

# 季华实验室

## 研究生联合培养项目需求表

联 培 项 目 编 号： FSNEU-2026-JHSYS-09

联 培 项 目 名 称： 气浮用陶瓷/石墨材质的制备技术研究

联 培 单 位： 季华实验室

项 目 负 责 人： 邓延生

联 系 电 话： 15999987525

单 位 负 责 人： 邓延生

联 系 电 话： 15999987525

东北大学佛山研究生创新学院

## 填表说明

- 1、 本表由联合培养基地填写，务必保证信息全面准确。
- 2、 联合培养基地每年 3 月前将本表交于东北大学佛山研究生创新学院，用于本年度接收联合培养研究生。
- 3、 一份需求表只能填写一个项目，且需求表上交后原则上不允许取消或更改。
- 4、 联培项目编号为：东北大学佛山研究生创新学院简称佛山研究生创新学院，简称代码-FSNEU、年份-202X、基地名称简称代码-XXX(美的集团中央研究院简称美的中研院，简称代码 MDZYY)、本基地本年度项目序号 X X，例如：  
FSNEU-2026-MDZYY-1。
- 5、 各栏目内容可续页。

东北大学佛山研究生创新学院联培基地项目需求表

|   |  |      |                   |
|---|--|------|-------------------|
| 项目编号  | FSNEU-2026-JHSYS-09  | 项目名称 | 气浮用陶瓷/石墨材质的制备技术研究 |
| 联培课题方向  | 面向超精密高端装备对高精度平面类气浮零部件的迫切需求，开展陶瓷/石墨材质导轨及气浮垫的快速集成制造技术研究，重点攻克轻量化/复杂结构的成型一致性控制、高精度平面研磨抛光工艺机理等关键科学问题。 |      |                   |
| 所需研究生专业方向   | 机械工程、冶金工程、材料工程   |      |                   |
| 需求人数  | 1  |      |                   |
| 岗位要求  | 无  |      |                   |
| 项目简介  |  |      |                   |
| <p>一、项目背景：</p> <p>随着半导体光刻、大口径光学系统、超精密测量与高端数控装备向纳米级定位、亚微米级运动、超高稳态方向快速发展，高精度平面类气浮零部件已成为决定装备精度、稳定性与可靠性的核心功能部件。气浮导轨、气浮垫依托气体静压支撑实现无摩擦、低振动、长寿命、高精度运动，在光刻机工件台、晶圆传输系统、光学反射镜调整机构中不可替代。</p> <p>当前，超精密装备对气浮部件提出低热变形、高刚性、高面形精度、快速响应、高一致性的严苛要求，传统金属材料难以兼顾热稳定性与精度保持性，而陶瓷与石墨凭借低热膨胀系数、高比刚度、优异耐磨与阻尼特性，成为高端气浮部件的优选材料。然而，陶瓷/石墨材质硬脆、可加工性差、成型与精密加工流程长，现有制造模式存在材料—结构—工艺脱节、单件试制周期长、集成精度难以保障、批产一致性不足等瓶颈，难以满足高端装备对气浮部件快速迭代、高可靠、低成本的工程需求。</p> <p>在此背景下，面向超精密高端装备对高精度平面气浮零部件的迫切需求，开展陶瓷/石墨导轨、气浮垫快速集成制造技术研究，突破材料选型、成型、超精密加工与模块化快速装配等关键环节，建立高效、高精度、高一致性的集成制造体系，对提升我国超精密核心功能部件自主保障能力、支撑高端装备高质量发展具有重要理论价值与工程意义。</p> |  |      |                   |
| <p>二、研究现状：</p>  |  |      |                   |

面向超精密高端装备对高精度平面类气浮零部件的迫切需求，我国在陶瓷/石墨材质导轨、气浮垫的快速集成制造技术研究领域起步较晚与国际巨头仍存在不小的差距。以下从材料应用现状、制造技术现状和产业格局现状三个维度阐述目前我国在陶瓷/石墨材质导轨、气浮垫的快速集成制造技术研究领域的现状。

### 一、材料应用现状：陶瓷/石墨成为高端气浮部件优选，但性能匹配性仍需突破

超精密气浮零部件对材料的热稳定性、刚性与摩擦学性能提出严苛要求，传统金属材料因热膨胀系数高（如钢类 $\alpha \approx 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、温漂显著，已难以满足纳米级定位需求。陶瓷与石墨凭借独特优势成为主流选择：陶瓷材料（如堇青石、碳化硅）兼具超低膨胀系数（ $\alpha \leq 1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、高比刚度与耐磨特性，石墨则具备优良自润滑性与气体渗透性，二者均能有效降低气浮运动中的振动与热变形风险。目前，国际高端产品已实现陶瓷/石墨材质的规模化应用，如德国 PI 公司的 NanoCube 系列平台采用超低膨胀陶瓷导轨，实现 $\pm 0.5\text{nm}$  重复定位精度；日本 THK 的 AeroGuidePro 系列通过陶瓷-石墨复合结构，实现  $300\text{mm/s}$  速度下直线度误差 $< 20\text{nm}/100\text{mm}$ ；美国 NewWay 介孔气浮石墨其 VPL 90 型号在  $5\mu\text{m}$  膜厚下刚度可达  $43\text{N}/\mu\text{m}$ ，这种高刚度和无摩擦的特性，使其能实现亚微米级的同步误差运动和纳米级的异步误差。国内在材料选型上已完成基础探索，清华大学、哈工大等科研机构验证了堇青石陶瓷、高纯石墨在气浮部件中的适用性，但存在核心瓶颈：一是材料一致性控制不足，原料粒度分布、烧结致密化均匀性差，导致大尺寸部件（ $> 500\text{mm}$ ）性能离散度高，批产良率不足；二是材料-结构适配性欠缺，陶瓷硬脆特性与气浮垫多孔节流结构的加工兼容性、石墨孔隙率与气膜稳定性的匹配关系尚未完全厘清，制约了部件综合性能提升。

### 二、制造技术现状：精密加工与集成工艺逐步发展，但快速化、规模化瓶颈突出

#### ■ 成型与烧结技术

国际上已形成近净成型+精准烧结的成熟路线：采用注射成型（CIM）、冷等静压（CIP）技术实现复杂结构坯体成型，结合热压/热等静压（HP/HIP）烧结，保障陶瓷部件相对密度 $\geq 98\%$  与尺寸精度控制；石墨部件则通过等静压成型与高温石墨化处理，优化孔隙结构均匀性。国内在实验室层面已掌握基础成型工艺，但工程化应用存在明显短板：大尺寸坯体成型密度分布不均，烧结温场控制精度低（炉内温差 $> \pm 10^{\circ}\text{C}$ ），导致部件收缩变形率超  $0.5\%$ ，需依赖后续加工矫正，延长生产周期；且缺乏针对陶瓷/石墨气浮部件的烧结工艺参数体系，难以兼顾结构复杂度与成型效率。

#### ■ 超精密加工技术

硬脆材料加工是核心技术难题。国际上采用“金刚石超精磨 + 磁流变抛光 + 离子束修形”组合工艺，实现陶瓷导轨面型精度 $\leq \lambda/20$ 、表面粗糙度  $Ra \leq 1\text{nm}$ ，石墨气浮垫节流孔加工精度达 $\pm 1\mu\text{m}$ 。国内虽已突破单工序超精密加工技术，但存在三大问题：一是加工效率与精度矛盾突出，传统磨削材料去除率低，高效加工易产生亚表面裂纹、崩边等缺陷，表面质量难以保障；二是集成化加工能力不足，气浮导轨的导轨面、安装基准面、气路通道等多特征需多次装夹加工，定位误差累积导致集成精度下降；三是缺乏快速响应的工艺优化手段，针对不同结构部件的加工参数

依赖经验迭代，试制周期长达数周。

■ 集成与检测技术

国际领先企业已建立加工-装配-检测一体化体系：通过模块化设计实现导轨与气浮垫的快速装配，采用激光干涉仪、非接触式三坐标测量机进行全尺寸精度检测，结合数字孪生技术模拟气膜动态特性，保障集成后部件的运动稳定性。国内集成技术仍处于分散化阶段：装配过程依赖人工调整，一致性差；检测手段侧重单一尺寸精度测量，缺乏对气膜刚度、动态稳定性等关键性能的一体化检测能力，且检测数据与工艺优化的闭环联动机制尚未建立，难以支撑批量生产的质量管控。

三、产业格局现状：国际垄断格局未破，国产替代面临从样品到批产的鸿沟

全球高端气浮零部件市场高度集中，德国 PI、日本 THK/IKO、美国 NewWay 等企业占据 80%以上的高端市场份额，其产品已实现重复定位精度  $\pm 0.5\text{-}1.2\text{nm}$ 、热漂移 $\leq 0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ 的工程化应用，广泛配套 EUV 光刻机、空间望远镜等尖端装备。这些企业通过长期技术积累，构建了覆盖材料配方、核心工艺、控制算法的全链条专利壁垒，形成技术垄断优势。

国内产业仍处于追赶阶段：科研机构在气膜动力学建模、单部件精密加工等方面取得阶段性成果（如哈工大实现气膜刚度理论提升 32%），但科研成果工程化率不足；企业层面仅能实现 $\pm 10\sim 50\text{nm}$ 级中端产品的小批量交付，高端产品进口依赖度高达 80%，单套采购成本达 120~300 万美元，且受出口管制制约日益加剧。核心差距体现在：一是批量生产稳定性不足，实验室样品性能达标，但产线级生产因材料一致性、工艺稳定性控制欠缺，良率难以提升；二是缺乏全流程协同创新体系，材料研发、工艺设计与装备需求脱节，难以快速响应高端装备的定制化需求；三是基础工业支撑薄弱，专用加工设备、高精度检测仪器等仍依赖进口，制约了集成制造技术的自主突破。

综上，当前陶瓷/石墨材质气浮零部件制造技术已取得一定进展，但在材料一致性控制、高效精密加工、模块化快速集成、批量质量管控等方面仍存在显著技术缺口，难以满足超精密高端装备对零部件 高精度、快交付、高可靠、低成本的迫切需求，开展快速集成制造技术研究具有明确的现实必要性与技术紧迫性。

三、关键性问题或技术：

面向超精密高端装备对高精度平面类气浮零部件的需求，陶瓷/石墨材质导轨、气浮垫快速集成制造技术的研究，其核心挑战在于攻克材料选型与性能匹配、轻量化/复杂结构成型与一致性控制、以及超精密加工表面完整性控制三大关键技术瓶颈。这些关键问题相互交织，构成了从材料设计到部件制造的全链条技术体系。

一、材料选型与性能匹配

陶瓷（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ ）：高硬度、高模量、低热膨胀、耐磨、绝缘，但脆性大、难加工、烧结收缩大、内部易存孔隙 / 应力。石墨（多孔介质石墨）：自润滑、低热膨胀、易加工、成本低，

但强度低、易掉粉、气密性差。

陶瓷/石墨材质导轨、气浮垫的孔隙率、孔径及连通性与气浮膜刚度、承载能力、流量特性的多场耦合关系，如何建立精准的孔隙结构-气浮性能映射模型，实现多孔节流功能的定向设计与精准制造。

**二、轻量化/复杂结构的成型与一致性控制**

轻量化/复杂结构（微流道、均压槽）陶瓷/石墨坯体的近净成型均匀性控制机制，如何抑制成型过程中的密度波动与缺陷生成，实现烧结收缩率波动（ $<\pm 0.5\%$ ）的精准预补偿；

快速烧结过程中温度场-应力场-组织场的耦合演化规律，如何通过烧结工艺优化抑制晶粒异常长大与烧结变形（平面度/直线度  $< 0.3\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$ ），兼顾快速制造需求；

**三、超精密加工表面完整性控制**

陶瓷（高硬脆性）/石墨（低强度多孔）的超精密加工表面形成机理，如何解决加工过程中的崩边、微裂纹、亚表面损伤问题，实现纳米级表面粗糙度（ $R_a\ \text{nm}$ ）与微米级形位公差的高效协同控制，建立加工参数-表面质量-气膜稳定性的关联模型。

**四、预期目标：**

基于超精密高端装备对陶瓷/石墨材质气浮零部件的高精度、快速集成需求，结合行业技术瓶颈与突破方向，预期目标主要为：

聚焦轻量化/复杂结构陶瓷导轨快速集成制造技术开展系统性研究，重点攻克陶瓷材料精密成型、高精度加工、气浮结构一体化制备及装配集成等关键技术瓶颈，建立适配工程化应用的陶瓷导轨快速制造与质量控制体系。通过突破陶瓷材料改性、近净成形、高效精密磨削、气浮面形精度保障及导轨—气浮单元快速装配调试等核心难题，实现陶瓷导轨高平面度、高直线度、高刚度与高稳定性的协同提升，显著缩短研制周期、降低制造成本。最终形成具有自主知识产权的陶瓷导轨快速集成制造工艺与装备能力，满足超精密运动平台对纳米级定位精度、微米级形位公差及长期服役可靠性的要求，为高端光刻机、精密检测仪器、超精密加工装备等核心领域提供关键零部件技术支撑，推动我国超精密气浮零部件国产化替代与技术水平跃升。

聚焦超精密高端装备对高精度平面类石墨气浮垫的核心需求，以石墨材质气浮垫快速集成制造技术为核心，针对石墨材料多孔特性、气浮结构精细化成型、集成工艺效率与精度协同等关键技术瓶颈，建立石墨气浮垫材料改性-成形-精密修整-气路集成-性能标定一体化快速制造体系，突破石墨孔隙精准调控与气浮性能协调等核心技术，实现气浮垫关键性能与制造效率的双重提升。最终使石墨气浮垫的气膜厚度均匀性误差 $\leq 1\ \mu\text{m}$ ，静态刚度提升至  $100\text{N}/\mu\text{m}$  以上，形成具备自主知识产权的快速集成制造工艺规范与质量检测标准，满足超精密运动平台对低摩擦、高稳定性、长寿命气浮支撑的严苛要求，为半导体装备、超精密测量仪器、高端数控机床等领域提供高性能石墨气浮垫国产化解决方案，助力我国超精密气浮零部件制造技术摆脱进口依赖，实现技术自主可控与产业升级。

| 项 目 负 责 人 项 目 经 历          |                                    |   |          |
|----------------------------|------------------------------------|---|----------|
| 起止时间                       | 项目名称                               | 主要内容  |          |
| 2023. 06. 08-2024. 06. 30  | 晶圆减薄金刚石砂轮磨块材料溶胶凝胶法制备技术开发           | 开展晶圆减薄金刚石砂轮磨块材料凝胶法制备技术开发工作，实现晶圆减薄金刚石砂轮磨块材料的溶胶凝胶法制备，研究不同干燥方式对其干燥的影响并开展烧结制度的研究  |          |
| 2023. 08. 01-2024. 02. 01  | 米级半封闭轻量化碳化硅反射镜坯体制备技术研究与D1200 反射镜研制 | 开发一种米级半封闭轻量化碳化硅陶瓷反射镜制备技术，并按图纸研制 D1200 碳化硅陶瓷反射镜材料坯体  |          |
| 2024. 4-2024. 7            | SiC 非球面材料批量化制备技术研究与若干镜坯研制          | 针对性地开展基于间接 3d 打印技术和机械加工技术的碳化硅陶瓷批量化成型技术研究，完成若干轻量化碳化硅反射镜毛坯材料的制作和交付。   |          |
| 2024. 7. 8-2024. 10. 31    | 超轻小相机 SiC 结构件研制                    | 根据甲方图纸研制超轻小相机 SiC 结构件若干套  |          |
| 2024. 10. 14-2024. 12. 15  | SiC 陶瓷反应连接技术研究与若干 SiC 反射镜材料研制      | 开发一种轻量化 SiC 陶瓷反应连接制备技术，并完成轻量化 SiC 陶瓷反射镜材料的研制  |          |
| 2025. 11. 07-2026. 12. 31  | 大口径光电集成检测系统 SiC 反射镜坯体制作            | 完成平面镜装置中平面反射镜坯体和平行光管主镜、次镜、平面镜坯体的研制。   |          |
| 2025. 11-2026. 5           | 车载光学望远镜系统                          | 针对大尺寸主镜,重点突破了近净尺寸成型技术，以实现其轻量化与高形面精度;针对小尺寸次镜，则深入优化“冷等静压成型—机械加工轻量化结构”这一技术路线。基于上述工艺研究，完成两套Φ1.2 米级轻量化碳化硅反射镜坯体及两套Φ200mm 级碳化硅次镜坯体的研制工作，所有产品均严格符合设计图纸要求并预留加工余量 |          |
| 工 作 计 划 安 排（2026.7-2028.4） |                                    |   |          |
| 序号                         | 起止时间                               | 阶段内容  | 工作量估计（天） |
| 1                          | 2026.08-2027.02                    | 气浮用陶瓷/石墨材料导轨、气浮垫原料配方设计与原料改性   | 180      |
| 2                          | 2027.02-2027.08                    | 气浮用陶瓷/石墨材料导轨、气浮垫轻量化/复杂结构一体化成型技术的研究  | 180      |

|   |                 |                                   |     |
|---|-----------------|-----------------------------------|-----|
| 3 | 2027.08-2028.02 | 气浮用陶瓷/石墨材料导轨、气浮垫轻量化/复杂结构性能一致化的研究  | 180 |
| 4 | 2028.02-2028.04 | 陶瓷（高硬脆性）/石墨（低强度多孔）的超精密加工表面形成机理的研究 | 60  |