

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-08

联 培 项 目 名 称： 光学级近零膨胀堇青石陶瓷制备
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

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-08	项目名称	光学级近零膨胀堇青石陶瓷制备技术研究
联培课题方向	面向超精密高端装备对高稳定性特种材料的迫切需求，本课题拟开展光学级近零膨胀堇青石陶瓷制备技术与应用研究，重点攻关粉体的可控合成与改性、块体材料的精密制备及其高精度抛光性能研究，旨在建立一套从材料源头设计到超光滑表面实现的完整技术体系。		
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

一、项目背景：

随着超精密高端装备制造技术的飞速发展，尤其是在极紫外光刻（EUVL）、空间遥感和高精度测量仪器等领域，对关键结构部件的尺寸稳定性提出了近乎严苛的要求。温度波动引发的热变形已成为制约光学系统成像精度和设备运行可靠性的核心瓶颈之一。因此，开发兼具超低热膨胀系数、高力学性能和优异加工特性的先进陶瓷材料，已成为满足下一代高端装备需求的关键科学命题。堇青石凭借其独特的本征低热膨胀特性、良好的热稳定性和轻量化优势，在这一背景下脱颖而出，成为极具潜力的候选材料。

堇青石（ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ）是自然界与人工合成体系中少数具有本征低热膨胀特性的硅酸盐陶瓷，其六方晶系的层状链状晶体结构赋予其独特的热膨胀行为：沿晶轴呈现各向异性热膨胀，部分方向表现为负热膨胀，宏观整体可实现极低甚至近零的平均热膨胀系数。室温至800/1000℃范围内，高纯致密堇青石的热膨胀系数可低至 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，经组分与显微结构精准调控后，室温附近可实现 $0 \pm 20 \text{ ppb}/^\circ\text{C}$ 的近零膨胀水平，远优于氧化铝、莫来石、氧化锆等传统结构陶瓷，与 ULE、Zerodur 等低热膨胀玻璃相当，同时具备更高的弹性模量、比刚度、化学稳定性与耐高温性，成为极端精度与极端温度场景下的首选候选材料。

在半导体与光刻装备领域，7nm 及以下先进制程 EUV 光刻对工件台、反射镜、基准板的尺寸稳定性要求达到纳米级，温度波动仅 0.01°C 即可引发图案套刻偏移，而堇青石的近零膨胀与高

导热特性可显著抑制热变形，是突破光刻机精度瓶颈的关键核心材料。在航空航天与空间光学领域，大口径反射镜、遥感器、空间相机在轨道温度剧烈交变环境下必须保持面型精度与结构稳定，堇青石低密度、高刚性、超低膨胀的组合优势可实现轻量化与高稳定性协同。

当前，低热膨胀堇青石陶瓷已实现规模化工业应用，但面向超低膨胀 ($\leq 1.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)、近零膨胀、高致密度、高强度、高均匀性、高一致性的高端需求，仍存在一系列关键科学与技术难题：堇青石相生成温区窄、易伴生莫来石、玻璃相等杂相，导致热膨胀系数偏高且波动大；晶体各向异性易引发微裂纹与内应力，降低强度与可靠性；低膨胀与高致密度、高强度之间存在固有矛盾；烧结工艺窗口窄、组分敏感、批间稳定性差；高端高纯低膨胀堇青石长期依赖进口，成为我国高端装备自主可控的卡脖子材料环节。

在此背景下，开展超低膨胀系数堇青石陶瓷的基础理论、组分设计、显微结构调控、低缺陷烧结工艺与性能优化研究，系统揭示晶体结构、相组成、晶粒取向、致密度、界面状态与热膨胀行为的内在关联，突破杂相抑制、微裂纹控制、近零膨胀精准调控、高强高稳协同制备等关键技术，开发出热膨胀系数可控、性能稳定、适合高端应用的超低膨胀堇青石材料与构件，对提升我国高端陶瓷材料自主化水平、支撑半导体、航空航天、先进制造等领域的技术突破与产业升级，具有重要的科学价值与迫切的工程意义。

二、研究现状：

当前，致密超低膨胀堇青石陶瓷已成为高端装备的关键核心材料：在半导体光刻领域，其近零膨胀特性可抑制 0.01°C 温度波动引发的纳米级变形，成为 ASML 等光刻机工件台、方镜的首选材料，日本京瓷通过晶相定向生长与精准配比调控，实现产品垄断性供应；在太阳能发电领域，作为吸热器、输热管道材料，其低膨胀与耐高温特性可延长设备使用寿命，降低维护成本；在航空航天领域，轻量化与高尺寸稳定性的组合优势，使其成为大口径反射镜、遥感器的理想候选材料。而目前致密超低膨胀系数堇青石陶瓷的研究正呈现出从可控制备向近零膨胀与高致密协同优化深入发展的趋势。研究的核心聚焦于如何在获得致密微观结构的同时，将热膨胀系数调控至接近零的水平，以满足光刻机、空间光学等尖端领域对材料尺寸稳定性的极致要求。这一目标的实现，依赖于组分设计与热膨胀系数精准调控研究、致密化制备工艺优化研究、关键性能协同优化研究和。

■ 组分设计与热膨胀系数精准调控研究

致密超低膨胀堇青石陶瓷的核心性能突破依赖组分与晶体结构的精准调控，当前研究主要聚焦于纯相优化、掺杂改性与复相协同三大方向。在纯相调控方面，通过精准控制 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三元体系配比，抑制莫来石、玻璃相等杂相生成，可使堇青石主相含量提升至 94% 以上，室温至 1000°C 热膨胀系数降至 $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 左右。掺杂改性是实现近零膨胀的关键技术路径，稀土元素掺杂尤为典型： La^{3+} 掺杂通过取代堇青石结构中 Mg^{2+} 引发六元环畸变，同时促进液相烧结致密化，当

La³⁺掺杂后，材料在 (22.0±0.5)°C下热膨胀系数绝对值≤0.02×10⁻⁶/K，弯曲强度达约 200 MPa，满足光刻机方镜材料要求；ZrO₂基添加剂（如锆英石）不仅能拓宽烧结窗口至 50~60°C，其相变增韧效应还可同步提升抗热震性与耐腐蚀性。复相改性则通过引入碳化硅、氮化硅等第二相，构建堇青石基复合体系，在保留超低膨胀特性的同时，弥补单一堇青石力学性能不足，适配太阳能发电、航空航天等极端工况需求。

■ 致密化制备工艺优化研究

堇青石陶瓷烧结窗口窄（仅 30°C左右）、易产生孔隙与微裂纹，是制约其致密化的核心瓶颈，当前研究围绕工艺创新与参数优化形成系列突破。在烧结工艺方面，二步煅烧法已成为主流技术，通过 低温预烧—高温致密化分段调控，结合保温时间优化(6~10h),可使材料体积密度提升至 2.08 g/cm³，显气孔率降至 6.5% 以下，显著促进堇青石相充分生成；溶胶-凝胶法凭借分子级混合优势，可制备高纯超细粉体，为致密化与低膨胀调控奠定基础，已成功用于光刻机用近零膨胀堇青石陶瓷制备。此外，真空烧结、气氛烧结等技术通过精准控制炉内环境（温控精度 ±0.1°C），减少烧结过程中的组分挥发与氧化，有效抑制杂相形成；晶种诱导技术通过添加高纯度堇青石细粉作为晶核，降低烧结峰值温度，提升晶粒生长均匀性，进一步优化致密化效果与热稳定性。

■ 关键性能协同优化研究

致密超低膨胀堇青石陶瓷的应用核心在于低膨胀、高致密、高强度的协同实现。热膨胀性能方面，通过晶粒细化与取向调控，可利用堇青石晶体各向异性特征，实现不同温度区间的膨胀系数精准匹配，室温附近已达成 0±20 ppb/K 的近零膨胀水平，与 ULE、Zerodur 等低热膨胀玻璃相当。致密化与力学性能协同方面，当致密度≥98% 时，材料弯曲强度可稳定在 200 MPa 以上，弹性模量达 140 GPa 以上，满足精密结构件的力学要求；但低膨胀与高强度之间的固有矛盾仍未完全解决，过度追求近零膨胀易导致晶体结构应力累积，引发微裂纹，需通过界面改性、相变增韧等手段平衡二者关系。在极端环境适应性方面，堇青石陶瓷已被证实具备优异的抗热震性（分解温度达 1460°C）与化学稳定性，在 25~1000°C温度范围内可保持性能稳定，为高温工业、太阳能发电等领域应用提供支撑。

尽管目前致密低膨胀系数堇青石的研究取得显著进展，但产业化仍面临三大核心瓶颈：一是近零膨胀精准调控技术不足，国内实验室样品虽能接近海外指标，但批量生产中膨胀系数波动大，良品率偏低，难以满足光刻机近零膨胀和低波动要求；二是高致密化与精密加工协同难题，国内烧结设备温控精度、超精密加工工艺（如 CMP）尚未匹配堇青石硬脆特性，制约纳米级面型精度实现；三是供应链协同验证壁垒，海外形成材料-设备一体化设计闭环，国内材料研发与整机需求脱节，缺乏长期可靠性验证数据，高端产品长期依赖进口。

三、关键性问题或技术：

致密超低膨胀系数堇青石陶瓷的关键性问题，核心在于如何在获得高致密度微观结构的同时，

将热膨胀系数精准调控至接近零的水平，并确保其力学性能和可加工性满足光刻机、空间光学等尖端装备的苛刻要求。当前研究主要面临以下三大核心挑战。

关键问题 1：α-堇青石晶相纯度与热膨胀各向异性协同调控机制

α-堇青石的超低膨胀特性源于其六方/斜方晶系的本征各向异性抵消效应，而晶相纯度是该效应实现的核心前提。如何通过原料配比精准锁定（MgO-Al₂O₃-SiO₂三元体系摩尔比）、杂质相（莫来石、方石英、残余石英等）抑制机制优化，以及掺杂元素（Ti⁴⁺、Zr⁴⁺、La³⁺等）的晶界/晶格作用调控，实现α-堇青石晶相纯度≥94%，并通过晶相取向与各向异性协同匹配，将 25-800℃线膨胀系数稳定控制在≤1.6×10⁻⁶/℃，室温线膨胀系数稳定控制在≤2×10⁻⁸/℃是解决膨胀系数波动与稳定性不足的核心科学问题。

关键问题 2：窄烧结窗口下致密化与低膨胀的热力学耦合机制

堇青石稳定烧结温区仅 40℃（1380-1420℃），存在致密化提升依赖高温/液相烧结→玻璃相增多/晶相分解→膨胀系数上升的热力学矛盾。如何揭示烧结过程中晶核形成-晶粒生长-孔隙演化-玻璃相生成的多尺度耦合规律，阐明压力辅助烧结热压与活化烧结助剂（MgF₂、Y₂O₃等）对烧结温度的降低机制，在避免晶相分解与玻璃相过量生成的前提下，实现相对密度≥98% 的近全致密化，建立低温致密-低膨胀-高力学性能的协同调控理论，是突破工艺瓶颈的关键。

关键问题 3：微结构均匀性主导的性能一致性调控原理

原料粒径级配、成型密度分布、烧结温场均匀性等因素易导致堇青石陶瓷出现晶粒尺寸不均、气孔/玻璃相偏聚、局部应力集中等微结构缺陷，进而引发膨胀系数离散、热震开裂等问题。如何建立粉体特性-成型工艺-烧结微结构-宏观性能的构效关系，揭示微结构均匀性对热膨胀各向异性抵消效应的影响规律，通过二元/三元粒径级配优化、冷等静压成型工艺改进、温场精准控制等手段，实现晶粒尺寸（2-5μm）、玻璃相分布（孤立岛状，含量≤5%）的精准调控，解决同批次性能离散度大的难题，为高精度领域应用提供理论支撑。

四、预期目标：

本研究面向半导体光刻机、大口径天文与空间光学反射镜等高端装备对超稳尺寸结构件的迫切需求，围绕致密超低膨胀系数堇青石陶瓷开展系统性研究。预期突破高纯α-堇青石相调控、近全致密化烧结与微结构均匀化等关键问题，制备出兼具高致密度、超低热膨胀系数、高尺寸稳定性与优良力学性能的堇青石陶瓷材料。通过材料-结构-工艺-性能的多目标协同优化，实现热膨胀系数、热稳定性、力学强度与加工精度的综合提升，满足高端装备在复杂温度场与极端工况下长期服役的尺寸稳定性要求，为我国高端制造与先进光学装备核心结构件的自主可控提供关键材料支撑与技术基础。这一目标具体体现在以下三个核心维度：

一、材料本征性能的极致化追求

研究的首要目标是获得热膨胀系数接近零、力学性能优异的致密堇青石陶瓷材料。在热物理性能方面，目标将室温（22±0.5℃）热膨胀系数的绝对值控制在 $\leq 0.020 \times 10^{-6}/K$ 以内，达到国际领先产品（如京瓷 CO720 保证的 0±20 ppb/K）同等水平。与此同时，通过离子掺杂（如 La³⁺）与微观结构调控，实现力学性能的协同优化——抗弯强度 ≥ 180 MPa、弹性模量 ≥ 140 GPa，以满足结构部件对高刚性和抗变形能力的严苛要求。致密度方面，目标相对密度 $\geq 99.5\%$ ，确保材料内部无孔隙、微裂纹等缺陷，为后续超精密加工奠定基础。

二、部件成型与轻量化能力

针对高端装备对结构轻量化和复杂形状的迫切需求，预期目标是突破大尺寸、复杂结构部件的成型与烧结技术。具体而言，应具备制备单体尺寸 $\geq \Phi 300$ mm 光学镜坯的能力，并实现最薄处 ≤ 2 mm 的轻量化肋状结构设计。通过与现有低热膨胀玻璃相比，堇青石的比刚度可提升 1.5 至 2 倍，结合高刚性肋状结构设计，有望实现减重 70% 的轻量化效果。

三、光学加工与表面完整性控制

实现原子级超光滑表面是光学应用的最终门槛。预期目标是通过离子束抛光（IBF）、磁流变抛光（MRF）等先进技术，获得表面粗糙度 Sa ≤ 1 nm 的超光滑表面，且加工后表面/亚表面无微裂纹、无晶界损伤。对于空间光学应用，还需验证材料在伽马射线、原子氧辐照环境下机械、热学和光学性能的长期稳定性。最终，实现从单一反射镜部件到无热化光学系统（整个结构由相同材料制成）的集成制造能力。

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	2026.08-2026.11	高纯度堇青石陶瓷前驱粉的制备	90
2	2026.11-2027.01	高纯致密化堇青石陶瓷烧结的研究	90
3	2027.01-2027.08	超低热膨胀系数致密化堇青石陶瓷的制备	180
4	2027.08-2027.11	超低热膨胀系数致密化堇青石陶瓷高抛光性的研究	90
5	2027.11-2028.04	大尺寸、复杂结构超低热膨胀系数致密化堇青石陶瓷部件的成型与烧结技术的研究	180