

引文格式: 王岩, 陈曦, 彭帅国, 等. 材料设计优化热压注成形陶瓷型芯综合性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(10): 25010166.  
WANG Yan, CHEN Xi, PENG Shuaiguo, et al. Progress in optimizing comprehensive performance of hot-press injection molded ceramic cores through material design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(10): 25010166.

# 材料设计优化热压注成形陶瓷型芯综合性能研究进展

王岩<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 彭帅国<sup>2</sup>, 张耀中<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240;  
2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 北京 100015)

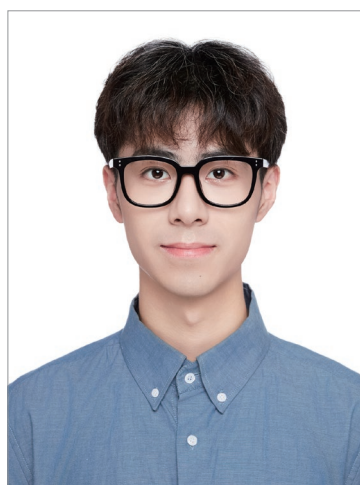
**[摘要]** 为满足高推重比发动机对涡轮叶片的苛刻要求, 获得高精度与高可靠性的陶瓷型芯是制备空心叶片的关键。针对热压注成形制备陶瓷型芯存在的收缩率高、气孔率与力学性能难平衡等问题, 对 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 及 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷型芯的相关研究进行综述。聚焦优化原料颗粒级配、调控矿化剂种类、引入高性能纤维及添加第二相材料等材料设计方法, 探讨其对陶瓷型芯的收缩率、气孔率、室温/高温强度及热变形量等关键性能的影响规律和内在机理。不同材料体系对同一性能优化策略的响应程度存在显著差异, 性能提升机理也不尽相同。通过对比不同材料体系与优化路径间的共性与特性, 旨在为未来高性能陶瓷型芯的理性设计与工艺优化提供理论依据与技术参考。

**关键词:** 涡轮叶片; 熔模铸造; 热压注成形; 陶瓷型芯; 颗粒级配; 矿化剂; 纤维增强

中图分类号: V232; TQ174

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010166



王岩

博士研究生, 研究方向为高性能陶瓷结构先进制造技术。

随着航空航天工业的飞速发展, 对航空发动机的推重比、燃油效率及可靠性提出了日益苛刻的要求。热端部件作为发动机的“心脏”, 特别是高压涡轮叶片, 其性能直接决定了发动机的整体效能。在高温燃气环境中, 涡轮叶片承受着极端的热负荷与机械负荷。当前, 先进单晶高温合金叶片材料的耐温能力已逐渐接近其物理极限<sup>[1-2]</sup>。为了突破这一瓶颈, 业界普遍采用主动冷却技术, 即通过设计具有极其复杂内部空腔结构的叶片, 使冷却介质在叶片内部流通, 综合利用对流换热、冲击冷却、气膜冷却等多种方式对叶片进行高效散

热, 从而将叶片基体温度控制在材料安全范围内, 避免发生熔化、蠕变、氧化或热腐蚀等失效行为<sup>[3-5]</sup>。这种“镂空”结构设计使涡轮叶片能够在远超其材料熔点的燃气温度下稳定工作, 是现役及在研高推重比发动机不可或缺的关键技术。熔模铸造法因具备成形复杂、薄壁、精密构件的独特优势, 成为制备含内部冷却通道的空心涡轮叶片的主流制造方法<sup>[6-7]</sup>。在该制造方法中, 陶瓷型芯在铸造型壳中充当形成叶片复杂内部空腔结构的模具或转接体。因此, 陶瓷型芯的尺寸精度、结构完整性与表面质量, 直接传递到最终铸件上, 是保证

收稿日期: 2025-11-13; 退修日期: 2025-12-18; 录用日期: 2025-12-26

基金项目: 新材料重大专项(2025ZD0609300)

通信作者: 张耀中, 副教授, 博士, 研究方向为陶瓷/合金复合结构先进制造技术。

李飞, 教授, 博士, 研究方向为高温合金精密铸造技术及其在航空航天领域的应用。

涡轮叶片冷却效率与结构可靠性的基石<sup>[8-9]</sup>。陶瓷型芯自身的性能,如高温强度、抗蠕变性、热化学稳定性及脱芯性能,成为决定熔模铸造成败与叶片质量的关键因素<sup>[10-12]</sup>。在陶瓷型芯的多种成形工艺中,热压注成形法因其成形效率高、能够复制复杂精细结构而占据主导地位。该工艺将陶瓷粉体与有机增塑剂在加热状态下混合制成料浆,在压力下注入模具,冷却定型后获得生坯,再经过高温烧结得到陶瓷型芯<sup>[13]</sup>。尽管热压注成形法具有显著优势,但其制备的陶瓷型芯在实际应用中仍面临一系列严峻挑战:首先,在烧结过程中,有机物的排出和陶瓷颗粒的重排致密化会导致型芯发生显著收缩,若收缩控制不当,将直接影响型芯的尺寸精度;其次,为满足后续脱芯工艺要求,型芯须具备一定的孔隙率,但这与追求高强度相矛盾,过高的孔隙率会导致型芯的室温强度(便于搬运和制壳)和高温强度(抵抗金属液冲刷和热应力)不足,在铸造过程中易发生断裂或变形<sup>[8,14]</sup>。

针对上述挑战,本文旨在系统梳理和评述近年来航空涡轮叶片用陶瓷型芯材料的研究进展,总结调控原料颗粒级配,添加矿化剂、高强纤维和第二相材料等方法对陶瓷型芯性能的影响规律,深入揭示其内在的物理与化学机理。最后,对提升陶瓷型芯性能的有效策略进行总结与展望,以期对未来高性能、高精度陶瓷型芯的制备与开发提供理论依据,综述的内容框架如图1所示。

## 1 陶瓷型芯的性能要求与材料体系

熔模铸造的工艺特性对陶瓷型芯材料提出了极为严苛的性能要求,理想的陶瓷型芯材料需同时满足以下特性<sup>[15-17]</sup>。

(1) 优异的热稳定性: 具备较低的热膨胀系数和优良的抗热震性,以

承受合金浇注时产生的剧烈热冲击,确保在巨大温差下不发生开裂或变形,维持叶片结构尺寸的精确性。

(2) 良好的热化学稳定性: 在高温下不得与熔融合金发生相互溶解或显著的化学反应,以避免在铸件表面产生污染、雀斑等冶金缺陷。

(3) 较高的高温强度与抗蠕变性: 在铸造温度及保压过程中,必须保持足够的结构强度和形状稳定性,以抵抗金属液的静压力与冲刷力,防止发生弯曲或断裂。

(4) 适宜的脱芯性能: 铸造完成后,型芯材料应能通过特定的化学溶剂(如碱液、酸液)或物理方法被顺利清除,这通常要求材料具备一定的开口气孔率以保证脱芯通道的畅通。氧化物陶瓷材料普遍具有高熔点、优异的高温稳定性、良好的力学性能和抗热震性,因此成为制备陶瓷型芯的主导材料体系。目前,研究较为广泛的陶瓷型芯材料主要包括SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及MgO,它们各自具有独特的性能优势与应用局限性,这些材料的特点对比如表1所示<sup>[18-23]</sup>。

### 1.1 SiO<sub>2</sub>基陶瓷型芯

SiO<sub>2</sub>基陶瓷型芯是当前应用最广泛、技术最成熟的材料体系,其主要优势在于热膨胀系数极低、烧结窗口宽、室温与高温力学性能良好,且易于通过碱液腐蚀脱除<sup>[18]</sup>。然而, SiO<sub>2</sub>的熔点相对较低(约1723℃),最高使用温度通常被限制在1550℃以下,一旦浇注温度超过1550℃,易与高温合金中的活性元素(如Mg、

Al、C等)发生反应,生成低熔点硅酸盐或释放气体,从而在叶片表面诱发夹杂、气孔等缺陷,限制了其在先进高熔点单晶叶片铸造中的应用<sup>[19]</sup>。

### 1.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯

为满足更高使用温度的需求,具有更高熔点(约2054℃)和更优高温稳定性的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯被广泛研究。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷具有结构稳定、高温强度高、抗蠕变性能出色及与高活性合金反应倾向低等特点,使用温度可达1850℃,非常适用于高性能单晶叶片的铸造<sup>[20]</sup>。然而,较差的脱芯性能限制了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>型芯的应用,因Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>具备较强的化学惰性,导致铝基型芯难以被常规的碱液快速溶解,若采用高温浓碱或氢氟酸等强腐蚀性介质进行脱除,又极易损伤精密铸件,从而导致成品率低和生产成本高昂<sup>[21]</sup>。

### 1.3 MgO基陶瓷型芯

针对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>脱芯困难的问题,探索了其他高熔点氧化物,MgO(熔点2852℃)即为代表之一。MgO仅存在于方镁石一种稳定晶型,热化学稳定性好。其最大优势在于作为碱性氧化物,可溶于弱酸溶液(如柠檬酸、硝酸),脱芯性能优异,对于具有复杂内腔的薄壁叶片铸造潜力巨大。然而,MgO陶瓷的主要缺点是热膨胀系数高、抗热震性能差,在铸造的急热急冷过程中极易因热应力而开裂,严重制约了其工程应用范围<sup>[22]</sup>。

### 1.4 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>是一种性能极其优异的潜

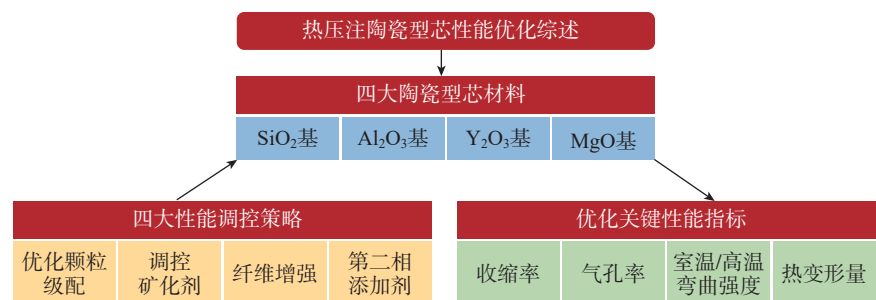


图1 综述内容框架图

Fig.1 Framework diagram of the review

表 1 不同陶瓷型芯材料的特点对比<sup>[18-23]</sup>Table 1 Characteristics of different ceramic core materials<sup>[18-23]</sup>

参数	SiO <sub>2</sub> 基	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	MgO基	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基
最高使用温度/℃	< 1550	1850	>2000	>2000
热膨胀系数	极低	中等	高	中等
抗热震性	优异	良好	差	良好
高温强度	良好	高	中等	极高
热化学稳定性	与活性元素反应	良好	良好	极佳(反应性最低)
脱芯性能	优异(易碱溶)	差(难溶解)	优异(易酸溶)	中等(可酸溶)
原料与制造成本	低	中等	低	极高
主要优势	成本低, 易脱芯, 抗热震性好	高温性能好, 结构稳定	熔点高, 易脱芯	高温性能最优, 化学惰性强
主要劣势	耐温低, 与合金易反应	脱芯极其困难	抗热震性差, 易开裂	成本高昂, 难烧结, 难脱芯

在型芯材料,其熔点高达 2410 ℃,且被证实是与高活性镍基/钛铝合金反应性最低的氧化物之一,具备极佳的热化学惰性。同时,它还具有优异的高温抗蠕变性能和强度<sup>[23]</sup>。然而, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体原料价格昂贵,且烧结致密化所需温度高,这些因素共同导致其制备成本居高不下,目前主要局限于实验室研究和对性能有极端要求的特定领域。此外, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的脱芯性能也比较差,这些都限制了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 型芯的广泛应用。

综上所述, SiO<sub>2</sub> 基、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基、MgO 基与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基 4 类陶瓷型芯材料在性能上各具特点,也分别面临不同的应用限制。SiO<sub>2</sub> 基型芯工艺成熟、成本低、脱芯性能优良,是目前广泛应用的体系,但其高温稳定性不足,难以满足超高熔点合金的铸造要求。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基型芯具有良好的高温强度与热化学稳定性,适用于高性能单晶叶片,但脱芯困难是制约其工程化应用的主要瓶颈。MgO 基型芯脱芯性能优异、原料成本低,但较高的热膨胀系数与较差的抗热震性能使其在铸造过程中易发生开裂。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基型芯展现出最优的高温稳定性与化学惰性,尤其适用于活性合金的铸造,但其高昂的原料成本与较难的烧结工艺限制了规模化应用。

## 2 热压注成形陶瓷型芯材料的研究进展

熔模铸造技术要求陶瓷型芯在确保复杂结构成形精度的同时,必须兼具优异的高温强度、卓越的热稳定性和适宜的气孔率。为满足这一多重目标,热压注成形法因其在成形效率、尺寸控制与工艺稳定性方面的突出优势,已成为制备高性能陶瓷型芯的主导技术。该工艺的性能输出很大程度上取决于原料的精确调控。本节将系统论述通过原料的材料设计提升热压注陶瓷型芯综合性能的最新研究进展,主要讨论原料颗粒级配、不同类型矿化剂的引入、纤维增强策略及第二相添加剂(如造孔剂与功能性粉体)对型芯性能的影响机制。通过对上述四大调控策略的深入剖析,旨在为高性能陶瓷型芯的制备提供系统的理论依据与参考。

### 2.1 调控原料颗粒级配平衡陶瓷型芯的气孔率和力学性能

要满足熔模铸造工艺对陶瓷型芯提出的高强度和高气孔率的矛盾要求,核心在于对陶瓷烧结过程中微观结构演变的精确调控。根据经典的烧结理论,陶瓷粉体的颗粒尺寸分布是决定烧结体微观结构的关键因素。采用单一粒径的粗颗粒粉体时,

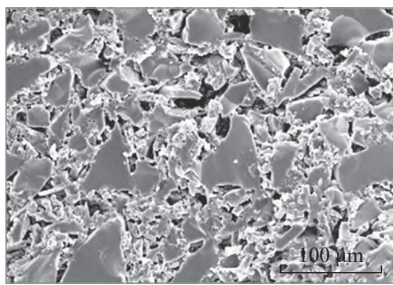
由于烧结驱动力小、原子扩散路径长,易于形成具有高气孔率的开放性骨架结构;然而,这些气孔在受力时易成为应力集中点,导致裂纹萌生与扩展,严重劣化材料的力学性能。反之,若全部采用细颗粒粉体,其高比表面积带来的巨大烧结驱动力将促使材料迅速致密化,虽能获得高强度,但过低的气孔率会使脱芯变得极为困难<sup>[24-25]</sup>。显然,单一粒径的粉体无法满足陶瓷型芯对性能的综合要求。为此,研究者普遍采用颗粒级配策略,即通过将不同尺度的颗粒按优化比例混合,构建“粗颗粒形成骨架、细颗粒填充孔隙”的理想微观结构,以期在保证必要气孔率的同时,最大限度地提升力学性能。例如,牛书鑫等<sup>[26]</sup>的研究便验证了这一策略的有效性,研究以不同粒径的石英粉(粗粉  $D_{50}=33.7\ \mu\text{m}$ ,细粉  $D_{50}=6.8\ \mu\text{m}$ )为原料制备 SiO<sub>2</sub> 陶瓷型芯,发现当细粉添加质量分数为 30% 时,细粉能均匀填充于粗粉颗粒间隙中,如图 2(a)所示;这种级配不仅提高了坯体的堆积密度,增强了力学性能,还因减少了粗颗粒间的直接接触而改善了型芯表面质量,如图 2(b)和(c)所示,最终制备的 SiO<sub>2</sub> 陶瓷型芯实现了气孔率 32.3% 与 1540 ℃ 高温抗弯强度 22.4 MPa 的良好结合。然而,细粉

的引入需控制在合理范围内。陆丽芳等<sup>[27]</sup>的研究便揭示了过量石英细粉的负面影响,随着细粉( $D_{50}=14.85\ \mu\text{m}$ )含量增加, $\text{SiO}_2$ 型芯的玻璃化软化温度显著降低,在浇注过程中生成过量玻璃相,导致热变形量增大,反而损害了型芯的尺寸精度。这说明了级配优化中量的重要性。在此基础上,研究者进一步探索了引入更小尺度颗粒以增强材料性能的潜力。Xu等<sup>[28]</sup>认为,在微米级基体中引入纳米相可带来显著的增强效应,试验在平均粒径 $35\ \mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2$ 原料中添加了质量分数0.6%的 $\text{SiO}_2$ 纳米粉(20 nm),成功地在微观结构中引入了更多方石英微晶,如图2(d)所示,起到了类似“纳米增强相”的作用;该复合结构使型芯在保持27.5%气

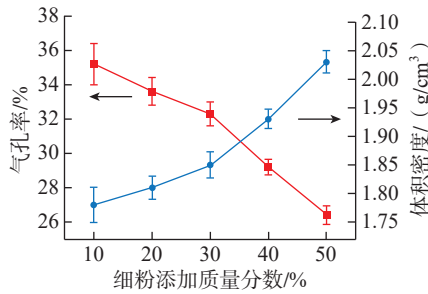
孔率和仅0.6%线收缩率的同时(图2(e)),将 $1540\ ^\circ\text{C}$ 下的抗弯强度大幅提升至28.9 MPa(图2(f))。同样地,颗粒级配的优化原则也成功应用于其他陶瓷体系。覃业霞等<sup>[29]</sup>通过将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉体按细:中:粗=1:2:1的比例混合,获得了高温蠕变量最小的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷型芯。于子豪等<sup>[30]</sup>在研究 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷型芯时发现,在325目粉体基础上,用更细的4500目粉体替代200目粉体进行级配,能使抗弯强度从20.51 MPa提升至22.01 MPa,证明了更细的填充颗粒对力学性能的贡献更为显著。为了更高效、科学地指导级配设计,基于紧密堆积理论模型的数值计算被引入研究。潘正武<sup>[13]</sup>依据Horsfield紧密堆积理论模型,如图2(g)所示,计算了符合异直径球

填充模型的最佳 $\text{MgO}$ 颗粒组合;研究以150目( $106\ \mu\text{m}$ )粉体为骨架,精确配比200目( $75\ \mu\text{m}$ )和400目( $37\ \mu\text{m}$ )粉体作为填充相,最终制备出抗弯强度为8.69 MPa、气孔率为25.87%的 $\text{MgO}$ 陶瓷型芯。该工作为颗粒级配提供了坚实的理论模型,能够显著提升原料设计的效率与科学性。

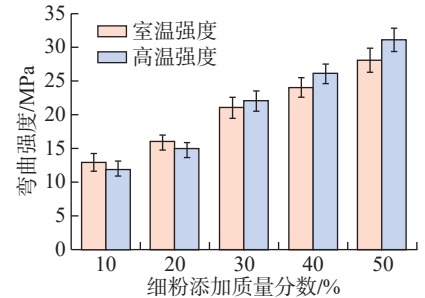
综上,精确调控原料颗粒级配是优化各类陶瓷型芯微观结构与宏观性能的基石。为突破当前经验性优化的局限,未来研究应致力于发展更为精确、普适的颗粒堆积理论模型,并积极结合计算机模拟与人工智能等先进手段,以实现复杂多组分体系烧结行为的精准预测,从而显著提升原料设计的效率与科学性。其次,纳米增强相在硅基陶瓷型芯中展



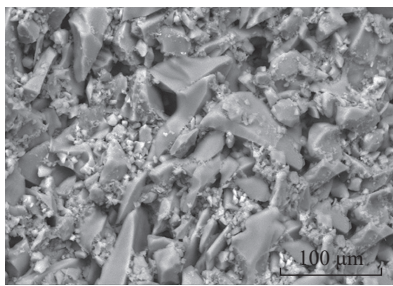
(a) 细粉填充粗粉间隙的 $\text{SiO}_2$ 型芯的微观形貌<sup>[26]</sup>



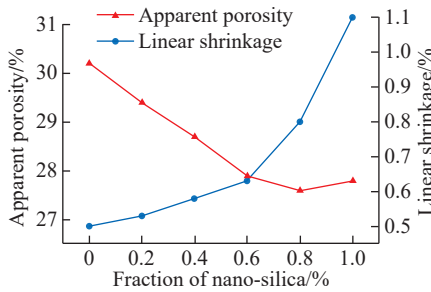
(b)  $\text{SiO}_2$ 型芯的气孔率和体积密度与细粉添加量的关系<sup>[26]</sup>



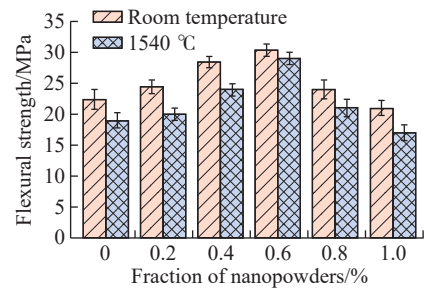
(c)  $\text{SiO}_2$ 型芯的弯曲强度与细粉添加量的关系<sup>[26]</sup>



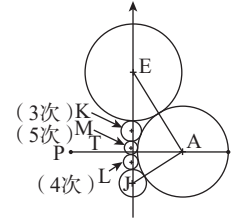
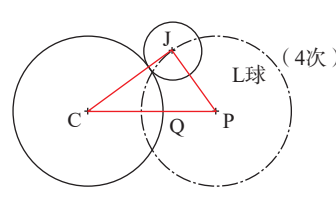
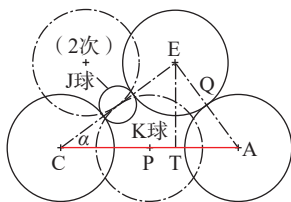
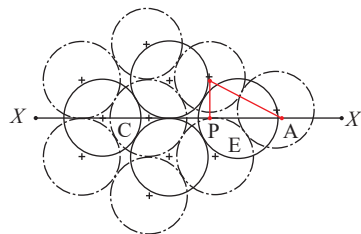
(d) 纳米粉填充微米粉间隙的 $\text{SiO}_2$ 型芯的微观形貌<sup>[28]</sup>



(e)  $\text{SiO}_2$ 型芯的气孔率和线收缩率与纳米粉添加量(质量分数)的关系<sup>[28]</sup>



(f)  $\text{SiO}_2$ 型芯的弯曲强度与纳米粉添加量(质量分数)的关系<sup>[28]</sup>



(g) Horsfield紧密堆积模型图<sup>[13]</sup>

图2 调控原料颗粒级配平衡陶瓷型芯的气孔率和力学性能的相关研究

Fig.2 Research on the porosity and mechanical properties of ceramic cores by regulating the particle size distribution of raw materials

现出了显著的性能提升作用,后续研究可系统评估相应的纳米级细粉在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 及 $\text{MgO}$ 等陶瓷型芯体系中的应用潜力。

## 2.2 调控矿化剂以提升陶瓷型芯的综合性能

矿化剂是在陶瓷烧结过程中引入的一类添加剂,通过物理化学作用显著影响基体材料的烧结动力学、相组成与微观结构,从而实现陶瓷型芯综合性能的精准调控<sup>[31]</sup>。其主要作用机理可归纳为:(1)作为烧结助剂,降低烧结活化能,促进颗粒迁移与基体致密化;(2)形成高黏度液相或第二相,抑制高温下的黏性流动,从而减少收缩与变形;(3)作为增强相,通过钉扎裂纹、桥接颗粒等方式提升力学性能;(4)调控基体材料的结晶行为,包括结晶速率、晶型转变与晶体含量,这对于以玻璃相为主的

$\text{SiO}_2$ 基陶瓷型芯尤为关键<sup>[31-32]</sup>。因此,系统研究矿化剂种类与含量,是优化陶瓷型芯性能的核心途径之一。下文将以研究最为集中的 $\text{SiO}_2$ 基陶瓷型芯为例进行重点综述,并延伸讨论矿化剂在其他陶瓷体系中的应用,该部分讨论的陶瓷型芯的详细性能参数如表2所示。

### 2.2.1 矿化剂对 $\text{SiO}_2$ 基陶瓷型芯性能的影响规律

$\text{SiO}_2$ 基陶瓷型芯的性能与其高温下的析晶行为密切相关。其主相熔融石英在烧结和使用中会析出方石英晶体,这一过程对性能具有双重影响:一方面,高强度的方石英相能提升材料的力学性能和高温抗蠕变能力;另一方面,方石英在冷却过程中伴随体积收缩的 $\alpha$ - $\beta$ 相变易引发微裂纹,从而降低强度<sup>[44]</sup>。因此,矿化剂的核心作用在于调控方石英晶

体的析出动力学与含量,以调控陶瓷型芯的综合性能。例如, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 是最常用的矿化剂之一,但其作用具有复杂性。范红娜等<sup>[33]</sup>对比了不同纯度 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的影响,发现普通 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (纯度>95%)中的碱(土)金属杂质可作为网络修饰体,显著降低 $\text{SiO}_2$ 的结晶活化能,促进方石英析出;而高纯 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (纯度>99.9%)中的 $\text{Al}^{3+}$ 具备较高的电荷密度,能够屏蔽易极化的氧原子阻碍其运动,抑制方石英析晶;因此,添加5%普通 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的型芯获得了收缩率0.63%、气孔率27.5%和室温强度20.2 MPa的良好平衡(图3(a)和(b))。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 在不同的烧结温度对方石英的析晶行为同样具有双重影响,在Pan等<sup>[34]</sup>的研究中,在低温烧结阶段(1160℃), $\text{Al}_2\text{O}_3$ 促进析晶;而在后续高温阶段(1450℃或1550℃), $\text{Al}^{3+}$ 更易取代

表2 调控矿化剂制备的陶瓷型芯性能参数汇总

Table 2 Detail performance parameters of ceramic cores prepared by regulating mineralizers

型芯种类	矿化剂种类及添加质量分数	收缩率/%	显气孔率/%	室温弯曲强度/MPa	高温弯曲强度/MPa	热变形量/mm	参考文献
SiO <sub>2</sub> 基	普通氧化铝 5%	0.63	27.50	20.20	—	0.23 (1540℃)	[33]
	氧化铝(15 μm) 5%	0.33	43.64	~18.50	13.93 (1550℃)	~1.00 (1550℃)	[34]
	电熔莫来石 10%	0.73	30.50	18.90	—	0.30 (1540℃)	[35]
	电熔莫来石 10%	0.83	31.49	12.28	18.17 (—)	0.95 (—)	[36]
	电熔莫来石(19 μm) 10%	0.65	31.80	17.80	—	0.40 (1540℃)	[37]
	碳化硼 0.3%	1.44	25.51	16.32	33.20 MPa (1550℃)	0.19 mm (1550℃)	[38]
	电熔氧化钇 10%	0.83	33.80	20.40	—	—	[39]
	锆英石 24%	<0.03	36.90	—	26~30 (1550℃)	0.15~0.30 (1550℃)	[40]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	硅树脂 20%	0.14	36.50	27.00	—	—	[41]
	液态硅树脂 0.8%	<0.80	28.10~31.10	50.76	—	—	[42]
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	硅树脂 3%	—	21.13	50.77	—	—	[30]
MgO基	石英玻璃粉 30%	2.80	32.90	15.10	8.60 (1550℃)	—	[43]
	碳酸钙粉末 5%	0.97	28.12	24.03	—	—	[13]

Si<sup>4+</sup> 形成稳定的桥氧结构,反而延长成核期,抑制析晶。这一现象表明,若旨在通过高温烧结获得高强型芯,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 并非理想矿化剂。莫来石因其高稳定性与低热膨胀系数受到关注,陈昊等<sup>[35]</sup> 发现杂质少的电熔莫来石既能适度促进方石英析晶,又能抑制陶瓷的高温变形,综合性能最优;而烧结莫来石具有更多的碱(土)金属,会显著促进氧化硅玻璃的析晶,导致陶瓷容易产生裂纹和形变,高温下过多的玻璃相软化也会加剧蠕变。李寒松等<sup>[36]</sup> 的研究进一步表明,质量分数 10% 的电熔莫来石可弥散分布于晶界,既阻碍黏性流动减少收缩,又作为异质形核点加速方石英转化,使型芯高温强度(18.17 MPa)显著优于室温强度(12.28 MPa)。值得注意的是,矿化剂的粒度同样关键。吴笑非等<sup>[37]</sup> 系统研究了不同粒度的莫来石对硅基陶瓷型芯的性能影响,发现过细的莫来石(5 μm)因促进析晶过度而易产生微裂纹;过粗

的莫来石(40 μm)则因烧结活性低而致强度不足;当粒度适中为 19 μm 时,通过合理的颗粒级配实现了最优的综合性能,室温强度提升至 17.8 MPa,相比李寒松等<sup>[36]</sup> 的研究提升了 44.9%。然而,以莫来石作为矿化剂所得硅基型芯的弯曲强度仍然处于较低水平。为了在维持高气孔率的同时突破强度瓶颈,新型矿化剂被不断开发。刘泳鸿等<sup>[38]</sup> 引入 B<sub>4</sub>C,其在烧结中氧化生成的 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液相能促进烧结并抑制析晶,从而使 1550 °C 高温强度高达 33.2 MPa,但其副作用是致密化过度,导致气孔率偏低(25.51%)且收缩率偏高(1.44%),在脱芯性能和尺寸精度上存在不足。相比之下,曹咏梅等<sup>[39]</sup> 研究的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则展现出更好的平衡性。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 既能诱导方石英析晶,又能与 SiO<sub>2</sub> 反应生成高强的硅酸钇第二相;添加质量分数 10% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的型芯在保持 33.8% 高气孔率的同时,室温强度达 20.4 MPa,显著高于莫来石体系;此外,

研究显示其溶出速率为 0.069 g/min,脱芯速率也优于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 矿化体系。ZrSiO<sub>4</sub> 具备更高的高温稳定性和与 SiO<sub>2</sub> 基体较好的相容性,综合性能更为优异。在 Pan 等<sup>[40]</sup> 的研究中,添加质量分数 24% ZrSiO<sub>4</sub> 的型芯展现出一系列卓越性能:气孔率 36.9%,1550 °C 高温强度 26~30 MPa,热变形量极小(0.15~0.30 mm)(图 3(c));其增强机理在于,高强的锆英石颗粒与 SiO<sub>2</sub> 基体结合紧密,迫使裂纹扩展时消耗更多能量,如图 3(d)所示,同时它还能抑制方石英过度结晶并填充孔隙,从而同步优化了力学性能与尺寸稳定性。

### 2.2.2 矿化剂对非 SiO<sub>2</sub> 基陶瓷型芯性能的影响规律

对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 这类以晶相为主的陶瓷型芯,其烧结过程本质上是晶粒的重排、长大和致密化过程,而非像 SiO<sub>2</sub> 基陶瓷经历从玻璃相为主到析出晶相的转变。因此,矿化剂的作用机理与 SiO<sub>2</sub> 基体系有根本

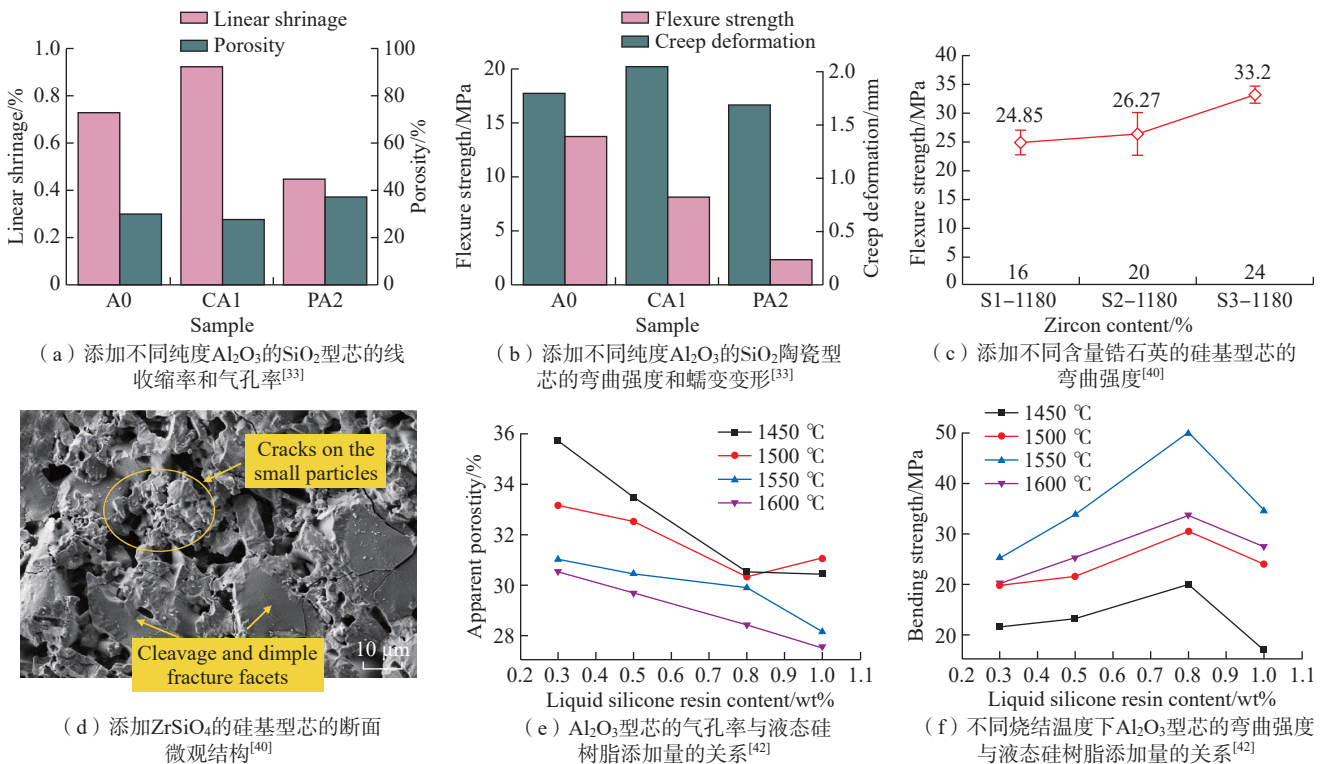


图3 调控矿化剂种类和含量提升陶瓷型芯综合性能的相关研究

Fig.3 Research on the comprehensive properties of ceramic cores by regulating the type and content of mineralizers

区别,核心在于降低烧结温度与通过形成第二相调控基体的性能<sup>[43,45]</sup>。在此背景下, Yang 等<sup>[41]</sup>针对固态 SiO<sub>2</sub> 颗粒为矿化剂在使用时存在的颗粒容易团聚、反应活性低及额外需要黏结剂等问题,创新性地采用硅树脂作为前驱体矿化剂兼黏结剂。硅树脂热解生成的高活性无定形 SiO<sub>2</sub>,更易与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应生成莫来石增强相。同时,树脂裂解释放的气体能有效抑制烧结收缩,添加质量分数 20% 硅树脂时收缩率仅为 0.14%。但这也使得陶瓷型芯的气孔率过高,导致抗弯强度显著下降,硅树脂添加质量分数为 20% 时抗弯强度仅为 27 MPa。于子豪等<sup>[30]</sup>在研究 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系时发现,过量硅树脂 (>3%) 会导致玻璃相增多、气孔均匀性变差,使强度下降;最佳含量为 3% 时,型芯气孔率 21.13%,抗弯强度 50.77 MPa。杨志彬等<sup>[42]</sup>还进一步研究了液态硅树脂作为前驱体对铝基陶瓷型芯综合性能的影响,发现其不仅能提高生坯强度,其热解产物还能填充微观孔隙,从而在维持较高气孔率 (28.14%~31.11%) 的同时,将抗弯强度提升至 50.76 MPa (图 3 (e) 和 (f))。对于 MgO 基陶瓷型芯,矿化剂研究同样取得了进展。贺康兴等<sup>[43]</sup>发现, SiO<sub>2</sub> 能与 MgO 反应生成硅酸镁,增加晶格畸变以加速烧

结,并能填充孔隙增强结合;当 SiO<sub>2</sub> 含量为 30% 时,型芯室温强度为 15.1 MPa,气孔率 32.9%,并在乙酸中具有良好的脱除性能。此外,潘正武<sup>[13]</sup>研究了 CaCO<sub>3</sub> 为矿化剂对 MgO 陶瓷型芯综合性能的影响,其在高温下分解的 CaO 能够与 MgO 发生固相反应,促进烧结的致密化;适量的 CaO 也能够填充 MgO 晶粒间的孔隙,进一步增强陶瓷性能的抗弯性能,当添加质量分数 5% CaCO<sub>3</sub> 时, MgO 型芯的抗弯强度显著提升至 24.03 MPa,同时保持了 28.12% 的气孔率。

综上所述,矿化剂的种类与含量是调控陶瓷型芯烧结行为与最终性能的关键因素。对硅基型芯而言,对于已展现出卓越潜力的新型矿化剂 (如 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrSiO<sub>4</sub> 等),研究需进一步系统评估其对型芯脱芯性能 (如溶出速率)、长期热稳定性及与特定高温合金的界面反应性等关键实用化指标的影响规律,以推动其从实验室走向工程应用。同时,应继续探索更多新型矿化剂材料 (如其他稀土氧化物) 对型芯性能的提升效果。此外,当前针对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 MgO 等非硅基陶瓷型芯的矿化剂研究体系尚不完善,尤其缺乏矿化剂对其高温弯曲强度、热变形量及抗热震性等关键高温服役性能影响规律的系统数

据,也缺乏更加深入的矿化剂在不同基体中的强化机理。因此,未来研究应着力于填补此空白。

## 2.3 纤维增强提升陶瓷型芯的综合性能

纤维材料,特别是陶瓷纤维 (如氧化铝纤维、硅酸铝纤维、莫来石纤维、碳化硅纤维) 与碳纤维,凭借其高长径比、高强度、高耐温性及优异的化学稳定性,已成为制备高性能陶瓷基复合材料的关键增强相<sup>[46-47]</sup>。为满足航空航天领域对涡轮叶片性能的极致要求,突破单一陶瓷材料的性能极限,通过引入纤维形成复合材料,成为同步提升陶瓷型芯强度、调控收缩率与气孔率的有效策略。其核心作用体现在两方面:一是通过在基体中形成刚性网络,物理阻碍颗粒迁移,从而抑制烧结收缩;二是通过经典的纤维增韧机制来提升力学性能<sup>[48]</sup>。鉴于纤维种类繁多且其与不同基体的相互作用机制各异,系统研究其影响规律与深层机理,对于按需设计和制备高性能陶瓷型芯至关重要。该部分讨论的纤维增强陶瓷型芯的微观形貌和详细性能参数如表 3 和图 4 所示。

### 2.3.1 引入纤维抑制陶瓷型芯的烧结收缩

纤维的引入能有效抑制陶瓷型

表 3 纤维增强陶瓷型芯性能汇总

Tabel 3 Detail properties of fiber-reinforced ceramic cores

型芯种类	纤维种类及添加质量分数	收缩率/%	显气孔率/%	室温弯曲强度/ MPa	高温弯曲强度/ MPa	热变形量/ mm	参考文献
SiO <sub>2</sub> 基	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纤维-1%	0.335	—	20.48	—	—	[49]
	石英纤维-0.5%	1.00	9.00	17.30	32.50 (1500 ℃)	0.92	[50]
	硅酸铝纤维-3%	1.00	29.23	23.36	31.39 (1550 ℃)	0.69	[51]
	短切碳纤维-1.5%	0.48/N <sub>2</sub>	39.05/N <sub>2</sub>	—	—	—	[52]
	氧化锆纤维-1%	0.89	30.40	18.64	28.06 (1550 ℃)	0.71	[53]
	非晶莫来石纤维-3%	0.62	43.40	27.70	22.40 (1540 ℃)	0.31	[54]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	PA66 纤维-0.9%	0.418	41.14	15.33	—	—	[21]
	短切 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纤维-1.5%	0.44	—	—	15.22 (1500 ℃)	—	[55]
	PA66 纤维 0.90%+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纤维 1.05% (混杂纤维比例 6 : 7)	0.20	43.31	20.10	—	—	[56]

芯的烧结收缩,其主要机理是在基体中构建三维刚性网络,阻碍陶瓷颗粒在高温下的迁移与重排。然而,不同纤维与基体间的特殊物理化学作用,会带来更复杂的收缩抑制效果。例如,芦刚等<sup>[49]</sup>研究了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纤维对SiO<sub>2</sub>基陶瓷型芯的影响,发现质量分数1%的添加量可使线性收缩率降低62.3%(从0.889%降至0.335%);研究指出,除物理阻隔作用外,纤维表面与SiO<sub>2</sub>反应生成的莫来石相,通过降低SiO<sub>2</sub>结晶度,间接抑制了方石英相变引发的体积收缩。类似

地,肖祖德等<sup>[50]</sup>发现石英纤维同样能显著降低硅基陶瓷型芯的收缩率(从1.75%降至0.452%);除常规的阻碍晶界迁移外,研究通过XCT图像证实,因纤维与基体物理相容性差而产生的微气孔,进一步抑制了收缩,为此机理提供了新的试验证据。此外,杨建等<sup>[51]</sup>在研究硅酸铝纤维时指出,其抑制收缩的机理还包括纤维在高温下(≥985℃)析出方石英和莫来石晶体,这些晶相提高了基体黏度,从而有效抑制了非晶石英玻璃的黏性流动与致密化收缩。值得注

意的是,纤维的作用还与烧结环境气氛密切相关,这主要体现在非氧化物纤维上。陈义斯等<sup>[52]</sup>研究了短切碳纤维对SiO<sub>2</sub>陶瓷型芯的影响,发现在氮气气氛下烧结,碳纤维不仅能形成三维网络阻碍原子扩散,还能原位生成SiC晶须抑制黏性流动,使线性收缩率降至0.48%,如图4(a)所示;而在空气气氛下,碳纤维会被氧化而无法发挥相同作用,碳纤维氧化留下的孔洞如图4(b)所示。同样地,在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯中,田国强等<sup>[53]</sup>发现短切Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纤维的添加也能将收

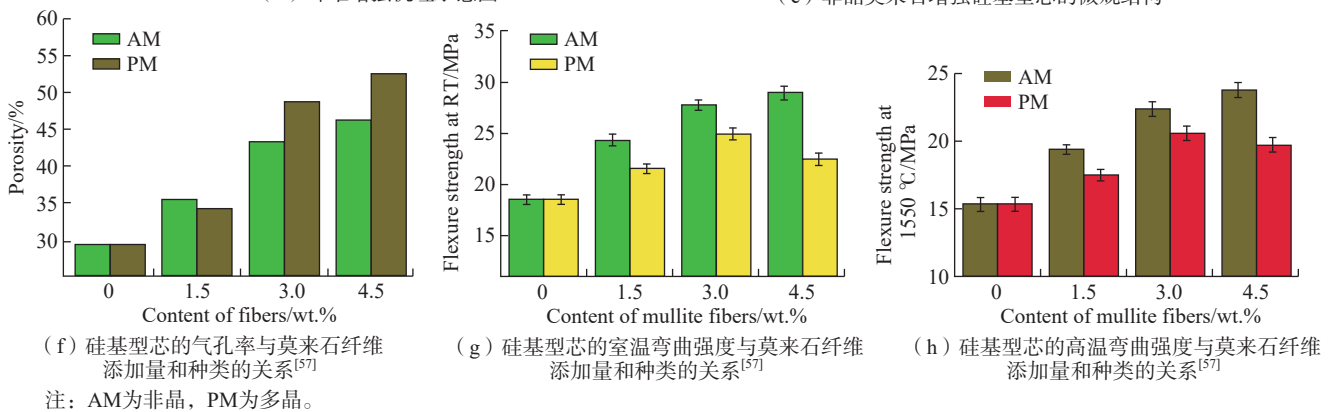
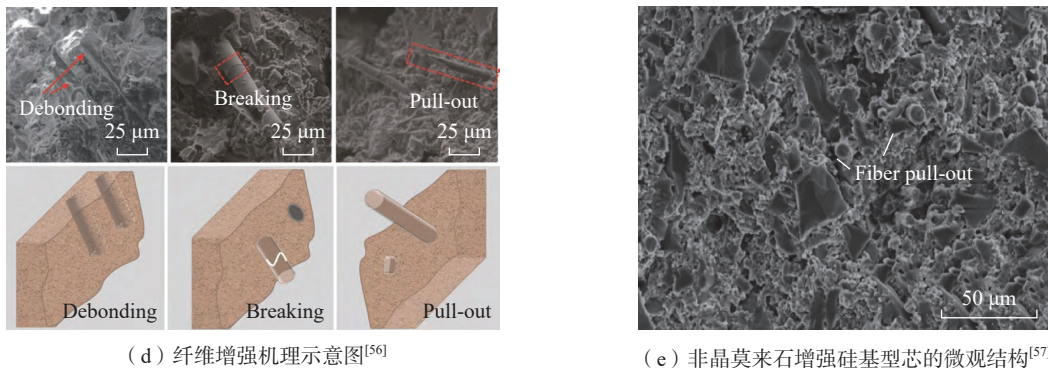
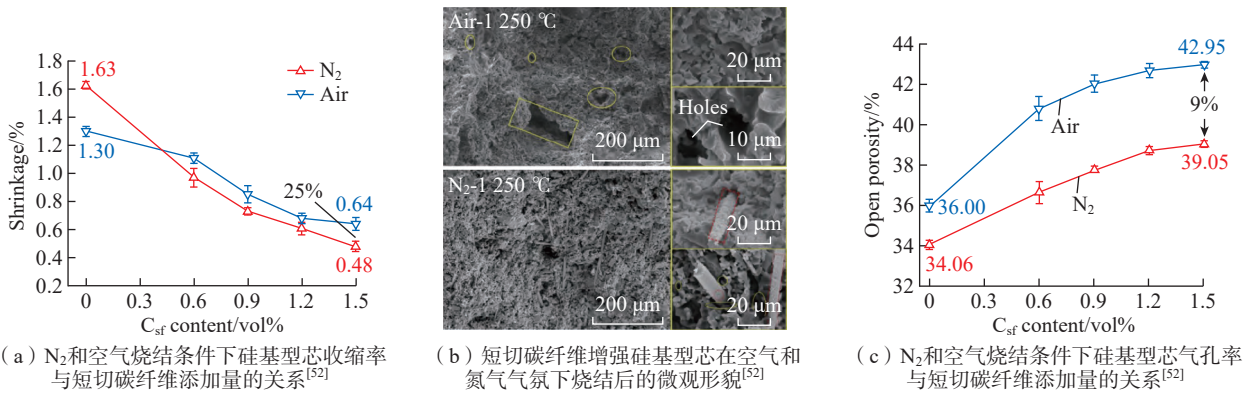


图4 纤维增强提升陶瓷型芯综合性能的相关研究

Fig.4 Research on improving the comprehensive performance of ceramic core by fiber reinforcement

缩率从 0.75% 降至 0.38%；研究中指出,纤维在烧结过程中发生断裂也会消耗部分烧结能量,这也是减少基体收缩的一个因素。

### 2.3.2 纤维强化提升陶瓷型芯的力学性能

为提升陶瓷型芯的力学性能,特别是高温强度,是引入纤维的主要目的。纤维的增强机理普遍基于经典的纤维桥连与纤维拔出效应<sup>[48,58]</sup>。例如,李毅鹏等<sup>[53]</sup>借助氧化锆纤维的桥连作用,使 SiO<sub>2</sub> 型芯的室温和 1550 °C 高温强度分别提升了 15.84% 和 13.46%。然而,许多纤维的作用远超单纯的机械互锁。肖祖德等<sup>[50]</sup>引入石英纤维后, SiO<sub>2</sub> 型芯高温强度达 32.5 MPa,研究发现石英纤维还能作为形核剂促进方石英析晶,从而进一步提升高温强度。杨建等<sup>[51]</sup>也观察到,硅酸铝纤维在高温下析出的方石英和莫来石晶相,本身作为高温稳定相,共同增强了材料;当硅酸铝纤维添加质量分数为 3% 时,型芯的气孔率为 29.23%,室温强度为 23.36 MPa,高温强度(1550 °C)为 31.39 MPa。对于同一成分的纤维,不同晶相的纤维与陶瓷型芯基相的相互作用也会存在差异,从而导致陶瓷型芯的性能差异。Niu 等<sup>[57]</sup>对比了非晶和多晶莫来石纤维对硅基陶瓷型芯的性能影响差异及微观机理,发现非晶纤维因其亚稳态结构,在烧结中通过扩散传质与熔融石英基体形成更强界面结合(图 4(e)),从而使型芯强度增幅(室温 49.7%)显著高于多晶纤维

(室温 34.6%)。如图 4(f)~(h)所示,通过优化,当非晶莫来石纤维添加质量分数为 4.5% 时,制备的型芯展现出 28.9 MPa(室温)和 23.8 MPa(1550 °C)的强度,同时保持了良好的气孔率和脱芯性能<sup>[57]</sup>。对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基陶瓷型芯,其面临的挑战是如何在保持高气孔率(以利脱芯)的同时,获得足够的强度。芦刚等<sup>[21]</sup>通过引入 PA66 纤维,成功将气孔率提升至 43.97%,这主要是纤维在烧结过程中分解留下孔隙,同时阻碍氧化铝颗粒的烧结扩散,减少收缩造成,但过量孔隙会成为应力集中点导致强度下降。最佳平衡点在纤维质量分数为 0.9% 时,此时气孔率为 41.14%,室温强度为 15.33 MPa。为了协同提升气孔率与强度,芦刚等<sup>[56]</sup>进一步创新性地采用了有机纤维(Nsf,作为造孔剂)与无机氧化铝纤维(Asf,作为增强体)的混杂体系,Nsf 烧失形成闭气孔增加气孔率,而 Asf 则通过桥连、拔出等机制显著增强基体,如图 4(d)所示,当 Nsf 与 Asf 质量分数比为 6:7 时,型芯实现了 20.1 MPa 的抗弯强度与 43.31% 的显气孔率的优异组合,成功解决了高孔隙率 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 型芯强度不足的难题。

纤维增强是同步抑制陶瓷型芯烧结收缩、优化其气孔率与力学性能的有效策略。当前,纤维在 SiO<sub>2</sub> 基陶瓷型芯中的应用研究已较为深入和系统。对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基陶瓷型芯,采用“造孔纤维”与“增强纤维”构成的混杂纤维体系,能够在维持高气孔

率的同时显著提升强度,展现出优异的协同增效作用,是解决其强度-脱芯性能矛盾的关键工艺路径。未来的研究需要继续系统评估该工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 型芯高温抗蠕变强度、热变形量及抗热震性等关键高温服役性能的影响规律与机理。其次,应积极拓展新型纤维组合,探索不同种类、不同尺度的造孔纤维与增强纤维的搭配,以期获得综合性能更优的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基陶瓷型芯。最后,纤维增强策略对于解决 MgO 基陶瓷型芯抗热震性差的固有劣势具有巨大潜力。未来应重点研究各类纤维对 MgO 基体的增韧机制和对烧结收缩的抑制效果,系统探索纤维增强对提升 MgO 陶瓷型芯综合性能的可行性与有效路径。

### 2.4 第二相添加剂对陶瓷型芯性能的影响

除矿化剂和纤维外,引入特定的第二相添加剂也是调控陶瓷型芯性能的有效策略。这些添加剂主要包括两类:一是如铝粉、木粉等造孔剂,通过物理或化学作用引入气孔;二是如方石英、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等功能性粉体,通过影响基体相变与烧结行为来优化性能。该部分讨论的第二相添加剂的种类和对应陶瓷型芯的具体性能参数见表 4。造孔剂类添加剂的核心机理是利用其在烧结过程中的体积膨胀效应来抵消陶瓷的固有烧结收缩,但其副作用是往往会导致气孔率上升与强度下降。例如,李鑫等<sup>[59]</sup>在 SiO<sub>2</sub> 基陶瓷型芯中添加 Al 粉,利用其氧化生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 时伴随的体积

表 4 第二相添加剂陶瓷型芯性能汇总

Table 4 Detail properties of ceramic cores prepared by adding additives

陶瓷型芯	添加剂种类及添加质量分数	收缩率/%	显气孔率/%	室温弯曲强度/MPa	高温弯曲强度/MPa	热变形量/mm	参考文献
SiO <sub>2</sub> 基	Al粉-1%	0.01~0.03	28.58	12.10	—	0.57(1550 °C)	[59]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	Al粉-10%	~0.85	46.99	30.43	—	—	[60]
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基	Al粉-2%	~2.0	35.33	34.38	—	0.32(1550 °C)	[61]
MgO基	木粉-1%	0.46	31.31	18.91	—	—	[13]
SiO <sub>2</sub> 基	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -5%	0.74	29.40	16.84	30(1550 °C)	—	[62]

膨胀(图 5 (a)),成功将烧结收缩率控制在极低水平(0.01%~0.03%),如图 5 (b)所示;然而,新生成的 $Al_2O_3$ 颗粒会增大颗粒间距并引入气孔,导致强度随Al粉含量增加而显著下降(图 5 (c)),当Al粉质量分数为1%时,型芯在气孔率28.58%与室温强度12.1 MPa之间达到最佳平衡。类似地,唐世艳等<sup>[60]</sup>将Al粉用作 $Al_2O_3$ 基陶瓷型芯的成孔剂,添加质量分数10% Al粉使型芯表观孔隙率高达46.99%,并产生了-0.85%(负收缩)的线性膨胀,同时抗弯强度保持在30.43 MPa。值得注意的是,

Al粉在不同基体中的作用也会存在差异,例如,Al粉作为造孔剂在 $Y_2O_3$ 型芯中,在降低收缩率的同时还提升了基体的强度。芦刚等<sup>[61]</sup>为解决 $Y_2O_3$ 型芯收缩大、强度低的问题,引入Al粉后发现其不仅通过膨胀效应将三维收缩率从约3%~4%大幅降低至约0.3%(图 5 (d)),还因发生液相烧结、填充晶界并生成 $Al_2Y_4O_9$ 和 $Y_2Al$ 等强化相(图 5 (e)和(f)),使型芯气孔率下降且强度从23.05 MPa提升至34.38 MPa(质量分数2% Al粉)。作为另一种经济型造孔剂,潘正武<sup>[13]</sup>研究了木粉对MgO陶瓷型

芯的影响。木粉燃烧逸出气体,在基体中留下气孔,使收缩率从0.97%降至0.46%,并显著提高气孔率。但同样地,这些气孔破坏了颗粒间的连接,导致强度下降高达55%。

为解决单纯使用造孔剂导致强度显著劣化的问题,研究者转向了兼具膨胀效应与增强作用的功能性添加剂。在此背景下,Xuan等<sup>[62]</sup>选用 $Si_3N_4$ 作为 $SiO_2$ 基陶瓷型芯的第二相添加剂,其作用机理是双重的,一方面, $Si_3N_4$ 在烧结过程中的氧化会产生体积膨胀,并能物理阻碍致密化,从而将线性收缩率从1.21%显

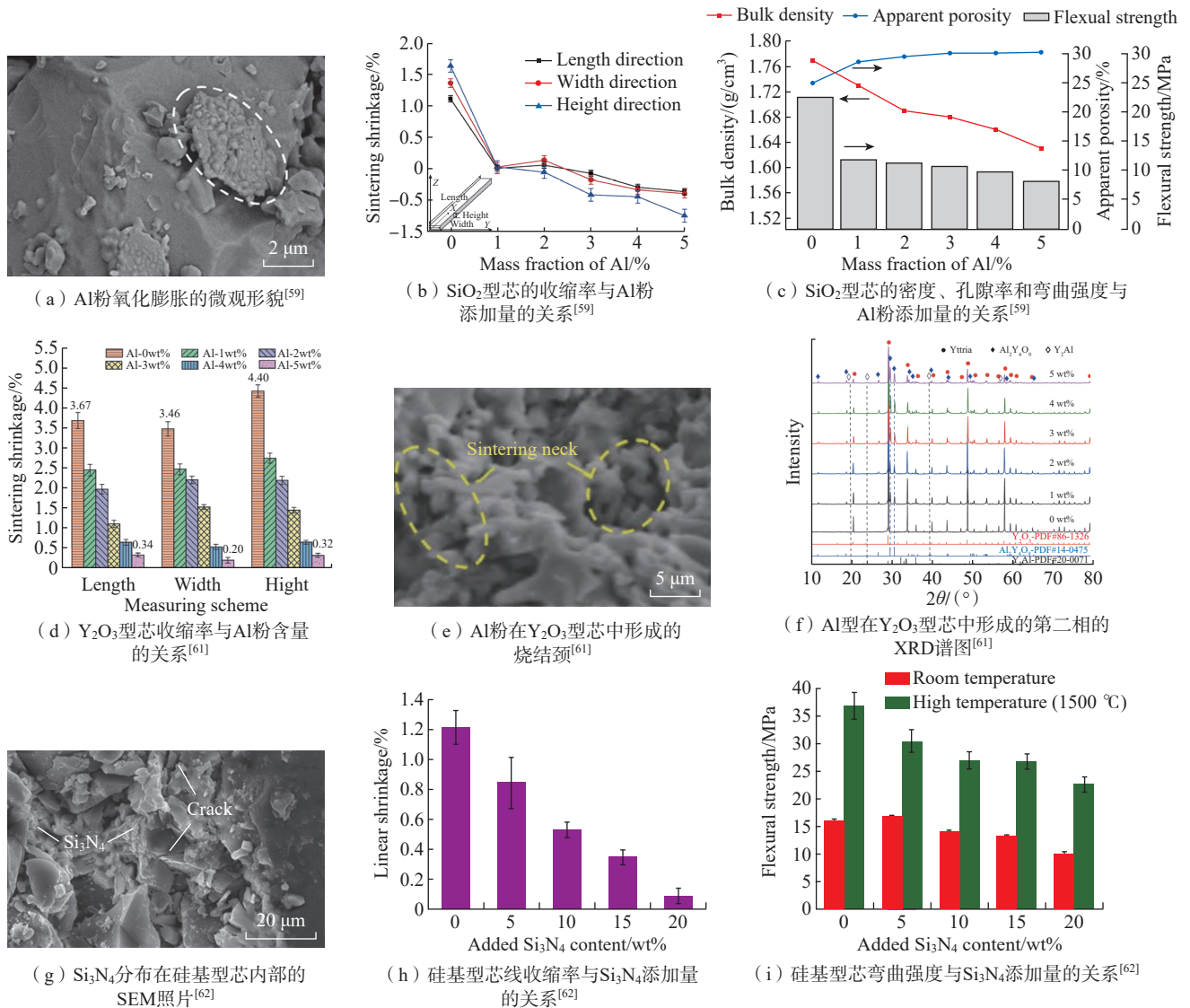


图 5 添加第二相添加剂调控陶瓷型芯的收缩率、气孔率和强度的相关研究

Fig.5 Research on the regulation of shrinkage rate, porosity rate and strength of ceramic cores by adding other additives

著抑制至 0.087%；另一方面,氧化生成的高活性  $\text{SiO}_2$  促进了方石英的析出与烧结致密化(图 5(g)),从而同步提升了力学性能;当  $\text{Si}_3\text{N}_4$  添加质量分数为 5% 时,型芯的室温强度为 16.84 MPa,1500 °C 高温强度可达约 30 MPa,实现了低收缩与高强度的协同提升(图 5(h)和(i))。

综上,Al 粉作为第二相添加剂对降低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  基陶瓷型芯的收缩率,平衡型芯的气孔率和强度有着非常显著的积极作用。未来的研究应当进一步深化添加剂作用机理的理解,系统评估 Al 粉对型芯高温强度、抗热震性及长期热稳定性等关键服役性能的影响规律。然而,Al 粉在  $\text{SiO}_2$  基体系中并未体现出积极作用,反而会导致强度下降,限制其在硅基型芯中的应用。与之机理相似的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  颗粒则不同,其在烧结时可原位氧化生成高强第二相,既能抑制收缩,又不损失基体强度,在硅基型芯中综合性能更优。未来研究需系统研究添加剂自身物理属性(如  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的粒径、形貌与分布)对最终性能的调控规律,并积极探索更多新型第二相添加剂(如其他金属粉体、非氧化物陶瓷等)的性能影响规律,尤其注重发掘那些能够与特定基体发生有益反应、生成高性能第二相的创新材料体系,为下一代高性能陶瓷型芯的设计提供更多可能。

### 3 总结与展望

#### 3.1 总结

本文综述了通过材料设计优化  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  及  $\text{Y}_2\text{O}_3$  陶瓷型芯综合性能的研究进展,主要结论如下。

(1) 原料颗粒级配是调控陶瓷型芯气孔率与力学强度的基础性手段。构建“粗颗粒为骨架、细颗粒填充孔隙”的理想微观结构,可在维持必要气孔率的同时有效提升抗弯强度。

(2) 矿化剂的种类与含量影响烧结行为、晶相组成及第二相分布,

对型芯性能起着决定性作用。对于  $\text{SiO}_2$  基型芯,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrSiO}_4$  等新型矿化剂在平衡各项性能方面展现出比传统矿化剂更优异的潜力。而在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  等高强度基体中,矿化剂的研究重点在于协同调控烧结温度与气孔率。

(3) 纤维增强是提升陶瓷型芯性能的有效途径。纤维在基体中通过形成三维网络抑制型芯的烧结收缩,并利用“桥连”与“拔出”效应显著增强力学性能。对于  $\text{SiO}_2$  基型芯,硅酸铝纤维与非晶莫来石纤维效果显著;而“造孔纤维与增强纤维”构成的混杂体系能有效协同提升  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基型芯的强度与气孔率。

(4) 第二相添加剂为性能调控提供了更多样化的选择。Al 粉在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  基型芯中能同步优化收缩率、气孔率与强度,效果突出。而对于  $\text{SiO}_2$  基型芯,兼具膨胀效应与增强作用的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  展现出更佳的综合效果。

#### 3.2 展望

基于上述研究现状,本文认为未来研究可在以下方向深入探索:

(1) 开发更精确的颗粒堆积理论模型,探索纳米级细粉在非硅基体系中的应用潜力;

(2) 系统评估  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{ZrSiO}_4$  等新型矿化剂对  $\text{SiO}_2$  基型芯的脱芯性能和界面反应的影响,同时完善矿化剂对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  等非硅基型芯关键高温服役性能的影响规律与机理研究;

(3) 系统研究混杂纤维体系对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基型芯高温服役性能的影响,拓展新型纤维组合,并重点探索纤维增强策略解决  $\text{MgO}$  基型芯抗热震性差的可行路径;

(4) 深化第二相添加剂的作用机理研究,系统考察其物理属性的影响规律,并积极探索能与基体发生有益反应的新型添加剂体系。

综上所述,陶瓷型芯的性能优化需依据材料体系特性选择针对性策

略。优化颗粒级配是普适性的,纤维增强是提升  $\text{SiO}_2$  基型芯综合性能的有效方案,而引入 Al 粉等第二相添加剂则是优化  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  基型芯的更优选择。目前,针对  $\text{MgO}$  基陶瓷型芯的强化研究尚显不足,纤维增强策略对于解决  $\text{MgO}$  基陶瓷型芯抗热震性差的固有劣势具有巨大潜力,未来需系统探索各类改性策略对其性能的影响规律与作用机理。

#### 参考文献

- [1] 刘砚飞,钟燕,陶稀鹏,等.镍基单晶高温合金/热障涂层体系的应用研究进展[J].材料工程,2025,53(9):1-10.
- [2] 冷玉潇,曹铁山,陈家万,等.航空发动机用镍基单晶高温合金涡轮叶片服役后的显微组织损伤[J].机械工程材料,2025,49(2):34-42.
- [3] 肖强,曾献城,魏群.航空发动机涡轮叶片气膜孔制备仿真与试验研究[J].航空制造技术,2025,68(14):34-41.
- [4] 由儒全,权胜,陈文彬,等.气膜孔径变化对涡轮叶片全表面冷却特性影响研究[J].航空动力学报,2025,40(8):20-28.
- [5] 孔祥灿,张子卿,朱俊强,等.航空发动机气冷涡轮叶片冷却结构研究进展[J].推进技术,2022,43(5):1-23.
- [6] LIU Yanfei, ZHONG Yan, TAO Xipeng, et al. Research progress in application of nickel-based single crystal superalloy/thermal barrier coating system[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(9): 1-10.
- [7] LENG Yuxiao, CAO Tieshan, CHEN Jiawan, et al. Microstructure damage of nickel-based single crystal superalloy turbine blade for aircraft engine after service[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2025, 49(2): 34-42.
- [8] XIAO Qiang, ZENG Xiancheng, WEI Qun. Simulation and experimental study on preparation of air film holes for aero-engine turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 34-41.
- [9] YOU Ruquan, QUAN Sheng, CHEN Wenbin, et al. Effects of film hole diameter variations on overall cooling performance of a rotating turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(8): 20-28.
- [10] KONG Xiangcan, ZHANG Ziqing, ZHU Junqiang, et al. Research progress on cooling structure of aeroengine air-cooled turbine blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5):

1-23.

[6] 张攀,汪东红,肖程波,等.航空发动机高温合金铸件精密成形研究进展[J].航空制造技术,2025,68(18):162-172.

ZHANG Pan, WANG Donghong, XIAO Chengbo, et al. Research progress on precision forming of aero-engine superalloy castings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(18): 162-172.

[7] 张鹏飞,张林嘉,周瑜,等.钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展[J].航空制造技术,2025,68(7):22-36.

ZHANG Pengfei, ZHANG Linjia, ZHOU Yu, et al. Application progress of titanium alloys investment casting in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(7): 22-36.

[8] 张金,张巍,金磊,等.熔模铸造用陶瓷型芯材料的研究应用现状及展望[J].特种铸造及有色合金,2024,44(12):1687-1696.

ZHANG Jin, ZHANG Wei, JIN Lei, et al. Research status and prospects on ceramic core materials for investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(12): 1687-1696.

[9] 许西庆,杨永康,李杰,等.空心叶片铸造用陶瓷型芯的3D打印及性能调控研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(6):1583-1594.

XU Xiqing, YANG Yongkang, LI Jie, et al. Research progress on 3D printing and performance optimization of ceramic cores for hollow blade casting[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(6): 1583-1594.

[10] 陈超越,殷宇豪,徐松哲,等.航空发动机叶片用陶瓷型芯的光固化增材制造研究现状[J].航空制造技术,2022,65(1/2):67-76.

CHEN Chaoyue, YIN Yuhao, XU Songzhe, et al. Research status of lithography-based additive manufacturing of ceramic cores for aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(1/2): 67-76.

[11] 许西庆,李世元,杨永康,等.氧化铝纤维强化陶瓷型芯的3D打印及尺寸精度控制[J].机械工程学报,2025,61(5):323-329.

XU Xiqing, LI Shiyuan, YANG Yongkang, et al. 3D printing and dimensional accuracy control of ceramic cores reinforced by alumina fibers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(5): 323-329.

[12] 江红涛,杨昕昊,王秀峰.黏结剂喷射制备陶瓷型芯抗弯强度、尺寸精度及表面质量影响因素的研究进展[J].机械工程材料,2024,48(5):8-14.

JIANG Hongtao, YANG Xinhao, WANG Xiufeng. Research progress on factors affecting bending strength, dimensional accuracy and

surface quality of ceramic cores by binder jetting[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(5): 8-14.

[13] 潘正武.原料颗粒级配和矿化剂对镁基陶瓷型芯性能影响的研究[D].南京:东南大学,2021.

PAN Zhengwu. Study on the influence of raw material particle gradation and mineralizer on the properties of magnesium-based ceramic core[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

[14] 任士平,张力,李帅鹏,等.高尺寸稳定性的MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MgO复合陶瓷型芯的制备[J].有色金属工程,2023,13(9):12-22.

REN Shiping, ZHANG Li, LI Shuaipeng, et al. Preparation of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MgO-based composite ceramic core with high dimensional stability[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(9): 12-22.

[15] 陈晓燕,肖旅,余建波,等.熔模铸造高温合金与陶瓷材料界面反应研究进展[J].特种铸造及有色合金,2016,36(8):844-848.

CHEN Xiaoyan, XIAO Lü, YU Jianbo, et al. Research status of the interface reactions between superalloys and ceramic materials in investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(8): 844-848.

[16] 赵代银,何建,伍林,等.陶瓷型芯在高温合金熔模铸造中的应用技术[J].特种铸造及有色合金,2020,40(9):999-1003.

ZHAO Daiyin, HE Jian, WU Lin, et al. Application technology of ceramic core in investment casting of super alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(9): 999-1003.

[17] 胡可辉,吕志刚,陆宽,等.复杂陶瓷型芯增材制造及浇注工艺验证[J].机械工程学报,2021,57(3):227-234.

HU Kehui, LÜ Zhigang, LU Kuan, et al. Additive manufacturing of complex ceramic cores and verification of casting process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 227-234.

[18] YANG Z G, YIN Z Q, ZHAO Z J, et al. Microstructure and properties of SiO<sub>2</sub>-based ceramic cores with ball-shaped powders by the preceramic polymer technique in N<sub>2</sub> atmosphere[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 243: 122609.

[19] 戴睿卿,玄伟东,张强,等.定向高温合金UGTC47与硅基陶瓷型芯界面反应研究[J].特种铸造及有色合金,2025,45(1):112-117.

DAI Ruiqing, XUAN Weidong, ZHANG Qiang, et al. Interfacial reaction between UGTC47 directional superalloy and silicon-based ceramic core[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(1): 112-117.

[20] 罗凌,芦刚,严青松,等.氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2021,41(3):305-309.

LUO Ling, LU Gang, YAN Qingsong, et al. Research progress in alumina-based ceramic cores' Dissolution[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 305-309.

[21] 芦刚,查军辉,严青松,等.PA66纤维含量对多孔铝基陶瓷型芯气孔率的影响[J].材料工程,2020,48(7):170-175.

LU Gang, ZHA Junhui, YAN Qingsong, et al. Influence of PA66 fiber content on porosity of porous aluminum based ceramic core[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(7): 170-175.

[22] 罗龙华.多孔MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>复合镁基陶瓷型芯的制备及性能研究[D].南昌:南昌航空大学,2024.

LUO Longhua. Study of preparation and properties in porous MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composite magnesium based ceramic core[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2024.

[23] 李明,康永旺,郭丰伟,等.Nb-Si合金高温熔体与型壳和型芯的界面反应[J].铸造,2023,72(6):648-653.

LI Ming, KANG Yongwang, GUO Fengwei, et al. Interface reactions between ultra-high temperature ceramic shell/core and molten Nb-Si alloy[J]. Foundry, 2023, 72(6): 648-653.

[24] MUSTAPA N B, AHMAD R, IBRAHIM W M W, et al. Effect of sintering mechanism towards crystallization of geopolymer ceramic—a review[J]. Materials, 2023, 16(11): 4103.

[25] CHAIM R, LEVIN M, SHLAYER A, et al. Sintering and densification of nanocrystalline ceramic oxide powders: A review[J]. Advances in Applied Ceramics, 2008, 107(3): 159-169.

[26] 牛书鑫,骆宇时,李鑫,等.陶瓷型芯颗粒级配控制及综合性能评定[J].铸造,2025,74(3):350-356.

NIU Shuxin, LUO Yushi, LI Xin, et al. Evaluation on comprehensive performance of ceramic cores with controlled particle grading[J]. Foundry, 2025, 74(3): 350-356.

[27] 陆丽芳,张弘毅,武振飞.熔融石英粉体级配对硅基陶瓷型芯性能的影响[J].江苏陶瓷,2020,53(4):28-29,36.

LU Lifang, ZHANG Hongyi, WU Zhenfei. Effect of Shi Ying Powder gradation on properties of silicon-based ceramic core[J]. Jiangsu Ceramics, 2020, 53(4): 28-29, 36.

[28] XU X Q, NIU S X, WANG X G, et al. Fabrication and casting simulation of composite ceramic cores with silica nanopowders[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 19283-19288.

- [29] 覃业霞, 张睿, 杜爱兵, 等. 粉料粒度对氧化铝基陶瓷型芯材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S1): 711–713.
- QIN Yexia, ZHANG Rui, DU Aibing, et al. Effect of particle size on properties of alumina-based ceramic cores[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(S1): 711–713.
- [30] 于子豪, 杨治刚, 秦国强, 等. 稀土氧化钇基陶瓷型芯材料的制备研究[J]. 铸造, 2020, 69(6): 612–616.
- YU Zihao, YANG Zhigang, QIN Guoqiang, et al. Preparation of rare earth yttrium oxide-based ceramic core material[J]. Foundry, 2020, 69(6): 612–616.
- [31] 陈天赐, 李乔磊, 张辉, 等. 矿化剂对陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(10): 1262–1270.
- CHEN Tianci, LI Qiaolei, ZHANG Hui, et al. Effect of mineralizers on properties of ceramic core[J]. Foundry, 2022, 71(10): 1262–1270.
- [32] 张强, 丁方政, 玄伟东, 等. 矿化剂对陶瓷型芯组织和性能调控研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(2): 179–186.
- ZHANG Qiang, DING Fangzheng, XUAN Weidong, et al. Progress in mineralizer regulating microstructure and properties of ceramic cores[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(2): 179–186.
- [33] 范红娜, 许西庆, 李鑫, 等. 氧化铝改性硅基陶瓷型芯制备及结晶动力学[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 212–217.
- FAN Hongna, XU Xiqing, LI Xin, et al. Preparation and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores modified by alumina[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(5): 212–217.
- [34] PAN Z P, GUO J Z, LI S M, et al. Investigation of microstructure evolution and properties in silica-based ceramic cores with alumina as a mineralizer[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2023, 20(3): 2009–2018.
- [35] 陈昊, 李鑫, 牛书鑫, 等. 氧化硅/莫来石陶瓷型芯的析晶行为及性能研究[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(5): 902–907.
- CHEN Hao, LI Xin, NIU Shuxin, et al. Crystallization behavior and properties of silica/mullite ceramic cores[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(5): 902–907.
- [36] 李寒松, 玄伟东, 潘文轩, 等. 电熔莫来石含量对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2020, 69(8): 861–865.
- LI Hansong, XUAN Weidong, PAN Wenxuan, et al. Effect of fused mullite content on properties of silicon-based ceramic cores[J]. Foundry, 2020, 69(8): 861–865.
- [37] 吴笑非, 李鑫, 许西庆, 等. 不同粒度莫来石粉改性硅基陶瓷型芯的制备及性能[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4): 128–133.
- WU Xiaofei, LI Xin, XU Xiqing, et al. Fabrication and properties of silica-based ceramic cores modified by mullite powders with different particle sizes[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 128–133.
- [38] 刘泳鸿, 玄伟东, 张强, 等. 碳化硼对硅基陶瓷型芯性能的影响研究[J]. 铸造, 2024, 73(4): 532–539.
- LIU Yonghong, XUAN Weidong, ZHANG Qiang, et al. Effect of boron carbide on properties of silicon-based ceramic core[J]. Foundry, 2024, 73(4): 532–539.
- [39] 曹咏梅, 易仁杰, 刘强, 等. 电熔氧化钇含量对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74(3): 365–369.
- CAO Yongmei, YI Renjie, LIU Qiang, et al. Effect of the fused yttria content on the properties of silicon-based ceramic core[J]. Foundry, 2025, 74(3): 365–369.
- [40] PAN Z P, GUO J Z, LI S M, et al. Experimental study on high temperature performances of silica-based ceramic core for single crystal turbine blades[J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 548–555.
- [41] YANG Z G, ZHAO Z J, YU J B, et al. Effect of silicone resin as precursor and binder on the properties of alumina-based ceramic cores using ball-shaped powders[J]. Ceramics International, 2019, 45(2): 2170–2177.
- [42] 杨志彬, 张阳, 蒲发源, 等. 液态硅树脂对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响[J]. 中国材料进展, 2021, 40(7): 535–541.
- YANG Zhibin, ZHANG Yang, PU Fayuan, et al. Effect of liquid silicone resin on the properties of  $Al_2O_3$  based ceramic core[J]. Materials China, 2021, 40(7): 535–541.
- [43] 贺康兴, 姜卫国, 毛萍莉. 石英玻璃粉含量对氧化镁基陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2024, 73(5): 668–676.
- HE Kangxing, JIANG Weiguo, MAO Pingli. Effect of fused silica powder content on the properties of MgO-based ceramic core[J]. Foundry, 2024, 73(5): 668–676.
- [44] 周宇豪, 玄伟东, 段方苗, 等. 电熔刚玉对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(4): 1396–1402.
- ZHOU Yuhao, XUAN Weidong, DUAN Fangmiao, et al. Effect of fused corundum on properties of silicon-based ceramic core[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(4): 1396–1402.
- [45] 李彪, 娄延春, 于波, 等. 添加锆英粉矿化剂的氧化铝基陶瓷型芯试验研究[J]. 铸造, 2020, 69(8): 853–860.
- LI Biao, LOU Yanchun, YU Bo, et al. Experimental study of alumina-based ceramic cores mineralized by zircon powder[J]. Foundry, 2020, 69(8): 853–860.
- [46] 马昕, 刘海韬, 孙逊. 连续纤维增强陶瓷基复合材料连接件的研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(8): 1–11.
- MA Xin, LIU Haitao, SUN Xun. Research progress in continuous fiber reinforced ceramic matrix composite joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(8): 1–11.
- [47] 商剑钊, 吴小飞, 曹晔洁, 等. 连续纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料低成本制备工艺研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(1): 15–27.
- SHANG Jianzhao, WU Xiaofei, CAO Yejie, et al. Research progress in low-cost preparation process of continuous fiber-reinforced silicon carbide ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(1): 15–27.
- [48] 李毅鹏, 刘孝福, 娄延春, 等. 纤维增强技术在熔模铸造陶瓷型芯的应用研究[C]//第十九届中国铸造协会年会. 天津, 2023: 190–194.
- LI Yipeng, LIU Xiaofu, LOU Yanchun, et al. Application of fiber reinforced technology in investment casting ceramic core[C]//The 19th Annual Conference of China Foundry Association. Tianjin, 2023: 190–194.
- [49] 芦刚, 于航, 严青松, 等.  $Al_2O_3$ 纤维对 $SiO_2$ 基陶瓷型芯的烧阻阻滞[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1): 168–172.
- LU Gang, YU Hang, YAN Qingsong, et al. Effect of  $Al_2O_3$  fiber on shrinkage blocking of  $SiO_2$  matrix ceramic core[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 168–172.
- [50] 肖祖德, 玄伟东, 段方苗, 等. 石英纤维对氧化硅陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2021, 70(9): 1072–1079.
- XIAO Zude, XUAN Weidong, DUAN Fangmiao, et al. Effect of silica fibers on properties of silica ceramic cores[J]. Foundry, 2021, 70(9): 1072–1079.
- [51] 杨建, 玄伟东, 周宇豪, 等. 硅酸铝纤维对氧化硅陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72(3): 294–300.
- YANG Jian, XUAN Weidong, ZHOU Yuhao, et al. Effect of aluminum silicate fibers on properties of silica ceramic core[J]. Foundry, 2023, 72(3): 294–300.
- [52] 陈义斯, 芦刚, 严青松, 等. 气氛烧结短切碳纤维增强硅基陶瓷型芯的致密化行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2412–2420.
- CHEN Yisi, LU Gang, YAN Qingsong,

et al. Densification behavior in short carbon fiber reinforced silica-based ceramic cores via atmosphere sintering[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 2412–2420.

[53] 李毅鹏, 娄延春, 刘孝福, 等. 氧化锆纤维对氧化硅陶瓷型芯性能的影响[J]. *铸造*, 2023, 72(5): 564–569.

LI Yipeng, LOU Yanchun, LIU Xiaofu, et al. Influence of zirconia fiber on properties of silica ceramic cores[J]. *Foundry*, 2023, 72(5): 564–569.

[54] 牛书鑫, 刘智鹏, 周婷婷, 等. 基于多种莫来石纤维的硅基陶瓷型芯增强机制及性能研究[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(19): 36–40, 47.

NIU Shuxin, LIU Zhipeng, ZHOU Tingting, et al. Reinforcing mechanism and property investigation of silica-based ceramic cores based on different mullite fibers[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(19): 36–40, 47.

[55] 田国强, 闫学伟. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纤维改善Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯高温强度和烧结收缩[J]. *中国陶瓷*, 2021, 57(3): 18–23.

TIAN Guoqiang, YAN Xuewei. Improvement of high-temperature strength and sintering shrinkage of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic core

by adding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber[J]. *China Ceramics*, 2021, 57(3): 18–23.

[56] 芦刚, 罗龙华, 陈晓, 等. 有机-无机混杂纤维改性氧化铝基陶瓷型芯孔隙-强度协同强化机制[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(1): 180–188.

LU Gang, LUO Longhua, CHEN Xiao, et al. Organic-inorganic hybrid fibers modified alumina-based ceramic core with synergistic enhancing porosity and strength[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 52(1): 180–188.

[57] NIU S X, LIU Z P, LUO Y S, et al. Reinforcement of silica-based ceramic cores based on amorphous and polycrystalline mullite fibers[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(19): 31378–31384.

[58] 张俊敏, 蔡飞燕, 靳喜海, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料研究与应用进展[J]. *陶瓷学报*, 2023, 44(2): 195–207.

ZHANG Junmin, CAI Feiyan, JIN Xihai, et al. Progress in research and application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44(2): 195–207.

[59] 李鑫, 牛书鑫, 姚建省, 等. 金属Al粉对氧化硅基陶瓷型芯的性能及组织的影响[J]. *无机材料学报*, 2019, 34(2): 207–212.

LI Xin, NIU Shuxin, YAO Jiansheng, et al. Effect of Al powder on property and microstructure of silica-based ceramic core[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, 34(2): 207–212.

[60] 唐世艳, 樊自田, 刘鑫旺, 等. 基于Al粉成孔作用制备多孔氧化铝陶瓷型芯[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 34–38.

TANG Shiyan, FAN Zitian, LIU Xinwang, et al. Fabrication of porous alumina-based ceramic core using aluminium as pore-forming agent[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2017, 45(4): 34–38.

[61] 芦刚, 吴谦, 陈晓, 等. Al粉含量对Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷型芯性能及组织的影响[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(8): 4366–4374.

LU Gang, WU Qian, CHEN Xiao, et al. Effect of Al powder content on the properties and microstructure of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic core[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8): 4366–4374.

[62] XUAN W D, ZHANG Q, SONG H R, et al. Improved mechanical properties and dimensional accuracy of silica-based ceramic cores by Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> addition[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(14): 25730–25737.

## Progress in Optimizing Comprehensive Performance of Hot-Press Injection Molded Ceramic Cores Through Material Design

WANG Yan<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, PENG Shuaiguo<sup>2</sup>, ZHANG Yaozhong<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China United Gas Turbine Technology, Co., Ltd., Beijing 100015, China)

**[ABSTRACT]** To meet the stringent requirements of high thrust-to-weight ratio engines for turbine blades, obtaining ceramic cores with high precision and reliability is crucial for manufacturing hollow blades. In response to issues such as high shrinkage rates and the difficulty in balancing porosity with mechanical properties in hot-press injection-molded ceramic cores, this paper provides a review of research on SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic cores. Focusing on material design approaches—including optimization of raw material particle size distribution, adjustment of mineralizer types, introduction of high-performance fibers, and incorporation of second phase materials—the influence of these strategies on key properties such as shrinkage, porosity, room- and high-temperature strength, and thermal deformation is discussed, along with the underlying mechanisms. The response of different ceramic core systems to the same strategy varies significantly, and the mechanisms for performance enhancement are not universal. By comparing the commonalities and specific characteristics of different material systems and optimization routes, this review aims to offer a theoretical foundation and technical reference for the rational design and process optimization of future high-performance ceramic cores.

**Keywords:** Turbine blades; Investment casting; Hot-press injection molding; Ceramic core; Particle gradation; Mineralizer; Fiber reinforcement

(责编 阳光)