

航天器用材料应用验证技术体系

高 鸿^{1,✉}, 邢 焰¹, 孙 明¹, 余 斌², 李 岩¹, 刘泊天¹, 吴 冰¹, 于利夫¹, 樊彦艳¹

¹ 中国空间技术研究院, 北京 100094

² 中国航天科技集团公司, 北京 100048

本文基于钱学森的“综合集成方法论”, 结合我国航天器材料的研制及应用特点, 阐述了应用验证技术体系基本原理, 并总结工程实践经验, 提出建设要点。该体系通过材料特性表征及应用情况的宏观与微观研究, 利用试验验证、专家决策支持、计算仿真、归纳演绎、信息处理等方法, 形成了多指标评价、多角度分析、综合评判的材料工程应用质量控制系统, 发挥了人机结合、定性定量结合、理论与实践结合以及多学科融合的系统工程优势, 为我国航天装备自主发展奠定基础。

关键词 航天器材料 应用验证 技术体系

中图分类号: TB302 文献标识码: A

Application Verification Technology System for Aerospace Advance Materials

GAO Hong^{1,✉}, XING Yan¹, SUN Ming¹, YU Bin², LI Yan¹, LIU Botian¹, WU Bing¹, YU Lifu¹, FAN Yanyan¹

¹ China Aerospace of Space Technology (CAST), Beijing 100094, China

² China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC), Beijing 100048, China

Based on Qian Xuesen's "comprehensive integration methodology", and combined with the characteristics of spacecraft materials development and application in China, the basic principles of application verification technology are described in this paper. The new material engineering application quality control system has been formed with multi-index evaluation, multi-angle analysis and comprehensive evaluation by means of macro and micro material research of material characterization and application, using the methods of experimental verification, expert decision support, computational simulation, induction and deduction, information processing and so on. The system gave full play to the advantages of man-machine integration, qualitative and quantitative integration, theory and practice integration and multidisciplinary integration of systems engineering, laying a quality assurance foundation for the independent development of China's space equipment.

Key words spacecraft material, application verification, technology system

0 引言

航天产业是表征国家科技实力和竞争力, 保障国家安全和经济社会发展的重要战略性新兴产业^[1]。航天器研制所用元器件、机电产品、电子单机、结构组件等各类产品均离不开先进的材料技术, 为积蓄航天装备基于国产材料研发的潜力, 驱动航天自主创新内生力, 亟需开展国产材料高效高质量应用转化技术研究, 通过一套完善的技术体系, 拉动国产材料技术在航天高端装备中的转化速率与比例, 为支撑航天自立自强奠定坚实基础。

然而, 受限于航天高端装备高可靠性的要求, 传统的产品质量观念在不断演化, 从产品符合规定要求的“符合性”发展到现代质量观强调的“产品性能、可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性和经济性”的全质量特性^[2]。而材料作为航天装备设计的基础要素, 需要在产品研制初期通过有效的分析试验技术为可靠性设计和制造提供全面准确输入, 规避产品“先天不足”, 进而实现高端装备产品高可靠性要求。本文以钱学森“综合集成方法论”为理论依据^[3], 提出航天器材料应用验证技术体系架构, 通过总结应用验证工程实践经验, 明确了技术体系建设要点, 可有效指导航天器用材料应用验证实施, 加强国产材料研制与航天器高端装备应用衔接, 解决新材料技术快速应用转化与产品高可靠性要求的矛盾, 为稳步推进国产材料技术与航天装备产品创新发展发挥积极作用。

1 航天器材料应用验证技术体系架构设计基本原理

航天器材料应用验证技术体系是为满足我国国产新材料在航天高端装备领域快速应用转化的需求, 保障复杂产品高可靠设计与制造, 提出的一套以材料为“主体”的试验验证综合质量保证体系。该体系在军用装备材料评价评估工作中首次将钱学森于1990年提出的“综合集成方法论”应用到装备基础材料试验验证体系建设^[4], 它融汇了“系统工程学”^[5]理论方法, 科学地回答了基于高端装备产品用材料多指标体系协同效应下的产品可靠性设计与制造的基础科学问题。

航天器材料应用验证技术体系首先从需求出发, 利用多领域专家的知识经验和广泛获取的信息资源, 针对某一种或一类材料特定的应用需求, 结合产品应用环境、产品结构特征以及功能性能需求, 提出经验性假设或定性判断。该经验性假设多以材料在特定应用背景下的失效物理行为为主, 同时也兼顾产品可靠性特征和全质量特性。在专家系统知识汇总的基础上, 通过将复杂问题进行系统框架设计和层次分级, 设计材料应用验证指标体系, 这一阶段利用以人为主的思维科学, 将复杂问题结构化、系统化、可视化以及可衡量化, 进而从定性研究转为定量研究。在指标体系建设完善的基础上, 试验体系通过与指标体系相辅相成的协同关系, 将指标体系带入机器为主的实施阶段。通过

以机器为主的试验评估材料特性与指标体系的偏离程度, 再通过设计和工艺优化, 得到最佳试验结论, 实现材料以最

优的状态应用于复杂产品, 并形成完善的材料数据体系(见图 1)。

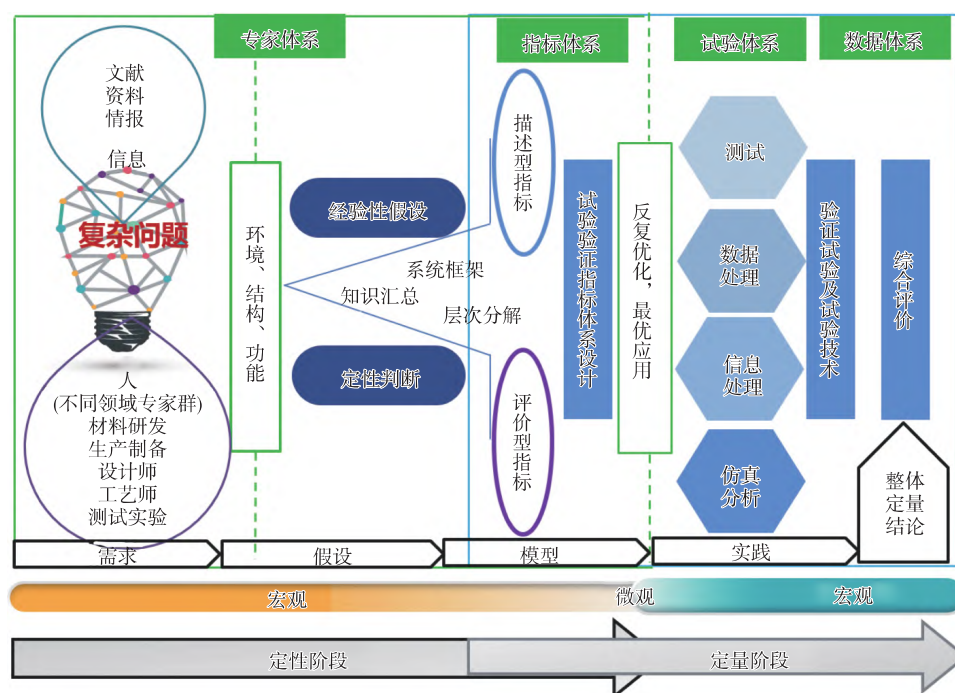


图 1 “综合集成方法论”在材料应用验证体系中的求解过程

Fig.1 Solving process of comprehensive integration methodology in material application verification system

航天器材料应用验证技术体系充分体现了“综合集成方法论”从整体研究问题, 系统分解, 到综合认识, 即从整体出发, 分解再综合, 循环迭代的解决问题的思想, 展示了技术体系的系统和整体功能。该体系从定性到定量的过程中, 将专家体系、指标体系、试验体系和数据体系结合起来构建了应用验证技术方法, 从宏观到微观, 按整-分-合的路线实现材料多指标体系在特定应用背景下的适用度定量化求解过程。

2 航天器材料应用验证技术体系建设关键环节

航天器材料应用验证技术体系以需求调研与分析作为起点, 通过层次分析和结构分析形成应用验证评价指标体系(简称应用验证指标体系), 进而利用试验、分析与评价技术对指标体系中的定性与定量参量进行评估与反馈, 通过设计和工艺优化调整, 获得最优应用状态的材料。最后, 基于材料多指标体系的复杂特征, 利用仿真与计算技术, 从适用度、成熟度、可靠性等多维度开展综合评价, 获得材料在特定产品及型号装备应用背景下的“可用性”与否的结论, 指导材料“好用易用”, 支撑型号装备“能用尽用”(见图 2)。

2.1 材料应用验证需求调研与分析

通过充分吸纳各领域专家智力资源、工程经验以及所收集信息和资料文件, 从材料研制情况、应用背景需求、验证试验资源等方面, 提炼总结被验证材料特点和应用需求, 明确应用验证具体需要解决的工程问题。该过程是多种复杂需求集成的过程, 调研范围从材料研制生产单位延伸到设计应用, 甚至到分系统乃至系统级应用需求, 同时融汇了空间环境、安全性、可靠性、测试实验等多学科理论和经验。应用验

证需求分析是指向性明确的收敛型多变量求解过程, 它不同于第三方检测完全开放式的测试评价, 也有别于鉴定试验仅以材料指标为主的评价考核, 它以明确的应用需求为主, 进行多指标体系关联, 通过建立层级清晰的验证指标体系, 从而实现验证的最终目标。需求分析是材料应用验证的第一步, 也是决定材料应用验证过程真实性、验证结论有效性的关键一步。

2.2 材料应用验证指标体系设计

深入分析我国航天装备发展对材料的需求特点和应用特点, 确定航天器材料应用验证指标体系五个一级指标(又称五要素), 即材料关键指标一致性、工艺适用性、环境适应性、服役安全性、组件健壮性, 再结合具体产品及应用特点构建二级指标和三级指标, 形成完整的指标体系。该体系兼顾了我国国产高端、多样化、多类别材料在空间各轨道探测的高效高质量应用需求, 提出材料多参数指标验证、适应各类服役轨道的通用性验证、匹配型号研制进度的短周期、低成本验证以及以“用”为主的闭环式验证的任务特征。

紧密结合航天装备材料的需求和验证特征, 验证指标体系设计遵从“满足航天装备用材料需求覆盖性、验证考核指标关重性、验证参数精准性、验证项目独立性以及验证试验经济性”五个原则。从材料性能一致性、稳定性, 到构件(含缩比件、工艺件、随炉件、标准样件) 的环境适应性、服役安全性和工艺适用性, 以及组件健壮性对验证指标体系进行逐层分解。验证指标体系由参数和判据两部分组成, 针对每一类或每一种参数设定明确单一指标和预设判据, 进而构成材料多层次、多指标体系, 如图 3 所示。

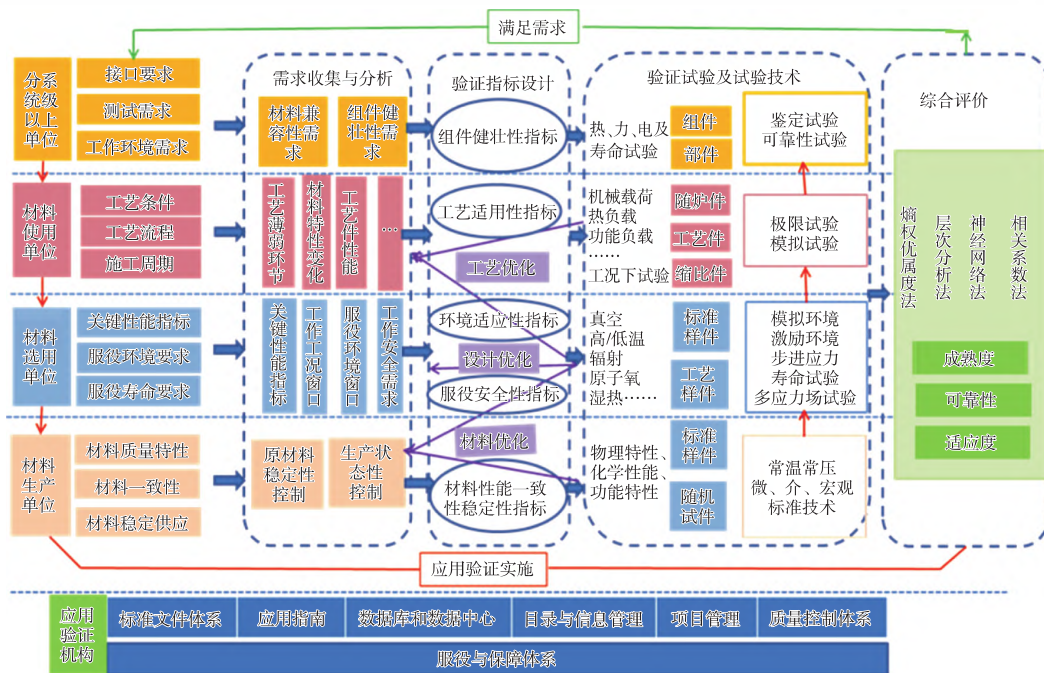


图2 航天器材料应用验证技术体系架构模型

Fig.2 Technical system model of application verification of spacecraft materials

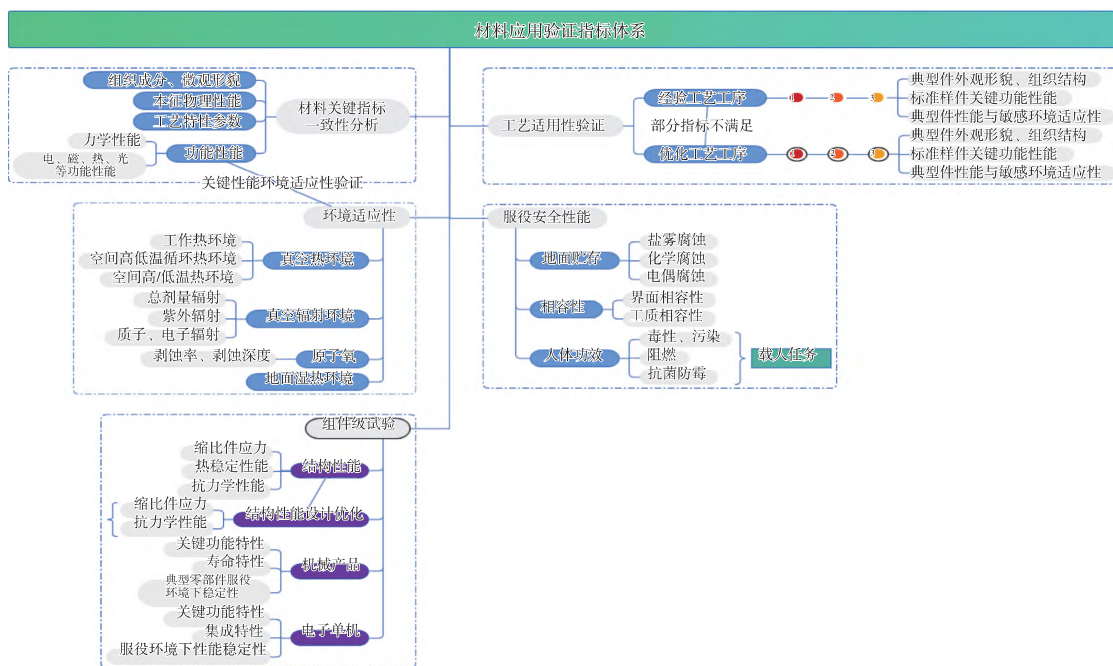


图3 航天器材料应用验证指标体系逻辑图

Fig.3 Logic diagram of the index system for spacecraft material application validation

2.3 材料应用验证试验体系建设

材料应用验证试验体系是“综合集成方法论”中从定性到定量的转化。材料应用验证需求的提出和指标体系设计是以“人”为本,通过人的形象思维为主的信息、经验、知识的定性综合集成的过程,提出问题与假设并明确整体的、全面的应用验证目的或目标。而试验体系着重从定量的角度,通过对指标体系提出的每一个参数利用“机器”(如仪器、设备)开展测试、试验和计算,获得数据、图标和曲线,形成定量的描述。材料应用验证试验应结合材料特点、材料价值、试验条件、试验程序复杂程度、试验置信度、试验数据采集等因

素对验证项目进行适用性、经济型和有效性分析。

应用验证试验体系关键是保证有限的试验资源,在可接受的试验周期和试验成本下,通过指标体系、参试样品数量与状态,确定测试实验项目;并经紧前紧后、串行并行的逻辑关系分析设计试验流程,通过试验及数据解析获得有效的验证试验结果(见图4)。参试样品可以是材料或是其原材料及其标准试件,也可以是通过特定工艺加工后制备的构件(工艺样件、缩比样件、典型样件等),亦或是通过组装成型过程得到的组件级产品;测试项目既涵盖材料本征性能测试,也包括服役环境下应用的模拟试验,其中模拟试验、激励试

验、步进应力试验、极限试验以及寿命试验是获得各类材料在特定服役工况下性能稳定性的试验手段。通过指标体系所建立的评价矩阵模型衍生出材料测试实验流程,明确各阶段紧前试验关系,优化串并行试验程序,实现指标体系量化、精准性和全面性的验证目标。

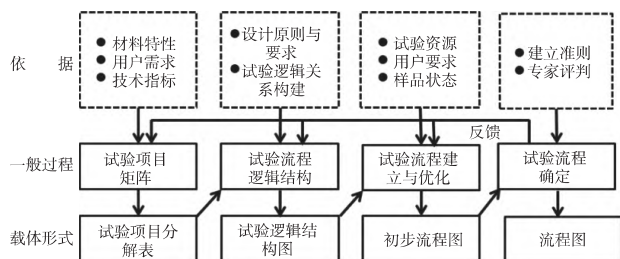


图4 航天器材料应用验证试验流程建立

Fig.4 Establishment of validation test processes for spacecraft materials application verification

2.4 材料应用验证综合评价

材料应用验证综合评价阶段是将材料多参数指标体系层次化、量化的“归一”过程,进而形成满足应用需求的“适应度”,一般分为“可用、易用、好用”三个层次。综合评价是材料应用验证技术体系从分解研究到综合集成的递进,体现从整体层面研究和解决问题的优势。材料应用验证综合评价更多体现“人-机”交互且以人为主,是人的思维科学利用系统学、数学以及计算技术的融合,是系统工程的最佳体现。

在材料应用验证技术体系中,某种材料在特定应用背景下的应用“适应度”需要通过对多指标体系所设定的判据与评价获得的参数指标偏离度进行分析,加之对材料在一定时间、一定环境下的性能变化或退化水平进行统计分析。综合评价就是将测试获得的多种定量参数与预计或期望的性能进行比较并量化,这里可以用“适应度函数”来表示,通过数据模型求解一个多目标规划度问题,获得“适应度”。这个数学求解过程可以结合材料应用验证历史数据积累情况、参试材料种类、材料参数特征等,选择专家系统、神经网络法、层次分析法、商权优属度法、相关系数法等数据模型^[9],实现对多元或多目标规划问题求解。

3 航天器材料应用验证技术体系建设要点思考

3.1 全面体现“系统集成”理论优势

航天器材料应用验证是针对航天器型号应用背景,在装星使用前开展的一次综合分析评价活动。它是用户或用户指定机构通过全面分析材料应用需求、覆盖产品质量特性,研究并设计体系化的考核指标,进而实施程序化测试检验、试验验证、数据分析工作,获得航天器预定服役场景下应用的适应性。它通过材料宏观与微观研究,利用计算仿真、信息管理、专家决策支持的手段与方法,形成多指标综合评价分析系统,它的建立过程与“综合方法论求解”过程具有高度的符合性。其技术特点有以下几方面。

3.1.1 人与机器结合

航天器材料应用验证技术体系中需求调研分析、指标体系设计、试验实施以及综合评价各个环节都需要充分利用专家智力资源,通过各个不同领域专家头脑风暴、专家决策等

方式,把人的经验、知识、智慧以情报、资料和信息按照一定的思维逻辑整合起来,并形成应用验证指标体系,为定性化、宏观表象转入定量化、微观表征提供必备的理论基础。而利用测试与试验设备、仿真计算及分析软件等工具对专家系统所设计的验证试验指标体系开展更为精准的试验与仿真分析,通过图表、数据、曲线等定量的数据信息,展示更为微观和具体的状态与规律。与传统的材料鉴定检验、材料出厂检验、材料采购复验等其他质量检测活动不同,材料应用验证技术体系是以“人”为主、人机高效结合的试验技术体系。

3.1.2 定性定量结合

材料应用验证初始阶段依靠需求分析,定性分析材料固有属性、质量属性、应用属性及其可能存在的应用风险、环境效应与退化机理,通过仿真分析、历史经验借鉴、同行学习等多种途径拟定描述型或评价型指标,形成定性或半量化的指标体系设计。在测试设备和表征仪器的参与下,获得完善的数据体系,再通过比对、计算、分析等对定量化数据进行加工处理,进而体系化地掌握材料应用特性。而综合评价过程是通过定量的数据进行数据间关联性分析、因果分析、规律分析等方法完成定性化的归一,以获得适用性的结论。材料应用验证技术体系是通过人机交互而形成的从定性-定量-定性的演绎过程。

3.1.3 理论与实践结合

材料应用验证需求调研中的历史故障案例分析、同行应用案例借鉴以及专家咨询等工作属于实践经验层面,而文献及机理研究、材料特性评价、数据计算分析、环境效应分析等属于理论层面,经验与理论结合的界面横向体现在应用验证技术体系中四个关键技术环节,纵向体现在指标体系中五个要素,材料应用验证技术体系正是通过实践经验到理论建构,又由理论指导实践获取新的经验,不断反复迭代优化、螺旋上升,实现 $1+1>2$ 的体系整体特性,这也是综合集成法的最大优势。

3.1.4 多学科有机融合

航天器材料应用验证技术理论体系可分为三个层级,分别为基础层、工程层和应用层。基础层面主要是指导材料应用验证技术实施的基础科学理论,包括材料学、化学、物理、数学、信息学等;工程层面主要应用的科学理论有航天系统工程、产品可靠性、先进制造与工艺、环境工程学、真空技术等;而应用层面还需用到统计学、运筹学、规划技术等科学理论。多学科理论科学应用,高效统筹构成航天器材料应用验证技术内涵。

3.2 有效扩展深化航天器产品可靠性技术

可靠性试验多以“统计抽样”理论为主,属于统计类试验的一种。而不同于其他行业批产产品,航天器多以单星设计、单星发射为主,为满足整星功能、质量、尺寸需求,单机载荷等产品批产化水平较低,难以实现真正意义的基于统计抽样获得可靠性水平。对于小子样量、长寿命产品,经典的可靠性验证试验技术无法满足航天器单机产品可靠性需求。可靠性设计技术、工艺可靠性、可靠性制备技术、可靠性筛选和可靠性寿命试验等成为航天产品可靠性的重要支撑^[10]。而在可靠性设计、工艺可靠性以及制造可靠性环节中,其主要的理论来自于“失效物理”(即可靠性物理)^[11],它从化学、

物理等微观结构的角度出发,研究材料、构件和结构在工作条件、环境应力及时间对产品退化或故障的影响,从而获得产品故障机理,为产品可靠性设计、使用、维修以及材料、结构的改进提供依据。

航天器材料应用验证是产品可靠性试验及评价的有效扩展延伸。它通过将产品中所选用的一种或多种材料,开展材料级、构件级、组件级(产品级)逐级验证试验,利用材料多批次、多子样、小型样件、标准试验、多轮次试验等优势,获取并建立完备的数据集合,为可靠性设计提供必备的输入条件;同时也可解决单机及可靠性试验由于子样量不足而无法全面揭示或未及时发现问题隐患的弊端。

航天器材料应用验证是航天器产品可靠性技术的深化。它紧密围绕可靠性设计与指标需要,体系化地形成材料数据指标、环境应力、预计寿命等重要信息。相较于“失效物理”针对特定的材料或工艺失效模式开展的典型失效模式分析,材料应用验证更体现了整体性、全面性。其所获得的数据信息在产品可靠性设计与制造过程中,通过采取补偿措施,规避或消除由于材料和环境条件、工艺条件不协调而发生耗损或过应力等可靠性问题。

3.3 充分发挥应用验证技术的优势

通过应用验证,可确定材料生产质量控制水平和产品成熟度、材料性能指标相对于服役需求的适用程度、适应于地面工艺环境和在轨服役环境的可用程度,最终给出航天器型号可用度或型号可用性与否的结论,并以应用指南的形式明确材料特性及应用方法、材料质量控制方法和相应的防护措施。材料应用验证是提供数据和信息证据的质量控制过程,也是给将用于航天器型号任务的材料提供高水平质量保证的可行方式。

航天器材料应用验证可深度衔接我国材料基础技术与航天器装备发展,它通过以“用”为主的方式,正向提出材料需求指标,正向开展选用与评价工作,实现对国产化材料综合评估与筛选。材料应用验证既能满足型号研制对材料应用风险全面识别的诉求,也可规避传统材料装机应用考核循环试错周期长、成本高的局限性,可极大地提升国产化材料应用比例,缩减应用转化周期与成本,对推动我国材料产业发展,建立良性供应链体系奠定必备的技术基础,对促进我国航天自主创新发展具有深远的影响。

4 结语与展望

航天是国家战略性、基础性和先导性的高技术产业,是国家战略的重要体现,是国家发展目标的有力支撑。2013年,习近平总书记提出“发展航天事业,建设航天强国”,将航天作为“中国梦”的重要组成部分。航天技术作为高新技术的代表,是科技发展最为前沿和活跃的领域,覆盖了众多当

代科学和技术前沿的专业知识,其创新发展更能体现一个国家的科技实力^[9]。

在众多的科学技术领域,基础材料技术的发展与应用是提升我国航天装备发展水平、增强航天自主创新能力的专业原生动力之一,更是航天强国战略的重要支撑。然而,先进材料技术转化应用与装备产品质量提升需保持一致,协同发展。实施质量强国战略需要依靠先进的质量控制及管理方法,通过技术手段和管理方法创新,践行“零缺陷”质量管理理念。

航天器材料应用验证技术体系建设基于我国航天强国建设提出的“创新战略”和“质量战略”,理论研究与工程实践紧密结合,快速迭代完善后可形成一套技术体系完善、多学科融合的新型质量保证模式,构建新材料技术高质量高效益应用转化新模式。但是,航天器材料应用验证试验体系建设和理论方法研究仍处于起步阶段,仍需要通过大量国产化、先进材料应用对该体系进行不断的完善和补充,通过大数据服务能力建设、高通量快速试验技术方法、先进的综合环境试验平台等多项技术协同发展,提升材料应用验证技术水平,建立“快、准、好”的航天材料新型试验验证平台,打通研-用高效益衔接的壁垒,助力先进材料技术服务“航天强化发展战略”发展。

参考文献

- Gong M H, Zhang P, Xu G. Y, et al. *Aerospace China*, 2019(7), 35, (in Chinese) .
龚茂华, 张鹏, 徐广玉, 等. *中国航天*, 2019(7), 35.
- Kang R, Tu Q C. *Fundamentals of reliability & maintainability & support-ability engineering*, National Defense Industry Press, China, 2012, pp. 6 (in Chinese) .
康瑞, 屠庆慈. *可靠性维修性保障性工程基础*, 国防工业出版社, 2010, pp. 6.
- Qian X S. *Create systematics*, Shanghai Jiaotong University Press, China, 2007, pp.3(in Chinese) .
钱学森. *创建系统学*, 上海交通大学出版社, 2007, pp. 3.
- Shen X P, Ma S H. *Systems Engineering*, 2005, 23(10), 107(in Chinese) .
沈小平, 马士华. *系统工程*, 2005, 23(10), 107.
- Yu J Y. *Engineering Science*, 2001, 3(11), 10(in Chinese) .
于景元. *中国工程科学*, 2001, 3(11), 10.
- Jiang L D, Sun M. *Aerospace components application validation system engineering*, Harbin Institute of Technology Press, China, 2019, pp. 51(in Chinese) .
江理东, 孙明. *宇航元器件应用验证系统工程*, 哈尔滨工业大学出版, 2019, pp. 51.
- Yu J, Zhou S R, Yang L. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(4), 111(in Chinese) .
遇今, 周苏闰, 杨力. *航天器工程*, 2014, 23(4), 111.
- Pang Y, Huang J Y, Hu N et al. *An introduction to reliability*, Publishing House of Electronics Industry, China, 2015, pp. 52(in Chinese) .
潘勇, 黄进永, 胡宁, 等. *可靠性概论*, 电子工业出版社, 2015, pp. 52.
- Yuan J. *Red Flag Manuscript*, 2021, 12, 7(in Chinese) .
袁杰. *红旗文稿*, 2021, 12, 7.

(责任编辑 汪芸竹)



高鸿,研究员。2008年吉林大学化学学院博士毕业后,于日本东京工业大学高分子物理专业做访问学者。2010年就职中国空间技术研究院宇航物资保障事业部。目前主要从事航天器材料需求规划研究,材料空间复杂服役环境测试与评价技术,材料应用研制技术体系研究,以及宇航材料工程技术体系研究。已发表文章70余篇。