

矿化剂对 3D 打印硅基陶瓷型芯微观结构及力学性能的影响

程毅明¹, 李 鹤^{1, 2}, 石小丽¹, 管大伟², 李 飞²

(1. 新疆大学材料科学与工程学院, 新疆先进金属材料设计及应用重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046;

2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240)

摘要: 传统氧化硅陶瓷型芯虽具有良好的化学可溶性和脱芯性能, 但其本征强度较低, 在高温金属液体冲击下易发生开裂或变形, 难以满足复杂空心叶片对型芯力学性能的要求。本研究提出引入TiO₂矿化剂结合DLP增材制造的方法, 旨在通过组分优化改善硅基陶瓷的致密化行为与力学性能。采用DLP光固化成形工艺制备不同TiO₂掺量的陶瓷型芯, 利用SEM和XRD等手段分析其微观结构演变, 研究烧结温度对陶瓷型芯抗弯强度的影响。研究表明, TiO₂的添加可与基体形成共熔液相, 促进致密化。添加10wt.%TiO₂的陶瓷在1 300 °C烧结后气孔率显著降低为14.28% ± 0.22%, 抗弯强度达到峰值(65.46 ± 1.96) MPa。TiO₂含量与烧结温度对微观结构具有协同调控作用, 10wt.%TiO₂含量通过促进液相烧结, 显著提升了材料的力学性能。本研究为高性能可溶性陶瓷型芯的组分优化提供了参考依据。

关键词: 陶瓷型芯; DLP光固化; TiO₂掺杂; 抗弯强度; 微观结构; 液相烧结; 增材制造

中图分类号: TQ174.75; TG221; TF124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0855-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0110

The Influence of Mineralizers on the Microstructure and Mechanical Properties of 3D Printed Silica-Based Ceramic Cores

CHENG Yi-ming¹, LI He^{1, 2}, SHI Xiao-li¹, GUAN Da-wei², LI Fei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Xinjiang Key Laboratory for Advanced Metal Materials Design and Application, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Key Laboratory for High Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China)

Abstract: Silica-based ceramic cores exhibit excellent chemical solubility and core leaching performance, yet their inherently low mechanical strength makes them prone to cracking or deformation under the scouring of high-temperature molten metal, failing to meet the mechanical requirements of complex hollow turbine blades. This study proposes a strategy combining TiO₂ mineralizer with DLP additive manufacturing to improve the densification behavior and mechanical properties of silica-based ceramics via compositional optimization. Ceramic cores with different TiO₂ contents were fabricated by DLP stereolithography, and their microstructural evolution was analyzed by means of SEM, XRD and other methods, while the effect of sintering temperature on the flexural strength of ceramic cores was investigated. The results demonstrate that the addition of TiO₂ can form a eutectic liquid phase with the matrix, promoting densification. The ceramic with 10wt.%TiO₂ sintered at 1 300 °C exhibits a significantly reduced open porosity of 14.28%±0.22% and a peak flexural strength of (65.46±1.96) MPa. The TiO₂ content and the sintering temperature synergistically regulate the microstructure, and the 10wt.%TiO₂ content significantly enhance the mechanical properties of the material by facilitating liquid-phase sintering. This work provides a reference basis for the compositional optimization of high-performance soluble ceramic cores.

Key words: ceramic core; DLP stereolithography; TiO₂ doping; flexural strength; microstructure; liquid-phase sintering; additive manufacturing

基金项目: 先进材料—国家科技重大项目(2025ZD0609600)。

收稿日期: 2026-03-11 收到初稿, 2026-06-04 收到修订稿。

作者简介: 程毅明(2001-), 女, 硕士生, 研究方向为3D打印技术。E-mail: 19155445374@163.com

通信作者: 李鹤, 副教授, 硕士生导师。E-mail: lihe@xju.edu.cn; 李飞, 研究员, 博士生导师。E-mail: lifei74@sjtu.edu.cn

引用格式: 程毅明, 李鹤, 石小丽, 等. 矿化剂对3D打印硅基陶瓷型芯微观结构及力学性能的影响[J]. 铸造, 2026, 75(8): 855-861.

Cheng Yiming, Li He, Shi Xiaoli, et al. The influence of mineralizers on the microstructure and mechanical properties of 3D printed silica-based ceramic cores[J]. Foundry, 2026, 75(8): 855-861.

多元氧化物复合陶瓷凭借其优异的高温稳定性、抗蠕变性能及可设计性，在航空发动机涡轮叶片用陶瓷型芯领域展现出重要的应用价值。硅基陶瓷型芯因其良好的化学可溶性和与铸造工艺的适配性，已成为该领域的研究热点^[1]。传统SiO₂基陶瓷型芯在高温烧结过程中易产生过量玻璃相，导致抗弯强度不足，在金属浇注时难以承受高温合金液的冲击^[2]，此力学性能短板成为制约其应用于大尺寸、复杂结构叶片的关键瓶颈^[3]。研究表明，引入多元氧化物复合体系可有效提升硅基陶瓷的力学性能。其中，ZrO₂的掺杂利用其相变增韧特性，当裂纹扩展时，亚稳四方相ZrO₂在应力诱导下发生向单斜相的转变，伴随体积膨胀吸收能量，从而抑制裂纹扩展^[4]；TiO₂的加入则可促进液相烧结，降低气孔率，并通过析出第二相颗粒诱发微裂纹增韧机制^[5]。上述多机制协同作用，为改善陶瓷型芯的抗弯强度提供了可行的技术路径。随着航空发动机推重比的不断提升，涡轮叶片的冷却结构日趋复杂，这对陶瓷型芯不仅要求更高的力学性能，也对其内部异形冷却通道的几何精度提出了苛刻要求^[6-7]。增材制造技术，特别是数字光处理（Digital Light Processing）光固化成形工艺，凭借其高精度与无模成形的优势，为复杂结构陶瓷型芯的一体化成形提供了新的技术方案^[8]。在DLP成形工艺中，陶瓷浆料的组分设计直接影响坯体的固化精度、烧结行为及最终力学性能，是决定成形质量的关键因素。研究表明，通过调控烧结助剂的种类与含量可有效优化陶瓷型芯的微观结构与力学表现^[9]。

在DLP光固化成形陶瓷型芯领域，国内外学者围绕材料体系优化与性能调控开展了大量研究。She等以Al₂O₃为基体，引入SiO₂和TiO₂作为烧结助剂，系统研究了PMMA成孔剂含量和烧结温度对陶瓷型芯性能的影响，成功制备了气孔率50.48%、抗弯强度46.77 MPa的Al₂O₃基陶瓷型芯^[10]。该研究证实了SiO₂-TiO₂复合烧结助剂在促进致密化方面的协同效应。Xiang等通过调控烧结工艺参数（升温速率、保温时间），探究了其对于DLP成形Al₂O₃基陶瓷型芯物相演变与力学性能的影响，发现升温速率提高至4 °C/min时可获得峰值强度28.28 MPa^[11]。该研究为烧结制度的优化提供了重要参考。许等以熔融石英为原料、莫来石为改性剂，研究了莫来石添加对DLP成形氧化硅陶瓷型芯各向异性的调控作用，结果表明，3%莫来石添加可使横向、竖向高温强度分别达到18.5 MPa和16.3 MPa^[12]。该研究有效缓解了层状堆积导致的各向异性问题。Yu等系统梳理了DLP成形先进陶瓷的性能增强策略，指出浆料组分设计是影响成形精度与力学表现的关键因素，同时强调

了多元烧结助剂的协同作用机制仍需深入探究^[13]。综上所述，现有研究在单一材料体系优化或工艺参数调控方面取得了显著进展，但对于硅基多元复合体系中各氧化物组分的定量配比及其对抗弯强度的影响机制，特别是TiO₂掺量变化引起的微观结构演变与性能响应规律，尚缺乏系统深入的试验研究。

TiO₂掺量的精确调控成为优化陶瓷型芯力学性能的关键点，其作用主要体现在两个方面。其一，TiO₂可与SiO₂、Al₂O₃在较低温度下形成共熔液相，通过液相烧结机制促进颗粒重排与物质迁移，降低气孔率，提高坯体致密化程度^[14]，从而直接提升材料的抗弯强度。其二，当TiO₂掺量超过其在基体中的固溶极限时，过量的TiO₂会以第二相颗粒形式析出并均匀分布于晶界或晶内。这些第二相颗粒与基体之间存在热膨胀系数与弹性模量的差异，在烧结冷却过程中会在颗粒周围形成残余应力场。当裂纹扩展至颗粒附近时，主裂纹与残余应力场相互作用，诱发微裂纹萌生或裂纹偏转，从而消耗裂纹扩展能量，提高材料的断裂韧性与抗弯强度。此外，TiO₂的添加还可诱导晶粒各向异性生长，形成细长晶粒或板状晶粒，这些形貌特征有助于通过裂纹桥接和裂纹偏转机制进一步强化材料。

本研究以SiO₂-Al₂O₃为基体，引入ZrO₂、Y₂O₃和TiO₂构建多元复合体系，采用DLP光固化成形工艺制备陶瓷型芯。在固定ZrO₂、Y₂O₃和Al₂O₃含量的前提下，通过改变TiO₂掺量研究其对抗弯强度的影响，揭示TiO₂在烧结致密化与第二相增韧过程中的作用机制，为高性能可溶性陶瓷型芯的组分优化提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料

采用SiO₂、TiO₂、Y₂O₃、ZrO₂和Al₂O₃粉末作为原材料制备陶瓷素坯，其成分如表1所示。

表1 原材料信息
Tab. 1 Raw material information

原料	纯度/%	化学式	粒径/μm
氧化硅	>99.9	SiO ₂	5
氧化钛	>99	TiO ₂	1
氧化锆	>99	ZrO ₂	1
氧化铝	>99	Al ₂ O ₃	1
氧化钇	>99	Y ₂ O ₃	1

1.2 试验方法

按照表2配制混合粉末，将SiO₂、TiO₂、Y₂O₃、ZrO₂和Al₂O₃粉末按比例混合后倒入光敏树脂（北京十

维科技有限责任公司)中,制备固体含量为80wt.%的光敏陶瓷浆料。将混合后的浆料置于高速振动球磨机(合肥科晶材料技术有限公司)中球磨并充分搅拌30 min。

表2 两种陶瓷浆料的成分和含量
Tab. 2 The composition and content of the two ceramic slurries $w_B/\%$

试样	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	光敏树脂
1	40	5	5	10	20	20
2	35	10	5	10	20	20

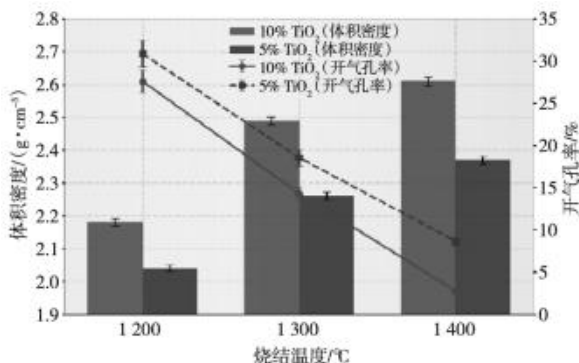
将配制好的陶瓷浆料置于载玻片上,采用DLP 3D打印机(北京十维科技有限责任公司)进行曝光固化试验。单层曝光固化后,使用数字测量仪(上海六菱仪器厂)测量固化深度并对比打印精度,以确定最佳打印参数。通过对比不同参数下的固化层厚和精度,确定打印参数为:层厚40 μm ,曝光时间15 s,紫外光功率5 mW/cm^2 。随后采用该参数打印尺寸为50 mm $\times$ 5 mm $\times$ 4 mm的陶瓷素坯。

使用马弗炉对打印完成的陶瓷素坯进行脱脂和烧结。在烧结炉中,素坯按以下程序进行处理:先以2 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至200 $^\circ\text{C}$,然后以1 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至600 $^\circ\text{C}$ 。再以5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率分别加热至1 200 $^\circ\text{C}$ 、1 300 $^\circ\text{C}$ 和1 400 $^\circ\text{C}$,并在各目标温度下保温120 min。最后,以5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率冷却至600 $^\circ\text{C}$,随后随炉冷却至室温。以上脱脂和烧结程序均在空气气氛中进行。

2 结果和讨论

2.1 物理性能

不同TiO₂掺量的陶瓷在不同烧结温度下的体积密度、致密度增量及开气孔率随温度的变化规律如图1所示。

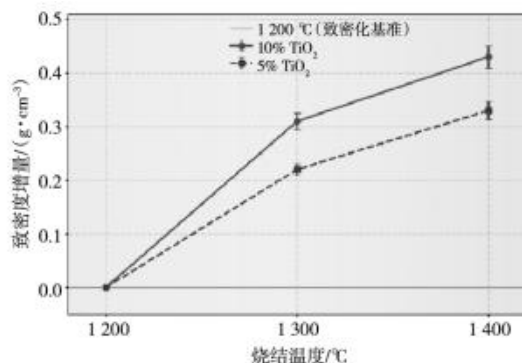


(a) TiO₂掺杂对陶瓷烧结致密化行为的影响

示。由图1(a)可知,随着烧结温度升高,两种掺量陶瓷的体积密度均呈持续上升趋势,开气孔率则显著下降,且相同温度下10wt.% TiO₂陶瓷的体积密度更高、开气孔率更低,致密化优势明显;图1(b)以1 200 $^\circ\text{C}$ 为基准,清晰呈现了致密度增量随温度的变化,升温对10wt.% TiO₂陶瓷致密度的提升作用更为显著,说明高TiO₂掺量与高温的协同作用更利于致密化。

TiO₂诱导的液相烧结机制在陶瓷致密化过程中具有关键作用。TiO₂可与陶瓷基体中的Al₂O₃、SiO₂形成低熔点共熔液相,随着烧结温度升高,液相含量增加且粘度降低,在毛细管力驱动下促进颗粒重排与物质迁移,有效填充坯体内部气孔,从而提升体积密度、降低开气孔率。研究表明,适量的TiO₂添加可显著改善陶瓷的烧结性能,获得均匀致密的显微结构^[15]。在烧结助剂含量方面,较高的TiO₂掺量能够提供更充足的共熔液相,相较于低掺量更能高效促进气孔消除与晶粒融合,因此在相同烧结温度下表现出更优的致密化效果^[16]。此外,烧结温度升高进一步增强液相的流动性与物质迁移能力,使得致密度随温度升高持续提升,且对高TiO₂掺量陶瓷的促进作用更为突出。

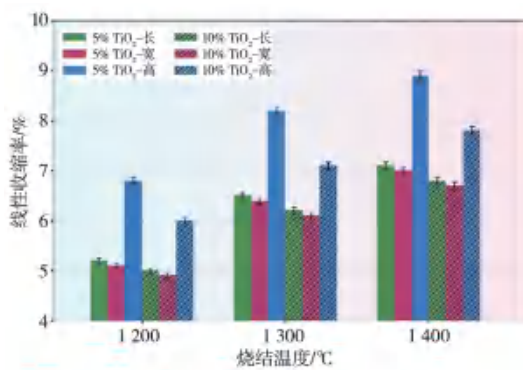
不同TiO₂掺量(5wt.%、10wt.%)陶瓷在不同烧结温度下的线性收缩率与收缩各向异性系数如图2所示。由图2(a)可见,随着烧结温度升高,各组样品的线性收缩率均呈上升趋势,且在相同温度下,高掺量(10wt.%) TiO₂陶瓷的收缩率略低于低掺量(5wt.%)陶瓷;同时,所有陶瓷均表现出明显的各向异性,即高度方向的收缩率显著高于长度和宽度方向。图2(b)进一步量化了收缩各向异性系数,随着烧结温度升高,两组陶瓷的各向异性系数均呈下降趋势。TiO₂可与基体中的Al₂O₃和SiO₂形成低熔点共熔液相,液相在烧结过程中充当润滑剂,促进颗粒重排,缓解因挤取向导致的内应力,从而降低收缩各向异性。10wt.% TiO₂陶瓷的各向异性系数始终低于5wt.% TiO₂陶瓷,



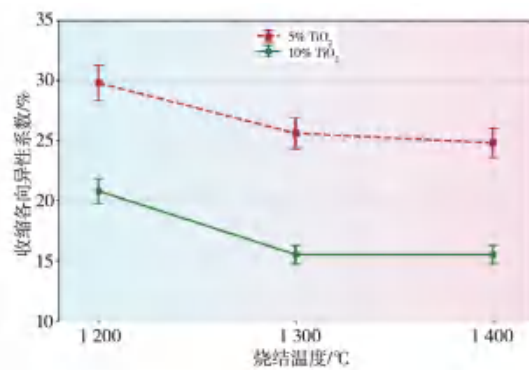
(b) 致密度增量对比

图1 不同TiO₂含量陶瓷的体积密度、致密度增量及开气孔率随烧结温度的变化规律

Fig. 1 The variations of bulk density, density increment and open porosity with sintering temperature for the ceramics with different TiO₂ contents



(a) 各方向线性收缩率对比



(b) 收缩各向异性系数趋势

图2 不同TiO₂含量陶瓷在不同烧结温度下的线性收缩率与收缩各向异性系数Fig. 2 Linear shrinkage rates and anisotropic shrinkage coefficients of the ceramics with different TiO₂ contents under different sintering temperatures

10wt.% TiO₂掺量能提供更充足的共熔液相, 相较于5wt.%掺量, 更能有效促进颗粒重排, 因此在全温度区间内, 其各向异性系数均更低。收缩各向异性是增材制造陶瓷部件变形、开裂的主要诱因之一。高各向异性会导致部件在烧结过程中产生翘曲、扭曲, 甚至产生微裂纹, 严重影响成形精度与结构完整性, 因此高TiO₂掺量有助于降低收缩各向异性。

不同TiO₂掺量(5wt.%、10wt.%)陶瓷的体积密度均随体积收缩率的增加呈显著线性增长趋势, 如图3所示, 且拟合度较高(R^2 分别为0.980和0.961), 这表明在本研究的工艺范围内, 体积收缩率与体积密度之间存在稳定的正相关关系。10wt.% TiO₂陶瓷的拟合斜率(0.076)高于5wt.% TiO₂陶瓷(0.054), 说明在相同的体积收缩增量下, 10wt.% TiO₂陶瓷的体积密度提升幅度更大, 致密化效率更高。在相同体积收缩率条件下, 10wt.% TiO₂陶瓷的体积密度始终高于5wt.% TiO₂陶瓷, 这进一步印证了高TiO₂掺量对致密化的促进作用。体积收缩率的提升本质上是坯体内部气孔被填充、颗粒间空隙减小的过程, 因此体积密度随收缩率增大而

升高; 而10wt.% TiO₂掺量能提供更充足的共熔液相, 在相同收缩条件下更有效地促进颗粒重排与物质迁移, 从而实现更高的致密化程度。

图4呈现了5wt.%与10wt.% TiO₂掺量的陶瓷抗弯强度随烧结温度(1200~1400 °C)的变化规律。整体而言, 两组陶瓷的抗弯强度均随烧结温度升高呈现先显著上升、后轻微下降的变化趋势, 且全温度区间内10wt.% TiO₂陶瓷的抗弯强度均显著高于5wt.% TiO₂陶瓷。1200 °C时, 两组陶瓷的抗弯强度均处于较低水平, 其中10wt.% TiO₂陶瓷的优势已初步显现; 当温度升至1300 °C时, 两组陶瓷的抗弯强度均达到峰值, 10wt.% TiO₂陶瓷的提升幅度尤为显著; 而烧结温度进一步升至1400 °C时, 两者的抗弯强度均出现小幅回落, 10wt.% TiO₂陶瓷仍保持更高的强度水平。1200 °C时, 烧结温度较低, TiO₂与基体形成的共熔液相量不足, 坯体致密度低、开气孔率高, 内部存在大量孔隙缺陷, 导致材料力学性能处于较低水平。升温至1300 °C时, 液相量充足且流动性适中, 通过毛细力驱动颗粒充分重排与物质迁移, 坯体致密度大幅提升, 气孔缺陷显著减少; 同时, 过量TiO₂以第二相颗粒形式均匀

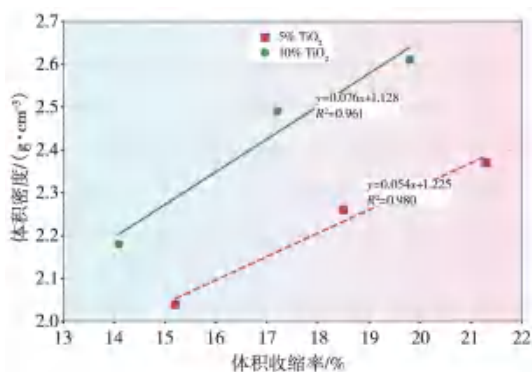


图3 体积收缩率与体积密度的线性关系

Fig. 3 The linear relationships between volume shrinkage rate and volume density

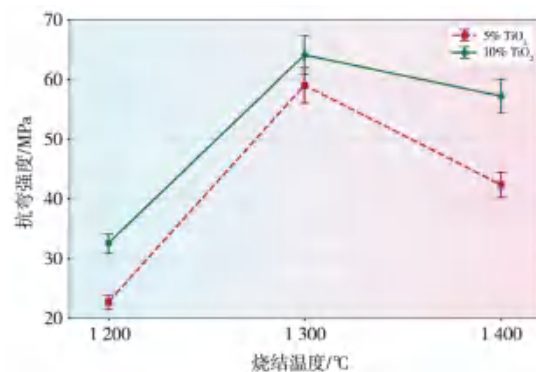


图4 抗弯强度的变化规律

Fig. 4 The variation of the flexural strength

析出,与基体形成残余应力场,通过裂纹偏转与微裂纹增韧机制协同提升材料的抗弯强度,使性能达到峰值。当温度升至1 400 ℃时,过高的烧结温度会导致 Al_2O_3 晶粒异常长大,同时过量液相会破坏基体晶界结构,使材料内部产生粗大晶粒与晶界缺陷,最终导致抗弯强度明显下降。10wt.% TiO_2 陶瓷液相含量更充足,致密化程度更高,且第二相增韧效果更显著,因此各温度下均表现出优于5wt.% TiO_2 陶瓷的抗弯强度。

2.2 物相组成

图5为不同 TiO_2 含量的陶瓷在不同烧结温度下的XRD表现。其中图5(a)为5wt.% TiO_2 陶瓷,图5(b)为10wt.% TiO_2 陶瓷。两组陶瓷的主要物相为方石英、硅线石、刚玉、低温石英以及锆石。不同的是5wt.%组中出现了硅酸钇相,10wt.%组中则出现了金红石相,这是由于 TiO_2 的掺杂导致。

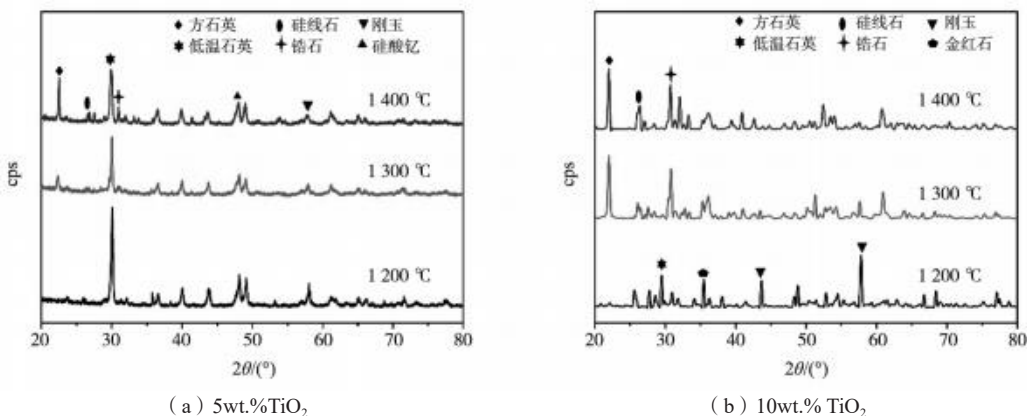


图5 不同 TiO_2 含量陶瓷素坯烧结后的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of ceramic green bodies with different TiO_2 contents after sintering

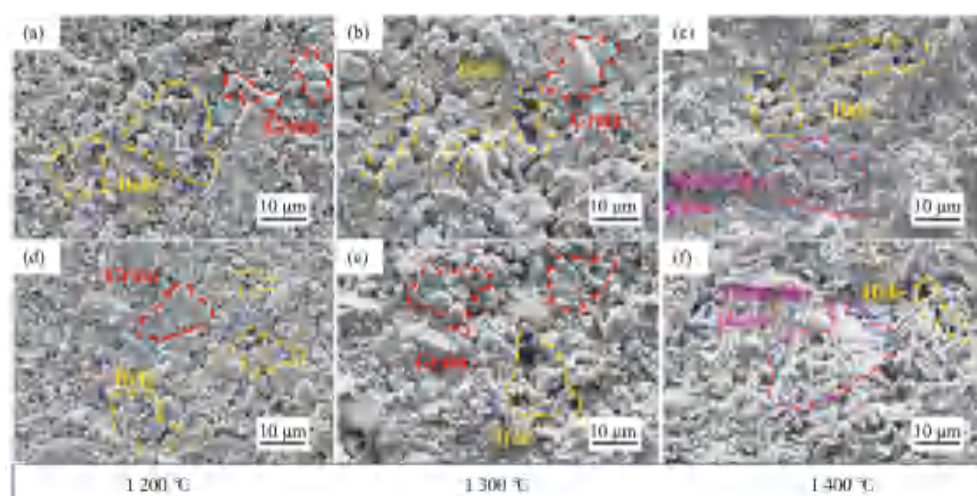
2.3 微观结构

图6为不同 TiO_2 掺量陶瓷在1 200 ℃、1 300 ℃和1 400 ℃烧结后的SEM照片,其中图6(a、d)对应1 200 ℃,图6(b、e)对应1 300 ℃,图6(c、f)对应1 400 ℃;图6(a-c)为5wt.% TiO_2 掺量,图6(d-f)为10wt.% TiO_2 掺量。1 200 ℃时,两组陶瓷均呈现松散的颗粒堆积形貌,烧结颈发育不完全,颗粒间充斥着大量不规则连通气孔。5wt.% TiO_2 陶瓷中颗粒离散分布,气孔尺寸不均且连通性强;10wt.% TiO_2 陶瓷则因液相提前形成,颗粒出现明显团聚,烧结颈初步连接,气孔开始向球形收缩,显示出更优的初期致密化能力。1 300 ℃时,两组陶瓷的烧结颈均发展为连续网状结构,颗粒边界逐渐模糊,气孔大幅收缩并球化,数量显著减少。相比之下,10wt.% TiO_2 陶瓷的烧结颈

随着烧结温度从1 200 ℃升高至1 400 ℃,两组陶瓷的衍射峰强度都持续增强,峰形更加尖锐,结晶度随温度升高而不断提升。在温度达到1 300 ℃时,10wt.% TiO_2 组的衍射峰强度较高,抗弯强度达到峰值,与该温度下结晶完善、结构致密的微观特征相呼应。当温度升高100 ℃时,衍射峰强度虽进一步增强,但抗弯强度出现下降。这是由于晶粒过度粗化以及高温下液相量增多导致的晶界弱化^[17]。

根据图5(a)、(b)两组图的对比,相同烧结温度下10wt.%组的衍射峰强度整体高于5wt.%组,峰形更尖锐,其结晶度更高,正说明了10wt.%组的体积密度更高、开孔率更低。高 TiO_2 含量中出现了金红石相特征峰,而低含量的样品未检测出。 TiO_2 的引入促进了致密化,提升了结晶程度。而过量的 TiO_2 以金红石相形式少量析出,作为第二相颗粒通过裂纹偏转、微裂纹增韧及晶界钉扎等提升抗弯强度^[18]。

更为粗壮,气孔分布更均匀,晶粒融合程度更高,微观结构远优于5wt.% TiO_2 陶瓷,这与该温度下力学性能达到峰值的测试结果高度一致。1 400 ℃时,微观结构呈现显著差异。5wt.% TiO_2 陶瓷中局部出现晶粒异常长大,残留少量半封闭气孔,结构均匀性下降;10wt.% TiO_2 陶瓷中则大量生成针状硅线石柱状晶,这些晶体交织形成三维网络,有效包裹并支撑基体,在一定程度上补偿了晶粒粗化带来的性能损失。尽管两组陶瓷在1 400 ℃时抗弯强度均较1 300 ℃有所下降,但10wt.% TiO_2 陶瓷仍保持较高的强度水平(59.55 ± 2.98) MPa,这与其更均匀的微观组织及硅线石柱状晶的增韧作用密切相关。 TiO_2 掺量与烧结温度对陶瓷微观结构具有协同调控效应。1 300 ℃是实现高致密化与结构均匀性的适宜烧结温度,而10wt.% TiO_2 掺量通过促进液相烧结



(a、d) 1 200 °C; (b、e) 1 300 °C; (c、f) 1 400 °C; (a-c) 5wt.%TiO₂; (d-f) 10wt.%TiO₂

图6 不同TiO₂掺量陶瓷在不同烧结温度下的SEM形貌图

Fig. 6 SEM morphological diagrams of the ceramics with different TiO₂ contents under various sintering temperatures

与硅线石柱状晶生长，显著优化了陶瓷型芯的微观结构。

3 结论

(1) 烧结温度的调控作用：随着温度从1 200 °C升至1 300 °C，两组陶瓷的收缩率均明显增大、体积密度显著提升、开气孔率持续降低，抗弯强度大幅提高。其中5wt.%TiO₂陶瓷抗弯强度由(22.72 ± 1.14) MPa提升至(61.92 ± 3.10) MPa，10wt.%TiO₂陶瓷由(35.91 ± 1.80) MPa提升至(65.46 ± 3.27) MPa；当温度进一步升至1 400 °C时，两组陶瓷抗弯强度均出

现不同程度下降。综合致密化与力学性能变化规律表明，1 300 °C为本体系的最优烧结温度，此时物相结晶最完善、微观结构最致密，与性能峰值高度协同。

(2) TiO₂掺量的优化效应：在相同烧结温度下，10wt.%TiO₂陶瓷的收缩率更高、密度更大、气孔率更低，抗弯强度始终优于5wt.%陶瓷。即使在1 400 °C易出现晶粒粗化的条件下，10wt.%TiO₂陶瓷仍保持(59.55 ± 2.98) MPa的较高强度。这是由于TiO₂形成的低熔点液相促进了传质与粘结，抑制高温晶粒异常长大，使陶瓷在全温度区间均具有更均匀稳定的微观结构与更优力学性能。

参考文献：

- [1] Yu Xiaopeng, Jiang Wenming, Wang Yunxia, et al. Preparation of soluble ceramic cores via additive manufacturing technology: a review [J]. China Foundry, 2025, 22 (5) : 507–518.
- [2] Qin Yi, Sun Xinsheng, Cheng Yani, et al. Boosting the collapse performance of wax-binder-free silica based ceramic core via adding nano-alumina sol modified fused silica powder [J]. J Sol-Gel Sci Technol, 2024, 111 (3) : 659–670.
- [3] 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.
- [4] Nai Xin, Zhao Shuai, Wang Peng, et al. Solid-state transformation composite filler: a new strategy to strengthen ceramic/metal joint [J]. Materials & Design, 2024, 243: 113040.
- [5] Zhang Qiang, Xuan Weidong, Song Haorui, et al. Preparation of silica-based ceramic cores with low shrinkage and improved flexural strength regulated by metallic Zr powders [J]. Ceramics International, 2025, 51 (19) : 27164–27175.
- [6] Huang Qiqi, Chen Chaoyue, Yin Yuhao, et al. Influence of final sintering temperature on properties of nano-ZrO₂ reinforced SiO₂-based ceramic cores via stereolithography additive manufacturing [J]. China Foundry, 2025, 22 (5) : 519–533.
- [7] Li Xiang, Su Haijun, Dong Dong, et al. Vat photopolymerization 3D printing of ceramic cores: advances, challenges, and prospects [J]. China Foundry, 2025, 22 (5) : 493–506.
- [8] Qin Qing, Xiong Gang, Han Lin, et al. Enhancing rheology and mechanical properties of DLP 3D-printed Si₃N₄ materials via composition optimization and gas-pressure sintering [J]. Int J Miner Metall Mater, 2025, 32 (5) : 1220–1233.
- [9] Zhao Jianwei, Gong Xiaolong, Xiao Xiongjie, et al. Effect of Al₂O₃-SiO₂ mass ratio and sintering temperature on the properties of water-soluble salt-based ceramic cores formed by binder jetting [J]. Ceramics International, 2024, 50 (24) : 55816–55827.
- [10] She Wentan, Liu Yansong, Liu Yongsheng, et al. Alumina-based ceramic cores with high porosity and flexural strength fabricated via DLP 3D-printing [J]. Ceramics International, 2025, 51 (20) : 30573–30582.

- [11] Xiang Zheng, Liu Yansong, Liu Yongsheng, et al. Digital light processing 3D-printing alumina-based ceramic core with high porosity and available strength via adjusting sintering procedures [J]. *Int J Applied Ceramic Tech*, 2025, 22 (5) : e15164.
- [12] 许西庆, 樊嘉显, 牛书鑫, 等. 3D打印氧化硅陶瓷型芯的各向异性调控及高温强化性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50 (9) : 2422–2429.
- [13] Yu Longhao, Ren Zhongkan, Qiao Zhuhui, et al. Advanced ceramics via digital light processing: performance enhancement and potential applications [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2025, 108 (11) : e70062.
- [14] Ilatovskaia M, Fabrichnaya O. Liquid immiscibility and thermodynamic assessment of the Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2 system [J]. *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2022, 43 (1) : 15–31.
- [15] 江瑜华, 张小珍, 谭丽, 等. TiO_2 对 Nb_2O_5 低膨胀陶瓷的烧结性、力学强度和抗热震性能的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2019, 48 (6) : 1100–1104.
- [16] Yuan Qi, Wang Sen, Liu Gaobin, et al. Effect of Li_2CO_3 - Bi_2O_3 doping on the low-temperature sintering, structure, and dielectric and mechanical properties of MgO-TiO_2 (w) ceramics [J]. *Ceramics International*, 2023, 49 (18) : 30224–30229.
- [17] 冶银平. 无压烧结过程中氧化物纳米陶瓷致密化与晶粒长大的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2005.
- [18] Mysen B. High-pressure and high-temperature titanium solution mechanisms in silicate-saturated aqueous fluids and hydrous silicate melts [J]. *American Mineralogist*, 2012, 97 (7) : 1241–1251.