

2026 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

高代次单晶高温合金高梯度定向凝固缺陷与组织性能协同调控技术

二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：

单晶高温合金叶片是航空发动机不可或缺的核心关键热端部件。该成果针对高代次单晶高温合金叶片长期存在的凝固缺陷频发、组织调控难、服役寿命短等“卡脖子”技术难题。从定向凝固基本原理出发，创新发明了液态金属冷却高梯度定向凝固、高代次单晶高温合金叶片晶体取向、凝固缺陷及组织性能协同调控等核心关键技术，开发了单晶叶片高梯度定向凝固成套装备，成功制备了系列低缺陷、组织超细化、高强度、长寿命新型高代次单晶叶片，有力保障了多个国家重要型号任务的预研，实现了高梯度定向凝固单晶叶片从基础研究、制备技术、工艺装备、工程应用到成果转化的全链路原创性关键技术突破。该成果获授权中国发明专利 35 项、美国发明专利 1 项及团体标准 1 项，核心技术自主可控；其中 10 项核心发明专利于 2021 年作价入股，成功孵化苏州高晶新材料科技有限公司，实现了重大科研成果转化。该成果在中国航发南方工业有限公司等航空航天重点单位及高新技术企业实现了重要应用，大幅提升了单晶叶片合格率，打破了国外高端装备与核心技术垄断，应用价值与社会经济效益显著。

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

该项目属于材料合成与加工技术领域。

高代次单晶高温合金叶片是高推重比航空发动机的核心关键热端部件，决定了发动机的性能先进性和服役安全性。然而，该类单晶高温合金成分和叶片结构复杂、制造流程长、凝固过程极难精确调控，长期存在凝固缺陷频发、取向精度差、生产合格率低、组织调控难、服役寿命短等瓶颈问题，已经成为制约我国先进航空发动机发展和应用的重大“卡脖子”技术难题。该项目面向高推重比航空发动机对低缺陷、高强度、长寿命高代次单晶叶片的国家重大战略亟需，在国家自然科学基金重点项目、重大仪器专项、青 B 项目，两机专项等 10 余项国家及省部级重要科研项目的资助下，历经 16 年系统深入的基础研究和技术攻关，从定向凝固基本原理出发，突破了液态金属冷却高梯度定向凝固、单晶叶片晶体取向、缺陷控制及组织性能协同调控等关键技术，开发了高代次单晶叶片高梯度定向凝固成套装备，有力保障了多个国家重要型号任务的预研，实现了高梯度定向

凝固单晶叶片从基础研究、制备技术、工艺装备、工程应用到成果转化的全链路原创性关键技术突破。主要技术发明点如下：

- (1) 发明了高代次单晶高温合金高梯度定向凝固组织均细化调控技术，突破了凝固界面位置、熔体强制对流、温度梯度稳定性、液态金属强制冷却等控制技术难题，开发了系列高梯度定向凝固装备，实现了高于国内外同类水平 3 倍的高温度梯度（170~250K/cm）定向凝固，成功制备了系列具有组织超细化、低偏析、高初熔温度的新型高代次单晶高温合金。
- (2) 发明了高代次单晶高温合金三维取向精确控制技术，研发了高晶格匹配、无糊状区、低成本异质籽晶，揭示了单晶高温合金异质籽晶调控三维取向机理，实现了高梯度定向凝固单晶叶片一次晶体取向控制在 5°以内，比传统定向凝固一次取向控制精度提高了 3 倍，二次取向偏差仅 2.8°，单晶晶体取向合格率超过 95%。
- (3) 发明了高代次单晶高温合金叶片凝固缺陷与组织协同调控技术，提出了单晶叶片杂晶缺陷形成判据，建立了单晶叶片三维空间枝晶生长演化模型，阐明了枝晶变形、枝晶破碎等对单晶叶片凝固缺陷的作用机制，实现了单晶叶片枝晶生长行为与凝固缺陷的精确调控，使叶片缘板小角晶界缺陷由 12°降低至 5°，杂晶完全消除，单晶叶片合格率较传统定向凝固提高了 25%。
- (4) 发明了高代次单晶叶片高温组织稳定性及力学性能调控技术，揭示了晶体取向、微观组织对力学性能和断裂行为的作用机制，制备的单晶叶片 1000°C/1000h 无 TCP 相析出，组织稳定性优异。1100°C 抗拉强度达 600MPa；1100°C/150MPa 持久寿命达 133h，较传统定向凝固提升了 27%，满足了我国新一代航空发动机对复杂结构单晶叶片的应用需求。

该项目获授权中国发明专利 35 项、美国发明专利 1 项及团体标准 1 项。在 *Acta Mater.*、*Int. J. Plasticity*、*J. Mater. Sci. Technol.*、*Mater. Res. Lett.* 等国内外重要刊物发表 SCI 论文 162 篇，国际会议特邀报告 15 次，出版专著 2 部，其中《先进材料定向凝固》获全国第三届“三个一百”原创出版工程奖。培养博士生 24 人、硕士生 60 人，其中全国百篇优博提名奖 1 人，陕西省优博获得者 1 人，中国材料研究学会科学技术博士生创新奖 3 人；培育国家级领军人才 1 人，国家级青年人才 2 人。项目成果受到美国、英国、日本、德国、中国等 30 余个国家和地区知名学者的高度评价，产生了重要的学术影响。获高温合金领域国际著名学者德国亚琛工业大学 A. Bührig-Polaczek 教授、中国工程院院士柳百成教授及多位国家级领军人才的充分肯定和积极评价，认为该项目“解决了单晶叶片凝固缺陷这一行业共性难题”、“突破了经典晶粒竞争生长模型的局限性”、“实现了单晶高温合金取向的精确控制”、“澄清了单晶高温合金凝固缺陷的形成机制”。项目成果对推动我国高温合金精密铸造技术进步、提升航空发动机热端部件自主研发能力和水平具有重要意义。获 2020 年中国产学研创新合作奖、2024 年中国材料研究学会青年科技奖，主持的 2 项国家自然科学基金重点项目结题获评优秀。

该项目研究成果形成了集基础理论、专利技术和工艺装备为一体的高梯度定向凝固高代次单晶叶片凝固理论与新技术。10 项国家发明专利于 2021 年作价投资 3575 万元孵化成立了苏州高晶新材料科技有限公司，已形成了符合航空标准的年产 200 吨高温合金精密铸件能力。该项目形成的高梯度定向凝固装备与技术、高梯度定向凝固单晶叶片取向及缺陷控制技术等已在中国航发南方工业有限公司、江苏隆达超合金航材有限公司、集萃翌拓科技(苏州)有限公司、西部金属材料股份有限公司、沈阳好智多新材料制备技术有限公司等航空航天重点企业实现了重要应用，为国内 10 余个研究所、高校及企业提供了 80 余套高梯度定向凝固炉，成功实现了单晶高温合金叶片及其他精密合金等多规格复杂铸件批量化生产。近三年新增销售额 4.1 亿元，产生了显著的经济和社会效益。项目负责人苏海军教授入选国家级领军人才、陕西省重点科技创新团队负责人，担任重点新材料研发与应用国家重大专项高温合金产品首席专家、国家重点研发计划首席科学家和陕西高校先进高温合金重点实验室主任，获陕西省科学技术一等奖、二等奖及全国有色金属优秀青年科技奖等多项奖励及荣誉。

四、客观评价

该项目获授权中国发明专利 35 项、美国发明专利 1 项及团体标准 1 项。在 *Acta Mater.*、*Int. J. Plasticity*、*J. Mater. Sci. Technol.*、*Mater. Res. Lett.* 等国内外重要刊物发表 SCI 论文 162 篇，国际会议特邀报告 15 次，获得了美国、英国、日本、德国、中国等 30 余个国家和地区知名学者的高度评价，产生了重要的学术和行业影响。

1. 国内外同行学者评价意见

(1) 针对发明点 1 的客观评价：国内外学者充分肯定了该项目有关高代次单晶高温合金高梯度定向凝固组织均细化调控技术的开创性工作。中国科学院院士、浙江大学张泽教授在材料领域顶刊【*Journal of Materials Science & Technology*, 253 (2026) 87-97】论文中高度肯定了该项目的研究工作，引用该项目关于高梯度定向凝固高温合金凝固组织研究的文章 5 篇，以阐述镍基高温合金组织稳定性的影响因素。德国拜罗伊特大学、材料研究中心主任 U. Glatzel 教授在【*Advanced Engineering Materials*, 2026, e202502756】论文中指出该项目“阐明了单晶高温合金薄壁效应对小壁厚构件枝晶间距的主导作用机制”，认为该结果为其镍基单晶高温合金薄壁构件枝晶组织调控及凝固行为模拟研究提供了重要实验和理论依据。

(2) 针对发明点 2 的客观评价：国内外学者充分肯定了该项目有关高代次单晶高温合金三维取向精确控制技术的重要发明。日本东京大学 Y. Shibuta 教授和东北大学 T. Mohri 教授在热力学领域顶刊【*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160 (2020) 120196】对该项目提出的晶粒反常竞争生长机制高度评价：认为“突破了经典晶粒竞争生长模型的局限性”，并利用该成果修订了传统的二维相场模型，阐明了汇聚双晶反常晶粒竞争生长行为。德国亚琛工业大学 A. Bührig-Polaczek 教授在论文【*Journal of Alloys and Compounds*, 817 (2020) 153337】

中高度肯定了该项目的研究工作，引用该项目关于单晶高温合金取向调控研究的文章 8 篇，利用该项目提出的二次枝晶取向对单晶叶片取向偏离的作用机制，澄清了其工作中单晶叶片缘板内部微观组织的演化规律，实现了单晶叶片取向精确控制。

(3) 针对发明点 3 的客观评价：国内外学者充分肯定了高代次单晶高温合金叶片凝固缺陷与组织协同调控技术的重要发明。中国工程院院士、中国铸造终身成就奖获得者柳百成教授在论文【*Journal of Materials Science & Technology*, 137 (2023) 232-246】中引用该项目关于单晶高温合金凝固缺陷形成及抑制机理研究的文章 7 篇，指出该项目“发现了枝晶变形是凝固缺陷形成的重要原因”，并据此实现了单晶高温合金条纹晶缺陷控制。

(4) 针对发明点 4 的客观评价：国内外学者充分肯定了高代次单晶叶片高温组织稳定性及力学性能调控技术的重要发明。国家海外高层次人才、北京航空航天大学刘翔教授在材料领域顶刊【*International Journal of Fatigue*, 210 (2026) 109684】中指出该项目“阐明了取向偏离角对单晶叶片蠕变性能的影响”，并基于该项目取向偏离控制技术实现了单晶叶片疲劳性能的提升。

2. 项目验收评价意见

(1) 国家自然科学基金重点项目——项目验收专家组评价认为：“系统研究了单晶高温合金凝固特性及缺陷形成机制，明确了叶片结构尺寸—凝固过程参数—凝固缺陷之间的相互作用关系，揭示了杂晶、取向偏离和小角度晶界形成与演化机理，提出了大型复杂单晶叶片精确凝固成形及缺陷控制方法，为国产第三代单晶高温合金的成分设计、大型复杂叶片的结构设计和制造提供了科学依据和技术原型；研究工作创新性强，与国家重大工程结合紧密”，项目综合评价等级 A。

(2) 航空科学基金——验收专家组评价认为：“该项目完成了不同截面变化、异形截面及在不同工艺参数条件下定向凝固组织的实验和模拟研究，提出了高温梯度定向凝固温度梯度评估模型，获得了截面突变过程中杂晶的形成规律，研究了降低抽拉速率、引入石墨冷却块等方法对杂晶的影响，从而为减少单晶叶片凝固缺陷提供技术支持；成果达到国内领先水平，在航空发动机单晶叶片制造领域具有广泛应用前景”，项目综合评价优秀。

(3) 中国航发动力股份有限公司技术合作开发项目——验收专家组评价认为：“阐明了第四代单晶合金 DD91 定向凝固机理，突破了凝固组织和缺陷控制技术，可以有效指导叶片铸造和热处理工艺的制定”。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

(1) 在高梯度定向凝固技术与理论、高性能单晶高温合金等领域获授权中国发明专利 35 项、美国发明专利 1 项及团体标准 1 项，编写专著 2 部。在国内外著名学术期刊上发表 SCI 论文 162 篇；在国际会议上做特邀报告 15 次；培养博士生 24 人、硕士生 60 人，其中全国百篇优博提名奖 1 人，陕西省优博获得者 1 人，中国材料研究学会科学技术博士生创新奖 3 人。项目负责人苏海军教授入选

国家级领军人才、陕西省重点科技创新团队负责人，获全国有色金属优秀青年科技奖等多项奖励。项目成果在 10 余家科研院所和企业获得重要应用，近三年新增销售额 4.1 亿元。同时，研究成果中 10 项专利通过知识产权评估作价 3575 万元孵化成立苏州高晶新材料科技有限公司，实现了重大成果应用转化。

(2) 中国航发南方工业有限公司(我国中小型航空发动机主要研制生产基地)：我单位应用西北工业大学凝固组织与缺陷调控技术，实现了单晶一次取向平均偏差 $<5^{\circ}$ ，二次取向偏差平均仅 $<2.8^{\circ}$ ，并针对第二代镍基单晶合金 DD412 高压涡轮工作叶片开展了应用验证工作，取向合格率 $>95\%$ ，叶片铸造合格率一次达到 65% 以上，成效显著。技术成果还推广应用于 DD407、DD6 单晶叶片实际生产中，为高性能先进航空动力单晶涡轮叶片关键核心热端部件的研发和制造提供了重要支撑。

(3) 江苏隆达超合金航材有限公司（科创板上市公司，国家级专精特新“小巨人”企业）：将项目成果应用于我公司高温合金母合金制备生产过程中，解决了高温合金母合金制备过程中的冶金质量和性能调控难题，使凝固偏析降低 23%，合金持久寿命提高 27%，形成了年产铸造高温合金年产能 5000 吨的生产规模，达到国际先进水平。研发的单晶高温合金，成功应用于中国商用航空发动机，替代进口，满足了国际适航标准要求。

表 1. 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/电话
1	中国航发南方工业有限公司	新型凝固技术	单晶取向合格率 $>95\%$ ，叶片铸造合格率达到 65% 以上	2023.05-至今	郝新
2	江苏隆达超合金航材有限公司	新材料技术	高温合金材料，近三年新增销售额 13168 万元	2015.02-至今	吕斌

2. 应用效益

该项目针对高代次单晶高温合金叶片长期存在的凝固缺陷频发、组织调控难、服役寿命短等卡脖子技术难题，突破了系列核心关键技术，开发了高梯度定向凝固成套装备，实现了 170~250K/cm 高温梯度，成功制备了系列低缺陷、组织超细化、高强度、长寿命高代次单晶叶片，取得了显著的社会和经济效益。研发了高晶格匹配、无糊状区、低成本异质籽晶，将单晶叶片一次取向偏差控制在 5° 以内，取向合格率超 95%；较传统定向凝固工艺，高代次单晶叶片合格率提升了 25%、高温持久寿命提升了 27%，解决了高代次单晶叶片成形与组织性能调控难题，显著提升了我国航空动力装备可靠性与核心竞争力。

该项目培养硕博研究生 84 人，其中全国百篇优博提名奖 1 人，陕西省优博获得者 1 人，中国材料研究学会科学技术博士生创新奖 3 人，80% 以上毕业生成

为航空航天领域重点单位的技术骨干，培育多名国家级、省级高层次人才，构建了特色鲜明的航空航天材料“总师型”人才培养体系。该项目成果中 10 项核心国家发明专利于 2021 年作价投资 3575 万元，孵化成立了苏州高晶新材料科技有限公司，形成了符合航空标准的年产 200 吨高温合金精密铸件能力。该项目产生的高梯度定向凝固装备与技术、高梯度定向凝固单晶叶片取向及缺陷控制技术等已在中国航发南方工业有限公司、江苏隆达超合金航材有限公司、集萃翌拓科技(苏州)有限公司、西部金属材料股份有限公司、沈阳好智多新材料制备技术有限公司等航空航天重点企业实现了重要应用，为国内 10 余个研究所、高校及企业提供了 80 余套高梯度定向凝固炉，成功实现了单晶高温合金叶片及其他精密合金等多规格复杂铸件批量化生产。近三年新增销售额 4.1 亿元，产生了显著的经济和社会效益。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

（应填写直接支持该项目主要技术发明成立且已批准或授权的知识产权（包括发明专利、实用新型专利、植物新品种权、计算机软件著作权、集成电路布图设计权、论文等）和标准规范等，应按与项目主要技术发明点的密切和重要程度排序。

对于发明专利，知识产权类别写发明专利，然后依次填写发明名称，国家（地区），专利号，授权公告日，专利证书上的证书号，发明人，专利权人。对于其他类型，根据实际情况填写相应栏目，发明人一栏可不填。

所列知识产权应为该项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖推荐项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意。有关知情证明材料均存档备查。

所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2025 年 12 月 31 日之前。发明人均不是项目主要完成人的发明专利，不得列入本表。）

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	Device and method for continuous temperature gradient heat treatment of rod-shaped material	美国	US 11,753,695 B2	2023.09.12	US011753695B2	西北工业大学	黄太文；刘 林；郭敏；苏 海军；张军； 杨文超;刘哲 良；郭一诺； 昌花婷；申 辉；李韶颖

2	发明专利	使用 Ni-W 异质籽晶制备 DD3 单晶高温合金试棒的方法	中国	ZL202010079827.1	2022.04.19	5089206	西北工业大学	杨文超；秦嘉润；屈鹏飞；刘林；张军；苏海军；黄太文；郭敏；郭跃岭
3	发明专利	一种二次取向控制单晶高温合金铸件突变截面杂晶缺陷的方法	中国	ZL202211486029.6	2025.10.03	8328351	西北工业大学	杨文超；曹凯莉；郭敏；黄太文；苏海军；刘林；张军
4	发明专利	一种铸造单晶高温合金籽晶切割制备的方法	中国	ZL202010117875.5	2022.04.05	5053641	西北工业大学	杨文超；屈鹏飞；刘林；张军；黄太文；苏海军；郭敏；郭跃岭
5	发明专利	一种确定铸造单晶高温合金晶体取向的方法	中国	ZL201910257352.8	2021.09.17	4683290	西北工业大学	刘林；胡松松；杨文超；杨敏；李卓然；霍苗；孙德建；黄太文；苏海军；甘斌；郭敏；郭跃岭；张军；傅恒志

6	发明专利	一种强化 γ' 相的第三代镍基单晶高温合金及制备方法	中国	ZL202010426827.4	2021.09.17	4684569	西北工业大学	黄太文；李卓然；刘林；张军；王博；苏海军；杨文超；郭敏
7	发明专利	镍基单晶高温合金固溶处理方法	中国	ZL201510371742.X	2016.10.05	2256752	西北工业大学	刘林；张琰斌；黄太文；杨振宇；岳全召；张军；杨文超；傅恒志；苏海军
8	发明专利	一种重复使用籽晶制备单晶高温合金的方法	中国	ZL201610389765.8	2018.07.06	2992624	西北工业大学	刘林；胡松松；黄太文；张军；杨文超；苏海军；郭敏；傅恒志
9	发明专利	使用经固溶处理的籽晶制备单晶高温合金的方法	中国	ZL201810340300.2	2021.01.05	4191652	西北工业大学	刘林；胡松松；杨文超；李卓然；杨敏；黄太文；苏海军；郭敏；张军；甘斌；傅恒志

10	发明专利	一种快速测定单晶 高温合金初熔温度 的方法	中国	ZL202011116560.5	2021.07.02	4522919	西北工业大学	郭敏；王涛； 黄太文；昌花 婷；张军；刘 林；杨文超； 苏海军
----	------	-----------------------------	----	------------------	------------	---------	--------	---

七、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列主要完成人应为在陕的个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人，并对该项目的主要技术发明做出创造性贡献（其中完成人必须为全职在陕的个人）。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

前三位完成人应为所列发明专利的发明人，其他完成人一般也应持有知识产权（含论文专著等）。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与该项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对该项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对该项目做出的实质性贡献。）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对该项目贡献
苏海军	1	副院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目第一完成人，项目总体思路和研究方案的提出者，对技术发明点 1、2、3、4 做出了实质性贡献。发明了高代次单晶高温合金高梯度定向凝固组织均细化调控技术，研制了系列高梯度定向凝固装置；发明了高代次单晶高温合金三维取向精确控制技术，提出了复杂结构单晶叶片凝固缺陷控制方法，提高了单晶叶片持久寿命，是 10 项主要知识产权的发明人。
杨文超	2	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目的主要完成人，对技术发明点 1、2、3、4 做出了实质性贡献。发明了高梯度定向凝固组织均细化调控技术，

						揭示了异质籽晶制备单晶高温合金的三维晶体取向控制机理；发明了高代次单晶高温合金叶片凝固缺陷与组织协同调控技术，降低了单晶叶片凝固缺陷形成倾向，提高了单晶叶片持久寿命，是 10 项主要知识产权的发明人。
郭敏	3	/	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对技术发明点 2、3 做出了实质性贡献。提出了单晶高温合金三维取向精确控制方法，提高了单晶叶片取向合格率；揭示了复杂结构单晶叶片凝固缺陷形成机理，是 9 项主要知识产权的发明人。
黄太文	4	/	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对技术发明点 1、4 做出了实质性贡献。发展了高梯度定向凝固技术，建立了温度梯度稳定控制方法；提出了高梯度定向凝固高代次单晶高温合金的凝固缺陷控制方法，提高了单晶叶片持久寿命，是 10 项主要知识产权的发明人。
刘林	5	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目研究方案制定的参与者，负责项目规划和人员协调，是项目单晶高温合金高梯度定向凝固技术与理论的指导者。对技术发明点 1、3、4 做出了实质性贡献。发明了高梯度定向凝固下温度场控制技术，建立了单晶叶片凝固特性与凝固缺陷之间的映射关系，

						提出了低缺陷单晶叶片定向凝固制备策略，提高了叶片持久寿命，是 10 项主要知识产权的发明人。
傅恒志	6	/	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目研究思路的提出者和研究方案制定的参与者。对技术发明点 1、3 做出了实质性贡献，是高梯度定向凝固、单晶高温合金凝固缺陷控制技术、凝固缺陷与组织协同调控机理等新方法和新理念的提出者，是主要知识产权 5、7、8、9 的发明人。

八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对该项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	该项目在国家自然科学基金重点项目、重大仪器专项、青 B 项目，两机专项等 10 余项国家及省部级重要科研项目的资助下，由西北工业大学组织实施并完成。学校为项目研究和实施提供了充分的人力、物力、财力支持，对项目执行情况进行了监督、管理和协调，保障项目组高质量完成了全部研究任务。 项目组在西北工业大学的支持下，针对航空发动机用高代次单晶高温合金叶片长期存在冶金缺陷频发、取向精度和生产合格率低、服役寿命短等瓶颈问题开展创新研究工作，从定向凝固基本原理出发，发明了高梯度定向凝固、高代次单晶高温合金叶片晶体取向、凝固缺陷及组织性能协同调控等核心关键技术，开发了单晶叶片高梯度定向凝固成套装备，成功制备了系列低缺陷、组织超细化、高强度、长寿命高代次单晶叶片，有力保障了多个国家重要型号任务的预研，实现了高梯度定向凝固单晶叶片从基础研究、制备技术、工艺装备到工程应用的原创性关键技术突破。该项目获授权中国发明专利 35 项、美国发明专利 1 项及团体标准 1 项，其中 10 项国家发明专利于 2021 年作价投资孵化成立了苏州高晶新材料科技有限公司，实现了重大成果转化。项目成果已成功应用于中国航发南方工业有限公司等航空航天重点企业科研生产，为国内 10 余个研究所、高校及企业提供了 80 余套高梯度定向凝固装备，成功实现了单晶高温合金叶片及其他精密合金等多规格复杂铸件批量化生产，产生了显著的经济和社会效益。

九、完成人合作关系说明

该项目完成人苏海军、杨文超、郭敏、黄太文、刘林、傅恒志为西北工业大学材料学院教师，是西北工业大学凝固技术全国重点实验室先进高温材料定向凝固课题组核心成员。第一完成人苏海军教授提出了主要学术思想、制定并实施了该项目的总体研究方案。第二完成人杨文超教授和第三完成人郭敏副教授从 2015 年加入项目团队。杨文超教授作为项目骨干，主要开展了高代次单晶高温合金高梯度定向凝固组织均细化调控等方面研究工作。郭敏副教授主要开展了高

代次单晶高温合金三维取向精确控制等方面研究工作。第四完成人黄太文副教授主要开展了高代次单晶高温合金叶片凝固缺陷与组织协同调控等方面研究。第五完成人刘林教授，一直开展高代次单晶叶片高温组织稳定性及力学性能调控等方面研究，参与了该项目的部分关键技术研究工作，是第四完成人黄太文副教授的博士生导师。第六完成人傅恒志院士是项目团队的学术带头人，负责该项目的技术和理论指导，是第一完成人苏海军教授和第五完成人刘林教授的博士生导师。六位主要完成人合作方式主要包括参与课题组项目、合著论文、合报专利、共同报奖等。该项目所取得的研究成果均由以上六位合作人共同完成，该项目获得的主要知识产权均为以上合作人的共同署名。