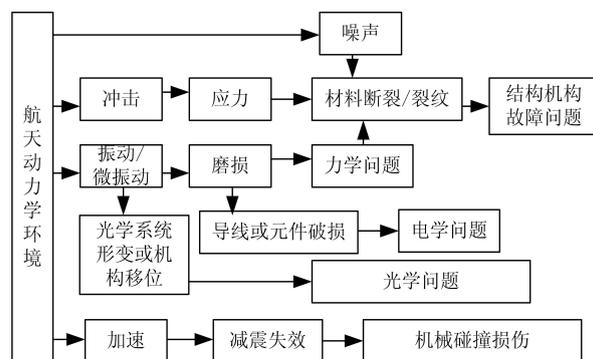


图 15 航天材料空间动力学环境效应损伤机制

Fig. 15 Damage mechanism of spacecraft materials in spatial dynamics environments

动力学环境会对航天器及航天器上组件造成结构变形或损坏,例如过应力可引起材料断裂,稳态振动或者声环境可引起材料产生微裂纹,振动应力可以引起运动机械磨损,间隙增大,精度降低,产生异常噪声、振动、表面腐蚀或者空化效应,最后可能导致运动机构故障而使产品失效。这些故障的发生可能影响飞行任务的完成,甚至导致整个飞行任务失败。

大多数航天器都存在微振动扰动源。由于微振动力学环境效应幅值小、频率高,对大部分航天器不会产生明显影响,通常予以忽略。但对高精度航天器将严重影响有效载荷指向精度、稳定度及分辨率等重要性能指标。

## 2.11 航天材料空间腐蚀环境效应损伤机制

航天材料腐蚀环境是指可引起航天材料发生腐蚀损伤或破坏的水、液体燃料、盐雾、涂层、液体金属等环境。尤其是我国目前正在建设海南发射场和天津航天基地,而这两个基地距离海洋比较近,海风中的高湿度、盐度及一定的温度等环境要素将会给航天器及其材料带来一定的腐蚀威胁<sup>[22-24]</sup>。在海洋性气候环境下航天产品的腐蚀风险将贯穿于航天器制造、贮存、装配、海运、测试和发射的全过程。可引起航天器表面材料或管路、联接件、高压气瓶等发生破坏。空间腐蚀环境对航天材料的损伤机制见图 16。

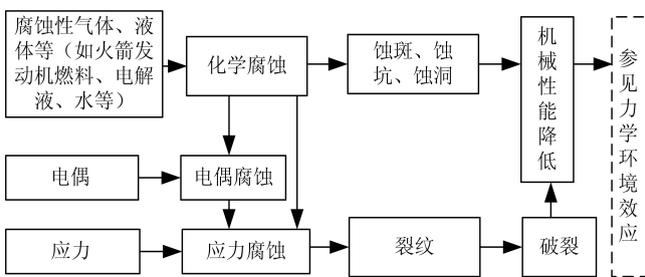


图 16 航天材料腐蚀环境效应损伤机制

Fig. 16 Damage mechanism of spacecraft materials in erosion environments

根据引起腐蚀的来源和性质不同,可分为化学腐蚀、应力腐蚀、电偶腐蚀等。这里,腐蚀环境主要是指在地面安装、测试、转运、发射前等地面环境下的腐蚀环境,不包括航天材料在轨腐蚀环境如原子氧环境、舱内细菌和温湿度等环境。在腐蚀环境作用下,航天器表面材料或结构材料将发生蚀斑、腐蚀坑、裂纹甚至破裂<sup>[24]</sup>。

## 2.12 航天材料空间生物环境效应损伤机制

在空间微生物的作用下,航天材料,尤其是有航天员生活的舱内材料及其构件,将受到微生物及其分泌物的腐蚀、侵蚀、循环系统的堵塞以及对航天员的健康造成威胁<sup>[25-27]</sup>。微生物对航天材料及航天员的威胁及与其他环境效应的关联性见图 17。

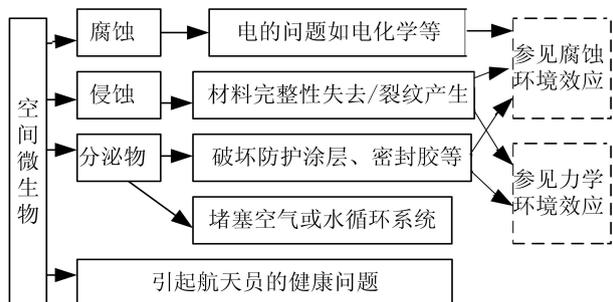


图 17 航天材料空间微生物环境效应损伤机制

Fig. 17 Damage mechanism of spacecraft materials in microgravity environments

## 3 讨论

虽然经过多年的发展,在航天材料空间环境效应及损伤机制方面开展了大量的研究,但由于空间环境的复杂性和空间材料的多样性,仍有大量问题有待进一步研究。

(1)加强航天材料在轨服役性能演化与微观损伤机理研究对不同航天材料(可分为有机/无机、舱内/舱外、金属/非金属等)、不同的轨道环境(低地球轨道、中地球轨道、地球同步轨道、深空轨道等)、所关注的不同性能(光学性能、电学性能、力学性能等),其在不同空间环境下的微观损伤机理是不同的,需要进一步研究。

(2)加强空间多因素环境对航天材料的协同效应与机理研究。从空间是多因素环境共存、不同空间环境及效应是相互作用的以及提高地面模拟试验和故障分析的有效性三个角度,需要进一步加强不同空间环境对航天材料的协同效应及机理研究<sup>[28-30]</sup>。

(3)加强航天材料空间环境效应天地等效性试验方法研究。由于空间环境的复杂性,通常采用效应等效和加速试验的方法开展地面模拟试验<sup>[31-32]</sup>,因此,需要加强航天材料的空间环境效应地面模拟试验方法研究。

(4)加强高性能航天材料的设计与研制工作。航天材料大多是从地面应用材料转化而来,通过对地面应用材料的空间环境适应性检验来选择航天应用材料。未来应该针对拟应用的航天材料,针对所需要的性能或功能,以及所面临的空間环境,从被动选择向主动设计航天材料进行改进。

## 4 结语

航天材料是航天器的重要基础,是组成航天器结构机构以及实现其在轨功能和性能的重要保障。航天材料与地面材料的重要区别是其所面临的空間环境是独特的和复杂的,不同空间环境对航天材料的作用之间存在一定的关联性。因此,需要进一步加强空间单一或多种环境对航天材料作用机制、航天材料的空间环境效应天地等效性和高性能航天材料的设计与研制工作,促进我国航天科技和相关基础科学的发展。

## 参考文献

- [1] 沈自才,邱家稳,丁义刚,等. 航天器空间多因素环境协同效应研究[J]. 中国空间科学技术,2012,32(5):54-60.
- [2] 邱家稳,沈自才,肖林. 航天器空间环境协和效应研究[J]. 航天器工程,2013,22(1):15-20.
- [3] 杜继实,吴洁华,赵丽丽,等. 玻璃空间电离辐照着色研究[J]. 无机材料学报,2012,27(4):411-416.

[4] 沈自才,郑慧奇,赵雪,等.远紫外辐射下 kapton/Al 薄膜材料的力学性能研究[J].航天器环境工程,2010,27(5):600-603.

[5] 王旭东,易忠,沈自才,等. ZnO 白漆的质子辐照损伤与光学性能退化机理[J].材料工程,2013,5:1-4.

[6] 王云飞,陈学康,郑阔海,等.原子氧处理对氧化锌薄膜的结构及光学特性的影响[J].真空科学与技术学报,2009,29(z1):51-54.

[7] 刘晓东,郑晓泉,张要强,等.高能电子辐照后高聚物内部空间电荷和介电性能研究[J].电工电能新技术,2007,26(1):55-59.

[8] 黄本诚,童靖宇.空间环境工程学[M].北京:中国科学技术出版社,2010:89-93.

[9] 胡文瑞,等.微重力科学概论[M].北京:科学出版社,2010:1-5.

[10] Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects[R]. NASA-HDBK-4002, 1999-2.

[11] 沈自才.空间辐射环境工程[M].北京:宇航出版社,2013:121-135.

[12] 沈自才,丁义刚.抗辐射设计与辐射效应[M].北京:中国科学技术出版社,2015:11-54.

[13] 冯展祖,杨生胜,王云飞,等.光电耦合器位移损伤效应研究[J].航天器环境工程,2009,26(2):122-125.

[14] ESA PSS-01-609 (Issue 1). The radiation design handbook[S]. 1993-05.

[15] 徐坚,杨斌,杨猛,等.空间紫外辐照对高分子材料破坏机理研究综述[J].航天器环境工程,2011,28(1):25-30.

[16] DEVER J A. Low earth orbital atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on polymers[R]. NASA TM-103711, 1991.

[17] EVERETT M L, HOF LUND G B. Chemical alteration of poly(vinyl fluoride) Tedlar induced by exposure to vacuum ultraviolet radiation[J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 3789-3798.

[18] ROHR T, EESBEEK M. Polymer materials in the space environment[C]//Proceeding of the 8<sup>th</sup> Polymers for Advanced Technologies International Symposium, Budapest, Hungary, 2005: 1-3

[19] 龚自正,徐坤博,牟永强,等.空间碎片环境现状与主动移除技术[J].航天器环境工程,2014,31(2):129-135.

[20] KAWAMOTO H, HARA N. Electrostatic cleaning

system for removing lunar dust adhering to space suits[J]. Journal of Aerospace Engineering,2011,24(4):442-444.

[21] 向树红.航天器力学环境试验技术[M].北京:中国科学技术出版社,2010:3-5.

[22] ECSS-Q-70-36A. Space product assurance-material selection for controlling stress-corrosion cracking[S].

[23] ECSS-Q-70-71A. Space product assurance-data for selection of space materials and processes[M].

[24] 孙璐,刘莹,杨耀东.航天材料应力腐蚀试验方法研究[J].真空与低温,2011,12(增2):142-147.

[25] MACATANGAY A V, BRUCE R J. Impacts of microbial growth on the air quality of the international space station[R]. AIAA, 2010-17239.

[26] CASTRO V A, THRASHER A N, HEALY M, et al. Microbial diversity aboard spacecraft: evaluation of the international space station[R], NASA, 2011-1427.

[27] NOVIKOVA N D. Review of the knowledge of microbial contamination of the russian manned spacecraft[J]. Microbial ecology, 2004, 47:127-132.

[28] 冯伟泉,丁义刚,闫德葵,等.空间电子、质子和紫外综合辐照模拟试验研究[J].航天器环境工程2005,22(2):69-72.

[29] TOWNSEND J A, PARK G. A comparison of atomic oxygen degradation in low earth orbit and in a plasma etcher[C]. 19<sup>th</sup> Space Simulation Conference: Cost Effective Testing for the 21st Century. Baltimore, Maryland, NASA CP-3341, X-28103, Oct. 29-31, 1996:295-304

[30] VERKER R, GROSSMAN E, GOUZMAN I, et al. Synergistic effect of simulated hypervelocity space debris and atomic oxygen on durability of polyimide nanocomposite[C]. 10<sup>th</sup> International Symposium on Materials in a Space Environment and The 8<sup>th</sup> International Conference on Protection of Materials and Structures in a Space Environment. Space Environment Group, Soreq NRC. Collioure, France. 2006.

[31] 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]. NASA CR-192824, N93-25078, 1993: 1-18.

[32] SCHULTZ P H, CRAWFORD D A. Electromagnetic properties of impact-generated plasma, vapor and debris[C]. Hypervelocity Impact Symposium, Huntsville, AL, 11/16-19/1998.