

引用格式: 占丽娜, 喻正, 张玄, 等. 层间裂纹对光固化氧化锆陶瓷力学性能的影响[J]. 材料工程, 2025, 53(11): 189-196.
ZHAN Lina, YU Zheng, ZHANG Xuan, et al. Effect of interlayer cracks on mechanical properties of light-cured ZrO₂ ceramics [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 189-196.

层间裂纹对光固化氧化锆陶瓷力学性能的影响

Effect of interlayer cracks on mechanical properties of light-cured ZrO₂ ceramics

占丽娜, 喻正, 张玄, 胡子健, 张剑威, 刘耀*
(萍乡学院机械电子工程学院, 江西萍乡 337000)

ZHAN Lina, YU Zheng, ZHANG Xuan, HU Zijian,
ZHANG Jianwei, LIU Yao*
(College of Mechanical and Electronic Engineering,
Pingxiang University, Pingxiang 337000, Jiangxi, China)

摘要:层间裂纹是影响光固化增材制造工艺向工业实用化推进的最大障碍。本工作通过研究光固化成型及脱脂工艺中裂纹缺陷的产生机理及其对光固化氧化锆陶瓷性能的影响规律, 分析比较了曝光时间和脱脂速率对氧化锆陶瓷裂纹分布状态的影响。结果表明: 当切片厚度等于曝光层厚时, 容易获得无缺陷的陶瓷坯体; 当脱脂速率为 0.1 °C/min 时, 陶瓷件表面裂纹最少, 并且最终获得了致密度为 99%、弯曲强度为 450 MPa 的陶瓷件。本工作为光固化增材制造无缺陷的氧化锆陶瓷及其应用提供了科学依据及技术指导。

关键词:光固化成型技术; 氧化锆陶瓷; 层间裂纹; 曝光时间; 脱脂速率; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000700 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000700

中图分类号: TQ174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0189-08

Abstract: Interlayer crack is a significant obstacle to the wide-scale implementation of light-cured additive manufacturing in industrial applications. The formation mechanism of crack defects during the forming and debinding stages of the process is investigated and their effects on the properties of light-cured ZrO₂ ceramics are analyzed. Furthermore, the study compares and analyzes the influence of exposure time and debinding rate on the distribution of cracks in ZrO₂ ceramics. The research analyzes and compares the influence of exposure time and debinding rate on the distribution of cracks in ZrO₂ ceramics. The results indicate that it is easier to obtain defect-free ceramic green bodies when the slice thickness matches the exposure layer thickness. Moreover, the study observes that the green body exhibits the least number of surface cracks when the debinding rate is set at 0.1 °C/min. Consequently, the research achieves the successful production of ceramic parts with a density of 99% and a flexural strength of 450 MPa. These findings establish a solid scientific foundation and provide valuable technical guidance for the manufacturing and application of defect-free ZrO₂ ceramics using light-cured additive manufacturing.

Key words: stereolithography; ZrO₂ ceramics; interlayer crack; exposure time; debinding rate; mechanical property

氧化锆陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、高硬度^[1-2]等特点, 在航空航天、军工及医疗等领域得到了广泛的应用。然而由于氧化锆陶瓷的脆性大^[3-4], 用传统成型方法难以制备出复杂、致密的陶瓷件, 从而限制了其进一步的应用^[5-6]。而光固化(stereolithography)增材制

造^[7-9]有望解决上述成型问题, 从而制备出性能优异的复杂、致密的氧化锆陶瓷^[10-13]。

光固化^[14-17]是在光敏树脂中加入陶瓷粉体, 并通过高速搅拌使陶瓷粉体均匀分散在光敏树脂中, 从而获得高固相、低黏度的陶瓷浆料。然后使浆料逐层固

化,堆积成形得到陶瓷坯体,再通过脱脂及烧结工艺得到陶瓷件。成型出无缺陷的陶瓷件显得尤为重要,其中,打印过程中光固化的工艺参数对陶瓷浆料的成型效果影响较大,选择合适的工艺参数能有效提高打印精度和效率^[18-19]。王亚宁等^[20]通过调配树脂体系成功制备出了固相含量为55%(质量分数)的氧化锆陶瓷浆料,并探究了激光强度和扫描速度对成形质量的影响;同时通过在NO₂气体下进行脱脂烧结,减少了由于有机物排除而导致的裂纹,提高了陶瓷件的成形质量。朱俊逸等^[21]利用同步热分析仪比较了不同脱脂工艺参数对堇青石陶瓷性能的影响,当升温速率为1℃/min且在氩气环境下,能有效地降低添加剂的裂解速率,从而提高坯体的致密度。陈龙等^[22]通过采用二次脱脂的方法有效地将有机体全部分解,使烧结过程中裂纹及孔洞等缺陷的产生得到较好的改善。

目前,光固化氧化锆陶瓷的裂纹缺陷严重影响陶瓷件的力学性能,现有的陶瓷增材制造裂纹缺陷的研究主要集中在理论研究上,鲜有对实验方法中的裂纹形貌和抑制进行详细讨论。本工作主要通过对光固化聚合和高温脱脂热处理中裂纹形成机制进行讨论,探究光固化氧化锆陶瓷坯体、工艺过程及力学性能之间的相互关系。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

图1为ZrO₂(800 nm,纯度>99.5%,上海阿拉丁生物有限公司)陶瓷粉末的SEM图,其中D₅₀=800 nm。将一定质量ZrO₂粉末放置电热鼓风干燥室中,并进行恒温干燥12 h,之后将质量分数0.5%~3%的偶联剂KH560(南京试剂有限公司)一起放入特氟龙罐中,以97%(体积分数,下同)无水乙醇液体为球磨介质。球磨后将浆料进行干燥并研磨,使用80目筛网进行筛选,

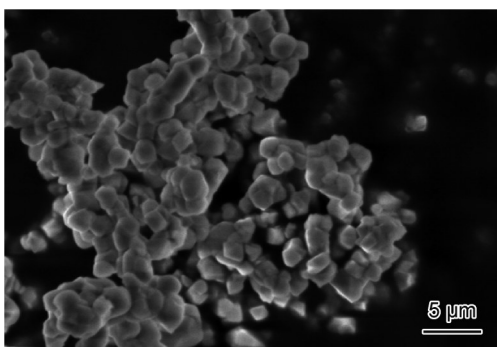


图1 ZrO₂陶瓷粉末的形貌

Fig.1 Morphology of ZrO₂ powder

得到改性ZrO₂粉末。

预混液是按一定比例的预聚物和稀释剂混合而成,其中预聚物为环氧丙烯酸酯(EA)(上海巴斯夫化工有限公司),稀释剂为1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)(上海巴斯夫化工有限公司)、丙烯酸-2羟乙酯(HEA)(上海巴斯夫化工有限公司)、三甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)(上海巴斯夫化工有限公司)。首先将HDDA、HEA和TMPTA分别按3:1:6的比例混合并搅拌10 min,然后将EA和树脂体系一起放置在真空搅拌除泡器(HMV800,哈赛)中进行搅拌,其中搅拌时间为5 min,转速为1500 r/min。

最后,将改性ZrO₂粉末倒入预混液并进行真空搅拌,其中搅拌时间为5 min,转速为1800 r/min,得到体积分数为45%的ZrO₂陶瓷浆料。

1.2 光固化过程

本实验采用DLP光固化打印机(K-D-3,金石),其中曝光强度为46 W/mm²。将浆料倒入离心槽中,机器自动将浆料刮平并刮薄,其次对ZrO₂浆料进行固化成型,如图2所示。实验探究不同曝光时间对单层氧化锆薄片的影响,曝光时间设置为1~11 s。设置切片厚度分别为20 μm和30 μm,研究不同切片厚度对坯体成型精度的影响。随后确定最佳曝光时间并进行光固化成形打印,并且沿Z轴方向制备了4 mm×5 mm×50 mm的长方体坯体。

1.3 脱脂、烧结处理

将打印试样置于马弗炉(Tmax1700,费杰罗)中,分别以0.1~5℃/min的升温速度进行脱脂,直至600℃,具体工艺路线如图3(b)所示,将脱脂后的ZrO₂陶瓷试样继续置于马弗炉中,直至1620℃,具体工艺路线如图3(c)所示。

1.4 样件性能表征

通过测量烧结前后样品不同方向的尺寸,计算出样品各个方向的收缩率。采用万能拉伸机(Instron-5569, UK)测量样品的弯曲强度,加载速率选择0.5 mm/min,其中跨距为30 mm,使用超清视频显微镜(HGO-2100G,汇光)和扫描电子显微镜(Quanta 250 FEG)对试样分别进行断口宏观和微观表征。

2 结果与分析

2.1 曝光时间对单层光固化氧化锆陶瓷精度的影响

光固化陶瓷坯体的缺陷控制是保证脱脂和烧结后质量的前提。光固化中的陶瓷坯体在固化过程中受固相含量、能量密度、曝光时间等参数的影响,在成形后常出现翘曲及尺寸精度不高等缺陷。

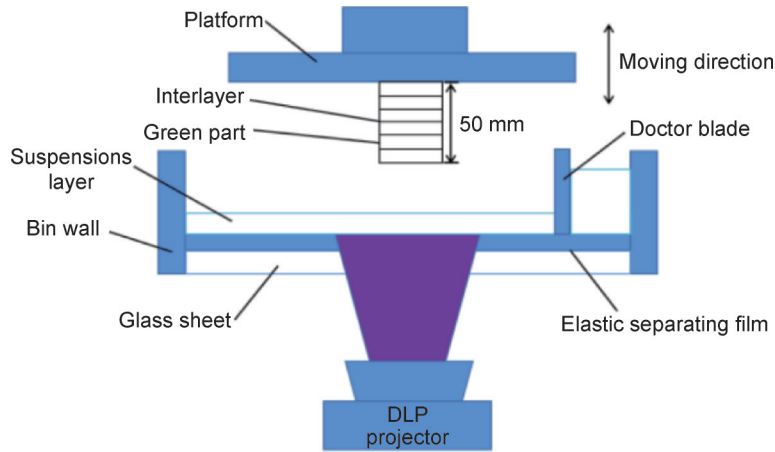


图2 DLP光固化增材制造原理

Fig.2 Principle of DLP light-cured additive manufacturing

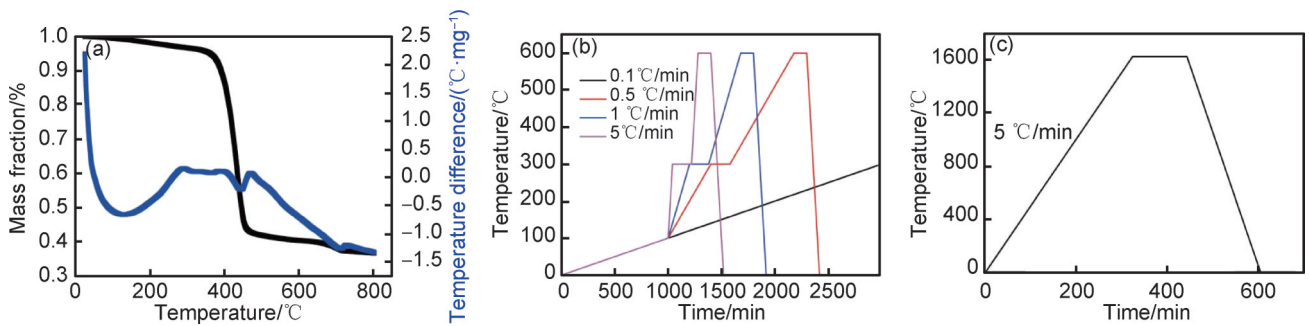


图3 氧化锆陶瓷生坯的TG/DSC、脱脂和烧结曲线

(a)TG/DSC曲线;(b)脱脂曲线;(c)烧结曲线

Fig.3 Curves of TG/DSC,debinding, and sintering of zirconia ceramic green

(a)TG/DSC curve;(b)debinding curves;(c)sintering curve

当紫外光曝光强度为 46 W/mm^2 , 分别对直径 5 cm 的圆形薄片进行固化成型。图4是不同曝光时间对氧化锆单层坯体精度的影响。如图所示, 当曝光时间为 2 s 时, 氧化锆薄片并未完全成型, 成型直径小于 5 cm ; 当曝光时间为 3 s 时, 薄片侧面的纹路清晰, 成型刚好在固化范围区域, 同时具有一定的韧性; 当曝光时间为 5 s 时, 纹路较为清晰, 但是有部分已经超出了

固化区域; 当曝光时间为 7 s 时, 纹路开始延展向外超出了固化区域但未固化; 当曝光时间为 9 s 时, 超出固化区域的浆料开始固化, 同时过曝面积增大; 当曝光时间为 11 s 时, 过曝面积最大。这是因为当紫外光首先在薄膜和玻璃的界面及薄膜和浆料的界面上发生反射, 此时紫光经过二次反射后的光线与原来的入射光线形成了一定的偏差, 导致浆料出现过曝光区域, 并且随着曝光时间的增加, 实际曝光的面积比理论的面积要大, 出现了纹路现象, 如图5所示; 同时, 紫外光在传播过程中容易发生衰减, 随着曝光时间的延长, 浆料的固化深度随之增大。

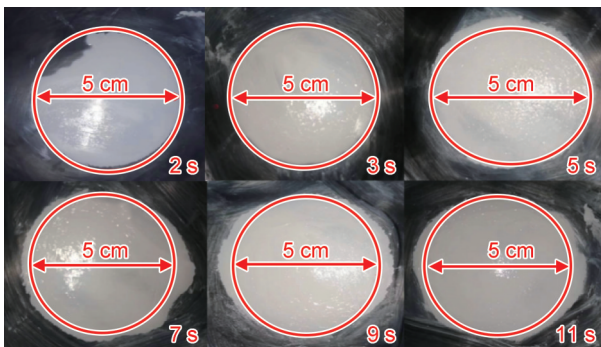


图4 不同曝光时间下单层氧化锆薄片宏观形貌

Fig.4 Macro-morphologies of single layer zirconia thin sheet under different exposure time

2.2 切片厚度对光固化氧化锆陶瓷裂纹缺陷的影响

根据 Beer-Lambert 公式^[23-24], 其中 C_d 为固化深度, D_p 为透射深度, E_0 为曝光能量, E_c 为临界曝光能量。

$$C_d = D_p \ln \frac{E_0}{E_c} \quad (1)$$

图6是固相含量 45% 的氧化锆浆料固化深度与能量剂量及其最小二乘拟合的关系曲线图。由图可知, 浆料的固化深度随着曝光能量的增加而增加。这

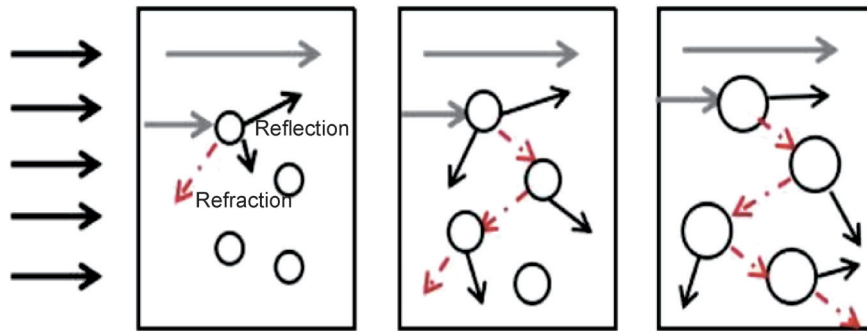


图5 紫外光在氧化锆浆料中的路线传播

Fig.5 Route propagation of ultraviolet light in zirconia slurry

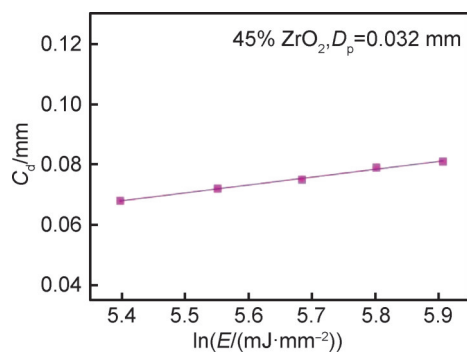


图6 45%氧化锆浆料的固化深度与能量剂量及其最小二乘拟合的关系曲线图

Fig.6 Relationship between curing depth and energy dose of 45% zirconia slurry and its least square fitting curve

是因为随着曝光时间的延长,进一步刺激了激发态的自由基的扩散和转换率。同时,紫外光在浆料中发生散射的概率增大,从而避免入射能量发生严重衰减,

使其在深度方向的衰减系数减小,导致浆料的透射深度增加。通过进一步的拟合发现,浆料的透射深度为0.032 mm。

图7展示了在曝光时间为3 s时,不同切片层厚下制备的陶瓷固化坯体形貌。由图可见,当切片厚度与浆料的透射深度相当时,所得坯体横截面轮廓清晰,表面无明显纹路,且台阶效应较小;而当切片厚度小于透射深度时,坯体横截面则出现界面模糊、明显纹路及台阶高度增大等现象。原因在于,当成型过程中每一新层开始固化时,紫外光会对已固化区域造成二次曝光,引发进一步固化收缩。该过程在已固化层内产生层间应力差,并导致上下层之间出现应变差异,从而使浆料中各层间的收缩应力差进一步增大。其结果削弱了层间结合强度,造成截面模糊、纹路加重、台阶高度增加等缺陷,最终降低坯体表面质量,并增加开裂风险。

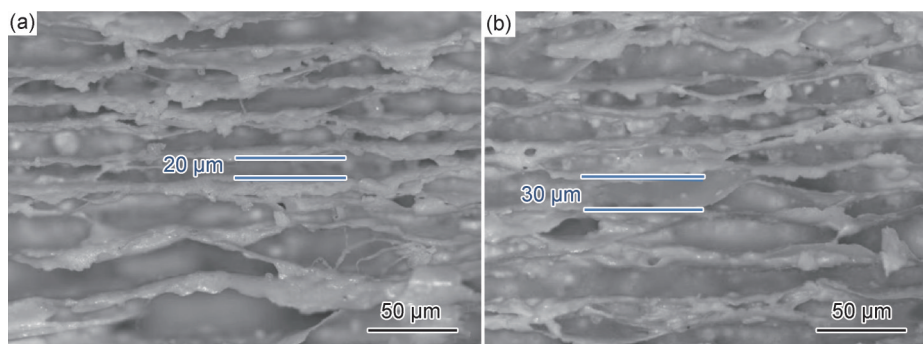


图7 曝光时间3 s时,切片层厚为20 μm(a)和30 μm(b)的固化坯体图

Fig.7 Cured billets with slice thickness of 20 μm(a) and 30 μm(b) at exposure time of 3 s

2.3 脱脂工艺对光固化氧化锆陶瓷坯体裂纹缺陷的影响

包含聚合物等中间载体的陶瓷注射成形和流延成形坯体的脱脂过程已得到了广泛研究。而光固化陶瓷坯体的脱脂过程报道相对较少。光固化陶

瓷坯体中的有机物在热脱脂过程中,有机物会发生热分解导致气体的产生及有机物由内到外的排除过程,坯体产生开裂等缺陷,最终影响零件的力学性能。故本节通过采用热脱脂工艺进行脱脂,加热坯体使树脂组分能够挥发、氧化或分解,从

而使树脂从固化后的坯体中脱出。尤其是在热脱脂初期,树脂成分不适当的脱除极易产生坯体缺陷。

由图 3(a)可知,根据 TG/DSC 曲线的特征可以将坯体的状态分为 3 个阶段,分别是:0~350 °C 的低温段脱脂,350~450 °C 的中高温段脱脂,450~600 °C 的高温段脱脂。图 8 是不同升温速率脱脂后的表面宏观和微观形貌图,图 8(a)~(d) 分别代表升温速率为 0.1、0.5、1、5 °C/min 脱脂后的陶瓷件。由图可知,随着坯体脱脂速率的增加,坯体裂纹明显增加。这是因为在热脱脂过程中,坯体以 0.1 °C/min 升温到 100 °C 后,氧化锆浆料会被有机物包裹形成致密的结构。但是在中高温阶段,随着温度逐渐升高,部分有机物从固相受热转化为液相,在毛细管力的作用下,有机物从坯体内部向外表面转移。当液相的黏结剂达到坯体表面受热进一步发生汽化,而来不及汽化的黏结剂,则会在后续冷却中转化为固态残留在坯体表面,当温

度达到低熔点的 HDDA 的临界温度 T_c 后,转变成液态或气态存在于坯体内部,有机物发生液化和汽化时,在热膨胀力和毛细力的作用下,进一步流动到坯体表面挥发和分解。当有机物完全挥发分解排除后,在坯体表面会形成大量相互连通的孔隙。孔隙受到高温热膨胀,产生高内压应力,容易导致破裂并形成微裂纹。此外,当升温速率过高时,陶瓷材料的结合强度超过生坯内部区域气体聚集产生的压应力时,导致零件开裂并形成宏观裂纹。故升温速率为 0.1 °C/min 时样件表面质量最好,几乎无宏观裂纹,通过电镜观察了该样品的微观形貌,如图 8(e) 所示。从图中可以看到,当升温速率为 0.1 °C/min 时,粉末排列紧密,由于有机物的热分解产生了少量裂缝,可见裂纹无法完全消除但该参数下的氧化锆陶瓷质量为最佳。为了防止实验偶然性,将坯体在空气环境暴露 6、12、48 h 并进行观察,其结果不变。

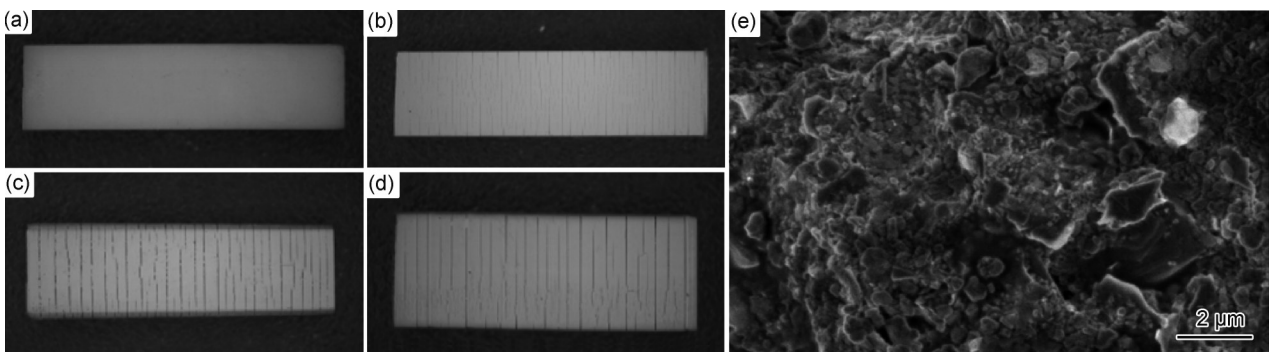


图 8 不同升温速率脱脂后的表面宏观和微观形貌

(a)0.1 °C/min; (b)0.5 °C/min; (c)1 °C/min; (d)5 °C/min; (e)0.1 °C/min 微观形貌

Fig.8 Surface macro- and micro-morphologies after debinding at different heating rates

(a)0.1 °C/min; (b)0.5 °C/min; (c)1 °C/min; (d)5 °C/min; (e)micro morphology at 0.1 °C/min

2.4 层间裂纹对氧化锆陶瓷性能的影响

根据以上的结果和分析,最终设置曝光时长为 3 s 并以不同的升温速率对氧化锆陶瓷进行脱脂烧结处理。图 9(a) 展示了最终的烧结效果,烧结后,氧化锆陶瓷样件的体积有一定收缩,随着升温速率的增大,X 轴和 Z 轴方向的收缩率不断增加,Y 轴方向的收缩率随着脱脂速率的加快先增大后减小。对比氧化锆陶瓷表面裂纹情况,可以看出当升温速率较大时,其收缩率也低,这是因为脱脂过程中,产生的裂缝过多也无法通过后续烧结的液相进行愈合,如图 10 所示。结合图 9(a) 条形图可见,在 0.1 °C/min 的升温速率进行脱脂时,其 X、Y、Z 轴方向的收缩率分别为 18.33%、19.56%、25.38%,各向收缩均匀且

样件表面光滑平整,无明显裂缝。故在该工艺参数下打印氧化锆陶瓷可以得到较为完好的样件,试样为钇稳定四方多晶氧化锆(3Y-TZP),如图 11 所示,最终获得了致密度为 99%、弯曲强度为 450 MPa 的陶瓷件,如图 9(b), (c) 所示。而分别以 0.5、1、5 °C/min 升温速率的弯曲强度为 380、310、150 MPa,如表 1 所示。

3 结论

(1) 当曝光时间为 3 s,打印层厚为 30 μm (即等于紫外光的透射深度)时,能成形的氧化锆陶瓷坯体无宏观缺陷,具有优异的表面完整性和几何保真度。

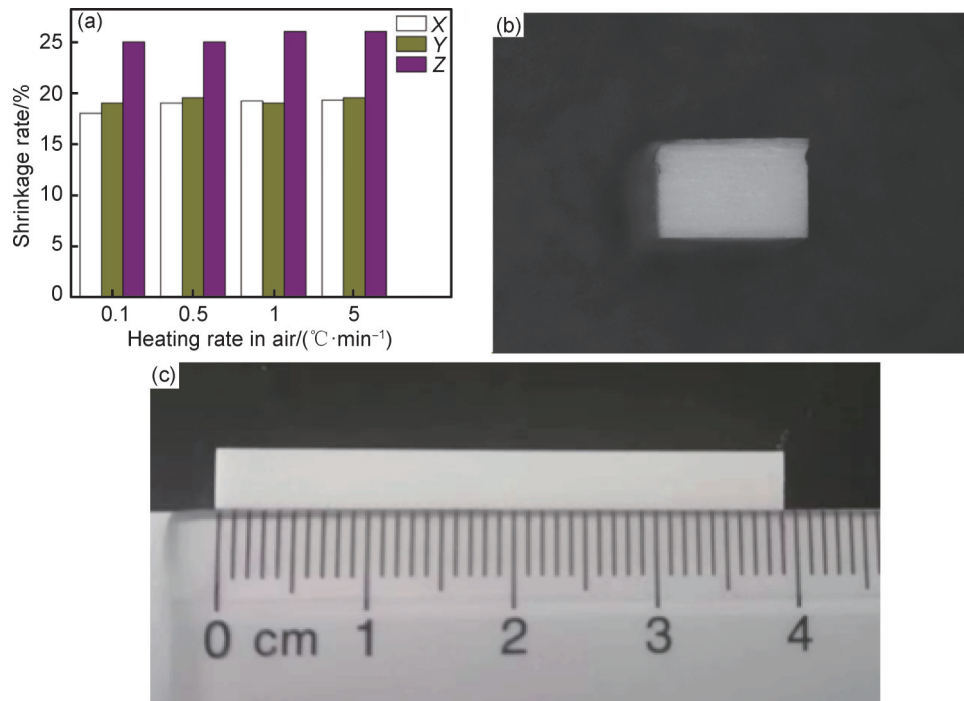


图9 不同升温速率下氧化锆陶瓷坯体的收缩率条形图(a)和最优工艺参数制备的氧化锆陶瓷样品图(b),(c)
Fig.9 Shrinkage rate bar chart (a) of zirconia ceramic billet at different heating rates and sample chart (b),
(c) of zirconia ceramic prepared with optimal process parameters

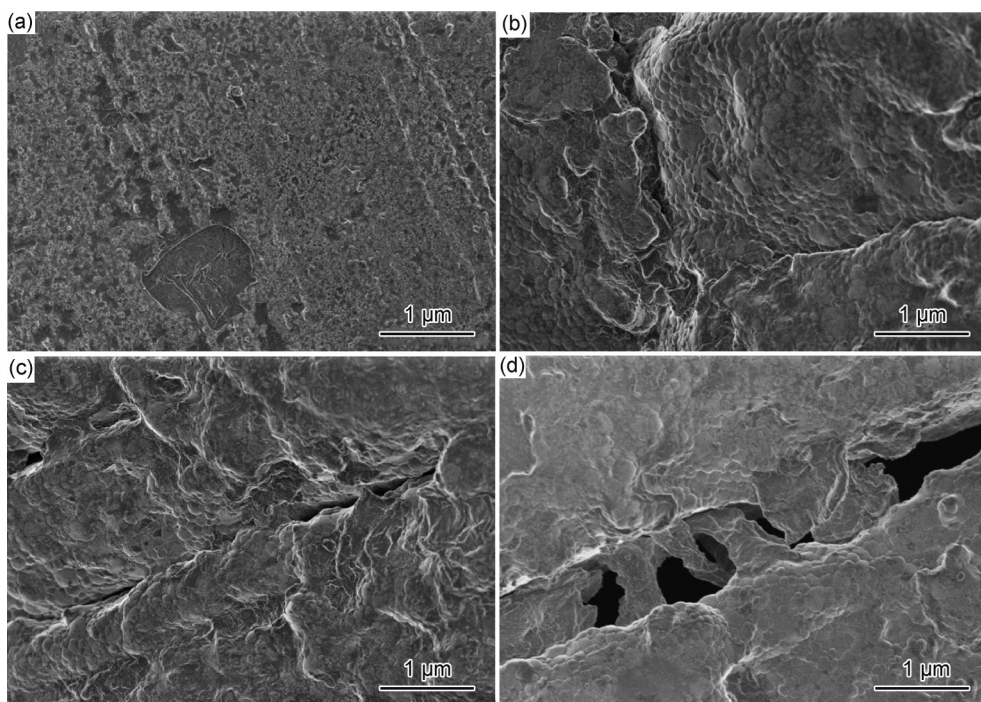
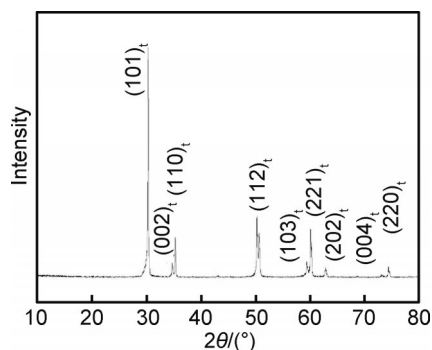


图10 不同升温速率下氧化锆陶瓷坯体的断口形貌
(a)0.1 °C/min;(b)0.5 °C/min;(c)1 °C/min;(d)5 °C/min
Fig.10 Fracture morphology of zirconia ceramic body at different heating rates
(a)0.1 °C/min;(b)0.5 °C/min;(c)1 °C/min;(d)5 °C/min

(2)采用 0.1 °C/min 的缓慢升温脱脂速率,可有效减少坯体开裂,最终获得无缺陷陶瓷件。烧后 X、Y、Z 轴方向的收缩率分别为 18.33%、19.56%、

25.38%。

(3)烧后陶瓷件的相对致密度达到 99%,三点弯曲强度为 450 MPa,表明材料具有优异的力学性能。

图 11 烧结后的 ZrO_2 XRD 图谱Fig.11 XRD pattern of ZrO_2 after sintering表 1 光固化制备 ZrO_2 试样的力学性能Table1 Mechanical properties of ZrO_2 samples after light-curing

Heating rate/ ($^{\circ}C/min^{-1}$)	Σ_{max}/MPa	HV/GPa	$K_{IC}/(MPa \cdot m^{1/2})$
0.1	450 ± 15.11	11.55 ± 0.31	5.65
0.5	380 ± 18.64	11.04 ± 0.11	5.75
1	310 ± 22.38	10.75 ± 0.68	5.89
5	150 ± 15.78	10.41 ± 0.58	5.92

Note: Σ_{max} denotes the maximum bending strength; K_{IC} signifies the fracture toughness

参考文献

- [1] LAO C, ZENG J, LIU X, et al. Facile laser-based process of super-wetting zirconia ceramic with adjustable adhesion for self-cleaning and lossless droplet transfer[J]. Applied Surface Science, 2023, 11(5): 638-646.
- [2] MÖLLER H. Dental gold alloys and contact allergy [J]. Contact Dermatitis, 2002, 47(2): 63-66.
- [3] UPADHYAY D, PANCHAL M A, DUBEY R S, et al. Corrosion of alloys used in dentistry: a review [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 432(1/2): 1-11.
- [4] 缪新宇, 陆萍, 刘双宇, 等. 光固化氧化铝陶瓷浆料流变性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 708-718.
- MIAO X Y, LU P, LIU S Y, et al. Research progress on rheological properties of light-cured alumina ceramic slurry [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 708-718.
- [5] CHEN Z, LI Z, LI J. 3D printing of ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramics Society, 2019, 39(4): 661-687.
- [6] RASAKI S A, XIONG D, XIONG S, et al. Photopolymerization-based additive manufacturing of ceramics: a systematic review [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(3): 442-471.
- [7] PENG E W, ZHANG D W, DING J. Ceramic robocasting: recent light industry machinery achievements, potential, and future developments [J]. Advanced Materials, 2018, 30(47): 2404-2411.
- [8] KOMISSARENKODA, SOKOLOV P S, EVSTIGNEEVA A D, et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(1): 684-689.
- [9] BADEV A, ABOULIATIM Y, CHARTIER T, et al. Photopolymerization kinetics of a polyether acrylate in the presence of ceramic fillers used in stereolithography [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry, 2011, 222(1): 117-122.
- [10] MATEJ P, PHOEBE B, KATICA P, et al. Polymerization kinetics and development of polymerization shrinkage stress in rapid high-intensity light-curing [J]. Polymers, 2022, 14(16): 15731582.
- [11] LIU Y, ZHAN L, WEN L, et al. Effects of particle size and color on photocuring performance of Si_2N_4 ceramic slurry by stereolithography [J]. Journal of the European Ceramic, 2021, 41(4): 2386-2394.
- [12] LIU Y, CHENG L, LI H, et al. Formation mechanism of stereolithography of Si_2N_4 slurry using silane coupling agent as modifier and dispersant [J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 14583-14590.
- [13] LIU Y, ZHAN L, HE Y, et al. Stereolithographical fabrication of dense Si_2N_4 ceramics by slurry optimization and pressure sintering [J]. Ceramics International, 2020, 46(2): 2063-2071.
- [14] ZHOU M, LIU W, 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, 11(3): 11878-11885.
- [15] CHEN W, LIU C, LI C. Additive manufacturing of shape-stabilized composite phase change materials via ultraviolet curing [J]. Additive Manufacturing, 2023, 61, 46(2): 2063-2071.
- [16] BIKAS H, STAVROPOULOS P, CHRYSOLOURIS G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1/4): 389-405.
- [17] SALMI M. Additive manufacturing processes in medical applications [J]. Materials, 2021, 14(1): 191-198.
- [18] CHEN Z, LI D, ZHOU W, et al. Curing characteristics of ceramic stereolithography for an aqueous-based silica suspension [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(4): 641-651.
- [19] CHEN Z, LI D, ZHOU W. Process parameters appraisal of fabricating ceramic parts based on stereolithography using the Taguchi method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(7): 1249-1258.
- [20] 王亚宁, 张玉琪, 宋索成, 等. 氧化锆陶瓷扫描光固化成形与脱脂烧结工艺研究 [J]. 无机材料学报, 2022, 37(3): 303-309.
- WANG Y N, ZHANG Y Q, SONG S C, et al. Laser stereolithography for zirconia ceramic fabrication and its debinding and sintering process [J]. Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(3): 303-309.
- [21] 朱俊逸, 张成, 罗忠强, 等. 脱脂工艺对光固化 3D 打印堇青石陶瓷性能的影响 [J]. 无机材料学报, 2022, 37: 317-324.
- ZHU J Y, ZHANG C, LUO Z Q, et al. Influence of debinding

- process on the properties of photopolymerization 3D printed cordierite ceramics [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, 37: 317-324.
- [22] 陈龙,王正上,崔旭东.氧化铝陶瓷光固化浆料的制备及脱脂工艺优化研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2022, 59(4): 145-152.
CHEN L, WANG Z S, CUI X D. 3D printing of shape-controllable alumina ceramics by using optimized slurry and sintering process [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2022, 59(4): 145-152.
- [23] LI X, ZHANG J, DUAN Y, et al. Rheology and curability characterization of photosensitive slurries for 3D printing of Si_3N_4 ceramics[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6438-6446.
- [24] GENTRY S, HALLORAN J W. Light scattering in absorbing ceramic suspensions effect on the width and depth of photopolymerized features[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(6): 1895-1904.
-
- 基金项目:**江西省自然科学基金面上项目(20212BAB204048);江西省教育厅科技计划项目(GJJ212711, GJJ2202117)
- 收稿日期:**2023-10-21; **录用日期:**2023-11-21
- 通讯作者:**刘耀(1985—),男,副教授,博士,研究方向为陶瓷增材制造,联系地址:江西省萍乡市萍乡学院机械电子工程学院(337000), E-mail: 65485913@qq.com
- (本文责编:齐书涵)