

# 增材制造产业发展 简报

2023年2月28日

第2期

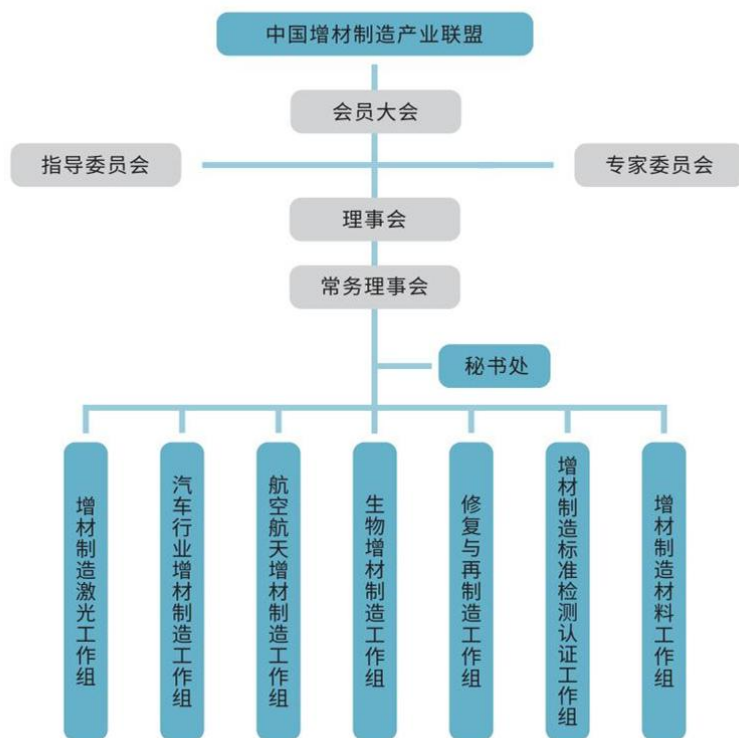
总第042期

---

## 【内容提要】

- 本期关注：2022年“增材制造与激光制造”专项立项汇总
- 政策追踪：铂力特、宁夏共享等被评为工信部2022年度绿色工厂
- 技术进展：航空装备激光增材制造技术发展及路线图
- 行业动态：塑料工程协会 (SPE) 收购法国增材制造在线媒体平台
- 典型应用：香奈儿推出生物增材制造皮肤模型
- 成员展示：宁波中科祥龙轻量化科技有限公司

中国增材制造产业联盟成立于2016年10月19日，是在工业和信息化部指导下，由增材制造领域的企事业单位、高等院校、科研机构、产业园区等128家相关单位，按照自愿、平等、互利、合作的原则，共同发起组成的跨行业、开放性、非营利性的社会组织，秘书处设在工业和信息化部装备工业发展中心。联盟现有成员330余家，已设立工作组7个，是中国增材制造领域**层次最高、规模最大的**行业组织。中国增材制造产业联盟立足于为我国增材制造产业搭建合作与促进平台，着眼于将政府与产业界、顶层设计与企业实践紧密结合起来，致力于支撑行业管理、聚拢行业资源、营造创新环境、促进交流合作，助力中国增材制造产业发展壮大。



## ●本期关注

### (一) 2022年“增材制造与激光制造”专项立项汇总

近期,2022年国家重点研发计划“增材制造与激光制造”重点专项陆续立项,联盟汇总了相关增材制造企业牵头申报项目情况,具体如下表1所示:

表1 增材制造企业牵头专项情况

序号	项目名称	承担牵头单位
1	多种陶瓷材料的光固化增材连续成形理论、关键技术与装备	燕山大学
2	大型高性能结构件增等减材复合绿色智能制造	南京中科煜宸激光技术有限公司
3	个性化食品增材制造与智能化加工装备研制	南京威布三维科技有限公司、北京隆源自动成型系统有限公司
4	激光粉末床熔融增材制造在线监控与质量评价技术	西安空天机电智能制造有限公司
5	面向精密医疗器械的微纳增减材协同制造技术及应用研究	北京理工大学重庆创新中心、重庆摩方精密科技有限公司
6	激光增材制造一体式打印头研发与产业化	江苏菲镭泰克激光技术有限公司、北京工业大学

“多种陶瓷材料的光固化增材连续成形理论、关键技术与装备”项目主要开发适用于光固化增材制造的陶瓷浆料配制理论及陶瓷多材料成形方法,开发切片软件及成形装备,提出高效加工策略,形成结构设计-材料组分-制备工艺-装备全链条评价方法,在医疗和航空航天等领域应用验证,提升多材料陶瓷结构件设计制造水平,促进我国高端陶瓷增材制造装备的创新发展与转型升级,推动陶瓷增材装备制造企业与航空航天、生物医疗服务业融合发展。

“大型高性能结构件增等减材复合绿色智能制造”项

目，针对传统大型金属构件激光送粉增材制造存在的组织不均匀、冶金缺陷多、成形精度低等瓶颈问题，重点研发具有组织在线局全域调控、缺陷自动检测、在线监测闭环控制功能的高负载、高精度、双龙门增等减复合制造装备与工艺，突破全流程跨尺度组织与应力数值模拟仿真、多工序多工步协调控制、在线监测控制与动态路径规划等关键技术，全面构建增等减材复合制造技术体系。为船舶、高铁、核电、航天等领域实现大型结构件高性能、高精度复合制造提供技术支撑与装备保障，并进一步实现应用验证和批量制造。

**“个性化食品增材制造与智能化加工装备研制”**项目将为个性化食品增材制造提供技术依据和基材、装备、生产线支持，丰富和发展食品增材制造基础理论；提升我国食品增材制造工业水平与产业规模，增加就业岗位；革新现有传统食品增材制造打印原料制备工艺，其产品直接用于市场投放；提升产业标准化、规模化水平，推动企业高效生产、减少资源和能源浪费，实现生态效益。

**“激光粉末床熔融增材制造在线监控与质量评价技术”**项目研究“机理-测试-评价-调控”全链条的LPBF增材制造在线监控和质量评价关键技术，解决金属增材制造规模化生产的质量保障难题，进一步提升我国金属增材制造装备与技术能力，具有重要的科学技术及工程应用价值，同时会产生显著的社会经济效益。

**“面向精密医疗器械件的微纳增减材协同制造技术及应**

用研究”项目主要针对精密医疗器件微型化、复杂化、定制化的发展趋势，及对高精度、跨尺度、复杂三维结构的高效低成本制造技术的迫切需求，结合北理工重庆创新中心飞秒激光技术和摩方精密微纳增材制造技术，通过增材、减材协同制造模式，实现两种技术的优势互补，并最终实现以给药微针为代表的个性化精密医疗器件的小批量制造应用示范。

“激光增材制造一体式打印头研发与产业化”项目针对大幅面、高效激光选区熔化增材制造技术的迫切需求，通过自主创新，攻克多振镜协同运动算法和光束扫描自适应控制原理、一体式阵列打印头光机电系统优化设计与协同控制、打印头状态监测传感与预测性维护等关键科学和技术问题，研制开发一体式四振镜阵列动态聚焦打印头，形成定型产品，填补国内空白，打破国外垄断，实现激光选区熔化增材制造关键核心部件的国产化和产业化。

国家重点研发计划由原来的国家重点基础研究发展计划（973计划）、国家高技术研究发展计划（863计划）、国家科技支撑计划、国际科技合作与交流专项、产业技术研究与开发基金和公益性行业科研专项等整合而成，是针对事关国计民生的重大社会公益性研究，以及事关产业核心竞争力、整体自主创新能力和国家安全的战略性、基础性、前瞻性重大科学问题、重大共性关键技术和产品，为国民经济和社会发展主要领域提供持续性的支撑和引领。

以上项目简介内容摘自网络

## ● 政策追踪

### (一) 铂力特、宁夏共享等被评为工信部 2022 年度绿色工厂

2023 年 2 月 9 日，工业和信息化部公示了 2022 年度绿色制造名单，此次共有 880 家绿色工厂，47 家绿色工业园区，以及 112 家绿色供应链管理企业入选，联盟成员单位铂力特和宁夏共享榜上有名。



图 1 2022 年度绿色制造名单公布

绿色工厂是在钢铁、有色金属、化工、建材、机械、汽车、轻工、食品、纺织、医药、电子信息等重点行业选择一批工作基础好、代表性强的企业，加快创建具备用地集约化、生产洁净化、废物资源化、能源低碳化等特点的绿色工厂；通过采用绿色建筑技术建设改造厂房，预留可再生能源应用场所和设计负荷，合理布局厂区内能量流、物质流路径，推广绿色设计和绿色采购，开发生产绿色产品，采用先进适用的清洁生产工艺技术和高效末端治理装备，淘汰落后设备，建立资源回收循环利用机制，推动用能结构优化，实现工厂的绿色发展。

相关增材制造企业入选，反映其工厂绿色低碳建设和绿色发展符合国家绿色制造体系建设工作部署，深入实施绿色制造工程，有利于发挥先进典型的示范带动作用，对加快增材制造技术向绿色低碳发展起到推动作用。

表 2 获绿色工厂企业名单

序号	地区	工厂名称	第三方评价机构
761	陕西	西安铂力特增材技术股份有限公司	西安电炉研究所有限公司
798	宁夏	共享智能装备有限公司	宁夏创绿环保科技有限公司

## （二）增材制造助力上海市“四大工艺”高质量发展

2023年2月1日，上海市印发《上海市推动四大工艺行业高质量提升发展实施意见（2023-2025）》（“以下简称《意见》”），巩固四大工艺（铸造、锻造、电镀、热处理）在汽车、高端装备、电子信息等重点应用领域的关键作用，保障产业链供应链基础稳定，提升实体经济产业韧性。在《意见》中，砂型增材制造技术作为先进工艺，推进铸造行业向高效化、精细化升级。

《意见》把控贯通产品、工艺、工厂、园区等重点环节实施五大重点任务，全面促进行业转型升级，并在任务二“先进工艺提升行动”中提出推进砂型增材制造技术等工艺装备的突破。砂型增材制造技术相对于传统铸造工艺，其无需制作木模、模样等，具有制造周期短、研发成本低、砂型、砂芯一体化制造及可制造出任意复杂形状铸型或原型等优点，可实现复杂铸件的整体近净成形，持续赋能传统铸造行业向高效化和精细化迈进。

铸造、锻造、电镀、热处理等四大工艺在先进制造业集群中发挥重要的基础支撑功能，《意见》印发对先进工艺技术装备突破、产业配套能力增强、生产效率提升以及能耗成本降低起到至关重要的作用，引导上海市四大工艺向数字化、绿色化、专业化、集约化转型提升，实现高端制造行业的高质量发展。



图 2 《上海市推动四大工艺行业高质量提升发展实施意见（2023-2025）》印发

## ● 技术进展

### (一) 航空装备激光增材制造技术发展及路线图

增材制造从三维模型出发实现零件的直接近净成形制造。相比传统的减材制造，增材制造将多维制造变成简单的由下而上的二维叠加，降低了设计与制造的复杂程度。

激光增材制造是当前航空装备领域最具代表性的增材制造方法，主要包括以粉床铺粉为技术特征的激光选区熔化和以同步送粉为技术特征的激光直接沉积。激光选区熔化工艺热输入小、成形尺寸精度高，适合制造航空发动机喷嘴、涡流器等复杂结构零件以及拓扑点阵等新型结构；激光直接沉积工艺效率较高、力学性能较好，但制造精度不高，适合制造飞机框梁等重要承力结构。由于国内外对激光增材制造技术非常重视，其技术发展迅速，陆续应用于飞机和航空发动机的制造，并且呈现出快速增长的趋势。

为了更好地把握增材制造的发展现状和趋势，提前做好航空领域增材制造技术发展的战略布局，推进增材制造在航空领域的发展与应用，本文针对激光增材制造最近几年的发展，开展文献、资料、信息的搜集、整理、分析。在对增材制造现状和发展趋势分析的基础上，提出 2035 年航空领域增材制造技术发展目标和相应的政策和环境支撑、保障需求，并尝试给出 2035 年技术发展路线图建议。

#### 一、发展需求

激光增材制造基于数模切片通过逐层堆积实现零件近

净成形制造，无需模具，节省材料，缩短研制和生产周期，降低制造成本。特别适合复杂形状零件、梯度材质与性能构件、复合材料零件和难加工材料零件的制造，还支持结构设计创新和结构功能一体化制造。

航空航天领域的零件，外形复杂多变，材料硬度、强度等性能要求较高，难以加工且成本较高。而新生代飞行器正在向高性能、长寿命、高可靠性以及低成本的方向发展，采用整体结构、复杂大型化是其发展趋势。正是基于此发展趋势，激光增材制造技术越来越受到航空航天制造商的青睐。

航空发动机燃油喷嘴、轴承座、控制壳体、叶片等零件，内部具有复杂油路、气路和型腔，为提高效能而进行结构创新设计，更增加了结构的复杂性和制造难度。飞机发动机舱进、排气门格栅结构，武器舱的舱门支座等部件，结构非常复杂，这些新型复杂构件的成形对基于激光选区熔化的增材制造技术具有迫切需求。

航空发动机各类机匣、压气机/涡轮整体叶盘、尾喷调节片等结构，形状复杂，为提高效能甚至需采用异种或梯度材料结构。飞机超高强度钢和不锈钢接头、滑轨、起落架，铝合金承力框、梁，钛合金框、支座、滑轨、滑轮架、筋壁板等承力构件，高马赫飞行器翼舵格栅结构承载骨架，为提高减重和承载效能须进行拓扑优化结构创新设计，结构的复杂性和制造难度增加，采用传统工艺制造难度大，对激光直接沉积增材制造具有明确技术需求。

高推重比发动机涡轮进口温度的提高，要求采用超高温

金属间化合物以及金属基/陶瓷基复合材料等新型高温结构材料。新型高温/超高温材料零部件的研制对激光增材制造技术提出了潜在需求。

飞机、发动机某些带局部凸台、耳片等特殊结构的承力构件，采用锻造工艺无法保证局部组织和性能；大型飞机的超大规格钛合金承力框，超出现有锻造设备的加工能力。对锻造+增材制造/增材连接的复合制造技术具有明确技术需求。

激光增材制造技术经过近年的项目支持，基本解决了原材料、成形工艺、复杂零件制造等关键技术，开始获得应用。目前制约激光增材制造大规模应用的瓶颈之一是疲劳问题。需要特别重视激光增材制造疲劳问题的原理性研究。

为了提高航空产品激光增材制造的工艺过程稳定性和质量，需要发展基于熔池动态监测、粉末床和熔融层可见光检测的在线监测、检测技术。

航空领域对激光增材制造的需求主要体现在以下几个方面：

表 3 航空领域激光增材需求

序号	重点方向
1	飞机钛合金框梁重要承力结构高性能高可靠激光直接沉积
2	飞机超高强度钢起落架抗疲劳长寿命激光直接沉积
3	飞机钛合金、铝合金格栅点阵复杂结构激光选区熔化
4	航空发动机燃油喷嘴类零件激光选区熔化
5	航空发动机涡流器、叶片类零件激光选区熔化
6	航空发动机控制、附件壳体类零件激光选区熔化
7	航空发动机机匣、轴承座类承力零件激光选区熔化
8	航空发动机整体叶盘/机匣类承力零件激光直接沉积
9	飞机、发动机超大规格结构锻造+增材制造/增材连接的复合制造
10	激光增材制造疲劳问题的原理性研究
11	激光增材制造过程的在线监测、检测技术研究

## 二、目标

突破飞机、发动机材料激光增材制造缺陷、组织、力学性能控制关键技术，掌握粉末设计与制备技术，制定材料、工艺、检测标准，建立工艺、性能数据库和冶金图谱，掌握零件产品质量控制技术，制定零件产品技术标准。在产品增材制造质量控制技术、产品技术标准研究和零件充分考核验证的基础上，推进激光增材制造在航空、航天、船舶、核工业等重点制造领域的应用。至 2035 年，在航空领域普通金属激光增材制造全面量产应用；金属间化合物增材制造的组织-性能-变形控制技术全面突破，性能验证基本完成，功能考核部分完成，部分产品进入量产。铌-硅、陶瓷基材料增材制造物理冶金原理得到揭示，性能验证基本完成，部分产品开始装机应用。

## 三、重点产品

飞机：①钛合金框梁重要承力结构；②超高强度钢起落架外筒；③钛合金、铝合金格栅点阵复杂结构。

发动机：①航空发动机燃油喷嘴类零件；②航空发动机涡流器、叶片类零件；③航空发动机控制、附件壳体类零件；④航空发动机机匣、轴承座类承力零件；⑤航空发动机整体叶盘/机匣类承力零件。

## 四、2035 年发展路线图

表 4 2035 年航空领域激光增材制造技术发展路线图

重点方向 Key directions	2025年 2025	2030年 2030	2035年 2035
1: 复杂结构激光选区熔织-性能-变形控制技术全面突破,性能验证基本完成,功能考核部分完成,部分产品进入量产。金属间化合物增材制造物理冶金原理得到揭示。	技术:普通金属增材制造的组织-性能-变形控制技术全面突破,性能验证基本完成,功能考核部分完成,部分产品进入量产。金属间化合物增材制造物理冶金原理得到揭示。	技术:普通金属增材制造全面量产应用。金属间化合物增材制造的组织-性能-变形控制技术全面突破,性能验证基本完成,功能考核部分完成,部分产品进入量产。镍-硅、陶瓷基材料增材制造物理冶金原理得到揭示。	技术:金属间化合物增材产品完成性能验证、功能考核、定型,进入全面批量应用。镍-硅、陶瓷基材料增材制造的组织-性能-变形控制技术全面突破,性能验证、功能考核部分完成,部分产品开始进入应用。
2: 承力结构激光直接沉积增材制造	增材制造的航空飞机次承力结构和发动机静止零部件得到大量应用。	增材制造的航空飞机重要承力结构和发动机旋转零部件得到大量应用。	增材制造的航空新材料、新结构零部件得到应用。
3: 耐高温新应用:增材制造的航空飞机次承力结构和发动机静止零部件得到大量应用。	增材制造的航空飞机次承力结构和发动机静止零部件得到大量应用。	增材制造的航空飞机重要承力结构和发动机旋转零部件得到大量应用。	增材制造的航空新材料、新结构零部件得到应用。

摘自《航空材料学报》中《航空装备激光增材制造技术发展及路线图》王天元, 黄帅, 周标, 郑涛, 张国栋, 郭绍庆

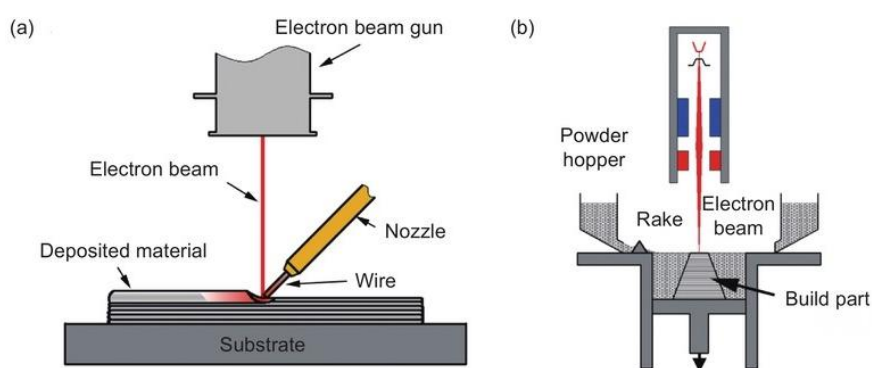
## (二) 航空装备电子束增材制造技术路线图

增材制造技术被认为是制造技术的一次革命性突破。电子束增材制造技术能够实现复杂零件的无模具快速成形,加工余量小,材料利用率高等特点,在航空装备领域具有广泛的应用前景。

按照所用原材料和成型方式的不同,电子束增材制造分为基于丝材的电子束熔丝增材制造技术和基于预置粉末的电子束选区熔化增材制造技术。电子束熔丝增材制造技术是在真空环境中,用高能量密度的电子束轰击金属表面形成熔

池，送丝装置将金属丝材送入熔池并熔化，同时熔池按照预先规划的路径运动，金属凝固、逐线、逐层堆积，形成致密的冶金结合，直接制造出金属零件或毛坯（图 3（a））。电子束熔丝增材制造具有成形效率高、真空环境材料冶金质量优、丝材成本低、可制造大尺寸结构件等特点。此外，作为定向能量沉积工艺方法的一种，电子束熔丝增材制造技术也可用于零件的修复。

电子束选区熔化增材制造技术是利用计算机把零件的三维模型进行分层处理，获得各层截面的二维轮廓信息并生成成形路径，电子束按照预定的路径进行二维图形的扫描预热及熔化，熔化预先铺放的金属粉末，逐层堆积，最终实现金属零件的近净成形（图 3（b））。与激光选区熔化增材技术相比，电子束选区熔化增材技术具有真空环境、电子束扫描速度快（ $10^3$  m/s）、成形效率高、残余应力小等优点。电子束选区熔化工艺可实现高温预热，使其非常适合室温低塑性材料（如钛铝金属间化合物）的快速成形制造。



(a) 熔丝； (b) 选区熔化

图 3 电子束增材制造原理示意图

为了更好地把握电子束增材制造的发展趋势，提前做好航空领域电子束增材制造技术发展的战略布局，推进电子束

增材制造在航空领域的发展与应用，针对电子束熔丝及电子束选区熔化增材制造技术，开展文献、资料、信息的搜集、整理、分析。在对电子束增材制造现状和发展趋势分析的基础上，提出 2035 年航空装备增材制造技术发展目标和相应的政策和环境支撑、保障需求，并尝试给出面向 2035 年的技术发展路线图。

针对电子束增材制造技术发展趋势制定了面向 2035 年的航空装备电子束增材制造技术路线图，如图 4 所示。本技术路线图包括发展需求、目标、关键技术、应用和战略支撑与保障 5 部分。

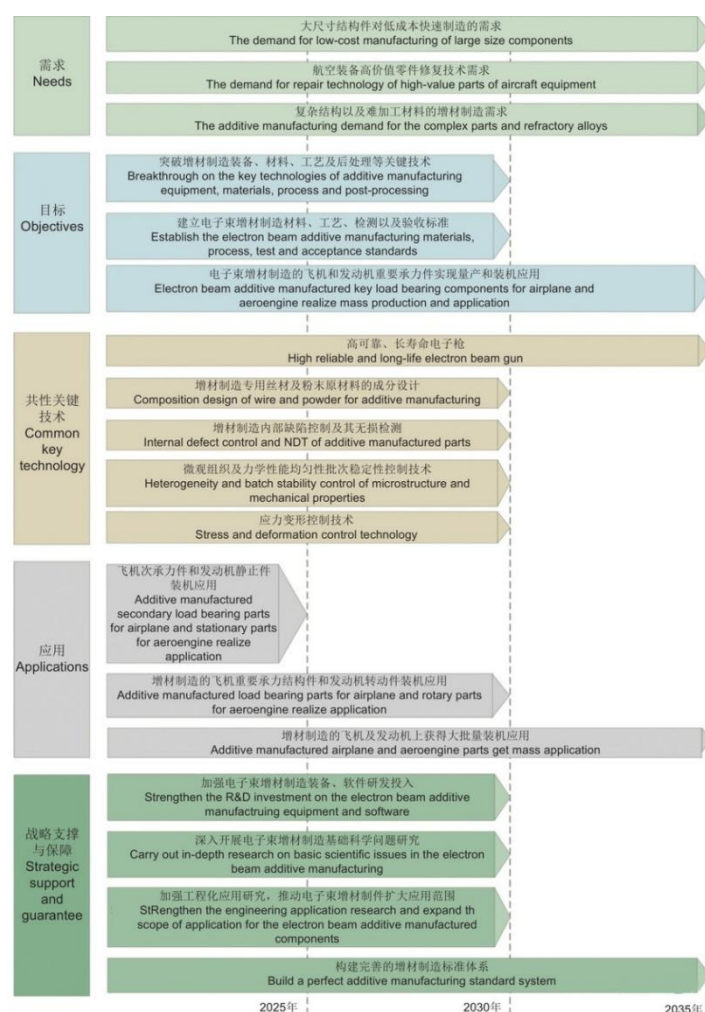


图 4 面向 2035 年的航空装备电子束增材制造发展技术路线图

## 一、发展需求

基于航空大尺寸结构件对低成本快速制造的需求和高价值零件服役后的修复需求，特别是对于难加工的钛合金和高温合金以及新型梯度材料结构，迫切需要以电子束熔丝增材制造技术为代表的快速、低成本制造技术。

复杂结构以及难熔合金制件的制造对电子束选区熔化增材技术具有迫切需求。例如，采用传统方法制造 TiAl 合金低压涡轮叶片、冷却结构和金属基复合材料易开裂，制造难度大，而电子束选区熔化增材具有的真空、高温预热低应力等特点使其非常适合室温低塑性材料制件的制造。此外，电子束选区熔化增材能够满足点阵等传统方法难以制造的新型结构的优化设计制造。

航空装备对电子束增材制造需求的具体体现包括以下几个方面：飞机钛合金框梁、滑轨、滑轮架、起落架等重要承力件的电子束熔丝增材制造；大尺寸结构件的锻造/铸造+电子束熔丝复合制造；航空发动机机匣类零件的电子束熔丝/选区熔化增材制造；航空发动机钛合金及高温合金叶片、整体叶盘、离心叶轮的电子束熔丝/选区熔化增材制造；航空发动机 TiAl 低压涡轮叶片、导向器、管路等复杂结构的电子束选区熔化；航空发动机难熔合金等新材料复杂结构电子束选区熔化增材制造。

## 二、目标

突破电子束增材制造装备的核心元器件及在线监控、电子束增材制造用粉末/丝材原材料、缺陷控制、后处理、组织

及力学性能调控等关键技术，建立组织性能数据库，制定材料、工艺及检测标准。在产品增材制造质量控制技术、产品技术标准研究和零件充分考核验证的基础上，推进电子束增材制造在航空装备上的应用。至 2035 年，在航空领域实现电子束熔丝增材制造重要承力结构件的量产应用、电子束选区熔化 TiAl 金属间化合物低压涡轮叶片以及传统钛合金和高温合金制件的量产和装机应用。

### 三、关键技术

电子束增材制造关键技术包括：

#### 1. 高可靠长寿命电子枪

电子枪是发射、形成和会聚电子束的装置，为增材制造提供能量源，是电子束增材制造设备的核心部件。电子束增材制造过程中电子枪需连续工作数十至数百小时，对阴极寿命要求高。增材制造过程中产生大量金属蒸气，阳离子进入电子枪的阴极与阳极之间易导致放电现象并造成过程中断。此外，基于电子光学的电子枪聚焦及扫描线圈设计和精确控制是获得优质电子束的重要条件，选区熔化过程中需保证不同位置（不同电子束偏转角度）处电子束焦点位置的一致性和电子束到达位置的准确性。因此，高可靠长寿命的电子枪是关键技术之一。

#### 2. 增材制造专用丝材及粉末原材料的成分再设计

电子束增材制造过程中材料在高能量密度的电子束作用下快速熔化凝固，由于不同元素的蒸气压不同，使得低熔点元素快速挥发损失，造成增材制件成分与原材料成分差异

较大，甚至不能满足材料标准下限要求。例如，钛合金真空电子束熔丝增材制造过程中 Al 元素烧损比例可达 10%—20%，钛铝金属间化合物电子束选区熔化增材同样面临 Al 元素烧损问题。钛合金中合金元素的烧损减弱固溶强化水平，降低增材制件力学性能。对于铸造性能差的铝合金，由于固液温度区间大，热裂敏感性高，增材制造过程中易形成热裂纹。通过在粉末/丝材中添加微量元素可有效细化晶粒并改善热裂性能。高 $\gamma'$ 含量高温合金增材制造同样面临热裂纹问题，需针对增材制造工艺特点设计专用高温合金成分，使其抑制裂纹缺陷产生的同时保持高的力学性能。

### 3. 增材制件内部缺陷控制及其无损检测技术

电子束增材制件内部缺陷主要有气孔、未熔合、裂纹等。缺陷将直接导致增材制件的报废或早期失效，因此控制缺陷是增材制造的关键技术。由于增材制造组织的各向异性以及晶粒外延生长特征，使其无损检测，如超声检测与锻件的检查差异较大，建立内部缺陷形状尺寸与检测结果间准确的定量关系是增材制件检测的难点和关键技术。

### 4. 增材制件组织性能均匀性及批次稳定性控制技术

增材制造过程中零件各部位温度场不同，组织特征存在微小差别，使其存在力学性能的不均匀性，此外，组织特征各向异性使其力学性能存在各向异性。因此，如何保证增材制件组织性能的均匀稳定和优良的力学性能水平是其推向工程应用的关键。

### 5. 增材制件应力变形控制技术

增材制造过程中零件长期经历电子束的周期性、剧烈、非稳态、循环加热和冷却及其短时非平衡循环固态相变。在已凝固金属强约束下移动熔池的快速凝固收缩等超常热物理和物理冶金现象，在零件内产生应力水平很高、演化及交互作用过程极其复杂的热应力、相变组织应力和约束应力及其强烈非线性强耦合交互作用和应力集中，导致零件严重翘曲变形和开裂，因此，应力变形控制是电子束增材制造的关键技术之一。

#### 四、应用

电子束增材制造在航空装备上的应用包括：钛合金框梁重要承力结构；钛合金滑轮架、支座等承力结构；飞机超高强度钢、钛合金起落架、发动机机匣、发动机整体叶盘/离心叶轮、发动机 TiAl 低压涡轮叶片、发动机导向叶片、导向器等复杂结构以及难熔合金等新材料复杂结构。

#### 五、战略支撑与保障

在战略支撑与保障方面需加强增材制造装备研制投入，提高装备技术成熟度，特别是增材制造设备的关键部件如电子枪、闭环控制系统、路径规划软件以及过程监控系统等。加强增材制造工艺基础关键技术的研发投入，多学科交叉，突破原材料、工艺、组织及性能均匀性和稳定性控制。加强工程化应用研究投入，依据增材制造特点选取典型结构再设计，实现多领域典型结构件的增材制造应用研究，并逐步推广应用。

摘自《航空材料学报》中《航空装备电子束增材制造技术发展及路线图》，作者张国栋，许乔郅，郑涛，郭绍庆，熊华平

### （三）航空装备电弧熔丝增材制造技术路线图

航空制造业作为高端技术密集型产业，一直代表着世界各国制造业的发展方向，是一个国家制造业实力和国防工业现代化水平的综合体现。航空航天高端装备具有结构复杂、制备工序多、批量小等特点，随着大飞机、航空发动机、新一代运载火箭等不断发展，航空航天典型构件产品结构趋向复杂化、大型化，新材料不断涌现，传统锻造、锻造结合机械加工的制造方法越来越难以满足上述制造需求，而增材制造技术能够较好地解决此类问题。

增材制造技术从零件的三维 CAD 模型出发，无需模具即可实现复杂结构金属构件的材料-结构一体化近净成形，为航空装备高性能构件的设计与制造提供新的工艺技术途径。航空航天高端装备高载荷、极端耐热、超轻量化和高可靠性的特性决定了金属材料增材制造将成为航空航天领域重点发展方向。电弧熔丝增材制造技术（WAAM）是一种金属材料近净成形制造技术，该技术被欧洲航天局视为一种低能耗、可持续的绿色环保制造技术；近年来，随着增材制造技术向高效率、低成本的方向发展，WAAM 越来越受到国内外航空航天工业的重视。

通过对电弧熔丝增材制造的定义、技术分类、成形系统及原理进行论述，分析目前电弧熔丝增材制造技术在航空装备的大型、中等复杂构件制备方面所面临的关键共性问题，提出 2035 年 WAAM 成形关键共性技术和技术路线规划图。

## 一、航空装备 WAAM 成形关键共性技术

### 1. WAAM 用高品质丝材制备技术

WAAM 成形所需原材料丝材的直径受送丝机构的导丝嘴口径限制，通常有 $\phi 1.0\text{ mm}$ 、 $\phi 1.2\text{ mm}$ 、 $\phi 1.6\text{ mm}$ 三种规格。WAAM 技术制备航空航天领域用大型构件需要使用同牌号的原材料丝材以确保构件的性能，现阶段航空装备中适用于 WAAM 技术成形的目标零件所用材料为难变形材料，如 ZL114A 铝合金、TiAl 金属间化合物、A-100 超高强度钢等均存在变形抗力大、加工硬化率高、伸长率低及室温难以变形等问题，采用常规加工方法减径制备出直径 $\phi 0.8\sim 1.6\text{ mm}$ 的丝材具有较大的技术难度，如何实现高品质、细规格及满足自动送丝系统使用要求的丝材制备是 WAAM 技术制备航空装备高性能零件的前提。

### 2. WAAM 技术专用丝材的成分设计及新材料开发

WAAM 增材过程中热源产生的温度非常高，如 TIG 电弧最高温度达到 8000 K，而 PAW 电弧最高温度则达到 24000 K。原材料丝材中的低沸点元素在高温作用下发生挥发，造成元素烧损，导致成形构件的低沸点元素偏低、化学成分不合格，从而严重影响构件的各项性能，严重时造成构件报废。因此，为获得高质量的 WAAM 增材构件，需对原材料丝材进行成分设计及优化，开发出适用于 WAAM 技术专用的直径 $\phi 1.2\sim 1.6\text{ mm}$ 的丝材。

### 3. 针对 WAAM 技术的路径规划软件开发

电弧熔丝增材制造技术虽然具有其独特的优越性，但在

实际生产中存在两个问题：弧坑塌陷导致的形状误差和过高的表面粗糙度。解决以上问题的主要方法则是依赖于路径规划方式的优化，路径规划方式的不同会对零件的几何形状精度、表面焊接质量、内部的显微组织和成形效率等造成影响。现有的增材制造模型分层切片方法主要有光栅扫描式、轮廓偏移式及分型线路径填充方式，上述路径规划方式均是基于单一路径规划方式的分析，但由于 WAAM 成形实际零件的结构复杂性，单一的路径规划方式往往不能起到很好的效果，故开发 WAAM 技术专用的路径规划软件成为新的研究重点。

#### 4. WAAM 成形过程中在线监控与反馈控制技术

WAAM 成形过程中气孔、开裂、变形及未熔合等冶金缺陷严重影响构件的成形质量，冶金缺陷的产生与熔池形态不稳定和温度不均匀分布密切相关。因此，采用视觉传感、红外测温传感、电参数传感等对温度、熔池形状以及电弧弧长等进行实时监控，进一步设计调控策略，及时调控成形工艺与过程是现阶段提高制造精度、确保成形件质量的重要手段。

## 二、航空装备 WAAM 成形技术发展路线规划图

图 5 按照技术成熟度提出了现在至 2035 年航空装备 WAAM 成形技术发展路线规划图。

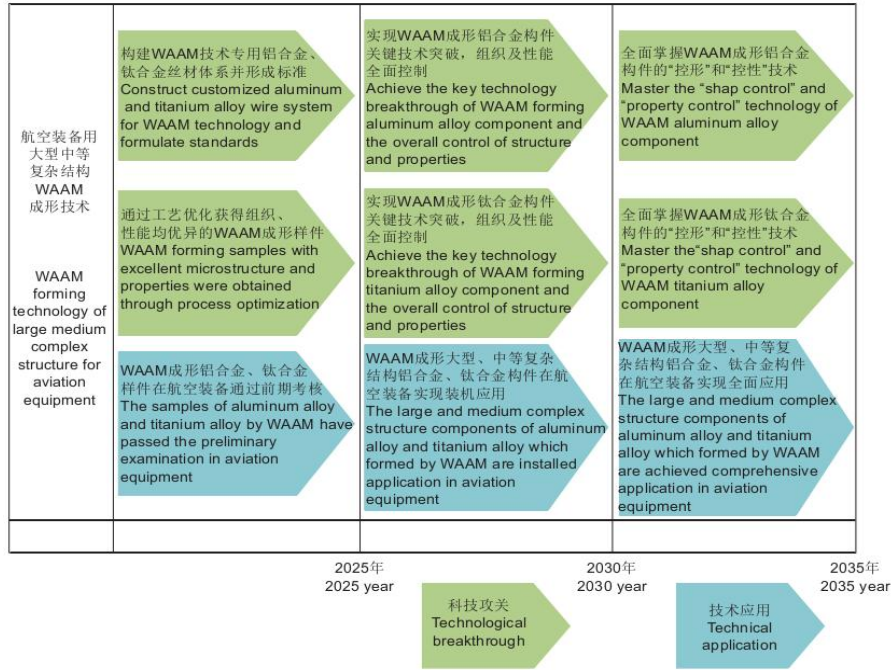


图 5 航空装备 WAAM 成形技术发展路线规划图

摘自《航空材料学报》中《航空装备电弧熔丝增材制造技术发展及路线规划图》，作者郑涛，郭绍庆，张国栋，施瀚超

## ● 行业动态

### (一) 塑料工程协会 (SPE) 收购法国增材制造在线媒体平台

近日，塑料工程协会 (SPE) 收购法国顶级增材制造在线媒体平台 3D natives，扩展其在增材制造领域的业务。

3D natives 成立于 2013 年，总部位于巴黎，专注于国内增材制造行业的资讯、技术、产品以及行业发展等。该网站每月接待超过 120 万的访问者，提供增材制造产品评估、B2B 咨询、B2B 品牌建设等内容和活动管理等服务，此外，还提供最新的增材制造企业、产品名录和商业信息活动。



图 6 塑料工程协会 (SPE) 收购增材制造媒体平台 3D natives

收购后，3D natives 将保留其在美国、布鲁塞尔和巴黎的办事处并通过五种语言发布每日行业新闻。在“Additive”品牌下，3D natives 还将举办专门针对医疗、汽车和航空航天领域的线上和线下论坛活动，活动邀请包括欧莱雅、奥迪、美国国家航空航天局和波音等公司的 200 多名行业专家，参与人数将达到 15000 人。

## （二）北京积水潭医院-爱康医疗 3D 打印联合实验室 落地揭牌

2023 年 2 月 22 日，北京积水潭医院-爱康医疗 3D 打印联合实验室落地揭牌。作为骨科领域国内首创医企联合实验室，旨在提高医企研发创新和技术迭代效率，不断促进科技创新成果转化应用，创新诊疗模式，服务更多患者。



图 7 3D 打印联合实验室

在联合实验室成立之前，北京积水潭医院与爱康医疗已展开全方位、多科室合作，基于金属增材制造技术，联合开展技术攻关、产品研发，先后获批 6 项定制式骨科植入物产品注册证。目前，可使用高分子材料和金属材料，为患者提供个性化临床解决方案，帮助患者消除病痛。

未来，北京积水潭医院-爱康医疗 3D 打印联合实验室将面向临床诊疗难点，建立高水平联合攻关团队，围绕骨创伤、肩、肘、腕、踝、髌、膝、脊柱等部位开展定制化产品联合开发，形成可以广泛临床应用的系列化骨科植入物产品，研发一批具有国际领先水平的临床诊疗新方法、新技术和新产

品，共同推动我国骨科行业高质量发展。

### （三）《增材制造 激光粉末床熔融用高温合金粉末》 国家标准预审会在郑州召开

2023年2月10日，由全国增材制造标准化技术委员会组织，中机新材牵头起草的《增材制造 激光粉末床熔融用高温合金粉末》等2项国家标准预审会在郑州召开。



图8 国标预审会在郑州召开

来自中机新材料研究院（郑州）有限公司、无锡市检验检测认证研究院、西安铂力特增材技术股份有限公司、西安增材制造国家研究院有限公司、鑫精合激光科技发展（北京）有限公司、中国航发商用航空发动机有限责任公司、西门子（中国）有限公司等28家单位的37位专家参加了会议。

与会专家围绕征求意见稿进行了讨论并进一步提出了意见建议。后续，工作组将根据专家意见，对标准进行细致完善，形成送审稿。

双循环新发展格局下，标准是企业 and 产品通向市场的通

行证，标准就是制高点、话语权、控制权。中机新材近年来积极开展标准化工作，主持和参与制（修）订国家、行业、团体、企业标准 10 余项。本次牵头制定《增材制造 激光粉末床熔融用高温合金粉末》国家标准，将进一步助推增材制造行业标准化进程，推动创新优势转化为规则优势，规则优势转化为产业发展优势、竞争优势，助力高温合金粉末产品的推广与应用。

## ● 典型应用

### （一）香奈儿推出生物增材制造皮肤模型

2023年2月27日，香奈儿与 LabSkin Creations 合作利用生物增材制造技术制造出带有色斑的人类皮肤模型，为护肤品开发和测试提供更准确的方法。

LabSkin Creations 是一家法国初创公司，致力于制造和开发多功能的人体生物组织、仿真皮等。LabSkin Creations 与香奈儿合作，利用生物技术制造了带有色素斑的人类皮肤模型，完成世界首例细胞培养技术和生物增材制造技术融合制造的皮肤组织，更精准定位皮肤缺陷的区域，增加护肤产品的效果。

该皮肤模型制造过程是将人类皮肤细胞在聚乳酸支架上培养，然后将其作为生物增材制造技术的原材料进行打印。聚乳酸支架能够为细胞提供支撑和定位作用，并促进它们在制造过程中形成具有所需结构的组织，有色素斑的区域的皮肤模型需在细胞中加入特殊胶体。

目前，许多化妆品品牌正在探索增材制造技术的应用潜力，用于定制化、创新以及更高效的产品开发。例如，Cosmogen 利用金属增材制造技术创建了复杂几何形状的定制化涂抹器，Albéa 也使用增材制造技术打造化妆品包装，欧莱雅则利用增材制造技术缩短产品开发时间，拥有多种不同技术的增材制造装备，包括 FDM、SLA 和 Multi Jet Fusion。

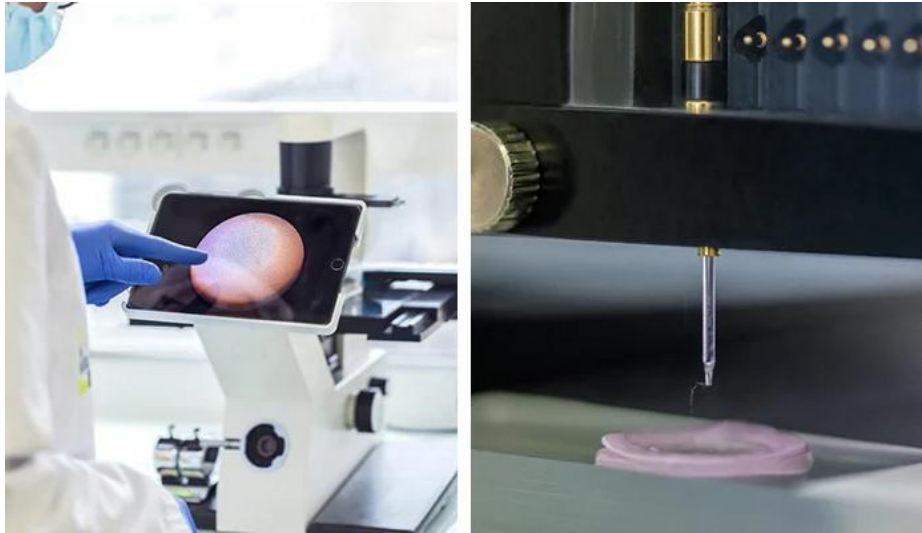


图9 含有素细胞的人类皮肤模型

## （二）增材制造开启测井仪器维修新纪元

2023年2月26日，中油测井物资装备公司采用基于增材制造的修复再制造技术，成功修复了ESCT井壁取心测井仪，并在华北油田留69-72X井顺利完成测井施工。

井壁取心器是采用机械液压驱动技术,将金刚石钻头垂直井壁钻取岩心的工具，以往的ESCT井壁取心仪器关键零部件损伤后，使用传统技术无法修复，采购更换零部件成本高且影响维保时效。对此，该公司联合相关增材制造厂商，利用修复再制造设备和数控机床进行断面增材和车铣，经过高温高压、安全拉力、超声波探损检测，该零部件性能完全满足技术要求。仪器经过总装调试，顺利在华北油田完成取心施工作业。基于增材制造的修复再制造技术具有可控性高、变形小、不易脱落、成本低、兼容性好等特点，修复的测井仪器零部件结构复杂，利用该项技术和传统维修模式相比节约成本90%以上。

此次零件修复标志着该公司专项维保能力大幅提升，为解决高端测井仪传感器、集成油路等精细结构件维保难题提供了一把“金钥匙”，有效提升了中油测井高端稀缺仪器维保市场竞争力。



图 10 基于增材制造技术修复的 ESCT 井壁取心测井仪

## ● 成员展示

### 宁波中科祥龙轻量化科技有限公司

宁波中科祥龙轻量化科技有限公司（以下简称“中科翔龙”）立足于空天关键装备通用部件产品设计为切入点，解决了特种新材料设计、制造及应用中的核心技术难题，实现了高超声速飞行器低成本、高效率的生产制造，技术达到国内先进水平，是国内首个以空天关键装备轻量化设计制造一体化整体解决方案的提供商。公司坚持以产品设计为驱动，以市场发展为导向，以应用需求为目标的核心价值观。



图 11 宁波中科祥龙轻量化科技有限公司

中科翔龙拥有一支专业技术及高级管理人才队伍，主要成员由来自哈工大、西工大、大连理工、麦吉尔、莱奥本等海内外知名大学。团队现有成员 70 人，其中博士 8 人，研发人员占 85%。目前公司已承研政府科研项目 20 余项；获得知识产权类 70 余项，其中已申请发明专利 20 余项，发表国内外核心期刊论文 50 余篇。企业资质行业认可等方面，中科祥龙获得宁波市军民融合企业、浙江省特种飞行器工程

中心等资质，获批浙江省博士后工作站、宁波市院士工作站，通过国军标 GJB9001C 质量体系认证、武器装备科研生产备案认证，被列为宁波市重点产业链上下游企业共同体资质企业。

中科翔龙以提供以空天关键装备通用部件产品设计为切入点，集合设计、制造、实验测试一条龙服务，解决了特种新材料设计、制造及应用中的核心技术难题，材料、工艺装备等产业链重要环节关键核心技术达到国际先进水平，行业应用显著深化，推动增材制造技术在航空、航天、船舶、汽车、医疗等领域实现规模化应用。

---

报：工业和信息化部装备工业一司，各省、自治区、直辖市及计划单列市、新疆  
生产建设兵团工业和信息化主管部门

送：联盟各成员单位

---

工业和信息化部装备工业发展中心

中国增材制造产业联盟

通讯地址：北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼 13 层

邮政编码：100846

联系电话：010-63942029

欢迎联盟企业提供各版块相关信息

供稿邮箱：[amac@miit-eidc.com.cn](mailto:amac@miit-eidc.com.cn)



联盟官方网站



微信公众号