DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4245

莫来石纤维含量对激光选区烧结结合真空浸渗制备二氧化硅陶瓷型芯性能的影响

刘　珩[1,2],刘翰帝[1,2],张任重[1,2],吴甲民[1,2,3],闫春泽[1,2],文世峰[1,2],陈超越[4],任忠鸣[4],史玉升[1,2]
(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料加工与模具技术全国重点实验室,湖北 武汉 430074; 2. 增材制造陶瓷材料教育部工程研究中心,湖北 武汉 430074; 3. 温州 HUST 先进制造研究所 微波通信材料与设备重点实验室,浙江 温州 325035; 4. 上海大学 材料科学与工程学院 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室,上海 200444)

摘　要:二氧化硅(SiO_2)陶瓷型芯热膨胀系数低、烧结温度低,具有优异的酸碱浸出能力,是生产涡轮空心叶片的必要材料。传统工艺在成形陶瓷型芯时受到模具限制,部分复杂结构陶瓷型芯甚至难以制造,生产高质量复杂结构陶瓷型芯面临挑战。采用激光选区烧结技术(SLS)和真空浸渗工艺(VI)相结合的方法制备 SiO_2 陶瓷型芯。应用莫来石纤维作为增强相,分析了莫来石纤维对 SiO_2 晶粒烧结过程的干扰及其在层间的堆积所引发的分层现象,阐明了莫来石纤维含量对 SLS-VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯性能的影响规律,探究出当纤维含量为 1%(质量分数)时陶瓷型芯综合性能最好,孔隙率为 31.16%,室温抗弯强度为 15.23 MPa,高温抗弯强度为 22.91 MPa。

关键词:SiO_2 陶瓷型芯;激光选区烧结技术;真空浸渗工艺;莫来石纤维;力学性能

中图分类号:TG241　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)01-0039-06

Effect of Mullite Fiber Content on the Properties of Silica Ceramic Cores Prepared by Selective Laser Sintering Combined with Vacuum Infiltration

LIU Heng[1,2], LIU Handi[1,2], ZHANG Renzhong[1,2], WU Jiamin[1,2,3], YAN Chunze[1,2], WEN Shifeng[1,2], CHEN Chaoyue[4], REN Zhongming[4], SHI Yusheng[1,2]
(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mold Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Engineering Research Center of Ceramic Materials for Additive Manufacturing, Ministry of Education, Wuhan 430074, China; 3. Wenzhou Key Laboratory of Microwave Communication Materials and Devices, Wenzhou Advanced Manufacturing Institute of HUST, Wenzhou 325035, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Special Steels, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Silicon dioxide (SiO_2) ceramic cores are essential for manufacturing turbine hollow blades because of their low thermal expansion coefficient, low sintering temperature, and excellent acid-base leaching resistance. The traditional process is limited by the use of molds when forming ceramic cores. Some complex structural ceramic cores are even difficult to manufacture, and the production of high-quality complex structural ceramic cores is challenging. In this study, SiO_2 ceramic cores were prepared via a combination of selective laser sintering (SLS) and vacuum infiltration (VI) techniques. Mullite fibers were used as the reinforcing phase, the interference of mullite fibers on the sintering process of SiO_2 grains and the delamination phenomenon caused by the accumulation between layers were then analysed, and the influence of the mullite fiber content on the properties of the SiO_2 ceramic core prepared by SLS-VI was clarified. The comprehensive performance of the ceramic core is the best when the fiber content is 1 wt.%, with a porosity of 31.16%, a flexural strength at room

收稿日期:2024-12-03

基金项目:航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目(2017-VII-0008-0102);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202202);中央高校基本科研业务费专项资金(15882024XCZX002)

作者简介:刘　珩,1998 年生,硕士生.研究方向为陶瓷型芯增材制造.Email: 552365247@qq.com

通信作者:吴甲民,1984 年生,博士,副教授.研究方向为陶瓷增材制造技术及其应用.Email: jiaminwu@hust.edu.cn

引用格式:刘珩,刘翰帝,张任重,吴甲民,闫春泽,文世峰,陈超越,任忠鸣,史玉升.莫来石纤维含量对激光选区烧结结合真空浸渗制备二氧化硅陶瓷型芯性能的影响[J].铸造技术,2025,46(1):39-44.
LIU H, LIU H D, ZHANG R Z, WU J M, YAN C Z, WEN S F, CHEN C Y, REN Z M, SHI Y S. Effect of mullite fiber content on the properties of silica ceramic cores prepared by selective laser sintering combined with vacuum infiltration[J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 39-44.

中国知网　https://www.cnki.net

temperature of 15.23 MPa, and a flexural strength at high temperature of 22.91 MPa.

Key words: SiO_2 ceramic cores; selective laser sintering; vacuum infiltration; mullite fiber contents; mechanical properties

随着航空航天、造船和发电等国家重要产业及技术快速发展,航空涡轮喷气发动机、燃气轮机和水力涡轮发电机等作为第 III 代动力机械需求量显著增加,性能要求不断提升。涡轮叶片作为其核心热端部件需在高温下进行多样的物化反应和力学变化[1],且需要满足运转时的稳定性和使用寿命要求,对耐热及精度等性能指标的要求不断提升。因耐热材料受限,燃气轮机等对涡轮叶片的冷却效率愈加重视,涡轮叶片的结构与形貌发生显著的改变,开始利用内腔冷却通道以提升其冷却效果[2]。涡轮叶片内腔结构日益复杂,具有较多形状不同的弯曲孔道且基本封闭,在铸造生产中须用提前定制的各类型芯来辅助制造,待浇注完成后设法脱除型芯[3]。

SiO_2 陶瓷因具有结构稳定、制备温度低、脱芯性能优异等特点[4-5],在涡轮叶片铸造工业得到了广泛的应用。以往的 SiO_2 陶瓷型芯制造方法,例如注浆成型[6]、凝胶注模成型[7]、注射成型[8-9]等,发展历史长,制备技术成熟,能够较好地成型出合格的陶瓷零件,但其制备过程需要模具参与,因而受到模具限制,面对日益缩短的产品更新周期和增加的试制需求更显得力不从心,极大地制约了 SiO_2 陶瓷的进一步发展及应用。

陶瓷增材制造技术,凭借其无需模具即可成形的特性,为高精度陶瓷的制备开辟了一条新的道路[10-11]。陶瓷增材制造技术主要包括立体光刻技术(stereolithography, SL)[12]、数字光处理技术(digital light processing, DLP)[13]、三维喷印技术(three-dimensional printing, 3DP)[14] 和激光选区烧结技术(selective laser sintering, SLS)[15]等。SL、DLP 技术成形精度高、表面质量好,所得素坯致密度较高,不需要进行额外的强化处理,但只适合于制备中小型叶片的陶瓷铸型。3DP 和 SLS 技术基于粉床成形,设备的成形尺寸可达数米,成形时一般不需要添加额外的支撑结构,其中 SLS 收缩率较小更适合于制备大型叶片的陶瓷铸型。但 SLS 难以成形出高堆积密度的素坯,且排胶后会留下有机黏结剂被烧除的孔隙,导致 SLS 制备的陶瓷在烧结后仍具有很高的孔隙率,力学性能较差。为了解决这些问题,必须在原料中加入纤维等增强相,且在 SLS 工艺之后引入后处理技术,以减少裂纹并提高机械性能[16-18]。浸渗处理已被证明是有效提升陶瓷致密度的方法[19]。Zhang 等[17]通过调整硅酸锆的比例至 10%(质量分数,下同)并结合真空浸渗技术(vacuum impregnation, VI)与预烧结工艺,优化了 SLS 制备的硅基陶瓷型芯。Li 等[20]采用真空浸渗与 SLS 相结合的方法成功制备了铝基陶瓷型芯,并对其铸造性能进行了系统性研究。同时,研究表明,莫来石纤维的加入能够改善 SiO_2 陶瓷型芯的各项性能[21],可以影响 SiO_2 陶瓷的析晶程度,降低显气孔率并提高力学性能。牛书鑫等[22]在 SiO_2 陶瓷中加入了莫来石纤维,当加入量达到 3% 时,SiO_2 陶瓷在碱液中的溶解速率达到 1.26 g/min,此时气孔率达到 6.96%。最终得到的 SiO_2 陶瓷的室温抗弯强度为 27.7 MPa,高温抗弯强度则达到了 22.4 MPa。但莫来石纤维含量对 SiO_2 陶瓷型芯性能的具体影响目前尚无系统性的研究。

在应用 SLS-VI 技术生产陶瓷零件的过程中,虽然制备参数和后续处理工艺对陶瓷件的性能有显著影响,但陶瓷粉体组分的调控对性能的增强往往起着更关键的作用。为此,本文采用 SLS 技术与 VI 结合的方式制备 SiO_2 陶瓷型芯,以 4 种不同莫来石纤维含量的 SiO_2 陶瓷型芯为研究对象,探讨了陶瓷粉体中莫来石纤维含量对 SLS-VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯各项性能的影响,并使用制备的陶瓷型芯铸型进行了浇注实验验证,成功实现了浇注。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

使用纯度 99.8%的熔融二氧化硅粉末(SiO_2,D50=22.2 μm,安徽易通材料科技公司)作为原材料[23]。以环氧树脂颗粒(型号 E12,D50=8.86 μm,广州新溪材料公司)作为黏结剂[23]。使用纯度 99.0%的氢氧化铝粉末($Al(OH)_3$,D50=22.2 μm,武汉卓岩科技有限公司)作为助渗剂[23]。使用莫来石纤维(直径 5~15 μm,长度 50~100 μm,浙江西亿达公司)作为增韧剂[23]。使用 30%的硅溶液(pH 值为 7,德州晶火玻璃科技公司)作为真空渗透介质[23]。

1.2 SLS–VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯

将熔融 SiO_2 粉末与 $Al(OH)_3$ 粉末按 20∶1 的比例置于行星式球磨机(XGB4,南京博蕴通仪器公司)中以 200 r/min 的转速球磨 24 h,以获得编号为 1# 的复合粉体。之后分别按照 84.5∶0.5∶15.0、84.0∶1.0∶15.0、83.5∶1.5∶15.0、83.0∶2.0∶15.0 的比例准确称量 1# 复合粉体、莫来石纤维和环氧树脂 E12,置于蝶阀混合搅拌机(380V- 蝶阀 300,利宏棣)中以 100 r/min 的

中国知网 https://www.cnki.net

转速机械混合 24 h，以获得编号为 2# 的 4 种不同莫来石纤维含量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)的复合粉体。之后,通过 UG 三维建模,模型为陶瓷型芯,将模型导入 SLS 切片软件进行切片处理,之后将切片文件上传至 SLS 打印设备(HK C500,华科三维科技公司)中。为确保打印质量,精细调整 SLS 打印设备的关键参数。采用的制备参数如下:铺粉厚度100 μm,保温温度 42 ℃,散热时间 3 s,激光功率 11 W,扫描速度 2 000 mm/s，单层厚度 100 μm 和扫描间距 130 μm[23]。打印完成的坯体用毛刷去除表面的粘附粉末,之后用气枪彻底清洁。待素坯表面干净整洁后,将素坯完全浸入 30%的硅溶液中,在真空度小于 -0.10 MPa 的条件下,浸渗 40 min,浸渗完成的坯体转移至烘箱中 38 ℃烘干。浸渗过程重复 3 次[23]。素坯在低温干燥后，置于排胶炉中进行脱脂处理。采用的脱脂参数如下：以 3.5 ℃/min 的升温速率由室温加热至 350 ℃,继而以 1 ℃/min 的速率加热至 440 ℃并保持 0.5 h。之后,再以 1 ℃/min 的速率升至 600 ℃,并在此温度下保温 2 h。最后将脱脂处理后的素坯置于烧结炉中进行高温烧结。采用的烧结参数如下:以 3.5 ℃/min 的升温速率,从 600 ℃加热至 1 225 ℃,保温 5 h 后在炉内自然冷却至室温[23]。

1.3　性能表征

采用激光粒度分析仪(Master sizer 3000,英国马尔温公司)对特定粉末的粒径分布进行精确测定;采用 X 射线衍射仪(XRD-7000S,日本岛津公司)进行物相分析,设置扫描速度为 10 (°)/min,扫描角度为 10°~80°;采用场发射电子显微镜(JSM-7600F,日本电子株式会社)对陶瓷粉末、SLS-VI 成形的陶瓷型芯素坯以及烧结后的陶瓷型芯样品的微观形态进行详细观察;分别采用动静态试验机(AG-100KN,英国英特斯朗公司)和陶瓷抗弯强度测仪(GWX-1700,长春方锐科技公司)对 SLS-VI 成形的 SiO_2 陶瓷样品进行室温和高温下的三点弯曲强度测试。

2　实验结果及讨论

2.1　莫来石纤维含量对物相组成和微观形貌的影响

SLS-VI 制备的 0.5%~2.0%莫来石纤维含量的 SiO_2 陶瓷型芯烧结后的物相组成如图 1 所示。随着莫来石纤维添加量的提高,陶瓷型芯中方石英衍射峰强度没有明显变化。这表明莫来石纤维的加入并不会对 $Al(OH)_3$ 抑制方石英的形成以及 $Al(OH)_3$ 吸附渗入的纳米 SiO_2 造成太大影响,这是由莫来石高温下的稳定性以及常温下相对致密的特点所致。首先,随着莫来石纤维含量的增加,莫来石的衍射峰

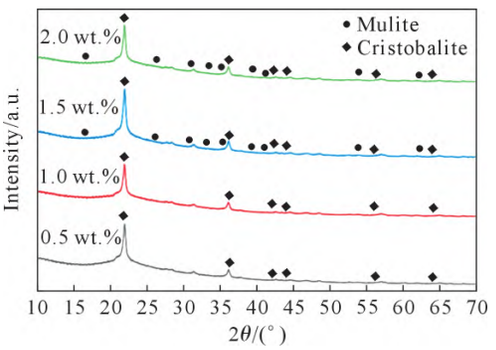


图 1　不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备的 SiO_2 陶瓷型芯的物相组成

Fig.1　Phase composition of SiO_2 ceramic cores prepared with SLS-VI with different mullite fiber contents

逐渐出现,但一直保持在低位。这是因为加入样品中的莫来石纤维含量较低,超出了设备的检测极限。其次，浸渗工艺以及多孔 Al_2O_3 的出现抑制了方石英形成而共同造成的液相使得莫来石相上覆上了一层 SiO_2,导致其衍射峰较低。

SLS-VI 制备的含有 0.5%~2.0%莫来石纤维的 SiO_2 陶瓷型芯断面的微观形貌如图 2 所示。当莫来石纤维含量为 0.5%时，莫来石与 SiO_2 基体的结合紧密,呈现较为致密的断面,大多数 SiO_2 球体中央出现裂纹,断面部分区域表现比较凹凸,部分区域较平,这表明大多数 SiO_2 球体表现出穿晶断裂,且有少量的沿晶断裂。在这一阶段,未观察到分层现象。随着莫来石纤维含量增至 1%,断面区域表现较平,表明断裂模式完全转变为穿晶断裂，莫来石与 SiO_2 基体的结合仍然良好未见分层。但当莫来石含量增至 1.5%时,部分 SiO_2 球体中央出现裂纹,表现为穿晶断裂,同时分层现象开始显现,尤其是在层间结合处，这是由于莫来石具有高熔点以至于难以与 SiO_2 球形颗粒在烧结后进行有效结合，导致层间孔隙形成。而在莫来石纤维含量达到 2.0%时,断面层间区域表现凹凸不平，过量的莫来石纤维在层间大量积聚,引发层间沿晶断裂,并且这些过量的莫来石纤维还对 SiO_2 的烧结造成了干扰,进一步导致层内部分区域也出现沿晶断裂。结果表明,较少含量的莫来石纤维由于其具有较高的力学性能，往往能抑制陶瓷产生高温蠕变，进而可有效抑制由于蠕变过程产生的应力集中而引发的沿晶裂纹，使得断裂模式转变为穿晶断裂,提高陶瓷的力学性能,然而过高含量的莫来石纤维则由于其高熔点在烧结过程中阻碍晶粒的结合,进而引发层间沿晶断裂,造成陶瓷型芯力学性能的下降。

2.2　莫来石纤维含量对性能的影响

不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备的 SiO_2 陶

中国知网　https://www.cnki.net

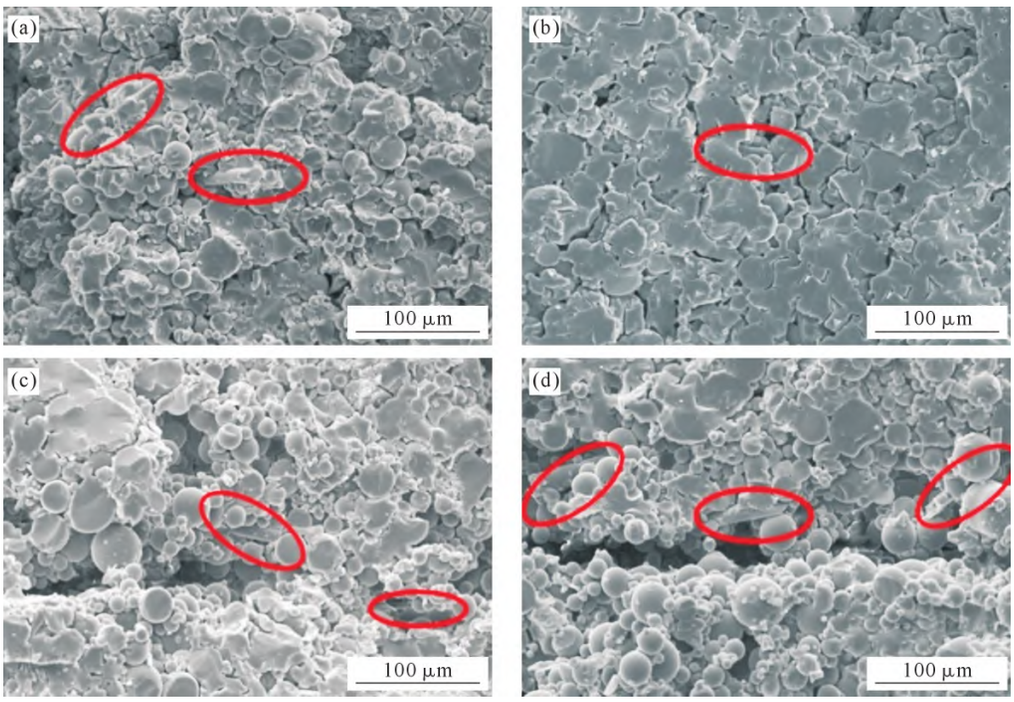


图 2 不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备的 SiO_2 陶瓷型芯断面的微观结构:(a) 0.5%; (b) 1.0%; (c) 1.5%; (d) 2.0%

Fig.2 Microstructure of the SiO_2 ceramic core sections prepared by SLS-VI with different mullite fiber contents: (a) 0.5 wt.%; (b) 1.0 wt.%; (c) 1.5 wt.%; (d) 2.0 wt.%

瓷型芯的轴向和径向收缩率的变化如图 3 所示。莫来石纤维含量的增加,导致 SiO_2 陶瓷的整体收缩率轻微下降,这一变化主要归因于 2 个因素:首先,莫来石纤维有效抑制了熔融石英的黏性流动,该流动会导致晶粒重排并增加收缩率,因莫来石纤维的抑制作用而降低了收缩率。其次,高温下莫来石纤维与纳米 SiO_2 发生莫来石化反应,导致相变和体积膨胀,这亦有助于降低收缩率。然而,莫来石纤维的加入量较低,因此对收缩率的影响相对有限。故当莫来石纤维含量从 0.5%增至 2.0%时, 轴向收缩率从 2.36%降至 2.17%。

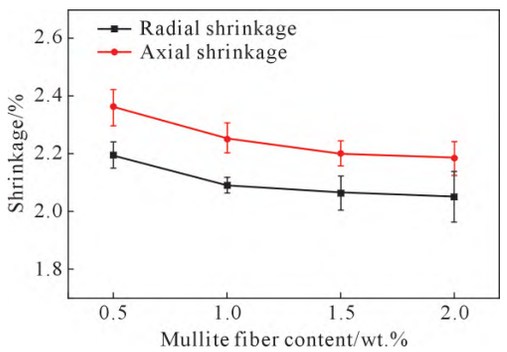


图 3 不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯轴向和径向收缩率

Fig.3 Axial and radial shrinkage of SiO_2-ceramic cores prepared by SLS-VI with different mullite fiber contents

如图 4 所示,莫来石纤维含量的变化对 SLS-VI 制备的 SiO_2 陶瓷型芯的孔隙率和体积密度产生了一定影响。莫来石纤维含量的增加并未明显改变孔隙率,该值稳定在 31%左右。相较之下,体积密度呈现轻微上升趋势,从 1.51 g/cm^3 增至 1.57 g/cm^3。孔隙率的稳定主要是由于莫来石纤维对纳米 SiO_2 无吸附作用,并不会带来浸渗率的较大提高或下降。在烧结过程中, 莫来石纤维对黏性流动的抑制会导致孔隙率提高, 而相变时体积的微小膨胀则会使孔隙率下降。在这两者的共同作用下,孔隙率的变化不明显。而体积密度的增加,可能源于莫来石本身较高的密度和其相变过程中可能发生的莫来石化作用。由于 SLS 工艺的特殊性,莫来石纤维只能加入较低含量,限制了其对孔隙率和体积密度的整体影响。

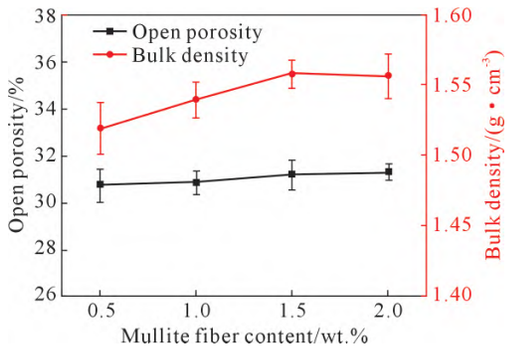


图 4 不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯孔隙率和体积密度

Fig.4 Porosity and bulk density of SiO_2 ceramic cores prepared by SLS-VI with different mullite fiber contents

不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备的 SiO_2 陶瓷型芯的室温抗弯强度变化如图 5 所示。伴随莫来石纤维含量的增加, 室温抗弯强度呈现出初期上升

中国知网 https://www.cnki.net

达到一定强度后开始迅速下降的趋势。初期抗弯强度的增强主要得益于莫来石纤维的优良力学性质。莫来石纤维与 SiO_2 基体结合良好,纤维与基体几乎烧结在一起,此时裂纹扩展的过程中不可避免地需要消耗能量来破坏纤维。故莫来石纤维的加入能显著提升断裂过程中的能量消耗进而提高陶瓷基体的抗弯强度。当莫来石纤维含量从 0.5%增至 1.0%时,抗弯强度从 14.65 MPa 上升至 16.63 MPa。

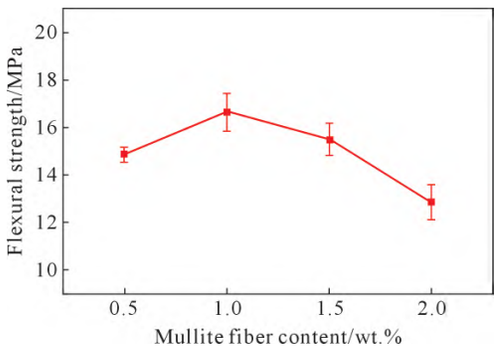


图 5　不同莫来石纤维含量下 SLS-VI 制备 SiO_2 陶瓷型芯抗弯强度

Fig.5　Flexural strength of SiO_2 ceramic cores prepared by SLS-VI with different mullite fiber contents

但随着莫来石纤维含量进一步增加，如上所述,由于高熔点、过高含量的莫来石纤维在烧结过程中会阻碍晶粒的结合，导致层间沿晶裂纹的产生,同时 SLS 逐层制造的特性导致的层间堆积促进了层间间隙增大,促使分层现象加剧。此外莫来石纤维对纳米 SiO_2 的无吸附特性以及高熔点,阻碍了 SiO_2 晶粒间的有效烧结，进一步加剧了分层现象。分层现象的出现通常会削弱材料的力学性能。特别是当莫来石纤维含量达到 1.5%时，抗弯强度降至 15.49 MPa,但此时莫来石纤维的加入依然能提高陶瓷的力学性能。而在莫来石纤维含量增至 2.0%时,阻碍 SiO_2 晶粒间烧结的负面影响进一步提高,此时莫来石纤维加入的负面效果超过了由其本身高强度带来的力学性能提升,导致抗弯强度降至12.80 MPa。综合考虑,莫来石纤维的最佳添加量为 1.0%。

2.3　浇注试验验证

优化配方及参数后制备的铸型如图 6a 所示。浇注验证在上海大学 ALD 单晶定向炉中进行。浇注母合金为 DZ125,浇注温度为 1 510 ℃,浇注前保温 30 min。浇注后的铸件如图 6b 所示,可以看出铸件整体形状完整,无明显漏液现象,证明 SLS 技术制备 SiO_2 陶瓷型芯的可行性。

3　结论

(1)随着莫来石纤维含量的增加,陶瓷的断裂模式经历了从混合断裂到穿晶断裂的转变，最终又回归至混合断裂。这种变化归因于莫来石纤维对 SiO_2 晶粒烧结过程的干扰以及其在层间的堆积所引发的分层现象。

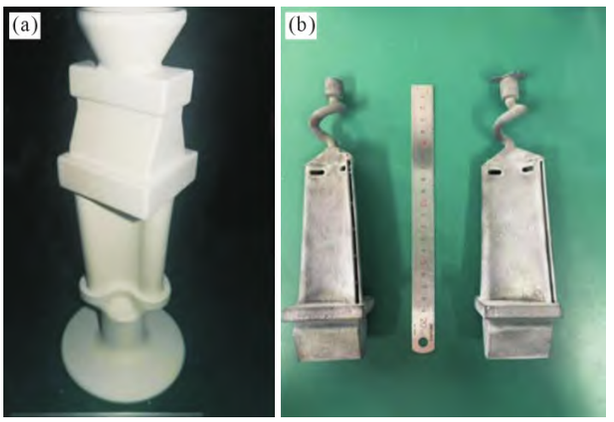


图 6　浇注试验结果:(a) SLS-VI 技术制备的铸型;(b) DZ125 单晶铸件

Fig.6　Results of the pouring test: (a) casting molds prepared by SLS-VI; (b) DZ125 single crystal casting

(2)莫来石纤维含量变化初期,陶瓷的抗弯性能先从 14.65 MPa 增至 16.64 MPa，随后下降至 15.49 MPa。莫来石纤维通过抑制熔融石英的黏性流动,收缩率从 2.36%降至 2.17%,孔隙率保持不变。

(3)当莫来石纤维含量为 1.0%时,SLS-VI 制备的 SiO_2 陶瓷具有 31.16%的孔隙率、15.23 MPa 的室温抗弯强度和 22.91 MPa 的高温抗弯强度。高温铸造叶片的成功制备,为 SLS-VI 技术在先进陶瓷制备领域的应用提供了新的思路。

参考文献:

[1]　PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15: 804-809.

[2]　KIM E H, PARK H Y, LEE C L, PARK J B, YANG S, JUNG Y G. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic core[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 3348-3356.

[3]　LI J G, AN X L, LIANG J J, ZHOU Y Z, SUN X F. Recent advances in the stereolithographic three-dimensional printing of ceramic cores: Challenges and prospects[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 117: 79-98.

[4]　ZHAO Z J, YANG Z G, YU Z H, FAN M J, BAI J Y, YU J B, REN Z M. Influence of yttrium oxide addition and sintering temperature on properties of alumina-based ceramic cores[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(2): 685-694.

[5]　LI X, NIU S X, WANG D S, LI J, JIAO Q, GUO X L, XU X Q. Microstructure and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores with enhanced high-temperature property [J]. Materials, 2023, 16(2): 606.

[6]　邓健,姚冬旭,夏咏锋,左开慧,尹金伟,曾宇平. 注浆成型结合

中国知网　https://www.cnki.net

真空发泡法制备梯度多孔氮化硅陶瓷[J]. 无机材料学报,2016, 31(8): 865-868.
DENG J, YAO D X, XIA Y F, ZUO K H, YI J W, ZENG Y P. Gradient porous silicon nitride by slip casting and vacuum foaming[J]. Journal of Inorganic Materials, 2016, 31(8): 865-868.

[7] 郝边磊,陈仕乐,张健,汪长安. 以 PMMA 为造孔剂的凝胶注模工艺制备多孔 Al_2O_3 陶瓷[J]. 硅酸盐学报,2019, 47(9): 1242-1246.
HAO B L, CHEN S L, ZHANG J, WANG C A. Preparation of porous Al_2O_3 ceramics by gelcasting with PMMA as pore-forming agent[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(9): 1242-1246.

[8] MADER M, SCHLATTER O, HECK B, WARMBOLD A, DORN A, ZAPPE H, RISCH P, HELMER D, KOTZ F, RAPP B E. High-throughput injection molding of transparent fused silica glass [J]. Science, 2021, 372(6538): 182-186.

[9] 冯江涛,夏风,肖建中. 陶瓷注射成型技术及其新进展[J]. 中国陶瓷,2003, 39(2): 34-38.
FENG J T, XIA F, XIAO J Z. Ceramic injection molding and its development[J]. China Ceramics, 2003, 39(2): 34-38.

[10] WANG X G, ZHOU Y L, ZHOU L, XU X Q, NIU S X, LI X, CHEN X. Microstructure and properties evolution of silicon-based ceramic cores fabricated by 3D printing with stair-stepping effect control[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(8): 4650-4657.

[11] DEHURTEVENT M, ROBBERECHT L, HORNEZ J C, THUAULT A, DEVEAUX E, BEHIN P. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing[J]. Dental Materials, 2017, 33(5): 477-485.

[12] CHEN S, SUN D, WANG C S, WEN S F, WU J M, YAN C Z, SHI Y S, CHEN C Y, REN Z M. Alumina-based ceramic mold with integral core and shell for hollow turbine blades fabricated by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103046.

[13] LI Q L, AN X L, LIANG J J, LIU Y S, HU K H, LU Z G, YUE X Y, LI J G, ZHOU Y Z, SUN X F. Balancing flexural strength and porosity in DLP-3D printing Al_2O_3 cores for hollow turbine blades [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 104: 19-32.

[14] MAURYA H S, KOSIBA K, JUHANI K, SERGEJEV F, PRASHANTH K G. Effect of powder bed preheating on the crack formation and microstructure in ceramic matrix composites fabricated by laser powder-bed fusion process[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103013.

[15] WU S Q, YANG L, WANG C D, YAN C Z, SHI Y S. Si/SiC ceramic lattices with a triply periodic minimal surface structure prepared by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 56: 102910.

[16] HU L X, YANG Y W, LUO S J, XU X Y. Investigation on the kinetics of infiltration of liquid aluminium into an alumina fibrous preform[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(2-3): 227-230.

[17] ZHANG J, WU J M, LIU H, ZHENG W, YE C S, WEN S F, YAN C Z, SHI Y S. Microstructure and properties of silica-based ceramic cores by laser powder bed fusion combined with vacuum infiltration[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 157: 71-79.

[18] JIA Q F, LIU B S, LI S, HU C Q, YANG Y Z, WANG G. Slurry-based photoinitiator jetting process for ceramic additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2024, 86: 104185.

[19] KIM Y H, YEO J G, CHOI S C. Shrinkage and flexural strength improvement of silica-based composites for ceramic cores by colloidal alumina infiltration[J]. Ceramics International, 2016, 42(7): 8878-8883.

[20] LI C H, HU L, ZOU Y, LIU J A, XIAO J H, WU J M, SHI Y S. Fabrication of Al_2O_3-SiO_2 ceramics through combined selective laser sintering and SiO_2-sol infiltration[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(1): 255-263.

[21] NIU S X, XU X Q, LI X, CHEN X, LUO Y S. Microstructure evolution and properties of silica-based ceramic cores reinforced by mullite fibers[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 829: 154494.

[22] 牛书鑫,刘智鹏,周婷婷,司远,李鑫,骆宇时,王东升,郭新龙,石振梅,焦琦,张腾飞,许西庆. 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 S X, LIU Z P, ZHOU T T, SI Y, LI X, LUO Y S, WANG D S, GUO X L, SHI Z H, JIAO Q, ZHANG T F, XU X Q. 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.

[23] LIU H, ZHANG R Z, WU J M, LI W K, ZHOU S X, ZHANG J, ZHENG W, YAN C Z, WEN S F, YE C S, SHI Y S, CHEN C Y, REN Z M. Effect of $Al(OH)_3$ on the properties of silica-based ceramic cores prepared by laser powder bed fusion combined with vacuum infiltration[J]. Additive Manufacturing, 2024, 95: 104527.

中国知网 https://www.cnki.net