

## 附件 4

# 航空发动机和燃气轮机耐高温叶片 “一条龙”应用计划申报指南

## 一、产业链构成

面向航空发动机和燃气轮机等应用领域，以提高高温合金精密铸造涡轮叶片质量和可靠性为核心，组织产业链各环节优势力量，推动重点项目攻关，突破单晶高温合金母合金纯净度控制、复杂定向/单晶涡轮叶片制备、长寿命热障涂层设计与制备等关键技术，带动上游原辅材料产业、高端装备产业等相关产业互融共生、分工合作、利益共享，推进产业链协作发展，形成上下游产业对接顺畅的应用示范全链条，推动航空发动机和燃气轮机的开发、生产和应用。

### 关键产业链条环节

序号	产业链环节	航空发动机叶片	地面燃气轮机叶片
1	上游原材料	√	√
2	关键设备制造	√	√
3	高性能涡轮叶片合金开发	√	√
4	高纯净度母合金制备	√	√
5	涡轮叶片精密铸造	√	√
6	涡轮叶片机加	√	√
7	涡轮叶片制孔	√	√
8	涡轮叶片焊接	√	√
9	涡轮叶片热障涂层	√	√
10	下游应用	√	√

## 二、目标和任务

### （一）上游原材料

#### 1.母合金用原材料

（1）**环节描述及任务。**开发镍、钼、铌等原材料制备技术，提

高原材料的杂质元素含量控制水平，为涡轮叶片用铸造高温合金熔炼提供优质原材料，为母合金锭纯净度控制奠定基础。

(2) **具体目标。**具备优质原材料生产能力，镍、钼、铌等具体化学成分控制要求如下表所示：

**表 1 镍的化学成分控制要求**

牌号	化学成分，%								
	Ni+Co 不小于	Co 不大于	C	Si	P	S	Fe	Cu	Zn
Ni9999	99.99	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	0.002	0.0015	0.001
牌号	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	Al	Mn	Mg
Ni9999	0.0008	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.001	0.001	0.001
牌号	Te	Tl	Ag	Se	Au	Ga	Ge		
Ni9999	0.0005	0.0005	0.0001	0.0003	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
牌号	Hg	In	K	Na	Th	U			
Ni9999	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

**表 2 钼的化学成分控制要求**

类别	牌号	化学成分，%							
		Ta	Nb	C	O	N	Fe	Ni	Mn
钼条	TTa-1	余量	0.01	0.015	0.20	0.01	0.01	0.005	0.003
类别	牌号	W	Mo	Si	Zr	Al	Cu	Cr	Ti
钼条	TTa-1	0.003	0.003	0.01	0.003	0.003	0.003	0.005	0.003

**表 3 铌的化学成分控制要求**

类别	化学成分，%								
	Re	K	Na	Ca	Fe	Cu	Mo	Pb	
铌条、铌粒	99.99	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0001	0.0001	0.0001	
类别	W	As	Se	Sn	Ba	Mn	Be	Pt	
铌条、铌粒	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	
类别	Co	Cd	Bi	Si	Mg	C	Zn	Sb	
铌条、铌粒	0.0005	0.0001	0.0001	0.0005	0.0001	0.0015	0.0001	0.0001	
类别	Al	Ni	Ti	Cr	Tl	Te	S		
铌条、铌粒	0.0001	0.0005	0.0005	0.0001	0.0001	0.0001	0.0005	0.0005	

## 2. 陶瓷型芯/型壳用原材料

### (1) 环节描述及任务

① 开发出适用于涡轮叶片精密铸造陶瓷型芯用的石英玻璃粉，提高原材料杂质含量、粒度分布控制水平，提高陶瓷型芯产品质量及合格率，满足航空发动机涡轮叶片开发需求。

② 针对涡轮叶片精密铸造陶瓷型壳用电熔白刚玉系列产品，提高原材料的控制水平，减少因原材料质量问题导致的型壳质量及叶片铸造合格率波动。

③ 针对目前涡轮叶片精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶存在问题，开发硅溶胶纳米粒径、pH值、运动粘度、钠含量等关键参数控制技术，开发满足涡轮叶片精密铸造的硅溶胶产品。

(2) **具体目标。**具备优质精密铸造用原材料开发能力，石英玻璃粉成分控制要求： $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}<0.02\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3\leq 0.01\%$ ， $\text{Na}_2\text{O}\leq 0.01\%$ ， $\text{SiO}_2\geq 99.95\%$ 。白刚玉控制要求： $\text{Al}_2\text{O}_3\geq 98.5\%$ ， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\geq 95\%$ ， $\text{SiO}_2\leq 0.20\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3\leq 0.1\%$ ， $\text{Na}_2\text{O}\leq 0.6\%$ ，中位粒径  $D_{50}$  为  $20.0\mu\text{m}\pm 5.0\mu\text{m}$ 。硅溶胶控制要求： $\text{SiO}_2$  含量 28~31%， $\text{Na}_2\text{O}\leq 0.5\%$  密度 1.18~1.22  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，pH 值 9.5~10.5，运动粘度  $\leq 8\times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ，纳米粒径 7~15 nm。

## (二) 关键设备制造

### 1. 单晶炉

(1) **环节描述及任务。**突破感应式双区壳型加热器电源等关键技术，提高单晶炉自动化、信息化水平和可靠性，设计、制造先进单晶炉，满足航空发动机和燃气轮机单晶叶片开发和生产需求。

(2) **具体目标。**具备先进单晶炉的开发能力，单晶炉技术指标：  
① 标称容量：坩埚容量 25kg；② 熔炼系统：最高温度 1700℃；③ 型壳加热器系统：双区感应加热，最高温度 1650℃；d) 抽拉系统：

抽拉速度 0.2 ~ 20mm/min 可调，精度 2%；④真空系统：极限真空度  $\leq 1 \times 10^{-2}$  Pa；f) 设备应具备数据采集及输出功能，所有工艺参数均可用于分析与检查。

## 2. 真空热处理炉

(1) **环节描述及任务**。突破全金属屏炉温均匀性控制、高温可靠性等关键技术，不断提高设备可靠性、稳定性和自动化程度，具有高温合金涡轮叶片真空热处理所需各项技术能力，满足航空发动机和燃气轮机涡轮叶片开发和生产需求。

(2) **具体目标**。具备先进真空热处理炉的开发能力，真空热处理炉应主要技术指标：最高温度 1600℃；长时工作温度 1350℃；炉温均匀性  $\pm 5$ ℃；工作真空度  $\leq 5 \times 10^{-3}$  Pa（在 1100℃空炉保温时）；系统精度校验（SAT）最大误差  $\pm 1.7$ ℃；具有分压控制功能，分压范围 10Pa ~ 400Pa；最大气淬冷却速度不低于 100℃/min。

### (三) 高性能涡轮叶片合金开发

(1) **环节描述及任务**。开发具有自主知识产权的高性能涡轮叶片材料，如航空发动机用第三代高强单晶高温合金和地面燃气轮机用第二代耐腐蚀单晶高温合金；开发第二代单晶合金和其它现用涡轮叶片材料的工程化应用技术，满足在研、在产航空发动机的需求。

(2) **具体目标**。具备高性能航空发动机和燃气轮机涡轮叶片材料开发能力：第三代高强单晶高温合金 1120℃/137MPa 持久寿命  $\geq 100$ h；第二代耐腐蚀单晶高温合金：1030℃/230MPa 持久寿命  $\geq 50$ h。

#### **(四) 高纯净度母合金制备**

**(1) 环节描述及任务。**开发高温合金纯净化熔炼技术，发展痕量元素高精度检测技术，生产出成分均匀、一致性好、杂质含量低的高温合金母合金，为提高涡轮叶片质量和可靠性奠定基础。

**(2) 具体目标。**具备高纯净度高温合金母合金锭批生产能力：等轴晶高温合金 O、N、S 总量 $\leq 15\text{ppm}$ ，定向、单晶高温合金 O、N、S 总量 $\leq 10\text{ppm}$ 。

#### **(五) 涡轮叶片精密铸造**

**(1) 环节描述及任务。**开发复杂结构单晶涡轮工作叶片和涡轮导向叶片的精密铸造成形技术，提升在产航空发动机涡轮叶片合格率，保障航空发动机批产。

**(2) 具体目标。**航空发动机定向复杂空心涡轮叶片铸件合格率 $> 80\%$ ；成功开发第三代单晶合金双层壁超气冷涡轮叶片、多联单晶导向叶片；具备地面燃机大尺寸定向/单晶涡轮叶片开发能力。

#### **(六) 涡轮叶片机加**

**(1) 环节描述及任务。**开发涡轮工作叶片和导向叶片磨削加工工艺及电加工加工工艺，提高涡轮叶片尺寸控制精度，消除加工损伤，提高涡轮叶片质量。

**(2) 具体目标。**具备单晶、定向和等轴晶涡轮叶片机加能力，满足目前在产、在研型号涡轮叶片小批量快速生产开发需求。

#### **(七) 涡轮叶片制孔**

**(1) 环节描述及任务。**开发空心涡轮叶片气膜孔加工工艺和检测技术，精确控制气膜孔的分布、形状、出口角度、尺寸，降低重铸层厚度，同时避免微裂纹等孔口缺陷发生，提高加工质量。

(2) **具体目标**。具备高温合金涡轮叶片异型气膜孔加工、检测及表征能力，满足目前在产、在研型号涡轮叶片小批量快速生产开发需求，提升航空发动机高性能叶片自主研发和制造生产能力。

### (八) 涡轮叶片焊接

(1) **环节描述及任务**。开发复杂结构涡轮工作叶片和导向叶片真空焊接技术，包括涡轮工作叶片叶尖顶盖焊接、叶尖/榫头处铸造工艺孔焊接封堵、低压工作叶片微动耐磨层焊接等，以及导向叶片的双联组合焊接、冷却通导流片、多孔盖板、支撑件等零部件的焊接，形成工程化开发能力和小批生产能力，保证航空发动机和燃气轮机涡轮叶片的开发和生产。

(2) **具体目标**。形成单晶高温合金涡轮工作叶片和导向叶片的工程化开发能力，保障型号开发需求；形成小批生产能力，保证发动机生产需求；形成新材料和叶片新结构焊接技术的持续自主创新开发能力，满足未来先进发动机叶片技术需求。

### (九) 涡轮叶片热障涂层

(1) **环节描述及任务**。针对航空发动机及燃气轮机叶片的高温防护需求，开发系统叶片涂层材料合成及制备工艺技术，突破热障涂层及抗氧化涂层工艺稳定性控制、热障涂层层间互扩散控制和微观结构控制、微量元素添加及控制、叶片涂层粗糙度及 CMAS 附着控制等系列关键技术，生产出厚度均匀性高、结合力强、防护性能优异的叶片涂层，为涡轮叶片的可靠使用及寿命提升提供有力保障。

(2) **具体目标**。具备涡轮叶片长寿命热障涂层生产能力：热障涂层隔热效果  $> 100^{\circ}\text{C}$ ；叶片涂层服役寿命  $> 500\text{h}$ 。

## （十）下游应用

### 1. 航空发动机涡轮叶片

（1）**环节描述及任务。**推进定向、单晶高温合金涡轮叶片在航空发动机中的应用。

（2）**具体目标。**下游应用企业产品满足航空发动机型号开发需求。

### 2. 燃气轮机涡轮叶片

（1）**环节描述及任务。**推进高温合金涡轮叶片在地面燃气轮机中的应用。

（2）**具体目标。**下游应用企业产品满足市场需求，市场认可度不断提升。

## 三、咨询电话

中国航发北京航空材料研究院 宋尽霞 010-62498232

中国企业联合会 杨秀丽 010-68702166

附：航空发动机和燃气轮机耐高温叶片“一条龙”应用计划申报书

附

航空发动机和燃气轮机耐高温叶片  
“一条龙”应用计划申报书

企业名称： \_\_\_\_\_

项目名称： \_\_\_\_\_

责任人（法人代表）： \_\_\_\_\_

项目技术负责人： \_\_\_\_\_

实施年限： 20\_\_\_\_年\_\_\_\_月至 20\_\_\_\_年\_\_\_\_月

填报日期： 20\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

中华人民共和国工业和信息化部制

二〇 年 月

单位名称		注册地		机构代码											
项目名称		项目实施期	年月至年月												
所属产业链	<input type="checkbox"/> 航空发动机叶片 <input type="checkbox"/> 燃气轮机叶片														
所属产业链关键环节	<input type="checkbox"/> 上游原材料 <input type="checkbox"/> 关键设备制造 <input type="checkbox"/> 高性能涡轮叶片合金开发 <input type="checkbox"/> 高纯净度母合金制造 <input type="checkbox"/> 涡轮叶片精密铸造 <input type="checkbox"/> 涡轮叶片机加 <input type="checkbox"/> 涡轮叶片制孔 <input type="checkbox"/> 涡轮叶片焊接 <input type="checkbox"/> 涡轮叶片热障涂层 <input type="checkbox"/> 下游应用														
所属产品	<input type="checkbox"/> 上游原材料 <input type="checkbox"/> 关键设备 <input type="checkbox"/> 航空发动机涡轮叶片 <input type="checkbox"/> 燃气轮机涡轮叶片														
实施期	年 月至 年 月														
主要负责人		联系电话(手机)													
电子邮箱		传真													
<p>参与单位满足所属“一条龙”环节供需概述(包括:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.企业基本情况;</li> <li>2.重点产品、工艺符合性质,与“一条龙”其他环节在产品、工艺上的直接关联性;</li> <li>3.创新能力、产品技术和工艺水平领先情况;</li> <li>4.对产业链上游的需求,以及对下游可提供的产品或服务;近年来企业产品和技术实际使用和应用情况;</li> <li>5.近三年经营业绩,遵纪守法情况,管理制度建设情况,包括但不限于以下内容</li> </ol> <p style="text-align: center;"><b>2016、2017、2018 年企业情况</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td rowspan="2">技术</td> <td>研发投入占营收比例</td> </tr> <tr> <td>当年申请专利数,截至年底累计授权专利数</td> </tr> <tr> <td>市场</td> <td>细分领域市场份额、市场排名</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">财务</td> <td>总资产</td> </tr> <tr> <td>资产负债率</td> </tr> <tr> <td>年度营业收入</td> </tr> <tr> <td>年度净利润</td> </tr> </table> <ol style="list-style-type: none"> <li>6.企业参与“一条龙”应用计划的运行工作机制及措施;</li> <li>7.推荐的龙头企业、参与单位和示范工程;</li> <li>8.存在的问题和建议等。</li> </ol>						技术	研发投入占营收比例	当年申请专利数,截至年底累计授权专利数	市场	细分领域市场份额、市场排名	财务	总资产	资产负债率	年度营业收入	年度净利润
技术	研发投入占营收比例														
	当年申请专利数,截至年底累计授权专利数														
市场	细分领域市场份额、市场排名														
财务	总资产														
	资产负债率														
	年度营业收入														
	年度净利润														
<p>项目基本情况(总投资、主要建设内容、预期效果等),并填列下表:</p> <p style="text-align: center;"><b>项目目前情况</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>项目成熟度</td> <td>是否已经完成可研</td> </tr> <tr> <td>项目总投资</td> <td>总投资额</td> </tr> <tr> <td>项目资本金</td> <td>项目资本金额度</td> </tr> </table>						项目成熟度	是否已经完成可研	项目总投资	总投资额	项目资本金	项目资本金额度				
项目成熟度	是否已经完成可研														
项目总投资	总投资额														
项目资本金	项目资本金额度														
参与单位自评意见	<p>本单位承诺申报内容真实有效。</p> <p style="text-align: right;">法定代表人(签字): (盖章) 年 月 日</p>														