

高端新材料智能制造的发展机遇与方向

孙宝德^{1,2}, 疏达^{1,2}, 付华栋³, 汪东红^{1,2}, 彭立明^{2,4}, 王新云⁵, 朱言言⁶,
王华明⁶, 丁文江^{2,4*}, 谢建新³

(1. 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;
3. 北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083; 4. 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240; 5. 材料成形与
模具技术国家重点实验室, 武汉 430074; 6. 大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100083)

摘要: 发展智能制造是我国制造业创新升级的主攻方向, 高端新材料是支撑高端装备和重大工程需求的核心材料, 推动智能制造与高端新材料制造紧密结合, 对提升高端新材料制造能力, 满足重大装备对高端新材料的需求, 具有重要意义。本文深入分析了高端新材料智能制造的必要性, 在分析面向高端新材料的高性能制造、复杂构件的整体化与轻量化制造、高端构件的一体化与低成本绿色制造等特征基础上, 总结了传统“试错法”研发模式在材料制造领域遇到的主要问题与挑战, 分析了数据驱动的高端新材料智能制造研发模式带来的重大变革与机遇, 并以材料智能加工成形为例, 全面梳理了亟需发展的共性关键技术及其发展方向。本文从加强关键技术研究、构建创新体系、创新学科交叉人才培养和加快成果转化等方面, 提出了加快发展高端新材料智能制造的对策建议, 以缩短与国外先进水平的差距, 支撑我国材料产业的升级换代和跨越式发展。

关键词: 高端新材料; 智能制造; 材料加工; 集成计算; 大数据; 人工智能

中图分类号: TB3 **文献标识码:** A

Intelligent Manufacturing for High-End New Materials: Opportunities and Directions

Sun Baode^{1,2}, Shu Da^{1,2}, Fu Huadong³, Wang Donghong^{1,2}, Peng Liming^{2,4}, Wang Xinyun⁵,
Zhu Yanyan⁶, Wang Huaming⁶, Ding Wenjiang^{2,4*}, Xie Jianxin³

(1. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, Beijing 100083, China; 4. Light Alloy Net Forming National Engineering Research Center, Shanghai 200240, China; 5. State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology, Wuhan 430074, China; 6. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beijing 100083, China)

Abstract: Intelligent manufacturing is the main upgrading direction for China's manufacturing industry and high-end new materials are core for high-end equipment and major engineering projects; therefore, promoting the integration of intelligent manufacturing and high-end new material manufacturing is crucial for enhancing the manufacturing capacity of high-end new materials and satisfying the

收稿日期: 2023-02-13; **修回日期:** 2023-05-08

通讯作者: *丁文江, 上海交通大学材料科学与工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为先进镁合金材料及加工;

E-mail: wjding@sjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新材料研发与制造应用智能化战略研究”(2021-JJZD-01); 国家自然科学基金重大项目(52090042)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

demand of major equipment for high-end new materials. This study first analyzes the necessity of promoting intelligent manufacturing for high-end new materials. With increasing demands for high-performance manufacturing of high-end new materials, integration and lightweight manufacturing of complex components, and efficient and low-cost green manufacturing of high-end components, serious problems and huge challenges have been encountered by the traditional trial-and-error method for materials manufacturing. Meanwhile, grand opportunities are provided by a data-driven research and development mode for intelligent materials manufacturing. Taking materials forming and processing as an example, the common key technologies of intelligent materials manufacturing that need to be developed are systematically clarified, and countermeasures and suggestions to accelerate the development of intelligent manufacturing for high-end new materials, including key technology research and development, innovation system establishment, interdisciplinary talent cultivation, and achievement transfer, are also proposed, in order to support the upgrading and leapfrog development of China's materials industry.

Keywords: high-end new materials; intelligent manufacturing; materials processing; integrated computation; big data; artificial intelligence

一、前言

高端新材料是支撑高端装备和重大工程需求的核心材料,包括高性能铝合金、镁合金、钛合金等先进基础材料及高温合金等关键战略材料和增材制造金属材料等前沿新材料,在航空、航天、能源、交通、电子信息、武器装备等战略领域发挥着举足轻重的作用^[1,2]。新材料的发展始终离不开材料制造技术的进步,典型的材料制造技术可以分为材料的合成与制备、成形与加工、改性与表面加工、复合4大类。随着全球新一轮科技革命和产业变革的快速发展,新一代信息、通信、生物、新材料、新能源等技术不断取得突破,并与先进制造技术加速融合,为制造业高端化、智能化、绿色化发展提供了历史机遇。为此,世界主要国家和地区相继推出了一系列支持智能制造的政策和发展计划,如美国的国家自然科学基金智能制造项目和先进制造业国家战略计划、欧盟的7个研发框架计划、德国的工业4.0战略计划等。

我国紧抓新一轮科技革命和产业变革的历史机遇,在机械制造等领域加快发展智能制造并取得了积极成效,但整体发展仍处于初级阶段^[3];新材料智能制造领域尚处于起步阶段。我国是材料大国,但还不是材料强国。在高端新材料制造领域,虽然已经具备了一定的高端新材料制造能力,但受国外新材料技术及标准体系、产品垄断等影响,与国外先进水平相比还存在较大差距。材料制造技术水平不足,成为我国关键领域新材料研发、应用与产业化受制于人的重要因素。当前,我国正处于高质量发展的战略转型期,运载工具、能源动力、信息显示、生命健康等领域均对高端新材料提出了重大战略需求,这为我国新材料的大发展提供了难得的机

遇^[4],但也对高端新材料及关键构件的制造提出了新的更高要求。

在智能化制造的国际大趋势下,进一步抢占先机,发展高端新材料智能制造技术,推动材料产业升级换代,显得尤为急迫。为此,本文从梳理高端新材料制造的特征出发,分析传统研发模式遇到的问题与挑战,指出材料智能制造研发模式带来的变革与机遇,总结高端新材料智能制造应重点发展的共性关键技术,并提出对策建议,以期推动我国高端新材料智能制造的快速发展。

二、高端新材料制造的特征

(一) 材料的高性能制造

航空、航天、交通运输、海洋开发、深空探测、武器装备等国家重大工程的发展和建设,对材料性能提出了更高要求,而材料的制备与加工是保证其使役性能的基本要素之一。材料的高性能制造,即要求以使役性能为第一要求,在材料成分、组织、工艺与性能综合调控的基础上,不断提升材料的综合性能及其一致性,并实现关键构件的几何结构、材料和性能一体化的高性能精密制造^[5],以满足高端装备和先进制造的不断发展要求。

以航空发动机核心零部件复杂空心高温叶片为例,定向凝固技术使合金的结晶方向平行于叶片的主应力轴方向,基本消除了垂直于应力轴的横向晶界,提高了合金的塑性和热疲劳性能;单晶生长技术消除了全部晶界,因而省去了可导致合金初熔点下降的晶界强化元素,进一步发挥了合金的潜力,实现高温强度和承温能力的提高。除提升材料自身性能之外,通过在叶片上设计复杂的冷却通道和冷却孔,对涡轮叶片进行复合冷却(对流、冲击式、

气膜结构、发散冷却等),可以使叶片的工作温度(涡轮前温度)相比承载温度高出约400 K。在新一代涡轮叶片中,采用双层空心壁冷却技术增加内部的冷却通道,可以进一步提升冷却效率,但也使叶片的成形更加困难;此外,通过先进的热障涂层制备技术,在叶片表面打造一层“金钟罩”,可使叶片在远高于合金熔点的温度下工作,大幅提高发动机的工作效率,服役寿命增加了1倍以上。

(二) 复杂构件的整体化、大型化与轻量化制造

轻量化是航空、航天、交通运输、武器装备等领域的重要发展方向。战斗机的重量若减轻15%,则飞机滑跑距离可缩短15%,航程增加20%,有效载荷可提高30%。传统燃油车重量每减少10%,燃油能耗可降低6%~8%,二氧化碳排放降低13%。而随着电池技术和智能技术时代的来临,新能源汽车在全球范围内迅速崛起,轻量化也被认为是新能源汽车续航的另一块“电池”。

轻量化对大型复杂薄壁构件及其成形提出了新的要求和挑战。高性能大型精密铸件是航空、航天领域大量使用的一类关键热加工金属构件,包括高温合金铸件、钛合金铸件和铝合金铸件等,通常具有外廓尺寸大、结构复杂、各部位尺寸变化大、形状尺寸精度要求高等特点。新一代航空发动机大型结构件尺寸更大、壁厚更薄、薄壁面积更大、结构更加复杂,对其结构刚度、表面质量以及可靠性提出了更高的要求^[6]。近年来,随着最大锁模力超过6000 t的超大型、智能化压铸装备获得突破,铝合金车身结构件一体化成型技术取得了进展,极大推动了新能源汽车轻量化发展,降低了生产制造成本,提升了新能源汽车的性能。一体压铸不仅颠覆了汽车车身工程的百年制程,也直接推动了免热处理高强高韧压铸铝合金材料的开发应用与迭代升级,极大促进了铝合金材料的创新与发展。

(三) 材料、结构与工艺的一体化制造

增材制造技术的快速发展和应用,为高端装备大型关键金属构件的加工制造提供了一种变革性的技术途径。增材制造过程具有独特的超高温微小熔池、熔体强对流等超常冶金条件和超高温梯度、超快冷却速度等非平衡凝固条件,不仅可以克服传统铸锭冶金偏析严重、疏松、凝固组织粗大等固有

冶金缺陷,还为突破传统铸锭冶金的合金化限制^[7],设计制造新一代高性能复杂超常合金材料提供了可能。此外,增材制造逐点连续熔凝沉积成形过程中可实现对合金成分、组织及性能的在线精确控制,可在新型高温合金等复杂构件设计与制造、结构功能一体化及梯度材料等新材料加工成形方面,具有对传统技术的颠覆性优势。

(四) 高端构件的低成本绿色制造

高端构件除了对高质量、高性能的不断追求外,低成本及低消耗制造也是其核心竞争力的重要组成部分,是高附加值和高社会效益的具体体现。材料及其加工产业是能源和资源的主要消耗者以及污染环境的主要责任者之一,随着能源和环境危机的日益严重,基础材料产业中能耗高、污染大的制造技术已经成为阻碍社会发展的瓶颈问题,而高端新材料及其构件的低消耗与绿色制造成为推动我国经济高质量发展和“双碳”目标实现的必然选择。

三、传统高端新材料研发模式遇到的问题与挑战

材料的高性能化、构件的复杂化与轻量化、生产的高效化与低成本化等重大需求,对材料制造过程的精确控制提出了越来越高的要求。我国高端新材料制造领域研究长期处于型号牵引下的任务攻关模式,跟踪性强,基础理论研究薄弱,多采用经验积累和以简单循环试错为特征的“经验寻优”方式,致使新材料的科学性差、偶然性大、研制周期长、成本高。究其原因,是对材料加工制备过程的研究不深入、不系统,过程控制水平较低,致使材料内部冶金缺陷、外形尺寸超差、残余应力大等诸多问题长期和普遍存在。新材料产品质量的一致性与稳定性偏差,成为高端制造的“卡脖子”难题。传统高端新材料“试错法”研发模式遇到的问题与挑战,主要集中于以下3个方面。

(一) 基础理论与机理模型不健全

20世纪后期以来,材料加工技术呈现出过程综合、技术综合、学科综合的总体发展趋势^[8];材料制造过程呈现出多物理场耦合、多参数交互作用、

多学科交叉的显著特点。传统的理论解析、实验回归建模和数值模拟等机理模型虽然能够阐明材料加工成形过程中某些基本的、确定性的规律,但在解决材料加工过程中成分-组织-性能-工艺之间关系的非线性、应力-形变-相变之间复杂的交互作用、温度/力学/电磁等多种外场的耦合作用以及各种扰动引起的边界条件及工艺参数的时变性等科学问题方面进展缓慢,相关基础理论的研究进展仍远远不能满足生产实践的需要,导致实现全过程模拟、多尺度-多目标-多参数综合优化非常困难,而这也成为制约高端新材料制造的瓶颈问题。

(二) “形”“性”一体化控制存在瓶颈

传统装备及零件的设计与机械制造是在选定材料的基础上进行零件几何设计、公差确定与制造实现的过程,多以几何尺寸公差为关注点^[9]。而高端新材料的制造则不同,不仅要关注外在形状-尺寸-表面质量的变化,更要关注内在性能及其决定性因素组织和缺陷的演化过程,实现内在组织-缺陷-性能与外在形状-尺寸-表面的一体化控制。我国制造业大而不强,部分重要零部件的寿命低、可靠性差,其重要的根源就在于制造过程中重成形制造、轻控性基础工艺^[9]。以航空用高性能大型整体金属锻件为例,组织缺陷和性能对成形过程和工艺参数敏感性大,成形过程温度场、金属流动与应力应变场精确控制水平低,难以实现内部组织场、性能场、残余应力场与服役应力场相匹配,导致锻造成品率低、尺寸精度低、质量一致性差、成本高。

(三) 材料制造过程全流程精确调控难

材料制备加工成形过程具有多物理场强耦合作用,过程强时变扰动,内禀关系非线性、多变量与多目标等特点,组织结构演化贯穿全过程,影响因素多、孤岛控制对象多、综合质量评价困难,难以解决全过程建模、综合优化和智能调控的问题,导致全过程综合优化,特别是快速自动寻优困难。此外,在材料加工过程中,内部的组织转变和缺陷演化往往难以实时测量与感知,致使材料控性成为制造过程数字化与信息化的一个盲区,使这一过程成为难以把控的“黑箱”。很多材料制造过程,特别是热制造,是能量场、应力场、浓度场与材料相变

等高度耦合的不可逆的动态过程,即使能通过计算机仿真建模等手段进行模拟计算和缺陷预测,也很难对这一过程进行实时的干预和调控。

四、高端新材料智能制造研发模式带来的变革与机遇

20世纪80年代中期以来,通过综合利用计算机、人工智能、数据库和先进控制技术,材料智能化成形加工技术^[10-12]逐渐兴起,成为21世纪前期材料制备与成形加工新技术中最富发展潜力的前沿研究方向。该技术可将材料组织性能设计、零部件设计、制备与成形加工过程的实时在线监测和反馈控制融为一体,其目标是以一体化设计与智能化过程控制方法取代传统材料制备与加工过程中的“试错法”,实现材料组织性能的精确设计与制备加工过程的精确控制,获得最佳的材料组织性能与成形加工质量。但受制于当时的技术水平,早期的智能化技术研究,主要采用基于物理建模和基于数学物理模型、先验知识的专家系统的技术路线。

近10年来,以材料高效计算、高通量实验和大数据技术为特征的材料基因工程关键技术和应用,将材料传统顺序迭代的“试错法”研发模式,变革成全过程关联并行的新模式,全面加速了材料发现、开发、生产、应用等全过程的进程,促进新材料研发和工程化应用^[13]。材料基因工程的工作模式大致可分为实验驱动、计算驱动和数据驱动3种^[14]。其中,数据驱动模式提出了一种新的材料创新范式,即所谓的材料研发第四范式^[15],以数据为基础,借助材料信息学的方法建立模型,利用人工智能如机器学习解析多参数间复杂的关联关系,可能产生颠覆性的效果,大幅度提升材料研发效率和工程化应用水平,推动新材料快速发展^[16]。

数据驱动模式也为发展材料制造加工全过程综合优化、智能调控新原理和新方法提供了重要机遇。数字化是智能化的前提和基础。快速发展的材料高效计算模拟、集成计算材料工程(ICME)等技术,为材料制造过程提供了大量仿真数据;同时,在材料制造过程中各种实时监测、智能感知技术的应用,又提供了有关材料工艺与质量的大数据。随着以深度学习为代表的人工智能技术的革命性突破,通过数据融合和挖掘,为基于数据模型而

非物理模型实现全过程数字化建模和实时仿真提供了可能。在此基础上，与智能控制相结合，有望真正解决材料制造过程复杂多物理场耦合作用、时变扰动以及内禀关系非线性、多变量和多目标优化等难题。

当前，世界主要先进工业国家正在开展高端构件的数字化、智能化制造加工技术研究，从传统的“经验+试错法”向“数字化仿真+智能控制”研发模式转变，基于数字化和信息化的数字孪生和虚拟制造技术得到越来越多的应用。为了缩小与国外先进水平的差距，快速弥补短板，我国应抓住机遇，集中力量研究和探索智能化制造国际大趋势下的材料智能制造研发模式，应用人工智能、大数据分析等前沿技术，发展数据驱动的集“成分设计-工艺优化-过程控制”为一体的材料制造新原理和新方法，发展数据驱动的智能加工成形共性关键技术与工艺，抢占先机，引领我国高端新材料制造加工工艺技术实现换道超车、跨越式发展。

(1) 注重发展机遇，开展高端新材料智能制造研究，抢占学科发展前沿。在以人工智能技术广泛应用为重要标志的第四次工业革命的新形势下，智能制造是未来全球高端制造业的竞争焦点，也是我国先进制造业发展的必然趋势。目前国际上在基于智能控制的材料加工成形研究与应用方面仍处于起步阶段，抓住难得的发展机遇，开展高端新材料智能制造相关研究，对于促进学科发展，抢占学科国际发展前沿具有重要意义。

(2) 应用集成计算材料工程、大数据分析、人工智能等前沿技术，发展高效研发模式，提升原始创新能力。传统的基于经验、实验和数值模拟的“试错法”研究模式，难以解决材料加工成形过程中的组织、缺陷及性能的跨尺度关联复杂性、交互作用、形成与演化的时变复杂性，为此，通过综合应用集成计算材料工程、大数据分析、人工智能等前沿研究技术，发展高效研发模式，提升原始创新能力，是突破高端新材料制造技术瓶颈的关键。

(3) 突破高端新材料智能制造关键技术，建立材料及其构件加工成形过程综合优化、精确控制新原理和新方法，支撑材料产业升级换代和跨越式发展。解决材料加工过程影响因素多、复杂多物理场耦合与多目标参数交互作用、组织结构与缺陷演化贯穿全过程等瓶颈难题，为实现高质量制造提供技

术支撑，满足高端关键材料的国家急需，支撑材料产业升级换代，实现高质量发展。

(4) 促进材料加工-虚拟制造-人工智能学科交叉，发展材料加工全过程数字建模与智能调控理论与方法，引领材料加工工程学科发展。

五、高端新材料智能制造共性关键技术的发展方向

目前，高端新材料智能制造的发展重心为融合人工智能与制造技术，突破材料智能制造共性关键技术，构建全生命周期、全流程、多尺度的智能制造系统。“料要成材，材要成器。”材料成形与加工在高端新材料制造中占有重要地位，正在开展智能技术研究的细分领域包括但不限于：铸造、锻造、增材制造、焊接、热处理、半固态成形、热处理、粉末注射成形等。以材料智能成形加工技术为例，亟待发展的材料智能制造共性关键技术主要包括：①面向工程应用的材料基础数据库与数据库技术；②应用先进数据库、集成计算和人工智能等技术，实现材料性能与成形工艺一体化设计的智能设计技术；③材料成形过程工艺参数、材料组织和性能等的在线检测与智能感知技术；④材料成形与加工处理全过程的预测与控制技术；⑤材料智能成形系统，实现对智能成形全过程的虚实交互、协同控制与发展。

(一) 面向工程应用的材料基础数据库与数据库技术

面向工程应用的材料基础数据库重点包含材料综合性能数据、制造工艺数据、高级计算机辅助工程仿真所需数据、标准数据以及材料供应商信息等，按照统一的数据格式将不同来源的数据存储至永久化内存或云端。材料数据库技术主要包括：数据的自动获取技术、多源异构数据存储技术、材料数据云技术设施、材料数据交换技术等。

欧洲、美国等国家和地区自20世纪90年代起开始发展材料性能数据库，如欧洲的Total Materia、Matmatch数据库和美国的MatWeb数据库。国内近年来也发展了例如钢研·新材道、材易通和寻材问料等在线数据库服务平台。但我国材料数据的发展历史较短，在数据库数量、数据量和全民积累数据

与共享数据理念方面明显落后于世界先进水平。

总体而言,我国面向材料成形加工的工艺数据库和质量数据库较为稀缺,面向工程应用的材料数据资源整合和数据体系建设尚待发展,材料数据自动获取技术与软件发展相对滞后,材料数据标准规范、权益保障与激励机制尚显不足。为此,今后应围绕材料研发、生产、认证、应用、服役全链条,进一步整合现有材料产业数据资源,开展面向材料研发和制造过程的数据自动抽取、实时采集、高效管理、智能检索与可视化、数据挖掘等大数据技术研发,形成系统化、成体系的材料数据应用产品链,创新突破和持续输出材料数据、关键技术、软件和产品服务,形成面向工程应用的材料数据赋能生态。

(二) 高端新材料成形智能设计技术

1. 实验数据驱动的材料成形智能设计

借助机器学习建立材料性能与特征工艺参量之间的映射关系,利用这一映射关系预测未知材料性能,再对新材料的成形工艺设计进行指导,是一种典型的数据驱动的材料成形智能设计策略。Fang 等^[17]提出了一种基于最小二乘支持向量机(LSSVM)的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金时效工艺参数-力学/电学性能预测模型,结果表明,与反向传播神经网络结合梯度下降训练算法相比,LSSVM 模型具有更好的广义预测能力。此外,利用优化算法、实验设计算法指导下一步实验,通过迭代反馈的方式快速优化模型,指导新材料开发,也是一种典型的数据驱动材料成形智能设计的关键技术。Chen 等^[18]提出了一种机器学习辅助策略的多目标性能优化方法,通过迭代方式推荐下一个实验,以加速完成多目标优化。面向未来,发展具有可解释性的机器学习方法,发展材料多目标协同优化关键技术,突破复杂材料的多性能需求、内在作用机理复杂等难题,将成为重要发展方向。

2. 集成计算驱动的材料成形智能设计

集成计算集成了横跨原子、微观、介观到宏观等跨尺度的计算方法,包括第一性原理计算、分子动力学、相图计算、相场模拟、有限元等方法。通过跨尺度、多层次地将计算模拟、理论模型和实验工具结合起来,将传统实验试错法的合金开发模式转换成事前预测模式,显著促进了新材料、新工艺

的发展。作为材料基因组计划的重要组成部分之一,集成计算驱动成形智能设计在国内外已得到广泛认可。工程上应用的材料一般是复杂的多元合金体系,其生产和服役温度跨度较大,运用集成计算驱动成形智能设计有利于全流程综合考虑,优化设计,缩短研发时间和减少研发成本。

相较于机器学习黑箱模型,集成计算具有物理可解释性,计算方法有明确的数理方程,能够显式指导材料成形智能设计。此外,目前集成计算所使用的计算软件具有通用的数据结构,有统一的计算标准,可以对计算结果进行横向比较和多人协作完成模型构建。但集成计算驱动成形设计在应用中仍然面临一定的挑战,如计算量和需要的计算资源需求量巨大,缺乏广泛普适的计算方法,存在跨尺度、多物理场的耦合困难等。因而,未来仍需加强集成计算驱动的材料成形智能设计计算方法、理论模型和多功能数据库的研发,从而加速实现面向应用的多层次、跨尺度的集成计算材料模拟平台的建立。

3. 工业大数据驱动的材料成形智能设计

随着第四次工业革命的深入展开,工业大数据日渐成为工业发展重要的战略资源,是推动制造业数字化、网络化、智能化发展的关键生产要素。在传统的材料加工过程中,积累了大量的材料成形数据,这些数据包含的知识可以辅助新材料成形设计。此外,随着高通量计算和高通量实验的发展,高通量成形技术可以辅助新材料成形数据库的建设。通过高通量计算、高通量实验手段,可在短时间内快速获取较多数据,且数据标准统一、数据质量较高。然而,目前存在工业过程全流程、多模态数据采集困难,数据噪声和波动大,数据信息密度低等问题制约了该领域的发展。为此,发展多源异构数据协同挖掘,联合实验、计算和工业生产数据优势,成为未来工业大数据驱动的材料成形智能设计的重要发展方向。

(三) 高端新材料成形过程在线检测与智能感知技术

在高端新材料成形过程中,常见的在线检测系统通常由核心传感器、传输系统、处理系统及显示系统组成。目前,高端新材料成形过程主要的传感器及测量技术有:①材料塑性成形过程的参数测

量，主要包括应变、应力及残余应力；②尺寸测量，主要包括工件长度、宽度、厚度以及复合层或涂层的厚度、直径、不圆度、版型等；③表面粗糙度、表面缺陷及内部缺陷检测；④成形工艺和设备参数测量，主要包括在加工过程中的力、扭矩、变形量、振动、张力、温度、轧机的辊缝、轧件速度、机架应力以及电流、电压、功率等。

智能感知是赋能机器视觉、机器人、扫描和检测等工业自动化的关键技术之一，在薄片厚度测量、工件裂缝以及工件的缺损检测等方面已取得了显著进展。高端新材料生产过程智能感知主要包括数据采集网络、大数据分析以及感知技术3个方面。数据采集网络由射频识别（RFID）、分布式传感器和物联网技术组成；大数据分析包括数据的挖掘-分析-融合以及数据存储-集成；感知技术包括生产状态感知、设备状态感知以及设备之间的智能感知。与国外先进国家的高端新材料成形过程在线检测与智能感知技术相比，我国在核心传感器国产化率、系统集成度、系统稳定性、检测数据服务成形控制能力、“产学研”协同示范应用等方面还存在较大差距。未来，需围绕这些关键问题，针对性开展技术突破，形成高精度快速检测和智能化感知模式。

（四）高端新材料成形过程预测与控制技术

高端新材料成形过程预测与控制技术主要从工业信息物理系统、数字孪生系统以及工业大数据与人工智能3个方面入手，建立起具有动态感知、实时分析、自主决策和精准执行功能的智能成形技术，把握材料生产数据价值，构建针对不同成形技术的材料数据库，并结合实际案例不断进行优化。

1. 工业信息物理系统

面向成形过程的工业信息物理系统主要包含物理系统、信息交互层和信息系统等要素。物理系统包含材料成形过程涉及的各种物理装备和控制系统；信息系统为通过数字化建模技术建立的与物理空间相对应的虚拟空间；物理空间与虚拟空间需要通过信息交互层连接，集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术，实现相互映射、适时交互和高效协同。基于信息物理系统的智能工厂正在引领制造方式向智能化方向发展。

2. 数字孪生系统

数字孪生指在计算机虚拟空间建立的与物理实体高度保真的信息模型。西门子公司、通用电气公司等较早将其应用到航空、医疗、能源等工业领域，引起了广泛关注和高度重视。最近，在美国国家航空航天局（NASA）发布的《2040愿景：材料体系多尺度模拟仿真与集成路径》中，提出采用混合数字孪生技术对制造工艺过程进行分析和改进，显示了这项前沿技术在材料成形加工中的巨大应用前景。由于材料成形过程的复杂性、时变性以及数据难以获取，建立材料成形过程的数字孪生系统具有极大的挑战性。目前，这方面的工作尚处于起步阶段。高端新材料成形过程的数字孪生体建模理论与方法有待完善，全流程数字建模、实时仿真、数字主线构建、互操作等关键技术亟需突破。

3. 工业大数据与人工智能

无论是工业信息物理系统还是数字孪生系统，都离不开工业大数据与人工智能技术的支撑。工业大数据技术，包括数据规划、采集、预处理、存储、分析挖掘、可视化和智能控制等，可使材料成形过程相关的各种数据中所蕴含的价值得以挖掘和展现。用于材料智能系统构建的人工智能的核心技术主要包含：深度学习、计算机视觉、自然语言处理和数据挖掘等^[9]。模拟、新数据源、互操作性、可视化、仪器、平台等多方面的进步共同推动了上述技术的快速发展。随着新一代信息技术、先进制造技术、新材料技术等系列新兴技术的发展，高端新材料成形过程预测与控制技术还将持续得到优化。未来，需充分利用模型、数据、智能，并集成多学科技术，面向产品全生命周期，发挥连接物理世界和信息世界的桥梁与纽带作用，提供更加实时、高效、智能的服务。

（五）高端新材料智能成形系统

为了突破高端新材料规模化制备的成套技术与装备，需要坚持创新驱动和数字赋能相结合，聚焦国家重大战略需求和产业发展瓶颈，加快关键核心技术攻关，大力发展材料智能化制备与成形加工技术与智能制造系统。目前，国际上典型的材料智能成形系统有智能增量成形系统、智能无模拉拔系统、智能自动焊接系统、智能粉末注射成形系统、智能轧制成形系统等。构建高端新材料智能成形系

统的技术难点在于集成策略的开发和实时信息传递与反馈机制的建设。先进智能成形技术的集成策略要求具有统一的技术衔接标准、可靠的衔接桥梁和高的技术稳定性，而实时信息传递与反馈机制要求各先进技术的时效性，即能在极短时间完成计算与输出过程。因此，攻克上述集成技术难题将成为高端新材料智能成形系统发展的重要方向。

六、发展高端新材料智能制造的对策建议

(一) 加强对材料智能制造软/硬件、关键技术与数据标准研究

建议在国家各类科技计划中设置高端新材料智能制造专项，统筹各方资源，加大政策扶持及引导力度，形成稳定的资金支持，推动该领域基础理论、工业软/硬件、关键技术与数据标准等研究工作。推动材料智能制造战略研究，制定发展规划，明确下一步发展路径。紧抓新一轮科技革命和产业变革的历史机遇，通过学科交叉和创新链产业链协同，重点突破材料数据库、数字化建模、实时仿真、数据驱动的工艺智能设计、数字孪生等共性关键技术，形成面向材料制造过程的大数据软/硬件平台。以若干种典型高端新材料和具有代表性的成形加工工艺为突破口，争取在较短时间内取得原创性成果，打造高端新材料智能制造的成功应用案例，以在国内外产生示范引领效应。

(二) 加强高端新材料智能成形创新体系与创新平台建设

高端新材料智能成形共性技术涉及到系统、硬件、软件、基础理论等多个方面，建议整合完善产业创新资源，充分调动企业的积极性，构建该领域覆盖产业链所有环节的创新联盟，统筹国家需求、技术攻关和资源共享，围绕产业链共性技术、关键技术和前沿技术攻关布局，打造具有国际竞争力的协同创新体系与平台，提高从基础研究到工程应用的转化能力。在基础研究方面，充分发挥高校、重点实验室的学科优势，积极开展国际合作与交流，争取原创性成果。在工程应用方面，夯实企业创新主体地位，以需求为引领，汇聚创新要素，打造高端新材料智能制造的核心竞争力。在科技创新服务平台方面，建设面向材料制造的数字云平台，提供

数据共享、数字化建模等基础服务，为企业在云上构建高度仿真的数字孪生系统提供支撑。

(三) 创新人才培养与评价体系，培养学科交叉工程人才

加快人才培养是发展高端新材料智能制造的重要支撑。材料智能成形（数字孪生）系统构建，需要材料科学与工程、机械工程、计算机科学与工程、控制科学与工程等多个一级学科交叉与合作。如何将材料制造的相关专业知识、机理、数据、模型转化为计算机能理解、可处理的信息，是实现高端新材料智能制造的关键，其重要性不亚于掌握机器学习算法等人工智能专业知识。目前，既懂材料制造，又熟悉人工智能方法与技术的复合型人才非常稀缺，建议增设“材料智能制造”专业，创新人才培养与评价体系，培养该领域卓越工程人才。

(四) 加快成果转化，引领行业转型升级

按照国务院发布的《新一代人工智能发展规划》，人工智能将成为带动我国产业升级和经济转型的主要动力。随着人工智能的应用场景从热门的互联网领域扩大深入到各个行业，人工智能赋能工业将成为人工智能新的爆发点。高端新材料制造产业覆盖范围广、产品价值高、对先进装备的支撑作用大，是人工智能应用落地的理想场景。建议从政策、财政、金融、税收、知识产权等方面，引导支持社会资本进入材料智能制造领域，培育独角兽企业，加快技术创新步伐。鼓励“产学研”深度结合，破除成果转化壁垒，加快科技成果转化，通过智能制造研发模式的变革，不断推动和引领传统材料制造行业的转型升级。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 13, 2023; **Revised date:** May 8, 2023

Corresponding author: Ding Wenjiang is a professor from the School of Materials Science and Engineering of Shanghai Jiao Tong University and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is design and processing of advanced magnesium materials. E-mail: wjding@sjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Intelligent Research & Development, Manufacturing and Application of New Materials” (2021-JJZD-01); Key project of National Natural Science Foundation of China (52090042)

参考文献

- [1] 谢曼, 干勇, 王慧. 面向2035的新材料强国战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 1-9.
Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 1-9.
- [2] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部, 中国材料研究学会编. 中国新材料产业发展报告2021 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
Chemical, Metallurgical and Materials Engineering Academic Division of Chinese Academy of Engineering, Chinese Materials Research Society. Development of advanced materials industry in China: Annual report (2021) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022.
- [3] 钟志华, 臧冀原, 延建林, 等. 智能制造推动我国制造业全面创新升级 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 136-142.
Zhong Z H, Zang J Y, Yan J L, et al. Intelligent manufacturing promotes the comprehensive upgrading and innovative growth of China's manufacturing industry [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 136-142.
- [4] 李元元. 新形势下我国新材料发展的机遇与挑战 [J]. 中国军转民, 2022 (1): 22-23.
Li Y Y. Opportunities and challenges for the development of new materials in China under the new situation [J]. Defense Industry Conversion in China, 2022 (1): 22-23.
- [5] 郭东明. 高性能精密制造 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(7): 757-765.
Guo D M. High-performance precision manufacturing [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(7): 757-765.
- [6] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势 [J]. 金属学报, 2022, 58(4): 412-427.
Sun B D, Wang J, Kang M D, et al. Investment casting technology and development trend of superalloy ultra limit components [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 412-427.
- [7] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题 [J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [8] 谢建新. 材料加工技术的发展现状与展望 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 29-34.
Xie J X. Developing situation and prospects of materials processing technologies [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 29-34.
- [9] 潘健生, 王婧, 顾剑锋. 我国高性能化智能制造发展战略研究 [J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 1-6.
Pan J S, Wang J, Gu J F. Study on the development strategy of high performance intelligent manufacturing in China [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(1): 1-6.
- [10] Wadley H N G, Vancheeswaran R. The intelligent processing of materials: An overview and case study [J]. JOM, 1998, 50(1): 19-30.
- [11] Wadley H N G, Eckhart W E. The intelligent processing of materials for design and manufacturing [J]. JOM, 1989, 41(10): 10-16.
- [12] Parrish P A, Barker W G. The basics of the intelligent processing of materials [J]. JOM, 1990, 42(7): 14-16.
- [13] 宿彦京, 付华栋, 白洋, 等. 中国材料基因工程研究进展 [J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1313-1323.
Su Y J, Fu H D, Bai Y, et al. Progress in materials genome engineering in China [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(10): 1313-1323.
- [14] Wang H, Xiang X D, Zhang L T. On the data-driven materials innovation infrastructure [J]. Engineering, 2020, 6: 609-611.
- [15] Agrawal A, Choudhary A. Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the "fourth paradigm" of science in materials science [J]. APL Materials, 2016, 4: 053208.
- [16] 谢建新, 宿彦京, 薛德祯, 等. 机器学习在材料研发中的应用 [J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1343-1361.
Xie J X, Su Y J, Xue D Z, et al. Machine learning for materials research and development [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57 (11): 1343-1361.
- [17] Fang S F, Wang M P, Song M. An approach for the aging process optimization of Al-Zn-Mg-Cu series alloys [J]. Materials & Design, 2009, 30(7): 2460-2467.
- [18] Chen Y, Tian Y, Zhou Y, et al. Machine learning assisted multi-objective optimization for materials processing parameters: A case study in Mg alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 844: 156159.
- [19] Batra R, Song L, Ramprasad R. Emerging materials intelligence ecosystems propelled by machine learning [J]. Nature Reviews Materials, 2021, 6: 655-678.