

# 陕西省技术发明奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	单晶涡轮叶片冶金缺陷形成机理及控制技术
主要完成人	王富，杨强
主要完成单位	西安交通大学

## 二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>单晶涡轮叶片的冶金质量是决定航空发动机及燃气轮机的综合性能的关键因素，然而单晶叶片的冶金质量控制难度大，目前我国单晶涡轮叶片生产合格率仍不足 50%，远低于西方国家 70%以上的成品率。针对这一难题，该项目在单晶叶片冶金缺陷形成机理及控制技术方面开展了创新性研究，揭示了单晶叶片定向凝固过程中冶金缺陷的形成机理，提出了其控制工艺方法，开发了基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固新技术。项目使单晶叶片在定向凝固制备过程中各类冶金缺陷的发生率降低了 80%，消除了雀斑缺陷，叶片良品率提升了 20%以上。发表高水平学术论文 20 篇，获得授权发明专利 9 项，软件著作权 1 项，取得了良好的学术成果。研究成果应用于东方电气集团东方汽轮机有限公司、江苏永瀚特种合金技术股份有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司等国内重点企业的单晶叶片生产，提高了其叶片成品率，累计实现销售收入 1.72 亿元，产生了显著的社会和经济效益。</p> <p>提名材料真实有效，技术具有显著的创新性，具有较高的学术水平和良好的工业应用前景。同意推荐该项目参评 2025 年度陕西省技术发明二等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

### 三、项目简介

先进航空发动机及燃气轮机是现代制造业的最高端产品，其中高温合金单晶涡轮叶片是核心热端部件，被誉为“制造业皇冠上的明珠”。单晶叶片需采用定向凝固精密铸造技术将高温合金制成单晶组织，由于完全消除了晶界，且具有与应力方向一致的晶体取向，在高温条件下呈现出优异的机械性能和抗腐蚀性能。单晶叶片的使用程度，已成为衡量航空发动机及燃气轮机先进性的重要标志。单晶叶片质量是保证“两机”寿命和稳定运行的关键，一直以来都是我国先进航空发动机及燃气轮机研制的“卡脖子”问题。单晶叶片质量的首要决定性因素是冶金缺陷控制，尤其是高代次高温合金复杂结构叶片，其因冶金缺陷导致的废品率高达 30~40%。针对该难题，本项目在单晶叶片冶金缺陷形成机理及控制技术领域开展了创新性研究，提出了单晶叶片中杂晶、条带晶等显性冶金缺陷的控制方法，提出了“马赛克”、异质共晶等隐性冶金缺陷的控制方法，开发了耦合尺寸-成分-工艺多因素的雀斑预测软件及基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术，有效提高了单晶涡轮叶片的冶金质量。

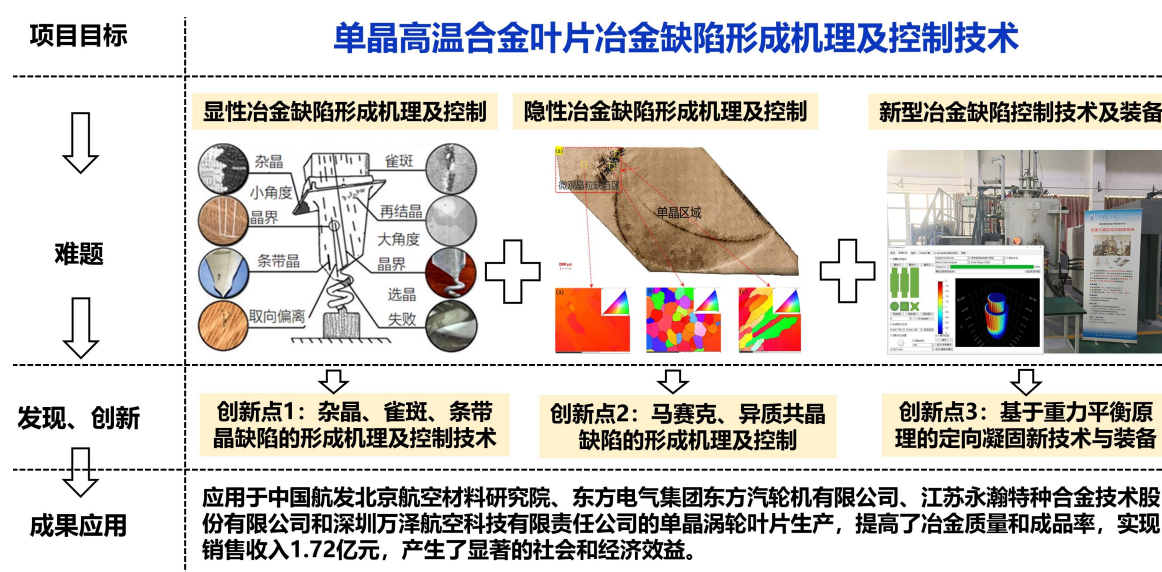


图 1 项目总体研究方案

本项目的创新点包括：

1. 揭示了单晶叶片定向凝固过程中显性冶金缺陷的形成机理并提出了控制方法。发现了杂晶形成的临界热过冷机制，提出了通过降低 Re，Ru 含量增加自身抗过冷能力的方法降低杂晶的形成，发明了可提升固液界面前沿温度梯度和消除局部过冷，提升凝固温度场均匀性的靶向温控陶瓷铸型，实现了单晶叶片批产条件下的杂晶

控制；发现了条带晶形成的型壳表面粘结和夹杂切割机制，提出了控制条带晶缺陷的陶瓷型壳内表面光整技术及过滤网的多级级配设计的夹杂控制技术，有效控制了条带晶在单晶叶片中的形成。研究成果成功应用于我国某型航空发动机和重型燃气轮机生产中，大幅降低了单晶叶片的显性冶金缺陷，提高了单晶叶片的冶金质量和成品率。

**2. 阐明了单晶叶片定向凝固过程中隐性冶金缺陷的形成机理并提出了控制方法。**发现了单晶叶片中异质  $\gamma/\gamma'$  共晶缺陷，构建了其与 MC 碳化物、 $\gamma$  基体的三相共生生长模型，提出了降低 C 含量和基于温场调控和型壳变壁厚结构设计的靶向控制策略，提高了局部冷速，实现了异质共晶缺陷的有效控制；发现了单晶叶片中的马赛克晶粒缺陷，构建了其形成的瑞利数不稳定性过热机制模型，揭示了其热熔断形成机制，发明了基于 Re 含量控制、抽拉速率优化、叶片缘板结构设计的多因素协同调控方法及靶向引晶技术，有效抑制了马赛克缺陷的形成。研究成果应用于我国某型航空发动机和重型燃气轮机生产中，有效减少了单晶叶片的隐性冶金缺陷，提高了单晶叶片的冶金质量和成品率。

**3. 开发了面向工业生产的雀斑缺陷预测软件与基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术。**基于雀斑的形成机制，开发了面向工业生产的耦合尺寸-成份-工艺多因素的雀斑瑞利数不稳定性数学模型及预测软件，准确预测了单晶叶片工业生产中雀斑缺陷的形成；基于杂晶和雀斑形成的机制，以温度均匀性和流体稳定性为目标，开发了基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术，研制了全球首台套中试级定向凝固设备，从定向凝固设备原理上消除了雀斑缺陷，同时大幅降低了杂晶缺陷的形成。研究成果应用于我国多款型号航空发动机和重型燃气轮机的高代次镍基高温合金单晶叶片生产，消除了雀斑缺陷，有效减少了杂晶缺陷，大幅提高了单晶叶片的冶金质量和成品率。

本项目自 2019 年起，先后获得了国家自然科学基金、军委科技委基础加强计划重点项目课题的资助，共发表 SCI 论文 20 篇，获得授权发明专利 9 项，软件著作权 1 项，获 2025 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖。成果分别应用于东方电气集团东方汽轮机有限公司、江苏永瀚特种合金技术股份有限公司和深圳万泽航空科技有限责任公司单晶涡轮叶片工业生产中，有效减少了叶片生产中的显/隐形缺陷，提高了单晶叶片的冶金质量和成品率，累计实现销售收入 1.72 亿元，产生了显著的社会和经济效益。

## 四、客观评价

本项目在单晶叶片冶金缺陷形成机理及控制技术领域开展了系统性创新研究，提出了单晶叶片中的显/隐性冶金缺陷的控制方法，开发了基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固新技术，有效抑制了单晶叶片的冶金缺陷，提高了单晶叶片的冶金质量。相关研究成果在 *Acta Materialia*、*Journal of Materials Science & Technology*、*Journal of Alloys and Compounds* 等国内外知名学术期刊上共发表学术论文 20 篇，获得授权发明专利 9 件，登记软件著作权 1 件，被国内外同行在 *Journal of Materials Science & Technology*、*Advanced Engineering Materials* 等累计引用 121 次，单篇最高他引 21 次，被多名国内外知名学者关注并正面评价，成果获得 2025 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖。本项目的研究成果已经成功应用于单晶叶片的工业生产，有效提高了单晶叶片的冶金质量和成品率，产生了显著的经济效益，对于推动先进航空发动机及重型燃气轮机自主研发具有重要意义。针对不同的创新点具体评价如下：

### 3.1 单晶叶片定向凝固过程中显性冶金缺陷的形成机理及控制方法

中国工程院院士、清华大学柳百成教授，在《*Journal of Materials Science & Technology*》期刊上发表的研究型论文“Generation mechanism and motion behavior of sliver defect in single crystal Ni-based superalloy”中正面肯定了本项目在高温合金单晶铸件中条纹晶形成机理的研究工作，指出“提出了一种新的条纹晶形成机理，条纹晶的产生主要来源于枝晶的撕断，夹杂的氧化物和凝固空隙造成的应力分布不均匀会导致枝晶的撕断。基于糊状区枝晶形貌分析，他们的研究还提出枝晶撕裂的固相分数范围在 0.6-0.8 之间，严格的解释了条纹晶缺陷起源于枝晶的撕裂”。

英国皇家工程院院士，英国莱斯特大学董洪标教授在《*Acta Materialia*》发表的“Solute enrichment induced dendritic fragmentation in directional solidification of nickel-based superalloys”的论文中肯定了本项目的研究成果，指出“在高温合金铸件的铸态组织中，表面的雀斑链是由取向杂乱的等轴晶组成”。

中国科学院院士、浙江大学张泽教授，在《*Journal of Materials Research and Technology*》中发表的“Effects of Cobalt on solidification characteristics and as-cast microstructure of an advanced nickel-based single crystal superalloys”论文肯定了本项目的研究成果，指出“Ru 可以降低 Re、W 等元素的凝固偏析程度，对 TCP 相沉淀

的抑制起重要作用”，为研究 Co 对镍基单晶高温合金凝固组织的影响提供了参考。

江苏永瀚特种合金技术有限公司在研制 300MW 重型燃机一级单晶叶片时，应用了本项目“关于杂晶和雀斑缺陷控制方法”的技术成果，有效指导了该公司制定消除杂晶和雀斑缺陷的措施，提高了单晶叶片的质量和成品率。

东方汽轮机有限公司在自主研发和试制 G50 国产燃气轮机定向及单晶叶片过程中，应用了本项目的研究成果，解决了涡轮叶片的杂晶和内界面雀斑问题，提高了该公司叶片生产的合格率。

深圳市万泽中南研究院有限公司在为 WS-XX 发动机制备单晶转子叶片时，应用了本项目提出的条带晶形成机理及控制方法，通过改善模壳内壁光滑度和避免夹杂，基本消除了条带晶缺陷。

### 3.2 单晶叶片定向凝固过程中隐性冶金缺陷的形成机理及控制方法

德国亚琛工业大学教授、铸造研究所所长 Andreas Bührig-Polaczek 教授，在《Materials》期刊上发表论文“Influence of process parameter and alloy composition on misoriented eutectics in single-crystal Nickel-based superalloys”中肯定本项目研究中  $\gamma/\gamma'$  共晶组织可以在碳化物上形核的形成机理。

深圳市万泽中南研究院有限公司在研制商发大飞机 CJ-1000A 发动机的单晶叶片时，采用本项目提出的隐性晶粒缺陷的形成机理及控制方法，消除了此类隐性马赛克缺陷，为发动机的安全运行提供了更加可靠的保障。

江苏永瀚特种合金技术有限公司在制定 300MW 重型燃机一级动叶热处理工艺时，应用了本项目在异质共晶凝固行为和不同凝固参数下的相析出行为的研究成果，提高了单晶叶片的质量和成品率。

### 3.3 基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固新技术

沈阳真空技术研究所有限公司指出“本项目开发的基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固新技术有效支撑了公司高稳定性定向凝固设备的研发，打破了我国对高性能定向凝固设备只能进口的局面”。通过应用本研究成果，该公司成功研发出了全球首台基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固生产样机，有效提高了单晶叶片的冶金质量，实现了我国在定向凝固高端设备制造领域对西方发达国家的赶超。

## 五、应用情况和效益

### 1. 应用情况

本项目面向航空发动机与工业燃气轮机核心热端涡轮叶片的高品质制造需求，系统研究了单晶叶片显/隐性冶金缺陷的形成机理，并提出了对应的控制策略与方法，有效抑制了单晶叶片制备过程中冶金缺陷的发生，解决了单晶叶片冶金缺陷控制难、成品率低等难题，实现了单晶叶片的高品质制备。研究成果已助力多家单晶叶片生产企业，大幅提升了叶片质量和成品率，助力了我国航空发动机、燃气轮机制造能力的提升。

**(1) 显性冶金缺陷形成机理与控制技术在叶片生产企业得到应用，有效抑制了杂晶、条带晶、雀斑等宏观晶粒缺陷，提高了叶片的冶金质量与成品率。**

东方电气集团东方汽轮机有限公司在自主研发和试制 G50 国产燃气轮机定向及单晶叶片过程中，应用了本项目开发的单晶叶片冶金缺陷控制技术，实现了多型号燃机单晶叶片的低缺陷、高成品率制备。采用过冷度控制技术，有效降低了单晶叶片杂晶缺陷的形成；采用基于雀斑形成机理的雀斑预测技术，有效降低了雀斑缺陷的形成。显著提高了东方汽轮机有限公司燃机单晶高温合金叶片的冶金质量，对保持其行业竞争力产生了积极作用。

江苏永瀚特种合金技术股份有限公司在研制 300MW 重型燃机一级单晶叶片时，应用了本项目“关于杂晶和雀斑缺陷控制方法”的技术成果，突破了燃气轮机单晶叶片冶金缺陷控制这一行业难题，实现了多款型号燃机单晶叶片的低缺陷制备。采用本项目研究的过冷度控制技术，消除了单晶叶片的杂晶缺陷；采用雀斑预测技术，降低了雀斑缺陷的形成，提高了其燃机单晶叶片的成品率。

**(2) 隐性冶金缺陷形成机理与控制技术在叶片生产企业得到应用，有效抑制了异质共晶、马赛克等微观隐性缺陷，提高了叶片的冶金质量与成品率。**

江苏永瀚特种合金技术股份有限公司应用了本项目关于  $\gamma/\gamma'$  异质共晶缺陷的形成机理与控制方法研究成果，有效指导了其 300MW 重型燃机一级动叶热处理工艺的制定，提高了单晶叶片的质量和成品率。

深圳市万泽中南研究院有限公司应用了本项目关于“马赛克”缺陷的形成机理研究成果，在研制商发大飞机 CJ-1000A 发动机的单晶叶片时，对原先经宏观检验认定为合格的产品重新进行了内部检查，发现在缘板内部确实存在“马赛克”缺陷。进一

步应用本项目提出的控制方法，消除了此类无法被常规检查所发现的微观隐性晶粒缺陷，为发动机的安全运行提供了更加可靠的保障。

(3) 开发了面向工业生产的雀斑缺陷预测软件，发明了基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术，研制了全球首台套中试级定向凝固设备，从定向凝固设备原理上消除了雀斑缺陷。实现了多种型号航空发动机单晶涡轮叶片的无雀斑缺陷制备，为下一代高品质单晶叶片的生产提供了理论基础与技术储备。

深圳市万泽航空科技有限责任公司应用本项目发明的新型定向凝固技术，实现了多种型号单晶高温合金叶片的无雀斑缺陷制备，大大提高了单晶高温合金叶片的冶金质量。近年来公司依靠新技术的开发和应用，单晶叶片的产能与成品率稳步上升。

沈阳真空技术研究所有限公司与项目组联合开发了全球首台基于温度均匀性原理与重力平衡的反重力单晶叶片定向凝固工业级新设备，该设备为第三代定向凝固设备，能有效提高单晶涡轮叶片的质量，可实现我国在定向凝固高端装备制造领域对西方发达国家的赶超。

**表 1 主要应用单位情况表**

序号	单位名称	应用的技术	应用的对象及规模	应用的起止时间	单位联系人/电话
1	东方电气集团东方汽轮机有限公司	单晶高温合金叶片冶金缺陷形成机理及控制技术	多型燃机单晶叶片	2019 年至今	李林蓄
2	江苏永瀚特种合金技术股份有限公司	单晶燃机叶片冶金缺陷形成机理及控制技术	燃机单晶叶片近两年销售收入 7200 万元	2021.01 至今	葛丙明
3	深圳市万泽航空科技有限责任公司	单晶高温合金叶片冶金缺陷形成机理及控制技术	单晶叶片年销售收入突破 1 亿元	2019.12 至今	赵运兴



## 2. 经济效益和社会效益

本项目面向航空发动机与工业燃气轮机核心热端涡轮叶片的高品质制造需求，发明了单晶叶片显/隐性冶金缺陷的形成机理及控制技术，解决了单晶叶片冶金缺陷控制难、成品率低等难题，实现了单晶叶片的高品质制备。研究成果已助力多家单晶叶片生产企业，大幅提升了叶片质量和成品率，产生了显著的经济效益，相关企业近两年来由于技术升级带来的累计销售收入超过 1.72 亿元，助力了我国航空发动机、燃气轮机制造能力的提升。

**(1) 显性冶金缺陷形成机理与控制技术在叶片生产企业得到应用，有效抑制了杂晶、条带晶、雀斑等宏观晶粒缺陷，提高了叶片的冶金质量与成品率，带来了显著的社会效益，同时带来经济效益 7200 万元。**

东方电气集团东方汽轮机有限公司在自主研发和试制 G50 国产燃气轮机定向及单晶叶片过程中，应用了本项目开发的单晶叶片冶金缺陷控制技术，实现了多型号燃机单晶叶片的低缺陷、高成品率制备。采用过冷度控制技术，有效降低了单晶叶片杂晶缺陷的形成；采用基于雀斑形成机理的雀斑预测技术，有效降低了雀斑缺陷的形成。显著提高了燃机单晶高温合金叶片的冶金质量，对保持其行业竞争力产生积极作用，产生了显著的社会效益。

江苏永瀚特种合金技术股份有限公司在研制 300MW 重型燃机一级单晶叶片时，应用了本项目“关于杂晶和雀斑缺陷控制方法”的技术成果，实现了多款型号燃机单晶叶片的低缺陷制备。采用本项目研究的过冷度控制技术，消除了单晶叶片的杂晶缺陷；采用雀斑预测技术，降低了雀斑缺陷的形成，提高了其燃机单晶叶片的成品率，产生了显著的社会效益。近两年该公司应用本技术实现了销售收入 7200 万元，产生了显著的经济效益。

**(2) 隐性冶金缺陷形成机理与控制技术在叶片生产企业得到应用，有效抑制了异质共晶、马赛克等微观隐性缺陷，提高了叶片的冶金质量与成品率，产生了显著的社会效益。**

深圳市万泽中南研究院有限公司应用了本项目关于“马赛克”缺陷的形成机理研究成果，在研制商发大飞机 CJ-1000A 发动机的单晶叶片时，对原先经宏观检验认定为合格的产品重新进行了内部检查，发现在缘板内部确实存在“马赛克”状的碎晶缺陷。进一步应用本项目提出的控制方法，消除了此类无法被常规检查所发现的微观隐

性晶粒缺陷，为发动机的安全运行提供了更加可靠的保障，产生了显著的社会效益。

**（3）发明了基于重力平衡原理的单晶叶片定向凝固新技术，开发了全球首台中试级反重力定向凝固设备，实现了多种型号航空发动机单晶涡轮叶片的无缺陷制备，带来经济效益过 1 亿元。**

深圳市万泽航空科技有限责任公司应用本项目发明的新型定向凝固技术，实现了多种型号单晶高温合金叶片的无雀斑缺陷制备，大大提高了单晶高温合金叶片的冶金质量。近年来公司依靠新技术的开发和应用，单晶叶片的产能与成品率稳步上升，产品销售收入突破 1 亿元，为公司带来了显著的经济社会效益。

## 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	一种高温合金定向凝固装置及凝固方法	中国	ZL202110679666.4	2022年10月25日	5533955	西安交通大学	王富，刘洋，张碧璇，段倩，杨强
2	发明专利	一种单晶高温合金叶片马赛克缺陷控制方法	中国	ZL202210017646.5	2023年02月24日	5750309	西安交通大学	王富，杨强，张碧璇，刘洋，李鸣杰
3	计算机软件著作权	单晶高温合金雀斑缺陷预测软件	中国	2023SR0598326	2023年02月28日	软著登字第11185497号	西安交通大学	王富，刘洋
4	发明专利	一种金属的定向凝固装置及凝固方法	中国	ZL202110679676.8	2022年08月09日	5369795	西安交通大学	王富，刘洋，张碧璇，段倩，杨强
5	发明专利	用于不同晶体取向铸造单晶高温合金的籽晶切割装置及方法	中国	ZL202110490580.7	2022年07月12日	5298683	西安交通大学；泰州市金鹰精密铸造有限公司	王富，段倩，杨强，朱鑫涛，曲凌峰，王迎鑫
6	发明专利	一种基于3D打印技术的氧化钙基陶瓷铸型制造方法	中国	ZL201710284229.6	2021年01月19日	4210743	西安交通大学	李涤尘，杨强，鲁中良，夏园林
7	发明专利	一种靶向控制铸件微观组织的变壁厚砂型结构设计方法及变壁厚砂型结构	中国	ZL202110477672.1	2021年04月29日	5306183	西安交通大学	杨强，李成伟，王富，李涤尘，崔晓涵
8	发明专利	一种易于脱芯的砂芯结构	中国	ZL201910168444.9	2019年03月06日	3720416	西安交通大学	王富，李成伟，徐

					日			文梁， 杨强， 张航， 李涤尘
9	发明专利	一种整体式砂型的3DP制备方法	中国	ZL202111372367.2	2021年11月18日	5370928	西安交通大学	杨强， 崔晓涵，王富，李涤尘
10	发明专利	一种基于3DP技术的铁铝合金零件的制备方法	中国	ZL201911289159.9	2020年11月17日	4100867	西安交通大学	王富， 李成伟，徐文梁， 杨强， 张航， 李涤尘

## 七、主要完成人情况表

姓 名	王富	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
项目总体负责人，发现了单晶叶片显/隐性冶金缺陷的形成机理，提出了单晶叶片冶金缺陷的控制方法，开发了面向工业生产的雀斑缺陷预测软件与基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术，是发明点 1、2、3 的重要贡献者。			

姓 名	杨强	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	副研究员		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
发现了“马赛克”微观隐性晶粒缺陷的控制方法，开发了面向工业生产的雀斑缺陷预测软件与基于温度均匀性原理的反重力单晶叶片定向凝固新技术，是发明点 2、3 的重要贡献者。			

## 八、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安交通大学机械工程学院与精密微纳制造技术全国重点实验室为本项目在单晶高温合金叶片冶金缺陷的形成机理、工艺控制、反重力定向凝固设备的开发以及性能检测方面提供了实验平台与启动经费支持，为本项目研究过程中设备研制、工艺试验、性能检测等工作提供仪器和设备支撑。</p>	

## 完成人合作关系说明

项目完成人王富、杨强目前均在西安交通大学机械工程学院工作，两名项目完成人曾共同承担科研项目，共同发表论文，共同获得知识产权，构成本项目的研究成果，具体情况如下：

（1）两名项目完成人在项目执行过程中，共同承担了本项目的相关研究课题，共同获得了项目中列出的主要发明专利，共同发表了学术论文；

（2）本项目第二完成人杨强副研究员与第一完成人王富教授共同发明了“马赛克”微观隐性晶粒缺陷的控制方法，开发了基于重力平衡原理的定向凝固新设备，是发明点 2、3 的重要贡献者。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同 知 识 产 权	杨强/2	2019 年	至今	发明了“马赛克”微观隐性晶粒缺陷的控制方法，开发了基于重力平衡原理的定向凝固新设备，是发明点 2、3 的重要贡献者。	发明专利 1-5, 7-9
2						
3						
4						
5						
不限 条 目						