

引用格式: 王玥, 李鑫, 牛书鑫, 等. 增材制造-热压注复合成型铝-硅基陶瓷型芯[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 64-72.  
WANG Yue, LI Xin, NIU Shuxin, et al. Alumina-silica based ceramic cores prepared by additive manufacturing-hot press injection composite molding[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 64-72.

## 增材制造-热压注复合成型铝-硅基陶瓷型芯

王玥\*, 李鑫, 牛书鑫, 周婷婷, 司远, 王珂,  
石振梅, 于千思一, 骆宇时

(中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 陶瓷型芯是航空发动机单晶高温合金空心涡轮叶片的重要转接件。为解决陶瓷型芯精细结构抗冲击不足的问题, 采用光固化增材制造研制复合成型铝-硅基陶瓷型芯, 形成尺寸精度和三点抗弯强度分别可达 $\pm 0.003$  mm 和 314 MPa 的致密  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相陶瓷精细结构部件, 具有良好的抗冲击性; 利用热压注成型包裹铝基陶瓷部件的陶瓷型芯主体, 其抗弯强度和显气孔率分别为 12 MPa 和 29.5%, 使陶瓷型芯主体保证良好的退让性和溶失性。同时, 建立铝-硅材料异质界面分离间隙宽度与两种材料热膨胀率、收缩率和弹性模量的关系, 采用增材制造铝基陶瓷部件表面微观纹理设计, 在复合成型陶瓷型芯上形成镶嵌咬合式铝-硅界面微观结构, 提高异质界面的物理结合能力, 有效补偿热过程异质界面分离。利用复合成型铝-硅基陶瓷型芯实现单晶空心涡轮叶片的基础浇注验证, 工艺孔尺寸符合性高, 内腔无多余金属, 在航空发动机高温合金叶片精密铸造领域具有广阔的应用前景。

**关键词:** 精密铸造; 陶瓷型芯; 增材制造; 热压注; 异质界面

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000177

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000177

中图分类号: TQ174.5; V257

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0064-09

## Alumina-silica based ceramic cores prepared by additive manufacturing-hot press injection composite molding

WANG Yue\*, LI Xin, NIU Shuxin, ZHOU Tingting, SI Yuan, WANG Ke,  
SHI Zhenmei, YU Qiansiyi, LUO Yushi

(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Ceramic cores are key transfer components for single crystal superalloy hollow turbine blades in aeroengines. To address the insufficient impact resistance of the fine structures in ceramic cores, this work innovatively adopts photocuring additive manufacturing to develop a composite-formed alumina-silica based ceramic core. Dense  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase ceramic fine structural components are produced, with dimensional accuracy and three-point bending strength reaching  $\pm 0.003$  mm and 314 MPa, respectively, exhibiting excellent impact resistance. The main body of the ceramic core, which encapsulates the alumina-based ceramic components *via* hot injection molding, has a bending strength of 12 MPa and an apparent porosity of 29.5%, ensuring favorable collapsibility and leachability. The relationship between the separation gap width of the heterogeneous alumina-silica material interface and the thermal expansion coefficient, shrinkage rate, and elastic modulus of two materials is established. Microtexture design on the surface of additively manufactured alumina-based ceramic components is adopted to form an interlocking alumina-silica interface microstructure on the composite-formed ceramic core, which improves the physical bonding strength of the heterogeneous interface and effectively compensates for interfacial separation during thermal processes. Basic casting verification of single-crystal hollow turbine blades is achieved using the composite-formed alumina-silica based ceramic core, with high

dimensional conformity of process holes and no excess metal in the inner cavity. It demonstrates broad application prospects in the precision casting of superalloy blades for aeroengines.

**Key words:** precision casting; ceramic core; additive manufacturing; hot pressing injection; heterogeneous interface

随着航空发动机涡轮前进气口承温需求的不断提高<sup>[1-3]</sup>, 涡轮叶片的冷却方式由传统的冲击冷却逐步发展为扰流柱冷却、带肋冷却、气模冷却、双层壁冷却等<sup>[4-5]</sup>, 叶片内腔结构趋于复杂化和精细化, 因此陶瓷型芯也向多腔、多层结构发展<sup>[6-7]</sup>, 且单位面积的精细结构单元数量大大增加, 例如排气边、连接柱、连接颈等<sup>[8-10]</sup>。陶瓷型芯精细结构所能承受的失效载荷较小, 受到蜡液和高温合金液体冲击时, 往往率先发生断裂, 造成叶片报废<sup>[11-12]</sup>。

同时, 陶瓷型芯需具有良好的退让性, 以避免高温合金在凝固阶段受到过大拉应力而热裂或二次结晶<sup>[13-14]</sup>。因此, 陶瓷型芯主体结构的强度不能过高。氧化硅基陶瓷型芯因良好的退让性、可脱除性和抗热震性, 获得广泛应用<sup>[15-17]</sup>。硅基陶瓷型芯以 $\text{SiO}_2$ 为主体材料、方石英为主晶相, 室温抗弯强度为6~25 MPa, 1500 °C的抗弯强度为20~40 MPa<sup>[18-22]</sup>。目前, 提高硅基陶瓷型芯精细部件抗冲击性能主要采用局部加强的方法: 一类为陶瓷-耐熔金属陶瓷型芯, 利用机加工方法制备高强度耐熔金属件, 再通过机械互锁或者化学黏结的方式将耐熔金属型芯与陶瓷件相连接, 形成局部加强复合陶瓷型芯<sup>[23-24]</sup>; 另一类为芯骨包入式增强陶瓷型芯, 将高强度芯骨(例如石英玻璃、氧化铝、碳化物等)由陶瓷浆料包裹后, 经烧结形成复合陶瓷型芯<sup>[25-26]</sup>。然而, 受限于加工精度, 耐熔金属件、芯骨等部件多被包覆于陶瓷型芯内, 不参与构成陶瓷型芯的外型面。而且, 由于复合部件与陶瓷型芯主体材料的热膨胀率和烧结收缩率不同, 经历高温环境二者界面会产生缝隙, 不仅造成复合部件的松动脱落, 而且在浇注时高温合金液体会浸入缝隙, 形成内腔多余物, 造成铸件报废。

增材制造技术为陶瓷型芯高强度精细部件的制备提供新的解决办法<sup>[27-30]</sup>。特别是光固化增材制造技术, 由于具有高打印精度, 在复杂结构陶瓷型芯一体化成型领域被广泛研究<sup>[30-33]</sup>。本工作借助光固化增材制造制备高强度铝基精细部件、热压注法制备硅基陶瓷型芯主体结构的两步复合技术, 成功制备兼具退让性和抗冲击性的陶瓷型芯。并且, 深入分析陶瓷型芯异质界面热过程尺寸变化不匹配造成的界面分离现象, 进一步制定异质界面微

观结构设计方案, 保证陶瓷型芯精细部件的稳固性。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

硅基陶瓷型芯主要材料为熔融石英粉, 由中值粒径分别为50、25  $\mu\text{m}$ 和8  $\mu\text{m}$ 的粗粉、中粉和细粉按15%(质量分数, 下同)、75%和10%混合制成; 矿化剂为莫来石粉, 中值粒径约为40  $\mu\text{m}$ ; 增强相为非晶莫来石纤维和多晶莫来石纤维。塑化剂由62#全精炼石蜡、微晶蜡、聚丙烯(PP)和硬脂酸按质量比为83:10:4:3混合而成。陶瓷粉末和塑化剂按质量比为87:13混合, 在140 °C条件下采用真空搅拌机搅拌12 h, 制成陶瓷浆料, 用于热压注成型。

铝基陶瓷部件的主要成分为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 其中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为微米级粉末。光敏树脂预混液由光敏树脂(二缩三丙二醇二丙烯酸酯TPGDA和1,6-己烷二烯二丙烯酸酯HDDA)、光引发剂(2,4,6-三甲基苯甲酰二苯氧磷TPO-L)和分散剂(DISPERBYK-111)按94%、5%和1%组合调配而成。采用行星式球磨机将陶瓷粉末与光敏树脂预混液以350 r/min转速球磨12 h制备光敏树脂浆料, 用于光固化增材制造。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 铝基陶瓷部件制备

铝基陶瓷部件采用光固化增材制造方法成型, 使用的设备为数字光处理3D打印仪(型号为AUTOCERA-L108), 配备入射能量可调、工作波长405 nm的发光二极管紫外激光器。打印时间为3 s, 打印功率为15  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 。成型后将坯体浸入专用清洁剂中超声清洗15~30 min后取出风干, 再在马弗炉中进行烧结, 烧结制度为: 在600 °C下脱脂5 h, 随后升温至1500 °C烧结3 h。将陶瓷部件的3D打印方向分为横向(horizontal)和纵向(vertical): 横向指打印平面的法线与陶瓷部件的轴向平行的方向; 纵向指打印平面的法线与陶瓷部件的轴向垂直的方向。

#### 1.2.2 硅基陶瓷型芯制备

硅基陶瓷型芯采用热压注法成型, 使用的设备为25 t注射成型机(型号为MPI 5X Crossover

Injector), 注射温度为 98 °C, 注射压力为 5.5 MPa, 注射流量为 220 mL/s。型芯坯体在大气环境中烧结成型, 在 300 °C 下脱脂 3 h, 随后升温至 1250 °C 烧结 4 h。

### 1.2.3 结构性能测试

铝基陶瓷部件和硅基陶瓷型芯的宏观结构采用体视显微镜表征(型号为 SZX10), 微观结构采用配备能谱(energy dispersive spectroscopy, EDS)仪的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM, 型号为 Nova-nano450)表征, 物相图谱采用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪(型号为 D8 Advance)测试, 三点抗弯强度采用电子万能试验机(型号为 WDW-10)测试, 热膨胀测试在热膨胀仪(型号为 DLT 402)下进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 铝基陶瓷部件结构设计

陶瓷型芯上存在大量尺寸微小的精细结构(特征尺寸 $\leq 1$  mm), 例如芯头与叶身的连接柱、U 型端与榫齿的连接颈等, 如图 1(a)所示。本工作采用增材制造技术将精细结构制造为铝基陶瓷部件, 再通过热压注技术成型硅基型芯主体, 使陶瓷型芯兼具抗冲击性、溶失性和退让性。具体操作为在陶瓷型芯模具上开设精细陶瓷部件的限位卡槽, 将铝基

精细陶瓷部件放入限位中, 将硅基陶瓷浆料注射至模具中, 冷却后取出烧结成型。将硅-铝基材料的结构简化为硅基陶瓷包裹铝基部件的构型, 如图 1(b)所示。两种材料的热膨胀率和烧结收缩率不同, 加热时铝基陶瓷材料的热膨胀率大于硅基陶瓷材料, 同时铝基陶瓷材料刚玉的弹性模量大于多孔的硅基陶瓷材料<sup>[34]</sup>, 所以外层硅基陶瓷材料会被刚玉材料撑大; 而冷却时硅基陶瓷材料的收缩率又大于刚玉材料, 因此外层的硅基材料与内层的铝基材料之间的界面会产生缝隙 $\Delta x$ 。该界面分离会造成铝基部件的松动脱落, 造成陶瓷型芯的局部尺寸超差; 而且在浇注时高温合金液体会浸入缝隙形成叶片内腔多余物, 导致铸件报废。为解决铝-硅材料异质界面在热过程中分离的问题, 在铝-硅异质界面设计凹凸微观结构(图 1(c)), 不仅与热过程造成的尺寸差异相匹配, 而且增加界面的摩擦力。

铝-硅异质界面凹凸微观结构的凸起量  $d$  需要匹配热过程界面分离产生的缝隙 $\Delta x$ , 如图 1(b)所示。假设硅基陶瓷材料从浆料到湿态的收缩率为  $s_{S0}$ , 型芯湿态到烧结态的热膨胀率和收缩率分别为  $e_{S1}$  和  $s_{S1}$ , 从烧结态到浇注态的热膨胀率和收缩率分别为  $e_{S2}$  和  $s_{S2}$ , 铝基陶瓷材料的半径为  $R_A$ , 从型芯湿态到烧结态的热膨胀率和收缩率分别为  $e_{A1}$  和  $s_{A1}$ , 从烧结态到浇注态的热膨胀率和收缩率分别为  $e_{A2}$  和  $s_{A2}$ , 按照硅基陶瓷材料向外径膨胀及

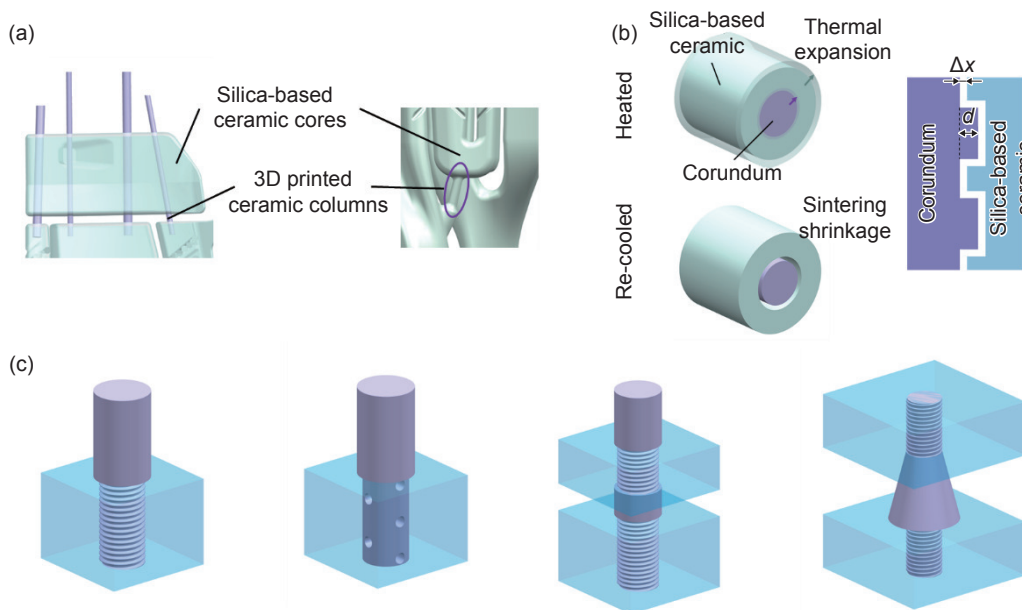


图1 铝-硅基陶瓷部件结构设计 (a)硅基陶瓷型芯主体和3D打印铝基陶瓷部件; (b)铝-硅基陶瓷异质界面分离; (c)铝-硅基陶瓷异质界面微观结构设计

Fig. 1 Structural design of alumina-silica based ceramic components (a) silica-based ceramic core body and 3D printed alumina-based ceramic components; (b) hetero-interface separation of alumina-silica based ceramic; (c) micro-structural design of alumina-silica based ceramic heterogeneous interface

向内径收缩,可计算 $\Delta x$ 的最大值,如式(1)所示:

$$\Delta x_{\max} = R_A(s_{S0} + e_{A1} + s_{A1} + s_{S1} + e_{A2} + s_{A2} + s_{S2}) \quad (1)$$

为避免浇注时高温合金液体浸入缝隙,铝-硅异质界面凹凸微观结构应满足 $d > \Delta x_{\max}$ 。因此,为实现表面微观结构的有效设计,需要掌握铝基和硅基材料的受热变形规律。

## 2.2 物相分析

本工作使用的增材制造铝基精细部件 XRD 谱图如图 2(a)所示,衍射峰对应  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  相,且无其他物相的衍射峰,表明铝基精细部件全部由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  构成,物相为三方晶系的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。根据文献 [35] 可知, $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的晶胞结构为  $\text{O}^{2-}$  按六方密集堆积, $\text{Al}^{3+}$  位于八面体空隙中,这是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多种变体中结构最稳定的一种。因此,铝基精细部件在高温浇注过程中可维持  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  相不变。

热压注硅基陶瓷型芯主体的 XRD 谱图如图 2(b)所示,下方曲线为经 1250 °C 烧结后的 XRD 谱图,对应于压蜡状态的陶瓷型芯;上方曲线为经 1540 °C 烧结后的 XRD 谱图,模拟陶瓷型芯经过高温浇注后的物相状态。1250 °C 烧结后,衍射峰对应方石英相和莫来石相,22°附近的馒头峰对应石

英玻璃非晶相;1540 °C 烧结后,石英玻璃非晶相消失,对应方石英相的衍射峰强度明显增强,表明在经历浇注过程后,陶瓷型芯中石英玻璃完全实现方石英化。

## 2.3 物理性质分析

硅基陶瓷和横向、纵向打印的铝基陶瓷试样的显气孔率和体积密度如图 3 所示。硅基陶瓷的体积密度为 1.52 g/cm<sup>3</sup>,显气孔率为 29.5%,较高的显气孔率有助于硅基陶瓷型芯在碱液中溶解,便于脱芯。横向打印铝基陶瓷试样的体积密度为 3.77 g/cm<sup>3</sup>,显气孔率为 0.56%,与纵向打印铝基陶瓷试样的性能相当,说明铝基陶瓷的显气孔率和体积密度与打印方向无关。铝基陶瓷的体积密度接近  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3.99 g/cm<sup>3</sup>),且显气孔率极低,可预测铝基陶瓷部件的强度、热膨胀性能接近刚玉,且难以在碱液中溶失。

不同材料的室温三点抗弯强度测试结果如图 4 所示,图中小图为不同打印方向的铝基陶瓷试样三点弯曲测试示意图,纵向打印方向与受力方向垂直,横向打印方向与受力方向平行。硅基陶瓷试样的抗弯强度最低,仅约为 12 MPa。铝基陶瓷试样的抗弯强度明显提高,对于横向打印的铝基陶瓷试

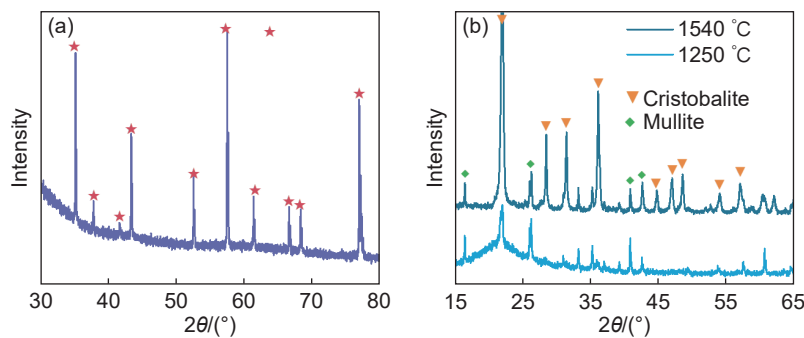


图 2 增材制造铝基精细部件(a)和热压注硅基陶瓷型芯主体(b)XRD 谱图

Fig. 2 XRD patterns of additive manufacturing alumina-based fine component (a) and hot pressure casting silica-based ceramic core body (b)

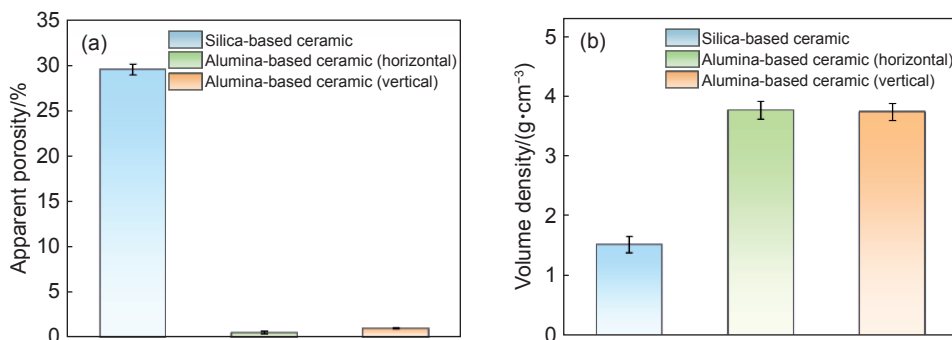


图 3 显气孔率(a)和体积密度(b)

Fig. 3 Apparent porosity (a) and volume density (b)

样,打印层间为易断裂区域,易产生裂纹并扩展,抗弯强度仅约为 57 MPa;纵向打印的抗弯强度较高,约为 314 MPa。因此,可根据实际工况选择铝基陶瓷试样的打印方向。

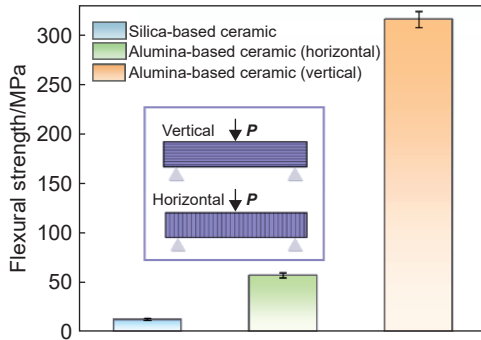


图4 不同试样的室温抗弯强度

Fig. 4 Flexural strength of different samples at room temperature

硅基陶瓷以及不同打印方向的铝基陶瓷试样的热膨胀性能如图5所示。图中小图为不同打印方向铝基陶瓷试样的测试示意图,纵向打印方向与热膨胀仪顶杆垂直,横向打印方向与热膨胀仪顶杆平行。结果表明,不同打印方向的铝基陶瓷试样受热膨胀行为相似,受热时表现为线性膨胀,降温后尺寸复原,在 1200 °C 和 1500 °C 时热膨胀率分别约为  $1.1 \times 10^{-2}$  和  $1.5 \times 10^{-2}$ , 温度降至室温后收缩率较小,约为  $0.08 \times 10^{-2}$ 。硅基陶瓷材料的热膨胀率远小于铝基陶瓷材料,在 1200 °C 和 1500 °C 时分别约为  $0.32 \times 10^{-2}$  和  $0.37 \times 10^{-2}$ , 但温度降至室温后存在明显收缩,收缩率约为  $0.5 \times 10^{-2}$ 。硅基陶瓷材料

从浆料到湿态的收缩率  $s_{S0}$  约为  $1 \times 10^{-4}$ 。据此估算两种材料的界面分离量最大值  $\Delta x_{\max} = 3.19 R_A \times 10^{-2}$ 。若铝基陶瓷材料的半径  $R_A = 1.0 \text{ mm}$ , 则  $\Delta x_{\max} = 3.19 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。

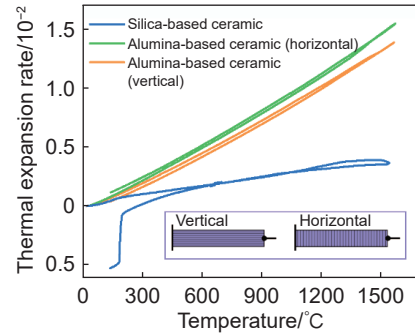


图5 不同试样的热膨胀率

Fig. 5 Thermal expansion rates of different samples

## 2.4 铝-硅基陶瓷型芯的制备与应用

在铝-硅基陶瓷型芯中,多种陶瓷型芯的精细结构部件均可通过增材制造方法制备。本工作以陶瓷型芯头部圆柱为例,详细介绍铝-硅基陶瓷型芯的制备与应用。该叶片需在叶尖盖板处形成一个长 2.0 mm、宽 1.0 mm 的跑道形工艺孔,以及一个直径为 1.3 mm 的圆形工艺孔,因此需要陶瓷型芯的芯头具有对应形状的圆柱,为保证圆柱的强度,跑道形圆柱和圆形圆柱均通过铝基陶瓷棒成型。铝基陶瓷棒与陶瓷型芯设计方案如图6所示,各图中从左到右依次为工艺孔尺寸示意图、铝基陶瓷棒设计图、铝基陶瓷棒实物局部细节光学显微镜图和陶瓷型芯局部 X 射线图。

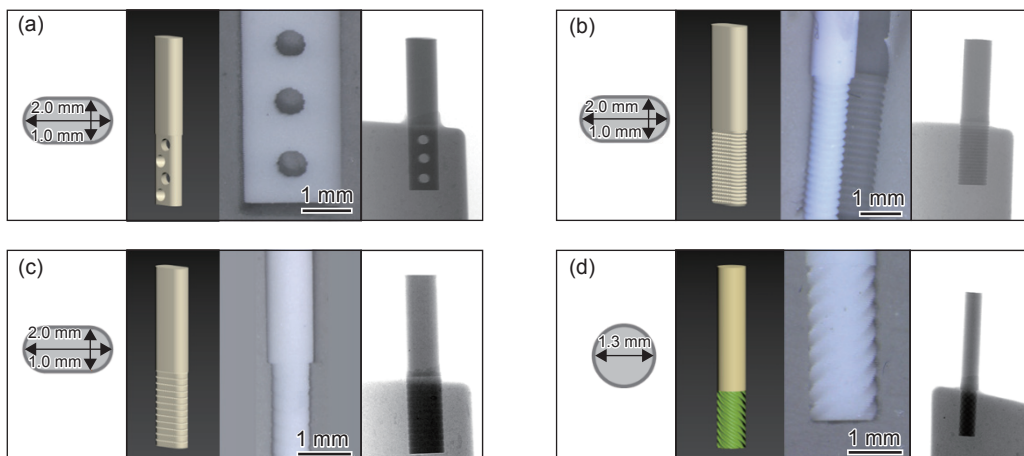


图6 铝基陶瓷棒和陶瓷型芯设计方案 (a)跑道形陶瓷棒设计方案①; (b)跑道形陶瓷棒设计方案②; (c)跑道形陶瓷棒设计方案③; (d)圆柱形陶瓷棒设计方案

Fig. 6 Design schemes of alumina-based ceramic rod and ceramic mold (a) design scheme ① of the runway-shaped ceramic rod; (b) design scheme ② of the runway-shaped ceramic rod; (c) design scheme ③ of the runway-shaped ceramic rod; (d) design scheme of cylindrical ceramic rod

跑道形陶瓷棒共设计了3种方案(图6(a)~(c)),陶瓷棒上端裸露,用于构成叶片工艺孔,尺寸与叶片图纸一致,设计为截面 $2.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ 的跑道形状;陶瓷棒下端包埋于硅基陶瓷型芯中,用于陶瓷棒在型芯中定位,为保证硅基陶瓷对陶瓷棒的紧密包覆,陶瓷棒下端尺寸减小,设计为截面 $2.0\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$ 的跑道形状。陶瓷棒下端共设计了3种方案,分别为打孔(图6(a))、细间距横纹(图6(b))和粗间距横纹(图6(c))。根据上文推断,硅-铝基材料的界面分离最大值 $\Delta x=3.9\times 2.0\times 10^{-2}\text{ mm}=7.8\times 10^{-2}\text{ mm}$ ,因此横纹深度大于 $7.8\times 10^{-2}\text{ mm}$ 。圆柱形陶瓷棒设计方案如图6(d)所示,上端为截面直径 $1.3\text{ mm}$ 的圆形,被包覆的下端具有螺纹结构。根据计算 $\Delta x=3.9\times 1.3\times 10^{-2}\text{ mm}=5.07\times 10^{-2}\text{ mm}$ ,则螺纹深度大于 $5.07\times 10^{-2}\text{ mm}$ 。由光学显微镜图和X射线图可见,铝基陶瓷棒的精细结构清晰,铝基陶瓷棒和硅基陶瓷型芯主体具有良好的相容性,界面结合紧密。

采用铝-硅基陶瓷型芯进行叶片浇注实验,结果如图7所示。图7(a-1)为采用传统干袋等静压法制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 跑道形陶瓷棒,尺寸精度低,截面是梭形而非跑道形。相应地,在叶片上形成的工艺孔为梭形,与叶片图纸的尺寸符合性差。而采用增材制造方法制备的铝基跑道形陶瓷棒(图7(b-1)),尺寸精度可达 $\pm 0.003\text{ mm}$ ,截面为跑道形,在叶片盖板上形成的跑道形工艺孔结构

清晰、尺寸精确。图7(a-3)为采用传统干袋等静压法制备的圆形工艺孔,难以在表面上形成精细凹凸结构,因此难以补偿热过程中铝-硅界面分离的缝隙,在浇注过程中有合金液进入;而使用具有螺纹结构的陶瓷棒(图6(d)),可通过表面微观纹理与铝-硅异质界面受热变形形成联动补偿,避免合金液进入界面缝隙,从而形成完整的圆形工艺孔(图7(b-3))。

为进一步分析陶瓷型芯铝-硅界面的结合情况,对图7(b-2)方案中高温烧结后的陶瓷棒附近型芯的截面微观组织进行表征,如图8所示。图8(a)~(c)为不同放大倍数下铝-硅基陶瓷型芯的SEM图,黄色箭头标注了硅基、铝基材料的界面。由图8(a)可见,铝基陶瓷棒的螺纹结构清晰,螺距为 $420\text{ }\mu\text{m}$ ,螺纹深度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ,陶瓷棒与硅基材料结合均匀;增大放大倍数(图8(b)、(c))可见,增材制造陶瓷棒为横向打印,单层厚度为 $40\text{ }\mu\text{m}$ ,硅基陶瓷存在大量气孔,而铝基陶瓷棒中无气孔。图8(d)为图8(b)对应的EDS图,Si元素分布处代表硅基陶瓷型芯主体,Al元素分布处代表铝基陶瓷棒,陶瓷棒周围紧密包裹硅基陶瓷,硅基陶瓷材料进入陶瓷棒螺纹内。由O元素分布可见硅基陶瓷与铝基陶瓷棒之间有一条狭窄缝隙,厚度约 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,与前面计算的异质界面分离缝隙厚度 $\Delta x$ 一致。由微观结构得到,陶瓷棒表面的螺纹结构深度大于异质界面分离缝隙厚度,硅基陶瓷可以进入螺

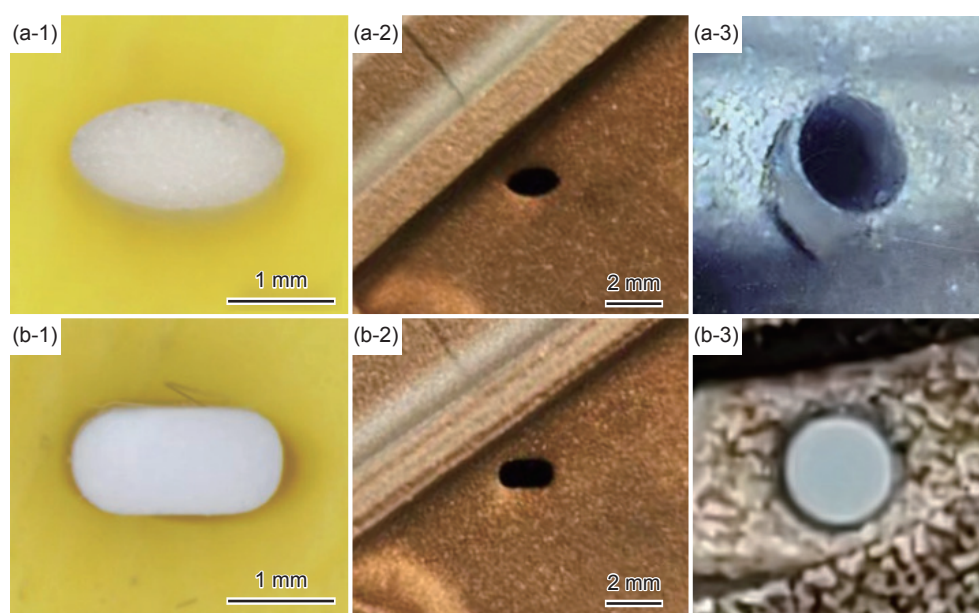


图7 采用干袋等静压法(a)和增材制造方法(b)制备的跑道形铝基陶瓷棒(1)、跑道形叶片工艺孔(2)和圆形叶片工艺孔(3)

Fig. 7 Runway-shaped alumina-based ceramic rod (1), runway-shaped blade process hole (2), and round blade process hole (3) using dry-bag isostatic pressing (a) and additive manufacturing (b)

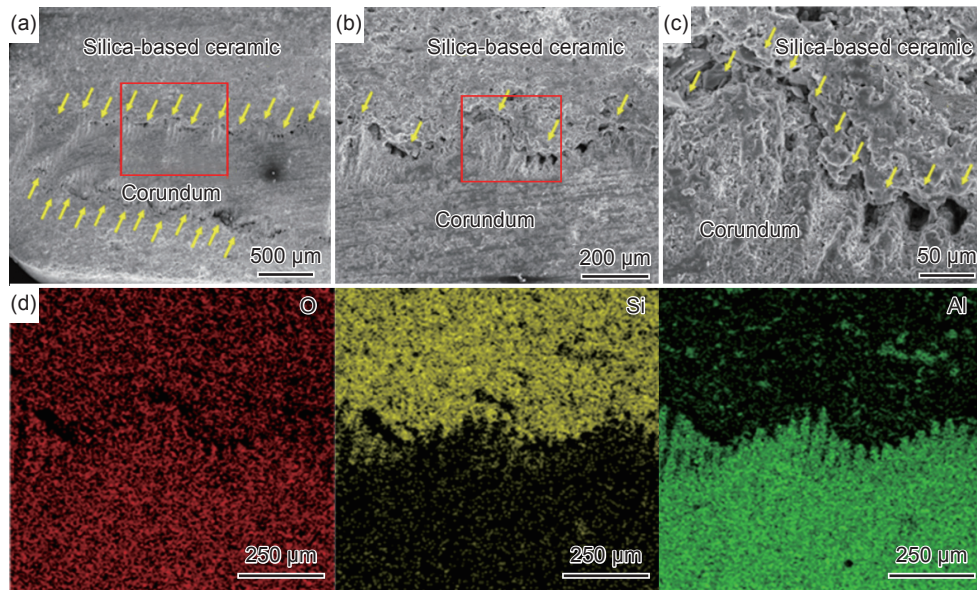


图8 铝-硅基陶瓷型芯微观组织 (a)SEM图;(b)图(a)中局部放大图;(c)图(b)中局部放大图;(d)图(b)的能谱分析  
Fig. 8 Microstructures of alumina-silica based ceramic core (a) SEM pattern; (b) local magnification in Fig.(a); (c) local magnification in Fig.(b); (d) EDS analysis in Fig.(b)

纹中,形成紧密结合的硅-铝材料,经历高温过程后,硅-铝异质界面未形成通道,有效防止浇注时高温合金液体浸入。

### 3 结论

(1)采用光固化增材制造方法制备铝基陶瓷部件、热压注法制备硅基陶瓷材料的复合成型陶瓷型芯技术,可制备兼具高尺寸精度、抗冲击性、退让性和溶失性的陶瓷型芯,将陶瓷型芯上不规则精细结构的尺寸精度提升至 $\pm 0.003$  mm,且抗弯强度由12 MPa(硅基陶瓷材料)提升至314 MPa(铝基陶瓷材料)。

(2)基于铝基陶瓷和硅基陶瓷的热膨胀率、收缩率和弹性模量的差异性,推导热过程导致的铝-硅材料异质界面分离间隙宽度,借助光固化增材制造铝基陶瓷部件表面微观纹理设计,在复合成型的陶瓷型芯上形成镶嵌咬合式铝-硅界面微观结构,提高异质界面的物理结合能力,有效补偿热过程异质界面分离。

(3)采用光固化-热压注复合成型的铝-硅基陶瓷型芯,完成单晶空心涡轮叶片的基础浇注验证,验证结果表明,该型芯可提高叶片工艺孔的尺寸符合性,消除铝-硅界面分离导致的多余金属现象。

#### 参考文献:

[1] 焦华宾,莫松.航空涡轮发动机现状及未来发展综述

[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(12): 62-65.

JIAO H B, MO S. Present status and development trend of aircraft turbine engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(12): 62-65.

[2] 董志国,王鸣,李晓欣,等.航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展[J]. *钢铁研究学报*, 2011, 23(增刊2): 455-457.

DONG Z G, WANG M, LI X X, et al. Application and progress of materials for turbine blade of aeroengine[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2011, 23(Suppl 2): 455-457.

[3] PEREPEZKO J H. The hotter the engine, the better[J]. *Science*, 2009, 326(5956): 1068-1069.

[4] 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): 6-28.

KONG X C, ZHANG Z Q, ZHU J Q, et al. Research progress on cooling structure of aeroengine air-cooled turbine blade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 6-28.

[5] 金捷,钟燕.先进航空发动机设计与制造技术综述[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(5): 34-37.

JIN J, ZHONG Y. Design and manufacturing technology of advanced aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(5): 34-37.

[6] GROMADA M, ŚWIECA A, KOSTECKI M, et al. Ceramic cores for turbine blades via injection moulding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 107-112.

[7] KIM E H, PARK H Y, LEE C L, et al. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic

- core[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 3348-3356.
- [8] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. *铸造*, 2018, 67(9): 790-793.  
LIANG Q R, WU Y S, LIU X F, et al. Development progress of ceramic cores for casting turbine blades of aero engines[J]. *Foundry*, 2018, 67(9): 790-793.
- [9] 康海峰, 李飞, 赵彦杰, 等. 高温合金空心叶片精密铸造用陶瓷型芯与型壳的研究现状[J]. *材料工程*, 2013(8): 85-91.  
KANG H F, LI F, ZHAO Y J, et al. Research status on ceramic cores and shells for superalloy hollow blades investment casting[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013(8): 85-91.
- [10] 潘继勇, 刘孝福, 何立明, 等. 硅基陶瓷型芯的研究进展[J]. *铸造*, 2012, 61(2): 174-178.  
PAN J Y, LIU X F, HE L M, et al. Research progress of silica-base ceramic core[J]. *Foundry*, 2012, 61(2): 174-178.
- [11] RIZKALLA A S, JONES D W. Mechanical properties of commercial high strength ceramic core materials[J]. *Dental Materials*, 2004, 20(2): 207-212.
- [12] XU Z L, ZHONG J W, SU X L, et al. Experimental study on mechanical properties of silica-based ceramic core for directional solidification of single crystal superalloy[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(1): 394-401.
- [13] 胡春阳, 贾志伟, 肖强伟, 等. 陶瓷型芯对含内腔钛合金铸件尺寸和质量的影响[J]. *铸造工程*, 2024, 48(3): 12-16.  
HU C Y, JIA Z W, XIAO Q W, et al. Effect of ceramic core on the size and quality of annular titanium alloy castings with inner groove[J]. *Foundry Engineering*, 2024, 48(3): 12-16.
- [14] 穆岩, 王树森, 白炜琛, 等. 高温合金熔模精密铸造陶瓷型芯研究进展[J]. *铸造技术*, 2024, 45(6): 503-513.  
MU Y, WANG S S, BAI W C, et al. Review of the research progress of ceramic cores for the precision investment casting of superalloys[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(6): 503-513.
- [15] 牛书鑫, 许西庆, 李鑫, 等. 石英纤维增强硅基陶瓷型芯制备与性能[J]. *中国陶瓷*, 2020, 56(9): 31-35.  
NIU S X, XU X Q, LI X, et al. Preparation and properties of silica-based ceramic cores reinforced by silica fibers[J]. *China Ceramics*, 2020, 56(9): 31-35.
- [16] 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.  
NIU S X, LIU Z P, ZHOU T T, 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.
- [17] 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 Q, DING F Z, XUAN W D, et al. Progress in mineralizer regulating microstructure and properties of ceramic cores[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2025, 45(2): 179-186.
- [18] 李波, 于兴福, 刘家胜, 等. 型芯抗弯强度的影响因素及空心型芯的制备技术[J]. *铸造*, 2012, 61(3): 316-319.  
LI B, YU X F, LIU J S, et al. Influencing factors of core bending strength and preparation technology of hollow core[J]. *Foundry*, 2012, 61(3): 316-319.
- [19] 王丽丽, 李嘉荣, 唐定中, 等. 硅铝复合水解液对硅基陶瓷型芯高温性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38(5): 521-524.  
WANG L L, LI J R, TANG D Z, et al. Effects of impregnation by hydrolysate with different Si/Al ratio on high temperature properties of silica-based ceramic cores[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(5): 521-524.
- [20] 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 H N, XU X Q, LI X, et al. Preparation and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores modified by alumina[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(5): 212-217.
- [21] 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 X F, LI X, XU X Q, 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.
- [22] 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 H, LI X, NIU S X, et al. Crystallization behavior and properties of silica/mullite ceramic cores[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(5): 902-907.
- [23] MUROGA T. Refractory metals as core materials for Generation IV nuclear reactors[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [24] MARCIN J J. Linkage of composite core features: EP20180184570[P]. 2019-01-23.
- [25] DAVIS R M. Composite, internal reinforced ceramic cores and related methods: US5947181[P]. 1999-09-07.
- [26] 李超, 杜应流, 叶锋, 等. 一种采用石英玻璃棒的硅基陶瓷型芯制备方法: CN202210607090.5[P]. 2022-09-13.  
LI C, DU Y L, YE F, et al. A preparation method of silica-based ceramic core using quartz glass rods: CN2022

- 10607090.5 [P]. 2022-09-13.
- [27] 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 X Q, YANG Y K, LI J, 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.
- [28] 翟小菲, 陈婧祎, 张学勤, 等. 陶瓷型芯 3D 打印研究进展与挑战 [J]. *陶瓷学报*, 2023, 44(5): 831-848.  
ZHAI X F, CHEN J Y, ZHANG X Q, et al. Recent progresses and challenges of 3D printing of ceramic cores [J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44(5): 831-848.
- [29] LI J G, AN X L, LIANG J J, et al. Recent advances in the stereolithographic three-dimensional printing of ceramic cores: challenges and prospects [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 117: 79-98.
- [30] LI Q L, CHEN T C, LIANG J J, et al. Manufacturing of ceramic cores: from hot injection to 3D printing [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 134: 95-105.
- [31] 马月婷, 尹绍奎, 于瑞龙, 等. 光固化 3D 打印陶瓷型芯技术的研究进展 [J]. *铸造*, 2022, 71(3): 271-276.  
MA Y T, YIN S K, YU R L, et al. Research progress of light-curing 3D printing ceramic core technology [J]. *Foundry*, 2022, 71(3): 271-276.
- [32] 李乔磊, 李金国, 梁静静, 等. 光固化 3D 打印制备空心叶片陶瓷型芯研究进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(11): 1339-1344.  
LI Q L, LI J G, LIANG J J, et al. Research progress in ceramic core of hollow blades by photocurable 3D printing [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, 41(11): 1339-1344.
- [33] 胡可辉, 赵鹏程, 吕志刚. 光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用 [J]. *铸造*, 2021, 70(2): 155-159.  
HU K H, ZHAO P C, LV Z G. Application of stereolithography technology to investment casting [J]. *Foundry*, 2021, 70(2): 155-159.
- [34] 李红霞. 耐火材料手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.  
LI H X. Handbook of refractories [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [35] 谭训彦, 王昕, 尹衍升, 等.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的晶体结构与价电子的晶体结构 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(增刊 1): 18-23.  
TAN X Y, WANG X, YIN Y S, et al. Crystal structure and valence electron structure of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(Suppl 1): 18-23.

收稿日期: 2024-12-02; 录用日期: 2025-01-08

通讯作者: 王玥(1996—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为精密铸造陶瓷型芯, 联系地址: 北京市 81 号信箱 1 分箱 (100095), E-mail: [w18813003089@163.com](mailto:w18813003089@163.com)

(本文责编: 陈 卉)