

航天材料工程学内涵及其体系构建

沈自才¹ 高 鸿² 欧阳晓平³

(1 北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

(2 中国航天宇航元器件工程中心,北京 100094)

(3 湘潭大学材料科学与工程学院,湘潭 411105)

文 摘 为应对空间特殊服役环境,航天材料研制、保证和使用单位已在材料设计、材料加工、材料评价和材料使用方面开展了大量工作。在此基础上,本文首先对我国航天材料的选型要求进行了分析,接着对航天材料、航天材料飞行试验、空间材料科学、航天材料空间环境适应性等概念进行了辨析,并提出了航天材料工程学的概念,进而对航天材料工程的各个组成部分的关联性进行了阐述。最后,为满足未来空间技术发展需求,在总结和借鉴国内外航天材料工程发展经验的基础上,从规划、研发、试(实)验、评价、选用、数据服务等角度,设计构建了具有航天领域特色的航天材料工程体系。

关键词 航天材料工程,空间环境,内涵,体系

中图分类号:O434.2; V416.5

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.02.001

Connotation and System Construction of Aerospace Material Engineering

SHEN Zicai¹ GAO Hong² OUYANG Xiaoping³

(1 Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

(2 China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094)

(3 School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract In order to overcome the space service environments, a lot of work in material design, material processing, material evaluation and material usage had been carried out by the institute of development, guarantee and use of aerospace materials. Based on this, the selection demand of aerospace materials in China was analyzed firstly, and then some discrimination was given on the concept among aerospace materials, flight test of aerospace materials, space materials science, and space environmental adaptability of aerospace materials and so on. Furthermore, the concept of aerospace material engineering was put forward, and the correlation of related parts composition of aerospace material engineering is described. Finally, to meet the needs of the future development of space technology, based on the domestic and abroad development of aerospace material engineering experience, the aerospace material engineering system is constructed from planning, development, test (experiment), evaluation, data base, data service, standard and other aspects.

Key words Aerospace material engineering, Space environment, Connotation, System

0 引言

随着系列重大工程的开展,国内外研究机构在金属材料、无机非金属材料、高分子材料、材料化学与物

理等基础科学以外,逐步将材料科学分化成以信息材料、电子材料、生物工程材料等为代表的“材料科学与工程”。美国麻省理工学院 Merton Flemings 教授

收稿日期:2017-05-17

基金项目:国家重点基金项目(JSHS2015203B002)

第一作者简介:沈自才,1980年出生于,博士,高级工程师,主要从事航天器空间环境工程和航天材料工程研究。E-mail: zicaishen@163.com

将材料科学与工程总结为研究材料结构/成分、性能、制备和使役行为之间相互关系,确立了材料研究、开发、生产和应用紧密结合是“材料工程学”的核心价值^[1]。

作为人类探索外太空神秘的工程,空间技术是在材料科学与电学、力学、热学、空间环境科学等相匹配的研究过程中,逐步实现对太空的探索。国内外均把“新材料”研究作为航天科学技术的关键储备。国外开展了以 LDEF、SEE、MISEE 为代表的系列航天材料研究计划和项目^[2-8],并定期组织系列研讨会,建立了航天材料研究数据库^[9-11]。我国也一直把航天材料作为国家的基础技术和关键技术大力发展,开展了大量的新材料研发和航天材料空间环境效应研究、积累了丰富的数据^[12-16],初步建立了一系列航天材料技术规范 and 评价标准规范^[17-20]。

但是,随着航天活动的持续推进,新型空间基础设施的环境适应新的轨道环境及其效应以及人的长期在轨驻留等对新材料研究方向和研究速度提出更广、更快、更准、更可靠的要求。航天领域急需打破以“循环试错、实验寻优”为特征的材料制备(设计、改性、工艺等)-性能评价(初始性能、服役行为、费效比)-材料应用多流程迭代的航天材料研发与应用模式,建立以航天工程应用为先导,将材料设计开发与工程应用技术融合的研制与应用模式。

本文提出的“航天材料工程”概念是基于空间特殊服役环境,航天材料研制、保证和使用单位在材料设计、材料加工、材料评价、在航天应用中的经验总结基础上,瞄准未来航天新材料产业发展而提出的,并对其内涵和体系构架建设进行研究 with 展望。

1 航天材料选型要求

材料是构成航天器的基元。一方面,材料是组成航天器结构的组成部分;另一方面,材料又是实现航天器在轨功能的保障。为此,应根据组成航天器的材料所起的功用来选择材料。航天材料根据其使用的功能,可以将其分为结构机构材料和功能材料两大类。其中,结构机构材料又可以分为金属材料 and 复合材料,功能材料则可以分为热控材料、光学材料、能源材料、密封材料、润滑材料、胶接材料等。

航天材料所面临的太空环境是航天器设计的重要约束条件之一,也是诱发航天器异常和故障并影响其在轨长寿命高可靠运行的重要因素。太空环境对航天器作用的归根结底是太空环境与航天材料间的相互作用,航天器的故障与损伤也可以归结为材料的损伤。航天器在轨故障分析表明,尽管航天器故障表现形式多种多样,但除设计缺陷外,大多是由于所使用的材料或元器件的材料在太空环境作用下发生性

能退化或变化而诱发的,航天材料的太空应用应满足航天产品在太空特殊环境作用下的使用要求^[21-23]。

航天器材料的选型是一个综合分析的过程,要考虑各方面的因素。第一,实现航天器本身所需的机、电、热、光等基本功能和性能;第二,满足航天工程的特殊要求,即具有较好的太空环境适应性,实现航天器在轨寿命期间的长期工作;第三,由于航天器造价较高,同时亦受到发射结构质量的限制,航天器往往结构复杂,具有高度集成性,因此,对材料的结构质量、可加工性和经济性也有一定的要求。

2 航天材料工程学的内涵

传统航天材料的设计、生产、评价和使用单位,相互之间具有较为清晰的分工界面,关联性和相互关注程度较差,造成了为获得理想的高性能航天材料,不同单位之间形成了以“循环试错、实验寻优”为典型特征的多次迭代开发模式,造成了航天材料的开发周期长、费用高等问题。为了满足航天器研制的需要,缩短高性能航天材料的研制时间,提高航天材料的研制效率,亟需将航天材料工程的各个环节构建为一个有机整体。航天材料设计、制备、性能及服役行为的关系图如图 1 所示。

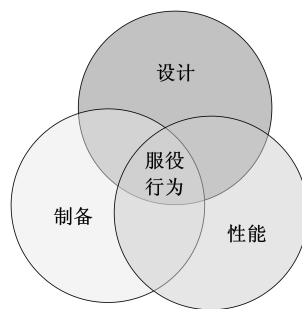


图 1 航天材料研制与服役行为关系图

Fig. 1 Correlation between research and service behaviors of aerospace materials

首先对航天材料、航天材料学、太空材料科学、航天材料飞行试验、航天材料太空环境适应性、航天材料工程学等概念及其关联性进行辨析。

航天材料是指构成航天器结构机构及实现其在轨寿命期间完成特定任务功能的各类材料。可以分为结构机构材料和功能材料。

航天材料学是指研究可用于航天器的材料的设计、制备方法与性能测试的材料科学。

太空材料科学是指研究太空环境条件下材料的加工及生产工艺过程的物理规律,从而获得新性能材料的科学。

航天材料飞行试验是指借助于暴露试验装置,获得材料在太空真实环境下的性能变化数据的在轨试验。

航天材料太空环境适应性是指航天材料适应其宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 2 期

将要经历的空间环境的能力。它是航天器部件、组件、系统级器件空间环境适应性的基础,是航天器研制的重要环节,对航天器在轨可靠性。

航天材料工程学是指与航天器工程相关的材料的研究、制备、试(实)验、选用、性能评价及保证,进而实现航天器在轨任务,并保障其可靠性和安全性的工程科学。

因此,航天材料是航天材料工程学的研究对象,空间材料科学实验、航天材料飞行试验和空间环境适应性评价是航天材料工程学的重要组成部分。

航天材料工程学的主要内容为涉及到航天材料的空间环境与效应分析、航天材料空间环境适应性评价、航天材料飞行试验技术、以航天材料为研究对象的空间材料科学实验、与航天材料选用相关的航天材料保证以及新型航天材料的研制等等。航天材料工程的各个组成部分的关联性参见图2。

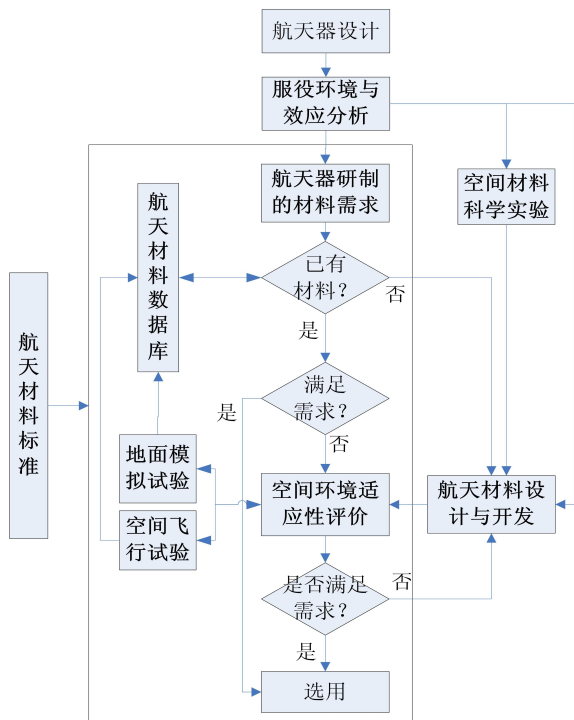


图2 航天材料工程各个组成部分的关联示意图

Fig. 2 Correlation between segments of aerospace material engineering

3 航天材料工程发展现状

航天材料技术是航天产品研制的基础技术、先导技术和关键技术,是决定航天产品性能、质量、可靠性和成本的重要因素,贯穿于航天产品的设计、研制、加工、生产、试验及使用维护的全寿命周期,其性能与水平是衡量航天技术发展水平的重要标志之一。下面将对航天材料工程的国内外现状进行分析。

3.1 航天材料体系与规划

长期以来,欧美航天大国开展了一系列航天材料研究计划,包括美国军方的《推进材料计划》、《隐身宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018年 第2期

材料、工艺及维修性计划》、《金属经济可承受性计划》、《被动式防热端头技术计划(PANT)》、美国陆军弹头防热材料研制计划《高级拦截器材料工艺研制计划》、美国海军实施的《再入飞行器材料技术计划(REV-MAT)》、美、法等国海陆空三军联合制定的《运载火箭材料计划》、欧盟的《低成本轻质结构计划》等。通过航天材料长期规划的实施,增强了其在航天材料研究与生产方面的技术优势^[15]。我国航天材料从无到有,自主研发能力不断增强,初步形成了20多类,1000多个牌号的航天主干材料体系,突破了航天产品研制中的关键材料技术,在航天产品(弹、箭、星、船)上得到应用,基本实现了航天产品关键材料的系统配套和自主保障,初步建成了航天材料体系。

3.2 航天材料发展及应用水平

欧美国家的航天材料发展及应用水平已经达到了较高水平,如高性能碳/碳和碳/酚醛防热复合材料等防热材料已经在弹头和固体火箭发动机上获得广泛应用,复合材料的应用使卫星结构质量减轻到仅占卫星总质量的4%~5%等,随着新一代武器系统和航天飞行器的材料技术研究,航天材料技术进入了新的发展阶段^[15]。由于欧美航天大国对华高技术禁运,致使很多航天器研制必须的高性能材料进口受阻,例如超薄、大面积、高性能聚合物薄膜材料,而在某些方面由于国内基础薄弱、设备老化、人员变动等为材料持续保障带来困难,从应用水平角度考虑,主要表现为已成熟应用的材料性能数据不全、航天材料的标准规范体系尚不完善、航天材料评价手段尚不健全、材料的应用工艺及加工技术有待提高。

3.3 航天材料飞行试验和空间材料科学实验

以美国NASA(美国国家航空航天局)为代表的航天大国或机构,对航天材料在空间环境下的性能变化进行了系统的空间飞行试验研究,开展了以长期暴露试验装置(LDEF)^[2-5]、国际空间站材料实验(MISSE)系列为代表大量飞行试验^[7-8],获得了上千种(类)航天材料性能变化的在轨数据。利用手套箱或飞行实验机柜开展了以晶体生长、胶体物理、金属合金及亚稳态为代表系列空间材料科学实验。我国虽然利用实践系列卫星、神舟飞船等开展了一些航天材料的空间飞行试验和空间材料科学实验^[24-27],但与欧美航天大国相比,仍需进一步系统规划。同时,对航天材料开展的飞行试验和科学实验数量较少,不成体系。

3.4 航天材料空间环境适应性评价体系

以美国NASA和ESA(欧洲航天局)为代表的航天机构建立了以ISO(国际标准化组织)、ECSS(欧洲

空间标准化组织)非常重视航天材料空间环境适应性评价工作,搭建了一系列空间环境及效应地面模拟试验装置,形成了以 ISO^[28-31]、欧洲(ECSS 标准、ESA 标准、ESCC 标准等)^[32-33]、美国(MIL(美军标)^[34]、NASA 标准^[35]、NASA 技术报告、AIAA(美国航空航天学会)^[36]、ASTM 标准等^[33]、俄罗斯^[38-40]等一系列标准、模型规范、技术报告等,指导航天材料的地面评价工作。经过多年的发展,我国已经开展了大量的航天材料空间环境适应性评价工作,主要航天机构如中国空间技术研究院等也建立了一些航天材料空间环境适应性评价规范或标准,国标方面只有热控涂层的 GJB 2502 的空间环境效应地面模拟试验的相关标准规范^[17]。我国航天材料评价技术基础仍然薄弱,需进一步建立系统化的国家标准(GB)、国家军用标准(GJB)或航天行业标准(QJ)体系。

3.5 航天材料性能变化数据库

国外航天大国和机构通过实施一系列航天材料性能在轨飞行试验技术和开展大量地面模拟试验评价,获得了大量的航天材料空间环境效应数据,并定期召开一系列航天材料应用研讨会,建立了完善的航天材料性能变化数据库^[9-11]。例如,美国 NASA 主要通过材料与工艺技术信息系统(MAPTIS)实现材料保证,并对各种材料在其使用环境下作出评估,包括耐应力腐蚀开裂、耐腐蚀、燃烧性(以及氧浓度的影响)、放气(毒性)、出气(热真空稳定性)、耐霉菌、流体系统的稳定性等。我国部分航天企业也尝试建立航天材料及其性能变化的数据库,但是,积累的航天材料空间环境效应数据仍然较少,缺乏在国家层面建立系统化的航天材料性能变化数据库。

与国外航天强国,尤其是美国相比,我国航天材料工程仍存在一定的差距。概括起来,主要表现为以下几点:(1)材料研究基础薄弱,原创性不足;(2)材料研究依赖于型号牵引,技术推动力度有待进一步加强;(3)高性能航天材料与国外差距较大;(4)航天材料的空间环境适应性评价与试(实)验缺乏系统规划;(5)数据库有待进一步建立和完善。

4 我国航天材料工程的体系构建

航天材料是航天器设计的最基本单元,是实现航天器功能、提升航天器性能的重要保证,也是保证航天器长寿命、高可靠运行的技术基础。因此,加强航天材料工程,构建航天材料工程体系,对促进我国航天事业的发展具有非常重要的作用。

基于我国航天材料工程的差距和航天工程的需要,航天材料工程的体系构建主要包括需求规划、高性能材料开发、地面试验评价、在轨飞行试验、数据库、大数据应用及标准等,如图 3 所示。



图 3 航天材料工程体系

Fig. 3 System of aerospace material engineering

下面对我国航天材料工程体系构建分述如下:

(1) 航天材料需求规划体系

一般来讲,航天器可由如下分系统组成:结构、机构、热控、能源、姿轨控、有效载荷、天线、回收、其他(如星务等)。不同的分系统,其对航天材料的要求和需求也不同。从航天器分系统的角度,航天材料有其需求的特殊性。同时,新技术新材料的出现,也对航天材料需求规划带来了新的方向。因此,航天材料需求可以按照航天器分系统和新技术新材料进行规划。

以纳米技术为例,美国 NASA 在 2010 年发布的《空间技术发展路线图》第 10 部分《纳米技术》中^[41],对未来 20 年在结构机构、能源供给和储存、推进技术、电子以及传感器四方面进行了规划,如图 4 所示。其中,工程材料和机构部分,从轻质结构、抗损宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 2 期

伤体系、涂层、胶黏剂和热管理等 5 个方面,给出了以碳纤维增强复合材料为代表的 24 项关键材料技术的

发展路线。可应用于智能化小卫星、抗损伤乘住舱、热控制与防护、极端环境操作等 10 个方面。

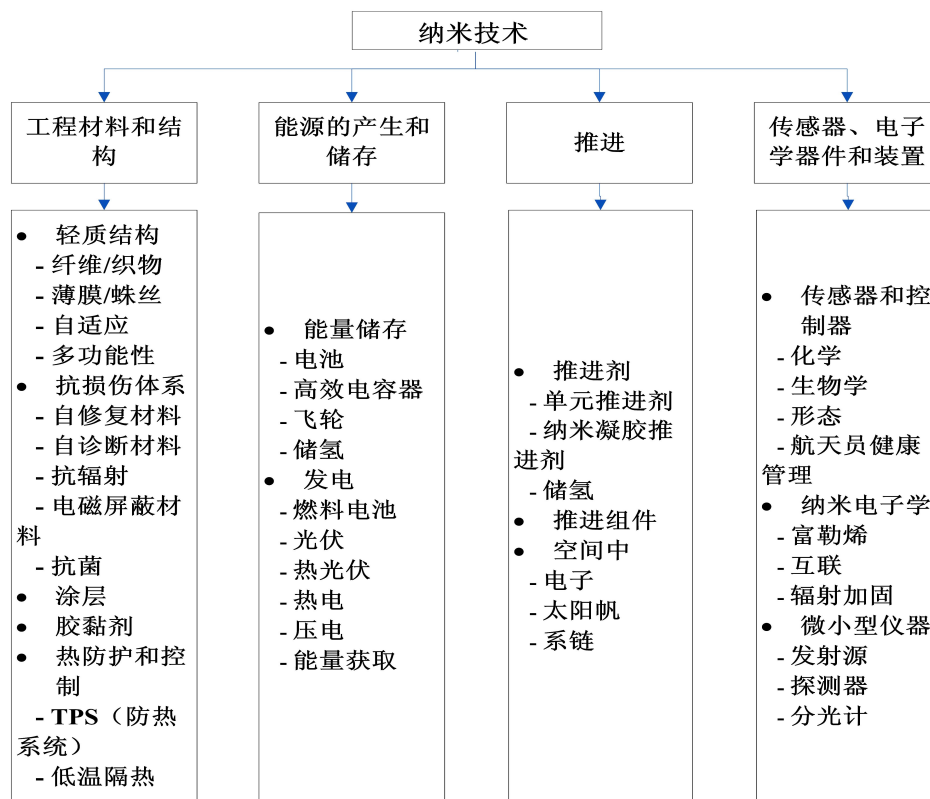


图 4 NASA 制定的纳米技术领域 2010 ~ 2030 年发展方向

Fig. 4 Space technology roadmap of NASA –Nanotechnology 2010–2030

(2) 航天材料研发体系

新工艺、新技术、新方法、新理念为高性能航天材料的研发带来新的机遇。同时,空间材料科学实验的成果也为开发适用于航天器的新材料研制提供了新的途径。随着我国向更遥远的深空推进和新的空间基础设施的建设,需要进一步加强航天用高性能新材料的研制与开发。航天材料的研发主要包括航天材料设计方法、航天材料工艺技术和空间科学实验方法等。

(3) 航天材料地面评价体系

航天材料能否在型号任务中得到应用,受到很多因素的影响,需要对其进行综合评价。总体来说,航天材料的地面评价体系主要包括航天材料的基本性能和功能评价、航天材料的空间环境适用性评价以及航天材料的工程可用性评价。其中,工程可用性评价主要包括可加工型、易获得性和经济性等。

(4) 航天材料飞行试验体系

由于空间环境是多种环境要素共存,地面模拟无法真实再现空间环境及其效应,因此,总是存在其局限性。同时,地面模拟试验的可靠性也需要飞行试验来验证和改进。因此,系统性开展航天材料的飞行试验是一重要工程方向。尤其是我国空间站的建设为未来开展系统的航天材料飞行试验提供了可能。根据在轨试验的方式,航天材料的飞行试验体系可以分为在轨被动暴露试验和在轨主动暴露试验。

(5) 航天材料数据库

面对航天强国的系统化材料体系,虽然我国初步建立了航天材料体系,但在高性能材料基础研究和材料性能数据库等方面存在许多差距,在关键的机理研究方面仍然需要加大工作力度。具体表现为所采用的部分型号材料,暴露出了工艺不稳定、性能离散性大的问题。同时,我国航天材料空间环境效应方面也进行了大量工作,积累了大量材料空间环境效应数据。因此,航天材料的数据库主要包括航天材料的基本应用信息、航天材料的基本功能数据和航天材料的空间环境适应性评价数据。

(6) 航天材料大数据应用

航天材料发展日新月异,新材料、新技术、新工艺和新方法层出不穷。材料信息的数据量和复杂性大大提高。而对不同类型材料的大量数据,最大限度地从中挖掘有价值的信息,总结规律和建立模型,形成航天材料数据资源共享和应用平台。航天材料的大数据应用主要包括航天新材料的研制开发、航天材料及航天器的在轨预警预报、航天器的在轨故障分析等。

(7) 航天材料标准体系

在航天材料保证过程中,航天材料的选用和应用需要经过标准化的鉴定,有其规划化的应用体系,主要包括航天材料的管理体系、航天材料选用指南、航天材料评价体系等。

5 结论

航天材料是航天器在轨可靠性的基石,航天材料的最大的特殊性是其服役环境的复杂性。要将空间环境及其效应的理念贯穿到航天器研制的全过程,切实将航天材料保证深入根植到航天器设计、研制、评价的各个环节,以提高航天器在轨的安全,保障其任务周期内的可靠性。

基于中国航天发展的新趋势、新挑战和新需求,航天材料向高性能、多功能、复合化、智能化、整体化、低维化、低成本化等方向发展。通过建立以航天工程应用为先导,将航天材料的研究、制备、试(实)验、选用、性能评价及保证形成有机整体,构建航天材料工程体系,形成航天材料的研发和应用新模式,才能更快、更准、更可靠、高费效比的研发出高性能航天新材料。

参考文献

- [1] FLEMINGS M C. What next for departments of materials science and engineering [R]. Annual Review of Materials Research, 1999, 29: 1~23.
- [2] LEVINE A S. LDEF - 69 Months in space first post-retrieval symposium [R]. NASA CP-3134, 1991, 1-636.
- [3] LEVINE A S. LDEF-69 month in space: second post-retrieval symposium[R]. NASA-CP-3194, 1992, 1-292.
- [4] LEVINE A S. LDEF-69 month in space: third post-retrieval symposium [R]. NASA-CP-3275, 1995, 1-560.
- [5] STEIN, B A, YOUNG P R. LDEF materials workshop 1991 [R]. NASA-CP-3162, 1992, 1-478.
- [6] DINGUIRARD M, MANDEVILLE J C, EESBEEK M V, et al. Materials exposure and degradation experiment (MEDET) [R]. AIAA2001-5070, 2001, 1-9.
- [7] FINCKENOR M M. The Materials on international space station experiment (MISSE); first results from msfc investigations [R]. AIAA, 2006, 1-9
- [8] GROH K K D, BANKS B A. NASA glenn research center's materials international space station experiment (MISSE 1-7) [R]. NASA/TM-2008-215482, 2008, 1-39.
- [9] FUNK J G, STRICKLAND J W, DAVIS J M. Materials and processes technical information system (MAPTIS) [R], NASA 93-28286, 1993: 1-22.
- [10] BOHNHOFF-HLAVACEK B. Data bases for LDEF results [R]. NASA-CP-3194, 1992: 1-12.
- [11] BOURASSA R J, GILLIS J R, ROUSSLANG K W. Atomic oxygen and ultraviolet radiation mission total exposures for LDEF experiment. LDEF first post-retrieval symposium [R], NASA CP-3134, 1991: 643-661.
- [12] 沈自才, 姜海富, 徐坤博, 等. 航天材料空间环境效应损伤机制及关联性研究[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 1-8.
- [13] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(2): 115-121.
- [14] 宋力昕. 航天材料发展趋势分析[C]. 中国空间科学学会第七次学术年会论文集, 大连, 2009: 47-52.
- [15] 郭玉明. 航天材料发展与展望[C]. 复合材料技术与应

用可持续发展工程科技论坛, 北京, 2006.

- [16] 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.
- [17] GJB 2502 航天器热控涂层试验方法[S].
- [18] QJ 20013-2011 空间材料出气特性测试方法[S].
- [19] QJ 20285-2014 空间材料原子氧效应试验方法[S].
- [20] QJ 20287-2014 空间材料原子氧与紫外综合环境试验方法[S].
- [21] 黄本诚, 童靖宇编著. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [22] 沈自才, 姜海富, 徐坤博, 等. 航天材料空间环境效应损伤机制及关联性研究[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 1-8.
- [23] 沈自才编著. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 宇航出版社, 2013.
- [24] 汪卫华, 潘明祥. Al-Mg₂Si 合金在"神舟二号"飞船上定向复合生长研究[C]. 中国空间科学学会空间材料专业委员会 2002 学术交流会议论文集, 北海, 2002.
- [25] 张富强, 陈诺夫, 吴金良, 等. 神舟飞船生长 GaMnSb 材料过程及性能分析[J]. 空间科学学报, 2004, 24(6): 455-461.
- [26] 奚日升. 空间站材料科学加工实验炉的选择[J]. 空间科学学报, 2009, 29(1): 154-158.
- [27] 刘岩, 艾飞, 潘秀红, 等. 空间材料科学实验技术总体方案构想[J]. 载人航天, 2010(3): 19-23.
- [28] <http://space-env.esa.int/ProjectSupport/ISO/index.html> [EB/OL].
- [29] http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=46614 [EB/OL].
- [30] ISO/DIS 15856 Space systems-Space environment-Simulation guidelines for radiation exposure of non-metallic materials[S].
- [31] ISO 23038 Space systems-Space solar cells-Electron and proton irradiation test methods[S].
- [32] ECSS-E-ST-10-12C Space engineering-Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins[S].
- [33] ECSS-Q-ST-70-06C Space product assurance-Particle and UV radiation testing for space materials[S].
- [34] MIL-STD-883 Test method standard microcircuits, 1019.4 Ionizing radiation (total dose) test procedure[S].
- [35] MIL-STD750E Method 1019.5 Steady-state Total Dose Irradiation Procedure[S].
- [36] NASA/SP-8053, Nuclear and space radiation effects on materials (JUN 1970) [S].
- [37] ASTM E512-94 Standard Practice for Combined, simulated space environment testing of thermal control materials with electromagnetic and particulate radiation[S].
- [38] GOST 25645. 323 :1988, Polymeric materials, methods of radiation tests[S].
- [39] GOST 25645. 331: Polymeric materials. Standards for radiation resistance estimations[S].
- [40] GOST 25645. 332 :1994, Polymeric materials for spacecrafts with nuclear reactor. Requirements to radiation tests[S].
- [41] Space technology roadmap -Nanotechnology Road map [R]. NASA, 2010: 1-23.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018年 第2期