

# 基于光固化的羟基磷灰石3D打印工艺研究

顾嘉骏<sup>1</sup>, 焦晨<sup>1</sup>, 曹颖<sup>1</sup>, 韩霄<sup>2</sup>, 田宗军<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

**[摘要]** 陶瓷材料因其强度高、密度低、耐高温及耐腐蚀等特点在航空航天领域具有广阔的应用前景。针对传统成型方式的局限性,对羟基磷灰石陶瓷材料的光固化3D打印工艺进行了研究。使用微米级羟基磷灰石粉末和光敏树脂,配制出可供3D打印的羟基磷灰石陶瓷浆料,成型出羟基磷灰石陶瓷坯体。根据TG-DSC热分析法,确定了陶瓷坯体的脱脂工艺参数,烧结出羟基磷灰石陶瓷样件。使用SEM扫面电镜观察样件表面形貌,通过X射线衍射分析物相组成,并通过阿基米德排水法测得其致密度,使用万能材料试验机测量样件的抗弯强度。试验结果证明,利用光固化3D打印技术可以成型出致密度为94.9%,抗弯强度约为41.3MPa的羟基磷灰石陶瓷样件。

**关键词:** 羟基磷灰石; 光固化; 3D打印; 瓷砖黏度; 脱脂烧结; 尺寸收缩; 力学特性

## Study on 3D Printing Process of Hydroxyapatite Via Digital Light Processing

GU Jiajun<sup>1</sup>, JIAO Chen<sup>1</sup>, CAO Ying<sup>1</sup>, HAN Xiao<sup>2</sup>, TIAN Zongjun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**[ABSTRACT]** Because of its high strength, low density, high temperature resistance and corrosion resistance, ceramic materials have a broad application prospect in aerospace field. Aiming at the limitation of traditional molding method, the digital light processing of hydroxyapatite is studied in this paper. Using micrometer hydroxyapatite powder and photo sensitive resin, the hydroxyapatite ceramic slurry for 3D printing was prepared and the hydroxyapatite ceramic blank was formed. Based on TG-DSC thermal analysis, the degreasing process parameters of ceramic green body were determined, and hydroxyapatite ceramic samples were sintered. The surface morphology of the sample was observed by SEM. The phase composition of the sample was analyzed by X-ray diffraction and the density was measured by Archimedes drainage method. The bending strength of the sample was measured by a universal material tester. The experimental results show that hydroxyapatite ceramic samples with density of 94.9% and flexural strength of 41.3MPa can be fabricated by using digital light processing.

**Keywords:** Hydroxyapatite; Digital light processing; 3D printing; Ceramic viscosity; Degreasing and sintering; Dimensional shrinkage; Mechanical property

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.17.068

陶瓷材料是一种无机非金属材料,通常具备高熔点、高硬度、高耐磨性等优点,是航空航天领域中不可缺少的一类先进材料。传统的干压、注射成形方式在制备一些形状较为复杂的陶瓷时存在较多局限性。近年来随着3D打印技术的发展和在各领域的应用,陶瓷的制造方式得以拓展,陶瓷的3D打印技术正在被逐渐开发<sup>[1-3]</sup>。

南洋理工大学 Tan 等<sup>[4]</sup>将聚醚醚酮(PEEK)与羟基磷灰石复合,通过选区激光烧结(SLS)技术成型出羟

基磷灰石基陶瓷样件。华中科技大学史玉升等<sup>[5]</sup>研究了一种用于激光选区烧结的复合粉体制备方法,通过溶解沉淀法或溶剂蒸发法将高分子聚合物包覆在陶瓷颗粒表面制得复合粉体,这种粉末经过SLS烧结成型后可以获得性能良好的陶瓷件。西安交通大学的李涤尘等<sup>[6]</sup>用DLP面曝光方式成型磷酸三钙陶瓷,研究了曝光光强、时间和固化层厚等参数对坯体成形的影响,在脱脂烧结后制备出磷酸钙陶瓷样件。

陶瓷光固化 3D 打印技术是一种逐层固化的陶瓷打印技术<sup>[7]</sup>。将需要制作的模型通过软件切片处理,导入光固化打印机,使用光敏树脂和陶瓷颗粒为原材料配制陶瓷浆料<sup>[8-10]</sup>,利用波长约为 340~420nm 的紫外光对浆料进行固化,从而分层打印出陶瓷坯体,之后对坯体进行脱脂烧结,最终成型出陶瓷样件<sup>[11-14]</sup>。

在使用光固化 3D 打印技术制备陶瓷时,陶瓷样件最终的成型质量主要受陶瓷浆料的 DLP 面曝光成型工艺及坯体的脱脂烧结工艺两个方面影响。预制陶瓷浆料的固含量、黏度、固化特性以及固化光源的曝光参数都是影响坯体打印质量的关键因素,使用未优化的成型参数会导致陶瓷坯体出现分层、变形等缺陷;另一方面,坯体脱脂烧结时的温度曲线是影响最终成型的关键,由于光固化成型的陶瓷坯体固含量普遍较低,所以在脱脂烧结时尺寸质量变化较大,升温速率过快会导致烧结件松散(含气孔)、开裂等缺陷。

本文使用光固化树脂与微米级羟基磷灰石粉末等原料配制出流变特性较好的陶瓷浆料,研究和优化光固化成型坯体时的工艺参数,制得精度较高的羟基磷灰石样件坯体。利用失重和差热等热分析手段,研究坯体在脱脂与烧结过程中的分解过程,确定优化脱脂烧结参数。通过测量成型件的致密度、烧结收缩率、判定物相组成,分析了羟基磷灰石陶瓷的成型效果,最终制得精度高、强度大的羟基磷灰石陶瓷样件。

## 1 试验及方法

### 1.1 陶瓷浆料配制

用于光固化 3D 打印的陶瓷浆料必须具有一定的流动性、黏度和稳定性,同时为了减小脱脂烧结后陶瓷坯体的收缩变形,应尽量提高浆料中陶瓷粉末的固含量。本文所使用的丙烯酸甲酯光固化树脂材料购自上海光易化工有限公司;粒径为 3 $\mu\text{m}$  的羟基磷灰石粉末购自西安沣禾生物科技有限公司;分散剂为液体聚丙烯酸钠盐,购自河北津宏化工有限公司。将羟基磷灰石粉末、光固化树脂及分散剂在球磨机中球磨 12h,配制出固含量质量分数在 10%~60% 的羟基磷灰石树脂浆料,使用黏度计测量不同温度下的陶瓷浆料黏度。

### 1.2 坯体成形

陶瓷坯体的成型使用南京航空航天大学自主研发的 DLP 光固化打印机,其数字光处理器(DLP)投影仪的光源波长为 405nm,投影精度为 100 $\mu\text{m}$ 。试验成型基板尺寸为 80mm $\times$ 80mm, $z$  轴定位精度为 10 $\mu\text{m}$ ,可成型的浆料黏度不超过 10000mPa $\cdot$ s,打印机内部机械机构如图 1 所示。

使用 Magics20.03 设计不同特征模型,其中模型(a)

为边长 20mm,厚 2mm 的简易刀具模型;模型(b)为 50mm(长) $\times$ 6mm(宽) $\times$ 4mm(高)的 3 点抗弯样件,如图 2 所示。

将配制好的陶瓷浆料倒入成型缸,使用计算机辅助软件将模型切片后导入光固化打印机。打印时刮刀将陶瓷浆料平铺于成型膜上,之后电机驱动基板下降,靠近成型膜,紫外光投影透过料槽底部成型膜,将一层截面光固化成型在基板上,基板抬起,如此往复逐层制造,打印出陶瓷坯体。光固化 3D 打印机参数为:曝光时间 6s;光强 10000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ;成形基板尺寸 60mm $\times$ 60mm;层厚 0.1mm,可以保证曝光界面充分固化,同时避免非曝光界面出现固化情况,坯体完全黏结在基板上,不会在成型缸内部出现残留。

### 1.3 脱脂烧结曲线

使用同步热分析仪(STA449F3,德国耐驰仪器制造有限公司)测量陶瓷坯体在高温下的热重曲线(TG)与差热曲线(DSC)。参照 TG-DSC 曲线制定羟基磷灰石陶瓷坯体的脱脂烧结曲线,使用游标卡尺测量不同样件在烧结前后的尺寸。陶瓷坯体和烧结出的陶瓷样件如图 3 所示。

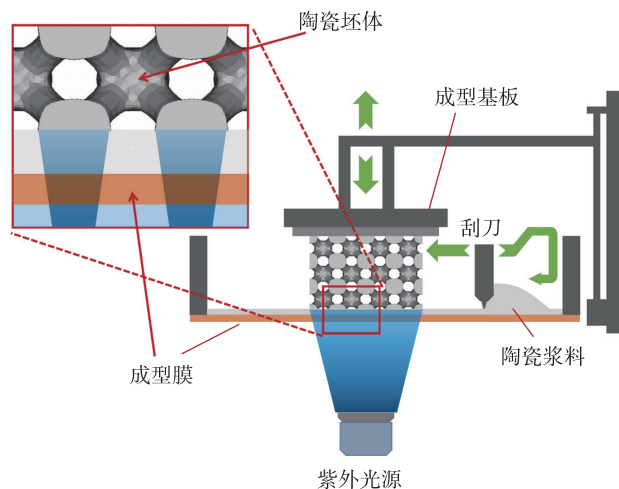


图1 陶瓷打印机内部结构

Fig.1 Internal structure of ceramic printer

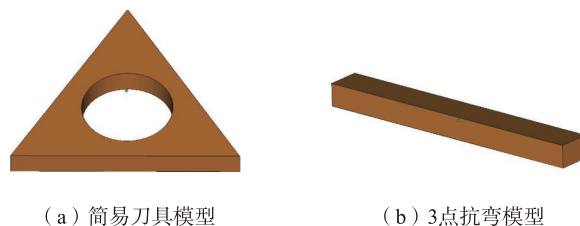


图2 特征模型

Fig.2 Feature models

### 1.4 成型样件表征

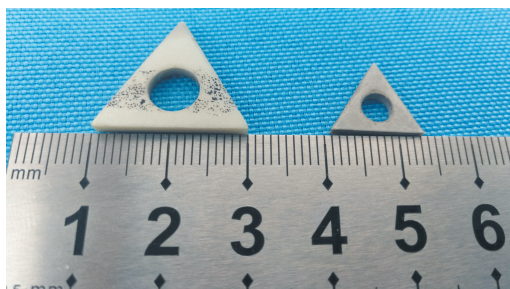
利用 X 射线衍射仪对陶瓷样件进行化学成分检测;对购买羟基磷灰石粉、成型坯体及烧结后的陶瓷样件进行 X 射线衍射,衍射参数为  $2\theta=0.02^\circ$ 、电压 40kV、电流 20mA、扫描速度  $10^\circ/\text{min}$ 。使用扫面电镜(Hitachi S-4800,日本日立公司)观察坯体及烧结件的形貌特征。利用阿基米德排水法测量样件致密度。使用万能材料试验机(Instron-5566,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司)测量陶瓷样件的抗弯强度。

## 2 结果与讨论

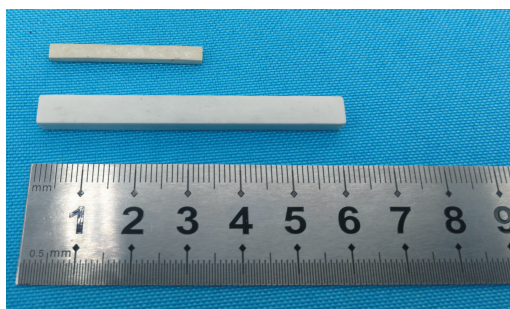
### 2.1 浆料黏度

本试验中陶瓷浆料的黏度主要受固含量、温度两个因素影响。当固含量质量分数超过 50% 时,浆料黏度迅速增加,当固含量质量分数超过 60% 时,浆料在室温环境下完全不具备流动性,无法用于光固化成型。树脂基陶瓷浆料可以通过适当升温来降低其黏度,但是当温度过高时会导致 DLP 设备的透光膜加速老化,影响成型精度。

图 4 为不同固含量浆料的剪切黏度图,黏度随着浆料固含量的增加而增加,随着温度的升高而降低。为了避免脱脂烧结过程中产生缺陷,配制陶瓷浆料时应当尽量提高浆料的固含量。本次试验使用固含量质量分数为 45% 的羟基磷灰石陶瓷浆料,打印机内部温度控制在  $50^\circ\text{C}$ 。



(a) 简易刀具坯体及烧结件



(b) 3 点抗弯坯体及烧结件

图3 特征样件  
Fig.3 Feature sample

### 2.2 坯体脱脂烧结

羟基磷灰石坯体的 TG-DSC 曲线如图 5 所示。坯体的第一个失重过程在  $80\sim 120^\circ\text{C}$ ,从 DSC 曲线为正值、样件吸热推测这一阶段坯体发生的主要变化为脱水(液态水及结晶水)。脱脂过程主要在  $200\sim 600^\circ\text{C}$ ,坯体中树脂等有机物发生了液化、汽化的物理反应以及氧化的化学反应。其中液化、汽化等物理反应是吸热过程,而氧化反应是放热过程。整个脱脂过程在空气气氛下完成,整体为放热的过程,可以推测这一过程中以树脂的氧化为主,也存在树脂的液化及汽化过程。对比 DTG 曲线上的两个失重峰,DSC 曲线上的峰值差异较大,DSC 在  $420^\circ\text{C}$  曲线峰值与  $310^\circ\text{C}$  的峰值相差较大,有显著的氧化反应特征。当样件温度达到  $500^\circ\text{C}$  时,样件质量及吸放热基本保持稳定,质量缓慢下降,吸放热达到平衡,这一过程基本保持到了  $900^\circ\text{C}$  的羟基磷灰石预烧结温度。

根据坯体在  $0\sim 500^\circ\text{C}$  之间的反应过程设定与之相应的脱脂曲线。坯体在  $80^\circ\text{C}$  开始逐步脱去游离水和结晶水,这一过程在  $120^\circ\text{C}$  左右基本结束。从  $300^\circ\text{C}$  开

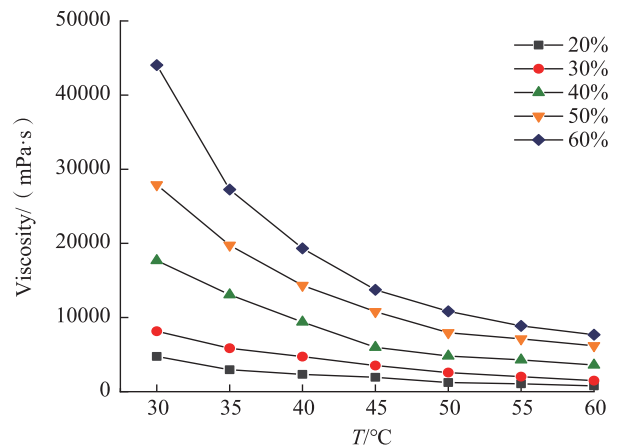


图4 浆料黏度变化曲线

Fig.4 Influence of temperature on slurry viscosity with different solid contents

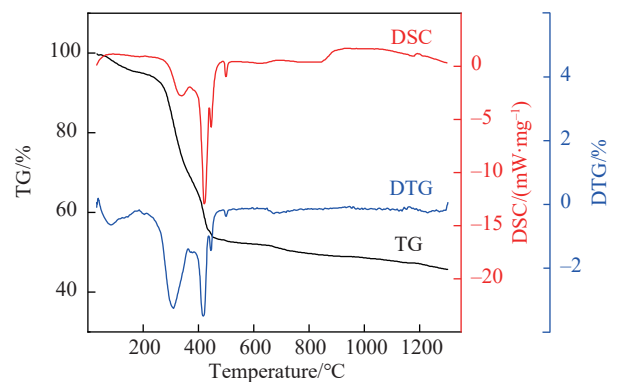


图5 坯体TG-DSC曲线

Fig.5 TG-DSC curves of the as-printed green body

始,树脂等有机物开始相变并氧化,相变过程主要发生在 400℃ 以前,在 400℃ 及以后是树脂的氧化过程,到 500℃ 以后,坯体中树脂基本脱去。综上,本次试验制定图 6 所示的坯体脱脂烧结曲线,在 80℃ 停留 0.5h 脱水,在 310℃、420℃ 两个温度点停留 2h 促进坯体内树脂的相变和氧化,最后在 500℃ 保温 2h 确保树脂完全脱离。脱脂后的坯体在 1100℃ 下烧结 2h 后炉冷至室温。

使用扫面电子显微镜观察烧结后样件的表面形貌如图 7 所示。可以看到 3D 打印逐层的成型过程使样件的侧面分布有层状台阶纹,样件表面整体质量较好,无明显裂纹和气孔,晶粒尺寸分布在 2~10 $\mu\text{m}$  之间。

图 8 为羟基磷灰石粉末、坯体及烧结样件的粉末的 X 射线衍射图谱,可以看到 3 条谱线与羟基磷灰石陶瓷的特征谱线基本吻合。其中,陶瓷坯体的谱线图衍射峰较弱,并且有大量的杂峰,这是因为陶瓷坯体中含有大量树脂等有机物;烧结样件相比粉末的峰值峰宽较窄,峰值较高,这说明烧结结晶度较高。

### 2.3 特征样件的尺寸收缩及致密度

分别测量两种样件在烧结前后的尺寸,并计算各方向的收缩率(表 1)。可以看到坯体成形后的尺寸与模型基本相同,误差不超过 0.16mm。烧结后的样件线性收缩率在 32.7%~38.4% 之间,整体尺寸收缩率分别为 72.1%、73.35%。

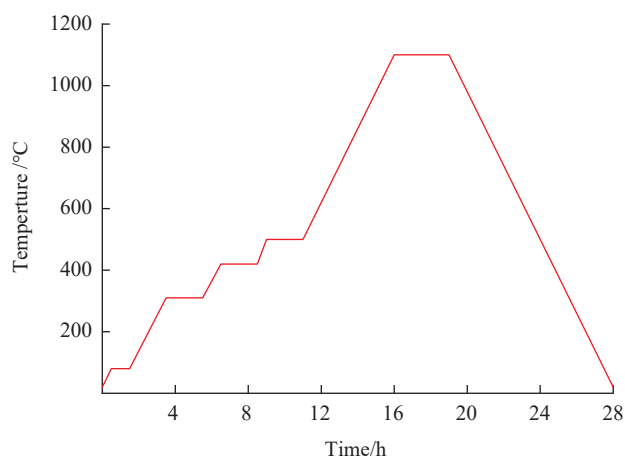
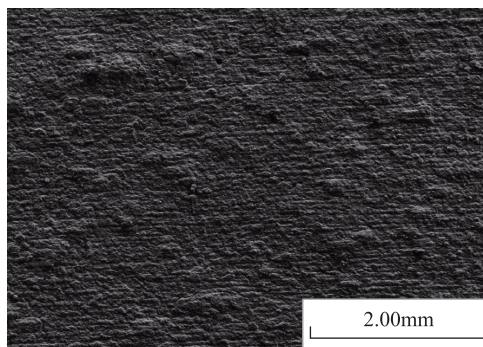
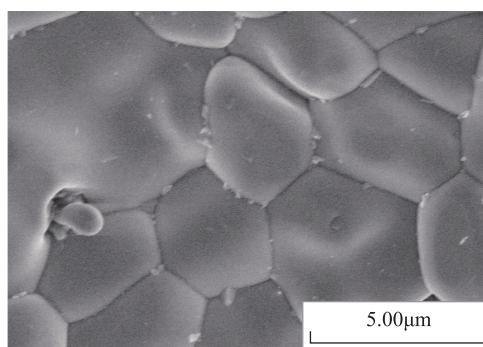


图6 坯体脱脂烧结曲线

Fig.6 Heating curve of sintering



(a) 表面台阶纹



(b) 微观形貌

图7 烧结件表面形貌

Fig.7 Surface topography of sintered body

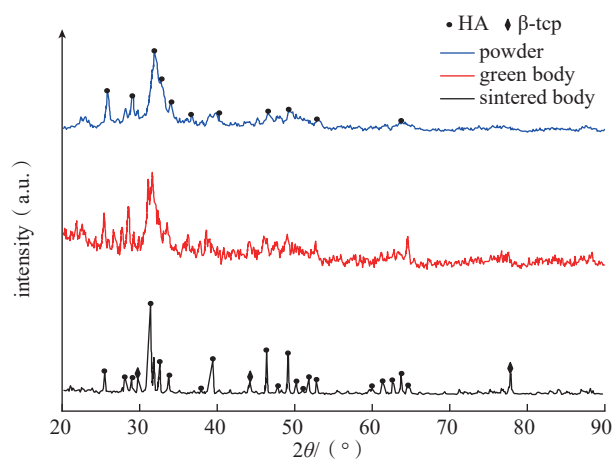


图8 羟基磷灰石粉末、坯体和烧结样件粉末的X射线衍射图谱

Fig.8 XRD pattern of HA ceramic powder, green body and powder of sintered body

表1 烧结件的尺寸及收缩率

Table 1 Size and shrinkage of sintered body

样件	模型边长 / mm	模型厚度 (高度) / mm	坯体边长 / mm	坯体厚度 / mm	烧结件边长 / mm	烧结件厚度 / mm	水平线性收缩率 $S_{Lx}/\%$	垂直线性收缩率 $S_{Lz}/\%$	体积收缩率 $S_v/\%$
样件 a	20	3	19.88	2.94	12.8	1.98	35.61	32.65	72.1
样件 b	6 × 50	4	6.17 × 50.12	3.86	3.82 × 32.16	2.6	38.4% × 35.8%	32.6	73.35

使用阿基米德排水法测量烧结件  $a$  的致密度。排水法测试样件平均致密度  $D_r$  的公式:

$$D_r = \frac{\rho_{实际}}{\rho_{理论}} \times 100\% = \frac{m_1}{m_2 / \rho_{水}} \times 100\% \quad (1)$$

其中,水的密度取  $\rho_{水}=1\text{g}/\text{cm}^3$ ,羟基磷灰石密度取  $\rho_{HA}=3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 。测试过程如下:首先,利用分析天平测出样件的质量  $m_1$ ;然后,把盛有水的烧杯置于天平托盘上,清零;最后,将样件用细线悬吊在水中并使其完全浸没,记录此时天平的读数  $m_2$ 。测量多组样件后取平均值,得到的平均致密度  $D_r$  为 94.9%。

### 2.4 特征样件抗弯强度

使用万能材料试验机测量烧结件  $b$  的三点抗弯强度,陶瓷三点抗弯公式:

$$\sigma = \frac{3FL}{2Bd^2} \quad (2)$$

式中, $F$ 为破坏载荷; $L$ 为跨距; $B$ 为宽度; $d$ 为样件厚度,其中  $L=33\text{mm}$ ,  $B=3.8\text{mm}$ ,  $d=2.6\text{mm}$ 。图 9 为样件应力-应变曲线,测得  $F=114.3\text{N}$ ,带入式(2)计算得到烧结样件的平均抗弯强度为 38.6MPa。

试验证明,通过光固化 3D 打印陶瓷坯体,采用脱脂烧结的方式,可以成型出具有一定强度的羟基磷灰石样件。

## 3 结论

本文从浆料流变特性、脱脂曲线等方面研究了羟基磷灰石陶瓷的光固化 3D 打印工艺,对打印样件的致密度和抗弯强度进行了表征,主要结论如下:

(1)使用微米级羟基磷灰石粉末与光敏树脂材料配制了一种用于光固化 3D 打印的羟基磷灰石陶瓷浆料。浆料固含量质量分数为 45%,在 50°C 下的黏度低

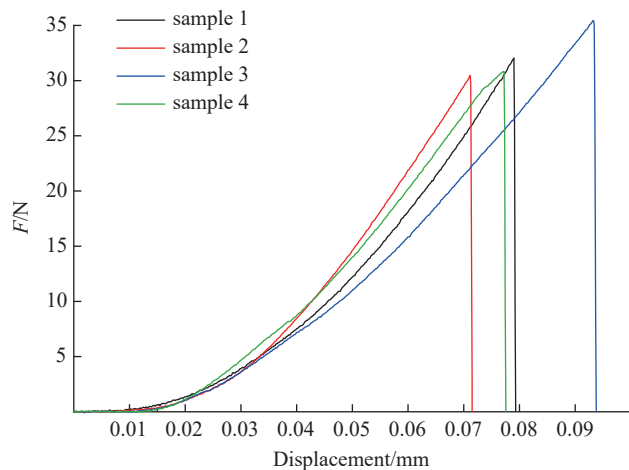


图9 三点抗弯曲线

Fig.9 3-point bending curve

于 10000m·Pa/s,可用于陶瓷光固化打印成型。

(2)参照陶瓷坯体的 TG-DSC 曲线制定了脱脂烧结曲线。烧结后的羟基磷灰石样件表面微观形貌无明显缺陷,晶粒尺寸分布在 2~10 $\mu\text{m}$ 。烧结件的线性收缩率在 32.7%~38.4% 之间,体积收缩率在 72.1%~73.5% 之间。

(3)最终成型的羟基磷灰石样件平均致密度为 94.9%,通过三点抗弯测试得到羟基磷灰石烧结件的平均抗弯强度为 38.6MPa。

## 参考文献

- [1] 杨孟孟, 罗旭东, 谢志鹏. 陶瓷 3D 打印技术综述 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46(1): 183-186.  
YANG Mengmeng, LUO Xudong, XIE Zhipeng. Review of 3D printing technology of ceramic[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2017, 46(1): 183-186.
- [2] 宁会峰, 阎相忠, 朱悦, 等. 水基光固化陶瓷浆料的粘度与分散性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(11): 3944-3949.  
NING Huifeng, YAN Xiangzhong, ZHU Yue, et al. Research on viscosity and dispersity of aqueous ceramic suspension for stereolithography[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(11): 3944-3949.
- [3] 周伟召, 李涤尘, 周鑫南, 等. 基于光固化的直接陶瓷成形工艺 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3): 198-201.  
ZHOU Weizhao, LI Dichen, ZHOU Xinnan, et al. Direct fabrication process of ceramics based on stereolithography[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(3): 198-201.
- [4] TAN K H, CHUA C K, LEONG K F, et al. Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone-hydroxyapatite biocomposite blends[J]. Biomaterials, 2003, 24(18): 3115-3123.
- [5] 林柳兰, 史玉升, 曾繁涛, 等. 高分子粉末烧结件的增强后处理的研究 [J]. 功能材料, 2003, 34(1): 67-72.  
LIN Liulan, SHI Yusheng, ZENG Fandi, et al. Paste resin bleeding through polymeric powder sintering parts[J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(1): 67-72.
- [6] 杨飞, 连琴, 武向权, 等. 陶瓷面曝光快速成形工艺研究 [J]. 机械工程学报, 2017(7): 138-144.  
YANG Fei, LIAN Qin, WU Xiangquan, et al. Ceramics fabrication using rapid prototyping of mask projection stereolithography[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(7): 138-144.
- [7] HATZENBICHLER M, GEPPERT M, GRUBER S, et al. DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Francisco, 2012.
- [8] 赵旭, 龚俊, 宁会峰, 等. 树脂基三维立体光刻陶瓷浆料性能研究 [J]. 陶瓷学报, 2018(1): 77-81.  
ZHAO Xu, GONG Jun, NING Huifeng, et al. Properties of ceramic suspensions for lithography[J]. Journal of Ceramics, 2018(1): 77-81.

(下转至第87页)

教授和杨志研究员,武汉理工大学的曹学强教授与北京农机学院的汪瑞军教授所提供的技术与学术上的支持。

### 参考文献

- [1] BOSE S, DEMASI M J. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1997, 6(1): 99–104.
- [2] SHEN Z Y, HE L M, XU Z H, et al. LZC/YSZ DCL TBCs by EB-PVD: Microstructure, low thermal conductivity and high thermal cycling life[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 1443–1450.
- [3] ADTURE P, ELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. *Science*, 2002, 296: 280–284.
- [4] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(10): 891–898.
- [5] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- CAO Xueqiang. Thermal barrier coating material[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] 刘纯波, 林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(1): 269–291.
- LIU Chunbo, LIN Feng, JIANG Xianliang. Research status and development trend of thermal barrier coatings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(1): 269–291.
- [7] SHEN Z Y, HE L M, XU Z H, et al. Morphological evolution and failure of LZC/YSZ DCL TBCs by electron beam-physical vapor deposition[J]. *Materialia*, 2018, 4: 340–347.
- [8] CAO X Q, VASSEN R, STOEVEER D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24(1): 1–10.
- [9] MISHRA S K, JAGDEESH N, PATHAK L C. Fabrication of nanosized lanthanum zirconate powder and deposition of thermal barrier coating by plasma spray process[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2016, 25(7): 2570–2575.
- [10] Wadley Research Group. High temperature coatings[EB/OL]. [2015–11–16]. <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley>.
- [11] VIARS P. The impact of IHPTET on the engine/aircraft system[C]//Proceedings of Aircraft Design and Operations Meeting. Seattle, 1989: 10.251416.1989–2137.
- [12] BALLAL D R, ZELINA J. Progress in aeroengine technology (1939–2003)[J]. *Journal of Aircraft*, 2004, 41(1): 43–50.
- [13] ZHANG Y, DUAN L F, ZHANG Y, et al. Advances in conceptual electronic nano devices based on 0D and 1D nanomaterials[J]. *Nano-Micro Letters*, 2014, 6(1): 1–19.
- [14] WRBANEK J D, FRALICK G C, BLAHA C A, et al. A multilayered thin film insulator for harsh environments[C]// 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, 2002.
- [15] GLEESON B. Thermal barrier coatings for aeroengine applications[J]. *AIAA Journal of Propulsion & Power*, 2012, 22(2): 375–383.

[16] 段力, 高均超, 汪瑞军, 等. 航空发动机叶片表面热障涂层温度分布的仿真分析[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(8): 915–920.

DUAN Li, GAO Junchao, WANG Ruijun, et al. Simulation analysis of temperature distribution of thermal barrier coatings on aeroengine blades[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2017, 51(8): 915–920.

[17] 高均超, 段力. PDMS 软质模板制备与叶片曲表面图形转移工艺[J]. *微纳电子技术*, 2016, 32(5): 333–339.

GAO Junchao, DUAN Li. Fabrication of PDMS mask and PDMS based soft lithography process on turbine blade[J]. *Micronanoelectronics Technology*, 2016, 14(5): 333–339.

通讯作者: 段力, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信与传感、MEMS 技术在航空发动机上的交叉应用, E-mail: frankliudian@sjtu.edu.cn.

(责编 铃兰)

(上接第72页)

[9] 宁会峰, 阎相忠, 朱悦, 等. 水基光固化陶瓷浆料的粘度与分散性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(11): 3944–3949.

NING Huifeng, YAN Xiangzhong, ZHU Yue, et al. Research on viscosity and dispersity of aqueous ceramic suspension for stereolithography[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(11): 3944–3949.

[10] 范哲超, 丰洪微, 陈磊, 等. 基于 DLP 技术光固化 3D 打印系统研究与实践[J]. *铸造技术*, 2018(3): 582–585.

FAN Zhechao, FENG Hongwei, CHEN Lei, et al. Research and practice of light curing 3D printing system based on DLP technology[J]. *Foundry Technology*, 2018(3): 582–585.

[11] 卢振, 蒋少松, 张凯锋. 陶瓷粉末微注射成形脱脂与烧结机理相关研究[J]. *精密成形工程*, 2015(3): 33–36.

LU Zhen, JIANG Shaosong, ZHANG Kaifeng. Fundamental research on debinding and sintering of submicron pillar arrays made by ceramic micro powder injection molding[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015(3): 33–36.

[12] EMIL J, OSCAR L, JAN J, et al. Influence of resin composition on the defect formation in alumina manufactured by stereolithography[J]. *Materials*, 2017, 10(2): 10020138.

[13] ZHOU M, WEI L, WU H, et al. Preparation of a defect free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography optimization of the drying and debinding processes[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(10): 598–602.

[14] PFAFFINGER M, MITTERAMSKOGLER G, GMEINER R, et al. Thermal debinding of ceramic-filled photopolymers[J]. *Materials Science Forum*, 2015, 825–826: 75–81.

通讯作者: 田宗军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种加工技术、增材制造(3D 打印技术), E-mail: Tianzj@nuaa.edu.cn.

(责编 铃兰)