

2025 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

轻质金属复杂构件高强韧高稳定激光增材制造技术与装备

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果针对航空航天高端装备领域轻量化、整体化轻质金属复杂构件的高性能、工程化激光增材制造迫切需求，建立了轻质合金复杂构件的高强韧高稳定激光增材制造形性控制理论和新方法，突破了轻质合金关键构件工程化高质量激光增材制造关键工艺和装备技术，提出了由“点”及“体”全过程组织性能协同调控方法，发明了基于光-粉-熔池耦合负反馈的自适应稳定控制技术、复杂结构整体化成形应力变形控制技术以及高精度高稳定激光增材制造装备技术。该项目成果成功应用于航空、航天和发动机等领域多项国家重大型号工程。国际上首次实现了激光增材制造关键承力构件（主起撑杆支座）在飞机上的应用，确保了我国重点型号战机的快速研制；成功应用于中国商飞 C919 大飞机 3 米级钛合金缘条的无拼接连续整体制造，性能一致性国际领先，保障了 C919 大飞机首台翼身组合体研制进度。该项目成果已经产生了重大的军事效益、社会效益和经济效益，并在航空航天、发动机、航海、汽车等领域具有广阔的应用前景。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省技术发明奖提名条件，特提名为陕西省技术发明奖一等奖。

三、项目简介

大型飞机、卫星等重大型号装备服役性能的保障和提升依赖于钛合金、铝合金等轻质金属构件的广泛应用。当前激光增材制造因其具有降维数字化制造特征，已成为航空航天高端装备轻质金属复杂构件研制与生产的重要支撑技术。然而，随着航空航天高端装备高性能、轻量化、功能结构一体化创新发展，轻质金属复杂构件的性能需求由高强到高强韧，尺寸由小变大超过米级，构型由简单逐渐向复杂化发展，同时，由于钛合金、铝合金等轻质合金大多是活性金属，成形工艺敏感性极强，因此，其复杂结构的高强韧高稳定激光增材制造面临巨大挑战。主要表现在多因素耦合逐点复杂路径成形的超常冶金成

“形”成“性”面临：高强韧组织调控难、长时间成形稳定性控制难、复杂结构易变形开裂、工程化装备适用性不足的瓶颈难题，严重制约了技术的发展及重大型号装备应用。

该项目在国家重点研发计划、973、863、国家自然科学基金等一系列重大、重点科研项目的支持下，通过持续的开拓性研究，突破轻质金属复杂构件高强韧、

稳定性激光增材制造关键工艺和装备技术，并实现了工程应用和产业化。主要发明点包括：

1. 提出了由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法，突破激光增材制造构件的“高强度与高塑性匹配控制”技术，构件综合力学性能与锻件相当，各向异性/各向同性可调可控，实现全球首例激光成形增材制造关键承力构件在先进战机上的应用。

2. 发明了光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术，实现增材制造构件几何形状与力学性的高稳定性控制，实现一次连续成形尺寸超过 3m，成形高度一致性提升 1 倍以上，批次制造的拉伸强度离散度优于 3%，显著优于波音公司技术水平(5%)。

3. 发明了工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术，实现 C919 大飞机 TC4 钛合金 3070mm 中央翼缘条变形量小于 0.8mm，整体化成形的先进关键构件结合强度相比传统工艺提高 2.3 倍，结构效益提升 65%。

4. 发明了高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术，解决了航空航天领域轻质合金关键构件高质量激光增材制造的控制难题，形成具有自主知识产权的系列商用化设备，氧含量可稳定控制在 10ppm 以内，为高性能、高稳定、高精密切复杂构件增材制造提供关键装备保障。

项目获授权发明专利 25 项，出版专著 2 部，牵头和参与制订国家标准 8 项。发表 SCI 论文 150 余篇，国内外本领域著名学者累计他引 5120 次。

成果成功应用于航空、航天和发动机等领域多项国家重大、重点型号工程。实现大飞机中央翼缘条类构件的无拼接全尺寸连续整体制造，成功应用于中国商飞 C919 大飞机 3 米级缘条的快速研制；国际上首次实现激光增材制造关键承力构件主起撑杆支座在飞机上应用，确保了我国重点型号战机的快速研制；实现国内首次激光增材制造钛合金薄壁复杂结构零件、铝合金薄壁复杂异形零件装机。依托项目成果成立了西安铂力特增材技术股份有限公司，实现成果持续转化应用，公司 2019 年首批科创板上市，成为行业领军企业。该项目成果已经产生了重大的军事效益、社会效益和经济效益，并在航空航天、发动机、航海、汽车等领域具有广阔的应用前景。

四、客观评价

上级部门组织的技术成果鉴定评价为：该项目技术难度很大，有重大自主创新，技术成熟、完备、可靠，项目成果核心技术自主可控，具有核心自主知识产权。总体技术达到了国际领先水平。项目成果已广泛应用，解决了我国多个重点型号研制任务的瓶颈难题。

部分应用单位评价如下：

(1) 成都飞机工业(集团)有限责任公司：“设备性能稳定可靠，运行良好，操作方便”、“开展 TC4 钛合金承力构件的激光修复再制造方面的研制任务，取得了良好的效果，提升了我公司大型框梁结构件的试制和生产能力”。

(2) 中航工业沈阳飞机设计研究所：“该支座是目前变工位增材制造的最复杂构件，是全球首例在飞机上得到应用的激光增材制造关键承力构件。主起撑杆支座激光增材制造和测试的成功，说明激光增材制造技术可为加快我国飞机关键结构件的快速研制和定型，提供一条更为先进、高效的设计与制造技术途径”。

(3) 中航工业第一飞机设计研究院：“锻造+激光增材两种不同工艺组织制备的材料与全锻造材料静力拉伸、疲劳性能相当，实现了 TC21 钛合金吊挂接头激光组合制造，静力试验结果表明激光组合制造结构满足飞机结构承载要求”、“该技术可应用于大型飞机起落架、发动机吊挂部位钛合金整体承力构件的激光组合制造，解决传统制造方法难以实现的制造难题，为飞机的研制生产提供重要技术支撑”。

(4) 航天科工集团二院二十五所：“结构整体减重 10%，结合强度提高 2.3 倍，谐振频率由 717Hz 提高至 1184Hz”、“和基于传统制造工艺的设计方法相比，基于功能优先的一体化设计与增材制造实现，显著提升了零件的结构效益，而激光增材整体化制造技术则是这种一体化设计得以实现的有力保障”。

(6) 航天科技集团一院 211 厂：“在一个月内成功实现了所有关键构件的快速制造。经少量加工后，短时间内完成了模装弹的总装及应用。实现了新型号装备设计制造的快速响应”。

(7) 中国商飞上海飞机设计研究院：“西北工业大学承担的 Ti-6Al-4V 激光增材制造件的最大尺寸为 3070mm，性能满足中国商飞图纸要求，为翼身组合体试验件的按时交付提供了有力支持，激光增材制造技术为我国大型客机结构件的快速制造提供了一条重要途径”。

项目成果在材料、冶金、先进制造领域发表主要论文 150 余篇，被国内外本领域著名学者广泛引用，引用期刊包括 Nature、Scienc、Nature Rev. Mater. 等顶级期刊，获得中国工程院院士卢秉恒教授和王华明教授，美国国家工程院院士 C.T.Liu 教授和 J.Mazumder 教授，德国弗劳恩霍夫激光技术研究所前所长 R.Poprawe 教授，美国焊接协会研发委员会前任主任 T.DebRoy 教授、美国国家增材制造卓越中心主任 Shamsaeia 副教授，澳大利亚 ARC 未来学者 Han Huang 教授等本领域著名学者高度评价。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

项目成果已在航天科技一院、五院，航天科工二院、三院，航空工业成飞公司、贵飞、601 所、603 所、611 所，中国航商 606 所，中国人民解放军 5713 厂和 5720 厂，中国商飞公司、中国商发公司等航空航天研究机构和企业的产品及型号研制中获得应用，涉及我国 C919 大飞机、先进战机、天绘卫星、火星探测器等 30 余种军民重点、重大型号任务，为我国航空航天、高端装备重要型号研制作出了重要贡献。

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称 | 应用的技术 | 应用对象及规模 | 应用起止时间 | 单位联系人 |
|----|---------------|---|--|-----------------|-------|
| 1 | 中国商飞上海飞机设计研究院 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 无拼接连续整体成形 3070mm 的 C919 大型客机翼身组合体关重构件，首次在 C919 大型客机翼身组合体综合验证项目中通过测试验证。 | 2013.01-2018.12 | 梁恩泉 |
| 2 | 中航工业沈阳飞机设计研究所 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术、工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 解决了新型战机传载高、受载形式及空间构型复杂、重量和尺寸大等关重构件设计与制造的技术难题，实现最复杂飞机主承力件变工位激光增材制造，并成功应用在飞机上。 | 2014.01-2015.10 | 吴斌 |
| 3 | 航天科工集团二院二十五所 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术、工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 实现航天飞行器的功能优先一体化设计光学构件制造，结构整体减重 10%，结合强度提高 2.3 倍。 | 2014.07-2015.12 | 唐晔 |
| 4 | 航天科工三院 31 所 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的 | 首次实现了 3D 打印细长薄壁内流道异型复杂结构转子类零件在某 | 2014.07-2015.12 | 刘黎明 |

| | | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|-----------------|-------|
| | | 沉积生长自适应稳定控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 装备动力系统上的应用,通过地面试车考核,已推广应用于超燃冲压发动机产品研制。 | | |
| 5 | 航 天 科 技 集 团 一 院 211 厂 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术、工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 某型飞行器 TA15 钛合金模装薄壁结构件的整体化快速响应激光增材制造。 | 2013.01-2014.05 | 陈 济 轮 |
| 6 | 西 安 铂 力 特 增 材 技 术 股 份 有 限 公 司 | 由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法、光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术、工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术、高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术 | 已批量应用于多个国家重大、重点型号工程关键构件的增材制造。 | 2011.01-至今 | 贾 鑫 |

2. 应用效益

该项目在国家科技部、自然科学基金、总装备部、军委科技委等一系列重大、重点科研项目的支持下，开展持续的技术创新研究，突破金属增材制造组织性能主动调控、成形过程稳定性和复杂结构应力变形控制等关键技术，研制了系列指标先进的集成装备，技术装备已在航空航天等工业领域得到广泛应用，产生了显著的经济效益。自该项目实施以来，已产生效益 105924.2 万元，近三年经济效益 72701.55 万元。

依托项目成果，项目组激光增材制造的零件超 5 万件，批量应用于 7 个飞机型号，4 个无人机型号，7 个航空发动机型号，6 个火箭型号，3 个卫星型号，2 个燃机型号，1 个空间站型号，涉及运载火箭、军民大飞机、先进战机、无人机、高推比航空发动机、新型导弹和卫星等，在优化产品结构提升性能、功能的同时实现整体减重，有效地解决了传统结构存在的载荷提升难瓶颈问题，取得了显著的军事效益。

项目成果研制的轻质合金高强韧激光增材制造复杂构件已在航空航天等领域高端装备国家重大重点型号中获得批量应用，涉及运载火箭、军民大飞机、先进战机、无人机、高推比航空发动机和卫星等，有力的支撑了 30 余个国家重大重点型号的研制，为航空航天等领域高端装备复杂关键构件先进制造模式升级提供了一条新的解决途径，大幅缩短研制周期，加速产品迭代，在优化产品结构的同时实现整体化、轻量化和综合服役性能的提升，取得了显著的社会效益。项目成果在成果转化平台铂力特公司大规模推广应用，助力公司于 2019 年首批科创板上市，成为行业领军企业，推动了增材制造产业的发展。

依托该项目培养“国家高层次人才计划”入选者两人次，在国内首次开设“增材制造”辅修专业，2023 年获批增材制造工程专业，为行业培养增材制造骨干千余名，50 余人成长为增材制造技术骨干。

牵头和参与制订增材制造国家标准 8 项，出版专著 2 部，为推进我国激光增材制造产业的良性发展和技术普及做出了重要贡献。

基于对项目成果的高度认可，空客公司选择西工大为中国区激光增材制造领域唯一合作研究单位，并成立了 NPU-AIRBUS 增材制造联合实验室，推进激光增材制造在飞机上的应用和推广，这极大地提升了中国增材制造技术在国际上的影响力。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称 | 国家 (地区) | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
|----|--------|-------------------------------|------------|------------------|------------------|---------|--------|---------------------------|
| 1 | 发明专利 | 一种能同时提高增材制造钛合金强度和塑性的制备方法 | 中国 | ZL201611021588.4 | 2018 年 11 月 20 日 | 3154976 | 西北工业大学 | 赵庄, 陈静, 隋尚, 谭华, 林鑫, 黄卫东 |
| 2 | 发明专利 | 一种能显著提高激光增材制造钛合金塑性的热处理方法 | 中国 | ZL201710685580.6 | 2019 年 7 月 12 日 | 3451950 | 西北工业大学 | 赵庄, 陈静, 谭华, 张国豪, 林鑫, 黄卫东 |
| 3 | 发明专利 | 一种同步送粉激光增材制造光粉交互的检测装置及方法 | 中国 | ZL201910711907.1 | 2022 年 12 月 6 日 | 5624693 | 西北工业大学 | 谭华, 米泽森, 袁子豪, 陈静, 林鑫, 黄卫东 |
| 4 | 发明专利 | 同步送粉激光增材制造光斑与粉斑相对位置自动匹配的装置及方法 | 中国 | ZL201811088716.6 | 2020 年 6 月 5 日 | 3823862 | 西北工业大学 | 林鑫, 谭华, 陈静, 黄卫东 |
| 5 | 发明专利 | 一种增材制造过程中成形件变形的实时测量方法及装置 | 中国 | ZL201510954796.9 | 2018 年 6 月 1 日 | 2947364 | 西北工业大学 | 谭华, 侯伟, 林鑫, 陈静, 黄卫东 |
| 6 | 发明专利 | 一种通过优化基板减小增材制造残余应力和非稳态的方法 | 中国 | ZL201910054188.0 | 2021 年 1 月 15 日 | 4204946 | 西北工业大学 | 林鑫, 鹿旭飞, 马良 |

| | | | | | | | | |
|----|------|--------------------------|----|------------------|-----------------|---------|-----------------|---------------------------|
| 7 | 发明专利 | 一种金属零件悬空结构的高能束增材制造方法 | 中国 | ZL201610460533.7 | 2018 年 3 月 2 日 | 2832221 | 西北工业大学 | 谭华, 王强, 林鑫, 陈静, 黄卫东 |
| 8 | 发明专利 | 分层块体金属增材制造方法 | 中国 | ZL201510763042.5 | 2017 年 6 月 13 日 | 2515006 | 西安铂力特增材技术股份有限公司 | 薛蕾、王俊伟、严峻 |
| 9 | 发明专利 | 高能束增材制造中温度与变形实时同步测量装置及方法 | 中国 | ZL201610076423.0 | 2018 年 5 月 1 日 | 2907532 | 西北工业大学 | 林鑫, 郑宇翔, 马良, 谭华, 杨海欧, 黄卫东 |
| 10 | 发明专利 | 一种提高下送粉金属增材制造粉末利用率的装置及方法 | 中国 | ZL202110336595.8 | 2022 年 12 月 6 日 | 5626629 | 西北工业大学 | 杨海欧、杨文哲、王佳、郝凯、黄琳皓、马晓蕾、林鑫 |

七、主要完成人情况（不超过 6 人）

| 姓名 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目贡献 |
|-----|----|------|------|--------|--------|--|
| 林鑫 | 1 | 院长 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 项目负责人，支持项目的总体研究工作，负责项目中激光增材制造组织性能主动调控理论研究，并开展激光增材制造稳定性控制技术研究，对发明点 1、2、3、4 做出了创新性贡献。支撑材料：专利 1-7，9-10。 |
| 谭华 | 2 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 项目技术骨干，开展关键技术方案论证，负责项目中激光增材制造稳定性工艺控制技术、高效高精度激光增材制造专用系列熔覆头研发以及适应增材制造工艺的结构优化与工艺设计方法研究工作，对发明点 1、2、3、4 做出了创新性贡献。支撑材料：专利 1-5，7、9。 |
| 黄卫东 | 3 | 无 | 教授 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 项目技术骨干，提出项目的总体研究思路，负责项目中激光增材制造组织主动调控、工艺控制和装备集成设计等工作，对发明点 1、2、3、4 的形成做出了重要贡献。支撑材料：专利 1-5，7、 |

| | | | | | | |
|-----|---|-----|------|-----------------|-----------------|--|
| | | | | | | 9。 |
| 薛蕾 | 4 | 总经理 | 副教授 | 西安铂力特增材技术股份有限公司 | 西安铂力特增材技术股份有限公司 | 项目技术骨干,开展装备完善改进以及技术转化应用研究,主要负责技术应用的组织和实施工作,对发明点 4 做出了重要贡献。支撑材料:专利 8。 |
| 杨海欧 | 5 | 无 | 副研究员 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 项目技术骨干,开展项目中高精度高稳定装备开发等研究工作。对发明点 4 做出了创新性贡献。支撑材料:专利 9、10。 |
| 马良 | 6 | 无 | 高工 | 西北工业大学 | 西北工业大学 | 项目技术骨干,开展激光增材制造热应力变形仿真研究工作。对发明点 3、4 做出了创新性贡献。支撑材料:专利 6、9 |

八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

| 完成单位 | 排名 | 对本项目主要贡献（限 600 字） |
|-----------------|----|---|
| 西北工业大学 | 1 | <p>作为项目负责单位，负责总体路线制定，研究内容实施、关键技术攻关、成果应用推广等工作，对发明点一、二、三、四做出了重要贡献。</p> <p>提出了由“点”及“体”的全过程组织性能主动调控新方法，突破激光增材制造构件的“高强度与高塑性匹配控制”技术，实现构件综合力学性能与锻件相当，各向异性/各向同性可调可控。</p> <p>发明了光-粉-熔池耦合适配的沉积生长自适应稳定控制技术，解决了增材制造构件几何形状与力学性的高稳定性控制难题，为激光增材技术的工程化应用奠定了技术基础。</p> <p>发明了工艺-基体协同优化的复杂结构应力变形控制技术，提升了增材制造形状精度，拓展了整体化复杂金属构件的精密增材制造能力。</p> <p>发明了高洁净高稳定高精度激光增材制造装备技术，解决了轻质合金关键构件高质量成形控制难题，形成具有自主知识产权的系列商用化设备，为高性能、高稳定、高精密增材制造提供关键装备保障。</p> <p>西北工业大学作为项目的第一完成单位，为本项目的提出和完成做出了创造性贡献。另外学校在科研经费资助、科研项目验收、人力资源配置、后勤条件保障等方面为该项目的顺利实施创造了有利条件。</p> |
| 西安铂力特增材技术股份有限公司 | 2 | <p>作为项目第二完成单位，负责激光增材制造成果应用转化和工程化装备中涉及到的关键技术的研究、改进和实施工作，对发明点四做出了创造性贡献。</p> <p>发明了分层块体金属增材制造方法，解决了轻质金属复杂分层结构激光增材制造的难题。</p> <p>围绕高质量激光增材制造的工程化需求，研究了商用化技术和装备的集成技术，开发了面向产品的工艺适应性数据库，支撑了产品精度和性能的实现。负责的系列功能模块改进与集成，提高了设备的技术指标和先进性。</p> |

九、完成人合作关系说明

该项目成果由项目第一完成人林鑫与谭华、黄卫东、薛蕾、杨海欧、马良等人合作完成。林鑫、谭华、黄卫东、杨海欧、马良均工作于西北工业大学材料学院，隶属于金属增材制造团队，林鑫为团队带头人。林鑫教授也担任了陕西省创新团队负责人，西安铂力特增材技术股份有限公司董事长、总经理薛蕾和其他完成人均为创新团队骨干成员，薛蕾主要参与装备的研发和项目成果的推广应用。该项目各完成人在项目执行过程中开展合作研究，先后共同承担了包括国家自然科学基金、国家重点研发计划项目等国家和省部级科研项目，取得了项目中列出的系列专利和论文成果。