

# 航天器用材料大数据服务体系建设构想

高 鸿, 牛 虎, 王向轲, 范晓明, 刘泊天, 邢 焰

(中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100094)

**摘 要:** 航天科学与技术代表着一个国家高端制造产业的发展和应用水平。随着航天科学技术的快速发展, 各国将加快发展先进材料快速应用转换技术; 加快推进材料大数据在工程领域的应用, 促进材料基础技术与工程深度融合, 在空间和时间尺度上加快探寻先进材料性能与应用技术之间的关系, 使材料快速应用转换技术成为航天技术发展的核心竞争力。基于材料基因工程技术实现快速材料研发与快速应用转化技术, 已逐步得到了国际航天应用领域的高度关注。结合美国国家航空航天局在材料大数据工程中的建设过程与发展思路, 通过对我国航天器材料发展的需求分析, 分别从大数据建设与数据流形成、航天器材料大数据应用和数据服务体系 3 个方面提出了航天器材料大数据服务体系建设构想。

**关键词:** 航天器; 材料; 大数据; 数据服务; 基因工程

**中图分类号:** V25; TP311.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)11-0930-08

**引用格式:** 高鸿, 牛虎, 王向轲, 等. 航天器用材料大数据服务体系建设构想[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 930-937.

GAO H, NIU H, WANG X K, *et al.* Research on Big Data Service System Construction for Spacecraft Materials[J]. Materials China, 2022, 41(11): 930-937.

## Research on Big Data Service System Construction for Spacecraft Materials

GAO Hong, NIU Hu, WANG Xiangke, FAN Xiaoming, LIU Botian, XING Yan  
(China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Space science and technology represents the development and application status of a country's advanced manufacturing industry. With the rapid development of space science and technology, many countries will accelerate the development of conversion application technology of advanced materials to be used in spacecraft; accelerating the application of material data in the engineering field, promoting the deep integration of material basic technology and engineering, speeding up the exploration of the relationship between advanced material performance and application technology in terms of length and time scale, and making rapid application conversion technology of materials become a core competitiveness of space technology development. The rapid research and development based on material genetic engineering and rapid application conversion technology of material have gradually attracted great attention in the field of international space applications. The paper combines NASA's ideas about the construction and development of material data, based on the demand analysis of the development needs of spacecraft materials in China, big data service system construction for spacecraft materials is put forward from three aspects: big data construction and data stream formation, spacecraft material big data application and data service system.

**Key words:** spacecraft; material; big data; data service; genetic engineering

## 1 前 言

在过去的 20 年里, 各个领域里的数据积累都在大量

增长。根据国际数据公司(international data corporation, IDC)报道, 中国创造和复制的数据量以每年 3% 的增长速度超过全球水平。2018 年, 中国产生了约 7.6 ZB (zettabyte, 1 ZB 约等于  $10^{21}$  B) 的数据, 预计到 2025 年, 这一数据将增至 48.6 ZB<sup>[1]</sup>。数据之所以重要, 是因为信息日益被视为各行业发展所依赖的“货币”。近年来, 大数据已获得工业界、学术界和政府的高度关注<sup>[2, 3]</sup>。如何有效地组织和管理大数据已然成为各行业

收稿日期: 2021-01-17 修回日期: 2021-04-18

第一作者: 高 鸿, 女, 1980 年生, 研究员,

Email: gaohong\_cast@sina.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202101013

的规划热点。在代表我国高端技术产业发展的航天应用领域, 大数据服务先行将是实现航天强国发展的重要标志。快速发展的航天领域需要高精度设计建造用材料数据输入, 需要提前 10 年预测新材料技术发展趋势, 需要实时预警材料质量特性, 需要完善准确的应用履历并实现信息共享。当前大数据、互联网技术和材料科学融合形成的材料大数据服务技术在航天领域实施应用具有高度的战略意义和深远影响。本文以航天器工程应用领域为背景, 提出材料大数据服务体系构建思路。

## 2 美国国家航空航天局 (NASA) 在材料大数据技术方面的规划研究

### 2.1 NASA 启动材料数据服务规划建设的背景分析

美国传统的军工材料研发与应用模式主要是以实验

为主的“试错法”, 该模式周期长、效率低, 而随着大数据计算技术的发展, 大部分材料设计与性能评价可以通过计算工具完成, 计算不仅可以深入理解材料的细节, 也可以逐步替代重复试验, 减少对物理实验的依赖, 从而加快材料研发与应用。美国在 2011 年 6 月提出“材料基因组 (materials genome) 计划”<sup>[4]</sup>, 其核心是利用正在发展的高通量计算、高通量试验、大数据信息技术, 寻找和建立材料从原子排列到微观组织形成再到材料性能与寿命之间的相互关系, 旨在以至少快两倍的速度开发和制造先进材料, 且成本仅为原先的几分之一, 这促使了材料信息学的快速发展。通过建设材料信息数据库并集成材料研究设计平台, 对材料大数据进行分析和预测, 快速发现决定材料性能的“基因”, 也就是材料成分、工艺、组织、性能之间的定量关系, 从而加速材料研发设计和应用<sup>[5]</sup>。以结构材料为例(图 1 和图 2), 结合材料

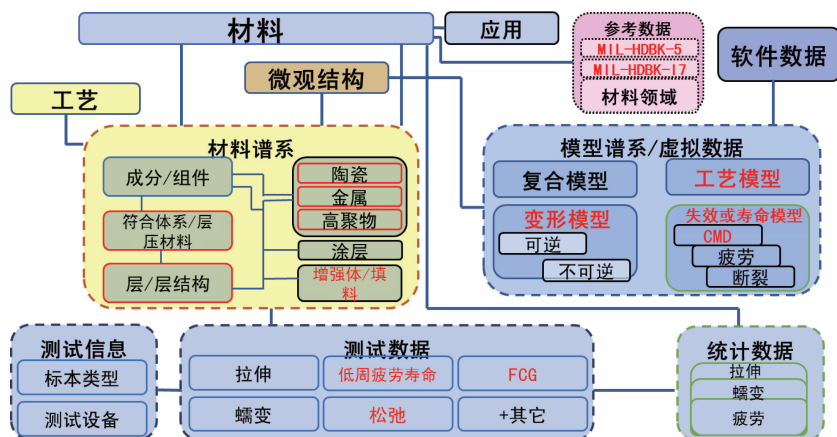


图 1 NASA 结构材料数据库与数据集计算材料工程库连接构架示意图

Fig. 1 Schematic of NASA structure materials linking to integrated computational materials engineering (ICME)

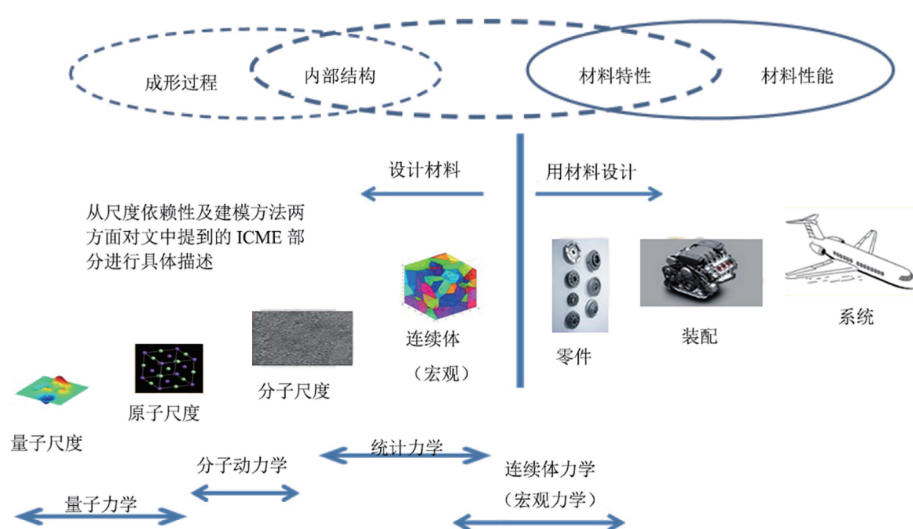


图 2 长尺度数据集计算材料工程示意图

Fig. 2 Schematic of associated length scale in the context of integrated computational materials engineering (ICME)

计算工具,将材料加工工艺、材料内部成分结构、材料特性以及性能不断迭代,逐步实现全寿命期内材料数据的获取和存储。通过材料量子力学、分子动力学、微观力学、统计力学分析,应用计算技术,基于材料微观尺度到宏观尺度的本构特性,建立从材料性能到零部件性能的定量关系。这个过程不仅离不开材料高通量测试技术和可追溯的材料测试数据,同时对产品设计、分析方法以及信息管理等也有较高的要求。

材料计算与数据服务技术建立初衷是为解决军工领域新材料从开发到成熟应用周期跨度长(一般 10~20 年)、开发成本高的问题,早期识别材料失效模式和性能局限,建立满足国防领域对高性能关键材料快速开发、可靠应用的研发体系。该项技术已在锂离子电池材料、光电材料、新型信息存储材料等领域得到成功应用,并逐步在各大工程领域推广<sup>[6,7]</sup>。为持久推动基于材料基因工程技术下的大数据应用技术,2018 年美国 NASA 发布“Vision 2040: a roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems”(2040 愿景:材料体系多尺度模拟仿真与集成路径)<sup>[8]</sup>,该规划全面系统地可对服务美国航空航天工程应用领域的大数据应用技术体系建设进行了布局。

## 2.2 NASA 大数据建设历程与未来发展目标

NASA 在长期实践中发现,通过一个强大的信息系统实现设计师和工艺师在特定应用背景下对材料和工艺的科学选用,是每一个 NASA 企业开展产品研制生产活动的关键保证。为了更好地借鉴以往的失败教训并从中吸取经验,避免重蹈覆辙,减少昂贵的、多余的、重复的材料测试,NASA 于 20 世纪 80 年代早期启动了一项强大的技术信息系统建设工程,并由马歇尔航天飞行中心(MSFC)管理。数据系统建设初期参考了 NASA 的《空间硬件系统材料选用目录》,收录了目录中已有的材料性能数据。2003 年 10 月,MAPTIS(materials and process technology information system)1.0 版投入使用并进行了快速的迭代和升级;2007 年 3 月,MAPTIS 3.8.0.4 版投入使用;如今,MAPTIS 能够提供大量 NASA 使用的工程材料数据,有超过 32 000 种材料的空间应用信息。目前,这个系统可以提供过去 15 年应用的主要产品系列的材料和工艺数据,为 NASA 恰当地选用材料和工艺提供基础保障;为每一个进入 NASA 体系的制造机构提供材料和工艺选用基础以及完善的材料数据信息,加速了材料的应用转化能力;为研究和研制者提供失效案例学习平台,避免同类问题在未来产品中再次发生;为使用者提供材料测试数据,避免同种性能测试重复开展;也为飞行准备就绪的产品提供所用材料和工艺安全性与适用性的证

明。这个系统在为 NASA 提供产品研制开发的机构中被广泛使用,大大方便了产品出口和国际交流。

NASA 在材料数据信息系统建设中,初步解决了设计选用需求,但是仍然解决不了大量材料测试数据丢失的问题;材料数据多以经验测试值为主,缺乏寿命预测和可靠性预测能力;新材料研制存在开发与设计需求不匹配、开发和应用周期长等问题。NASA 基于过去 10 年发展起来的高速计算方法、新材料表征测试技术,以及近期发展的集成计算材料工程(integrated computational materials engineering, ICME),提出从体系和基础设施两个方面整体推进大数据服务能力建设,打通材料到制造体系全链条模型和计算技术,实现利用材料计算学驱动航天器部组件先进制造技术发展的总体目标<sup>[9]</sup>。

未来,NASA 通过大数据服务整体能力建设,将 MAPTIS 与其他数据库集成。这项工作一方面将促进材料研制与航天工程系统的协调发展,利用现代化的信息技术逐步营造智能化的材料研发制造环境,引导研制方基于工程需求开发新材料产品;另一方面,可吸纳更多的材料和工艺数据,实现数据自动化分析,为每一个应用者提供高效、快速和低成本选材服务,打造材料数据集成应用服务(图 3)。通过数据平台建设,将打通相关实验室间的数据流,提高材料测试数据资源利用率,缩减材料测试样本与测试物理量;通过材料数据挖掘技术,可以实现对新材料发展趋势的预测,快速研制、开发新材料,缩短 NASA 先进产品的研制周期,加快产品更新换代。

## 2.3 NASA 大数据信息结构与来源

MAPTIS 现有的数据源来自于 NASA 的材料测试机构,如美国 MSFC、白沙试验研究所(WSTF)、戈达德航天飞行中心(GSFC)、喷气推进实验室(JPL)等。还有其他一些重要的途径,如欧洲航天局、美国军方、全球材料制造商以及学术界等。MAPTIS 包括 12 个子数据库。其中,金属材料子数据库包括腐蚀裂纹增长、蠕变断裂、断裂力学、摩擦热、高周疲劳、低周疲劳、机械冲击、粒子影响、气动影响、促燃、应力腐蚀以及拉伸强度等;非金属材料子数据库包括电弧跟踪、电超载、电线绝缘性、燃烧性、闪燃、流体相容性、防霉菌、机械冲击、气味、出气、气动影响、促燃、毒性以及光学相容性等。又如热物理性能子数据库,可提供金属、非金属(玻璃纤维、尼龙)、烧蚀材料、泡沫、绝缘材料、气体、液体和混合材料(推进剂、环氧、油脂等)的热物理性能数据,还包括了 MSFC 管理项目下的所有材料使用协议。材料使用协议确定并限定了有人环境下某种材料的特定用途。具体指标包括材料的燃烧性、放气性、应力腐蚀等。



此外, 还有“失效分析数据库”“备忘数据库”等, 建成一个协作的材料工程体系, 它可提供智能的环境, 应用现代信息技术准确地产生和分配材料与工艺的信息。这个新的材料工程系统可以从现有的资源中融合有用的

材料与工艺数据并加入自动化的分析元素, 将成为技术人员、设计人员和管理人员的智能助手, 在每一种用途下实现材料最快捷、准确、节约成本的识别和选用。

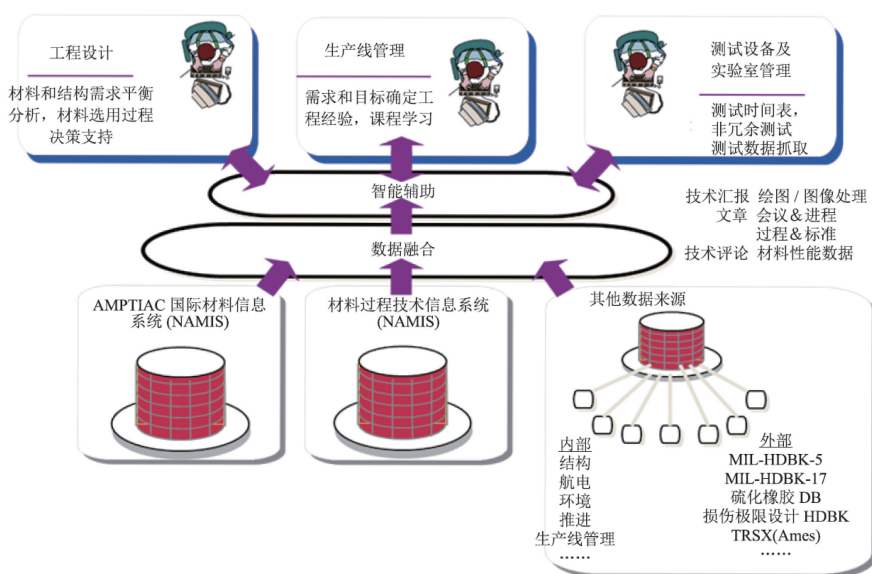


图 3 MAPTIS 数据服务体系

Fig. 3 Data service system of MAPTIS

### 3 我国航天器材料技术发展需求分析

#### 3.1 新产品新技术发展带来新材料多元化革新

“十四五”期间, 材料作为新产品新技术的基础元素, 将成为型号单机产品小型化、多功能、高集成、高精度、大尺寸结构设计发展中核心技术的主角。新材料技术的发展主要表现在 3 个方面。

第一, 产品功能发展带动高性能材料的发展。航天器发展过程伴随着新材料技术应用发展的过程。工程材料性能不断优化与提升, 是各类产品发展最为基础的保障。“十四五”期间, 新材料应用方向主要体现出轻量化、多功能、结构化、多元化的发展特点<sup>[10, 11]</sup>。传统的轻合金材料有望被柔性纺织品和泡沫材料“跨界”替代, 以机械强度为核心指标的结构材料将被结构功能一体化材料替代, 单层薄膜材料将被多层功能复合薄膜材料替代, 部分耐高温合金材料有望被碳材料替代, 单一均质材料将被多孔纳米结构材料替代。可以预期, 新材料技术将在航天工程领域实现大范围应用转化, 并构成航天技术发展的核心竞争力。

第二, 产品服役环境变化促进材料性能发展。未来, 我国深空探测、通信卫星、商业卫星等型号产品将在服役工况方面面临更大的挑战, 例如深空探测极低或极高温环境, 高轨卫星经历更宽的服役温度环境, 以及高集

成、大功率、高精度产品要求越来越高的温度控制精度等。耐高温材料、低应力材料、宽服役温度窗口材料、低温润滑材料、高导热材料、绝热材料、耐辐射材料、高致密度烧蚀材料等作为新一类材料将扩展航天材料的选用范围。

第三, 先进结构设计发展带来新一代材料需求。卫星产品逐步向轻量化、智能化方向发展, 带动弹性结构、大尺寸结构、柔性结构、记忆结构、膜壳结构、点阵结构等新型结构设计技术的发展。基于先进结构设计的材料应用技术俨然成为技术研究热点。随着新技术的发展, 材料将通过多体复合或单体构型实现特定结构, 并以一种特定的制品形式应用到工程中, 进而带来性能的提升。轻薄材料、低密度材料、纤维材料、泡沫材料、多孔材料、增材制造材料、膜壳结构弹性体材料、界面材料、零膨胀材料、梯度复合材料等成为新的需求方向<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 以大数据服务技术为核心的新材料应用转化需求

材料是航天器结构、单机载荷、结构、能源、推进、回收等分系统技术发展的关键。新材料需要通过在不断提升性能的同时兼顾可靠性, 以满足航天产品设计发展的需求。同时, 在航天型号产品创新发展的引领下, 各类国产化先进材料技术快速、精准应用转化是材料应用技术综合发展的目标。

大数据分析技术未来将是支持航天器在材料选用、



过程质量保证以及现代供应链管理过程中的核心。今后,材料大数据将会以巨量化、多样化、真实化、高速化的应用特点,吸纳多个行业和领域内的应用数据和信息,服务于航天器设计和研制。首先,大数据将实现从原材料到材料制品再到组件产品的本征性能、工艺特性、环境特性、可靠性特性数据信息的充分汇集;其次,大数据服务以自动或半自动形式实现数据提取和结构化应用,以满足建立更准确选用、质量控制和应用之间数据关系。基于材料大数据服务的人机交互模式,可以实现规避人为主观因素、快速获取和处理信息的目的。航天器应用领域大数据是基于业务流而实现的大数据流,获取成本低、数据复用度高,持续发展过程中也将具有长期低成本、高密度特性。

面对航天器多维度选材与材料应用转化技术发展的综合需求,材料选用技术服务需要逐步从被动式获取信息向主动累积信息转变。通过数据提取逐步建立结构化数据,通过数据清洗与挖掘获得客观的数据关系。随着数据库的不断发展,逐步实现监测、预警、提醒、决策等能力,进而推进新材料选用与应用转化的关键技术能力建设,缩短产品研制周期,提升产品竞争力,满足型号不断追求成熟产品快速更新换代、创新产品快速发展、基于先进材料技术功能单机快速升级的长远需求。

## 4 航天领域材料数据服务体系建设构想

### 4.1 航天领域材料数据库建设和数据流形成

材料信息数据库主要是储存和管理各类材料数据,形成包括材料基础性能、微观结构数据、模拟计算数据、试验与工艺数据、环境数据和各类出版物等在内的数据仓库<sup>[13, 14]</sup>。在航天应用领域,材料数据按来源主要有测试实验数据、计算数据和生产工艺数据。这些数据将通过一定科研生产管理模式的收集整理并存储于数据仓库中,进一步用于数据应用服务,主要的逻辑关系见图 4。

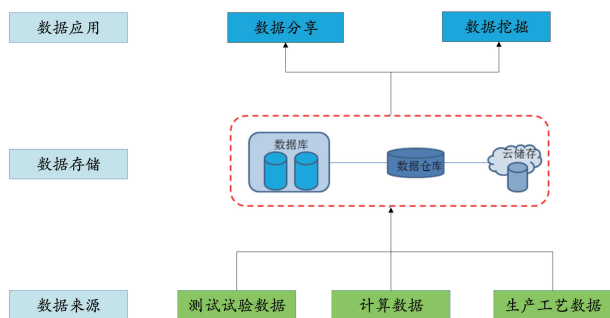


图 4 材料数据及其应用的逻辑关系

Fig. 4 Logical relationship between material data and its application

数据仓库建设需要具备数据量、数据完整性和数据覆盖面 3 个要素。

数据量是大数据的根本,从应用领域全流程尽最大可能获取信息量是保证数据有效应用的前提。然而,在航天应用领域,大到结构产品,小到微电子,涉及材料种类多,使用单位多,综合呈现杂、小、精、散的特点。要将这些材料和材料使用过程数据汇集到一个仓库,需要在航天领域建立材料总体技术机构(例如 NASA 马歇尔实验室),对所有应用于航天器产品的材料选用、使用过程进行质量控制与管理。航天应用领域总体技术机构从顶层建立统一编码,为数据流的形成与过程管理提供基本保障,实现材料数据从原材料到材料制品、从性能数据到工艺数据、从质量保证数据到质量归零数据、从生产数据到应用数据综合数据流的汇总与收集。

在数据完整性方面,当前存在的主要问题是数据信息断档、数据信息缺失、有效数据少、以自产数据为主。真正可用于数据服务的材料数据需要有明确的材料测试样品状态,如牌号、批次信息、技术标准等,通过特定工艺处理后的样品也需具备可查的工艺状态信息。此外,收纳的材料数据信息需要具备溯源性、测试不确定度等信息,以保证数据准确性。所以,在航天器应用领域,数据汇集与数据认可需要专业的机构进行管理。机构在全国范围内通过认定认可的测试联盟,依据统一的材料数据信息编码格式和信息化手段将产生的数据流汇集到主数据库,用于持续的数据维护。

在数据覆盖性方面,不同领域对材料数据覆盖性要求不同。在航天器工程应用领域,数据信息主要包括材料的成分与性能数据、应用数据、工艺数据、环境数据、寿命数据等。数据仓库覆盖性是保证数据完整性的前提,除收集汇总的材料基本性能数据,数据库应针对航天应用领域核心、关键、高端材料进一步组织完善材料在多维环境场、高通量测试和计算、长寿命评估等方面材料工程应用中的数据评价和数据积累,不断完善航天应用领域特殊的数据源。

未来,期望通过行业间数据接口,融合我国各个工程应用领域材料数据,在区域内逐步建立数据流共享机制,从而逐步完善数据库建设。

### 4.2 航天领域材料数据应用

当前,航天领域材料数据应用主要基于手册查询或实际测试获得材料本构数据,并利用有限元仿真与计算方法,实现对设计产品性能的仿真分析。近年来,随着材料基因工程在高通量计算技术方面的发展,基于数据库进行数据挖掘发现知识并实现工程应用已然成为新的发展热点。Sparks 等<sup>[15]</sup>采用数据挖掘和机器学习算法在

热电数据库中分析了成千上万化合物的热电性能,再结合密度泛函理论(density functional theory, DFT)计算,预测未知的三元相图中的低热导率相。Agrawal 等<sup>[16]</sup>使用日本国立材料科学研究院(NIMS)创建的 MatNavi 在线材料数据库建立了钢铁疲劳强度的预测模型,分析结果显示,神经网络、决策树和多元多项式回归等先进的数据分析方法可以显著提高预测模型的精度。Takahashi 等<sup>[17]</sup>利用 DFT 中的 GPAW (grid-based projector-augmented wave) 建立材料数据库,预测金属间化合物的性能数据,预测的点阵常数和实验数据基本一致。

数据应用系统将集成材料数据库、材料计算、材料测试与表征,形成材料数据管理和分析系统为一体的航天材料大数据平台。该平台能够实现强大的分析计算功能,例如通过原子尺度的第一性原理计算预测材料热力学性质、晶格常数以及单质、二元与三元化合物和固溶体的动力学数据,建立热力学性质、晶格常数、多元体系动力学数据模型;利用多元相场方法在二维和三维尺

度上预测材料微观组织的演变规律;采用有限元分析方法从模拟组织中计算材料的机械性能;通过进行从量子力学到材料服役的跨尺度高通量的材料计算,获得大规模、多源异构的材料数据;利用信息学方法进行材料大数据分析,发现材料成分、工艺、组织、性能与工程应用之间的定量关系,并以三维和四维的形式呈现。材料数据应用系统主要体现为以产品为最终目标的设计生产制造过程,见图 5<sup>[13]</sup>。数据库将通过集成常规性能数据评估方法和性能曲线处理算法,满足不同用户对材料数据查询、统计、对比、选择等需求。设计师可以利用数据库资源,通过材料计算技术和仿真技术,将应用需求转化成材料性能和相应的规范说明,在数据库中排除不合规范的材料,对遴选的材料进行评级,并基于试验和历史应用信息寻找等级最优的候选者以实现精准选材。通过大数据服务,可将材料基因技术在航天工程领域转化应用,大大加快新材料的研发和应用转化进度。

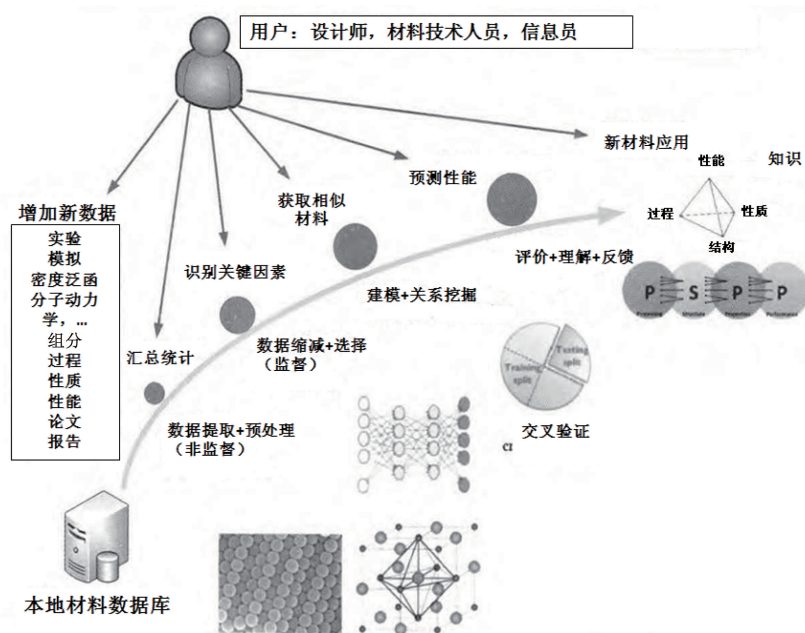


图 5 基于材料知识库的数据挖掘与应用模型<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Data mining and application model based on material knowledge base<sup>[13]</sup>

#### 4.3 航天领域材料大数据综合服务能力建设

数据服务、知识服务、模拟计算服务和测试分析服务组成了综合的材料大数据服务体系(图 6)。各类服务相互促进,协同发展,并不断完善,逐步融合现代化的高通量测试分析技术,以及材料计算技术,提升数据挖掘服务效力;利用数据库统计分析与在线检测预警计算,还可形成知识服务。其中,知识服务是基于大数据分析与应用体系,服务于航天器在材料选

用、过程质量保证、新材料需求规划研究以及现代供应链管理。

在质量保证领域,对每一批次材料检验数据提供自动统计与异常预警能力,可实施跟踪供方材料的稳定性,辅助识别供方技术状态变更,如重要原材料变更、重要工艺过程变更等;针对新选用材料评价验证数据,可实现相似相关材料同水平比对分析,以确认新使用材料的优势与不足,规避历史选用和使用风险。此外,针对数

数据库提供的材料品种、供方、性能等综合指标,可按年代、型号、应用背景等层面,统计分析材料需求趋势、

型号应用特点以及型号材料风险与薄弱项目,为后续材料规划与新材料开发提供更为科学的统计数据。

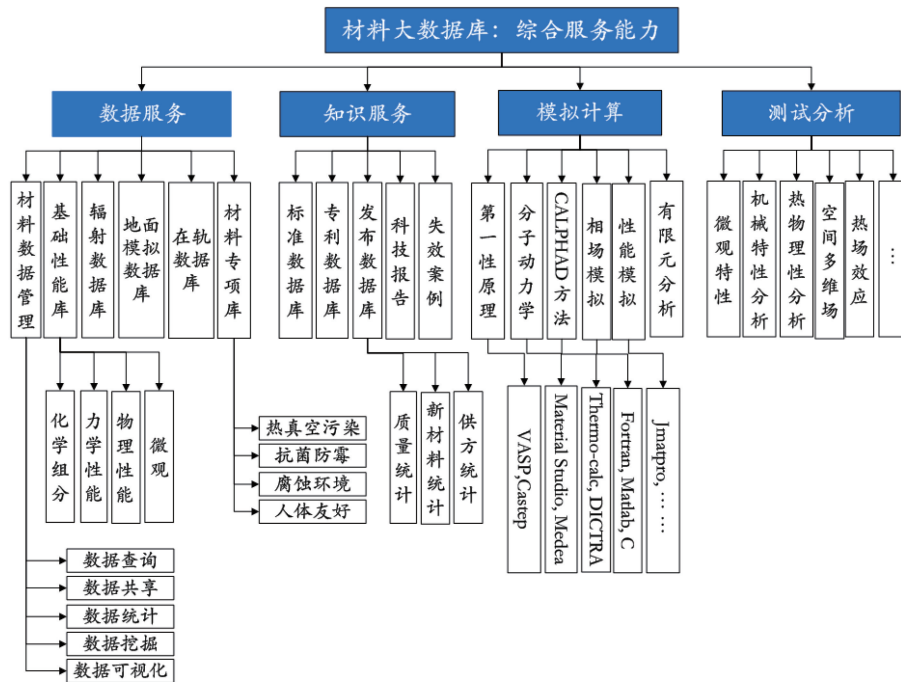


图 6 材料大数据综合服务能力结构图

Fig. 6 Structure diagram of comprehensive service capability of material big data

## 5 结 语

我国于 2015 年 1 月提出了“原材料工业两化深度融合推进计划”,旨在支持原材料工业大数据平台的建设,促进信息共享和数据开放。我国航天应用领域代表了国家高端制造技术发展和应用水平,加快推进材料大数据在航天领域应用,促进材料基础技术与工程深度融合,加快探寻先进材料性能与应用技术之间的关系。基于基础数字化与信息化能力建设,快速推广科学化、体系化、网络化的信息共享、数据共享、知识共享。通过大数据工程应用技术,逐步在我国航天器领域构建和谐共赢的工程材料网络体系,形成互补型工业网络环境,为发展自主知识产权的航天产品核心竞争力提供孵化器、加速器。

## 参考文献 References

- [1] 国际数据公司希捷: 中国 2025 年产生数据量将超越美国[EB/OL]. (2009-02-07)[2021-01-17]. [https://www.sohu.com/a/295622096\\_100188883](https://www.sohu.com/a/295622096_100188883).  
International Data Corporation Seagate: China will Produce More Data than the United States in 2025[EB/OL]. (2009-02-07)[2021-01-17]. [https://www.sohu.com/a/295622096\\_100188883](https://www.sohu.com/a/295622096_100188883).
- [2] ZHAO J C, JACKSON M R, PELUSO L A, *et al.* MRS Bulletin[J], 2002, 27(4): 324-329.
- [3] MELODY M, COUNCIL N. Teaching Statistics[J], 2014, 17(S1): 8-12.
- [4] 李楠楠, 沈一笋, 臧亮, 等. 中国材料进展[J], 2016, 35(2): 156.  
LI N N, SHEN Y S, ZANG L, *et al.* Materials China[J], 2016, 35(2): 156.
- [5] 尹海青. 新材料产业[J], 2015, 5: 8-11.  
YIN H Q. Advanced Materials Industry[J], 2015, 5: 8-11.
- [6] HOLDREN J P. Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing: PCAST[R]. Washington, D. C.: Executive Office of the President, 2011: 24-31.
- [7] GREEN M, CHOI C, HATTRICK S J, *et al.* Applied Physics Reviews[J], 2017, 4: 011105.
- [8] LIU 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.
- [9] National Research Council. Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security[M/OL]. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2008. [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12199](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12199).
- [10] 安宇. 化工管理[J], 2020, 557(14): 26-27.  
AN Y. Chemical Enterprise Management[J], 2020, 557(14): 26-27.



- [11] 范德增. 新材料产业[J], 2020, 318(5): 35-39.  
FAN D Z. Advanced Materials Industry[J], 2020, 318(5): 35-39.
- [12] 王军照. 今日制造与升级[J], 2020, 128(8): 50-51.  
WANG J Z. Manufacture & Upgrading Today[J], 2020, 128(8): 50-51.
- [13] 王卓, 王礲, 雍歧龙, 等. 中国材料进展[J], 2017, 36(2): 132-140.  
WANG Z, WANG M, YONG Q L, *et al.* Materials China[J], 2017, 36(2): 132-140.
- [14] 尹海青, 姜雪, 张瑞杰, 等. 中国材料进展[J], 2017, 36(6): 401-405.  
YIN H Q, JIANG X, ZHANG R J, *et al.* Materials China[J], 2017, 36(6): 401-405.
- [15] SPARKS T D, GAULTOIS M W, OLIYNYK A, *et al.* Scripta Materialia[J], 2016, 111: 10-15.
- [16] AGRAWAL A, DESHPANDE P D, CECEN A, *et al.* Integrating Materials and Manufacturing Innovation[J], 2014, 3: 1-19.
- [17] TAKAHASHI K, TANAKA Y. Computational Materials Science[J], 2016, 112: 364-367.

(编辑 吴 锐)