附件1：

高温合金材料/产品制备技术攻关项目

招标标的

一、攻关专题名称

高温合金材料/产品制备技术

二、攻关意义

高温合金是以金属镍、镍铁及钴为基，在高温下能承受一定应力并具有抗氧化、抗腐蚀能力的先进结构材料，是制造航空发动机、气电和舰船动力用燃气轮机热端部件的关键材料，也是航天推进系统、高增压车用发动机及能源的生成、化学和冶金处理、石油和天然气提炼等高端制造业需用的重要材料，被誉为先进航空发动机的基石和现代金属材料皇冠上的明珠。

江苏高温合金产业起步于上世纪90年代初，在国内高温合金行业中具有重要的地位，具有总量规模大、品种较为齐全、产品特色鲜明等特点，发展前景广阔。但是与国际先进水平相比，在基础研究、工艺技术和产品质量等方面均存在较大差距。坚持问题导向，加强高温合金共性技术攻关，突破新型高性能单晶高温合金母合金及叶片制造、铸造高温合金纯净化冶炼、基于组织控制的变形高温合金重要产品制备技术，对于提升高端产品的供给能力，缩小与国外先进水平差距，满足下游行业急需，促进航空航天、核电、火电和交通等高端装备制造业的发展，减少和替代进口，打造完整的产业链，提高行业竞争力具有重要作用。

三、攻关目标

面向我国航空、航天、舰船、火电站、核电站、石油化工、汽车等重点领域的发展需求，突破高温合金生产中的关键共性技术难题，形成具有国际先进水平的高温合金材料生产体系，获得一批自主知识产权，以点带面推动我省高温合金产业结构调整与升级，实现高温合金材料国产化和规模应用。

针对新型高性能单晶高温合金母合金及叶片制备的关键共性技术问题，从新型高性能单晶成分设计入手，对单晶合金熔炼、单晶叶片的铸造等各工序环节进行研究，开发单晶涡轮叶片的精密铸造成型技术，实现新型高性能单晶高温合金叶片的优质、高效制备。

针对多晶铸造高温合金生产过程中的关键共性技术问题，开发纯净化熔炼技术，使铸锭中主元素和痕量元素的检测与控制达到国际先进水平，同时实现铸锭中O、N、S等有害杂质元素的超低含量控制。

针对变形高温合金生产中组织控制的共性技术问题，开发基于组织性能精确控制的高温合金重要产品制备技术。实现高温合金冷、热变形产品的晶粒尺寸、组织均匀性、产品外形和表面质量的精确控制。

四、资格条件

本项目需依托高温合金制造企业的技术、装备和人才优势，及其与相关高校、科研院所进行产学研合作的能力，突破关键瓶颈技术，具体需满足以下条件：

（一）在江苏省内注册，并在江苏省内依法从事研发、生产、经营活动，正常经营一年以上。

（二）企业具有健全的财务管理机构和制度，信用良好且无违法记录；具有独立的研发机构和产学研合作研发团队，研发实力较强，在国内同行业中具有较强的竞争力。

（三）企业质量环境管理体系运行良好，符合国家相关法规政策标准要求，产品质量控制需达到国内先进水平。

（四）企业应承诺接受省经信委及其指定的社会第三方机构对攻关任务各阶段开展检查和审计工作；应承诺与省内同行分享部分攻关成果，从而推动我省高温合金行业的发展。

五、各子项目及其主要攻关目标

（一）新型高性能单晶高温合金母合金制备技术。

研发新型高性能单晶高温合金母合金的高纯净化冶炼技术，对母合金中主元素和痕量元素含量进行精确检测与控制，降低母合金中O、N、S、P等有害杂质元素含量，达到国内领先、国际一流水平。

**1.材料技术标准。**

GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号；

GJB 5512.3-2005 铸造高温合金和铸造金属间化合物高温材料母合金规范第3部分：单晶铸件用铸造高温合金母合金；

HB 7762-2005 航空发动机用定向凝固铸晶和单晶高温合金锭规范。

**2.攻关内容。**

**（1）超高纯单晶高温合金母合金熔炼制备工艺。**

通过攻关超高纯单晶高温合金母合金熔炼制备工艺，对化学成分和组织结构的遗传性、熔体成分稳定性等影响合金冶炼质量的因素进行分析并制定控制方法，实现合金冶炼全过程工艺精准控制，多批次合金成分均匀一致。

**（2）超低含量O、N、S控制技术。**

通过攻关超低含量O、N、S控制技术，研究夹杂物形成的热力学和动力学过程，掌握脱O、脱N、脱S的冶金机理，确定有害杂质元素控制方法。

**（3）高温合金痕量元素及超低含量元素精准检测技术。**

通过攻关单晶高温合金母合金痕量元素及超低含量元素精准的成分和性能检测技术，形成高温合金材料成分设计、熔炼和铸造工艺优化、理化性能和内外部缺陷检测等技术评价体系，建立针对我国航空材料及部件的现代分析检测硬件平台，制订相关行业标准。

**（4）开发含铪、含铼等难熔稀有元素单晶高温合金返回料处理和重熔技术。**

通过攻关多道挡渣、多道过滤、坩埚净化技术，对含铪、含铼等难熔稀有元素单晶高温合金返回料进行非真空净化处理，再真空除气体、杂质。通过返回料的重熔回用，解决国内含铪、含铼等难熔稀有元素高温合金不能返回使用的问题，提高能源、资源的综合利用率，降低原材料成本30%以上。（备注：#1合金元素含量均为质量分数；#2 σb、σ0.2和δ分别代表材料的抗拉强度、屈服强度和延伸率，后文相同）

**3.考核指标。**

**（1）合金元素成分控制要求**#1。

对母合金材料中痕量元素含量进行检测和控制，控制Bi，Tl，Se，Te等痕量杂质元素45种以上。

母合金中痕量元素总量不高于0.02%（200ppm），其中有害元素氧元素含量不高于0.0005%（5ppm），硫元素含量不高于0.0003%（3ppm），氮元素含量不高于0.0005%（5ppm），P元素含量不高于0.001%（10ppm），其中氧、氮、硫总含量≤12ppm。

**（2）力学性能与组织控制标准。**

瞬时力学性能#2

760℃拉伸性能：σb≥1000MPa，δ≥5%。

蠕变持久性能和寿命

持久性能980℃/250MPa，持久寿命≥100小时；1100℃/137MPa持久寿命≥100小时；1150℃/100MPa持久寿命≥50小时。

合金锭表面不允许有一次缩孔。材料试棒疏松和偏析小于0.5级，单晶材料试棒晶粒取向[001]方向小于10o。

**（3）外观。**

铸造表面不允许有喷砂、喷丸、油迹、脏污等，表面精度高，形状误差小。

**（4）返回料使用。**

建成返回料处理生产线，具备高温合金母合金熔炼中的返回料处理、重熔及再利用能力，实现对高温合金特色元素返回料使用量达到40%。

**4.最终提交成果。**

（1）系统研究合金元素变化及其交互作用对合金偏析行为、共晶溶解动力学、第二相析出行为、合金组织稳定性、变形行为、抗热腐蚀性能、合金缺陷等形成的影响。开展合金成分优化设计，研制性能达国际同类材料水平的上述合金配方。

（2）开展对合金真空熔炼、精炼、提纯工艺研究和“中间合金”的配比研究，掌握超高纯度熔炼工艺；建立超高纯、精配比、均质化的高温合金熔炼工艺体系。

（3）建立完善的高纯度单晶高温合金母合金的制备技术标准和工艺规范，形成工程化、产业化能力。

（4）形成专利5项，其中发明专利2项以上。

（5）形成新工艺方法2项以上。

（二）新型高性能单晶高温合金叶片精密铸造成形技术。

通过陶瓷壳型、型芯材料和蜡质模型用料的开发与集成，开发产业化条件下的制壳、制芯技术，实现满足单晶叶片成形的熔模制造；通过对新型高性能高温合金凝固特性的研究，建立合理的凝固温度场及其控制技术，研发获得高可靠性的单晶叶片精密铸造成形工艺；制备获得满足服役性能要求的单晶叶片，并建立相应的质量保证体系。具体要求如下：

**1.技术标准。**

GB/T 28412-2012 高温合金精铸叶片通用技术条件；

HB 7728-2002 航空用高温合金涡轮工作叶片精铸件规范。

**2.攻关内容。**

（1）航空发动机用镍基单晶涡轮叶片近净形熔模精密铸造技术。

开发航空发动机用镍基单晶涡轮叶片近净形熔模精密铸造生产整套工艺，解决单晶叶片生产的工艺设计问题，解决高精度的叶片蜡模模样的制备技术问题，重点突破适于单晶高温合金叶片生产的熔模铸造陶瓷型芯和型壳材料设计及其制备工艺难题；研发特种陶瓷模壳制备技术，解决单晶缺陷的防治问题。

（2）航空发动机用镍基高温合金涡轮叶片的单晶制备工艺。

开发航空发动机涡轮叶片的单晶凝固工艺，解决快速冷却定向凝固（Bridgman方法）过程中凝固速度、凝固界面的相对位置及温度梯度等凝固参数的控制问题，以及型壳内金属液的温度场、应力场、流动场的动态控制与优化问题，制备出符合航空发动机要求的单晶涡轮叶片。

**3.考核指标。**

（1）制备出的单晶叶片小角度晶界小于6°，无缺陷。

（2）单晶成品率超过50％。

**4.最终提交成果。**

（1）提交满足技术指标的单晶叶片样品（附测试报告）。

（2）申请国家发明专利不少于2项，形成技术秘密不少于5项。

（三）铸造高温合金母合金的纯净化熔炼技术。

铸造高温合金纯净化熔炼是高品质高温合金母合金及其铸件产品的技术基石，杂质元素O、S、N是影响铸造高温合金性能的关键元素，使合金高温塑性变坏，强度降低，可焊接性变差。国外发动机用高温合金的主要有害杂质S、O、N的含量之和基本控制小于10ppm左右，实现了一次冶炼合金的超纯净。而我国冶炼高温合金上述三种杂质元素的含量比国外都要高一个数量级。攻关铸造高温合金纯净化熔炼技术，实现合金中主元素和痕量元素含量的检测与控制，降低母合金中O、N、S、等有害杂质元素含量达到国际水平，有利于提高铸造高温合金产品的质量，增强竞争力。

**1.材料技术标准。**

GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号；

GJB 5512.1-2005 铸造高温合金和铸造金属间化合物高温材料母合金规范第1部分：普通精密铸件用铸造高温合金母合金；

GJB 5512.2-2005 铸造高温合金和铸造金属间化合物高温材料母合金规范第2部分：定向凝固柱晶铸件用铸造高温合金母合金。

**2.攻关内容。**

（1）铸造高温合金用中间合金纯净化熔炼技术。

铸造高温合金一般采用纯金属熔炼，但由于国内部分金属材料的O、N含量较高，在真空感应熔炼过程中，原材料中的O、N与合金化元素Al、Ti、Nb反应，影响真空熔炼的O、N去除效果；对此采用真空熔炼的低O、N含量中间合金进行铸造高温合金的熔炼是获得高纯净度的重要技术。

（2）铸造高温合金真空熔炼条件下的新型脱氧、脱硫技术。

在真空感应熔炼的过程中，依靠气相脱S较为困难，但采用CaO坩埚进行熔炼，结合气相脱S等新型脱S技术，可以实现真空脱S;同时采用合理的熔炼工艺促进熔体脱O，形成完整的脱氧、脱硫技术。

（3）铸造高温合金熔体过滤净化技术。

在铸造高温合金浇铸过程中采用物理分离、化学吸附等作用机理实现熔体过滤净化技术，进一步将熔体中的杂质去除，有效降低熔体中O、N含量。

**3.考核指标。**

母合金铸锭中O元素含量不高于0.0006%（6ppm），S元素含量不高于0.0005%（5ppm），N元素含量不高于0.001%（10ppm），H元素含量不高于0.0001%（1ppm）。

**4.最终提交成果。**

形成铸造高温合金母合金纯净化冶炼工艺规范；铸造高温合金母合金中O、S、N等杂质含量水平达到国内领先水平；采用该技术提升铸造高温合金市场占有率，达到年产铸造高温合金母合金不低于200吨，产值不低于5000万元，利税不低于800万元。

（四）均质细晶变形高温合金型材热加工工艺技术。

均质化和细晶化技术是制备优质变形高温合金的一项共性技术难题，涵盖了特种冶金低偏析熔炼、扩散退火均匀化工艺技术、基于组织控制的热加工技术等相关内容。通过技术攻关，为省内同行生产同类产品提供技术示范。

**1.材料技术标准。**

GB/T 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号；

GB/T 14999.4-2012 高温合金试验方法第4部分：轧制高温合金条带晶粒组织和一次碳化物分布测定；

GB/T 14999.6-2010 高温合金试验方法第6部分：锻制高温合金双重晶粒组织和一次碳化物分布测定方法；

GB/T 6394-2002 金属平均晶粒度测定方法；

GB/T 24177-2009 双重晶粒度表征与测定方法。

**2.攻关内容。**

（1）低偏析高温合金特种冶金工艺技术。

采用真空感应熔炼+真空电弧重熔（VIM+VAR）、真空感应熔炼+电渣重熔（VIM+ESR）双联工艺、真空感应熔炼+电渣重熔+真空电弧重熔（VIM+ESR+VAR）三联工艺路线，开发应用电渣重熔和真空电弧重熔过程中精确控制自耗电极熔速、同轴供电、强化冷却和控制浅平金属熔池等进一步控制高温合金铸锭成分、降低组织偏析的技术。

（2）高温合金扩散退火均匀化工艺技术。

高温合金中合金化程度较高，含有大量的铝、钛等易偏析元素，采用合适的高温合金扩散退火技术可显著降低合金铸态组织中枝晶干和枝晶间的元素偏析。

（3）均质细晶高温合金制品热加工工艺技术。

由于高温合金变形的合金化程度较高，其合适热加工工艺温度范围窄，为得到均质细晶高温合金制品，其热加工工艺中加热温度、保温时间、终（轧、锻）温度与合金的晶粒长大拐点温度、再结晶温度需要良好的匹配。

**3.考核指标。**

（1）变形高温合金有害元素含量控制指标。

P≤0.01%，S≤0.002%，As≤0.001%，Sb≤0.001%，

Bi≤0.001%，Sn≤0.001%，Pb≤0.001%，O≤20ppm。

（2）镍基高温合金金相组织控制指标。

成品棒材晶粒细于5级，级差小于等于1级

（3）力学性能指标。

棒材室温拉伸：

Rm≥1200MPa Rp0.2≥800MPa A≥15% Z≥25%；

棒材高温拉伸：

测试温度500℃

Rm≥1000MPa Rp0.2≥700MPa A≥15% Z≥25%；

硬度 HB≥330

冲击 Kv≥35J

丝材室温拉伸：

Rm≥500MPa Rp0.2≥200MPa A≥35%；

标准热冲击达到国际水平950℃。

**4.最终提交成果。**

形成完整的均质细晶变形高温合金型材制备工艺规范；形成发明专利一项；产品综合性能指标达到国外同类产品技术水平；采用该项技术生产均质细晶变形高温合金棒材或型材产品，国内市场占有率达到50%，实现产值2000万元以上，利税300万元以上。

（五）核工业用冷变形镍基合金管材生产技术。

攻关解决核工业用冷变形镍基合金管材晶粒尺寸及组织、外形和表面质量、生产全流程的组织和性能精确控制技术，实现镍基合金管材产品的高质量稳定生产。

**1.材料技术标准。**

NB/T 20008.7 蒸汽发生器传热管用镍-铬-铁合金无缝管

ASME SB-163 冷凝器和热交换器用镍和镍基合金无缝管技术条件

RCCM M4105 压水堆蒸汽发生器用无缝镍-铬-铁（NC30 Fe）合金管束。

**2.攻关内容。**

（1）优化冷变形工艺及冷轧模具技术，提高尺寸均匀性和控制表面粗糙度。

（2）研究冷变形镍基合金化学成分与变形工艺和热处理工艺的匹配关系，控制微观组织及晶粒度的大小和均匀性。

（3）研究管材表面硬化和晶界强化对力学性能的影响，控制冷变形镍基合金强度的均匀性。

（4）研究提高高温用冷变形镍基合金高温持久强度和抗高温水蒸气氧化性能的技术手段和工艺措施。

（5）优化Ti/C比，确保高温用冷变形镍基合金管材晶间腐蚀性能。

（6）优化全流程的制造工艺，提高综合合格率。

**3.考核指标。**

（1）组织控制指标。

要求镍基合金管材晶粒尺寸均匀，整台设备每批管材的晶粒度级差不高于2级。

（2）力学性能控制指标。

整台设备每批管材的力学性能满足相关技术标准的前提下，整体性能均匀性要求屈服强度偏差控制在80MPa以内。

（3）表面质量。

管材的内表面粗糙度控制在0.8μm以下，缺陷深度应通过人工伤0.10mm或更高标准的检验要求。

（4）内涡流信噪比。

管材的内涡流检测信噪比不小于30。

（5）高温用冷变形镍基合金管材的持久强度。

针对实际工况温度超过等强温度时，需考验材料的高温持久强度，6000h试验周期675℃条件下的持久强度不低于84MPa。

**4.最终提交成果。**

（1）形成一批先进工艺技术，产品性能满足考核指标要求，单项技术指标合格率达到或超过90%，综合合格率达到或超过80%。

（2）产品市场占有率达到50%～70%。

（3）技术性能指标达到国内领先、世界一流。

（4）年产值5000万元人民币以上。