

航天器材料应用验证信息提取与研判方法

刘泊天¹ 高 鸿¹ 李 岩¹ 于利夫¹ 王志强²

(1 中国空间技术研究院, 北京 100094)

(2 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

文 摘 当前航天器材料应用验证工作中必须解决的问题主要集中反映在验证需求的合理性、驱动性, 验证对象的信息准确性、功能覆盖性以及验证结果判读决策性和可复用性。为了更好地解决这些问题, 本文利用德尔菲调查、头脑风暴、文本挖掘、环境扫描、情景规划、回溯预测、趋势外推、多准则决策等科学研究方法, 设计了验证对象研判、需求&技术研判、难度&风险研判、验证路径研判、数据&结果研判等模型, 建立了系统性、原则性的信息提取与研判的要求和流程。通过材料应用验证信息提取与研判方法的制定, 可有效保障验证实施精准性, 提升验证工作质量。

关键词 航天器, 材料, 应用验证, 研判

中图分类号: V45

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.002

Extraction and Research-judgment Methods of Spacecraft Material Application Verification Information

LIU Botian¹ GAO Hong¹ LI Yan¹ YU Lifu¹ WANG Zhiqiang²

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094)

Abstract At present, the problems encounter in the spacecraft material application verification work are mainly reflected in the rationality, the actuation, the information accuracy, functional coverage of the verification object, as well as the decisiveness and reusability of the interpretation of the verification results. In order to solve these problems, the verification object research-judgment, demand & technology research-judgment, difficulties & risks research-judgment, verification route research-judgment, datum & results research-judgment and other models are designed via scientific research methods such as the Delphi method, brain storming method, text mining method, environment scanning method, scenario planning method, backcasting method, trend extrapolation method and multiple criteria decision making method. The systematic and principled requirements and workflow of information-extraction and research-judgment are established in this paper. Throughout the formulation of the information-extraction and research-judgment methods for material application verification, the accuracy of the implement of application verification is ensured, and the quality of verification work is improved.

Key words Spacecraft, Material, Application verification, Research-judgment application verification

0 引言

航天器产品在装机发射前均需通过地面试验以确保产品在轨运行的安全性和稳定性。材料应用验证是其中的一种重要评估模式, 其内涵是基于航天器应用需求和工况环境, 通过试验等方式对材料在应用场景下的可用性/适用性进行确认、分析和评价, 包括批次稳定性验证、工艺适用性验证、环境适应性验证、服役安全性验证和组件健壮性验证^[1]。通过应用验证可以评

价材料的质量一致性和稳定性、检验材料是否满足航天应用需求, 同时可以指导用户合理使用、提升厂家生产过程质量控制能力, 确保航天产品的环境适应性以及供应链稳定性^[2]。当前航天器材料应用验证工作中的问题主要集中反映在验证需求的合理性、驱动性, 验证对象的信息准确性、功能覆盖性, 以及验证结果判读决策性和可复用性方面。目前解决上述问题的主要手

收稿日期: 2022-08-31

第一作者简介: 刘泊天, 1986年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天材料保证与应用验证工作。E-mail: btlou06@sohu.com

通信作者: 高鸿, 1980年出生, 博士, 研究员, 主要从事航天材料开发应用与可靠性评价工作。E-mail: gaohong_cast@sina.com

段是依靠尽可能全面的调研和严格且繁复的筛选、审查、评议,消耗大量人力、物力的同时却并不能确保过程质量受控和问题的有效解决。

航天器材料应用验证工作是以“应用”为目标,包括(但不限于)准备阶段、需求分析阶段、方案设计阶段、验证实施阶段、综合评价阶段、成果推广应用阶段等。从材料应用需求的必要性和可行性论证、生产能力和验证能力评估,到指标体系构建,再到验证试验结果分析,直到最终的验证结论综合评价,均离不开对于需求、指标、评价、数据、结果、应用等过程信息的“研判”。研判的内涵在于经过必要的调研分析过程后的研究和判断,是作出决策的重要依据。通过研判工作可以解决当前航天器材料应用验证工作中较为棘手的验证需求合理性、驱动性问题,验证对象信息准确性、功能覆盖性问题,以及验证结果判读决策性和可复用性问题。

对于材料而言,从不同角度出发,可以有成分、结构、功能、用途等很多种分类方式;而针对不同的分类方式,可以从生产要素、加工方式、性能指标、应用场景

多个关注点正向获取应用验证需求信息。另外,从一种材料在特定应用背景下的性能特性薄弱环节、质量隐患、失效模式、应用风险等逆向分析,也将提取诸多验证需求信息。这些信息数量庞大、内容错综复杂,是材料应用验证实施必不可少的输入,信息挖掘与提取越充分全面,则验证需求的提炼也就越准确,验证指标设计和项目矩阵构建层次越清晰,内容越合理。

综上所述,研判工作是材料应用验证工程各阶段均涉及的重要环节,信息提取与研判方法的制定尤为重要。研究表明信息计量学等科学研究方法是实现信息提取、预判、预见的有效途径^[3-4],目前针对宇航元器件应用验证领域已形成一套与科学计量学相结合的研究方法^[2],但其重点是服务于指标权重和综合评价。因此,本文旨在利用科学研究方法建立系统性、原则性的研判要求和研判流程,覆盖从需求调研分析到综合评价结果判读的航天器材料应用验证全过程,拟提升材料应用验证精准性质量控制水平。

1 研判工作的阶段划分与方法确立



图1 航天材料应用验证综合研判流程

Fig. 1 Comprehensive research-judgment process of space material application verification

根据航天器材料应用验证工程的目标和特点,应用验证工作横跨应用需求调研、生产制备一直到试验实施和综合评价的全过程,以实现上装应用为最终目标,基于此,在本研究中将应用验证研判工作划分为预见阶段、生成阶段、设计阶段和行动阶段。其中,预见阶段对应的是应用验证工作中的准备阶段和需求分析阶段,结合了用户需求调研和厂家生产能力摸底;生成阶段和设计阶段对应的是应用验证工作中的方案设计阶段,分别结合了应用场景分析、难点与风险分析,以及指标和项目设计;行动阶段对应的是应用验证工作中的验证实施阶段、综合评价阶段和成果推广应用阶段,结合了试验数据分析、结果综合评价、成果复用和应用推广。

针对上述各研判阶段,分别提出了不同的科学研究方法^[2-7]:针对用户和生产单位等业内专业人士的德尔菲问卷调查法;针对专家审议的头脑风暴法;针对历史数据、调研信息提取和分析的文本挖掘法和环境扫描法;针对未来潜在应用前景设计的情景规划法;针对预期愿景实现途径设计的回溯预测法;针对环境适应性验证环境试验数据分析的趋势外推法;针对验证结果评估最优选用方式的多准则决策法。

如图1所示,通过建立需求&技术研判、验证对象研判、难度&风险研判、验证路径研判、数据&结果研判、推广&复用性研判等制度,结合研判模型研究,以提升验证质量、规避验证风险、优化验证流程,强化验证结果的准确性和复用性。在此基础上,进一步展开研判策略方法和机制研究。

2 预见阶段的需求&技术研判

2.1 面向用户的验证需求背景调查与必要性研判

2.1.1 德尔菲调查法

以航天材料应用验证需求为主题、以获取验证对象信息为目的,设计航天材料应用验证需求调查问卷,面向航天器各分系统、各单机的设计师和工艺师,从中遴选并确认调查人员(作为用户单位代表),针对航天器用材料应用验证意向进行全面调研,包括材料类别、材料名称、牌号、规格、状态、执行标准、生产单位、功能指标要求、关键性程度、应用(部)组件和单机、分系统、拟用航天器产品信息等。将调研信息回收汇总后,进行统型(针对牌号规格和标准进行同类项合并)、初筛(针对对象符合性删除不属于材料范畴的对象)和去重(针对各有效性信息进行重复项删减)的初级研判工作,并再次反馈被调查人员进行重新确认和补充。通过多轮调查和研判的迭代,促使用户方意见达成一致,并保证特定材料在宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023年 第2期

天特定应用背景下验证需求覆盖性。

2.1.2 头脑风暴法结合情景规划法

以应用验证需求的必要性为主题,结合历史沿革与当前局势,通过头脑风暴、会议集同构想潜在应用和需求模式,分析材料技术发展和市场趋势,识别材料应用影响因素、潜在风险和驱动因素,讨论材料关键程度、应用可行性、需求迫切性、应用正确性等,开展应用与验证必要性研判,形成决策并生成航天材料应用验证需求。

2.2 面向生产单位的验证对象身份识别与生产可行性研判

2.2.1 环境扫描法结合德尔菲调查法

以验证对象材料生产要素为主题、以完善验证对象信息为目的,设计航天材料应用验证对象生产要素调查问卷,以表格清单的形式,面向材料研究机构和生产企业(作为生产单位代表),针对航天器用材料的人、机、料、法、环、测等相关生产要素进行全面调研,包括材料基本情况、生产用物料质量、厂家(特指材料生产检验中的原料、辅料、耗材生产厂)供货情况、生产工艺过程、生产工艺设备、生产人员、生产环境、生产过程质量控制情况和管理流程等。将调研信息回收后,须通过多轮补充确认以保证航天材料应用验证对象信息的全面性和准确性。在此基础上开展验证对象材料信息的挖掘提取,并扩展为同类材料的德尔菲调查,获取材料研制基础、技术成熟度、技术水平、功能指标、应用场景与应用目标等“身份识别”信息,完成产品技术摸底。根据全流程国产化率的具体要求筛除不符合项,生成航天材料应用验证需求及研制进展情况。

2.2.2 头脑风暴法

以会议形式组织航天领域、材料和工艺领域专家以及应用验证实施单位人员针对生产单位调查问卷回收信息,以材料生产要素评估为主题进行书面或现场评估,识别风险并提出改进建议。在此基础上,专家组结合应用需求和关键程度,集同审查拟验证对象的生产要素相关信息,探讨材料技术发展路线与航天应用领域需求相符性,分析材料技术成熟度、工艺稳定性、功能指标先进性、样品可获得性、供应安全性,展开生产质量稳定性研判,完成生产技术摸底,形成决策并生成航天材料应用验证需求及研制进展情况。

3 生成阶段的难度&风险研判

3.1 基于文本挖掘法的材料信息聚类分析与潜在风险研判

利用文本挖掘法对国产材料的设计配方、工艺

过程、生产线、性能指标等基础信息进行提取：

(1)根据材料研制生产过程特点,充分分析材料生产工艺过程、构件加工工艺过程、组件装配工艺过程及其中影响材料性能和组件功能的关键技术点；

(2)总结目前已突破的关键技术,提炼亟待攻关的技术难点,特别是通过与国际领先产品技术的差异性分析,识别应重点验证的材料性能以及受此影响的工艺性能和环境适应性等。

全面挖掘分析材料过程控制、使用工艺环节、功能和性能、可靠性和安全性等服役任务/寿命剖面各类影响材料应用的因素,提炼材料生产工艺过程要素、构件加工工艺过程要素、组件装配工艺过程要素,研究材料应用模式、失效模式、潜在质量问题,对各要素开展聚类分析,综合研判材料构件及(部)组件潜在的失效隐患和故障风险。如图2所示,基于材料复杂度研判潜在风险。

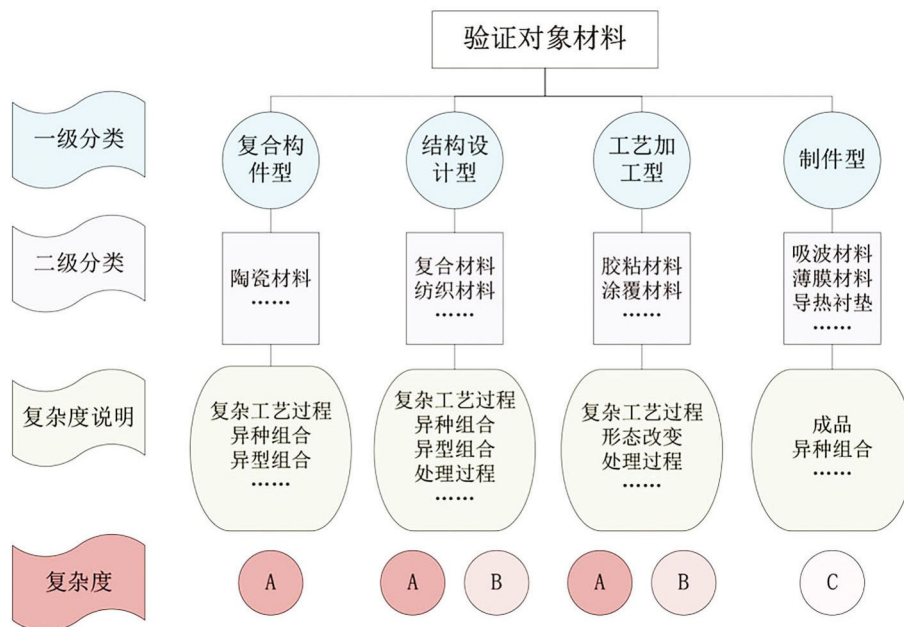


图2 复杂度研判模型

Fig. 2 Research-judgment model of complexity

3.2 基于情景规划法的应用背景归集与应用场景研判

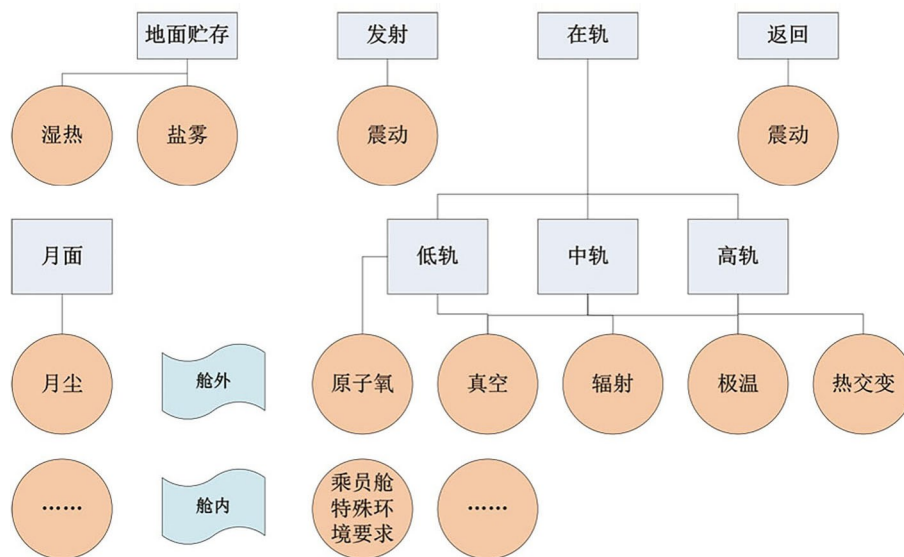


图3 应用场景研判模型

Fig. 3 Research-judgment model of application scenarios

开展应用背景及其影响因素的梳理、整合和归集:以在研在制的航天器应用为背景,兼顾潜在的航

天工程应用作为上装应用需求,从材料基础产品对型号关键程度出发,总结材料部组件级上装应用要

求;从航天器任务特点和潜在应用需求出发,充分提炼航天器分系统单机对组件的功能需求、组件对材料的使用需求,特别是直接关系到组件功能实现性的材料性能、影响组件工作甚至导致产品故障的关键指标;充分识别材料应用的工艺工况条件,结合部组件在地面及在轨服役工况,综合考虑航天器在轨环境最恶劣、最长寿命服役要求,充分分析产品在轨工作界面和环境界面(图3)。综上,通过情景规划法完成应用场景归集和研判。

3.3 基于文本挖掘法结合环境扫描法的验证难度&风险研判

通过文本挖掘法结合环境扫描法,对拟验证材料对象开展多维信息提取,聚类整合成身份识别信息、材料复杂度信息、应用环境信息,如图4所示,则对于材料的研制基础(成熟度)、当前验证需求、验证难度和使用难度(应用风险)等的分布情况可以一目了然,分析识别材料加工、验证、应用中质量问题可靠性的“验证难度&风险”,获得对于航天器用材料应

用验证工作开展更科学宏观的认知和预判。

基于对材料验证工作背景和门槛的客观分析,梳理出几种紧迫度、需求度、难度、风险等偏高的典型类型,接下来须有针对性地开展国产材料验证指标和项目设计的研判工作。

(1)针对X1Y1/2类材料:是应用验证重点对象。以下列举皆在此类别中。

(2)针对X1/2Y1/2类材料:新研材料具有较高的批次内和批次间质量一致性风险。重点开展批次稳定性验证指标和试验项目设计,考虑增加平行试样数、批次数量。

(3)针对A和B类材料:材料成型复杂度较高。重点开展工艺适用性验证指标和试验项目设计,考虑覆盖所有可能的工艺条件的适用性、所有可能的装配界面的相容性。

(4)针对W1和W2类材料:应用环境苛刻。重点开展环境适应性验证指标和试验项目设计,考虑覆盖所有可能任务/潜在应用的工作界面和环境界面。

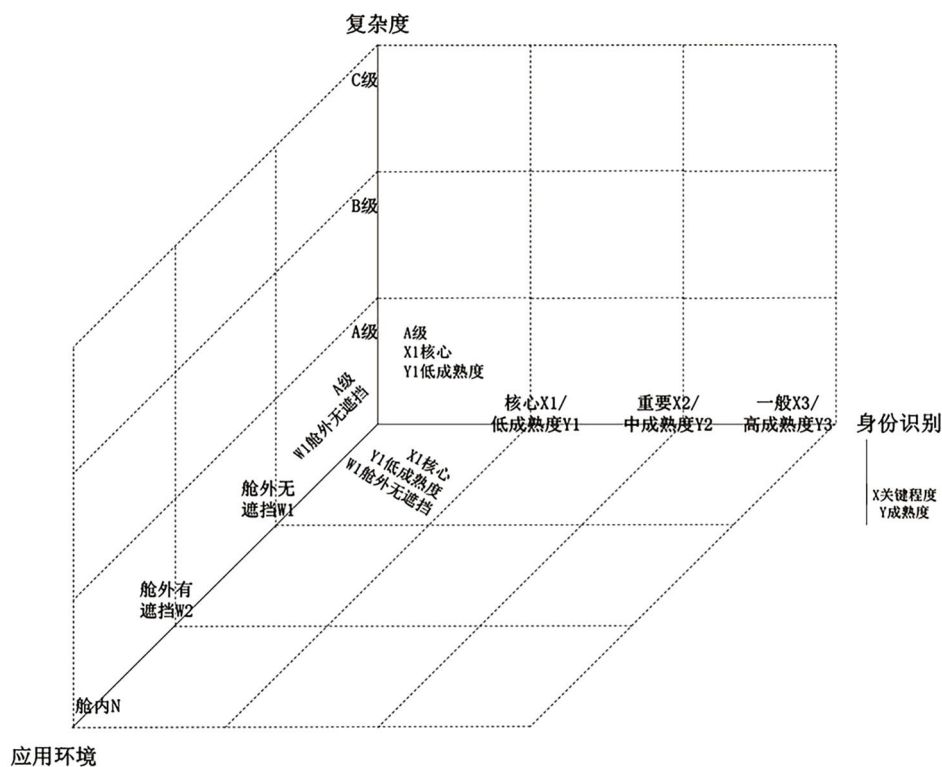


图4 难度&风险研判模型

Fig. 4 Research-judgment model of difficulties & risks

4 设计阶段的验证路径研判

4.1 基于文本挖掘法结合环境扫描法的应用环境效应耦合分析

在3.2应用场景研判的基础上,利用文本挖掘法结合环境扫描法:充分挖掘各研判阶段收集的数据,分别从不同维度提取、整合材料信息与应用信息,并宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023年 第2期

进行归集和聚类分析;按照地面储存、发射和在轨各阶段,以及轨道高度、材料所处位置(舱内或舱外)等归纳服役环境特点,分别针对材料、材料构件和(部)组件开展环境效应分析,如地面湿热环境、发射入轨的振动环境、在轨运行的真空环境、极限温度环境、交变温度环境、辐射环境等;结合(部)组件使用工

况,识别环境因素可能引发的材料构件性能及(部)组件功能退化效应;识别材料或构件可能带来的真空出气污染、多余物等次生安全问题。综上,完成环境效应耦合分析。

4.2 基于回溯预测法的指标项目方法研判

以实现航天应用场景验证为目标,采用回溯预测法,建立应用场景—环境效应—材料类型—失效模式—关键控制指标之间的共现关系网络,以产品最终状态为导向设计验证指标;根据应用验证指标体系,基于验证项目的覆盖性和代表性,在避免冗余重复的原则下,通过生产要素关键控制点识别、功能性能关键需求分析、应用适应性关键界面提炼,双向识别组件验证试验中无法暴露的材料问题以及材料构件验证试验中无法验证的组件应用健壮性问题,以最大包络原则设计验证试验内容(包括试验项目、方法和条件等)。综上,完成验证指标项目方法研判。

5 行动阶段的综合分析研判

5.1 基于趋势外推法的试验数据分析研判

航天器在地面储存、发射、在轨运行、返回的全寿命周期内将经历严苛的环境,为了验证材料的环境耐受性,须在地面进行环境模拟试验。然而,地面模拟试验并不能100%反映真实环境状态,特别是有时即便是加速模拟试验依然无法测定材料某项性能的边界阈值。因此在环境适应性验证试验完成后,须针对试验数据进行分析,在数据趋势连续的前提下,可利用趋势外推法通过数学模型(函数曲线)拟合延伸轨迹,推测研判材料应用边界,为材料的未来应用场景规划提供支撑。

5.2 基于多准则决策法的验证结果分析研判

航天材料性能指标之间既存在相互联系,又存在相互制约;特别是多家生产单位之间的同种材料比对时,不同验证项目中其相互间的优劣关系几乎不可能完全一致。因此,针对航天材料应用验证的批次稳定性、工艺适用性、环境适应性、服役安全性、组件健壮性等验证结果,须交叉进行多属性决策(MADM)和多目标决策(MODM),采用简单加权法和法(SAW)对每一个验证项目主观赋权,或利用层次分析法(AHP)构建判断矩阵并计算得到总排序权重,形成评价体系,再对不同生产单位同种材料的某一项验证的结果进行优劣排序,对同一生产单位某项材料的各项验证结果的应用满足程度进行优化组合,从而获取航天器某一应用环境下某组件产品材料选用的最优方案,包括材料牌号规格、生产单位、

使用状态、应用条件等。

5.3 基于情景规划法和回溯预测法的应用推广分析研判

面向材料目标应用场景,利用构建级差分布图等方式评估材料应用风险等级、质量薄弱环节及其影响力,结合材料复杂度、应用环境复杂度等多层面研究并提出国产材料应用风险控制要求。通过情景规划和回溯预测的方法,从规模化应用的前景、情境和适用性的角度,开展材料应用推广和验证技术体系复用性的研判,指导后续工程应用和验证工作。

6 结语

根据航天器材料应用验证工程目标及工程各阶段工作特点,将应用验证研判工作划分为预见阶段、生成阶段、设计阶段和行动阶段。结合科学研究方法提出了针对研判四阶段的信息提取与研判方法,确立了系统性、原则性的研判要求和研判流程,设计了研判制度和模型,可覆盖用户需求调研和厂家生产能力摸底,应用场景、难点与风险分析,指标和项目设计,以及试验数据分析、结果综合评价、成果复用和应用推广等各项研判工作内容。通过航天器材料应用验证信息提取与研判方法的研究,可有效优化验证流程、提升验证质量,避免对象重复、信息错误、项目冗余,规避验证风险,强化验证工作输出成果的准确性和可复用性,提升材料应用验证精准性质量控制水平。

参考文献

- [1] 王志强,刘泊天,高鸿,等. 航天材料应用验证技术一体化构建思路研究[J]. 航天工业管理, 2022(4): 7-12.
WANG Z Q, LIU B T, GAO H, et al. Study on the integrated construction of space materials application verification technology [J]. Aerospace Industry Management, 2022(4): 7-12.
- [2] 江理东,孙明. 宇航元器件应用验证系统工程. 第一卷. 宇航元器件应用验证总体技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2019.
JIANG L D, SUN M. The system engineering of the application verification for space components Volume 1: The general technology of the application verification for space components [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2019.
- [3] 穆荣平,陈凯华,等. 科技政策研究之技术预见方法[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
MU R P, CHEN K H, et al. Technology foresight methods of science and technology policies research [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [4] 邱均平,赵蓉英,董克,等. 科学计量学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
QIU J P, ZHAO R Y, DONG K, et al. Scientometrics 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023年 第2期

[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[5] 范晓明, 权利, 张延伟, 等. 宇航元器件应用验证指标体系构建方法研究[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(3): 18-21.

FAN X M, QUAN L, ZHANG Y W, et al. Research on the method for the construction of the index system of the application verification for the astronautic components [J]. Electronic Components & Materials, 2013, 32(3): 18-21.

[6] 权利, 范晓明, 张延伟, 等. 宇航元器件应用验证综合评价系统工程方法论[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(3): 49-52.

QUAN L, FAN X M, ZHANG Y W, et al. The systems engineering methodology of the application verification for the astronautic electronic components [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(3): 49-52.

[7] 张莹, 张延伟, 范晓明, 等. 宇航元器件应用验证判据体系构建研究[J]. 质量与可靠性, 2016(2): 22-26.

ZHANG Y, ZHANG Y W, FAN X M, et al. Research on the construction of application verification criteria system for aerospace components [J]. Quality and Reliability, 2016(2): 22-26.

《宇航材料工艺》荣获中国航天科技集团有限公司 2022年度优秀科技期刊奖

为深入学习贯彻习近平总书记关于办好一流学术期刊的重要指示精神,落实中宣部、教育部、科技部印发的《关于推动学术期刊繁荣发展的意见》,支撑中国航天科技集团有限公司(以下简称集团公司)“三高”发展要求,进一步加强航天科技期刊管理,规范航天科技期刊出版,推动航天科技期刊高质量发展,集团公司制定了期刊评价方法。2023年集团公司组织实施了期刊评价工作,遴选出10本2022年度优秀期刊,并在近日召开了表彰大会,颁发了奖状。

《宇航材料工艺》在这次评价活动中荣获中国航天科技集团有限公司2022年度优秀科技期刊奖。



这次集团公司科技期刊评价工作是中国航天科技集团有限公司成立以来组织的首次科技期刊评价工作。《宇航材料工艺》能在首次评价活动中获奖,是在各级领导、专家、编委、作者及编辑部两代同仁不懈努力的结果。在此,感谢各级领导、专家、学者多年来持续给予期刊的大力支持和帮助!也恳请各位今后一如既往地给予支持和帮助!让我们一起踔厉奋发、笃行不怠,把《宇航材料工艺》办得更好,促进航天材料及工艺科学的进步和发展,为建设航天强国作出自己的贡献。

本刊编辑部
2023年4月