第 49 卷第 9 期
2021 年 9 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 9
September，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210167

3D 打印空心点阵结构氧化铝陶瓷及其性能

孙立君[1,2,3]，董 鹏[4]，曾 勇[1,2,3]，陈继民[1,2,3]

(1. 北京工业大学材料与制造学部，北京 100124；2. 北京市数字化医疗 3D 打印工程技术研究中心，北京 100124；
3. 跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室，北京 100124；4. 首都航天机械有限公司，北京 100076)

摘 要：多孔氧化铝陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、低热导率等众多优异的性能，在工业隔热领域的需求持续增加。采用数字光处理(DLP)3D 打印技术制备了实心点阵和空心点阵 2 种不同构型的氧化铝陶瓷坯体，在 1 550 ℃的最佳烧结温度下保温 4 h 烧结出性能稳定的氧化铝陶瓷。结果表明，实心点阵比空心点阵具有更大的抗压强度，实心点阵的最大抗压强度为 4.80 MPa。空心点阵的最大抗压强度为 1.59 MPa。力学测试结果与力学模拟仿真结果具有一致性。DLP 技术成形的空心点阵结构氧化铝陶瓷将来可用于工业隔热应用领域。

关键词：3D 打印；多孔氧化铝；空心结构；力学性能；隔热性能
中图分类号：TQ174.75　　**文献标志码**：　　**文章编号**：0454–5648(2021)09–1853–08
网络出版时间：2021–07–26



Preparation of Hollow Lattice Alumina Ceramics by 3D Printing

SUN Lijun[1,2,3], *DONG Peng*[4], *ZENG Yong*[1,2,3], *CHEN Jimin*[1,2,3]

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 2. Beijing Engineering Research Center of 3D Printing for Digital Medical Health, Beijing, 100124, China; 3. Key Laboratory of cross scale laser forming technology, Ministry of education, Beijing 100124, China; 4. Capital aerospace machinery corporation limited, Beijing 100076, China)

Abstract: Porous alumina ceramics have many superior properties, such as high-temperature resistance, corrosion resistance, and low thermal conductivity. Alumina ceramics with solid and hollow lattices were prepared by a digital light processing (DLP) 3D printing technique. Stable alumina ceramics were sintered at 1 550 ℃ for 4h. The experimental results show that alumina ceramic with the solid lattice has a higher compressive strength rather than that with the hollow lattice, and the maximum compressive strength of alumina ceramic with the solid lattice is 4.80 MPa. The maximum compressive strength of the ceramic with the hollow lattice is 1.59 MPa. The results of mechanical tests are similar to the simulation data. Alumina ceramic with the hollow lattice formed by DLP technique can be used in industrial thermal insulation applications.

Keywords: 3D printing; porous alumina; hollow structure; mechanical properties; thermal insulation properties

氧化铝是一种用途广泛的结构陶瓷，它具有耐高温、耐腐蚀、低热导率、抗冲击性等众多优异的性能，被广泛应用于汽车、船舶、航空航天等领域[1]。近年来，多孔氧化铝陶瓷[2–3]常被用于工业生产与应用中的隔热材料[4]，其隔热原理主要是基于材料本身和材料基体内介质的低导热系数。因此，多孔氧化铝陶瓷可被用于高温环境下防止热量的消散或者低温环境下隔绝热量的流入。

目前多孔氧化铝陶瓷的制备方法主要有添加造孔剂法[5–6]、物理发泡法[7–8]、溶胶–凝胶法[9–11]等。虽然这些传统方法能够制造出多孔氧化铝陶瓷，但它们往往伴随着气孔率低、孔径大小不均匀、成形

收稿日期：2021–03–09。　修订日期：2021–04–05。
基金项目：北京市教委科研计划项目资助(KM2020100050003)。
第一作者：孙立君(1996—)，男，硕士研究生。
通信作者：曾 勇(1987—)，男，博士，副教授。

Received date: 2021–03–09.　**Revised date:** 2021–04–05.
First author: SUN Lijun (1996–), male, Master candidate.
E-mail: slj927@163.com
Correspondent author: ZENG Yong (1987–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: zengyong@bjut.edu.cn

工艺复杂、结构简单等缺点，所以很难实现对多孔氧化铝陶瓷构型的精确调控[12–14]。同时，传统方法对于复杂结构成形具有局限性，因此限制了多孔氧化铝陶瓷在特殊领域的应用[15–16]。另外，对于工业应用，多孔氧化铝隔热材料对体积和重量都有严格要求[17]。传统方法制备的多孔氧化铝陶瓷孔隙分布不均匀，难以对体积和重量进行精确的控制，造成了力学性能和隔热性能的不稳定性，难以满足工业要求。多孔空心点阵是一种新型多孔结构，其剪切强度、压缩强度和比表面积优于传统的多孔结构，能够提供稳定的力学性能和隔热性能[18]。近年来，3D 打印技术的出现实现了复杂构型陶瓷的快速制备[19–20]。数字光处理(DLP)3D 打印技术是一种新型面曝光成形工艺，其具有成形精度高、打印速度快、成本低等优点，可以实现高精度、高性能的多孔结构和复杂薄壁结构陶瓷零件的快速制造[21]。

采用 DLP 3D 打印技术制备了空心点阵和实心点阵 2 种构型的氧化铝陶瓷坯体，在 TG/DSC 曲线的指导下制定了不同的热处理工艺参数。通过 SEM、XRD、Raman 等表征手段对氧化铝陶瓷的微观形貌、相组成等进行分析。从而确定了氧化铝陶瓷的最佳热处理工艺参数。利用工业 CT 对 2 种构型氧化铝陶瓷的精度和形状进行分析。最后通过模拟仿真和测试对不同细杆外径的空心点阵和实心点阵氧化铝陶瓷的力学性能进行研究。

1 实验

1.1 浆料制备

高固含量陶瓷主要由氧化铝粉末、树脂单体、光引发剂以及其他添加剂组成。其中树脂单体为甲基丙烯酸酯(密度为 0.94 g/cm^3，折射率为 1.408)，氧化铝粉末(纯度>99%)，其粒径分布如图 1 所示，粉末粒径的 $D_{0.1}$=0.081 μm，$D_{0.5}$=4.416 μm，$D_{0.9}$=16.143 μm。

分散剂为四氢呋喃(密度为 0.88 g/cm^3)，光引发剂为樟脑醌。

配制高固含量氧化铝陶瓷浆料的步骤如下：首先，在 14%(质量分数)的甲基丙烯酸酯树脂单体中加入 2%的四氢呋喃分散剂制得预混溶液，将预混溶液在均质机(ZYMC–180HV)中以 1 000 r/min 的转速搅拌 1 min；将 83%的氧化铝粉体添加到预混溶液中；最后加入 1%的樟脑醌光引发剂，放入均质机以 2 000 r/min 的转速搅拌 1 min 使其充分混合并真空消泡。将混合好的陶瓷浆料经三辊机(ZYTR–50)制备得到高固相含量的氧化铝陶瓷浆料。

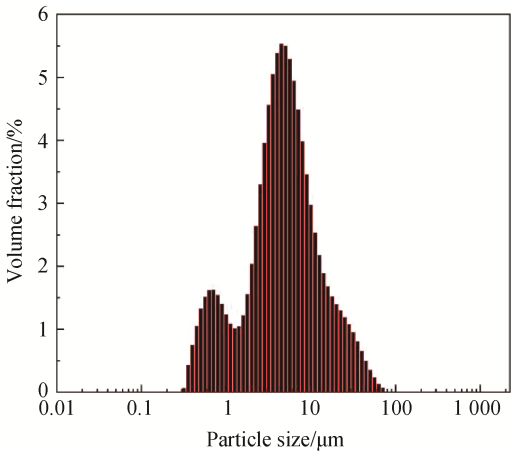


图 1 氧化铝粉末的粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of alumina powder

1.2 3D 打印制备流程

图 2 为氧化铝陶瓷的制备流程图。由图 2 可见，将已建好的模型导入 CeraFab 7 500 型 3D 打印机中进行切片处理，向打印机中添加配制好的陶瓷浆料，设置打印层厚为 50 μm，曝光时间为 2 s，功率密度为 85 mW/cm²。打印机打印出氧化铝陶瓷的坯体后，将其放置在 40 ℃的恒温干燥箱中进行恒温干燥，然后通过脱脂将坯体中的光敏树脂等有机物完全排出，最后通过高温烧结得到纯净的氧化铝陶瓷样品。

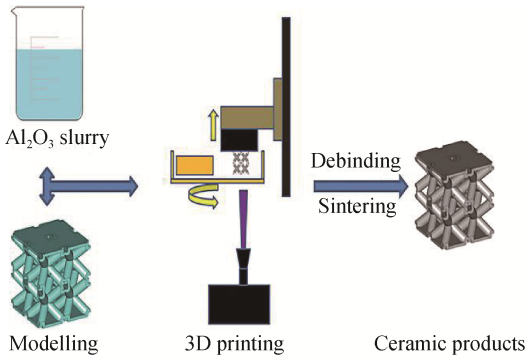


图 2 3D 打印制备氧化铝陶瓷流程图

Fig. 2 Flow chart of 3D printing alumina ceramics

1.3 样品表征

将少量氧化铝陶瓷样品放置在 Labsys evo 型高温同步热分析仪中，在空气气氛下以 5 ℃/min 的速率将样品升温至 1 100 ℃，通过测得的 TG/DSC 曲线，对样品的脱脂烧结工艺曲线进行指导。将打印好的坯体放置在 FMJ–07/11 型脱脂炉中从室温逐步加热到 900 ℃进行预烧结以提高脱脂件的强度并充分去除坯体中的有机物，具体脱脂工艺如图 4 所示。将脱脂件放在 FMJ–08/17 型烧结炉中升温到烧结温度以促进晶粒生长和样品收缩，具体烧结工艺如图

5 所示。将热处理前后的坯体和烧结体进行不同方向的收缩率测试：

$$S=\frac{L_{\mathrm{m}}-L_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{m}}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：S 为收缩率；L_{m} 为氧化铝坯体样品的尺寸；L_{s} 为烧结后氧化铝的尺寸。用 GeminiSEM 300 型扫描电子显微镜观察氧化铝陶瓷在不同烧结温度下样品的微观形貌，加速电压 20 kV，探针电流 5 nA。利用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪分析氧化铝陶瓷样品的相组成，测试条件：Cu 靶，管电压 40 kV，管电流 30 mA，测量范围 10°～90°，扫描速率为 10 (°)/min。利用 Horiba–T64000 型 Raman 光谱仪对烧结过程的振动特性进行了分析，激光的激发波长为 532 nm。采用 Instron 5948 Micro Tester 型超高精度静态微力测试机对不同构型的氧化铝陶瓷进行压缩试验，压头移动速率为 0.2 mm/min。采用 ANSYS 模拟仿真软件对不同构型的点阵结构进行力学模拟，先将不同构型的模型在 Solidworks 2014 软件中转成 STP 格式模型，再导入 ANSYS 软件中。

2　结果与讨论

2.1　热处理分析

图 3 为氧化铝陶瓷坯体从室温到 1 100 ℃的 TG/DSC 曲线。由图 3 可见，氧化铝陶瓷坯体的质量损失主要集中在 100~580 ℃。随着温度的升高到 380 ℃，坯体出现第 1 阶段的质量下降。在这个过程中，质量从 100%缓慢下降到 96%。当温度升高到 490 ℃左右时，该阶段主要为光敏树脂的热分解过程，因此质量损失较大，大约损失了 11%。随着温度进一步上升到 580 ℃左右时，生坯中的残余物完全挥发，质量损失 3%。之后，坯体几乎没有质量损失，整个脱脂过程结束。

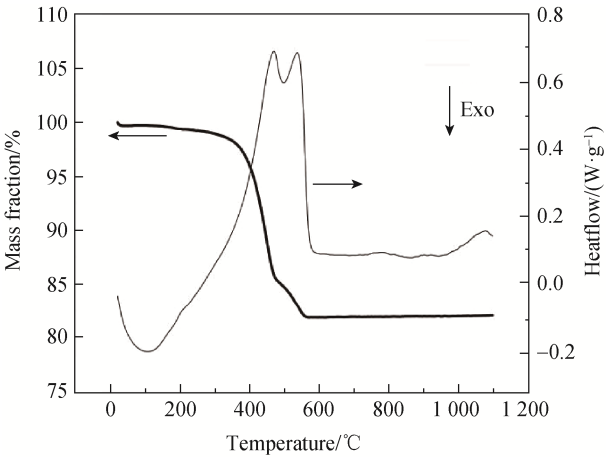


图 3　氧化铝陶瓷体的 TG/DSC 曲线

Fig. 3　TG/DSC curves of alumina ceramics

根据 TG/DSC 曲线制定了如图 4 和图 5 所示的脱脂和烧结方案。

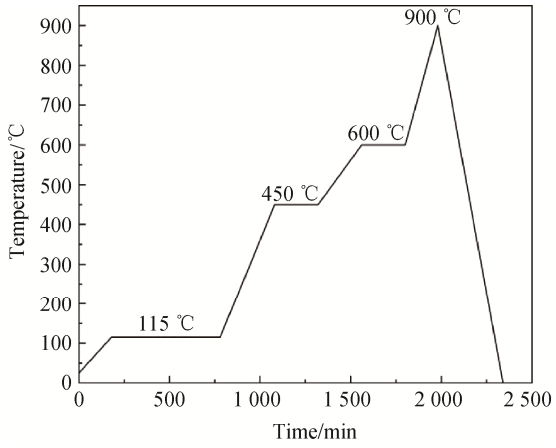


图 4　坯体脱脂方案

Fig. 4　Debinding scheme of green body

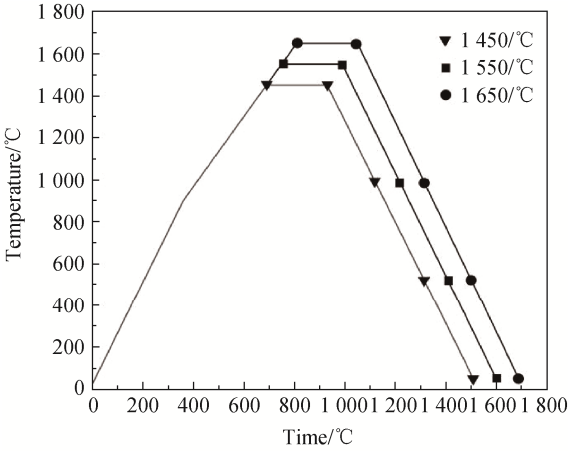


图 5　坯体烧结方案

Fig. 5　Sintering scheme of green body

2.2　氧化铝陶瓷的微观形貌及相组成

图 6 为在不同烧结温度下氧化铝陶瓷的表面和断面微观形貌。

从图 6a 和图 6b 可知，在 1 450 ℃烧结温度下，晶粒与晶粒呈现堆积状态，晶粒与晶粒之间结合不牢固，从氧化铝陶瓷的断面图可以看出有许多较大的孔洞。从图 6c 和 6e 可以看出，随着温度的升高，在 1 550 ℃和 1 650 ℃烧结温度下的表面形貌相似，都出现晶粒与晶粒的连接。但是从两者的断面可以看出，1 650 ℃烧结温度下的断面形貌中仍然存在较大孔洞。而 1 550 ℃烧结温度条件下的断面形貌呈现细小均匀的小孔洞。因此，在烧结温度为 1 550 ℃时观察到最好的微观形貌。另外，从图 6 也可以看出，烧结后的陶瓷晶粒具有不同的大小和形状，这主要是由于在配制陶瓷浆料过程中使用了不同形状和较宽粒度分布的氧化铝粉末。



(a) 1 450 ℃ (Surface) (b) 1 450 ℃ (Section)

(c) 1 550 ℃ (Surface) (d) 1 550 ℃ (Section)

(e) 1 650 ℃ (Surface) (f) 1 650 ℃ (Section)

图 6 氧化铝陶瓷样品表面和断面的微观结构照片

Fig. 6 Microstructure images of surface and cross section of alumina ceramic sample

根据已有研究发现，具有粒径分布较宽的粉末所制备的氧化铝陶瓷具有更高的体积密度，从而可以导致烧结后的陶瓷坯体有更小的收缩率，有效防止陶瓷在脱脂和烧结过程中发生变形等缺陷，这与实验过程中发现的现象保持一致，对不同烧结温度下的氧化铝烧结样品进行收缩率测试，具体的收缩率如表 1 所示：

表 1 为氧化铝陶瓷在不同烧结工艺、不同方向的收缩率。由表 1 可见，氧化铝陶瓷的纵向收缩率始终大于横向收缩率，这主要是由于 DLP 3D 打印时，层与层之间的结合致密度不足的导致。随着温度的升高，氧化铝陶瓷的收缩率逐渐增加，但整体的收缩率仍然较低，这主要与氧化铝陶瓷的高固相比有关。

表 1 氧化铝陶瓷在不同烧结工艺、不同方向的收缩率

Table 1 Shrinkage of alumina ceramics in different sintering processes and directions

Sintering temperature/℃	Shrinkage/%		
	X direction	*Y* direction	*Z* direction
1 450	2.8	3.0	7.0
1 550	4.2	4.2	9.5
1 650	7.6	7.4	15.0

图 7 为不同烧结温度下氧化铝陶瓷的 XRD 谱。由图 7 可知，烧结后的全部氧化铝样品均为 α-AI_2O_3 相，在热处理过程中并没有发生相的转变，这意味着在该烧结温度范围内具有稳定的 α-AI_2O_3 相。经过计算可知，在 35.3°衍射峰中，1 550 ℃烧结温度具有最小的半高宽值，其值为 0.087。在 1 550 ℃烧结温度具有较强的衍射峰，因此说明在这该温度下氧化铝陶瓷烧结更充分，晶粒与晶粒之间的结合更加紧密。

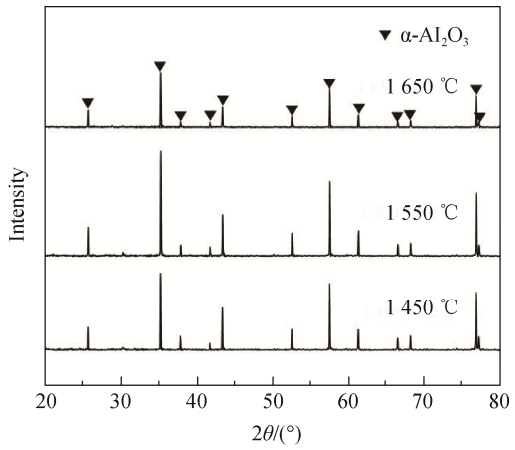


图 7　不同烧结温度保温 2 h 氧化铝陶瓷样品的 XRD 谱

Fig. 7　XRD spectrum of alumina ceramic samples sintered at different temperatures for 2 h

图 8 为氧化铝陶瓷在不同烧结温度下的 Raman 光谱。由图 8 可见，氧化铝陶瓷样品的特征峰分别位于 378、418、432、451、578、645 cm^{-1} 和 751 cm^{-1}。在 451 cm^{-1} 处的特征峰表示 Al—O 键的振动，其他特征峰的位置也没有明显的变化，符合 α-Al_2O_3 陶瓷的特征峰形态。因此，可以说明在烧结过程中氧化铝的化学组成没有发生变化，树脂以及其他添加剂在脱脂和烧结阶段已经被完全去除，与前文中

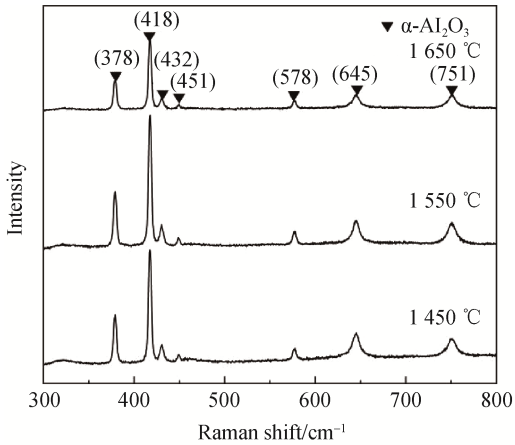


图 8　氧化铝陶瓷在不同烧结温度保温 2 h 的 Raman 光谱

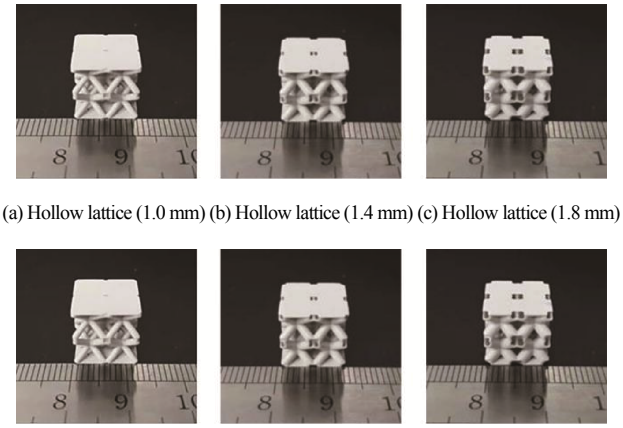
Fig. 8　Raman spectra of alumina ceramics sintered at different temperatures for 2 h

XRD 的结果保持一致。综上所述，氧化铝陶瓷在 1 550 ℃烧结温度下具有最好的烧结质量。

2.3　样品制备与性能表征

2.3.1 样品制备　　设计了不同细杆外径尺寸(1.0、1.4、1.8 mm)的多孔空心点阵结构，空心结构的壁厚为均为 0.3 mm。点阵结构的基本单元为体心立方，与其他结构相比，体心立方结构最主要的优点是在很宽的温度变化范围和很大的应变范围内都表现出较高的力学强度，因此体心立方结构非常适合做耐抗冲击性的隔热材料。为了进一步验证细杆外径和构型对隔热性能和力学性能的影响，设计了与多孔空心点阵结构外径相同的多孔实心点阵结构。

图 9 和图 10 分别为热处理前后 2 种构型的氧化铝陶瓷图片。热处理前后有一定的体积收缩，但整体的形状保持完好，具有良好的成形能力。

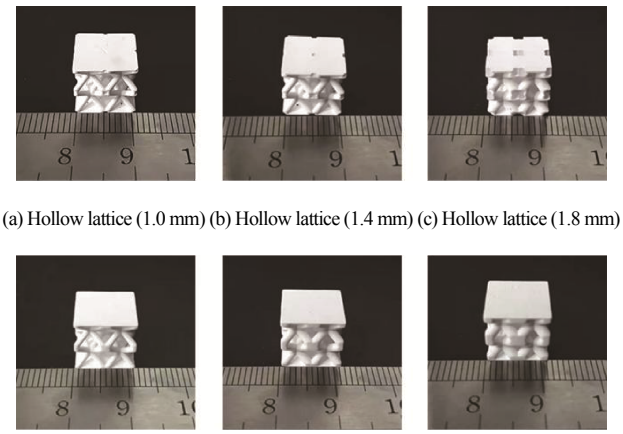


(a) Hollow lattice (1.0 mm) (b) Hollow lattice (1.4 mm) (c) Hollow lattice (1.8 mm)

(d) Solid lattice (1.0 mm) (e) Solid lattice (1.4 mm) (f) Solid lattice (1.8 mm)

图 9　不同细杆外径的空心点阵和实心点阵氧化铝陶瓷坯体

Fig. 9　Hollow lattice and solid lattice alumina ceramic bodies with different outer diameters of thin rods



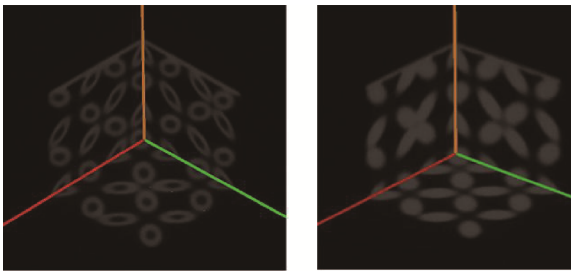
(a) Hollow lattice (1.0 mm) (b) Hollow lattice (1.4 mm) (c) Hollow lattice (1.8 mm)

(d) Solid lattice (1.0 mm) (e) Solid lattice (1.4 mm) (f) Solid lattice (1.8 mm)

图 10　不同细杆外径的空心点阵和实心点阵氧化铝陶瓷烧结体

Fig. 10　Hollow lattice and solid lattice alumina ceramic sinters with different outer diameters of thin rods

图 11 为空心点阵结构和实心点阵结构氧化铝陶瓷的 CT 图像。由图 11a 可以看出，完整的空心结构，表明在 3D 打印过程中多孔空心结构内部没有附着的浆料。由图 11b 可以看到完整的实心结构，表明氧化铝陶瓷在热处理后保持完整的内部结构，没有发生断裂。

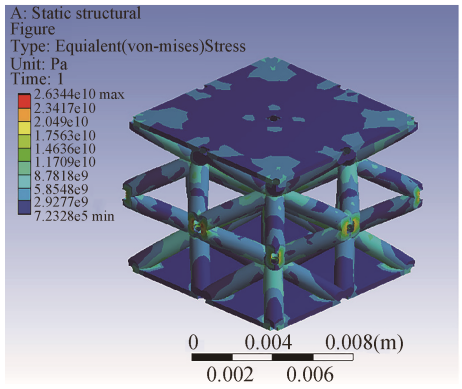


(a) CT images of hollow lattice (b) CT images of solid lattice

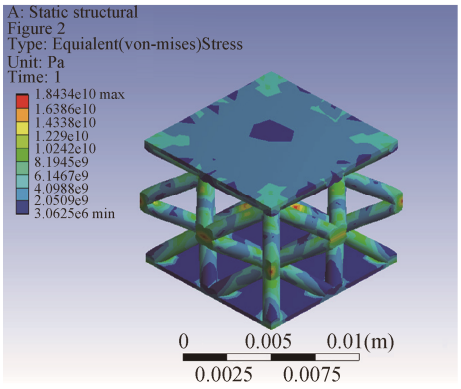
图 11 空心点阵结构和实心点阵结构氧化铝陶瓷的 CT 图像

Fig. 11 CT images of alumina ceramics with hollow lattice structure and solid lattice structure

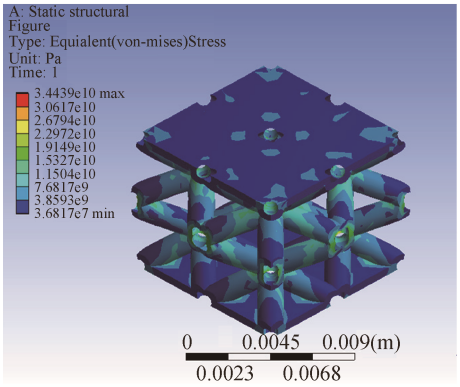
2.3.2 力学性能模拟与测试 图 12 为在相同的静力学条件下多孔空心点阵结构和多孔实心点阵结构的应力分布图。从图 12 可以看出，多孔实心点阵结构相比多孔空心点阵结构具有更强的内部结构作支撑，实心点阵结构受到更大的应力响应，在相同的形变下，越强的应力响应意味着更大的抗压强度。



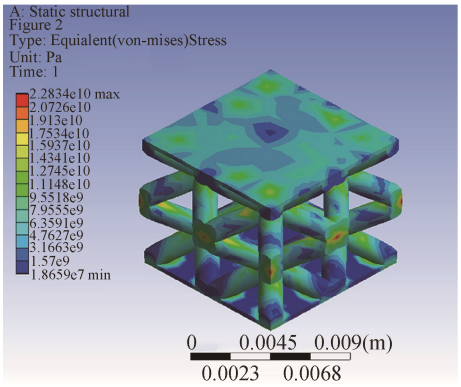
(a) Hollow lattice (1.0 mm)



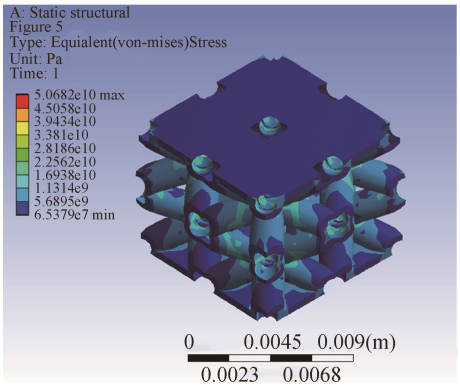
(b) Solid lattice (1.0 mm)



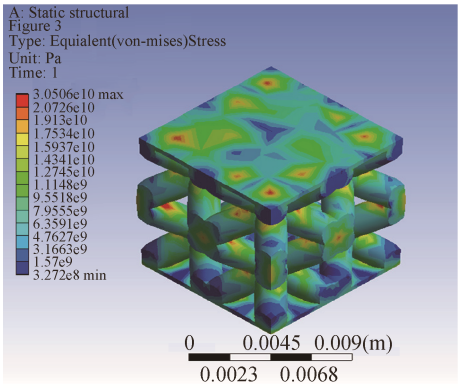
(c) Hollow lattice (1.4 mm)



(d) Solid lattice (1.4 mm)



(e) Hollow lattice (1.8 mm)



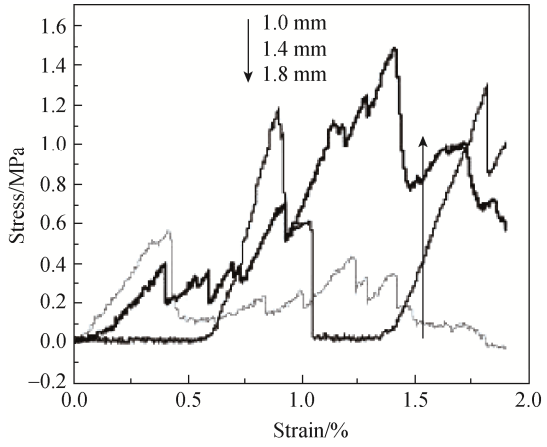
(f) Solid lattice (1.8 mm)

图 12 不同细杆外径的空心点阵和实心点阵结构氧化铝陶瓷力学模拟图

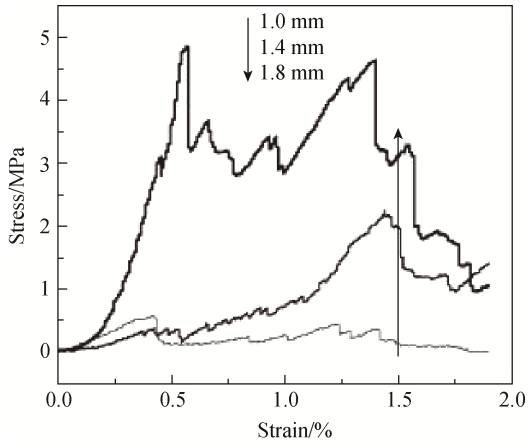
Fig. 12 Mechanical simulation of alumina ceramics with hollow lattice and solid lattice structures with different outer diameters of thin rods

因此，多孔实心点阵结构更不容易发生断裂。随着细杆外径尺寸的增加，2 种构型氧化铝陶瓷的抗压强度逐渐增大。

图 13 为氧化铝陶瓷不同构型、不同细杆外径的应力–应变曲线。表 2 为氧化铝陶瓷不同构型、不同细杆外径的最大抗压强度值。由表 2 可以看出，细杆外径尺寸的增大，实心点阵的最大抗压强度从 0.56 MPa 增加到 4.80 MPa。空心点阵的最大抗压强度从 0.4 MPa 增加到 1.59 MPa。图 13 和表 2 中的测试结果与图 12 中的模拟仿真结果一致。



(a) Hollow lattice



(b) Solid lattice

图 13　不同细杆外径尺寸的空心点阵和实心点阵的应力–应变曲线

Fig. 13　Stress strain curves of solid lattice and hollow lattice with different diameter of thin rod

表 2　不同细杆外径的多孔空心点阵和多空实心点阵的抗压强度

Table 2　Compressive strength of porous hollow lattice and porous solid lattice with different diameter of thin rod

Outer diameter of thin rod/ mm	Compression strength/ MPa	Compressive strength/ MPa
1.0	0.56	0.46
1.4	2.26	1.18
1.8	4.80	1.59

3　结论

1) 在 1 550 ℃的烧结温度下保温 4 h，氧化铝陶瓷具有均匀的晶粒分布，较大孔隙消失，具有稳定的氧化铝陶瓷相。

2) 工业 CT 的内部重建结果显示了 DLP 技术打印的 2 种构型氧化铝陶瓷具有良好成形精度和形状。

3) 当点阵结构的细杆外径尺寸相同时，实心点阵比空心点阵具有更大的抗压强度，实心点阵的最大抗压强度为 4.80 MPa。空心点阵的最大抗压强度为 1.59 MPa。力学测试结果与力学模拟仿真结果具有一致性。

参考文献:

[1] 卢志华, 李呈顺, 马育栋. 多孔氧化铝陶瓷制备技术研究进展[J]. 中国陶瓷, 2018, 54(2): 1–7.
LU Zhihua, LI Chengshun, MA Yudong. Chin ceram, 2018, 54(2): 1–7.

[2] 刘伟渊, 汪长安, 周立忠. 高气孔率及高强度多孔氧化铝陶瓷的制备(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(12): 1764–1768.
LIU Weiyuan, WANG Chang'an, ZHOU Lizhong. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(12): 1764–1768.

[3] DELE A, HANIM M A, NORKHAIRUNNISA M, et al. Investigating the effect of porosity level and pore former type on the mechanical and corrosion resistance properties of agro-waste shaped porous alumina ceramics[J]. Ceram Int, 2017, 43(12): 8743–8754.

[4] MOHAMMED S A, M. A. Azmah Hanim, C. N. A. Jaafar, et al. Effect of Cu Metal of Nanoscale Particle Size on the Porosity and Mechanical Properties of Porous Alumina Ceramics using Yeast as a Pore Agent[J]. Res. J Appl Sci, Eng Technol, 2017, 14(5): 187–195.

[5] WANG Y H, ZHANG Y, LIU X Q, et al. Microstructure control of ceramic membrane support from corundum-rutile powder mixture[J]. Powder Technol, 2006, 168(3): 125–133.

[6] 石棋, 范羽宣, 林铭. 铝粉造孔制备多孔氧化铝陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(6): 45–49.
SHI Qi, FAN Yuxuan, LIN Ming. Chin ceram (in Chinese), 2020, 56 (6): 45–49.

[7] HE Xing, ZHOU Xingui, SU Bo. 3D interconnective porous alumina ceramics via direct protein foaming[J]. Mater Lett, 2009, 63(11): 830–832.

[8] 杨金龙, 林煌, 席小庆. 粒子稳定型泡沫浆料及多孔氧化铝陶瓷的制备[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(2): 220–223.
YANG Jinlong, LIN Huang, XI Xiaoqing. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(2): 220–223.

[9] 鲁芹, 胡龙飞, 罗晓光. 高超声速飞行器陶瓷复合材料与热结构技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 251–260.
LU Qin, HU Longfei, LUO Xiaoguang. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(2): 251–260.

[10] 华富强, 刘艳涛, 杨粮铭. 用于隔热保温的多孔氧化铝陶瓷的制备与研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1030–1037.
HUA Fuqiang, LIU Yantao, YANG Liangming. Bul Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(4): 1030–1037.

[11] WANG Q, CHEN Q, ZHU J G, et al. Effects of pore shape and

porosity on the properties of porous LNKN ceramics as bone substitute[J]. Mater Chem Phys, 2007, 109(2): 488–491.

[12] GUO J, ZENG Y, LI P R, et al. Fine lattice structural titanium dioxide ceramic produced by DLP 3D printing[J]. Ceram Int, 2019, 45(17): 23007–23012.

[13] LIU S S, LI M, WU J M, et al. Preparation of high-porosity Al_2O_3ceramic foams *via* selective laser sintering of Al_2O_3 poly-hollow microspheres[J]. Ceram Int, 2020, 46(4): 4240–4247.

[14] SHUAI X, ZENG Y, LI P R, et al. Fabrication of fine and complex lattice structure Al_2O_3 ceramic by digital light processing 3D printing technology[J]. J Mater Sci, 2020, 55(10): 6771–6782.

[15] 陈敬哲, 仝建峰, 益小苏. 有序多孔氧化铝陶瓷微观结构研究[J]. 航空制造技术, 2016 (20): 88–91.
CHEN Jingzhe, TONG Jianfeng, YI Xiaosu. Aeronaut Manuf Technol (in Chinese), 2016 (20): 88–91.

[16] WANG G Q, WANG C N, SHAO R M, et al. Fabrication of Orderly Porous Anodic Alumina Optical Waveguide Sensor via Interface Hydrophilic Treatment for the Detection of Small and Large Molecules[J]. Adv Mater Interfaces, 2020, 7(15): 56–60.

[17] 何秀兰, 吴成, 张文正. 海藻酸钠凝胶–发泡法制备 Al_2O_3 多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(3): 368–374.
HE Xiulan, WU Cheng, ZHANG Wenzheng. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(3): 368–374.

[18] ZHAO Y F, HOANG V N, JANG G Won, et al. Hollow structural topology optimization to improve manufacturability using three-dimensional moving morphable bars[J]. Adv Eng Software, 2021, 15214(5): 196–204.

[19] ZENG Y, YAN Y Z, YAN H F, et al. 3D printing of hydroxyapatite scaffolds with good mechanical and biocompatible properties by digital light processing[J]. J Mater Sci, 2018, 53(9): 6291–6301.

[20] ZHAO Y T, LI P R, DONG P, et al. Investigation on 3D printing ZrO_2 implant abutment and its fatigue performance simulation[J]. Ceram Int, 2020, 47(1): 1053–1062.

[21] LI S Y, CUI Y H, LI J J. Thiol-terminated hyperbranched polymer for DLP 3D printing: Performance evaluation of a low shrinkage photosensitive resin[J]. J Appl Polym Sci, 2021, 138(22): 187–195.