

激光与光电子学进展

冻结陶瓷浆料激光扫描切割深度仿真与实验研究

张耿^{1*}, 陈桦^{1,2}¹西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021;²精密与超精密加工及测量国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710021

摘要 基于冻结浆料的分层实体制造方法在多孔陶瓷 3D 打印领域具有应用潜力。为了研究冻结陶瓷浆料的激光切割过程,建立了 CO₂激光面热源热传导数学模型,采用 COMSOL 有限元仿真模拟激光扫描加热过程,以纯冰为理想材料,结合实验研究建立激光切割深度数学模型。结果表明,冻结陶瓷浆料的激光切割过程与传统非金属材料相似,“V”字形的气化切割区深度随激光能量密度的增大而增大;由于陶瓷颗粒的吸热和散射作用,在冻结陶瓷浆料切割区下方存在热影响过渡区,实际切割深度与纯冰激光切割理论深度存在差异,在理论模型中引入材料特性相关修正系数后可较好地符合实际切割规律,为冻结陶瓷浆料激光切割工艺参数选择提供了参考。

关键词 材料; 激光切割; 冻结材料; 温度场; 陶瓷浆料; 3D 打印

中图分类号 TG485

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221728

Simulation and Experimental Study on Laser Scan Cutting Depth of Frozen Ceramic Slurry

Zhang Geng^{1*}, Chen Hua^{1,2}¹School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;²National and Local Joint Engineering Research Center for Precision and Ultra Precision Machining and Measurement, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Frozen-slurry-based laminated object manufacturing has potential for use in the field of 3D printing for porous ceramics. To study the laser cutting process of frozen ceramic slurry, the heat conduction mathematical model of a CO₂ laser plane thermal source is established. COMSOL finite element simulation software is used to simulate the laser scan heating process. Considering pure ice as the ideal material, the mathematical model of the laser cutting depth is established by combining the experimental research. The results show that the laser cutting process of frozen ceramic slurry is similar to that of traditional non-metallic materials, and the depth of the “V”-shaped gasification cutting zone increases with the increase in the laser energy density. Because of the heat absorption and scattering of ceramic particles, a heat affected transition zone exists below the cutting area of frozen ceramic slurry. The actual cutting depth is different from the theoretical cutting depth of pure ice. If correction coefficients related to the material characteristics are introduced into the theoretical model, it can more effectively satisfy the actual laser cutting law. The results of this study can be used as a reference for parameter selection in the laser cutting process of frozen ceramic slurry.

Key words materials; laser cutting; frozen materials; temperature field; ceramic slurry; 3D printing

1 引言

陶瓷材料在强度、硬度、耐磨、耐腐蚀、耐高温和理化性能稳定性等方面具有明显优势,应用于机械、电子、化工、航空航天、能源等诸多领域。采用 3D 打印成型方法加工陶瓷材料,避开了陶瓷材料铣削性能差的

缺点,无需设计加工模具,可用于成型复杂零件,是理想的成型方法^[1]。目前,激光选区成型的思想在陶瓷 3D 打印原理研究中应用最为广泛^[2]。

现有陶瓷激光选区 3D 打印方法中常用粉末和浆料两类材料。粉末基 3D 打印方法以激光选区烧结/融化(SLS/SLM)为主,其中直接 SLS/SLM 法采用高能

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-07-19; 网络首发日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(52102075)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ-812)

通信作者: *ggeng1987@163.com

激光对陶瓷颗粒进行直接成型。Bertrand 等^[3]采用 YAG:Nd 激光对 ZrO₂/Y₂O₃ 混合陶瓷粉末进行 SLS 成型,所制样件具有相对致密均匀的微观表面组织,制件含有裂纹和气孔;Hagedorn 等^[4]采用 YAG:Nd 激光器对氧化锆/氧化铝混合粉末进行 SLM 实验,制得致密度 100%、无裂纹的样件,但制件表面非常粗糙;以高分子材料作为黏结剂的间接 SLS 方法,将成型和烧结步骤分离,避免了高能激光的使用。Shahzad 等^[5]以聚丙烯为黏结剂进行了氧化锆陶瓷粉末的 CO₂ 激光烧结实验,结合脱脂烧结后处理,制备了内部多孔的无裂缝陶瓷样件。粉末材料存在料层铺设厚度较大、铺料密度低、材料流动性差等问题,影响制品致密度和组织结构均匀性。浆料基 3D 打印方法以光固化(SL)^[6]为主,利用激光选区固化陶瓷浆料中的光敏树脂进行成型。黄笔武等^[7]提出了根据光敏树脂临界曝光量和透射深度数值选定紫外激光固化加工参数的方法;王志勇等^[8]在 HAP-TCP 复合生物陶瓷浆料的 SL 成型实验中,分析了激光功率、扫描速度/间距、料层厚度等因素对固化区形貌尺寸的影响规律;Liu^[9]探索了以硅溶胶作为粘剂进行激光选区固化的陶瓷激光凝胶(CLG)打印方法,分析了 CO₂ 激光功率对固化深度的影响。考虑到液体浆料存在难以支撑悬臂结构的缺点,国内外学者基于先整体干燥固化液体料层,再激光选区扫描成型的思路,提出了许多新的陶瓷 3D 打印方法,如分层浆料沉积(LSD)^[10]、陶瓷激光烧结/熔覆(CLS/CLF)^[11-12]、激光选区烧除(SLB)^[13]等,其中 Tang 等^[13]分析了激光对陶瓷料层的切割作用,Ahn 等^[14]研究了激光功率和制件表面粗糙度之间的关系,

但这些方法都存在料层干燥过程耗时长的问题。Zhang 等^[15]提出基于冻结浆料的分层实体制造方法(FS-LOM),采用先整体冻结固化液体料层,再激光选区切割成型的思路,提高了料层固化效率,实现了多孔陶瓷的 3D 打印。

本文采用理论分析和实验研究的方法,结合 COMSOL 有限元仿真计算^[16],分析了水基氧化铝陶瓷冻结浆料的 CO₂ 激光切割过程,分析了不同激光功率和切割速度下的温度分布,修正了激光切割数学模型,为冻结陶瓷浆料激光切割工艺参数的选择提供了参考。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验材料由氧化铝粉末(α -Al₂O₃, $D_{50}=0.3\ \mu\text{m}$, 纯度 $\geq 99\%$)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na, 黏结剂, 分析纯)、聚丙烯酸铵(分散剂, 纯度 $\geq 99\%$)、去离子水构成, 配比如表 1 所示。材料经球磨、真空除泡, 得到分散性和流动性良好的陶瓷浆料。采用示差扫描量热法测定浆料的共晶点, 分别采用体积质量法、示差扫描量热法、瞬态热线法测定浆料在 $-20\ ^\circ\text{C}$ (确保浆料冻结) 条件下的热物性, 结果如表 2 所示。

表 1 陶瓷浆料的配比(质量分数, %)

Material	CMC-Na	α -Al ₂ O ₃	Ammonium polyacrylate	Deionized water
Content	1	50	1	48

表 2 陶瓷浆料热物性

Table 2 Thermophysical properties of ceramic slurry

Thermophysical property	Eutectic point $T_f / ^\circ\text{C}$	Density $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Specific heat capacity $C / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Thermal conductivity $k / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Value	-14	1.479	1203	3.871

2.2 加工原理

FS-LOM 加工步骤如图 1 所示:(a) 在工作台上铺设一层陶瓷浆料;(b) 利用冷冻板接触料层上表面;(c) 料层中水分转变为冰晶,实现料层冻结(温度达到 $-20\ ^\circ\text{C}$);(d) 采用激光束切割二维图形对应的外围轮廓,并使工作台下落一层;(e) 重复步骤(a)~(d),完成增材制造;(f) 将冻结工件置于冷冻干燥机中干燥,冰晶升华后留下孔隙结构;(g) 清除外围多余材料,形成多孔陶瓷生坯。

激光对冻结料层的选区切割过程直接影响 3D 成形的精度。在图 1(d)中,由于激光束能量非常集中,冻结浆料中的冰晶和有机添加剂受到激光辐照被迅速地气化,陶瓷颗粒被迅速产生的气体吹出,形成切割槽。激光能量随入射深度的增加而衰减。在气化区下方,激光能量不足以使冰晶气化,但可以使其融化,此

区域称之为过渡区。在过渡区,陶瓷颗粒摆脱了冰晶的挤压,重新分布在融化的液态水中。最后,周围的低温冻结浆料使过渡区材料重新冻结凝固。

2.3 激光加热温度场仿真

根据能量守恒定律以及热传导理论,热传导方程在 3D 笛卡尔空间表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} [k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z}] + Q(x, y, z, t) = \rho(T)C(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: $k_x(T)$ 、 $k_y(T)$ 、 $k_z(T)$ 为材料各向导热系数; $\rho(T)$ 为材料密度值(与温度相关); $C(T)$ 为材料的比热容值(与温度相关); t 为作用时间; $Q(x, y, z, t)$ 为单位体积、时间内材料吸收激光能量所产生的热量。假设冻结陶瓷浆料各向同性,即 $k_x(T) = k_y(T) = k_z(T) =$

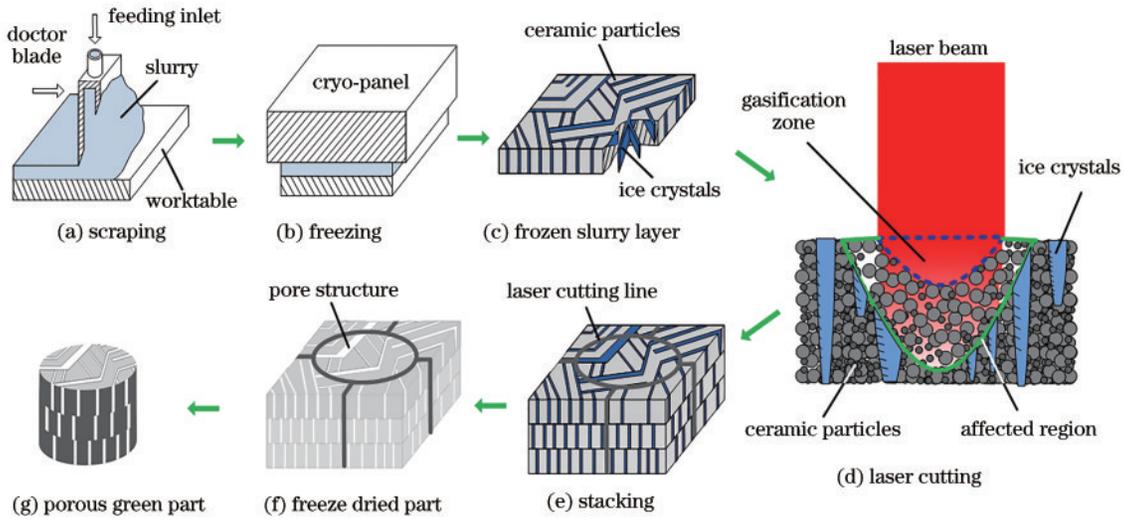


图 1 FS-LOM 加工原理图

Fig. 1 Machining schematic diagram of FS-LOM

$k(T)$, 则

$$k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z, t) = \rho(T) C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

本文选用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光对冻结陶瓷浆料进行辐照加热, 冰晶对能量的吸收发生在材料表面, 因此激光热源可视为面热源。此时, 可将热传导方程简化为一维问题, 则式(2)可简化为

$$k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q(x, y, t) = \rho(T) C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

图 2 是激光照射到冻结陶瓷浆料表面的示意图, 激光束沿 x 轴匀速移动。在一定的扫描速度下, 激光束模拟为平面上呈高斯分布的热源, 激光功率需转化为热载荷, 仿真过程中采用加载在表面节点上的热流密度来模拟激光热源的作用。为了简化模拟过程, 假设材料模型几何体为圆柱形。实验过程中所使用的激光器光斑半径较小, 其扫描影响范围较窄, 设定样品尺

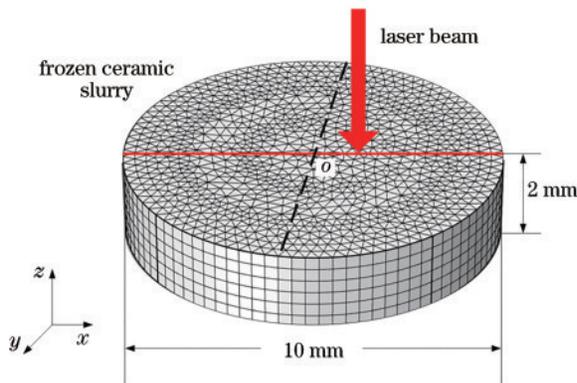


图 2 材料模型及网格划分

Fig. 2 Material model and mesh generation

寸为 $\text{Ø}10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。在 COMSOL 仿真平台中, 选择 3D 实体单元进行固体传热瞬态分析。为了确保计算的精度, 应使有限元网格的最小单元尺寸不大于激光半径。由于样品本身尺寸较小, 所以无需分区域进行网格划分, 对样品整体选择特别细化的有限元网格, 单元数为 4430, 最小单元尺寸为 0.15 mm , 最大单元尺寸为 0.3 mm 。

为了计算激光加热陶瓷浆料冻结坯体的温度场分布, 建立合理的热传导模型, 就需要对实际问题进行一定的假设和简化: 1) 冻结陶瓷浆料为各向同性材料; 2) 假设绝缘边界条件, 即第二类边界条件的特殊形式, 忽略对流、热辐射对坯体温度变化的影响; 3) 为了保持样品坯体一直处于冻结状态, 设定冻结 CMC-Na 陶瓷浆料的初始温度为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用相应条件下的热物性参数求解热传导方程; 4) 冰晶对 CO_2 激光的波长吸收系数极高, 假设其激光能量吸收率为 100%。

2.4 冻结浆料激光切割数学模型

激光光斑中心处的能量最大, 切割深度最深, 因此仅考虑光斑中心处的扫描切割。激光功率密度在笛卡儿坐标下的分布为

$$q(x, y) = \frac{2\alpha P}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right], \quad (4)$$

式中: α 为能量吸收率; P 为激光功率; ω 为激光光斑半径。在激光光斑中心扫描线上截取区域面积

$$ds = dx dy, \quad (5)$$

则作用在此区域上的激光功率为

$$dP = ds \frac{2\alpha P}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right]. \quad (6)$$

光斑完成此区域的扫描需要的时间为

$$dt = \frac{dx}{V}, \quad (7)$$

式中, V 为激光扫描速度。则作用在此区域上的激光总能量为

$$E_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\alpha P}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega^2}\right] ds \frac{dx}{V} \quad (8)$$

此区域材料被气化、分解所需要的能量为

$$E_2 = \rho Q D s, \quad (9)$$

式中: ρ 为材料密度; D 为切割深度; 比能 Q 为

$$Q = C(T_2 - T_1) + L_v, \quad (10)$$

式中: C 为材料比热容; T_2 为材料气化点温度; T_1 为环境温度; L_v 为气化潜热。根据能量守恒

$$E_1 = E_2, \quad (11)$$

则

$$D = \frac{\frac{2\alpha P}{V\pi\omega^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega^2}\right] dx}{\rho[C(T_2 - T_1) + L_v]} \quad (12)$$

当光斑沿 x 方向做直线运动时, 可认为 y 坐标始终为 0, 可以得到

$$D = \frac{\sqrt{2} \alpha}{\rho[C(T_2 - T_1) + L_v] \omega \sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{V}\right) \quad (13)$$

由式(13)可知, 材料性质确定以后, 激光气化的深度受光斑半径、激光功率和扫描速度等工艺参数的影响。

2.5 实验设备

为与理论计算进行对比, 采用振镜式 CO_2 激光器进行冻结浆料切割实验, 设备由中国经纬激光有限公司生产, 型号为 JW_CO₂-100, 功率范围为 0~100 W, 扫描速度范围为 0~7000 mm/s, 光斑直径为 0.3 mm; 成形后采用冷冻干燥机(LGJ-10, 北京松源)进行干燥; 采用扫描电镜(VEGA-II XMU, 捷克 TESCAN)观测激光切割线形貌, 确定合理的激光加工参数。

3 结果与讨论

3.1 激光加热温度场分布

冻结陶瓷浆料激光加热温度场分布如图 3 所示。热影响区温度在 xy 平面上呈高斯分布[图 3(a)], 在 yz 平面上的等温线呈“V”字形分布[图 3(b)]; 热影响区的宽度非常狭窄, 未扫描区域保持材料的初始温度, 已扫描热影响区温度逐渐向周围未扫描低温区域传导, 离光斑中心越远的区域温度越低[图 3(c)]。激光能量在入射深度方向呈指数衰减, 随着激光功率升高或扫描速度的减小, 其热流密度增大, 热影响区温度也随之增大[图 3(d)~3(e)]; 冻结浆料中的可气化材料绝大部分为冰晶, 温度达到 100 °C 以上则被气化, 因此采用热影响区深度方向上温度超过 100 °C 的范围计算激光切割深度, 随着激光功率的升高或扫描速度的减小, 气化深度随之增大[图 3(f)]。

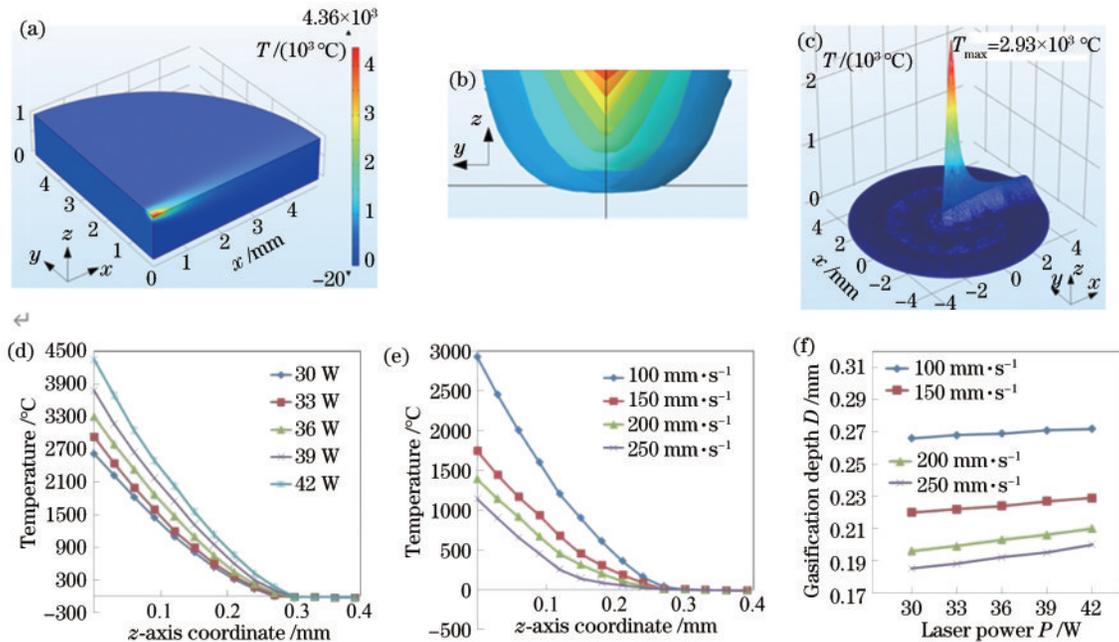


图 3 冻结陶瓷浆料激光加热温度场分布。(a) $P=42$ W, $V=100$ mm·s⁻¹, $t=0.05$ s; (b) $P=33$ W, $V=200$ mm·s⁻¹, $t=0.25$ s; (c) $P=33$ W, $V=100$ mm·s⁻¹, $t=0.05$ s; (d) $V=100$ mm·s⁻¹时激光功率对温度场的影响; (e) $P=33$ W 时扫描速度对温度场的影响; (f) 激光功率、扫描速度对气化深度的影响

Fig. 3 Temperature field distribution of frozen ceramic slurry by laser heating. (a) $P=42$ W, $V=100$ mm·s⁻¹, $t=0.05$ s; (b) $P=33$ W, $V=200$ mm·s⁻¹, $t=0.25$ s; (c) $P=33$ W, $V=100$ mm·s⁻¹, $t=0.05$ s; (d) influence of laser power on temperature field under $V=100$ mm·s⁻¹; (e) influence of scanning speed on temperature field under $P=33$ W; (f) influence of laser power and scanning speed on gasification depth

3.2 激光切割深度理论计算

冻结浆料中只有冰和其他有机物受热产生气化、分解现象,而水的含量远远超过有机物,因此以纯冰进行理论计算。冰的密度 $\rho_{ice}=0.913\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比热容 $C_{ice}=2.1\text{ J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$,融化热为 $Q_{ice\text{ melting}}=335\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,水的比热容 $C_{water}=4.2\text{ J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$,气化热 $Q_{steam}=2260\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,则气化 1 g 温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰需要能量(比能)为

$$Q_{ice\text{ gas}}=C_{ice}\times 20+Q_{ice\text{ melting}}+C_{water}\times 100+Q_{steam}=3057\text{ J}.$$
 (14)

根据式(13)计算理论切割深度,如图 4 所示,可以看出,随着激光功率增大或扫描速度减小,理论切割深度随之增大,其规律与仿真模拟结果一致。

3.3 激光切割实验

采用激光加工参数 P 为 $30\sim 41\text{ W}$ 、 V 为 $100\sim 250\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行冻结陶瓷浆料切割实验,切割线截面形貌如图 5(a) 所示。气化区(切槽)及其下方的过渡区(热影响区)均近似“V”形,与仿真等温线规律一致。测量切槽深度为 D ,并将其与仿真结果进行对比分析,结果如图 5(b) 所示。可以看出,气化区实际尺寸随激光功率和扫描速度的变化规律与仿真结果基本一致,

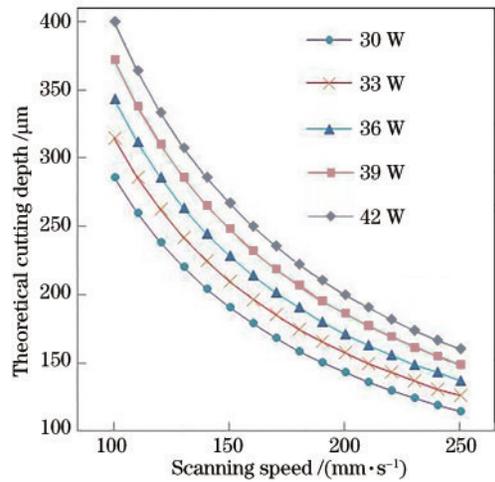


图 4 不同激光功率、扫描速度下冻结陶瓷浆料的理论切割深度

Fig. 4 Theoretical cutting depths of frozen ceramic slurry under different laser powers and scanning speeds

仿真值总体大于实验测量值,这是由于实际情况中存在能量损耗,且材料能量吸收率达不到理想的 100%。

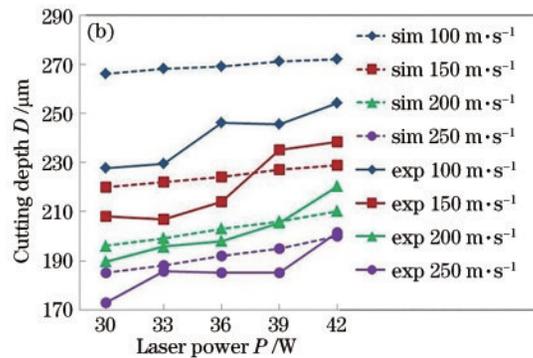
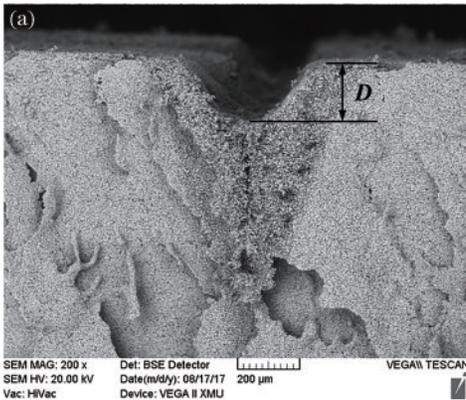


图 5 冻结陶瓷浆料激光切割实验结果。(a)切割线截面形貌;(b)切割深度实验值与模拟值对比(sim:模拟,exp:实验)

Fig. 5 Experimental results of laser cutting of frozen ceramic slurry. (a) Cross-sectional morphologies of cutting line; (b) comparison between experimental values and simulation values of cutting depth (sim: simulation, exp: experiment)

将实验结果与理论计算值进行对比分析,结果如图 6(a) 所示。可以看出,理论切割深度与实际测量值存在较大差距,最大误差为 $137\text{ }\mu\text{m}$,此外,激光扫描速度的影响被高估。一方面是纯冰和浆料的热物性不同,在激光扫描冻结陶瓷浆料时,不同于冰的气化相变大量吸热,热影响区中占有一定体积的陶瓷颗粒未发生相变吸热现象,陶瓷颗粒也增加了激光的散射,这些因素造成冻结陶瓷浆料激光切割过程与纯冰存在差异,其机理还需进一步深入研究;另一方面是在实际的扫描过程中,激光真实功率和光斑半径难以准确测量。

为了削弱扫描速度的影响,使模型更加适用于冻结陶瓷浆料的切割过程,引入系数 a 和 b 对模型进行修正,使得切割深度为

$$D=\frac{\sqrt{2}\alpha}{\rho[C(T_2-T_1)+L_v]}\omega\sqrt{\pi}\left(\frac{aP}{V^b}\right),$$
 (15)

式中, a 和 b 为与陶瓷浆料的固含量相关的系数,根据实验结果确定 50% 固含量的冻结陶瓷浆料对应值为: $a=0.0255$, $b=0.275$,修正后的理论曲线如图 6(b) 所示。结果表明,修正后模型的理论值与实验值之间的最大误差为 $27.221\text{ }\mu\text{m}$,相对于修正前误差大大减小,模型更加接近实验结果,对后续的实验研究具有一定的指导意义。

综上分析,采用激光功率 $P=41\text{ W}$ 、扫描速度 $V=250\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、料层厚度为 0.2 mm 等加工参数进行 3D 打印实验,对应的切割深度 $D=207\text{ }\mu\text{m}$,成形的多孔陶瓷零件如图 7 所示。可以看出,料层切割效果良好,制件表面无明显的台阶效应。

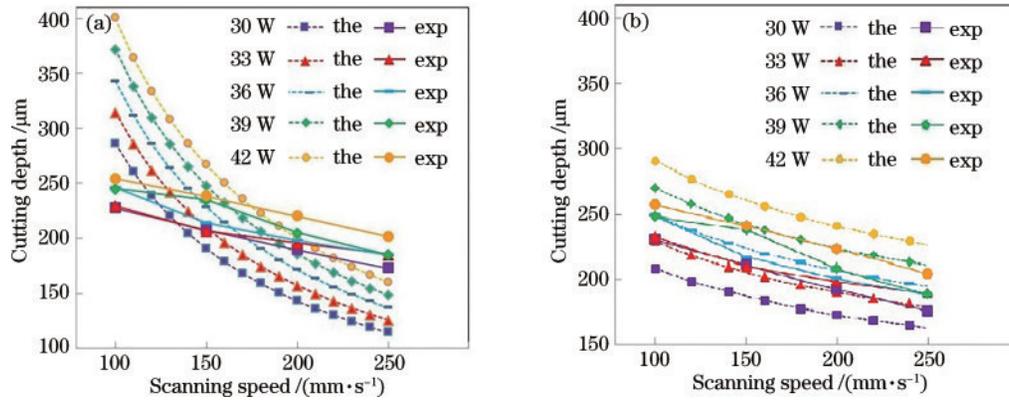


图 6 切割深度实验值与理论计算值对比(the:理论,exp:实验)。(a)模型修正前;(b)模型修正后

Fig. 6 Comparison between cutting experimental values and theoretical values of cutting depth (the: theoretical, exp: experimental). (a) Before theoretical model modification; (b) after theoretical model modification

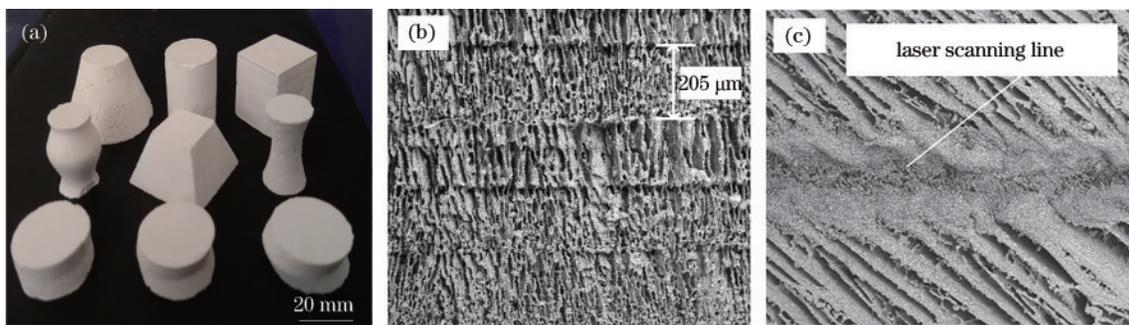


图 7 3D 打印实验。(a)FS-LOM 加工的陶瓷零件;(b)纵截面多孔结构;(c)表面多孔结构

Fig. 7 3D printing experiment. (a) Ceramic parts processed by FS-LOM; (b) longitudinal porous structure; (c) surface porous structure

4 结 论

本文结论如下:

1) 冻结陶瓷浆料的激光切割区域分为气化区和过渡区,其形状受激光能量密度影响呈“V”字形,以 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为气化边界条件进行有限元仿真分析,可得到与实际激光切割深度变化规律相符的模拟值;

2) 冻结陶瓷浆料的激光气化深度符合纯冰激光切割数学模型,但受陶瓷颗粒的吸热和散射作用,实际切割模型需引入修正系数;

3) 为提高成形表面质量,后续研究可围绕激光切割区域形状、3D 打印模型倾角等因素对制件表面粗糙度的影响展开。

参 考 文 献

- [1] 李亚运, 司云晖, 熊信柏, 等. 陶瓷 3D 打印技术的研究与进展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(6): 793-805.
Li Y Y, Si Y H, Xiong X B, et al. Research and progress on three dimensional printing of ceramic materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(6): 793-805.
- [2] Chen Z W, Li Z Y, Li J J, et al. 3D printing of ceramics: a review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(4): 661-687.

- [3] Bertrand P, Bayle F, Combe C, et al. Ceramic components manufacturing by selective laser sintering[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 989-992.
- [4] Hagedorn Y C, Balachandran N, Meiners W, et al. SLM of net-shaped high strength ceramics: new opportunities for producing dental restorations[EB/OL]. [2022-03-05]. <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/88376/2011-42-Hagedorn.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [5] Shahzad K, Deckers J, Zhang Z Y, et al. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(1): 81-89.
- [6] 赵圆圆, 罗海超, 梁紫鑫, 等. 光聚合微纳 3D 打印技术的发展现状与趋势[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002703.
Zhao Y Y, Luo H C, Liang Z X, et al. Micro-nano 3D printing based on photopolymerization and its development status and trends[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002703.
- [7] 黄笔武. 3D 打印立体光刻快速成型 SL5530 型光敏树脂性能研究[C]//2015 年第十四届全国应用化学年会论文集. 北京: 中国化学会, 2015: 101-102.
Huang B W. Study on the properties of SL5530 type photosensitive resin for stereolithography in 3D printing [C]//Proceedings of the 14th National Applied Chemistry

- Annual Conference 2015. Beijing: Chinese Chemical Society, 2015: 101-102.
- [8] 王志勇, 蔡志祥, 刘国承, 等. HAP-TCP 复合生物陶瓷浆料的激光 3D 打印及性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 104-107, 131.
Wang Z Y, Cai Z X, Liu G C, et al. Laser 3D printing and properties of HAP-TCP composite bioceramic materials[J]. Materials Reports, 2021, 35(S1): 104-107, 131.
- [9] Liu F H. Manufacturing porous multi-channel ceramics by laser gelling[J]. Ceramics International, 2011, 37(7): 2789-2794.
- [10] Mühler T, Gomes C M, Heinrich J, et al. Slurry-based additive manufacturing of ceramics[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12(1): 18-25.
- [11] Yen H C, Tang H H. Study on direct fabrication of ceramic shell mold with slurry-based ceramic laser fusion and ceramic laser sintering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(9): 1009-1015.
- [12] Tang H H, Liu F H, Lin W H. Rapid prototyping machine based on ceramic laser fusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(7): 687-692.
- [13] Tang H H, Yen H C. Slurry-based additive manufacturing of ceramic parts by selective laser burn-out [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(3): 981-987.
- [14] Ahn D, Kweon J H, Choi J, et al. Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 339-346.
- [15] Zhang G, Chen H, Yang S B, et al. Frozen slurry-based laminated object manufacturing to fabricate porous ceramic with oriented lamellar structure[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(11): 4014-4019.
- [16] 李金华, 安学甲, 姚芳萍, 等. H13 钢激光熔覆 Ni 基涂层热应力循环的仿真研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002104.
Li J H, An X J, Yao F P, et al. Simulation on thermal stress cycle in laser cladding of H13 steel Ni-based coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002104.