

结构对 SLS 砂型次级烧结区的影响及其控制工艺研究

惠 旭^{1, 2}, 李广宇^{1, 2}, 刘文文¹, 付宏源¹, 姚 山^{1, 2}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学宁波研究院, 浙江宁波 315016)

摘要: 设计了一种包含多种常见结构的精度测试件, 用于探究结构对SLS打印的砂型成形精度的影响。通过打印和尺寸测量发现, 纵向椭圆结构和圆孔的次级烧结相对其他结构更加严重, 且存在方向性差异。采用低密度多道次的扫描方法, 相较于常规扫描方法, 在 $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 的总能量密度下可以将国标鼓形件的精度等级从无评级提高至5级, 筋板的尺寸偏差降低到 0.072 mm , 显著改善了砂型的尺寸精度。

关键词: 激光3D打印; 结构; 成形精度; 铸造砂型; 次级烧结

作者简介:

惠旭(1999-), 男, 硕士生, 主要从事铸造砂型的激光3D打印。E-mail: hui_xu_05@163.com

通讯作者:

李广宇, 男, 副教授, 博士生导师。E-mail: gyli@dlut.edu.cn

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

07-0915-08

基金项目:

国家自然科学基金资助(52205359); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT23RC(3)039)。

收稿日期:

2024-03-25 收到初稿,

2024-04-02 收到修订稿。

增材制造, 作为一种以数字模型为依据逐层累加材料以构建物体的革新性工艺技术, 因其能有效实现复杂结构设计而被广泛应用于航空航天、汽车制造及医疗健康等多个领域, 不仅适用于快速原型制作, 还能够进行非标定制产品的批量生产^[1-4]。其中, 选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术具有设计灵活度高、无需模具以及一体化成形等显著优势, 尤其适合应用于小批量且工期紧迫的铸件制造^[5-6]。

在砂型铸造领域, 准确控制铸件精度至关重要, 而其关键在于铸造砂型的精度, 因为砂型的精确度直接影响到最终铸件的质量^[7-8]。使用SLS技术打印砂型由于无起模斜度、无分型面、尺寸精度高、分块少等优势, 在近净成形方面具有巨大潜力^[9-10]。但是采用SLS技术打印砂型的时候由于热传导会导致非打印区散砂粘连在零件上, 这个被称为次级烧结, 次级烧结问题会极大地影响砂型的精度, 进而制约了该技术的应用与发展^[11-12]。因此, 解决次级烧结难题是当前该研究领域的核心挑战。闫春泽等学者的研究表明, 通过控制预热温度, 增加无机填料等方法可以减少次级烧结的产生^[13-15]。这些研究侧重于打印过程温度场的控制以及打印原料的材料改性, 而砂型结构对次级烧结影响同样较大, 但是目前却鲜有研究。

本文设计并采用SLS技术打印了含有多种结构的模型, 以研究结构对次级烧结效果的影响。在此基础上, 提出了一种低能量密度、多道次的打印方式控制和提升打印精度, 为SLS打印砂型技术的进一步发展提供重要支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验设备和材料

本研究采用自主研发的PIRP-200覆膜粉体SLS打印机打印砂型, 设备原理图如图1所示。PIRP-200打印机的MSFC连续光纤激光器最大输出功率为500 W, 功率连续可调, 振镜最大扫描速度为 $4\ 000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 分层厚度为 $0.15 \sim 0.4 \text{ mm}$, 最大成形尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。

试验材料为覆膜宝珠砂, 其基体材料为球形 Al_2O_3 陶瓷颗粒, 粒径为 $70 \sim 140 \mu\text{m}$ ($109 \sim 212 \mu\text{m}$), 热固性酚醛树脂含量为2%, 固化剂为六亚甲基四胺, 含量为酚醛树脂的10%, 润滑剂为硬脂酸钙。

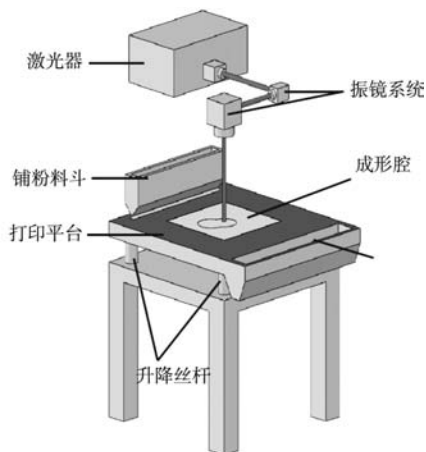


图1 PIRP-200原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PIRP-200

1.2 试验方法

本研究使用PIRP-200型SLS打印机打印砂型的具体步骤如下。

(1) 模型设计。本文旨在探索结构对次级烧结区域的影响，所设计的精度测试件充分结合了典型铸件的结构特性，其详细尺寸见表1，设计图见图2。该模型主要由两个长轴尺寸为70 mm、短轴尺寸为20 mm的方向不同的半椭圆形和两组直径为20 mm的圆孔、圆柱

表1 精度测试件尺寸表

Table 1 Dimensions of precision test specimens

位置	尺寸/mm
精度测试件X方向长度	190
精度测试件Y方向长度	75
精度测试件Z方向长度	40
圆柱直径	20
圆孔直径	20
横向椭圆X方向长度	35
横向椭圆Z方向长度	20
纵向椭圆X方向长度	35
纵向椭圆Y方向长度	20

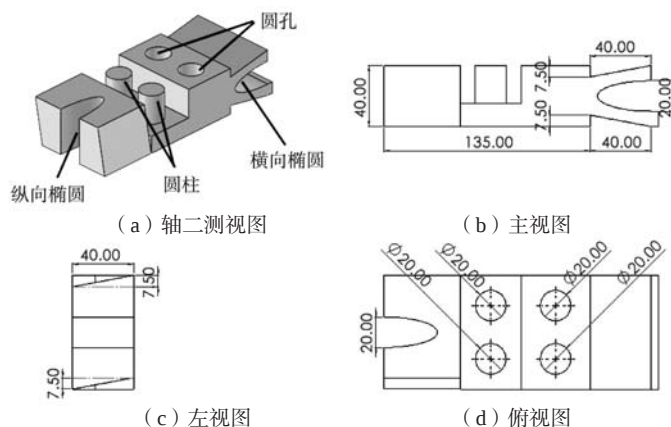


图2 精度测试件轴二测视图和尺寸图

Fig. 2 Accuracy test piece shaft two measurement view and dimension drawing

等四种典型结构组成。在本文中，将精度测试件的长边设定为X轴方向，短边设定为Y轴方向，高度方向设定为Z方向，以便于后续的研究分析。

(2) 数据处理。将设计好的精度测试件模型转化STL格式后导入Magics24.0中，将模型分割为单层厚度0.3 mm的多层截面轮廓，然后在自主开发的PIRP软件中将上一步获得的截面轮廓进行等距填充处理，得到“回”字形激光运动轨迹，生成工艺文件。SLS成形的激光扫描方法主要有单向扫描、环形扫描和光栅式扫描3种，本研究选用环形扫描方法制备样件。

(3) 零件打印。将工艺文件输入至PIRP-200控制系统的计算机中，设定好激光功率、扫描速度等相关参数，在完成全部参数写入后启动连续生产加工流程。具体打印参数如下：单层粉的厚度为0.3 mm，激

光功率为100~500 W，扫描速度为2 000~4 000 mm·s⁻¹，扫描线间距为1 mm。激光能量密度是指单位时间内单位面积上所传递的能量，对于连续激光器来说，其能量密度的公式^[16]：

$$E = P / (v \cdot d) \quad (1)$$

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。由式(1)可以看出，激光能量密度由激光功率，扫描速度，线间距共同影响。根据式(1)可以计算出能量密度范围为0.012 5~0.25 J·mm·s⁻²。本文在该能量密度范围内分别选取0.06 J·mm·s⁻²、0.08 J·mm·s⁻²、0.1 J·mm·s⁻²三个能量密度进行打印。为保证试验的准确性，每组试样打印3个。

1.3 分析测试

为了准确测量打印精度测试件的尺寸，使用Byes3020型影像测量仪进行测定，测量仪精度为0.002 mm，满足国标GB/T 39329—2020要求。具体操作流程如下。

打开Byes3020型影像测量仪与Tenhon影像测量系统，使用调焦螺旋将物镜推至上端；将待测试样放在载物台上，选择最低倍率物镜；旋动调焦螺旋直至获得最清晰的图像；切换高倍率物镜，缓慢旋动调焦螺旋直至获得最清晰的边界轮廓图像，将显示十字线对准轮廓的边缘；将测距器数字清零，旋动载物台的螺杆，直至到达测量所需的位置；再次缓慢旋动调焦螺旋直至获得最清晰的边界轮廓图像，将十字线对准轮廓边缘，此时测距器显示的数字即为所测的尺寸。

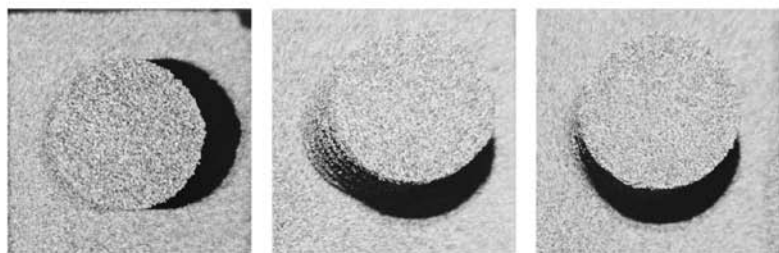
(a) $0.06 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ (b) $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ (c) $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

图3 不同能量密度下的圆柱直径

Fig. 3 Cylinder diameters at different energy densities

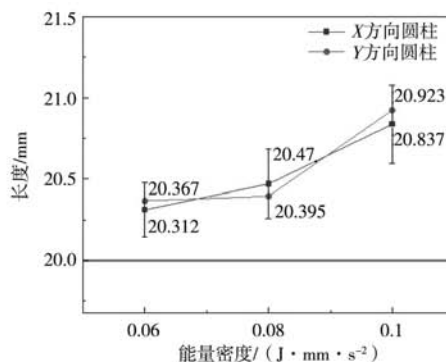
密度下最大尺寸偏差只有4.6%，这表明圆柱形结构表面产生的次级烧结区域较小，该结构对尺寸精度的影响较小。

不同能量密度下打印的圆孔结构的宏观图像与尺

2 结果与讨论

2.1 圆形截面对次级烧结区域的影响

不同能量密度下打印的圆柱结构砂型宏观图像与尺寸如图3所示，可以发现，当激光能量密度为 $0.06 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时，精度测试件圆柱的X方向直径为20.312 mm，Y方向直径为20.367 mm；能量密度为 $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时，圆柱X方向直径为20.470 mm，Y方向直径为20.395 mm；而当激光能量密度增大到 $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时，圆柱X方向直径达到20.837 mm，Y方向直径为20.923 mm。该现象表明：圆柱的尺寸偏差大小随激光能量密度的增大而呈现增大的趋势，能量密度的高低与次级烧结区域的大小成正相关，且三个能量密度下，圆柱结构次级烧结产生的尺寸相对均匀，不存在方向性。整体尺寸偏差值较小，最大能量



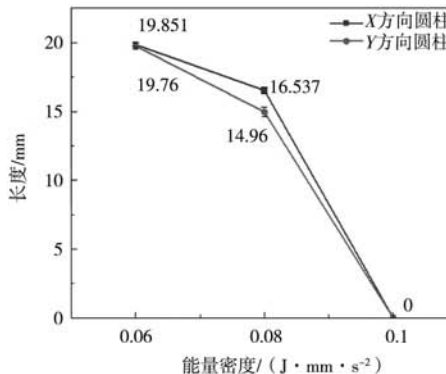
(d) X、Y方向圆柱直径

(a) $0.06 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ (b) $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ (c) $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

图4 不同能量密度下的圆孔直径

Fig. 4 Diameter of the hole at different energy densities

寸如图4所示，可以发现，在不同能量密度下砂型的表观形貌发生明显变化，随着能量密度的增大，次级烧结区域逐渐增大至无法看到圆孔。当激光能量密度为 $0.06 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时，精度测试件圆孔的X方向直径为



(d) X、Y方向圆孔直径

19.851 mm, Y方向直径为19.760 mm; 能量密度为 $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 圆孔X方向直径为16.537 mm, Y方向直径为14.960 mm; 而当激光能量密度增大到 $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 圆孔完全堵塞。该现象表明, 圆孔三个能量密度下X方向和Y方向的尺寸偏差值较大, 圆孔结构上产生的次级烧结存在方向性。砂型整体尺寸偏差值较大, 中等能量密度下尺寸偏差分别达到17.3%与25.2%; 最大能量密度下最大尺寸偏差达到100%, 这表明圆孔结构表面产生的次级烧结区域较大, 该结构对尺寸精度影响大。

由覆膜宝珠砂的DSC曲线可以得知^[17], 覆膜宝珠砂在 90.5°C 左右存在吸热峰, 该峰为热固性酚醛树脂的熔融峰, 树脂在该温度会熔化流动, 并在宝珠砂表面初步形成树脂颈。在激光能量密度较大时, 烧结区域以外的散砂在热传导的作用下也会升温, 散砂内的树脂少量熔融形成相对较小的树脂颈, 使得散砂粘连在工件表面, 形成一定厚度的次级烧结区。

对于选区激光烧结的加工过程而言, 次级烧结的产生原因是由于粉床中激光烧结区域对该区域周围散砂的热影响导致周围散砂中的树脂升温固化。图5是粉床中已烧结区域与其周围散砂之间传热的示意图^[18], 散砂从已经烧结区域获得的热量主要来自于热传导。该过程在一个激光连续加工的时刻, 可以用经典热传导方程来描述^[19]。在直角坐标系 (x, y, z) 中, 经典热传导方程为:

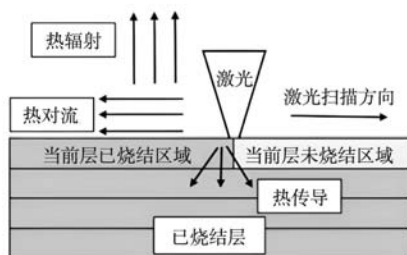
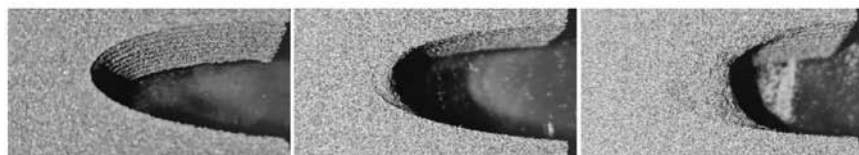


图5 激光烧结粉床传热示意图

Fig. 5 Schematic diagram of heat transfer in laser sintering powder bed



(a) 纵向椭圆

(b) 横向椭圆

(c) 圆孔

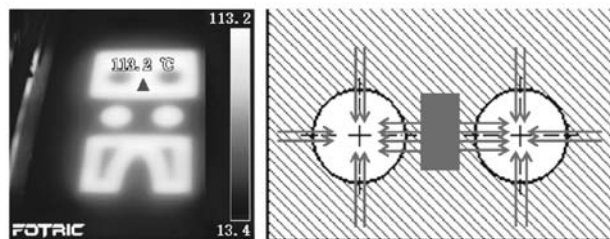
图7 不同能量密度下纵向椭圆结构的次级烧结区域

Fig. 7 Secondary sintering regions of longitudinal elliptical structure at different energy densities

$$k_e \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: K_e 为粉床有效导热系数; c 为粉体比热容; T 为瞬态温度; q 为激光功率密度。由式(2)可知, 输入的激光能量密度越高, 瞬态传热的温度就会越高, 对周围的热影响区域会随之增大。

图6是打印过程中的温度分布图与热量传导示意图, 圆孔结构的温度最高点出现在两圆孔之间的测试件中心, 圆柱的最高温度在自身的中心。出现上述现象是由于靠近工件中心部分的散热条件比远离中心的部分差, 在连续加工过程中积累了更多的热量, 导致靠近中心部位的圆孔部分产生了更大的次级烧结区域, 而圆柱周围的散砂受到的热影响主要来自圆柱本身, 因此尺寸没有方向性。



(a) 热像仪实际图

(b) 圆孔部位热传导示意图

图6 温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution

2.2 椭圆截面的次级烧结区域

不同能量密度下打印的纵向椭圆结构的宏观图像与尺寸如图7所示, 可以看出, 随着能量密度的增加, X方向上的尺寸偏差从1.148 mm增加到12.840 mm, Y方向上的尺寸偏差从0.079 mm增加到0.469 mm。产生次级烧结的区域集中在椭圆顶点位置, 且当能量密度为 $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 纵向椭圆形结构几乎不能保持原来的形状; 但Y方向则保持相对清晰的轮廓, 这表明纵向椭圆形结构X方向相较于Y方向更易产生次级烧结。

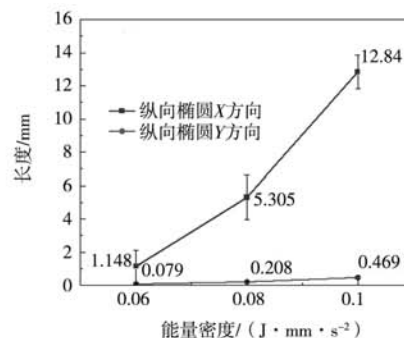
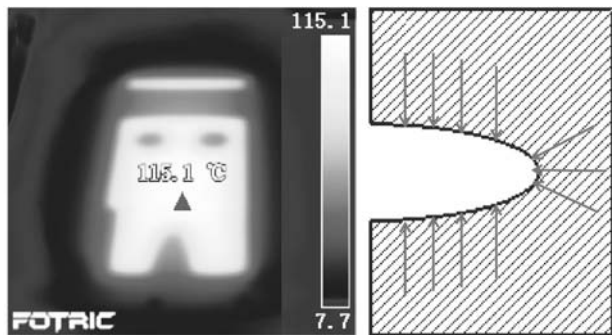


图8是纵向椭圆结构的温度分布图,纵向椭圆结构X方向附近的温度要高于Y方向。这是由于X方向上的曲率小于Y方向,在该处热量累积更加严重。



(a) 热像仪实际图 (b) 热传导示意图

图8 纵向椭圆结构的温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution of a longitudinal elliptical structure



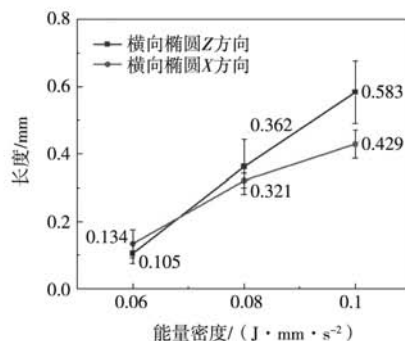
(a) $0.06 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

(b) $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

(c) $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$

图9 不同能量密度下横向椭圆结构的次级烧结区域

Fig. 9 Secondary sintering regions of the transverse elliptical structure at different energy densities



(d) X、Y方向

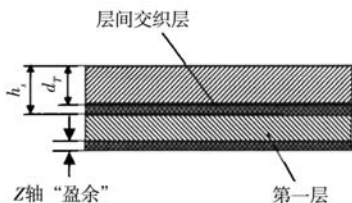


图10 “Z轴盈余”原理图

Fig. 10 Schematic diagram of “Z-axis surplus”

其所需的能量可以固化 h_z 厚度散砂的能量,因此打印初始层会在底部形成一段“Z轴盈余”。而本文中的横向椭圆结构由于其悬空于散砂之上,层与层之间呈阶梯状,因此会在悬空结构顶部产生大块的次级烧结体。

因此,对比横向椭圆和纵向椭圆可以发现,纵向椭圆在X方向上的尺寸偏差显著小于横向椭圆,而纵向椭圆在Y轴方向上尺寸偏差则反而大于横向椭圆的Z轴。

不同能量密度下打印的横向椭圆结构的宏观图像与尺寸如图9所示,可以看出,随着能量密度的增大,椭圆X与Y方向的边缘均能保持相对清晰的轮廓,没有出现类似于纵向椭圆的X方向的严重次级烧结,这说明在该处结构边缘处很少产生次级烧结。但是XZ方向上尺寸仍存在差异,Z方向上尺寸偏差高于X方向,且随着能量密度的增加,X方向的尺寸偏差从0.134 mm增加到0.429 mm,Z方向的尺寸偏差从0.105 mm增加到0.583 mm。这表明在横向椭圆结构中,Z方向相较于X方向更易产生次级烧结。

由图9还可以看出,悬空结构顶部存在大块次级烧结体,这是由于产生了“Z轴盈余”^[13]。如图10是“Z轴盈余”的原理图^[14],由于在SLS技术加工过程中,激光输入的能量不仅需要将当前层厚度为 d_z 的散砂固化为平面层片,还要使得层与层之间粘接成为一体,因此

2.3 低密度多道次扫描控制次级烧结区域

根据上述打印实际结果,并结合激光热影响区域的传热规律,计划使用单次低能量密度多道次扫描的方式控制次级烧结的产生,该方法主要分为数据准备,打印制造两个环节,具体步骤如下:使用计算机切片软件将目标试样件CAD模型分割为单层厚度0.3 mm的多层截面轮廓;在工艺设计软件中将上一步获得的截面轮廓进行2次等距填充处理,得到扫描次数为2的“回”字形激光运动轨迹,生成工艺文件;将上述工艺文件导入打印机控制系统,铺粉过程结束后,使用低能量密度的激光对覆膜宝珠砂扫描两次;重复上述铺粉及扫描过程,直至打印结束。

采用低密度多道次扫描方法对精度测试件进行打印,使用的总能量密度为 $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$,打印道次为2次。如图11是圆孔、纵向椭圆和横向椭圆在不同扫描方法和能量下的次级烧结区域尺寸。可以发现,对于圆孔,X方向次级烧结区域尺寸从3.463 mm减少到

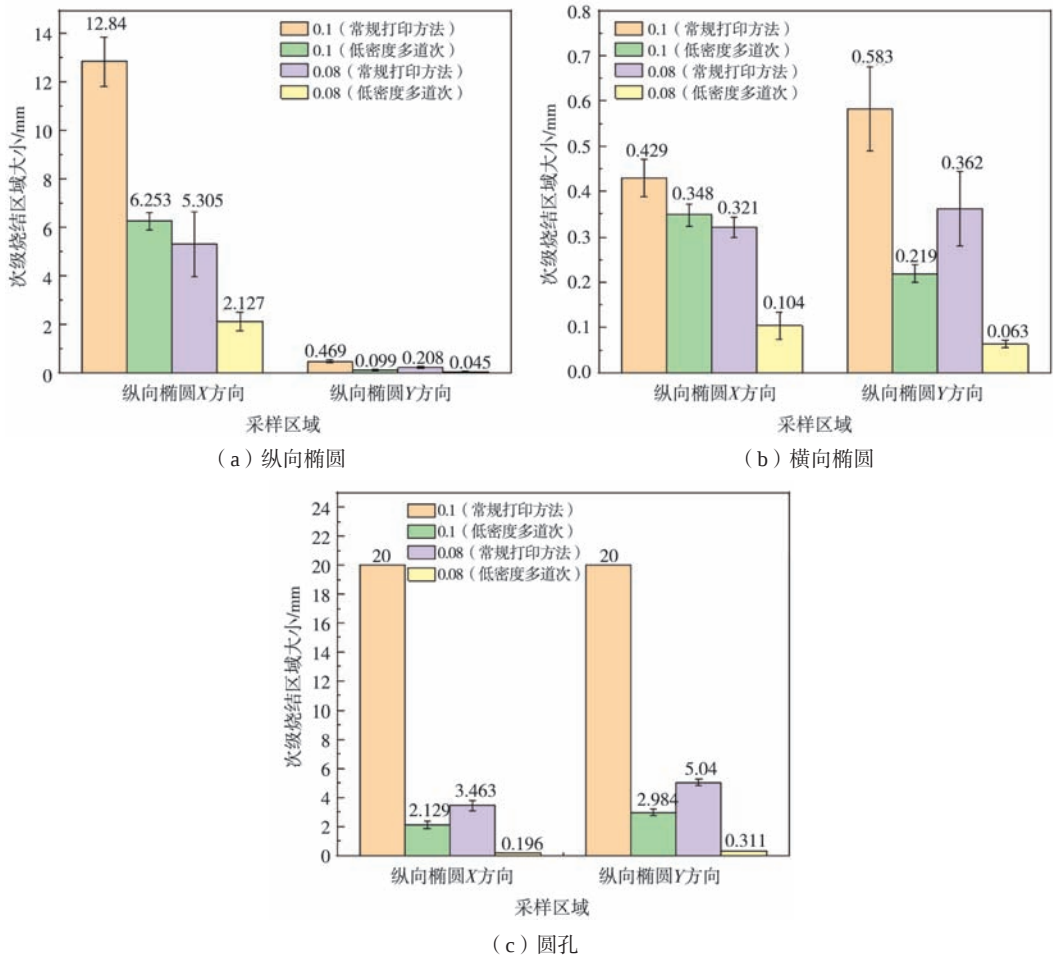


图11 不同结构在不同扫描方法下的次级烧结区域大小

Fig. 11 The size of the secondary sintering area for different structures under different scanning methods

0.196 mm，Y方向次级烧结区域尺寸从5.04 mm减少到0.311 mm。在砂型铸造领域，一般使用铸件公差等级来评价铸件精度，铸件公差是指铸件实际尺寸和设计尺寸之间的差值，这个评价标准也适应于砂型。可以发现，通过低密度多道次扫描方法可以使圆孔的精度从CT12提高至CT5以上，如表2所示。按照相同的精度等级评价方法可以发现，纵向椭圆X方向次级烧结区域从5.305 mm减少到2.217 mm，Y方向则从0.208 mm减小到0.045 mm。横向椭圆X方向次级烧结区域从0.321 mm减少到0.104 mm，Z方向则从0.362 mm减小到0.063 mm。横向椭圆X、Z方向和纵向椭圆Y方向的精度都提高到了CT3，纵向椭圆X方向的精度也从CT13提高到了CT10。这表明，在不同结构下使用低能量密度多道次扫描的方式都能有效减少次级烧结，从而极大地提高精度。

可以发现，不论是圆孔结构、纵向椭圆结构还是横向椭圆结构，通过低能量密度多道次扫描的方式都能有效减少次级烧结。这是由于低密度多道次法的单次能量输出小，边缘得到的热量相较于常规方法更

表2 尺寸偏差与公差等级表			
Table 2 Dimensional deviations and tolerance grades			
打印方法	采样区域	尺寸偏差/mm	精度等级
常规打印方法	圆孔X方向	3.463	CT12
	圆孔Y方向	5.040	CT3
	横向椭圆X方向	0.321	CT5
	横向椭圆Z方向	0.362	CT5
	纵向椭圆X方向	5.305	CT13
	纵向椭圆Y方向	0.208	CT3
低密度多道次法	圆孔X方向	0.196	CT3
	圆孔Y方向	0.311	CT5
	横向椭圆X方向	0.104	CT3
	横向椭圆Z方向	0.063	CT3
	纵向椭圆X方向	2.127	CT10
	纵向椭圆Y方向	0.045	CT3

少，因此对工件外围轮廓周围散砂产生的热影响也随之下降，使散砂通过热传导所获得的热量减少，有效减小了次级烧结区域。

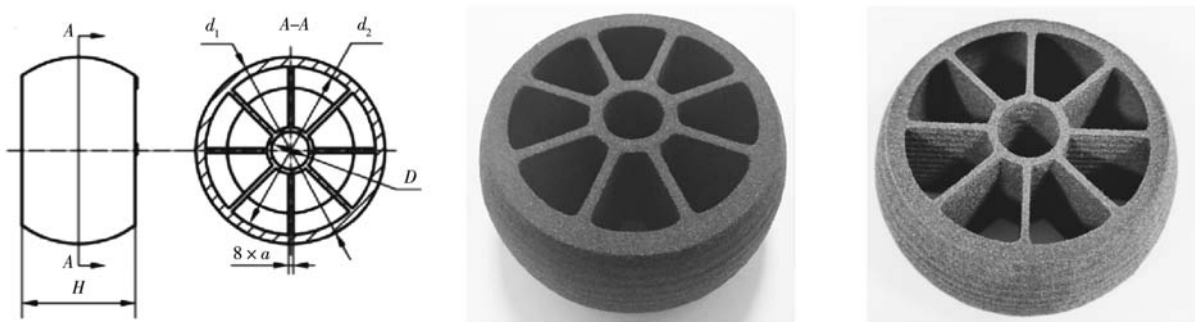
2.4 国标鼓形件的打印

为了验证上述低密度多道次方法的适用性和准确性,参考GB/T 39329—2020标准中鼓形件试样,以覆膜宝珠砂为原料,使用PIRP-200打印机进行打印,鼓形件的具体尺寸如表3所示,鼓形件形状示意图如图12所示。

打印完成后,将测试件取出,待冷却到室温后使用Byes3020影像测量仪进行测量。根据GB/T 39329—2020对数据进行分析计算出其标准误差 SE ,按公式

表3 鼓形测试件尺寸规格
Table 3 Dimensions of drum test pieces

特征	尺寸规格(2:1)/mm
球壳外径 d_1	100
球壳内径 d_2	90
筋厚 a	2.4
孔径 D	20
高度 H	60



(a) 设计图

(b) 常规方法

(c) 低密度多道次法

图12 标准鼓形件

Fig. 12 Standard drum pieces

(3) 计算,确定其精度等级,精度等级评价如表4所示, SE 大于1.400 mm的为无评级。

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (3)$$

式中: SE 为标准误差,单位为mm; x_i 为测试件的实测尺寸,单位为mm; n 为测量尺寸数量; x_0 为鼓形件的设计尺寸,单位为mm。

采用常规扫描方法与低密度多道次扫描方法打印国标鼓形件进行验证试验,输入的总能量密度均为 $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$,低密度多道次法扫描次数为2次。如图12b、c的国标鼓形件实物图所示,可以看出常规扫

描方法打印的鼓形件筋板的厚度比低密度多道次法打印的更大。图13是国标鼓形件各位置的尺寸偏差,可以看出,常规方法打印鼓形件的外形标准误差为1.420 mm,评级大于鼓形件精度等级中的6级,为无评级打印件,而使用低密度多道次法打印后,其外形标准误差为0.476 mm,评级达到5级,精度明显提升,这表明低密度多道次法能有效控制次级烧结区域。

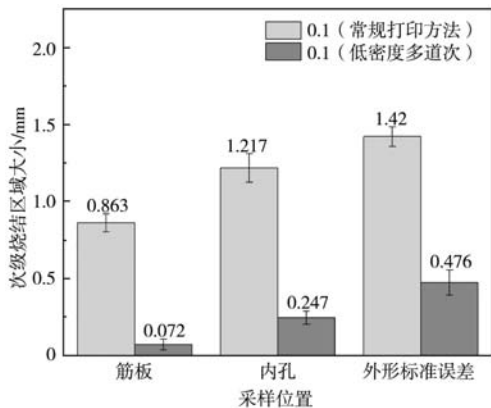


图13 两种打印方法下的鼓形件不同位置的尺寸偏差

Fig. 13 Size deviation of drum parts at different positions under two printing methods

表4 鼓形件精度等级
Table 4 Accuracy level of drum parts

精度等级	标准误差值(2:1)/mm	标准公差等级
1级	≤ 0.015	IT5
2级	≤ 0.035	IT7
3级	≤ 0.087	IT9
4级	≤ 0.220	IT11
5级	≤ 0.540	IT13
6级	≤ 1.400	IT15

3 结论

本文设计了一种用于研究结构因素对SLS打印产生的次级烧结区域影响的精度测试件,通过分析相同尺寸截面不同结构之间的打印精度差异来研究结构对次级烧结产生的影响,并采用低密度多道次的激光扫描方法控制次级烧结,得到结论如下。

(1) 模型结构对SLS打印砂型的次级烧结区域

尺寸有较大影响。纵向椭圆结构和圆孔的次级烧结相对于圆柱结构更加严重,且存在明显的方向性差异。横向椭圆结构虽然在整体轮廓方面没有严重的次级烧结,但是在悬空部分会产生严重的“Z轴盈余”。

(2) 使用低密度多道次方法能有效控制次级烧结区域尺寸,在 $0.08 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 的总能量密度下可以将国标鼓形件的外形精度从无评级提高到5级。

参考文献:

- [1] PARK H J, TUCKER J S, YOON K J, et al. 3D printing modality effect: Distinct printing outcomes dependent on selective laser sintering (SLS) and melt extrusion. [J]. Journal of Biomedical Materials Research. Part A, 2024.
- [2] 刘景博,刘世锋,刘全明,等. 选区激光烧结用粉末材料研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4): 111-116.
- [3] A Y G, M N S, SYLVAIN C, et al. Selective laser sintering (SLS), a new chapter in the production of solid oral forms (SOFs) by 3D printing [J]. Pharmaceutics, 2021, 13(8): 1212-1212.
- [4] 李佳,宋梅利,冯君,等. 面向激光增材制造的仿生薄壁结构抗冲击研究 [J]. 工程设计学报, 2024, 31(1): 67-73.
- [5] 李顶,杨尚鑫,贾润礼,等. 激光烧结用复合蜡粉的筛选及成形工艺研究 [J]. 铸造技术, 2020, 41(2): 157-159.
- [6] 张赛博,赵俊淞,李小海,等. 金属3D打印技术的应用与发展前景 [J]. 装备制造技术, 2022(11): 207-210.
- [7] 杨永泉. 汽车发动机零件的快速铸造工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] 孙丽娟,李亚萍,易俊兰,等. 基于增材制造技术的飞机接头零件喷丸防护装置设计与制造 [J]. 塑料工业, 2021, 49(11): 74-78.
- [9] 曹继伟,王沛,刘志远,等. 基于粉末成形的激光增材制造陶瓷技术研究进展 [J]. 无机材料学报, 2022, 37(3): 241-254.
- [10] 杨佩,康聪,李维. TC4钛合金工艺进展 [J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 45-47.
- [11] 王根. 基于激光近净成形技术的TC4/Inconel 625功能梯度材料的增材制造与力学性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [12] NGOVENI A, POPOOLA A, ARTHUR N, et al. Residual stress modelling and experimental analyses of Ti6Al4V ELI additive manufactured by laser engineered net shaping [J]. Procedia Manufacturing, 2019: 351001-351006.
- [13] 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(自然科学版), 2008(5): 86-89.
- [14] 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.
- [15] 赵保军,施法中,冯涛,等. 选区激光烧结成形中致密度的数值模拟与实验 [J]. 激光技术, 2003(1): 40-43.
- [16] 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(1): 137-141.
- [17] 童强,薛铠华,姚山. 基于次级烧结区域调控的SLS制件控形控性研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 62-69.
- [18] 高程翔. 覆膜粉体高精度激光3D打印技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [19] 沈以赴,顾冬冬,余承业,等. 直接金属粉末激光烧结成形过程温度场模拟 [J]. 中国机械工程, 2005(1): 69-75.

Influence of Structure on the Secondary Sintering Zone of SLS Sand Mold and Its Control Process

HUI Xu¹, LI Guang-yu^{1,2}, LIU Wen-wen¹, FU Hong-yuan¹, YAO Shan^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, Zhejiang, China)

Abstract:

In this paper, a precision test piece containing many common structures is designed to explore the influence of structure on the forming accuracy of sand mold printed by SLS. Through printing and dimensional measurement, it is found that the secondary sintering of longitudinal elliptical structure and circular hole is more serious than that of other structures, and there are directional differences. Compared with the conventional scanning method, the low-density multi-pass scanning method improves the accuracy level of national standard drum parts from more than 6 to 5 at the total energy density of $0.1 \text{ J} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$, and the dimensional deviation of the rib plate is reduced to 0.072 mm.

Key words:

laser 3D printing; structure; forming accuracy; casting sand mold; secondary sintering