

# 航天器材料应用验证特点及其指标体系设计与优化

于利夫 高鸿 何端鹏 邢焰 李岩 刘泊天 樊彦艳

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

**文 摘** “材料应用验证”是为适应复杂工程研制任务而建立的一种材料多参数指标在特定服役需求下应用适用度评估的综合评价方法,也是通过一系列的试验、测试与表征手段获得材料各项性能数据、曲线、图谱,并通过综合分析确定材料应用可行性的分析方法。文章从航天器发展对高性能、多样化材料快速应用转化需求出发,阐释材料应用验证任务具有指标体系的综合性、通用性、短周期、低成本以及闭环式验证特点,进而提出了覆盖性、关重性、精准性、独立性、经济性的指标体系设计原则,以及材料应用验证的三层级五要素即材料批次稳定性、工艺适用性、环境适应性、服役安全性及组件健壮性指标体系设计及优化方法。

**关键词** 航天器材料,应用验证,指标体系,优化方法

中图分类号:TB302

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.001

## Application Verification Characteristics of Spacecraft Materials and Its Index System Design and Optimization

YU Lifu GAO Hong HE Duanpeng XING Yan LI Yan LIU Botian FAN Yanyan

(China Aerospace of Space Technology, Beijing 100094)

**Abstract** Material application verification is a comprehensive evaluation method, which is established to evaluate the application suitability of material multi-parameter indexes under the specific service requirements, for adapting to the complex engineering tasks. Various performance data, curves and maps of materials are obtained by a series of tests and characterization methods, and through comprehensive analysis, the feasibility of material application process are determined. Based on the requirements of high-performance materials, diversified materials and rapid application of materials for spacecraft development, this paper explains that the verification task of materials application is characterized by comprehensiveness, generality, short period, low cost and closed-loop verification of the index system. According to these characteristics, the index system design principles of coverage, criticality, accuracy, independence and economy are proposed, as well as the design and optimization methods of the three-level and five-factor index system of material application verification, including batch stability, process applicability, environmental adaptability, service safety and component robustness, are proposed.

**Key words** Spacecraft materials, Application verification, Index system, Optimization method

### 0 引言

随着航天领域大量国产化材料应用,传统的以产品为主的可靠性验证方法已经难以通过型号产品小样本量、短周期局限下,开展大量国产化高可靠性评估要求,即使采用加速寿命试验,也存在验证不充分、试验覆盖不全的风险。近几年发展起来的材料

应用验证技术,搭建了国产材料研制攻关向型号应用推进的“桥梁”,打通了国产基础产品从“生产下线”到“成熟应用”的“最后一公里”,是航天器材料技术和装备可靠性评估的重要补充。材料应用验证是以国产材料为研究对象,通过开展系列的试验、评估、测试以及综合评价工作,确定材料性能状态、工

收稿日期:2022-08-14

第一作者简介:于利夫,1977年出生,硕士,高级工程师,主要从事航天器基础材料及元器件应用验证技术研究工作。E-mail:y13621056226@163.com

通信作者:高鸿,1980年出生,博士,研究员,主要从事航天器用材料的规划、测试技术、质量及可靠性研究工作。E-mail:gaohong\_cast@sina.com

艺特性和服役风险,并提出必要的改进措施,实现材料应用技术的发展使航天器产品满足高可靠设计、制造和在轨安全要求。材料应用验证指标体系设计与优化是应用验证的关键环节,也是材料应用验证技术的核心;是保证验证试验科学合理、综合评价准确有效的前提条件;也为有效衔接好应用需求与验证试验、客观全面呈现材料状态和准确获得验证结论提供方法与依据。

当前,国内外在航天领域材料应用转化均存在转化周期长、成本高的壁垒。美国航空航天局(NASA)在“2040愿景:材料体系多尺度模拟仿真与集成路径”(“Vision 2040: a roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems”)中<sup>[1]</sup>,提出通过材料计算技术打破新材料在军工领域应用转化周期长、转化效率慢的壁垒。该项技术发展的基础就是完善的材料试验验证体系和测试技术,以及通过大量的数据分析而构建的材料多尺度仿真评价方法。在我国航天领域,元器件应用验证技术已成功展示了应用验证技术推动国产元器件快速应用转化的示范作用,而航天器材料的应用验证工作开展得较少。

本文研究我国航天器材料需求和应用特点,阐释材料验证任务特点,提出航天器材料应用验证指标体系设计与优化需遵从的五项原则,研究建立三层级五要素指标设计和优化方法。

## 1 材料需求与应用验证特点分析

材料技术的不断突破、制备工艺水平的不断提高及新技术新设计的不断更迭应用带动了空间探测技术快速发展<sup>[2-4]</sup>。为满足航天器从地面装配到在轨全部任务剖面高可靠服役需求,需要全面认识材料在给定应用环境和服役状态下的性能演变规律。航天器“材料应用验证”是通过一系列的试验、分析、评估和综合评价手段,用数据、图谱、曲线来量化、可视化地展示材料服役退化规律,以回答材料是否满足或适应航天器产品应用。所以,航天器材料需求的特点也将决定材料应用验证任务的特点。

### 1.1 材料需求特点

#### 1.1.1 满足空间探测技术发展对高性能材料需求

航天器真正能力的体现不仅是展示对地、对空、对天的观测、通信、感知、定位等多种复杂功能,更是展示了对各类材料的应用,使材料能够满足多种任务工作需求和复杂空间轨道适应能力。随着北斗导航、载人工程、深空探测等重大工程任务顺利实施,我国空间探测技术实现了飞越式发展<sup>[5]</sup>。电推进、激光、红外成像、大尺寸复合结构、空间大型网状天线、大口径相机等先进技术以高集成化、大功率、构型多

样化、多功能化的特点不断提升卫星在轨综合服务能力。空间高功率散热碳材料、轻量化复合材料、高收纳比柔性材料、增材制造材料等高性能材料逐步成为卫星选材应用重点<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.2 满足航天器不同型号、不同产品多样化需求

依据航天器空间探测任务和在轨运营需求不同,北斗导航、对地观测、深空探测和通信遥感等各类卫星具有不同的载荷体制、功率要求、轨道要求和寿命约束。而同一种航天器又由结构、热控、电源、姿轨控、测控、中心处理单元等各类不同功能的航天器分系统组成。基于各分系统功能需求不同,轻量化金属材料、高强合金、金属基复合材料、高分子材料、化工材料、无机材料、非金属复合材料、陶瓷材料及光学材料多种材料被广泛使用<sup>[7]</sup>。比如:油脂类材料可作为展开机构润滑剂、全氟烷烃化工品可作为热控工质、高纯氙气可作为推进剂工质、纤维纺织品可作为回收伞主材、光学玻璃可作为反射镜、镍箔可作为耐高温热控层等等。即便是同类材料,在不同产品中其应用需求也不尽相同,比如,聚酰亚胺薄膜既可作为柔性印制基板材料,又可用作热控多层基底材料,还可用作太阳翼基板绝缘层材料。综上,多样化的材料应用需求成为航天器验证指标体系构建的难点。

#### 1.1.3 满足型号发展的新材料快速应用转化需求

自“东方红一号”卫星发射成功以来,我国已经研制并发射了近300颗卫星。“十三五”期间我国完成北斗导航30星组网<sup>[8]</sup>;嫦娥二号到嫦娥五号研制,实现月球绕、落、回工程任务<sup>[9]</sup>;火星巡视器、探测器、着陆器三器同时研制与发射,一次实现环绕、着陆和巡视的探测任务<sup>[10]</sup>;其他军民商卫星也展示了快速研制与在轨服务实力。近十年,我国卫星年研制与发射总数以及任务难度均呈现激增的趋势,为适应卫星研制的质量和周期需求,新材料应用转化需从五到十年周期缩短到一年甚至数月。基础产品快速应用转化能力已然成为我国航天强国建设的前提条件。

### 1.2 材料应用验证任务特点

基于我国航天器任务对材料需求,为加快国产化材料从研制到应用的转化速率,同时满足高端装备在轨高可靠服役的刚性要求,材料应用验证作为复杂产品可靠性评价技术的重要补充,具备五个特点。

#### 1.2.1 匹配复杂工程任务的多指标验证

航天器是由部组件、分系统到系统构成的复杂功能性能的一类产品,部组件的性能不仅决定所在分系统,也决定相关分系统的设计需求;而各个分系统整体设计与优化,才能满足卫星产品的综合性能。例如,载荷单机的功率决定电源分系统供电需求,

也对热控分系统的热传导和热防护提出需求;而结构分系统设计又需要依据单机安装部位及尺寸精度、热控系统的热辐射要求乃至供配电系统太阳翼及电池设计等作为输入,才能明确卫星结构产品的尺寸、质量、构型及承载等设计要求。所以,应用于卫星的材料必然是多指标体系协同应用验证,以满足单机到整星的服役需求。

### 1.2.2 匹配各轨道服役需求的通用性验证

尽管服役于航天器各个分系统材料选用特点不尽相同,但是针对于不同地球轨道航天器,应用于同一分系统的材料型谱差异不大。如结构分系统,碳纤维材料、结构胶黏剂、聚酰亚胺薄膜及铝蜂窝是各类型号卫星结构平台的通用材料,通用性的航天器材料应用验证不仅需考虑一颗或一类卫星需求,更需要兼顾服务于低轨(LEO)、中轨道(MEO)、地球同步轨道(GEO)和倾斜同步轨道(IGSO)等各类轨道需求,以确保材料验证工作满足后续各类型号规模化应用,满足优化选材、缩减型谱及降低成本的材料体系建设需求。

而针对于特殊使用需求的材料,例如低轨道原子氧防护材料、载人密封舱体用密封类材料、载人舱降噪隔音材料及返回舱烧蚀耐热材料等,不具备多轨道、多型号通用性特征,材料应用验证需要充分考虑经济性、在轨服役周期性和可维修性等实际应用需求,也需要避免过试验、冗余试验造成对材料的不科学考核评估。

### 1.2.3 匹配型号研制进度的短周期验证

材料应用验证工作一般是在明确型号任务背景需求下开展的一项工作,其结论需要为型号产品设计和产品制造提供数据输入,以便项目组决策材料是否可用或通过优化设计可满足应用要求。材料验证任务须早于型号设计,或与设计并行开展、协同优化。当前,我国卫星产品从方案论证到初样设计周期仅为1年甚至更短,为能更好服务于产品设计与制造,3~5个月完成材料的试验验证工作是科学匹配型号任务的必要条件。所以应用验证指标体系设计需要在试验结论有效的前提下兼顾验证周期。

### 1.2.4 匹配型号低成本研制的集约型验证

我国航天器核心竞争力不仅体现在产品功能性能和在轨服务能力,也体现在低成本研制与发射,低成本已成为近年航天器在国际合作与竞争的重要因素。材料应用验证的优势之一是通过材料级或构件级开展的小子样、小型试验达到识别工程应用风险,提升设计可靠性的目标,进而可以缩减大型试验样品和大型试验量与试验周期,这与卫星型号低成本研制任务需求相匹配。材料应用验证指标体系设

计需要针对试验样品可复用、试验数据可继承、试验结论可覆盖等多种要素进行统筹设计,以满足低成本验证需求。

### 1.2.5 匹配型号应用目标的闭环式验证

航天器材料应用验证目标是以“用”为主,特别是近年我国国产材料替代应用需求迫切,利用材料应用验证工作所发挥的积极作用,衔接好我国国产材料基础工业发展与高端装备建设,是我国航天装备自主创新发展的源动力。所以,航天器材料应用验证工作不仅是通过试验开展应用可行性评估,也需要针对所识别的材料质量或应用风险提出材料配方优化、加工工艺优化、型号设计优化等建议,必要时需要通过指标体系二次优化再次进行验证评估。

## 2 材料应用验证指标体系设计原则

基于上述航天器材料需求特点及其所带来的材料应用验证特点,航天器材料应用验证指标体系设计需依从五个原则。

### (1) 应用需求覆盖性

航天器材料所有被验证的指标应全面覆盖预定背景下的应用需求。包括单机、部组件乃至分系统所有要实现的功能性能对材料需求,地面加工装配工艺、地面储存运输环境、发射与在轨服役环境对材料需求,以及其他涉及人体功效、环境污染等安全保障需求。

### (2) 验证指标关重性

尽管材料具有多参数指标特点,但针对特定的部组件产品的应用需求需突出材料关键重要性能。一般包括:关键质量特性,也就是通过某个指标可直接或间接反映材料质量控制水平的特性;重要功能特性,即直接反应材料被需求的应用指标;工艺特性,如符合加工、制造、装配及成型等工艺条件;工作工况下稳定性,如复杂的空间辐射、真空及温度环境下关键性能指标稳定性。

### (3) 验证参数精准性

能够精确表达材料性能的应用验证指标参数,且是与实际使用需求关联度高的性能参数。比如,关于机械承载能力评价项目中,结构胶黏剂突出剪切性能,复合材料突出弯曲和层间剪切性能。

### (4) 验证项目独立性

应用验证试验项目是通过验证的技术指标设计而确立的,所以进行技术指标设计时应兼顾对应的实验项目独立性。过度的指标体系不仅增加验证任务工作量,而且会给后续综合评价带来困难。

### (5) 验证试验经济性

验证指标体系设计关系到后续验证样品需求、试验项目需求和试验周期需求,需结合材料固有特

性,科学合理设计验证试验,既要达到工程应用需求的验证目标,也要满足验证试验低成本要求。

### 3 材料应用验证指标体系设计与优化方法

#### 3.1 材料应用验证指标设计主要依据

从航天器产品研制到在轨服务,材料将经历工艺加工、试验、储存、运输、发射到在轨运行各种环境工况,评估材料及其所装配的产品关键性能指标稳定性及环境适应能力是航天器材料应用验证的目的。围绕这个目的,所构建的指标体系设计依据主要由三个部分构成。

##### 3.1.1 材料关键应用性能指标是材料应用验证指标设计的核心

航天器工程是在地球大气层以外的宇宙空间执行探测任务的一类复杂系统工程。在其制造过程中,所有部组件、单机产品甚至零部件的功能性能、约束条件和接口条件等指标均是从卫星系统建造指标逐级分解而形成的。而组成单机、部组件产品的材料,其性能指标直接来自于产品功能对材料提出的需求,例如材料承载性能、密封性能、导电/绝缘性能、导热/绝热性能、电磁特性及光学特性等等。此外,航天器系统工程特点,使得同一分系统内其他产品也将对该产品所用材料提出性能指标需求,而这类指标多以热适配、相容性、多余物及污染行为为主。受限于航天器一次在轨发射且在轨不可维修性的特点,所有应用于航天器材料关键功能必须满足其质量一致、批次稳定,进而才能确保通过应用验证的材料满足后续航天器研制应用的高质量供应要求。

##### 3.1.2 空间环境适应性是材料应用验证指标设计的重点

空间射线辐射、高低温和高真空环境、原子氧侵蚀环境、深空极端低温和强电磁场环境等构成航天器产品特殊且复杂的服役条件。所有用于航天器材料均须依据其服役轨道特点,有无防护措施等实际的应用条件,考核所用材料或其组成的零部件产品耐受特殊空间服役环境的能力。空间环境适应性指标是所有应用于航天器产品应用验证的重要部分。

##### 3.1.3 地面加工、储存、运输条件适应性是材料应用验证指标的重要组成

航天器材料性能与在轨服役适应性的好坏不仅与材料本身有关,也受产品加工工艺条件约束及地面储存运输环境影响。在加工工艺适用性方面,金属材料焊接、热处理、机械加工、表面涂镀等工艺;复合材料成型、热固化工艺;非金属材料注塑及消应力处理工艺;橡胶硫化工艺;胶黏剂固化工艺等均受制备工艺影响而带来材料应用特性改变,使得实际使

用的材料状态存在二次加工特性。地面储存和运输条件,特别是海南沿海发射场的储存与运输条件,造成的材料吸湿及盐雾腐蚀敏感问题也将影响材料最终服役性能。

#### 3.2 材料应用验证指标三层级五要素设计

通过航天器材料应用特点和指标设计依据分析,材料应用验证一级指标凝练为材料批次稳定性、工艺适用性、环境适应性、服役安全性、组件健壮性五个要素(图1)。首先识别材料关键性能的批次稳定性,确定材料性能基线;再通过典型样件、缩比件或模拟件的加工工艺评估工艺适用性,必要时可通过优化工艺参数获得最优的工艺条件,发挥材料最佳性能;环境适应性是对原材料或经过工艺加工的材料构件产品开展地面储存、发射、在轨等各类环境下材料性能退化规律、失效模式或机理的验证;服役安全性针对人体功效学、精密仪器设备等需特殊防护的应用需求,开展应用安全性评估;当部分单机、部组件产品存在材料级性能无法验证的功能指标,需通过组件级试验对材料影响的关键指标进行验证,同时佐证材料验证试验结果的符合性,必要时评估设计或工艺更改方案的可行性。

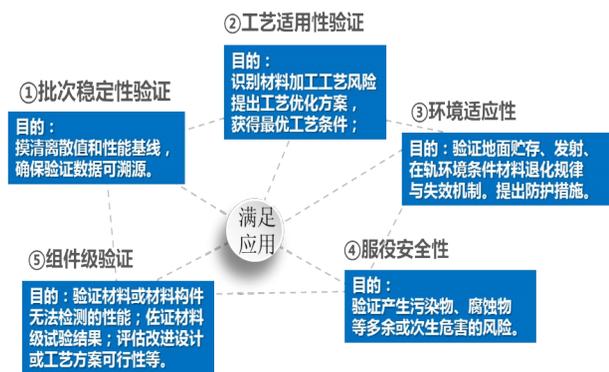


图1 航天器材料五要素应用验证目的

Fig. 1 Purposes of application verification of five elements for spacecraft materials

应用验证五要素作为一级指标体系以确保满足应用验证需求全覆盖的原则,在一级指标体系下,对二级指标进行分解,从性能关重性原则和精准性原则出发形成二级应用验证指标体系。二级应用验证指标体系明确验证关键性能指标范围,关键考核工艺,关键服役环境,与材料有关的关键组件性能验证,进而精准地确定指标参数;三级指标体系在二级指标体系基础上,通过经济性原则和独立性原则,进行二级指标细化,进一步形成标准化或通用化的试验指标体系,确立每一个验证要素验证指标重点,以及可支撑验证结论分析的技术指标(图2)。

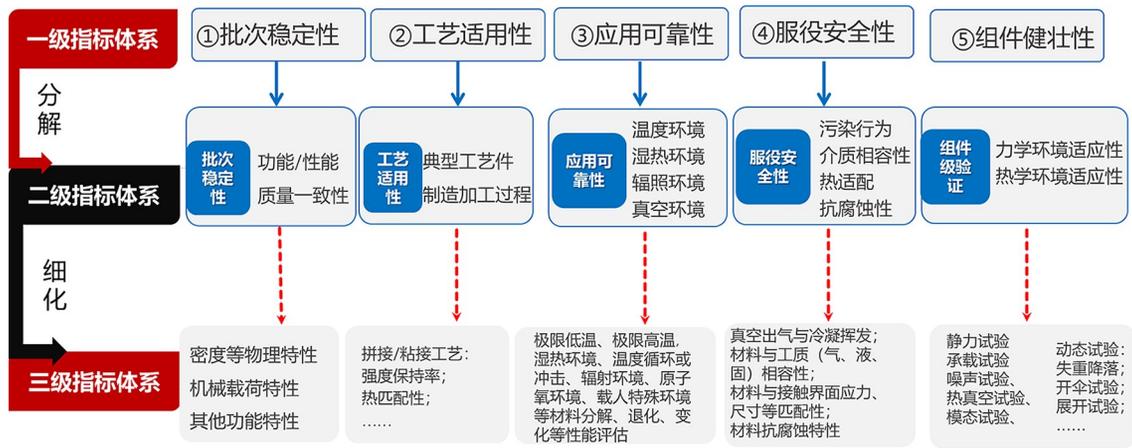


图2 航天器材料应用验证三级指标体系结构图

Fig. 2 Diagram of three-level index system for spacecraft material application verification

### 3.3 材料应用验证指标体系优化

航天器材料应用验证指标体系优化主要针对所设计的指标初始值从补充完善、冗余删减、优化调整三个

步骤实施指标体系, 依从指标体系优化原则进行优化(图3)。

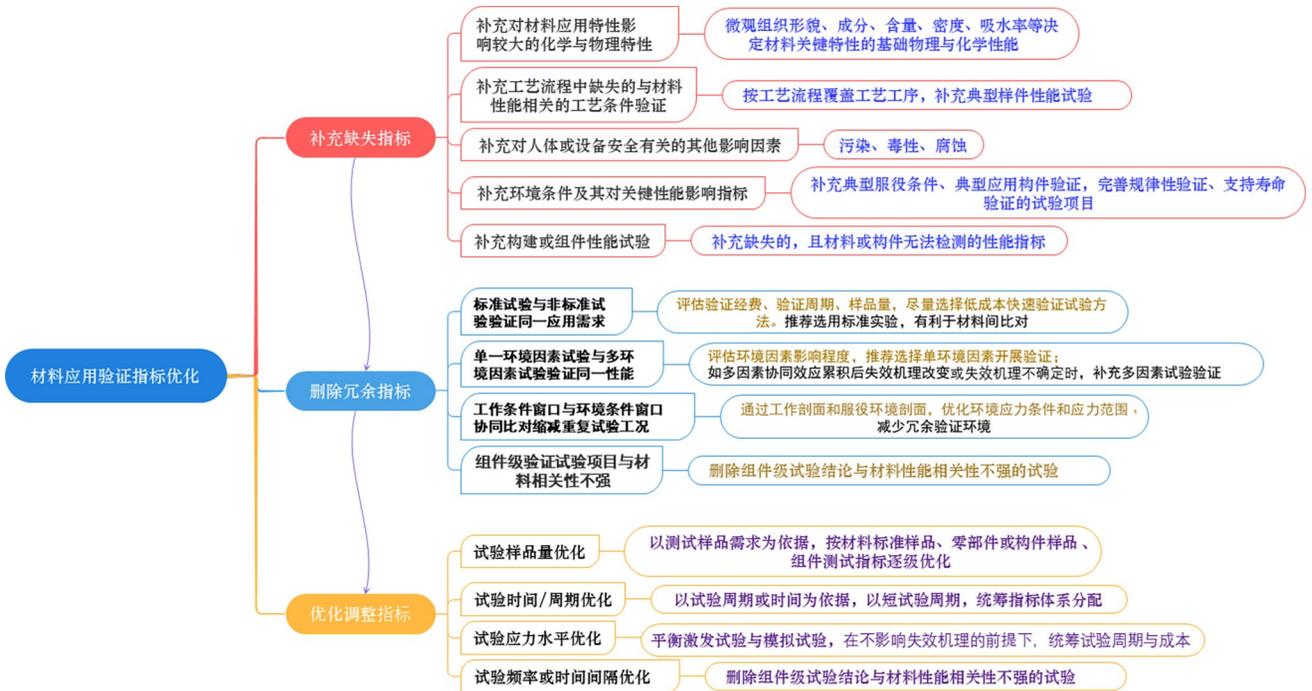


图3 材料应用验证指标体系优化过程与重点

Fig. 3 Optimization process and key points of materials application verification index system

**指标体系初始值设置。**一般,按照上述“三层级五要素”指标体系设计方法,航天器材料应用验证指标初始值设定主要来自材料研制生产中确立的基本性能指标、产品设计及应用提出的材料功能指标、生产加工过程工艺特性指标以及应用环境适用性指标。此外,结合材料应用场景,组件或单机产品实际性能需求,初始值也应涵盖与安全性、组件产品健壮性有关的性能指标。

**指标体系补充完善。**在已设置的指标体系基础上,开展材料应用验证指标补充与完善。一方面,可利用头脑风暴法组织材料专家、工艺师、产品设计师及测试专业技术人员针对初始设置指标体系对五要

素分别提出补充建议;另一方面,采用失效物理方法,从材料失效模型或退化模式等失效信息,建立寿命与应力关系,补充完善材料应用验证指标。另外,还可借鉴同类或同种材料历史使用质量案例或失效案例,以及与之有关的型号常见质量问题,达到质量风险和应用风险验证的目的。

**指标体系冗余删减。**三层级五要素指标体系中,针对每个要素或要素间存在的同一验证目标,而开展的不同受验样品或不同试验项目,可采用因子分析方法或冗余分析法<sup>[11]</sup>,对冗余指标进行删减。须依据验证指标精准性和验证项目独立性原则,综合权衡标准

试验项目和非标准试验项目,单一环境模拟试验项目与多环境模拟试验项目,对产品工作工况试验项目与服役工况试验项目间存在叠加或关联的指标体系,按照经济性原则和关重性原则对冗余指标进行删减。

**指标体系优化调整。**指标体系优化调整根据试验样本量、试验时间、测试频率或时间间隔、试验应力水平或试验费用等综合分析,在不影响验证准确性和真实性前提下,尽量以样本量最小、试验时间或周期最优及试验成本最低为原则进行指标优化。重点协调好工程类试验(即暴露材料缺陷类的试验)与统计类试验(即表达可靠性或寿命趋势类的试验)统筹优化;协调好模拟实验(即模拟产品真实使用条件的试验)与激发类试验(即设计更为严酷的应力以激发潜在失效模式的试验)择优。

航天器材料应用验证指标体系设计与优化过程既是航天器产品故障树的分解过程,也是航天器产品可靠性设计分析过程,指标体系设计过程中应秉承覆盖性、精准性、关重性、独立性和经济性五个原则,以确保该项工作满足型号匹配产品研制对材料技术的综合要求。

#### 4 结语

航天器材料应用验证技术指标体系设计与优化,将与材料应用验证需求分析方法、材料应用验证试验技术和材料应用验证综合评价技术共同构成航天器材料应用验证技术体系,是航天器研制领域选材、用材的关键技术,将为我国航天器基于国产材料自主发展的质量保障提供理论基础。本文以材料为核心,从材料到零部件,延伸至产品,基于应用需求和潜在产品失效物理行为开展材料应用验证指标体系设计,从系统工程角度提出指标体系设计原则、构建内容及优化方法。当前,我国航天器材料应用验证技术处于起步阶段,建立健全配套方法理论,研究构建验证技术方法体系,是扎实做好应用验证实施、推动工程材料领域科学发展的前提。通过航天器材料应用验证技术指标体系设计与优化,能够为科学准确开展国产化材料应用验证试验实施提供准确的依据,为国产材料在航天器应用开展准确的综合评价提供前提条件,为发现或者识别国产材料在特定应用背景下存在缺陷或者质量隐患、应用风险提供理论方法。该技术将提升国产材料应用水平,提升航天器产品设计、制造水平,提高航天器产品可靠性保障的能力,为稳步推进我国国产材料在航天装备领域应用转化效率起到积极的促进作用。

#### 参考文献

[1] IU X, DAVID F, JARED K, et al. Vision 2040: A

roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems: NASA/CR 219771[R], 2018.

[2] 雷智博,曹建光,董丽宁,等. 航天器热管理高导热材料应用研究[J]. 中国材料进展, 2018, 379(12): 1039-1046.

LEI ZB, CAO J G, DONG L N, et al. Study on application of high thermal conductivity materials in aerospace thermal management [J]. Materials China, 2018, 379(12): 1039-1046.

[3] 石文静,高峰,柴洪友,等. 复合材料在航天器结构中的应用与展望[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(4): 1-6.

SHI W J, GAO F, CHAI H Y, et al. Application and expectation of composite in spacecraft structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(4): 1-6.

[4] 范含林. 航天器热控材料的应用和发展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 7-10.

FAN H L. Spacecraft thermal control material [J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(6): 7-10.

[5] 李明. 我国航天器发展对材料技术需求的思考[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 1-5.

LI M. Review on requirement of materials technology for development of chinese spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(2): 1-5.

[6] 周亦人,沈自才,齐振一,等. 中国航天科技发展对高性能材料的需求[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 41-50.

ZHOU Y R, SHEN Z C, QI Z Y, et al. Demand for high performance materials in development of China's aerospace science and technology [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 41-50.

[7] 高鸿,沈自才,何端鹏,等. 我国未来探月工程任务对材料需求展望[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5): 15-25.

GAO H, SHEN Z C, HE D P, et al. Prospect of material demand for future lunar exploration project in China [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5): 15-25.

[8] 智东西. 北斗三号组网完成[J]. 物联网技术, 2020, 10(8): 3.

ZHI D X. BeiDou-3 networking completed [J]. Internet of Things Technologies, 2020, 10(8): 3.

[9] 庞之浩. 中国嫦娥探月工程之路回眸[J]. 科学, 2021, 73(4): 12-16.

PANG Z H. Review on the road of China's Chang'e lunar exploration project [J]. Science, 2021, 73(4): 12-16.

[10] 刘国强,孙泽州,饶伟,等. 天问一号火星探测器产品保证工作实践[J]. 航天器工程, 2022, 31(1): 125-132.

LIU G Q, SUN Z Z, RAO W, et al. Practice of product assurance for Tianwen-1 Mars Probe [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(1): 125-132.

[11] 江理东,孙明. 宇航元器件应用验证系统工程[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2019: 061-067.

JIANG L D, SUN M. The systems engineering of the application verification for space components [M]. Harbin Institute of Technology Press, 2019: 061-067.