

技术发明奖公示：

项目名称	航空发动机单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术及应用
提名者	中国科学院沈阳分院
提名意见	<p>我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合填写要求。按照要求，我单位和完成人所在单位都已对该项目进行了公示，目前无异议。</p> <p>该项目针对单晶高温合金叶片制备过程中出现的杂晶、小角晶界、取向偏离、再结晶和型壳反应等缺陷开展了全流程控制技术研究，并逐步形成了一套从模具设计到铸件检验的单晶叶片制造全流程控制技术。该项目提出了螺旋选晶器起始段和螺旋段的优选结构和优化工艺控制单晶叶片的取向偏离。提出了在杂晶形成区预置晶核、主动控制该区域局部散热条件以及抽拉速度等杂晶缺陷控制方法。阐明了小角晶界的形成机理是以枝晶偏转方式形成，提出了通过控制单晶晶体取向偏离度减少小角晶界的新思路。在认识形变储能是诱发单晶高温合金再结晶的本质驱动力的基础上，提出了减少单晶高温合金叶片再结晶的方法。发明了通过控制陶瓷型芯与型壳材料成分以及利用还原性气体抑制陶瓷材料与合金熔体发生界面反应的方法。该成果的应用不仅成功解决了我国多种单晶叶片从无到有的问题，还大幅提高了多种单晶叶片的合格率，在单晶叶片铸造技术领域达到国内领先水平。专利技术成果在沈阳航发精密铸造有限公司、贵阳中航动力精密铸造有限公司、西安中航动力精密铸造有限公司、安徽应流航源动力科技有限公司实现了产业化应用。近 3 年带来新增产值过亿元。</p> <p>对照省技术发明奖授奖条件，提名该项目为 2018 年度辽宁省技术发明奖一等奖。</p>
项目简介	<p>复杂冷却结构空心单晶叶片制备是困扰我国先进航空发动机装机和定型的主要技术瓶颈之一。本项目针对单晶高温合金叶片制备过程中出现的杂晶、小角晶界、取向偏离、再结晶和型壳反应等缺陷开展了全流程控制技术研究。</p> <p>首先采用双晶与三晶高温合金定向凝固实验探讨了晶粒竞争生长机制，修正了教科书中定向凝固组织形成机制模型，完善了单晶高温合金晶体生长与控制理论，为单晶生长过程中冶金缺陷控制和工艺优化提供了理论指导和技术支持。基于晶粒和枝晶竞争生长理论，提出了螺旋选晶器起始段和螺旋段的优选结构和优化工艺，将晶体取向偏离超标的废品率从大于 20% 降低到小于 1%。</p> <p>根据自行设计的定向凝固过程连续测温装置和方法以及单晶高温合金杂晶形成倾向性的评定方法，研究了不同合金的杂晶形成倾向性，发现复杂结构单晶构件定向凝固中固液界面前沿的温度场分布是控制杂晶形核的决定性因素，提出了在杂晶形成区预置晶核、主动控制该区域局部散热条件以及抽拉速度等杂晶缺陷控制方法，使单晶叶片杂晶废品率从大于 90% 降低到小于 10%。</p> <p>阐明了小角晶界的形成机理是以枝晶偏转方式形成，提出了通过控制单晶晶体取向偏离度减少小角晶界的新思路，将小角晶界的形成</p>

频率从大于 90%降低到小于 30%。

针对单晶叶片的再结晶缺陷，通过预压缩、拉伸和喷丸等试验对其形核及长大热力学与动力学进行了研究，发现形变储能是诱发单晶高温合金再结晶的本质驱动力；研究了再结晶对单晶高温合金蠕变性能的影响；提出了减少单晶高温合金叶片再结晶的方法，将单晶叶片再结晶废品率从大于 60%降到 5%以下。

研究了高温合金熔体与陶瓷材料的作用机理，发明了通过控制陶瓷型芯与型壳材料成分以及利用还原性气体抑制陶瓷材料与合金熔体发生界面反应的方法，显著提高了单晶叶片的表面冶金质量。

通过对单晶高温合金典型铸造缺陷的形成机理研究，提出了多项工程上行之有效的缺陷控制措施，发展了一套从模具设计到铸件检验的单晶叶片全流程控制技术，不仅成功解决了我国多种单晶叶片从无到有的问题，还将实心单晶叶片的合格率从小于 20%提高到 75%以上，复杂空心单晶叶片的合格率从小于 10%提高到 50%以上，极大地促进了我国单晶叶片铸造技术的进步，为我国多个新型航空发动机的研制提供了叶片保障。

本项目研究期间，获得国家授权专利 25 项，发表 SCI 收录论文 100 余篇。

客观评价

我国在大飞机制造技术上与西方发达国家仍存在较大差距，重大瓶颈问题就是发动机的推力严重不足。为提高发动机推力，就需要发动机的涡轮叶片具有更高的承温能力。因此，国外大推力航空发动机全都采用单晶高温合金叶片。而在我国，由于单晶高温合金叶片制造技术的落后，从而导致发动机的动力、寿命与可靠性严重不足。显然，单晶高温合金叶片制造技术的突破将成为我国大飞机制造发展的关键。

针对单晶叶片制造的技术难题，该团队系统开展了杂晶、小角晶界、取向偏离、再结晶、型壳反应、表面疏松、热裂纹等缺陷形成机制的基础研究，完成实验室研究工作后，到发动机叶片制造厂进行生产性验证。该团队根据单晶叶片凝固缺陷的形成机制提出了多项工程上行之有效的凝固缺陷控制措施，形成了一套单晶叶片规模化制造的全流程控制技术，成功研制出多种不同类型的单晶叶片，在现有的工业基础条件下实现了单晶叶片制造技术的突破，为中航工业发动机公司、航天科工集团公司等新型发动机的研制提供了叶片保障。其中一项标志性成果就是采用我国新型的第二代单晶高温合金DD405 成功铸造出了中航工业新型航空发动机中的高压涡轮转子单晶叶片。该叶片在发动机试车考核中表现优越，标志着我国在复杂结构单晶叶片制造技术上取得了重要进展。具体见附件2其他附件。

中国科学院金属研究所开发的单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术已在沈阳航发精密铸造有限公司、贵阳中航动力精密铸造有限公司、西安中航动力精密铸造有限公司、安徽应流航源动力科技有限公司的单晶叶片生产制造过程进行了推广应用，生产出了DD5 合金单晶高压涡轮导向叶片、DD5 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD32 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD5 合金单晶高压涡轮外环块等多种航空发动机核心热端部件。

推广应用情况

1) 沈阳航发精密铸造有限公司的推广应用情况

中国科学院金属研究所开发的单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术已在沈阳航发精密铸造有限公司的单晶叶片生产制造过程进行了推广应用,生产出了 DD5 合金单晶高压涡轮导向叶片、DD5 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD5 合金单晶低压涡轮工作叶片、DD6 合金单晶低压涡轮工作叶片等多种航空发动机核心热端部件。通过产学研结合,共同承担了“DD5 单晶高压涡轮导向叶片研制”、“DD5 单晶高压涡轮工作叶片研制”等项目,共同培养了 10 余名单晶叶片制造技术方面的专业人员。近 3 年带来新增产值 1683 万元。

2) 贵阳中航动力精密铸造有限公司的推广应用情况

中国科学院金属研究所开发的单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术已在贵阳航发精密铸造有限公司的单晶叶片生产制造过程进行了推广应用,生产出了 DD32 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD5 合金单晶高压涡轮导向叶片、DD5 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD5 合金单晶低压涡轮工作叶片等多种航空发动机核心热端部件。通过产学研结合,共同承担了“DD32 单晶涡轮叶片的研制”、“DD5 单晶高压涡轮导向叶片研制”等项目,共同培养了 10 余名单晶叶片制造技术方面的专业人员。近 3 年带来新增产值 7320 万元。

3) 西安航发精密铸造有限公司

中国科学院金属研究所开发的单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术已在西安中航动力精密铸造有限公司的单晶叶片生产制造过程进行了推广应用,生产出了 DD5 合金单晶高压涡轮导向叶片、DD5 合金单晶高压涡轮工作叶片、DD5 合金单晶高压涡轮外环块、SRR99 合金单晶 II 级涡轮工作叶片等多种航空发动机核心热端部件。通过产学研结合,与中国科学院金属研究所共同承担了“DD5 单晶高压涡轮导向叶片研制”、“SRR99 合金单晶叶片的研制”等国家部委项目。近 3 年带来新增产值 2280 万元。

4) 金属研究所的应用情况

该技术发明成果已经在金属研究所承担的多个型号航空发动机单晶叶片研制过程中应用,为我国多个新型发动机的研制提供了叶片保障。主要应用情况包括:技术发明成果应用到 DD5 合金单晶高压涡轮工作叶片和导向叶片的研制中,研制出我国第一个叶尖盖板整体铸造成型的复杂空心单晶工作叶片和缘板与叶片叶身整体铸造成型的单晶导向叶片,不仅解决了该类叶片从无到有的问题,还将叶片的合格率提高到 30%以上。应用到 DD32 合金单晶高压涡轮工作叶片精铸件研制中,将该叶片的合格率从 10%提高到 50%以上。应用到 DD5 工作叶片铸件研制中,将该叶片的合格率从小于 20%提高到了 75%以上。近 3 年带来新增产值 3900 万元。

主要知识产权证明目录（不超过 10 件）								
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	发明专利有效状态
发明专利	一种高温完全抗氧化镍基单晶合金及其制备方法	中国	200910248674.2	2012.8.29	第 1033627 号	中国科学院金属研究所	孙晓峰, 于金江, 金涛, 赵乃仁, 王志辉, 侯桂臣, 管恒荣, 胡壮麒	专利权维持
发明专利	一种减少单晶高温合金精铸件再结晶的方法	中国	201210179680.9	2016.6.1	第 2090064 号	中国科学院金属研究所	孟杰、王猛、周亦胄、金涛、孙晓峰、王亮、徐福涛、李博	专利权维持
发明专利	单晶高温合金杂晶形成倾向性的评定方法	中国	201210138597.7	2014.3.26	第 1367779 号	中国科学院金属研究所	张小丽, 周亦胄, 金涛, 孙晓峰	专利权维持
发明专利	一种可调节热膨胀系数的硅基陶瓷型芯的制备方法	中国	201410175419.0	2016.6.1	第 2092723 号	中国科学院金属研究所, 韩国机械研究院	林泉洪、张炫、梁静静、周亦胄、金涛、孙晓峰、赵昌龙、崔白圭、金仁守、都政铉	专利权维持
发明专利	一种含铼镍基单晶高温合金及其制备方法	中国	200510046361.0	2009.4.29	第 493111 号	中国科学院金属研究所	于金江, 金涛, 赵乃仁, 侯桂臣, 孙晓峰, 王志辉, 于洋, 管恒荣, 胡壮麒	专利权维持
发明专利	一种金属单晶横向晶体取向的控制方法	中国	02132531.6	2005.7.6	第 216499 号	中国科学院金属研究所	郑启, 孙晓峰, 侯桂臣, 管恒荣, 胡壮麒	专利权维持
发明专利	平面薄壁铸件的制备方法	中国	201210136757.4	2013.7.10	第 1232231 号	中国科学院金属研究所	张小丽, 周亦胄, 金涛, 孙晓峰	专利权维持
发明专利	一种定向凝固镍基高温合金及其热处理工艺	中国	200610047418.3	2010.05.12	第 619482 号	中国科学院金属研究所	孙晓峰, 于金江, 管恒荣, 夏鹏成, 金涛, 赵乃仁, 侯桂臣, 周鹏杰, 胡壮麒	专利权维持
发明专利	一种无铼第二代镍	中国	200610046891.X	2009.2.11	第 470269 号	中国科学院金属研	金涛, 赵乃仁, 王志辉, 孙晓	专利权维持

	基单晶高温合金				号	究所	峰, 管恒荣, 胡壮麒	
发明专利	一种低成本第三代镍基单晶高温合金	中国	200510047752.4	2008.11.5	第439773号	中国科学院金属研究所	金涛, 王文珍, 赵乃仁, 王志辉, 刘金来, 侯桂臣, 孙晓峰, 管恒荣, 胡壮麒	专利权维持
完成人情况			<p>摘自辽宁省技术发明奖提名书中“主要完成人情况表”中姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献。</p> <p>1. 姓名: 周亦青</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名: 1 • 行政职务: 无 • 技术职称: 研究员 • 工作单位: 中国科学院金属研究所 • 完成单位: 中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献: 负责整个项目研究, 对六个发明点均有重要贡献。带领研究组人员发展了一套从模具设计到铸件检验的单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术, 并将该技术应用到了金属研究所承担的新型航空发动机单晶叶片研制中, 研制出多种新型单晶高温合金叶片; 将单晶高温合金叶片典型铸造缺陷的全流程控制技术推广到沈阳航发精密铸造有限公司、贵阳中航动力精密铸造有限公司、西安中航动力精密铸造有限公司、安徽应流航源动力科技有限公司等企业的单晶叶片生产制造过程中, 促进了我国单晶叶片铸造技术的进步和航空事业的发展。 <p>2. 姓名: 李金国</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名: 2 • 行政职务: 无 • 技术职称: 研究员 • 工作单位: 中国科学院金属研究所 • 完成单位: 中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献: 参与了整个项目研究的研究工作, 对发明点一、二、三有重要贡献。通过对不同取向晶粒竞争生长的研究, 提出了三维晶粒竞争生长模型。在此基础上, 通过对螺旋选晶器的起始段和螺旋端的晶粒演化机制研究, 提出了螺旋选晶器设计准则。基于对杂晶的成因分析, 提出了杂晶的有效控制措施。所发展的单晶叶片冶金缺陷控制在金属研究所和叶片生产厂得到了实际应用和推广, 有效提高了单晶叶片铸造合格率。 <p>3. 姓名: 于金江</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名: 3 • 行政职务: 无 • 技术职称: 研究员 					

	<ul style="list-style-type: none"> • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：成功研制出 DD32 合金单晶定向凝固高压涡轮工作叶片精铸件以及 SRR99 合金单晶 II 级涡轮工作叶片，并把相关研制成果推广应用到贵阳中航动力精密铸造有限公司以及西安中航动力精密铸造有限公司。 <p>4. 姓名：孟杰</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：4 • 行政职务：无 • 技术职称：副研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：主要负责单晶叶片晶粒状态和热处理相关的控制和检验技术，揭示了单晶高温合金再结晶缺陷的形成机理，发明了单晶叶片再结晶缺陷控制技术。具体包括：先热处理再进行会引入应力与应变的加工、先去应力热处理再固溶热处理、化学腐蚀去除应力层、降低型壳溃散强度、增大转接区 R 值、优化合金热处理制度等方法。 <p>5. 姓名：孙晓峰</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：5 • 行政职务：副所长 • 技术职称：研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：通过开展单晶高温合金纯净化冶炼基础研究，建立了单晶高温合金纯净化冶炼工艺规范，使单晶合金中 O、N、S 等杂质元素控制在几个 ppm 量级水平，减少了单晶叶片中疏松、夹杂、界面反应等铸造缺陷的形成，提高了单晶叶片的冶金质量与力学性能。
完成人合作关系说明	<p>该技术的 5 位完成人为中国科学院金属研究所铸造高温合金课题组的科研人员，自 1998 年开始，课题组已开始单晶高温合金及铸件的相关技术研究，5 位完成人从单晶合金的研制到单晶铸件的缺陷控制等方面都开展了合作研究。</p>