

## 技术发明奖公示：

项目名称	航空大型复杂薄壁构件一体化铸造成型技术
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>现代先进航空发动机关键构件向大型化、复杂化、整体化方向发展，对其成型技术提出更高要求，整体精密铸造整体成型成为其发展趋势。采用精密铸造一体化成型制造的大型复杂铸件在使用性能、服役可靠性、减重、制造成本等多方面均有明显优势。但此类铸件在整体铸造成型时存在凝固组织粗大、冶金质量和尺寸精度超差严重、合格率低等关键技术问题，制约了我国先进航空发动机制造技术的进步。为此，该团队提出航空大型复杂铸件一体化成型新技术，在磁控晶粒细化技术、顺序凝固缺陷消减技术、低应力引流浇注成型技术等三方面取得突破，该研究成果已在我国先进发动机涡轮后机匣和复杂精密涡轮叶片上得到应用，解决了航空发动机机匣等大型复杂铸件整体铸造、尺寸精度、凝固组织、冶金质量及质量稳定性的一体化关键技术难题，支撑了我国新一代飞机等高端装备的研制。通过上述关键技术研发，获得授权发明专利 6 项，发表相关论文 143 篇。该成果的应用，提高了大型复杂铸件整铸工程化能力与批次稳定性，使铸造合格率提高了 20%，生产周期缩短 30%，并在模具钢等高品质金属材料铸件中推广应用，累计为企业新增销售收入 1.85 亿元，利税 3117.75 万元。</p> <p>对照省技术发明奖授奖条件，提名该项目为 2019 年度辽宁省技术发明奖一等奖。</p>
项目简介	<p>该项目属于材料冶金领域，具体为航空关键构件的一体化制备。现代先进航空飞机的高机动性、超音速巡航性对航空发动机推重比、使用寿命的要求不断提高，其关键构件向大型化、复杂化、薄壁化、整体化方向发展，对其成型技术提出更高要求，传统的锻焊制备工艺已无法满足要求，以铸代锻成为其发展趋势。采用精密铸造一体化成型制造的大型复杂薄壁构件在使用性能、服役可靠性、减重、制造成本等多方面均有明显优势，正被国外美、欧等先进国家所研制，并在最新航空飞机中使用。国内对于航空大型复杂薄壁铸件制备也初步开展相关研究工作，但目前尚处在以铸代锻的初始阶段，研究重点还停留在铸件的完整成形方面，铸件性能和合格率低，严重制约我国发动机的制造技术进步。为此，该项目团队在国家航空推进技术验证计划、973 计划、自然基金重点项目支持下，针对大型复杂薄壁铸件凝固组织粗大、冶金质量和尺寸精度超差严重、合格率低等关键技术问题，提出航空大型复杂薄壁构件一体化铸造成型技术新技术，经过近十年攻关，取得如下创新成果：</p> <p>（1）磁控晶粒细化技术：</p> <p>国际上首次发明低压脉冲磁场晶粒细化新技术，建立磁场作用下三传模型、晶核游离模型、枝晶球化模型，解决了该技术应用的关键科学问题，研制出具有自主知识产权的大型复杂薄壁铸件脉冲磁场晶粒细化专用装置。这一发明应用于航空发动机涡轮后机匣等大型复杂薄壁铸件的铸造，获得整体晶粒尺寸小于 3mm 细晶组织，解决了航空发动机大型复杂薄壁铸件凝固组织粗大和薄壁处贯穿晶的问题。</p> <p>（2）顺序凝固减缺消陷技术：研发大型复杂薄壁铸件成型、致密组织逐层凝固的顺序凝固工艺，建立了温度梯度、抽拉速度等工艺参数与铸件缺陷的映射关系，</p>

	<p>提出顺序凝固缺陷消减方法，开发大型复杂薄壁铸件顺序凝固仿真系统，实现疏松、热裂等缺陷定量预测和工艺优化，在大型复杂薄壁铸件上进行试验验证和应用，铸件疏松控制 0.02% 以下，无热裂产生。</p> <p>（3）低应力引流浇注成型技术：</p> <p>发明出兼具良好高温性能和低温溃散性能的大型复杂薄壁铸件成型型壳新配方和制备技术，达到了蜡模-型壳-铸件的最小传递误差；提出引流式浇道和分散式冒口消减大型复杂铸件粗大冒口、浇道引起的应力集中和铸件变形的新技术，进行了航空发动机涡轮后机匣等大型复杂薄壁铸件低应力引流浇注成型技术试验验证及产业化应用，新型型壳可承受 1600°C 的高温浇注熔体同时具有良好低温溃散性，大型复杂薄壁铸件的合格率提高至 80%，铸件尺寸精度达到 CT6-7，解决了高温合金大型复杂薄壁铸件因变形导致的尺寸超差问题。</p> <p>基于上述创新成果，发明了集成磁控晶粒细化技术、顺序凝固缺陷消减技术和低应力引流浇注成型技术的航空大型复杂薄壁构件一体化铸造成型技术，解决了航空发动机机匣等大型复杂薄壁铸件整体铸造、尺寸精度、凝固组织、冶金质量稳定性控制的一体化制备技术难题，研究成果已在我国先进航空发动机涡轮后机匣等大型复杂薄壁铸件铸造中得到应用，支撑了我国新一代飞机等高端装备的研制。通过上述关键技术研发，获得授权发明专利 6 项，发表相关论文 100 余篇。项目成果的应用，提高了大型复杂铸件整铸工程化能力与批次稳定性，使铸造合格率提高了 20%，生产周期缩短 30%，并在模具钢、新型铜合金等高品质金属铸件中推广应用，累计为企业新增销售收入 1.85 亿元，利税 3117.75 万元。</p>
客观评价	<p>1. 与国内外相关技术的比较</p> <p>针对大型复杂薄壁铸件制备技术，美国 PCC 公司于 20 世纪 90 年代研发出热控凝固工艺（TCS）和装备，通过控制凝固过程的温度梯度、低过热度浇注技术，细化大型复杂铸件的晶粒，提高了铸件成形性和致密度，并在机匣等铸件中应用。针对热控法在铸件内形成粗大柱晶的缺陷，为进一步实现大型复杂铸件的晶粒细化，美国 Howmet 公司研发了 Grainnet(GX) 和 Microcast-X(MX) 工艺和装备。Grainnet(GX) 法是在较高的过热温度下，在凝固过程中通过离心旋转机械力作用将枝晶骨架打碎成为结晶核心，从而细化晶粒。MX 法则利用电磁搅拌技术获得细晶组织。目前 Howmet 公司利用 MX 工艺和装备研制出大型薄壁细晶结构整体铸件已应用于火箭发动机和航空发动机中。</p> <p>国内制备航空大型复杂铸件的主要方法为重力铸造工艺，存在晶粒粗大、缩松、热裂、铸件变形等问题。北京航空材料研究院近年来采用和 PCC 公司相似的热控法开展了大型复杂铸件的成型研究，目前处于实验室阶段。江苏丹阳市精密合金厂有限公司和上海交通大学采用重力法对航空大型复杂铸件成型开展了实验，尚停留在实验室阶段。</p> <p>该项目所发明的磁控晶粒细化技术、顺序凝固缺陷消减技术和低应力引流浇注成型技术均属原创性技术，所涉及的方法、原理和技术拥有自主知识产权，并进一步对这些技术进行集成应用和创新，首创出具有真空熔铸、低应力浇注、致密整体成形和细晶铸造功能的大型复杂薄壁铸件一体化成型技术和设备。采用本技术制备的大型复杂薄壁铸件晶粒尺寸可细化至 3mm 以下，显微疏松控制在 2 级以下，铸件尺寸精度达 CT6-7，与美、欧等发达国家先进技术相比，技术功能和指标相当，优于国内相关技术。表 1 列出了该项目技术与国内外代表性技术的特点和应用情况对比。</p>

表 1 该项目技术与国内外代表性技术的特点和应用情况

工艺方法	铸造晶粒尺寸	铸造缺陷	尺寸精度	技术研发单位	应用情况
该项目一体化成型技术	<3mm	显微疏松<2级	CT6-7	该项目团队	发动机后机匣、精密铸造叶片等
热控法 (TCS)	3-10mm	显微疏松<2级	-	美国 PCC 公司、	涡轮机匣
GX 和 MX 工艺	<2 mm	-	-	美国 Howmet 公司	涡轮机匣、旋流框架、中间框架铸件
热控法 (TCS)	3-10mm	显微疏松 2-3 级	-	北京航空材料研究院	无

## 2. 项目验收意见

### 2.1 航空推进技术验证计划验收意见

项目于 2016 年 12 月 28 日通过国防科工局组织的验收，验收意见认为项目“通过 K4169 合金大型薄壁复杂整体净铸件母合金气体和杂质含量控制，蜡模、制壳、浇注工艺，晶粒度、冶金缺陷控制等研究，突破了引流式浇注、热控凝固控制、脉冲晶粒细化等关键技术，制备出高精度细晶涡轮后机匣铸件”，“课题研究成果已在某发动机得到部分应用。成果还可推广到其它型号大型薄壁大型复杂铸件整体精铸件铸造”，“课题组完成了全部研究内容，达到了技术指标要求，实现了研究目标”，“专家组一致同意通过验收”，见附件验收意见 1。

### 2.2 国家 973 计划项目课题验收意见

项目于 2014 年 9 月 30 日通过科技部组织的验收，验收意见认为课题“紧密围绕项目总目标中高温合金的组织演变及性能调控等关键科学问题，开展了高温合金液态成形基础理论研究工作”，“研究了脉冲磁场作用下合金熔体中的电磁力、流场、温度场的特性和分布，界面演化和枝晶生长，晶粒细化，溶质元素分布，第二相析出等规律，建立了脉冲磁场作用下结晶形核热力学模型、枝晶球化模型和溶质原子微观迁移模型，揭示了脉冲磁场的作用机理，并开展了细晶高温合金脉冲磁场铸造技术的应用研究”见附件验收意见 2。

### 2.3 国家自然基金重点项目验收意见

项目于 2015 年 5 月 4 日通过基金委组织的验收，验收意见认为项目“研发成功低压脉冲磁场真空细晶凝固和低压脉冲磁场半连续铸造新技术以及相应装置，实现了高温合金铸锭、复杂精密薄壁铸件以及镁合金铸锭的晶粒细化”，“项目完成优秀，取得突出成果，验收专家组一致同意通过验收”。综合评价等级为 A

推广应用情况	<p>该项目发明的包括磁控晶粒细化技术、顺序凝固缺陷消减技术、低应力引流浇注成型技术等航空大型复杂薄壁构件一体化铸造成型技术，成果已由中国航发沈阳黎明发动机集团有限公司实施，在我国先进航空发动机大尺寸机匣类复杂铸件、中小尺寸类复杂铸件、复杂精密叶片生产中得到推广应用。通过该项目的实施，使我国大型复杂航空发动机关键构件的制备技术上了一个台阶，实现了航空发动机涡轮机匣等大型复杂铸件尺寸精度、凝固组织、冶金质量及质量稳定性的综合控制，产品合格率提高 20%，生产周期缩短 30%，生产成本降低显著，为企业实现新增销售额 9495 万元，新增利润 474.25 万元。</p> <p>该项目研发的磁控晶粒细化技术在山东远大特材科技股份有限公司进行推广应用，开发出高性能模具钢低压脉冲磁场电渣熔铸工艺，解决了 H13 模具钢电渣熔铸铸造冶金质量问题，使模具钢等轴晶率提高 31%，晶粒尺寸细化 24%，后续变形处理热裂废品率降低 30%，力学性能提高 10%新增销售额 8970 万元，新增利润 2643 万元。该项技术也在汕头华兴冶金设备股份有限公司的新型细晶稀土铜铬锆合金及其精密铜件上进行推广应用，形成年产 200 吨新材料及精密铜件的生产规模，满足轨道交通等领域对高端铜铬锆合金精密铜件的需要，产品供应中国中车、湘电股份等公司。</p> <p>该项目的研究成果还将为中低温条件下服役的发动机叶轮，整体涡轮和转子、扩压器等大型复杂薄壁细晶结构件的研制提供技术和设备支撑，满足航空、航天、船舶等行业对大型复杂、薄壁、整体精密铸件的需求，实现零部件结构合理、轻量化等目的。</p>							
	主要知识产权和标准规范等目录（不超过 10 件）							
知识产权（标准）类别	知识产权（标准）名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准实施）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态

发明专利	磁热复合控制复杂精密或薄壁铸件细晶铸造方法及装置	中国	ZL201410713316.5	2016.10.0 5	225860 1	中国科学院金属研究所	杨院生，李应举，罗天骄，冯小辉，滕跃飞	有效
------	--------------------------	----	------------------	-------------	----------	------------	---------------------	----

发明专利	一种高温合金薄壁环型铸件浇注系统及制造方法	中国	ZL201510745432.X	2017.8.29	2600781	中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司	李波，陈仲强，顾欣，孙长波，孙宝才	有效
发明专利	低压脉冲磁场作用下细晶金属材料制备方法	中国	ZL200810228547.1	2012.8.29	1033382	中国科学院金属研究所	杨院生，汪斌，童文辉，李应举，马晓平，冯小辉	有效
发明专利	一种薄壁环型熔模铸件型壳及其制备方法	中国	ZL201410624310.0	2016.7.13	2144484	中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司	李波，刘艳，邹建波，李雪，潘国志	有效
发明专利	减少铜或铜合金铸锭中柱状晶的热-磁一体控制制备方法	中国	ZL201410713245.9	2017.1.18	2346069	中国科学院金属研究所	杨院生，冯小辉，李应举，罗天骄	有效



	<ul style="list-style-type: none"> <li>完成单位：中国科学院金属研究所</li> <li>对该项目贡献：项目第三完成人，对创新点 1 和 2 做出了创造性贡献，提出了项目低压脉冲磁场细晶技术路线实施方案，负责完成了相关工艺研究，获得了低压脉冲磁场细化凝固组织的最佳过程参数，实现了航空复杂铸件的凝固组织细化，专利 1、3、5、6 主要发明人。</li> </ul> <p>4. 姓名：李波</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>排名：4</li> <li>行政职务：无</li> <li>技术职称：研究员级高级工程师</li> <li>工作单位：中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司</li> <li>完成单位：中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司</li> <li>对该项目贡献：项目第四完成人，对创新点 3 做出了创造性贡献，提出了项目低应力引流浇注成型技术研发的思路、方案和技术路线，设计出低应力引流式浇注成型系统，解决了高温合金大型复杂铸件因变形导致的尺寸超差问题。专利 2、4 主要发明人。</li> </ul> <p>5. 姓名：罗天骄</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>排名：5</li> <li>行政职务：无</li> <li>技术职称：副研究员</li> <li>工作单位：中国科学院金属研究所</li> <li>完成单位：中国科学院金属研究所</li> <li>对该项目贡献：项目第五完成人，对创新点 1 做出了创造性贡献，负责研制具有自主知识产权的大型复杂铸件脉冲磁场晶粒细化专用装置，为大型复杂铸件整体细晶制备提供了设备支撑。专利 1、5、6 主要发明人之一。</li> </ul> <p>6. 姓名：顾欣</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>排名：6</li> <li>行政职务：无</li> <li>技术职称：研究员级高级工程师</li> <li>工作单位：中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司</li> <li>完成单位：中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司</li> <li>对该项目贡献：项目第六完成人，对创新点 3 做出了创造性贡献，在项目中负责大型复杂铸件蜡模工艺、型壳耐火材料及浆料配方优化及淋砂工艺、型壳干燥与焙烧工艺等工作，提出并负责低应力引流浇注成型型壳制备技术实施。专利 2 主要发明人之一。</li> </ul>
完成人合作关系说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>项目主要完成人杨院生、李应举、罗天骄同属中国科学院金属研究所“先进材料凝固与制备技术”创新课题组，杨院生为课题组长，李应举、罗天骄为课题组工作人员。项目主要完成人陈仲强、李波、顾欣在中国航发沈阳黎明发动机有限责任公司工作，陈仲强为集团</li> </ul>

	<p>总冶金师，李波为一级技术专家、顾欣为合金厂总工程师。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>项目主要完成人杨院生、李应举、罗天骄共同承担完成了国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目课题“高温合金液态成形先进制备技术基础研究”，国家自然科学基金重点项目“低压脉冲磁场凝固基础研究”和国家自然科学基金面上项目“磁-热协同控制大型复杂薄壁铸件成形的基础研究”等项目。</li><li>中国科学院金属研究所杨院生、李应举、罗天骄与中国航发沈阳黎明发动机有限责任公司的陈仲强、李波、顾欣等人于 2011 年就开始开展大型复杂铸件凝固组织细化研究，2012 年 1 月起共同承担完成了航空推进技术验证计划课题“K4169 合金大型薄壁复杂结构件整体精铸工程化应用技术研究与实验验证”项目。经多年的联合研究，项目组研发和发明了低应力引流浇注成型技术、磁控晶粒细化技术、顺序凝固缺陷消减技术等航空大型复杂薄壁构件一体化铸造成型技术，并在我国第三代航空发动机后机匣、复杂精密涡轮叶片等复杂薄壁结构件的一体化铸造中得到应用，联合申请了 9 项专利。</li></ul>
--	---