熔融石英级配对光固化制备陶瓷型芯性能的影响

顾　玥[1, 2]，段文艳[1, 2]，白镜琳[3]，刘兵山[1, 2]，王　功[1, 2]

（1. 中国科学院空间应用工程与技术中心，北京 100094；2. 中国科学院太空制造技术重点实验室，北京 100094；3. 中国船舶集团有限公司系统工程研究院，北京 100080）

摘要：作为航空发动机空心涡轮叶片的重要部分，陶瓷型芯成为现代工业制造技术的核心要素之一。与热压注成形方式相比，光固化技术制备的硅基陶瓷型芯仍存在抗弯强度低、收缩率大等问题。本课题对陶瓷浆料配方进行深入研究，探索熔融石英粉体级配对浆料流动性和固化特性的影响规律，对级配后的浆料打印成形后进行了高温烧结，并对烧结后型芯的微观结构、元素分布和相组成进行分析，获得适配光固化工艺的熔融石英粉体级配策略。当熔融石英粉 Si-A（粒径为5.8 μm）与 Si-B（粒径为21 μm）按7∶3比例复配时，烧结后陶瓷型芯的收缩率、力学性能均可满足实际使用要求。研究结果对光固化技术制备陶瓷型芯的性能优化具有重要参考价值。

关键词：陶瓷型芯；二氧化硅；光固化；粒径级配

中图分类号：TG221；TG249.5　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1096-09

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0140

Influence of Fused Quartz Particle Gradation on the Properties of Ceramic Cores Fabricated via Stereolithography

GU Yue[1, 2], DUAN Wen-yan[1, 2], BAI Jing-lin[3], LIU Bing-shan[1, 2], WANG Gong[1, 2]

(1. Technology and Engineering Centre of Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Space Manufacturing Technology (SMT), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. China State Shipbuilding Corporation Limited, Systems Engineering Research Institute, Beijing 100080, China)

Abstract: As an important part of the hollow turbine blades of aero-engines, ceramic cores have become one of the core elements of modern industrial manufacturing technology. Compared with the hot - injection molding method, the silica-based ceramic cores fabricated via the stereolithography technology still have problems such as insufficient flexural strength and excessive sintering shrinkage. In this project, an in-depth study was carried out on the formulation of the ceramic slurry, investigating the influence rules of the gradation of fused quartz powder on the fluidity and curing characteristics of the slurry. The graded slurries were printed and subsequently subjected to high-temperature sintering, and the microstructure, element distribution and phase composition of the sintered cores were analyzed, and a gradation strategy of fused quartz powder suitable for the stereolithography process was obtained. When the fused quartz powder Si-A (particle size of 5.8 μm) and Si-B (particle size of 21 μm) are compounded in a ratio of 7∶3, the shrinkage rate and mechanical properties of the sintered ceramic core can meet the actual use requirements. This study provides a significant reference for the performance optimization of stereolithography-fabricated ceramic cores.

Key words: ceramic core; silicon dioxide; stereolithography; particle size gradation.

作为空心精密复杂铸件的重要部分，陶瓷型芯成为现代工业制造技术的核心要素之一[1-6]。陶瓷型芯通常是通过热压注成形来制造的[7]。然而，受模具限制，热压注成形已达到其最大几何复杂度，难以满足复杂结构陶瓷型芯制备的需求[8-10]。光固化三维打印技术具有独特能力，包括设计灵活性、可定制性、无模具制造，弥补了传统热压注工艺在复杂型芯材料制备中的局限性[11-17]。因此，采用光固化技术可制造具有高

基金项目：国家自然科学基金（51802319）；中国科学院青年创新促进会（2021160）。

收稿日期：2026-06-23 收到初稿，2026-07-01 收到修订稿。

作者简介：顾玥（1995-），女，博士生，研究方向为陶瓷型芯的增材制备技术。E-mail：17888822903@163.com

通信作者：段文艳，副研究员，硕士生导师。E-mail：dwy@csu.ac.cn

引用格式：顾玥，段文艳，白镜琳，等. 熔融石英级配对光固化制备陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造，2026，75（10）：1096-1104.

Gu Yue，Duan Wenyan，Bai Jinglin，et al. Influence of fused quartz particle gradation on the properties of ceramic cores fabricated via stereolithography [J]. Foundry，2026，75（10）：1096-1104.

性能、高精度、高抗弯强度和更低生产成本的陶瓷型芯，成为快速制造高质量陶瓷型芯的最佳途径[18-21]。符合要求的陶瓷型芯应具备下述特征[22-24]：抗弯强度在20~30 MPa，以抵御高温浇注过程中产生的外部压力及损伤；气孔率约30%，有助于后期的脱芯过程；具备较小的热膨胀系数，浇注时有较小的变形量。

目前，关于光固化制备二氧化硅陶瓷型芯已有大量报道[25-27]。李琴等利用SLA光固化成形技术，使用粒度在10 μm以内的氧化硅粉末作为原材料，采用不同的脱脂烧结方式后试样仍发生变形[28]。Kim等研究了硅基陶瓷型芯的脱脂升温速率对型芯制品的影响，以0.2 ℃/min的升温速率脱脂时，可减少陶瓷型芯表面的膨胀现象[29]。胡可辉等人采用DLP光固化打印方式，以55vol.%的氧化硅陶瓷浆料制备陶瓷型芯，烧结后型芯表面粗糙度为8.51 μm[30]。

为了抑制成形过程中的缺陷以及提高硅基陶瓷型芯强度并降低烧结收缩率，Li等研究了莫来石纤维含量对硅基陶瓷型芯力学性能和收缩率的影响规律。莫来石纤维能显著降低收缩率并提高型芯的高温抗弯强度[31]。Niu等通过在熔融石英中加入6wt.%氧化铝降低硅基型芯的各向异性，同时控制加入方石英颗粒的尺寸可以有效提高硅基型芯的室温以及高温抗弯强度[13，32]。Pan等通过在硅基陶瓷型芯中加入氧化锆，以5∶3∶2的比例混合粗、中、细熔融二氧化硅粉末，有效改善了样件的高温抗弯强度[33]。Li通过引入$ZrSiO_4$和熔融石英生成网络结构，在保持高孔隙率的同时显著提高了型芯的抗弯强度。与热压注成形方式相比，光固化技术制备的硅基陶瓷型芯仍存在抗弯强度低和收缩率大等问题，需要对陶瓷浆料配方进行深入研究[34]。

在传统硅基陶瓷型芯的研究中，单一粒径的熔融石英粉体难以实现最优配比，因此需采用多粒径级配的熔融石英粉体进行调控[35]。不同于传统注塑成形工艺，光固化成形工艺对陶瓷浆料流动性、固含量以及颗粒分散均匀性要求更为严苛，传统适配于注塑工艺的粉体级配方案无法直接套用，亟需针对性探索适配光固化工艺的熔融石英粉体级配策略。基于此，本课题对光固化硅基陶瓷型芯配方中的熔融石英进行级配研究，将调控级配后的浆料打印成形后进行高温烧结，并对烧结后型芯的微观结构、元素分布、相组成进行分析。

1 试验材料及方法

1.1 试验原料

本研究所用材料如表1所示。

表1 试验所用材料
Tab. 1 Materials used in the test

材料名称	用途	厂商
Al_2O_3（500 nm）	陶瓷粉体	中航纳米技术发展有限公司
熔融石英（5.8 μm）	陶瓷粉体	江苏乾度制造高科技有限公司
熔融石英（21 μm）	陶瓷粉体	江苏乾度制造高科技有限公司
混合树脂	光敏树脂	江苏乾度制造高科技有限公司
SP710	分散剂	东莞市鑫博诚环保材料有限公司
DN2024	增稠剂	东莞市鑫博诚环保材料有限公司
IRAGACURE 819	光引发剂	福斯曼科技（北京）有限公司
蓝光吸收剂 47	光抑制剂	福斯曼科技（北京）有限公司

1.2 试验方法

在混合树脂基体中分别加入熔融石英粉体和氧化铝粉体，以Iragacure 819为光引发剂，添加量为树脂质量的0.5wt.%，引发树脂单体体系发生光聚合反应。为改善陶瓷粉体在树脂基体中的分散稳定性，加入1wt.%~5wt.%粉体质量的分散剂。为了调控浆料体系粘度，添加占粉体总质量2wt.% 的增稠剂。将配制好的混合料置于均质机中，在1 500 r/min 条件下搅拌3~5次，实现初步均匀混合。再采用三辊研磨机以30 μm辊距研磨2~3遍，最终制得熔融石英陶瓷光固化浆料。

采用CeraStation160高精度陶瓷立体光刻打印机进行浆料固化成形。将打印模型导入成形设备，把制备好的陶瓷浆料加入料槽，依据浆料光聚合特性优化并设定曝光时间、曝光强度、分层厚度等工艺参数：固定曝光时间2 s、打印层厚75 μm，通过逐层光固化成形制备陶瓷素坯，成形结束后采用清洗剂清洗素坯表面残留浆料，得到洁净完整的陶瓷生坯。

1.3 分析测试

（1）X射线衍射仪（X-Ray Diffractometer，XRD）测试：采用Cu为靶材（Cu Kα=0.154 nm），扫描角度设置为5°~90°，扫描速度设置为8（°）/min，分析不同烧结温度及材料组分下的物相组成。

（2）激光粒度仪：采用济南微纳颗粒仪器股份有限公司的激光粒度分析仪Winner2000ZDE测试粉体的粒径分布。

（3）开气孔率测试：采用阿基米德法测量热解后陶瓷材料的开气孔率。首先称量干燥陶瓷样品的质量m_1，然后将试样放入真空箱中进行抽真空操作；抽真空操作完成后，向试样中缓缓加入蒸馏水，将陶瓷样品完全淹没，并于真空下保持30 min；随后称量其在蒸馏水中的质量m_2，然后将陶瓷样品取出，用蘸满蒸馏

水的纸巾小心擦拭陶瓷样品表面多余的水分，称量其吸满水后的质量m_3。每组测量5个样品以得到陶瓷样品开气孔率的平均值。根据公式（1）计算出陶瓷材料的开气孔率。其中，P为陶瓷材料的开气孔率；m_1为干燥陶瓷样品的质量；m_2为陶瓷样品抽真空吸满水后在蒸馏水中的质量；m_3为陶瓷样品吸满蒸馏水后在空气下的质量。

$$P=\frac{m_3-m_1}{m_3-m_2}\times 100\% \qquad (1)$$

（4）室温抗弯强度测试：采用三思纵横UTM5305万能力学试验机测量陶瓷材料的弯曲强度；样条尺寸为100 mm × 10 mm × 4 mm，所有的测试项目均测量5个样品以获得力学性能的平均值。

2 结果与讨论

图1为陶瓷颗粒级配堆积模型，由此看出，实际打印成形的陶瓷型芯素坯由大小相间的不同组分陶瓷粉末颗粒组成，通过改变不同粒径的颗粒粉末来实现不同的粒径级配方式，使硅基陶瓷型芯样件达到最优性能。

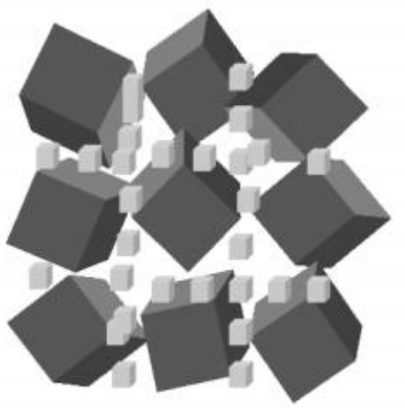
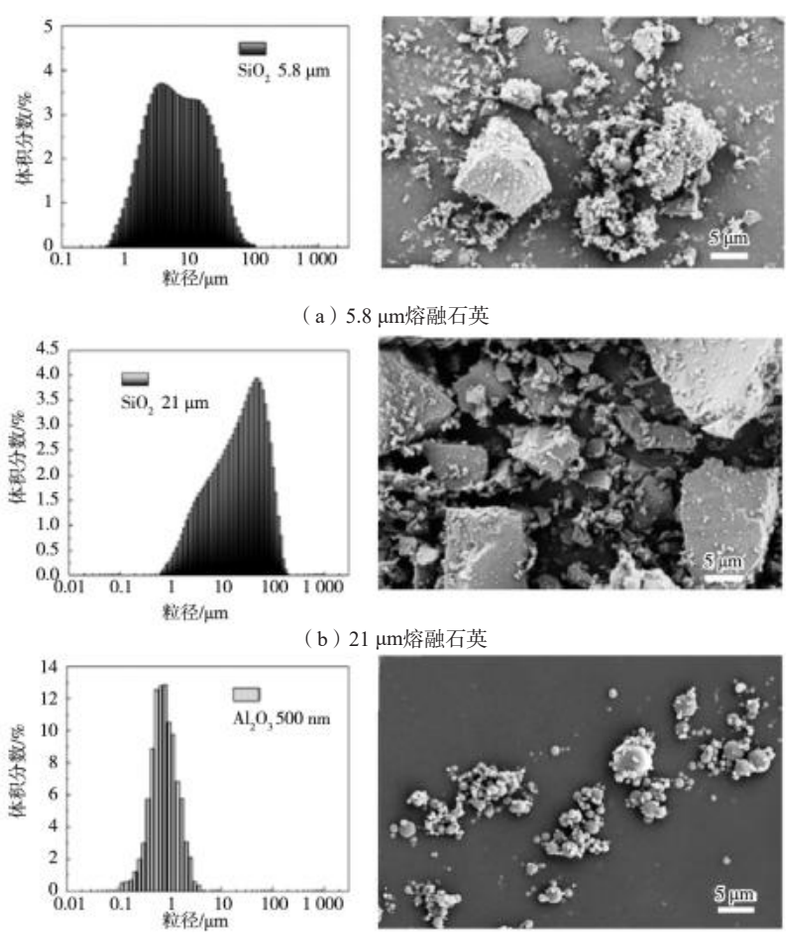


图1 陶瓷颗粒级配堆积模型

Fig. 1 Particle size distribution packing model for the ceramics

2.1 光固化浆料的固化性能

光固化浆料用陶瓷粉体的粒径分布及电镜图如图2所示。熔融石英及氧化铝陶瓷粉体XRD分析结果如图3所示。其中Si-A 为5.8 μm的熔融石英，Si-B为21 μm的熔融石英，Al-A 为500 nm的氧化铝粉体。由图3（b）的XRD结果可以看出，熔融石英为非晶态。



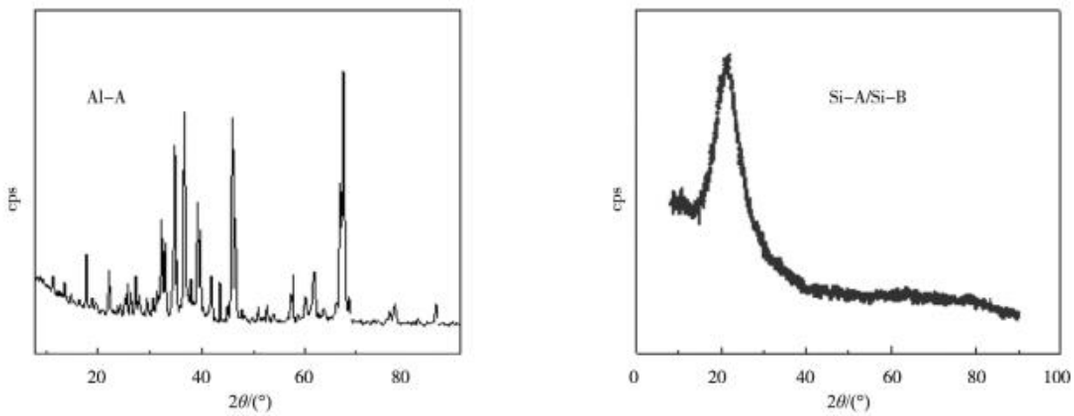
（a）5.8 μm熔融石英

（b）21 μm熔融石英

（c）500 nm Al_2O_3

图2 粉体粒径分布及电镜图

Fig. 2 The powder particle size distributions and the electron microscopy images



（a）氧化铝粉体　　（b）熔融石英

图3　氧化铝粉体和熔融石英XRD测试图

Fig. 3 XRD patterns of the alumina powder and the fused silica

熔融石英具有复杂的多晶形态，方石英对硅基陶瓷型芯的高温稳定起到重要作用。如图4所示，当温度上升，石英在获取充足的能量后发生反玻璃化转变，从而形成方石英。方石英在降温过程中会发生晶型转变，由α-方石英向β-方石英转变，在此过程中会有2.8%的体积收缩，导致微裂纹在型芯内部产生，影响硅基陶瓷型芯的抗弯强度，因此，控制方石英的物相转变是保证型芯强度的关键。

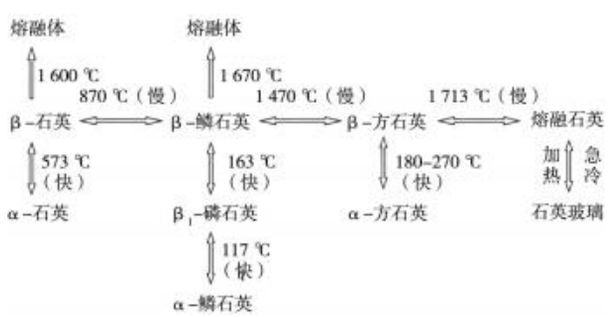


图4　熔融石英玻璃的多种晶型转变

Fig. 4 Multiple polymorph transformations of the fused silica glass

熔融石英颗粒级配方案如表2所示。将小粒径Si-A与大粒径Si-B熔融石英陶瓷粉体进行配比，设计S100、S70、S50、S30、S0五组样品；其中S100全部采用小粒径Si-A熔融石英，S0则为纯大粒径Si-B熔融石英。配方中除了石英外均加入粒径为500 nm的球形氧化铝，加入量为陶瓷粉体的15wt.%。

不同配比浆料的固化深度测试结果如图5所示。各组级配配方对应的浆料固化深度处于200~220 μm区间。结果表明，熔融石英粒径对硅基陶瓷型芯浆料的固化深度影响较小。究其原因，熔融石英与光敏树脂折射率相近，使得浆料整体固化深度本就较高，因此粉末粒径的变化对浆料的固化深度影响不显著。

表2　熔融石英级配配方

Tab. 2 The fused silica grading formula　　w_B/%

样品号	Si-A	Si-B	Al-A
S100	85	0	15
S70	59.5	25.5	15
S50	42.5	42.5	15
S30	25.5	59.5	15
S0	0	85	15

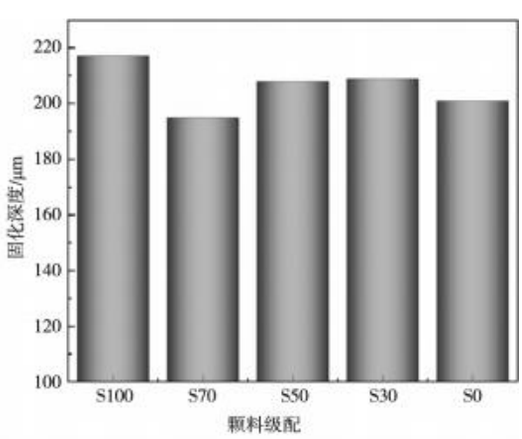
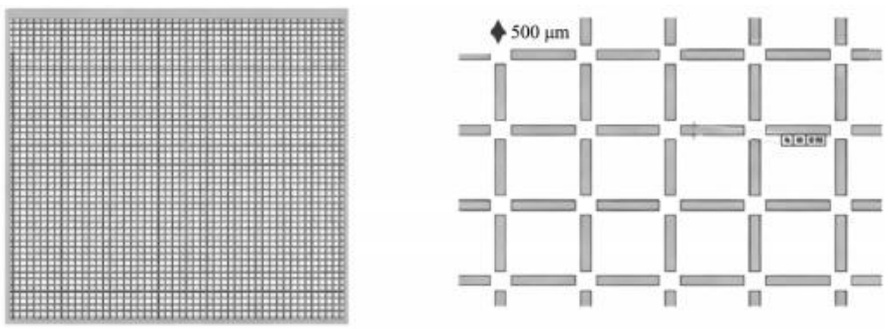


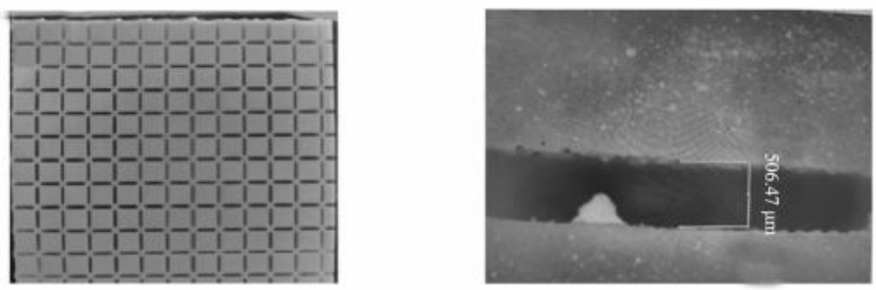
图5　熔融石英浆料固化深度测试

Fig. 5 Curing depth test of the fused silica slurries

以S50浆料为研究对象开展打印精度验证，该浆料可稳定制备网格中心间距500 μm的周期性方格微阵列。微阵列设计模型及单元放大视图如图6（a）、（b）所示，光固化成形样件宏观形貌如图6（c）所示，结构完整、网格轮廓规整。借助光学显微镜完成网格实际尺寸定量测试，测量结果如图6（d）所示，实测尺寸与理论设计值吻合。试验结果表明，采用光固化打印工艺可实现高精度微结构制造，打印尺寸与模型设计参数基本一致。



（a）模型图　（b）模型局部放大图



（c）打印件实物照片　（d）打印件光学显微镜图

图6　阵列结构设计模型、打印实物及显微尺寸表征

Fig. 6 Array structure design model，printed physical object，and microscopic dimension characterization

2.2　光固化素坯的热分解行为

为了考察熔融石英陶瓷素坯在煅烧过程中的热力学变化，采用德国Netzsch-STA409PC型热失重分析仪在空气气氛下进行热重-差热分析测试，升温速率为10 ℃/min。图7给出了陶瓷素坯的TG-DTG曲线。从曲线中可以看出，树脂在150~450 ℃之间分解，600 ℃之后质量基本保持不变。

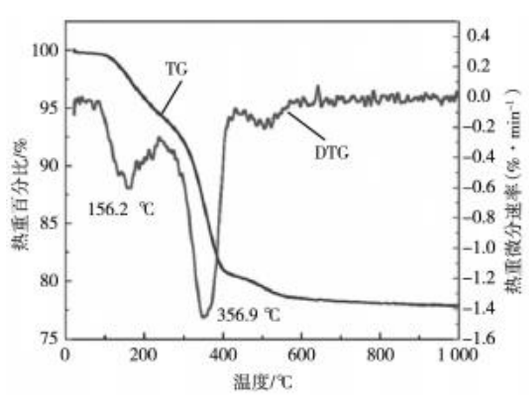


图7　打印后陶瓷坯体的TG-DTG曲线

Fig. 7 TG-DTG curves of the printed ceramic green body

由TG-DTG曲线可以得出，素坯的脱脂温度处于150~500 ℃之间。因此，素坯的高温热处理分为三个阶段：（1）脱脂阶段，光敏树脂在150~500 ℃之间分解，从而完成样品的脱脂过程；（2）预烧结阶段，脱脂后用以固定粉体颗粒的树脂被移除，因此需要进行预烧结以防止结构坍塌；（3）烧结阶段，在1 300 ℃进行烧结。脱脂曲线如图8（a）所示，烧结曲线如图8（b）所示。

2.3　烧结后陶瓷型芯的性能分析

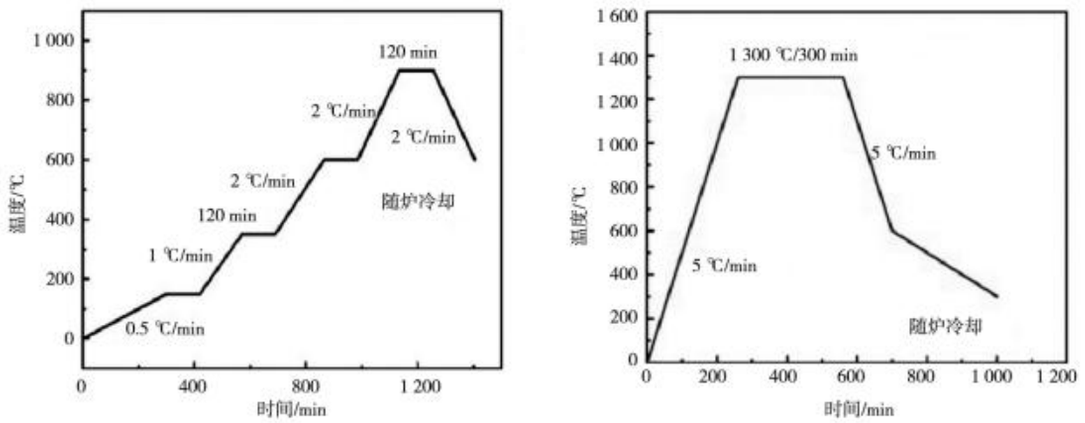
陶瓷样品烧结后的收缩率如图9所示。可以看出随着小粒径 Si-A熔融石英粉的增多，收缩率增大。当材料体系中均为粗粉时，烧结收缩率最低，小于1%；当材料体系均为细粉时，收缩率最高，达到5.5%。细粉与粗粉相比，具有更高的表面能，在烧结过程中活化能也就越大，能够促进烧结反应进行，导致烧结后样品的收缩率更大。陶瓷型芯烧结时属于固相烧结，根据扩散传质的双球模型，如公式（2）所示[36]。

$$\frac{\Delta L}{L_0}=\frac{\rho}{r}=\frac{x^2}{4r^2} \qquad (2)$$

式中：ΔL为烧结收缩值，L_0为烧结前两球中心距，ρ为表面曲率半径，x为颈部半径，r为球粒的初始半径。

由公式（2）可知，陶瓷型芯的粒度越细，收缩率越大，因此在陶瓷型芯的制备中，型芯粉体的粒径选择很重要。

图10为不同级配样品对应的开气孔率和密度。随着材料体系中大粒径 Si-B熔融石英粉体的增加，样品的开气孔率显著增加，密度显著降低。当大颗粒粉体增多时，颗粒间孔隙增多，开气孔率增加，而小粒



（a）脱脂曲线　　（b）烧结曲线

图8　脱脂烧结工艺

Fig. 8 The debinding and sintering processes

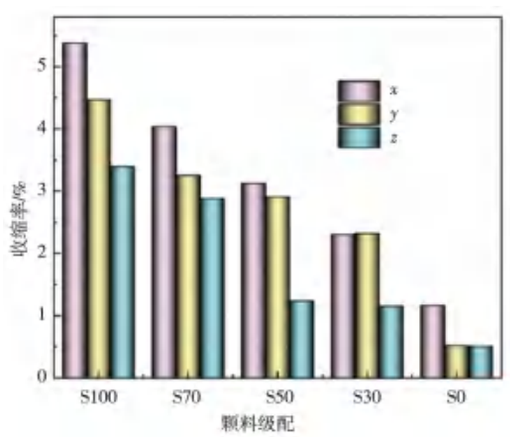


图9　不同级配样品烧结收缩率

Fig. 9 Sintering shrinkages of the samples with different grades

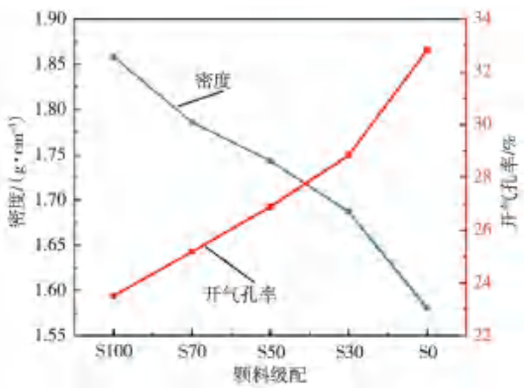


图10　不同级配样品开气孔率和密度

Fig. 10 Open porosity and density of the samples with different grades

径 Si-A的加入，促进烧结致密化，减少了颗粒间的孔隙。随着熔融石英浆料中细粉比例的增加，样品密度上升，由1.57 g/cm^{3}增加到1.85 g/cm^3，开气孔率逐渐降低，由33%降低至24%。

图11 为不同级配的型芯样品烧结后的断面电镜图，由S100至S0，颗粒堆积逐渐松散。S100由Si-A细粉组成，细粉的加入导致颗粒间结合明显，颗粒之间

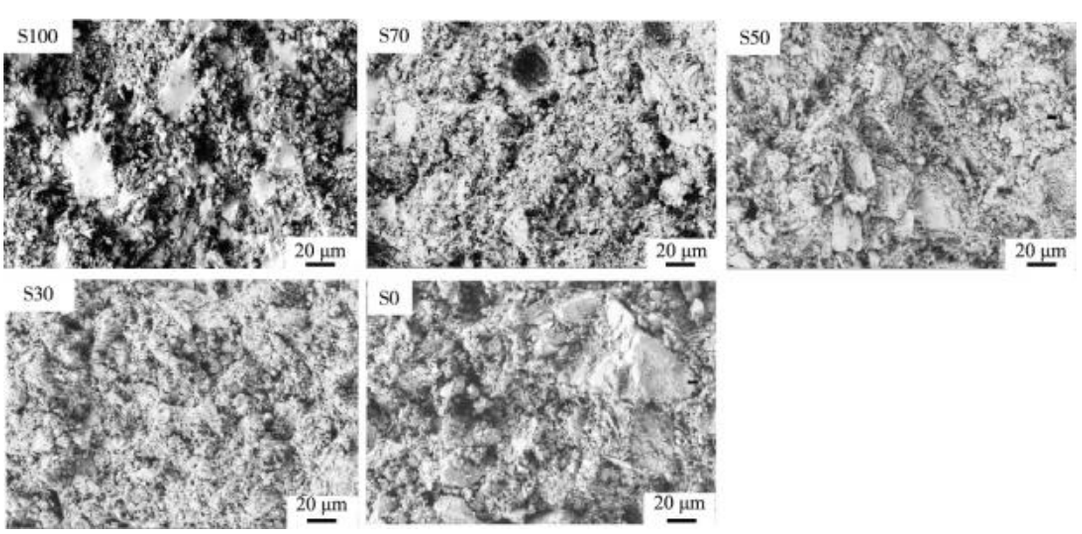


图11　不同配比样品烧结后断面形貌SEM图

Fig. 11 SEM images of the cross-section morphologies of the samples with different ratios after sintering

连接最为紧密；加入的大颗粒构成了骨架，作为主体的小颗粒粉末填充在大颗粒构成的骨架之中，而S30和S0由于Si-B粗粉含量增多，开气孔率增大，颗粒堆积相对松散。

不同级配配方烧结后的XRD图谱如图12所示。熔融石英玻璃在高温下容易析出方石英，析晶过程包括形核过程和晶体生成过程。随着温度升高，析晶一般是从陶瓷颗粒表面开始，并且由于陶瓷颗粒的表面能存在，使得表面成核析晶占主导地位，从熔融石英颗粒表面析出α-方石英晶体。方石英易于在表面缺陷及杂质处形核，其形核速率按玻尔兹曼分布律计算，服从一级反应动力学方程式。晶核形成后会向周围延伸，继而产生向陶瓷颗粒内部扩散的行为，也就是方石英晶体在不断长大。根据公式（3）和（4）可以看出，随着陶瓷颗粒粒径减小，方石英形核速率增大。根据Johnson、Mehl和Avrami所提出的等温玻璃晶体动力学经典理论[7]，又称JMA方程，可以得到玻璃析晶的体积分数。

$$x=1-\exp\left[-(kt)^n\right] \quad (3)$$

$$k=v\exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \quad (4)$$

式中：x代表结晶体积分数，k代表动力学参数，n代表反应析晶机理指数，v代表频率因子，E代表析晶活化能，T代表温度，R代表气体常数。

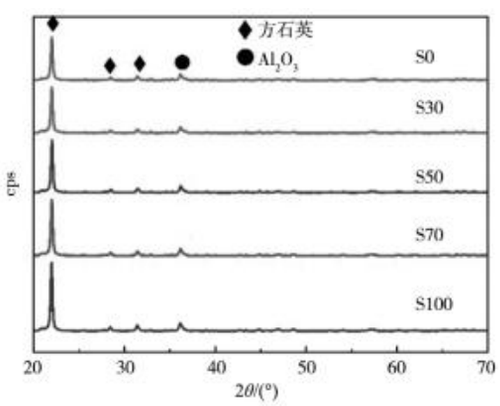


图12 不同级配样品的XRD图谱

Fig. 12 XRD patterns of the samples with different grades

因此，陶瓷粉料越细，表面能越高，其活性也越大，在方石英晶体形核时可降低成核生长势垒和析晶活化能，促进石英玻璃向方石英的转化。当颗粒粒度变小时，析晶活化能减小，晶体生长转为质点重排控制。因此，随着熔融石英中细粉的增加，样品中析晶速度也随之增大。

图13显示了各种级配配方对样品抗弯强度的影响，结果表明，随着细粉含量的提高，陶瓷型芯试样

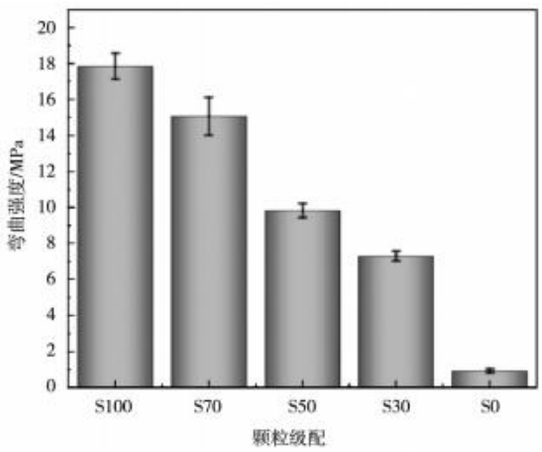


图13 不同级配样品和抗弯强度关系

Fig. 13 Relationships between different graded samples and flexural strengths

在室温下的强度也有所增加。细粉的增多使得熔融石英的烧结变得更为紧密，从而显著提升了其抗弯强度。硅基陶瓷型芯烧结时，烧结过程的驱动力主要来自于陶瓷粉体的表面能、多晶烧结体的能量差和陶瓷颗粒弯曲表面造成的压力差。经机械破碎和研磨的陶瓷粉料处于能量不稳定状态，能够促进烧结过程中粉末结合从而实现结构致密。随着陶瓷颗粒粒径减小，陶瓷颗粒的表面能增高，增大了粉体和烧结体之间的能量差，烧结推动力增大，颗粒之间的结合更加紧密，有助于提高烧结后的力学性能。此外，由于陶瓷粉体在弯曲的表面上存在压力差[36]。当陶瓷粉体密集堆积后，表面张力引起的压力差导致颗粒间仍然有许多微小的气孔，具体关系如公式（5）所示。

$$\Delta p=\gamma\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \quad (5)$$

式中：γ为粉末体表面张力；r_1和r_2为非球形曲面的两个主曲率。

附加在弯曲表面的压力与球形颗粒的曲率半径呈反比关系，这意味着，粉末越细小，由曲率半径产生的烧结动力就越强。因此，随着细粉的增多，试样的室温强度也会提高。

试验结果表明，配方全部采用小粒径熔融石英粉时，试样抗弯强度最优，可达17.9 MPa，但该组试样X向烧结收缩率为5.40%，较大的收缩形变不利于复杂结构陶瓷型芯的精度控制。当熔融石英粉体配方为S70时，室温抗弯强度为14.5 MPa，X、Y、Z方向收缩率分别为4.01%、3.25%、2.88%，开气孔率为25.5%，可以满足陶瓷型芯的使用需求。

图14为多类型精细多孔结构成形验证，包含微孔阵列和波纹薄壁等复杂拓扑构型的三维设计模型与烧

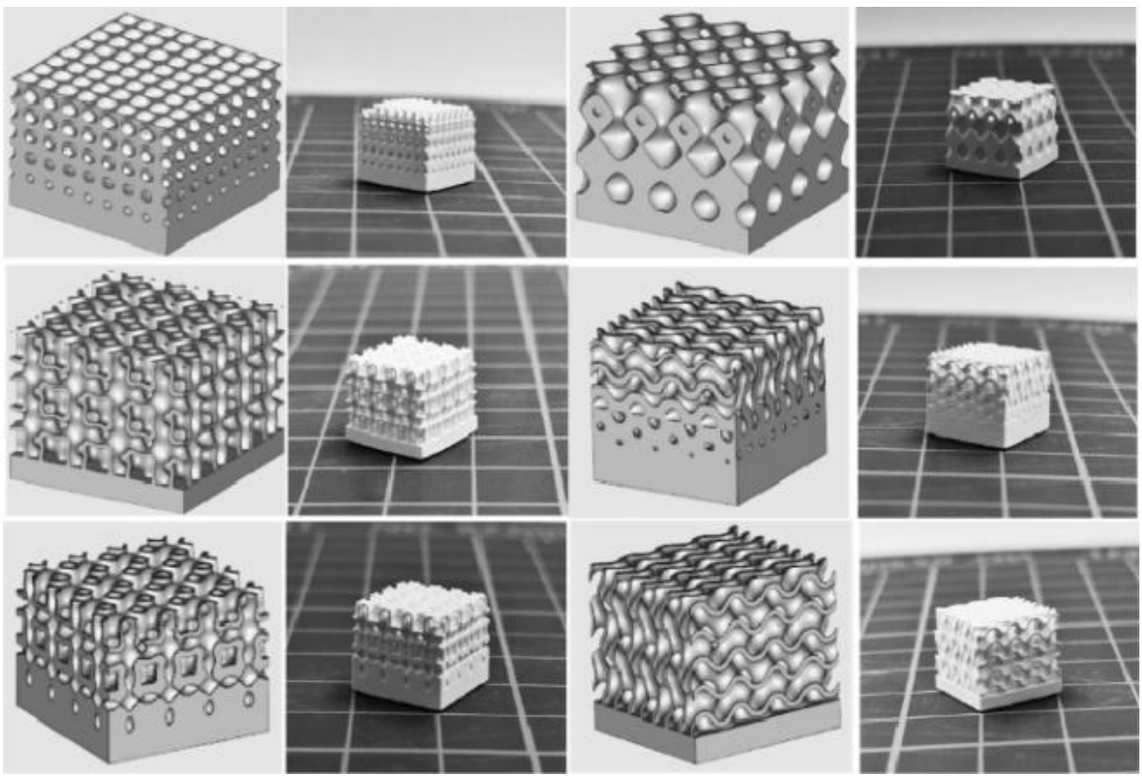


图14 精细多孔结构的模型与烧结后样品照片

Fig. 14 The models of intricate porous architectures and corresponding photographs of sintered specimens

结后样品的照片。观测结果表明，该陶瓷浆料可精准复现各类微尺度精细特征，经脱脂烧结处理后构件结构完整，证实此熔融石英陶瓷浆料适用于复杂精细多孔陶瓷构件的高精度无缺陷成形。

3 结论

（1）熔融石英的折射率与光敏树脂相近，不同配比下陶瓷浆料固化深度均在200~220 μm左右，熔融石英粒径配比变化对硅基陶瓷型芯浆料的固化深度影响较小。

（2）随着小粒径Si-A熔融石英粉的增多，烧结后陶瓷型芯的收缩率增大，开气孔率随之变小，弯曲强度逐渐增大。

（3）陶瓷颗粒粒径越小，陶瓷颗粒的表面能越高，烧结推动力增大，颗粒之间的结合更加紧密，有助于提高烧结后的力学性能。

（4）1 300 ℃烧结，熔融石英粉Si-A与Si-B配比为7∶3的硅基陶瓷型芯的综合性能最佳，*X*、*Y*、*Z*方向收缩率分别为4.01%、3.25%、2.88%，开气孔率为25.5%，室温抗弯强度为14.5 MPa。

参考文献：

[1] Wong D T，Ngai E W. The impact of advanced manufacturing technology，sensing and analytics capabilities，and planning comprehensiveness on sustained competitive advantage：the moderating role of environmental uncertainty [J]. Int. J. Prod. Econ.，2023，265：109007.

[2] Liu X，Han X，Yin G，et al. Design and processing of gas turbine blades based on additive manufacturing technology [J]. Micromachines，2023，14（9）：1675.

[3] Li Q，Chen T，Liang J，et al. Manufacturing of ceramic cores：from hot injection to 3D printing [J]. J. Mater. Sci. Technol.，2023，134：95–105.

[4] Mu Y，Chen J，An X，et al. Defect control in digital light processing of high-solid-loading ceramic core [J]. Ceram. Int.，2022，48（19）：28739–28744.

[5] Niu Y，Jiang W，Yang L，et al. Preparation of low-cost high strength soluble ceramic cores using heavy calcium carbonate by binder jetting and vacuum impregnation [J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2023，43（16）：7714–7720.

[6] Yin Y，Wang J，Huang Q，et al. Influence of debinding parameter and nano-ZrO_2 particles on the silica-based ceramic cores fabricated by stereolithography-based additive manufacturing [J]. Ceram. Int.，2023，49（12）：20878–20889.

[7] Kim E H，Park H Y，Lee C，et al. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic core [J]. J. Mater. Res. Technol.，2020，9（3）：3348–3356.

[8] Wang X，Mei X，Wang X，et al. Picosecond laser trimming of ceramic cores with porous multi-scale particle microstructure [J]. Ceram. Int.，2022，48（6）：7593–7604.

[9] Zheng W，Wu J M，Chen S，et al. Improved mechanical properties of SiB_6 reinforced silica-based ceramic cores fabricated by 3D stereolithography printing [J]. Ceram. Int.，2022，48（15）：21110–21117.

[10] Ozkan B，Sameni F，Karmel S，et al. Binder stabilization and rheology optimization for vat-photopolymerization 3D printing of silica-based ceramic mixtures [J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2023，43（4）：1649–1662.

[11] Zhang L，Zeng Y，Yao H，et al. Fabrication and characterization of ZrO_2（3Y）/Al_2O_3 micro-ceramic gears with high performance by vat photopolymerization 3D printing [J]. Ceram. Int.，2024，50（3）：5187–5197.

[12] Li X，Liu Z，Niu S，et al. Controlled anisotropy in 3D printing of silica-based ceramic cores through oxidization reaction of aluminum powders [J]. Ceram. Int.，2023，49（15）：24861–24867.

[13] Niu S，Luo Y，Li X，et al. 3D printing of silica-based ceramic cores reinforced by alumina with controlled anisotropy [J]. J. Alloys Compd.，2022，922：166325.

[14] Wang B，Yang Y，Li X，et al. Enhancing forming precision and performance of silica-based ceramic cores via vat photopolymerization [J]. Virtual Phys. Prototyp.，2025，20（1）：2565476.

[15] Fei J，Rong Y，Zhu L，et al. Progress in photocurable 3D printing of photosensitive polyurethane：a review [J]. Macromol. Rapid Commun.，2023，44（18）：2300211.

[16] Li Q H，Liang J. Controlling the anisotropy behaviour of 3D printed ceramic cores：from intralayer particle distribution to interlayer pore evolution [J]. Addit Manuf. 2022，58：103055.

[17] Fan J，Li Q，Jin F，et al. High solid loading，low viscosity stereolithography 3D printing ceramic cores slurry [J]. Ceram. Int.，2023，49（24）：40705–40715.

[18] Zhang K，Dong X，Chen Y，et al. Influence of photosensitive hydroxy siloxane on the mechanical properties of silicon-based ceramic cores prepared by digital light processing [J]. Ceram. Int.，2025，51（3）：3394–3403.

[19] Sun X，Xu J，Zhang W，et al. Effects of polysiloxane and sintering atmosphere on phase evolution and mechanical behavior of ceramic cores fabricated by vat photopolymerization [J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2026：118414.

[20] Qu B Y，Li Q L，Liu S Q，et al. Controlling the cristobalite content，microstructure，and properties of vat photopolymerization 3D printed SiO_2-based ceramic cores by doping Fe_2O_3 [J]. Ceram. Int.，2025，51（12）：15535–15546.

[21] An X，Mu Y，Liang J，et al. Stereolithography 3D printing of ceramic cores for hollow aeroengine turbine blades [J]. J. Mater. Sci. Technol.，2022，127：177–182.

[22] An G S，Choi S W，Kim T G，et al. Amino-functionalization of colloidal alumina particles for enhancement of the infiltration behavior in a silica-based ceramic core [J]. Ceram. Int.，2017，43（1）：157–161.

[23] Liu X G，Li X，Tang D Z，et al. Effect of bimodal granularity distribution on the properties of silica-based ceramic cores [J]. Materials Science Forum，2017，898：1724–1731.

[24] Qin Y，Pan W. Effect of silica sol on the properties of alumina-based ceramic core composites [J]. Mater. Sci. Eng. A，2009，508（1–2）：71–75.

[25] Bae C J，Halloran J W. Influence of residual monomer on cracking in ceramics fabricated by stereolithography [J]. Int. J. Appl. Ceram. Technol.，2011，8（6）：1289–1295.

[26] Bae C J，Halloran J W. A segregation model study of suspension-based additive manufacturing [J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2018，38（15）：5160–5166.

[27] Cohen E，Menkin S，Lifshits M，et al. Novel rechargeable 3D-microbatteries on 3D-printed-polymer substrates：feasibility study [J]. Electrochim. Acta，2018，265：690–701.

[28] 李琴，张硕，赵代银，等. 3D打印空心叶片用氧化硅陶瓷型芯工艺及应用研究 [C]// 2019中国铸造活动周，湖北武汉，2019.

[29] Kim Y H，Yeo J G，Choi S C. The effect of fused silica crystallization on flexural strength and shrinkage of ceramic cores for investment casting [J]. J. Korean Ceram. Soc.，2016，53（2）：246–252.

[30] 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.

[31] Li X，Yao J S，Liu X G，et al. Microstructure and performance of fused silica-based ceramic core reinforced by mullite fiber [J]. Mater. Sci. Forum，2016，848：228–232.

[32] Niu S，Xu X，Li X，et al. Enhanced properties of silica-based ceramic cores by controlled particle sizes of cristobalite seeds [J]. Adv. Appl. Ceram，2019，118（7）：403–408.

[33] Pan Z，Guo J，Li S，et al. Experimental study on high temperature performances of silica-based ceramic core for single crystal turbine blades [J]. Ceram. Int.，2022，48（1）：548–555.

[34] Li Q，Liang J，Zhang Y，et al. Fused silica ceramic core based on network-structured zircon design via 3D printing [J]. Scr. Mater.，2022，208：114342.

[35] 安晓龙. 光固化增材制造一种高固含量硅基陶瓷型芯组织与性能研究 [D]. 沈阳：中国科学技术大学，2022.

[36] 陆佩文. 无机材料科学基础 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.