长期紫外辐射下星用功能材料性能退化预示方法研究

田 海^{1,2},杨生胜³,把得东³

(1.空间环境材料行为及评价技术国家级重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.兰州大学核科学与技术学院,甘肃 兰州 730000;3.兰州空间技术物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要:紫外辐射是造成卫星外表面非金属材料性退化的主要因素之一,材料在空间使用前必须经过 充分的紫外辐射效应评价。由于紫外辐照加速倍数较小(近紫外不允许超过5倍),通过地面试验实现材 料在轨全周期紫外辐照暴露剂量,试验周期过长。本文介绍了典型星用功能材料紫外辐照作用下的性能 退化规律和退化机理,并在此基础上提出了紫外辐照下材料性能退化模型建模方法,为解决大剂量紫外 辐射下星用功能材料性能退化评价提供了一种有效手段。

关键 词:紫外辐射;功能材料;模拟试验;退化规律;性能预示

中图分类号:V416.5 文献标识码:A 文章编号:1002-0322(2019)02-0019-03 doi:10.13385/j.enki.vaeuum.2019.02.03

Study on performance degradation prediction of spacecraft functional materials under long-term ultraviolet radiation

TIAN Hai^{1,2}, YANG Sheng-sheng³, BA De-dong³

(1.National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment, Lanzhou
730000, China; 2.School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3.Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: UV radiation is one of the main factors that cause the degradation of non-metal materials on the external surface of satellites. The material must be sufficient evaluated for UV radiation effect before it can be used in space. Due to UV irradiation test acceleration factor can not be too large (near-UV does not allow more than 5 times), achieving the full life UV exposure dose of the material on-orbit through ground test will take too long time. In this paper, the degradation law and degradation mechanisms of typical spacecraft functional materials under UV irradiation are introduced. The modeling method of material degradation under UV irradiation are then proposed. This provides an effective mean to solve the evaluation of functional spacecraft material degradation under high dose UV radiation.

Key words : ultraviolet radiation; functional materials; simulation test; degradation law; performance prediction

紫外波段的光子作用于材料,将导致材料内 的分子产生光致电离和光致分解效应,尤其会破 坏航天器上高分子材料的化学键,使材料化学键 和功能团发生断裂或交联,使材料性能退化。紫 外辐照对热控涂层的光学性质有较大的影响,使 材料表面逐渐变暗,对太阳辐照的吸收比显著增 加,影响航天器的温度控制。

航天器处于轨道上时,由于失去大气层的保护,所有波段的太阳电磁辐射都能够照射到航天器的表面。紫外辐射的波长范围为10nm~400nm, 其辐射的能量约占太阳常数的9%。紫外辐射虽 然在总电磁辐射中所占的比例很小,但是其光子 的能量非常高,会对航天器表面材料的性能(热 控涂层、太阳电池、光学玻璃、透明导电膜、滤光 片等)产生很大的影响。

暴露于航天器外表面的非金属材料在轨使 用前应开展严格的地面模拟试验,以考核其耐受 太阳紫外辐射的能力。由于紫外辐照加速倍数有 限(近紫外最大为5倍),通过地面模拟试验等效 模拟材料在轨寿命末期经受的紫外辐照量,试验 周期和成本都不允许。如地球同步轨道设计寿命 为15年的卫星,近紫外辐照采用最大5倍加速,

收稿日期:2018-03-28

作者简介:田海(1981-),男,山西省大同市人,本科,高级工程师。

地面模拟试验仍约需3年。因此需要在掌握材料 紫外辐射下退化机理的前提下,研究材料在紫外 辐射下性能退化的规律,建立性能退化模型,以 地面较短试验周期的结果为基础,预示空间长期 紫外辐照下材料性能的退化结果。

1 紫外辐射下材料性能退化规律研究

(1) 试验及结果分析

地面模拟试验是研究材料在紫外辐射下退 化规律的主要手段,由于远紫外(10nm~200nm)波 段加速倍数最大可达 100 倍,地面试验周期相对 较短,本文主要讨论近紫外辐射低材料性能的改变 (200nm~400nm)。近紫外辐射使材料性能的改变 (光化学反应引起的)主要取决于紫外线的积分 能量,依据这种原理进行的材料衰变试验,需要 提供的照射剂量=紫外太阳常数×辐照时间^[1]。

在地面近紫外试验中,一般使用汞氙灯为模 拟源,并使用光学系统滤除光谱中的可见光和红 外光,以防止试验中试样温度过高影响试验结果 判读。为研究材料性能随紫外辐照量的变化规 律,应在辐照过程中选取适当的测试点,对材料 性能进行测试。其中紫外辐照造成材料性能的瞬 态损伤,如电学性能、热性能宜进行原位测试,紫 外辐照造成材料性能永久损伤的情况,如机械性 能等可进行异位测试。

紫外辐射引起材料性能退化具有开始非常快、后来渐渐减少直至基本饱和的特点。对不同 材料和不同考核性能,饱和紫外剂量是不同的。 研究表明,由于紫外辐照导致的材料性能退化通 常在 5000ESH(当量太阳小时)后趋于稳定^[2]。

1994年,美国空军在 SCEPTRE 设备上针对 热控涂层开展了紫外辐照试验,紫外辐照量约 3000ESH,材料包括 Z-93 涂层、YB71 涂层等,试 验结果(见图 1)表明材料太阳吸收比的增加主 要发生在试验初期(1000ESH 左右),随着紫外辐 照量的增加,太阳吸收比增大趋势减缓^[3]。

2000年,宇航公司空间材料实验室应用其空间环境效应模拟试验设备,对光学涂层实验室研制的多种热控材料进行了空间紫外辐照试验,总辐照量约4400ESH,试验的目的是评估新的涂层的辐照耐受性,试验中使用 PE 公司的 Lamda9 分光光度计对试样的光学特性进行了原位测试。试验结果表明材料抗紫外辐射性能较好,其中表面包覆 Ta₂O₉/ZrO₂ 结构的 Tedlar 材料具有最佳的抗紫外辐射性能。试验结果见图 2,由图可见,材料在 1000ESH 前退化较快,在 3000ESH 以后性能退



control materials

2006年, Joyce A. Dever 等人研究了 DC93-500 硅树脂在真空紫外辐照作用下的性能变化,通过 试验获得了硅树脂性能退化与辐照量的关系。试 验结果表明,真空紫外辐照下, DC93-500 硅树脂 的力学性能下降,断裂伸长率随辐照量的增大而 减小,辐照初期减小较快,辐照后期下降速率趋 于平缓^[5]。



(2) 退化机理分析

紫外辐射下材料性能退化的本质是紫外光 子与材料的相互作用,即材料的分子结构、元素 组成、价态、能级等发生了变化,体现在宏观尺度上 是材料热学、力学、电学等性能的变化。物质的基态 吸收紫外线光子形成激发态,随后由激发态发生一 系列光物理过程和光化学反应。光物理过程是通过 一些辐射和非辐射方式消散吸收能;光化学过程包 括自由基形成、光致电离、环化、分子内重排及分子 碎裂等。紫外辐照对材料造成的影响分为瞬态效应 和累积效应两种。瞬态效应是可逆的,当辐照取消 后其性能可恢复到初始状态;累积效应是对材料持 续辐照,会发生不可逆的化学反应,并改变材料的 成分和结构,因而造成性能的退化。

材料在紫外辐射下性能退化呈现辐照初期 退化较快,辐照后期退化逐步趋于平缓直至饱 和,其原因分析为:

(1)与带电粒子辐射相比,太阳紫外辐射穿透能力较弱,影响材料功能层的区域有限。紫外辐照的能量大部分被材料表面薄层吸收而引发材料表面化学老化。如,在紫外(124 nm)辐照 8800 ESH条件下,Teflon FEP发生表面改性的厚度仅为1µm左右^[6],而一般星用薄膜材料的功能层在 25µm以上。

(2)聚合物量子产率(即每吸收一个光量子 所引起反应的分子数)低,即材料受紫外辐照而 产生缺陷有一定的几率。

(3)随着紫外辐照量的增大,材料本身未反应 的杂质、缺陷、自由基、发色团等退化因素在辐照过 程中会越来越少,紫外退化作用相应也越来越小。

3 紫外辐射下材料性能退化模型建模方法

基于紫外辐射下材料性能退化规律研究,其 性能退化模型整体建模的思路为:材料性能退化 规律可以在微观机理分析的基础上用含有若干 参数的数学解析模型表征。设材料性能退化测量 数据点为(t_i,y_i),i=1,2,…m,t为辐照时间,y为 材料在某个时间对应的性能变化值。设材料性能 退化模型为f(t,k₁,k₂,…,kn),ki是模型未知参 数。利用试验数据以及材料性能参数退化表达 式,可以进行数学拟合确定模型参数。

具体过程为:

(1)在光化学作用理论及试验的基础上,研究近紫外辐照对材料光学性能造成损伤的机理, 建立材料性能退化规律与材料紫外辐照总量及 材料工作原理相关的太阳吸收比变化的表达式;

(2)以辐照试验参量、测量所获得的材料太阳 吸收比变化数据做为已知条件,通过以上建立的模 型,计算表达式中表示材料相关特性的待定参数;

(3)在建立的初步表达式的基础上,应用后续 试验及测试数据,验证并适当修正上述表达式,形成 针对该材料在紫外辐照作用下光学性能退化模型。





4 结束语

对紫外辐射下材料性能退化的评估是星用 功能材料筛选、提升材料空间环境可靠性和在轨 长寿命的必要条件。对于大剂量紫外辐射下星用 功能材料,建立材料紫外辐射性能预示模型是必 要的。本文分析了材料近紫外辐射下性能退化规 律及微观作用机理,提出了建立材料性能退化规 律及微观作用机理,提出了建立材料性能退化预 示模型的方案。下一步应选择星用典型材料开展 模拟试验,将材料宏观性能变化的统计规律(指 数型、对数型、复合型等)和材料微观损伤机理相 结合,建立退化模型并进行试验验证,从而为材 料可靠性筛选和寿命预测提供依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 柯受全.卫星环境工程和模拟试验(上)[M]北京:中 国宇航出版社,1993年:299-300.
- [2] Stuckey, Meshishnek M J. Solar ultraviolet and space radiation effects on inflatable materials [R]. Aerospace Report, 2000, NO.TR-2000(8565)-9, 15.
- [3] Cerbus C A and Carlin P S. Evaluation of reformulated thermal control coatings in a simulated space environment Part I—YB-71 [C].NASA Goddard Space Flight Center. Eighteenth Space Simulation Conference:Space Mission Success Through Testing.Washington, United States, NASA, 1994:1-23.
- [4] Stuckey W K, Barrie J D, Meshishnek M J. Space environmental performance of optical coatings on tedlar [R]. Aerospace Report, 2001, NO. TR-2001(8565)-1,7.
- [5] Joyce A. Dever, Bruce A. Banks and Li Yan. Effects of Vacuum Ultraviolet Radiation on DC93–500 Silicone [J]. Journal of Spacecraft and Rockets,2006,Vol.43(2):386–392.
- [6] Dever J A, Pietromica A J, Stueber T J, et al. Simulated space vacuum ultraviolet (VUV) exposure testing for polymer films [C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit:Nevadan, United States, NASA, 2002: 1–14.