

基于次级烧结区域调控的 SLS 制件控形控性研究

童强, 薛铠华, 姚山*

大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116023

摘要 提出了一种将中能量密度高速面域扫描粘接与高能量密度轮廓碳化分割相结合的复合扫描方法, 并采用该方法及常规扫描方法对宝珠覆膜砂进行烧结实验; 研究了烧结件的拉伸断面形貌、抗拉强度、成形精度和变形量, 结果表明: 复合扫描方法能有效去除次级烧结体, 提高烧结件的精度及烧结初强度, 减小后处理加热强化过程的变形量, 最终获得了高精度、高性能的烧结件。

关键词 激光技术; 控形控性; 复合扫描; 选择性激光烧结; 次级烧结

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1202001

Accuracy and Performance Controlling of Part Made by Selective Laser Sintering Based on Secondary Sintering Region Regulation

Tong Qiang, Xue Kaihua, Yao Shan*

School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract In this paper, a composite scanning method combining high energy density contour carbonization with high energy density contour bonding is proposed, and the proposed method and ordinary scanning method are used to implement sintering experiment. The tensile fracture, tensile strength, forming accuracy and deformation are studied. The results show that the composite scanning method can effectively remove the secondary sinter, improve the precision and initial sintering strength of the sinter, and reduce the deformation in the process of post-treatment heating strengthening. At last, sintered parts with high precision and high performance are obtained.

Key words laser technique; accuracy and performance controlling; composite scanning; selective laser sintering; secondary sintering

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.5470

1 引言

增材制造(3D 打印)技术是一种新型的材料制造技术, 主要应用于铸造、模具、新产品开发等行业。选择性激光烧结(SLS)技术利用激光直接烧结粉末来成形工件, 被广泛应用于增材制造行业^[1-4]。SLS 与铸造技术相结合可省去木模的设计与制造, 实现砂型/砂芯一体化成形, 能够快速制造出具有复杂结构的铸件^[5-7]。工件的强度和精度是增材制造研究的热点, 而激光能量密度是影响烧结初强度、工件精度的重要因素^[8-13]。在 SLS 技术中, 工件的最终强度是在后续热处理过程中获得的, 在打印过程中只获得烧结初强度。在激光选择性烧结过程中常常伴

随着次级烧结现象, 最终烧结件表面会粘连一定厚度的多余固体粉末^[14]。次级烧结现象对工件的烧结初强度及精度具有重要影响, 但这方面的相关研究目前还鲜有报道。闫春泽等^[15-17]的研究表明: 烧结初强度与工件精度之间相互制约, 提高预热温度和激光能量密度均会增大次级烧结区; 当采用增大激光能量密度的措施来提升烧结件的性能时, 应考虑次级烧结对成形精度的影响。

通过研究次级烧结区域调控来解决烧结初强度与成形精度的矛盾, 对于复杂结构砂型/砂芯的烧结制备具有重要意义。宝珠覆膜砂具有强度高、耐火度高、回收率高、膨胀系数低等优点, 被广泛应用于高端复杂铸件的铸造^[18-20]。本文以宝珠覆膜砂为原

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-07-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(SS2015AA042502)

* E-mail: yaoshan@dlut.edu.cn

材料,借鉴轮廓失效 3D 打印方法的技术路线^[21-22],在 SLS 现有扫描方法的基础上提出了一种复合扫描方法,该方法可以提高工件的烧结初强度,控制工件的变形,实现次级烧结体与工件的分割和剥离,最终能获得高性能、高精度的烧结件。

2 基本原理

2.1 实验设备及材料

采用自主搭建的选择性激光烧结 3D 打印平台进行成形实验,实验原理图如图 1 所示。实验平台主要由激光成形系统、粉末铺送系统、机械运动系统、控制系统等组成。激光器为 MFSC-1000W 连续光纤激光器,激光波长为 1064 nm,最大输出功率为 1000 W,功率密度呈高斯分布且功率连续可调。激光先后经过振镜及聚焦镜。通过控制系统来控制激光的轨迹与能量密度,在粉床上实现变能量密度的选区扫描成形。振镜扫描的最大速率为 $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,激光聚焦光斑的直径为 0.4 mm,成形层厚度为 0.1~0.5 mm,成形工件的尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

吸热和放热峰,树脂在此温度范围燃烧碳化。可见,随着温度升高,宝珠覆膜砂中的树脂先后经历了软化、固化、碳化三个过程。

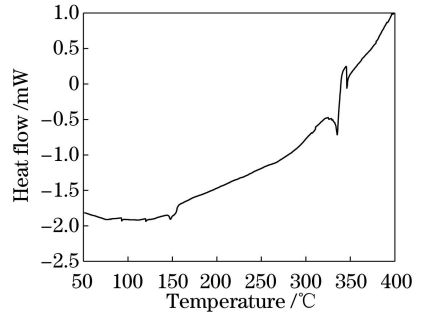


图 2 宝珠覆膜砂的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curve of coated ceramsite

2.2 复合扫描方法

根据上述的检测分析结果,并结合宝珠覆膜砂受热先后发生软化、固化和碳化的特点,基于 SLS 提出了一种复合扫描方法,该方法的原理如图 3 所示。可以看出,复合扫描方法的整个过程可分为数据准备、打印制造及后处理三个环节,主要步骤如下:

- 1) 采用计算机对目标模型进行切片处理,层厚为 0.3 mm,规划扫描轨迹,在工艺设计软件中获取每层截面的填充路径及轮廓路径;
- 2) 打印铺粉过程结束后,控制系统以高能量密度的激光对宝珠覆膜砂进行样件截面填充扫描;
- 3) 控制系统利用高能量密度的激光对已固化的宝珠覆膜砂进行轮廓轨迹的碳化扫描,从而完成单层复合扫描烧结;
- 4) 重复上述铺粉及复合扫描过程;
- 5) 逐层复合扫描后,得到略大于实际尺寸的具有较高烧结初强度的样件;
- 6) 对样件进行热处理,在此过程中,如果样件的烧结初强度较高,就会弱化或抑制后续热处理过程中树脂的软化变形;
- 7) 对碳化层以外的次级烧结体进行剥离,获得高精度样件。

2.3 实验方法

激光能量密度是指单位时间单位面积上获得的激光能量的大小,计算公式^[10,14,23]为

$$E = \frac{P}{v \cdot d}, \quad (1)$$

式中: E 为激光能量密度; P 为激光功率; v 为激光扫描速率; d 为扫描线间距。由(1)式可知,激光能量密度的大小受激光功率、扫描速率、扫描线间距的

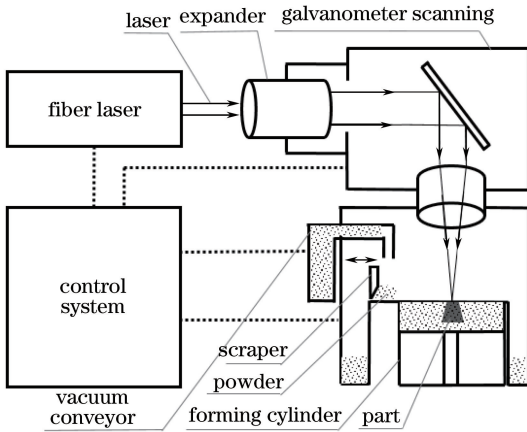


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic of experimental platform

实验原料有宝珠覆膜砂粉末、球形电解陶粒、高强度热塑性酚醛树脂及固化剂。其中:高导热率的球形电解陶粒为基体材料,其粒径为 $109 \sim 212 \mu\text{m}$,角形系数不大于 1.1;高强度热塑性酚醛树脂为覆膜材料;试样中,树脂的质量为宝珠覆膜砂的 2%,固化剂乌洛托品的质量为树脂的 15%。

采用 DSC822 差热分析仪(DSC)对宝珠覆膜砂的热性能进行分析,结果如图 2 所示。可以看出:在 DSC 曲线中,90.5 °C 左右出现了吸热峰,该峰为酚醛树脂的熔融峰;在 151.5 °C 左右出现了放热峰,该峰为酚醛树脂的固化峰;在 337.5~343.7 °C 出现了

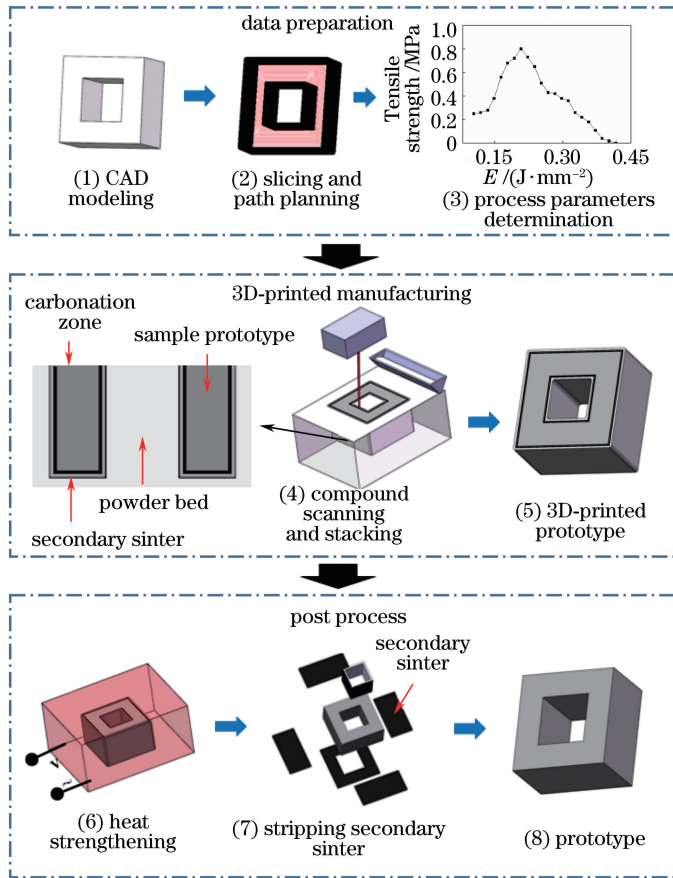


图 3 复合扫描方法示意图

Fig. 3 Schematic of compound scanning method

共同影响。实验采用的工艺参数如下：宝珠覆膜砂粉床的初始温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，单层粉的厚度为 0.3 mm ，扫描速率为 $2500\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，激光功率为 $50\sim 800\text{ W}$ ，扫描线间距为 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ 。在上述工艺参数下可得激光的能量密度为 $0.1\sim 3.2\text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。

采用 LT665 激光光斑分析仪检测分析激光光斑的形状及能量分布，结果如图 4 所示。可以看出：激光能量呈高斯分布，光束宽度在次轴与主轴上的长度之比为 0.872 ，聚焦时光斑的直径为 0.3 mm ，光斑半径偏差的绝对值约为 0.02 mm 。实验中成形层的厚度为 0.3 mm ，理论成形的最小误差为 0.3 mm 。可见，实验中采用的激光光斑形状的偏差对砂型成形精度的影响可以忽略不计。

SLS 成形的激光扫描方法主要有 X(或 Y)向扫描、环形扫描和光栅式扫描^[24] 3 种，选用环形扫描(下文简称“常规扫描方法”)和复合扫描方法制备力学性能测试件及精度测试件，每组样件烧结 5 个。采用 Byes3005 拉伸试验仪在室温下对烧结件进行拉伸试验(抗拉强度取 5 个试样的平均值)，参考 JB/T8583—2008 标准中的“8”字形试样制备拉伸试

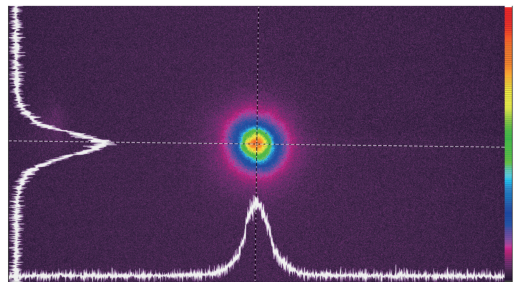


图 4 光束分析结果

Fig. 4 Beam analysis results

样，扫描方式为回字形填充；采用 JSM-5600LV 扫描电镜观察烧结件的拉伸断口形貌，采用 Byes3020 影像测量仪测量烧结件的碳化宽度及深度(取 5 个试样的平均值)。精度测试试样的形状与尺寸如图 5 所示(精度以绝对数进行统计)。其中：空心立方体试样用于检测复合扫描方法与常规扫描方法对制件尺寸精度的影响；悬臂结构试样用于测量高烧结初强度与常规烧结初强度的样件经后处理后的变形量。采用 HandySCAN 700 三维扫描仪检测样件的尺寸精度。

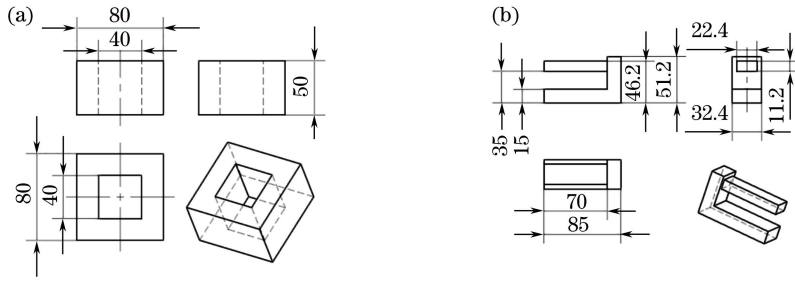


图 5 精度测试样件的形状与尺寸。(a)空心立方体样件;(b)悬臂结构样件

Fig. 5 Shapes and sizes of samples for accuracy test. (a) Hollow cube sample; (b) cantilever structural sample

3 结果与讨论

3.1 激光能量密度与烧结性能的关系

激光能量密度与烧结件抗拉强度(烧结初强度)的关系如图 6 所示。可以看出,烧结初强度随着激光能量密度的增大呈先增大后减小的趋势。激光作用于宝珠覆膜砂颗粒后,由光能转化而来的热能使宝珠覆膜砂的温度升高,其表层的树脂受热发生软化后均匀地包覆于宝珠覆膜砂颗粒表面,并与相邻颗粒表面熔化的树脂相互连接成颈。不同激光能量密度下烧结件的拉伸断口形貌如图 7 所示。可以看出:当激光能量密度为 $0.10 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时,激光能量较小,树脂熔融的程度小,颗粒之间形成的树脂颈较小;当激光能量密度增大到 $0.21 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时,覆膜砂的温度升高,颗粒之间形成的树脂颈增大,此时

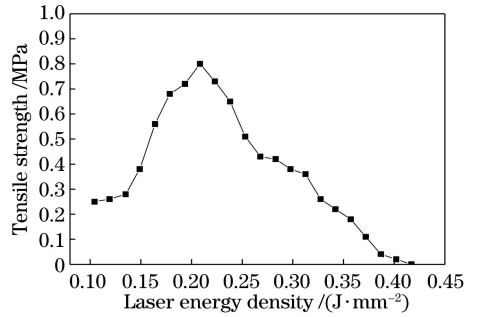


图 6 激光能量密度与烧结件抗拉强度的关系

Fig. 6 Relationship between laser energy density and tensile strength of sintered sample

烧结初强度最大,为 0.80 MPa ;随着激光能量密度继续增大到 $0.26 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,颗粒温度进一步升高,颗粒间的树脂膜及树脂颈开始碳化,树脂膜及树脂颈出现毛刺,树脂颈的接触面积减小,烧结初强度降

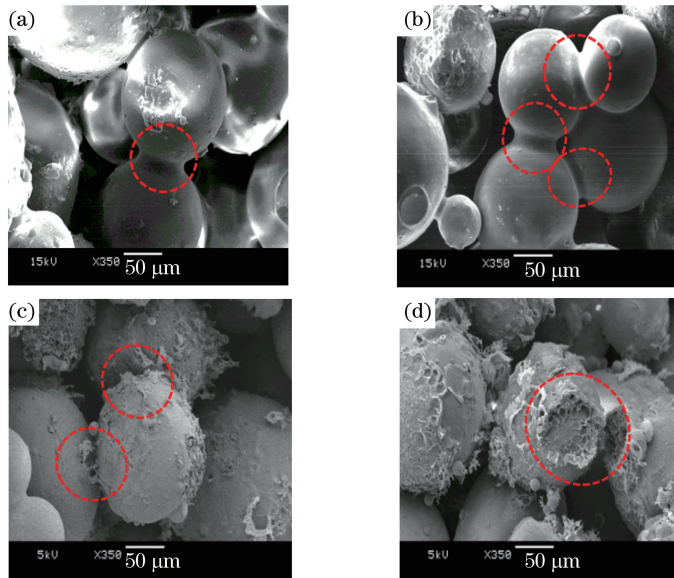


图 7 不同激光能量密度下制备的拉伸试样的断口形貌。

(a) $0.10 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (b) $0.21 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (c) $0.26 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (d) $0.42 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$

Fig. 7 Fracture morphology of tensile samples prepared at different energy densities.

(a) $0.10 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (b) $0.21 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (c) $0.26 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$; (d) $0.42 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$

低;当激光能量密度增大至 $0.42 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时,烧结初强度几乎为 0,颗粒的树脂膜及树脂颈接近完全碳化,颗粒树脂膜出现凸起的毛刺。

利用宝珠覆膜砂碳化态无强度的特点,通过线条烧结实验研究了激光能量密度与碳化宽度、碳化深度的定量关系,扫描线间距为 $0.1\sim 0.2 \text{ mm}$ 。烧结线碳化宽度测量的俯视图如图 8 所示,激光能量密度与碳化宽度、碳化深度的关系如图 9 所示。可以看出,当激光能量密度达到 $1.60 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时,碳化宽度为 0.31 mm ,碳化深度为 0.32 mm 。

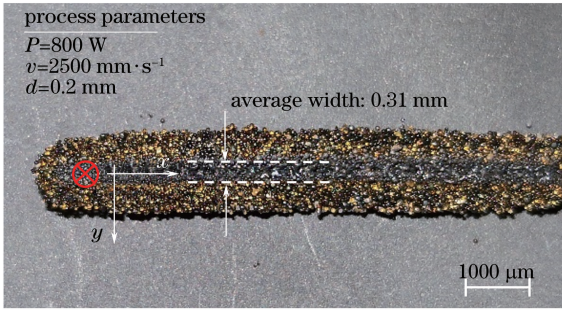


图 8 测量碳化宽度的俯视图

Fig. 8 Top view of measuring carbonation width

3.2 扫描方法对精度的影响

采用常规扫描方法与复合扫描方法进行烧结实

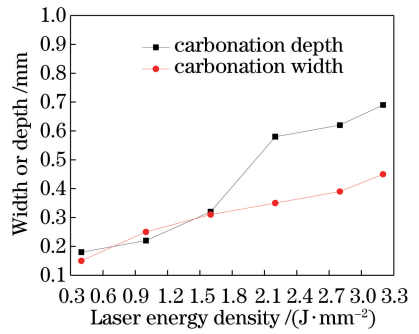


图 9 激光能量密度与碳化宽度、碳化深度的关系

Fig. 9 Relationship between energy density and carbonization width or carbonization depth

验,扫描粘接的激光能量密度为 $0.21 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,扫描碳化的激光能量密度为 $1.60 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。后处理过程的热处理温度为 $180 \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间为 1 h 。成形精度试样的形貌如图 10 所示。可以看出:采用常规扫描方法得到的烧结件的侧壁及底部均有次级烧结体,图 10(a)、(b)中的红色虚线为设计尺寸参考线;复合扫描方法得到的烧结件的设计尺寸处有黑色碳化线,碳化轮廓以外的为次级烧结体,通过剥离侧壁及底部的次级烧结体可以获得成形精度试样。成形精度试样的三维扫描结果(成形试样尺寸与设计尺寸误差)如图 11 所示。

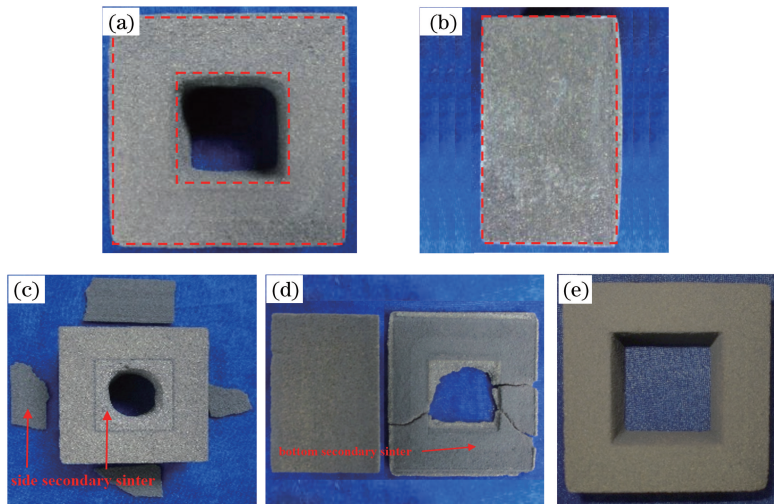


图 10 成形精度试样的形貌。(a)常规扫描方法,俯视图;(b)常规扫描方法,侧视图;

(c)复合扫描方法,俯视图;(d)复合扫描方法,侧视图;(e)剥离次级烧结体后的试样

Fig. 10 Images of samples used for sintering precision measurement. (a) Top view of sample sintered by conventional scanning method; (b) side view of sample prepared by conventional scanning method; (c) top view of sample sintered by composite scanning method; (d) side view of sample sintered by composite scanning method;

(e) experimental sample after stripping secondary sinter

为了验证结论的通用性,将实验方案中设计扫描粘接的激光能量密度调整为 $0.10\sim$

$0.21 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$,并进行对两种方法制备的烧结件的成形精度进行对比,结果如图 12 所示,同时给出了

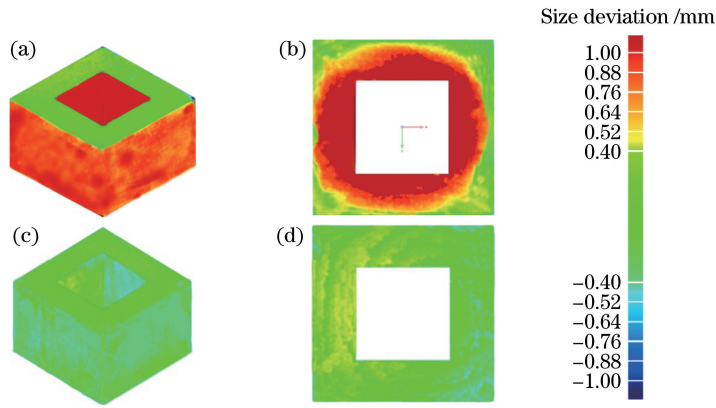


图 11 成形精度试样的三维扫描结果。(a)常规扫描方法,侧壁;(b)常规扫描方法,底层;
(c)复合扫描方法,侧壁;(d)复合扫描方法,底层

Fig. 11 3D scanning images of samples used for sintering precision measurement. (a) Side scanning image of sample sintered by conventional scanning method; (b) bottom scanning image of sample sintered by conventional scanning method; (c) side scanning image of sample sintered by composite scanning method; (d) bottom image of sample sintered by composite scanning method

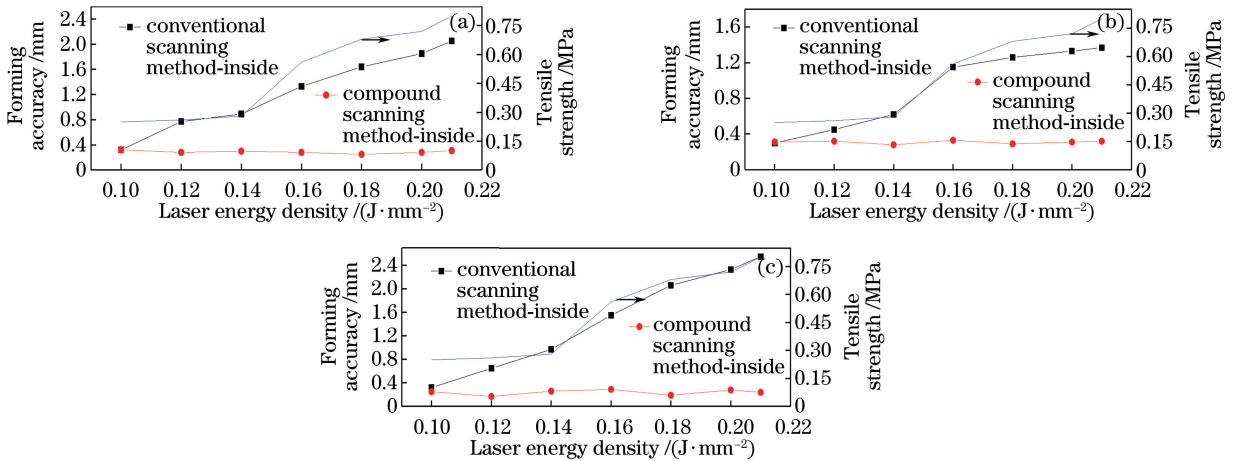


图 12 激光能量密度与烧结件成形精度、抗拉强度的关系。(a)内侧;(b)外侧;(c)底层

Fig. 12 Relationship between laser energy density and forming precision or tensile strength.
(a) Inside; (b) outside; (c) bottom

复合扫描方法制备的烧结件的抗拉强度(烧结初强度)。可以看出:常规扫描方法制备的烧结件的内壁尺寸偏差为 +2.05 mm, 外壁尺寸偏差为 +1.37 mm, 底层尺寸偏差为 +2.55 mm; 复合扫描方法制备的烧结件内壁平均尺寸的偏差为 +0.31 mm, 外壁平均尺寸的偏差为 +0.32 mm, 底层平均尺寸的偏差为 +0.28 mm。复合扫描方法制备的烧结件的内壁、外壁及底层的尺寸精度均高于常规扫描方法制备的, 这是因为常规扫描方法制备的烧结件的尺寸精度受次级烧结体的影响。由图 12 还可以看出: 随着激光能量密度增大, 常规扫描方法制备的烧结件因受次级烧结的影响, 尺寸偏差增大, 精度降低; 复合扫描方法制备的烧结件不受次

级烧结的影响, 尺寸偏差稳定, 精度保持不变; 当烧结件精度小于 0.4 mm 时, 常规扫描方法会受次级烧结的影响, 因此激光能量密度选择的工艺窗口较小, 烧结初强度最高为 0.25 MPa; 复合扫描方法不受次级烧结的影响, 故而激光能量密度选择的工艺窗口较大, 最大烧结初强度可达 0.80 MPa。

酚醛树脂具有受热先软化后固化, 并且固化反应结束后再次加热不会软化的特性, 提高打印过程的烧结性能会增大样件的树脂反应程度, 从而减小样件在后处理过程中的变形。为了验证烧结初强度对试样在后续热处理过程中变形的影响, 采用烧结初强度分别为 0.25 MPa 和 0.80 MPa 对应的能量密度打印悬臂结构样件, 并将两样件在相同的加热

工艺条件下进行后处理。不同烧结初强度的悬臂样件的三维扫描检测结果如图 13 所示。可以看出,烧结初强度为 0.25 MPa 和 0.80 MPa 的样件经后处

理后的最大变形量分别为 -1.48 mm 和 -0.21 mm,这说明较高的烧结初强度会降低试样在后续热处理过程中的变形。

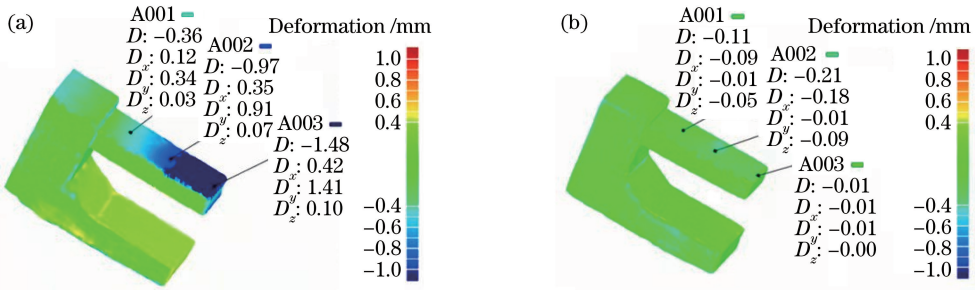


图 13 不同烧结初强度悬臂样件经后处理后的变形量。(a) 0.25 MPa;(b) 0.80 MPa

Fig. 13 Deformation of cantilever samples with different pre-sintered strength after post-treatment.

(a) 0.25 MPa; (b) 0.80 MPa

4 结 论

提出了将中能量密度高速面域扫描粘接与高能量密度轮廓碳化分割相结合的复合扫描方法,并采用该方法及常规扫描方法对宝珠覆膜砂进行烧结实验,得到以下结论:1)采用中能量密度高速面域扫描粘接可以增大试样的烧结初强度,减小试样在后续热处理过程中的变形量;2)采用高能量密度轮廓扫描碳化可将次级烧结体与目标样件进行分割,打印结束后实施剥离,制件精度不受次级烧结的影响;3)当工件精度最大时,复合扫描方法制备的工件的抗拉强度约为常规扫描方法的 3 倍,后续热处理后工件的最大变形量约为常规方法的 0.14 倍。

所提复合扫描方法解决了烧结初强度与工件精度相互制约的问题,实现了控形控性制造。

参 考 文 献

[1] Franco A, Lanzetta M, Romoli L. Experimental analysis of selective laser sintering of polyamide powders: an energy perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(16/17): 1722-1730.

[2] Gu D D, Shen Y F, Wu P, *et al.* Processing conditions of Cu-based metal powder in selective laser sintering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1561-1566.

顾冬冬, 沈以赴, 吴鹏, 等. 铜基金属粉末选区激光烧结的工艺研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1561-1566.

[3] Wang X, Cui R, Yang H. Theoretical and experimental studies on three-dimensional temperature field of selective laser sintering of engineering plastics powder [J]. *Chinese Journal of*

Lasers, 2011, 38(1): 0103005.

王翔, 崔瑞, 杨浩. 工程塑料粉末激光烧结三维温度场的理论和实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103005.

[4] Bo F X, He B, Zong X M. Selective laser sintering process of coated sands[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091405.

薄夫祥, 何冰, 蹤雪梅. 覆膜砂选择性激光烧结工艺[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091405.

[5] Bassoli E, Gatto A, Iuliano L, *et al.* 3D printing technique applied to rapid casting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, 13(3): 148-155.

[6] Fan L P, Li B H, Wang B B, *et al.* Preparation and properties of novel yttria coating for titanium alloy investment casting [J]. *Foundry*, 2016, 65(12): 1189-1191, 1197.

范李鹏, 李宝辉, 王宝兵, 等. 钛合金熔模铸造用新型氧化钇涂层的制备及其性能研究[J]. *铸造*, 2016, 65(12): 1189-1191, 1197.

[7] Wang W L, Conley J G, Stoll H W. Rapid tooling for sand casting using laminated object manufacturing process[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1999, 5(3): 134-141.

[8] Li J. Support optimization and post-curing research of the samples produced by selective laser sintering with pearl coated sand [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 8-12.

李杰. 选择性激光烧结宝珠覆膜砂的支撑优化和后处理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 8-12.

[9] Raghunath N, Pandey P M. Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(6): 985-995.

[10] Wu C B, Liu C M, Shi Y S, *et al.* Investigation on

- warp and curl in selective laser sintering polymeric materials [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2002, 30(8): 107-109.
- 吴传保, 刘承美, 史玉升, 等. 高分子材料选区激光烧结翘曲的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(8): 107-109.
- [11] Dotchev K D, Dimov S S, Pham D T, *et al.* Accuracy issues in rapid manufacturing CastForm™ patterns [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(1): 53-67.
- [12] Wang C J, Li X S, Huang S H. The precision analysis of SLS prototypes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(6): 77-79.
- 王从军, 李湘生, 黄树槐. SLS 成型件的精度分析 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(6): 77-79.
- [13] Fan C H, Dong L H, Huang K X. Analysis of densification rate of Fe-C mixture powder forming with laser sintering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(1): 137-141.
- 范春华, 董丽华, 黄开旭. Fe-C 混合粉末激光烧结成形致密度分析 [J]. 中国激光, 2008, 35(1): 137-141.
- [14] Yan C Z. Preparation of polymer and its composite powders sand their selective laser sintering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 60-61.
- 闫春泽. 聚合物及其复合粉末的制备与选择性激光烧结成形研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 60-61.
- [15] Yan C Z, Shi Y S, Yang J S, *et al.* Secondary sintering of selective laser sintering polymeric materials [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(5): 86-89.
- 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料 SLS 中次级烧结实验 [J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(5): 86-89.
- [16] Wu H H, Li T F, Yan J N, *et al.* Effect of secondary sintering on the dimensional accuracy of graphite parts by selective laser sintering [J]. Carbon Techniques, 2017, 36(2): 39-43.
- 吴海华, 李腾飞, 鄢俊能, 等. 次级烧结对选择性激光烧结石墨成型件的尺寸精度影响 [J]. 炭素技术, 2017, 36(2): 39-43.
- [17] Fan Z T, Huang N Y. Mechanism of coated sand mold(core) hardened by selective laser sintering [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(4): 60-62.
- 樊自田, 黄乃瑜. 选择性激光烧结覆膜砂铸型(芯)的固化机理 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(4): 60-62.
- [18] Nie Y, Liu Z L, Su P, *et al.* Applications of the ceramsite-RCS to cylinder blocks casting [J]. Foundry, 2017, 66(4): 414-417.
- 聂越, 刘增林, 苏鹏, 等. 宝珠覆膜砂在缸体铸造中的应用 [J]. 铸造, 2017, 66(4): 414-417.
- [19] Zhang X, Bai P K, Li Y X. Optimization research on influence factors of PF/pearl sand laser sintering [J]. Foundry Technology, 2016, 37(2): 282-284.
- 张昕, 白培康, 李玉新. 覆膜宝珠砂激光烧结工艺影响因素的优化研究 [J]. 铸造技术, 2016, 37(2): 282-284.
- [20] Li J, Shen Q W, Yu L H, *et al.* Strengthening characteristics of pearl coated sand produced by selective laser sintering [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(11): 21-23.
- 李杰, 沈其文, 余立华, 等. 选择性激光烧结宝珠覆膜砂的固化特性研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(11): 21-23.
- [21] Yang T, Yao S, Zeng F. Profile invalidation approaching rapid prototyping [J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(2): 146-155.
- [22] Yao S, Zeng F, Ye C K, *et al.* Modeling & application of laser energy distribution in the coated-sand SLS process [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S2): 92-95.
- 姚山, 曾锋, 叶昌科, 等. 覆膜砂 SLS 过程激光能量分布模型的建立及应用 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(S2): 92-95.
- [23] Wu H H, Yan J N, Li T F, *et al.* Experimental study on molding precision for graphite/phenolic resin mixed powders processed by selective laser sintering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081405.
- 吴海华, 鄢俊能, 李腾飞, 等. 石墨/酚醛树脂混合粉末选择性激光烧结成型精度实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081405.
- [24] Shi Y S, Zhong Q, Chen X B, *et al.* Research and implement of a new kind of scanning mode for selective laser sintering [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 35-39.
- 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 选择性激光烧结新型扫描方式的研究及实现 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 35-39.