

## **“增材制造与激光制造”重点专项 2022 年度项目申报指南**

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“增材制造与激光制造”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2022 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：到 2025 年，使我国增材制造与激光制造成为主流制造技术之一，总体达到世界一流，基本实现全球领先，在战略新兴产业、新基建、大国重器中发挥不可替代的重大作用。同时，基本实现增材制造与激光制造全产业链主体自主可控，形成系列长板技术和一批颠覆性技术，并汇集为行业整体优势，为一批领军企业奠基强大的国际技术竞争力，高端装备/产品大批进入国际市场，实现大规模产业化应用，在制造业转型升级中发挥核心作用。

2022 年度指南部署坚持问题导向、分步实施、重点突出的原则，围绕“基础理论和前沿技术、核心功能部件、关键技术与装备、典型应用示范”全链条部署任务。拟启动 28 项指南任务，拟安排国拨经费 3.58 亿元。其中，围绕难熔金属材料增材制造、超快激光制造中光子—电子—晶格相互作用观测与调控等技术方向，拟部署 2 个青年科学家项目，拟安排国拨经费 400 万元，每

个项目 200 万元。围绕个性化医疗器械制造、医疗植入物表面微功能结构制造等技术方向，拟部署 5 个科技型中小企业技术创新应用示范项目，拟安排国拨经费 1000 万元，每个项目 200 万元。共性关键技术类项目，配套经费与国拨经费比例不低于 1.5:1。应用示范类项目鼓励产学研用紧密结合，充分发挥地方和市场作用，配套经费与国拨经费比例不低于 2:1。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，每个方向拟支持项目数为 1—2 项，实施周期不超过 5 年。申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基础研究类项目下设课题不超过 4 个，项目参与单位总数不超过 6 家；共性关键技术类和应用示范类项目下设课题数不超过 5 个，项目参与单位总数不超过 10 家。项目设 1 名项目负责人，项目中每个课题设 1 名课题负责人。

青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1984 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1982 年 1 月 1 日以后出生。原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

科技型中小企业项目要求由科研能力强的科技型中小企业牵头申报。项目下不设课题，项目参加单位（含牵头单位）原则上不超过 2 家，原则上不再组织预算评估，在验收时将对技术指标完成和成果应用情况进行同步考核。科技型中小企业标准参照科技部、财政部、国家税务总局印发的《科技型中小企业评价办

法》(国科发政〔2017〕115号)。

指南中“拟支持数为1~2项”是指：在同一研究方向下，当出现申报项目评审结果前两位评价相近、技术路线明显不同的情况时，可同时支持这2个项目。2个项目将采取分两个阶段支持的方式。第一阶段完成后将对2个项目执行情况进行评估，根据评估结果确定后续支持方式。

## 1. 基础理论和前沿技术

### 1.1 跨尺度自润滑复合结构增材制造(基础研究类)

研究内容：针对我国航空航天和高端装备对高度集成、精准按需润滑以及润滑异形件的设计与制造需求，开展复合润滑功能组件整体化增材制造研究，研究增材制造专用自润滑功能材料设计制备、跨尺度润滑功能结构、尺寸突变异形构件一体化精密制造关键技术，研发面向增材制造的自润滑复合材料体系，探索精准按需润滑结构增材制造新原理、新工艺，研究面向增材制造的可控自润滑表界面材料精准设计与构筑新方法，建立跨尺度增材制造平台，发展润滑功能准确定制化系统设计与一体化制造技术。

考核指标：形成不少于2类适用于增材制造的自润滑复合材料体系，使用温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ ，载荷 $\geq 100\text{N}$ ，摩擦系数 $\leq 0.05$ ，磨损率 $\leq 5\times 10^{-5}\text{mm}^3/\text{Nm}$ ；研制跨尺度自润滑复合结构增材制造装备，最大成形尺寸不小于 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 600\text{mm}$ ；实现 $0.5\mu\text{m}\sim 500\text{mm}$ 范围内跨尺度自润滑复合结构的可编程设计与一体化增材制造，复合结构孔隙率 $\leq 1\%$ ，体积收缩率 $\leq 5\%$ ，拉伸强度 $\geq 100\text{MPa}$ ，断裂韧性 $\geq$

5MPa·m<sup>1/2</sup>；在航空、航天、核等不少于 3 个领域通过功能应用验证，相比传统制造组件，装配件数量减少 50%，减重 30%，制造周期缩短 20%，与原有组件耐用寿命相当。

### 1.2 飞秒激光—电化学复合微纳增材制造（基础研究类）

研究内容：针对三维复杂金属微纳结构的飞秒激光辅助定域电化学增材制造，探索微结构无掩膜激光—电化学双耦作用定向诱导粒子原位增材制造机理，研究飞秒激光诱导下定域电化学沉积组织—结构—功能一体化微纳制造新方法，研究激光—电化学复合能场亚微米复杂构型和微米功能结构阵列制造、纳米体元与微米构型精准调控等技术。

考核指标：建立多物理场模拟仿真模型 1 套；实现三维复杂结构微细金属构件制造：金属纯度  $\geq 99.5\%$ ，体积沉积率  $\geq 10\mu\text{m}^3/\text{s}$ ；在微米尺度曲面上实现深宽比  $\geq 500$  的微细结构，与底面的过渡圆弧半径  $\leq 2\mu\text{m}$ ；复杂微结构阵列面积  $\geq 2\text{mm}^2$ ，阵列中单体结构尺寸精度  $\leq 300\text{nm}$ 。

### 1.3 材料组分三维精确可控的粉末床熔融金属增材制造（基础研究类）

研究内容：研发面向粉末床熔融增材制造的在线多组分材料精确添加技术，研究材料组分三维可控的非均质粉末床熔融增材制造工艺特性、材料原位冶金行为、材料梯度/界面行为和组织性能演化规律，明晰非均质材料构件成形过程中的应力—形变演化规律，建立非均质材料梯度/界面行为、组织与性能协同调控方法，

研发材料成分过渡区间精确调控和后续热处理等关键技术，实现材料组分三维精确可控构件的创新设计、制造及评价。

考核指标：研发出材料组分三维精确可控的非均质粉末床熔融增材制造装备；可实现不少于 4 种材料组分的独立精确可控添加，材料组分添加区域形状任意可控，材料组分添加位置精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，材料过渡区间在  $0.1\text{mm}\sim 10\text{mm}$  范围内精确可控，材料组分变化区域位置控制精度 $\pm 0.3\text{mm}$ ；成形结构最大尺寸 $\geq 250\text{mm}$ ，构件成形精度达 $\pm 0.2\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\leq \text{Ra}6.3\mu\text{m}$ ；完成不少于 3 类具有材料三维精确分布的金属复杂精密构件的设计与制造，关键性能/功能指标提升 $\geq 30\%$ 。

#### 1.4 柔性光电器件的激光光场调控微纳制造（基础研究类）

研究内容：面向柔性光电器件中的关键微纳结构，研究激光时域/空域/频域光场调控方法，探索激光调控光场与柔性光子器件材料相互作用的新现象与新效应，研究激光远场与微腔等近场光学效应结合的宏微纳跨尺度无掩膜加工新技术，研制远场—近场复合光场的无掩膜高效激光微纳制造装备。

考核指标：建立空间跨尺度复合光场调控模型；实现跨越 7 个数量级以上的宏微纳多级结构制造，单次曝光加工面积 $>25\text{cm}^2$ 、单次曝光优于  $80\text{nm}$  线宽的微纳结构单元数量超过 2 百万个；研制的装备实现拼接面积 $>100\text{cm}^2$ 、拼接精度优于  $40\text{nm}$ ；面向可穿戴定向光源、光电探测、光学传感等混合集成柔性光电器件，实现 1~3 项重大应用。

### **1.5 异质仿生结构设计及一体化增材制造（基础研究类）**

研究内容：探索仿生结构中材料/结构的多重耦合行为与机制，研究与高效减振、智能变形、损伤自修复等功能需求匹配的仿生结构模块化设计方法，揭示基于异质材料增材制造的仿生功能模块化调控规律，发展功能模块化构件的多维度、多尺度和异质材料的仿生设计技术；研究异质材料体系下模块化仿生构件的一体化增材制造关键技术，研发面向增材制造的宏微构型—异质材料仿生结构设计、仿真与工艺规划平台，发展多场复杂应用环境下增材制造宏微构型—异质材料仿生构件的性能评价技术。

考核指标：建立基于异质材料一体化增材制造的功能集成仿生结构设计平台，损耗因子、结构变形量和损伤修复量等功能指标提升 30%以上，异质界面强度不低于母材的 70%，成形精度优于 $\pm 0.2/100\text{mm}$ ；建立一套仿生结构设计数据库，仿生单元库包含不少于 10 种构型种类，复合界面库包含不少于 5 种界面种类，不少于 5 种仿生结构设计模板；实现基于钛合金、镍钛合金等异质金属材料的仿生结构一体化制造；制定不少于 2 件仿生设计的国际或国家标准，实现仿生构件在不少于 2 个领域（航天、海洋等）的应用验证，具备高效减振、损伤自修复、智能变形等功能。

### **1.6 功能化活性心肌组织增材制造（基础研究类）**

研究内容：针对心肌组织损伤治疗，开展活性心肌组织高精度增材制造及其功能再生方法研究。研究功能化活性心肌组织复杂微结构系统的仿生设计方法；研究具有电传导能力的活性心肌

组织增材制造新原理与新工艺；研究增材制造活性心肌组织的体外三维定向排布生长与高频同步跳动方法，以及体外活性心肌组织电信号特征与其生物功能的作用关系；研究大型动物大面积心肌病变缺损修复的考核评价方法。

考核指标：功能化活性心肌组织打印过程满足活性植入物的安全标准，最小打印尺寸 $\leq 30\mu\text{m}$ ，细胞活性 $\geq 90\%$ ，细胞密度 $\geq 2 \times 10^7$ 个/mL；增材制造心肌组织力学与天然心肌跳动变形相匹配，可体外连续成活 $\geq 10$ 天，实现大面积同步跳动频率 $\geq 100$ 次/分钟；开展大型动物实验 $\geq 20$ 例，可修复心肌病变区域 $\geq 30\text{mm} \times 20\text{mm}$ ，活性心肌厚度 $\geq 2\text{mm}$ ，可与宿主心肌组织融合生长。

### **1.7 面向前沿探索制造新原理（青年科学家项目）**

研究内容：针对新能源、新材料等新兴产业领域重大需求，重点开展难熔金属材料增材制造、超快激光制造中光子—电子—晶格相互作用观测与调控、喷墨共形打印、复合制造等前沿制造新原理新方法研究。

考核指标：青年科学家项目可参考指南支持方向组织项目申报，但不受研究内容和考核指标限制。

有关说明：青年科学家项目，支持2项。

## **2. 核心功能部件**

### **2.1 激光粉末床熔融增材制造在线监控与质量评价技术（共性关键技术类）**

研究内容：研究合金成分、跨尺度微观组织/缺陷、应力/形

变状态与激光粉末床熔融增材制造过程特征信息的相互关系；研究增材制造熔池动态行为、非均质宏/微观组织特征的多物理场在线监测方法和在线质量评价技术体系，研发铺粉状态快速准确识别与分类、熔池特征分析及质量预判、逐层熔凝区域组织/缺陷识别和轮廓变形分析、质量预警及多参量复合调控等关键技术；发展基于在线监测数据的多信息融合及高效率深度学习模型，明晰工艺参数—特征信息—制造质量关联关系，研发基于过程特征的高效在线质量评价和多参量交互质量控制方法。

考核指标：针对激光粉末床熔融增材制造开发 $\geq 3$ 种在线监控模块，可在线识别 10 类以上非正常制造状态特征；建立高效率监控和评价算法模型，铺粉缺陷识别准确率 $\geq 90\%$ ，漏检率 $\leq 5\%$ ，制造过程熔池温度监测精度高于 $\pm 5\%$ ，铺粉缺陷与故障响应 100%；建立规模 $\geq 50\text{TB}$ ，涵盖工艺属性数据 $\geq 10$ 类、过程监控数据 $\geq 6$ 类、标记质量评价参数 $\geq 6$ 类的共享数据库，开放数据下载利用率 $\geq 80\%$ ；在不少于 25 家企业（ $\geq 400$  台粉末床熔融增材制造装备）实现应用验证，制定激光粉末床熔融在线监控与质量评价规范、标准 $\geq 10$ 份。

## **2.2 大型复杂构件制造过程在线检测与智能调控技术（共性关键技术类）**

研究内容：面向重大装备的高性能焊接与增材制造，研究大型复杂结构制造过程中的在线三维形貌及变形的跨尺度光学测量技术、制件与制造加工头的多自由度位姿测量技术；研究制造过

程中熔池特征尺寸和温度场表征、制造缺陷非接触式在线检测技术；研发从微观位错演化到宏观结构件变形失效的跨尺度增材制造热力模拟预测技术和方法；揭示制造工艺与位错—晶界多级微结构、结构变形和制造缺陷的关联关系；研究面向大型结构的表面形貌、结构变形、构件温度和制造缺陷等成形质量自适应闭环控制系统与装备。

考核指标：研发出大型结构件焊接和增材制造过程中的多物理场在线检测和智能调控系统，实现 6 种以上光束模式自适应调控，工况环境下制造过程实时三维形貌与变形测量精度  $80\mu\text{m}/\text{m}$ ；熔池特征尺寸检测精度  $20\mu\text{m}$ ，温度场测量精度达到  $\pm 1\%$ ，增材制造构件缺陷在线检测分辨率  $90\mu\text{m}$ ；研发出增材制造多尺度模拟预测软件，可实现百纳米至米级跨尺度仿真预测；制定大型构件制造在线检测与智能调控规范和标准 10 项，应用于激光电弧复合焊接、电弧增材制造等 2 种以上设备，并在舰船、特种车辆、建筑等领域 3 类以上 8m 级结构件增材制造、3 类以上 8m 级结构件焊接中实现应用验证。

### 2.3 增材制造构件长寿命服役行为表征与调控关键技术（共性关键技术类）

研究内容：研究增材制造构件在高温环境与复杂应力条件下的长寿命服役性能表征方法，典型增材制造构件/材料长寿命试验标准与疲劳数据库；研究增材制造构件微结构/缺陷与长寿命服役行为的关联机制，制造工艺—微结构/缺陷—服役性能的映射关

系；研究提高服役寿命的增材制造缺陷/微结构在线调控技术，发展高服役性能构件增材制造工艺的优化方法；研究增材制造构件长寿命疲劳的评估技术。

考核指标：建立可应用于复杂服役环境增材制造构件材料的长寿命疲劳试验方法与装备，可实现高温条件下，应力加载类型 $\geq 4$ 种， $\geq 10^{10}$ 周次的寿命测试；建立复杂服役环境下不少于5种典型增材制造构件/材料的疲劳性能数据库；基于调控使增材制造典型构件增寿幅度 $\geq 100\%$ ；形成带有缺陷的构件长寿命疲劳强度评估方法，预测误差 $\leq 10\%$ ；在航空、航天、车辆及轨道交通等领域实现应用验证，制定增材制造长寿命服役行为表征与调控关键技术规范和标准 $\geq 5$ 项。

## **2.4 制造用高性能高功率飞秒激光器（共性关键技术类）**

研究内容：探索飞秒激光产生、放大、线性和非线性调控过程的动力学机制，以及高功率大能量飞秒激光放大时由于增益导致的脉冲宽度劣化机制；攻克高单脉冲能量飞秒激光热管理、模式控制、高效率长寿命飞秒频率转换等关键技术，研究倍频产生高功率紫外飞秒激光参量的稳定控制及优化技术，开展高功率大能量飞秒激光器模块化设计和系统集成技术研究。

考核指标：红外与紫外飞秒激光脉冲宽度 $\leq 500\text{fs}$ ；红外输出平均功率 $\geq 200\text{W}$ 且稳定性 $<1\%$ （100小时内的均方根误差），最大单脉冲能量 $\geq 2\text{mJ}$ ；紫外输出平均功率 $\geq 30\text{W}$ 且稳定性 $<2\%$ （100小时内的均方根误差），最大单脉冲能量 $\geq 300\mu\text{J}$ ；实现制

造用高功率飞秒激光器销售  $\geq 100$  台。

## **2.5 制造用高性能高功率皮秒激光器（共性关键技术类）**

研究内容：开展皮秒激光增益分布优化、模式控制机制和有效热管理等技术研究，攻克均匀泵浦、长寿命皮秒锁模及非线性抑制等关键技术，研究倍频转化效率提升、紫外皮秒激光光束质量控制及延寿等技术，研制高稳定性高功率红外、紫外皮秒激光器产品。

考核指标：红外皮秒激光器：平均功率  $\geq 1000\text{W}$ ，最大单脉冲能量  $\geq 25\text{mJ}$ ，脉冲宽度  $\leq 10\text{ps}$ ；紫外皮秒激光器：平均功率  $\geq 50\text{W}$ ，单脉冲能量  $\geq 0.5\text{mJ}$ ，脉冲宽度  $\leq 10\text{ps}$ ，实现倍频晶体寿命  $\geq 2000$  小时的稳定工作，实现 100 套高功率皮秒激光器生产销售。

## **3. 关键技术与装备**

### **3.1 非均质材料飞秒激光制造技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：面向复杂构件涉及的复合、多层膜、多孔等非均质材料的高性能加工共性需求，建立飞秒激光加工过程中光子能量吸收、电子状态变化、等离子体喷发、成形成性等多尺度连续观测系统；从电子层面研究飞秒激光时/空/频域协同整形的非均质材料加工新方法，突破损伤控制、选择性加工等关键工艺技术，研发飞秒激光跨尺度柔性加工装备和三维复杂构件微细加工装备。

考核指标：多尺度连续观测系统：跨越 15 个时间数量级，峰值帧速率  $\geq 5000$  亿帧/秒，连续观测图像序列  $\geq 6$  帧/次；跨尺度柔性加工装备：复合材料切割/制孔损伤程度较传统加工降低一

个数量级，可加工尺度覆盖  $100\mu\text{m}\sim 5\text{m}$ ；三维复杂构件微细加工装备：多孔材料微锥加工锥顶锐度曲率半径  $\leq 10\mu\text{m}$ 。在大型卫星天线及太阳翼机构、惯性导航、微小卫星空间推进系统等关键构件上实现应用验证。

### **3.2 陶瓷多材料连续成形光固化增材制造技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：研究高固含量/低粘度陶瓷打印浆料流变机理与稳定性优化方法，攻克陶瓷光固化增材制造精度光散射调控技术。研发陶瓷多材料连续成形光固化增材制造技术与装备，开展高效加工策略与成形效能评估研究，开发材料—工艺—装备全链条性能评价方法。

考核指标：研发高固含量/低粘度陶瓷浆料及多材料连续成形光固化增材制造装备，陶瓷浆料固含量  $\geq 60\%$ ，粘度  $\leq 5\text{Pas}$ ，实现  $\geq 3$  种陶瓷材料的一体化增材制造；增材制造多材料构件的尺寸  $\geq 150\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ ，多材料最小典型结构特征尺寸精度  $\leq \pm 0.1\text{mm}$ ，增材制造效率  $\geq 100\text{cm}^3/\text{h}$ ；增材制造多材料陶瓷的致密度  $\geq 96\%$ ，断裂韧性  $\geq 10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；压缩应变  $\geq 4\%$ ；不少于 5 种增材制造多材料陶瓷制品在生物医疗、航空航天等领域应用验证，制定陶瓷多材料连续成形光固化增材制造的技术规范和标准 2 项。

### **3.3 大能量高重频脉冲激光智能清洗技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：研究纳秒脉冲能量输出能力提升的新方法，开展

大能量高重频脉冲激光光束控制、模式调控、高功率关断和多级放大等技术研究；揭示大能量纳秒脉冲激光高效高质清洗机制，攻克基于机器视觉的精确定位、智能选区、残留物快速识别、复杂曲面路径智能规划、双光束联动无缝无重叠拼接等关键技术，研制具备复杂曲面结构高效循环作业的激光智能化清洗成套工艺与装备。

考核指标：纳秒激光器：平均功率 $\geq 2\text{kW}$ ，单脉冲能量 $\geq 0.5\text{J}$ ，脉冲宽度 $\leq 100\text{ns}$ ，光束质量 $\leq 30\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。激光清洗装备：单层清洗厚度 $\geq 50\mu\text{m}$ ，清洗效率 $\geq 80\text{m}^2/\text{h}$ ，清洗残留物自动识别时间（以复杂曲面构件、表面积 $>5\text{m}^2$ 为考核） $\leq 60\text{s}$ ，定位精度 $\leq 0.02\text{mm}$ ，识别率 $\geq 90\%$ ，在航天或航空领域清洗方面实现典型应用。

### 3.4 薄壁弱刚性构件激光电解复合高效铣削加工技术与装备（共性关键技术类）

研究内容：针对薄壁弱刚性整体复杂构件制造瓶颈，研究气液环境下激光束流作用过程、超高电流密度电化学加工材料去除机制及成形规律；研究激光—电解复合铣削制造新方法，攻克复合能量场形性调控、束流流域设计等关键技术；研制大型构件激光—电解复合铣削加工装备。

考核指标：研制激光电解复合铣削加工装备：行程 $\geq 1500\text{mm}\times 1500\text{mm}\times 800\text{mm}$ ，加工构件单方向尺寸 $\geq 1000\text{mm}$ ，最薄壁厚 $\leq 1.5\text{mm}$ ，表面粗糙度 $\leq \text{Ra}1.6\mu\text{m}$ ，材料去除效率较机械铣削方法提高 1 倍以上（以尺寸精度优于 $\pm 0.1\text{mm}$ 考核），加工成本

降低 50%以上；建立典型薄壁弱刚性整体构件的激光电解复合加工工艺规范；在航空航天等领域中实现应用。

### **3.5 结构功能部件飞秒激光精密制造技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：针对航空航天等领域结构功能一体化部件精密制造的需求，揭示飞秒激光光束运动参量调控的微结构控形控性制造机制，研究制造结构的几何特征、质量对部件功能和服役性能的映射关系；发展“压敏、密封、润滑”等功能部件飞秒激光制造方法，攻克激光脉冲三维整形、内腔光束运动姿态参量控制等关键技术，研制飞秒激光制造成套工艺与装备。

考核指标：研制三维空间整形、内腔润滑结构飞秒激光加工头 2 类关键模块；研制结构功能一体化部件的飞秒激光精密制造装备：实现 3 类结构功能一体化部件的精密制造；压敏结构的加工深度尺寸误差 $\leq 2\mu\text{m}$ 、密封/润滑微结构尺寸误差 $\leq 2\mu\text{m}$ ；压敏元件的压力响应偏差缩小至 6%~7%、密封产品成型合格率提高至 90%、润滑产品摩擦系数降低 20%；实现在火箭等装备中的典型应用。

### **3.6 海洋装备水下原位高效增材修复技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：针对海洋装备在服役过程中的修复需求，研究适用于水下原位增材修复的专用材料；研发复杂水下环境空间重构、姿态感知和损伤区域快速三维测量技术与装备；研发水下空间约

束环境下的增材修复过程规划、组织性能调控、修复部位服役性能预测等技术；研究应急响应条件下的水下结构可修复性评价和修复方案智能决策方法；研发水下现场环境修复工艺和装备。

考核指标：建立现场作业要求的水下增材修复成套装备，可实现 $\geq 10$  米水深状态下的现场修复，作业区域 $\geq 1\text{m}^2$ ，具备空间曲面构件仰面、立面的修复能力；损伤区域三维建模精度 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ ，增材修复精度 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ；研发 $\geq 3$  种水下增材修复专用材料，水下修复部位抗拉强度、冲击韧性及耐腐蚀性能 $\geq$  原件性能的 90%；制定水下增材修复工艺及评价规范 2 项；在舰船或海工装备中应用验证。

### 3.7 大型点阵结构无支撑高效增材制造技术与装备（共性关键技术类）

研究内容：研究面向增材制造的多功能大型点阵结构设计技术；研究点阵结构的无支撑高效增材制造、高性能连接、多层点阵夹芯结构制造、结构变形控制等关键技术；研究大型点阵夹芯结构的无损检测技术；研发规模化低成本高效增材制造装备。

考核指标：研制大型点阵结构多弧并行增材制造装备，打印头数量 $\geq 40$  个，沉积效率 $\geq 5000\text{cm}^3/\text{h}$ ；点阵整体结构尺寸 $\geq 10\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$ ，点阵规模 $\geq 10^4$  量级，结构变形量 $\leq 2\text{mm}/\text{m}$ ；增材制造材料力学性能与锻造材料相当；在船舶、车辆等装备中实现应用验证，满足抗爆、抑振、降噪等需求，功能指标提升 $\geq 30\%$ ，减重 $\geq 30\%$ ；制定大型点阵结构设计与增材制造的软件、工艺、

检测和装备等标准规范。

### **3.8 大幅面纤维增强热塑性复合材料增材制造技术与装备（共性关键技术类）**

研究内容：研究面向大型纤维增强热塑性复合材料构件的多丝束挤出增材制造成形机理及翘曲变形行为，发展大型纤维增强热塑性复合材料构件设计方法，攻克大型纤维增强热塑性复合材料增材制造的路径优化、多材料性能匹配、多工艺参数匹配、界面结合优化、成形精度控制等关键技术；研究增材制造复合材料构件非降级回收再制造技术和构件的性能评价方法；研制大型纤维增强热塑性复合材料构件增材制造装备。

考核指标：研制纤维增强热塑性复合材料多丝束挤出增材制造装备，成形尺寸 $\geq 4000\text{mm} \times 2000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，成形效率比单丝工艺提升5倍以上，构件制造精度 $\leq 1\%$ ；增材制造构件纤维质量分数 $\geq 55\%$ ，层厚在 $0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$ 可调，层间剪切强度 $\geq 35\text{MPa}$ ；回收再制造复合材料力学性能不低于回收前性能的90%；在航空航天、轨道交通等领域应用验证，制定大型纤维增强热塑性复合材料构件增材制造成形工艺标准和测试评价规范。

### **3.9 超强韧中熵合金构件增材/强化/减材复合制造（共性关键技术类）**

研究内容：研究适用于增材制造的超低温超高强韧中熵合金高通量设计与性能验证方法；研究中熵合金在复合制造过程中形性调控机制与方法，以及表面损伤动态演变机制及抑制理论，研

发激光增材/强化/减材复合制造工艺与装备，研究复合制造中熵合金在室温、液氧和液氮超低温环境下的强韧化机制，以及疲劳断裂等性能评价方法；研究面向服役环境的复合制造中熵合金构件重复使用评估体系。

考核指标: 形成不少于 3 种增材制造专用超高强韧中熵合金；研制激光增材/强化/减材复合制造装备，最大成形尺寸  $\geq 500\text{mm}$ ；复合制造中熵合金超低温环境下（以液氮温度考核）的屈服强度  $\geq 1300\text{MPa}$ 、延伸率  $\geq 30\%$ 、断裂韧性  $\geq 250\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、冲击韧性  $\geq 100\text{J}$ 、疲劳强度  $\geq 550\text{MPa}$ ；复合制造关键结构表面粗糙度  $\leq \text{Ra}1.6\mu\text{m}$ ，制件局部残余应力  $\leq 100\text{MPa}$ ；复合制造最高效率  $\geq 300\text{cm}^3/\text{h}$ ；建立中熵合金复合制造工艺数据库  $\geq 3$  套；典型构件可重复使用次数  $\geq 30$  次（采用仿真分析、地面试验及热试车考核验证）；在航天等领域实现应用验证，制定复合制造标准与低温服役性能评价技术规范  $\geq 5$  项。

### **3.10 大型高性能结构件增等减材复合绿色智能制造（共性关键技术类）**

研究内容：研究增材/等材/减材复合制造形性协同控制机理和增材/等材/减材一体化复合制造技术；研究复合制造工艺—组织—缺陷—性能的一体化映射关系，研发大型结构件综合力学性能、疲劳性能提升关键技术；发展全过程智能化在线质量监控系统，研发大型复合绿色智能化制造装备。

考核指标：研制可实现智能监控的大型增材/等材/减材复合

制造装备，构件最大成形尺寸 $\geq 5000\text{mm}$ ，制造精度 $\leq \pm 0.01\text{mm}/1000\text{mm}$ ，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu\text{m}$ ，成形效率 $\geq 500\text{cm}^3/\text{h}$ ，设备平均无故障工作时间 $\geq 2400\text{h}$ ；相比传统制造方式，复合增材制造综合能耗降低60%以上；复合增材制造高温合金、钛合金等构件的疲劳性能不低于同成分锻件；对尺寸 $>0.01\text{mm}$ 缺陷的在线检测灵敏度 $\geq 90\%$ ，处理响应时间 $\leq 500\text{ms}$ ；完成 $\geq 2$ 类大型结构件复合增材制造，在航空航天、船舶海洋、核能电力等重点行业实现应用验证，制定技术标准或规范不少于2项。

#### 4. 典型应用示范

##### 4.1 无人机十米级机身承力结构整体化增材制造示范应用（应用示范类）

研究内容：针对高性能大型无人机研制需求，研究基于增材制造的大尺寸机身关键构件一体化设计方法；突破大尺寸精密复杂构件增材制造跨尺度形性主动调控及后处理关键技术；研究增材制造大尺寸机身整体构件无损检测评价关键技术；建立基于增材制造的大尺寸机身整体构件“材料—设计—工艺—检测—评价”全流程技术体系。

考核指标：增材制造大尺寸机身整体构件一体化设计后的零件数量减少 $\geq 25\%$ 、减重 $\geq 20\%$ 、制造周期缩短 $\geq 50\%$ 、综合制造成本降低 $\geq 50\%$ ；定向能量沉积一体化成形零件最大尺寸 $\geq 3500\text{mm} \times 2000\text{mm} \times 350\text{mm}$ ，且变形量 $\leq 0.3\text{mm}/100\text{mm}$ ；粉末床熔融成型零件尺寸 $\geq 1000\text{mm}$ ，且变形量 $\leq 0.1\text{mm}/100\text{mm}$ ；无人机

组合件最大尺寸 $\geq 8000\text{mm}\times 3000\text{mm}\times 500\text{mm}$ ；增材制造构件综合力学性能达到同牌号合金锻件标准要求，多批次静强度性能统计变异系数 $\leq 5\%$ ；幅面 $\geq 12\text{m}\times 9\text{m}$ 的全尺寸无人机通过静力考核和飞行演示验证，航速 $\geq 0.7\text{Ma}$ ；制定基于增材制造的大尺寸机身整体构件的设计方法、工艺规范及评价标准 $\geq 10$ 项。

#### 4.2 多材料功能梯度结构增材制造在无人潜航器领域应用示范（应用示范类）

研究内容：针对万米深海无人潜航器应用需求，研究面向增材制造的无人潜航器多材料轻型耐压壳体的仿生优化设计方法，包括无人潜航器壳体仿生结构、多材料梯度耐压结构、壳体外表面防生物附着结构等设计方法；研究高分子、陶瓷、金属等多材料增材制造工艺及形性控制方法；研发无人潜航器多材料一体化智能增材制造装备，包括金属及高分子材料增减材一体化装备，陶瓷材料高效增材制造装备；研究高分子、陶瓷、金属等多材料一体化增材制造构件的检测技术和评价方法。

考核指标：研制适应万米深海无人潜航器快速开发、柔性制造的陶瓷材料、高强度高分子材料、金属材料增材制造一体化技术和装备，成形尺寸 $\geq \Phi 250\text{mm}\times 750\text{mm}$ ，制造精度 $\leq 0.05\text{mm}$ ；增材制造的一体化耐压壳体尺寸 $\geq \Phi 250\text{mm}\times 1500\text{mm}$ ，相比传统金属壳体减重 $\geq 20\%$ ，研制周期缩短 $\geq 50\%$ ，满足 $110\text{MPa}$ 静水压力测试无渗漏、无破损、无变形要求；研制应用增材制造耐压壳体的无人潜航器1套，重量 $< 400\text{kg}$ ，实现 $\geq 5$ 次的大深度（ $\geq$

10000 米)连续剖面下潜应用验证;制定基于增材制造的一体化耐压壳体设计、制造、检测规范及考核评价标准 $\geq 10$ 项。

#### **4.3 大型关重结构件激光高效高稳定增材制造工程应用示范 (应用示范类)**

研究内容:研究面向规模化生产的大型关重结构件高效高精度激光增材制造材料、工艺稳定性控制方法与技术体系;研究质量性能一致性控制、检测和评价方法;研究激光增材制造典型材料关键力学性能许用值和数据库;研发面向规模化生产的高效高精度成套装备。

考核指标:研制大型关重结构件激光增材制造工程化装备,沉积效率 $\geq 10\text{kg/h}$ (钛合金),粉末一次利用率 $\geq 90\%$ ,最大成形能力 $\geq 6000\text{mm}\times 3000\text{mm}\times 3000\text{mm}$ ,变形量 $\leq 1\text{mm}/1000\text{mm}$ ;在95%置信度水平下,所制造构件超声多批次检验统计内部缺陷 $\leq \Phi 0.6\text{mm}$ 当量平底孔;形成不少于3类材料的激光增材制造工艺和性能数据库,增材结构静强度与锻件典型值相当,冲击韧性提高50%以上,多批次静强度性能统计变异系数 $\leq 3\%$ ;在国家重大装备中形成 $\geq 5$ 例的大型关重件批量工程应用,技术就绪度9级;制定激光增材制造大型结构件工艺、设备、材料、检测与评价成套标准规范 $\geq 10$ 项。

#### **4.4 内部精细流道增材制造在空间推进领域应用示范 (应用示范类)**

研究内容:开展基于增材制造的空间推进系统集成化、轻量

化和模块化设计研究，研发基于增材制造空间推进系统的流—固—力—热多物理场耦合一体化设计方法及增材制造技术；研究小尺寸复杂内流道成形、内表面加工及质量控制、薄壁耐压结构成形质量控制及后续加工处理等关键技术；研究增材制造空间推进系统的检测方法及评价标准。

考核指标：增材制造空间推进系统尺寸 $\geq 250\text{mm} \times 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，总冲量 $\geq 3000\text{N} \cdot \text{s}$ ，流体通道最小内径 $\leq 1\text{mm}$ ，内表面粗糙度 $\leq \text{Ra}1.6\mu\text{m}$ ，耐压 $\geq 3\text{MPa}$ ；增材制造空间推进系统工作性能指标优于传统技术制造的同类系统，并实现减重 $\geq 20\%$ ，研制周期缩短 $\geq 50\%$ ，成本降低 $\geq 20\%$ ；通过装机考核，并在航天等领域实现示范应用；制定基于增材制造的空间推进系统设计方法、工艺规范及考核评价标准 $\geq 10$ 项。

#### 4.5 高品质激光剥离与解键合在电子制造领域应用示范（应用示范类）

研究内容：针对 Micro-LED 显示、超薄晶圆封装中的激光剥离、解键合等制造技术瓶颈，研究紫外和深紫外光束传输与空间整形、光斑形貌与能量监控以及焦点跟随等关键技术；研究可减少器件损伤的激光剥离、解键合方法与加工工艺；研发光束整形器、焦点跟随等核心功能模块；开发 Micro-LED 显示激光剥离装备、超薄晶圆紫外激光解键合装备，研究成套工艺。

考核指标：研制 Micro-LED 显示激光剥离装备：光束整形器光斑能量分布均匀性 $\geq 95\%$ ，最大加工直径 $150\text{mm}$ 、良率 $\geq$

99.9%；研制超薄晶圆紫外激光解键合装备：最大加工直径300mm、焦点跟随精度 $\leq 5\mu\text{m}$ 、加工效率 $\leq 60$ 秒/片（300mm）、晶圆破片率 $\leq 0.1\%$ ；实现激光剥离、解键合装备小批量生产，并在新型显示、先进封装等2个领域建立应用示范生产线，实现不少于5台的销售。

#### 4.6 科技型中小企业技术创新应用示范(科技型中小企业项目)

研究内容：面向增材制造与激光制造领域不断涌现的新兴产业增长点，开展个性化医疗器械制造、医疗植入物表面微功能结构制造、光纤微纳传感器制造、光子/电子器件制造、印制电路板（PCB）增材制造等新兴增材制造与激光制造技术的产业化应用研究，发展新兴技术商业化装备，实现创新型构件或器件的小批量或个性化定制生产；开展具有产业新增长潜力的前沿新技术产业化研究，实现颠覆性创新新技术产业化应用。

考核指标：由科技型中小企业自行提出，要求达到同类技术和产品的国内领先水平；要求形成原型装备或产品；提交证明该技术和产品先进性和实用性的证明性文件，包括设计报告、分析报告、技术测试报告、第三方检测报告、查新报告等；申请/获得不少于2项核心技术发明专利。

有关说明：科技型中小企业牵头申报，可参考指南支持方向组织项目申报，但不受研究内容和考核指标限制。其他经费（包括地方财政经费、单位出资及社会渠道资金等）与中央财政经费比例不低于2:1。拟支持项目数不超过5个。