

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

吴海华, 鄢俊能, 李腾飞, 肖林楠

三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002

摘要 将选择性激光烧结(SLS)技术应用于石墨/酚醛树脂混合粉末成型,实验研究了石墨原型件尺寸精度的变化规律,并揭示了其内在原因。研究发现,石墨原型件 X、Y 方向的尺寸偏差随着激光能量密度的增大而增大,随着分层厚度的增大而减小,而 Z 方向的尺寸偏差随着激光能量密度和分层厚度的增加呈现出先减小后增大趋势;与 X、Y 方向尺寸相比,Z 方向尺寸受工艺参数的影响更为明显。导致石墨原型件产生较大尺寸偏差的主要原因是 SLS 成型过程中产生了较为明显的次级烧结和 Z 轴盈余。正交实验结果表明,影响 Z 方向尺寸相对误差的因素按影响程度从大到小排序依次为扫描间距、分层厚度、激光功率、扫描速率。使 Z 方向尺寸相对误差最小的最优工艺参数组合为:激光功率 23 W、扫描速率 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描间距 0.18 mm、分层厚度 0.14 mm。

关键词 激光技术; 选择性激光烧结; 石墨原型件; 成型精度; Z 轴盈余; 最优工艺参数组合

中图分类号 TH145.1+3; TF124 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081405

Experimental Study on Molding Precision for Graphite/Phenolic Resin Mixed Powders Processed by Selective Laser Sintering

Wu Haihua, Yan Junneng, Li Tengfei, Xiao Linnan

Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

Abstract The selective laser sintering (SLS) technology is applied to the molding of the graphite/phenolic resin mixed powders, the change rule of the dimensional precision of the graphite prototype is studied experimentally, and its internal cause is revealed. It is found that the dimensional deviations in both the X and Y directions of the graphite prototype increase with the increase of the laser energy density, and decrease with the increase of the layer thickness. The dimensional deviation in the Z direction shows a tendency to decrease first and then increase with the increase of the laser energy density and the layer thickness. Compared with the dimensions in the X and Y directions, the dimension in the Z direction is more obviously affected by the process parameters. The main reasons for the large dimensional deviation of the graphite prototype are the secondary sintering and the Z-axis bonus, which are produced in the SLS process. The orthogonal experimental results show that the factors affecting the relative dimension error in the Z direction are sorted by the order of influence degree from large to small as the scanning interval, the layer thickness, the laser power and the scanning speed. The optimal combination of process parameters which makes the relative error in the Z direction smallest is: laser power of 23 W, scanning speed of $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, scanning interval of 0.18 mm and layer thickness of 0.14 mm.

Key words laser technique; selective laser sintering; graphite prototype; molding precision; Z-axis bonus; optimum combination of process parameters

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2017-03-06; **收到修改稿日期:** 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(51575313)、湖北省自然科学基金(2014CFB678)

作者简介: 吴海华(1970—),男,博士,教授,主要从事石墨增材制造及其工程应用技术方面的研究。

E-mail: 652146213@qq.com

1 引言

天然鳞片石墨具有优良的导热性、导电性、耐腐蚀性等,已被广泛用于航空、航天、核能及工业等领域。但天然鳞片石墨一般为粉末状,存在易碎、自粘接能力弱、成型工艺性不佳等问题,是一种典型的不加工不成型的矿产资源,目前,其主要作为冶金工业高级耐火涂料的原材料,也用于生产形状简单的低附加值器件,如石墨坩埚、石墨器皿、柔性石墨纸等^[1-2]。为了挖掘石墨矿产资源的经济价值,Chen 等^[3]将鳞片石墨粉末与酚醛树脂粉末机械混合在一起,利用选择性激光烧结(SLS)成型技术快速制备了燃料电池用的双极板坯体,Alayavalli 等^[4]也开展了类似的研究工作。SLS 成型技术的出现为制造复杂、功能性好的石墨元器件提供了可能,也为天然鳞片石墨矿产资源的开发及提升其利用价值提供了全新的技术手段。然而,当前关于 SLS 石墨原型件成型机理及精度的研究鲜有报道。

在 SLS 成型精度的研究方面,早期相关的研究工作主要集中在机器误差、软件误差等对其的影响。随着各种三维打印材料不断涌现,SLS 过程中的烧结收缩、翘曲变形、次级烧结和 Z 轴盈余等现象对 SLS 件成型精度的影响引起了学者们的广泛关注。本课题组利用有限元法模拟了酚醛树脂/鳞片石墨的热影响区的变化规律,初步确定了激光功率为 20 W、扫描速率为 $2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描间距为 0.2 mm、分层厚度为 0.1 mm 的工艺参数^[5]。杨雄文等^[6]选用 316L 不锈钢粉末进行了激光选区熔化成型实验,得出激光光斑约束、台阶效应、粉末粘附、激光深穿透等因素是影响零件尺寸精度的主要原因;Dotchev 等^[7]对阶梯状聚苯乙烯(PS)试样的尺寸精度变化规律进行了研究,发现烧结收缩是致使 PS 件产生较大尺寸偏差的主要原因之一,此外,扫描方式也会对 PS 件在 X、Y 方向上的尺寸产生一定的影响;熊旭等^[8]对比研究了不同成型方向对 PS 原型件的尺寸精度的影响,得出了应尽量使 PS 原型件的重要尺寸与成型机的 X 轴或 Y 轴平行的结论;闫春泽等^[9]以尼龙 12 为材料,实验研究了不同的预热温度、铺粉层厚、能量密度等对 SLS 尼龙件成型精度的影响,指出次级烧结、Z 轴盈余等现象的存在是引起 SLS 尼龙原型件产生较大尺寸误差的主要原因,并提出降低预热温度、增加铺粉层厚度、减小能量密度等工艺措施可降低次级烧结与 Z 轴盈余的不利影响,从而提高尼龙原型件的成型精度;柯帆等^[10]对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)材料 SLS 的成型精度进行了研究,得出了类似结论。

与 PS、石蜡、尼龙、ABS 等材料相比,天然鳞片石墨不仅熔点高,而且具有良好的导热性能(其导热系数可达 $151 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),但其易脆,成型工艺性不佳。为了改善天然鳞片石墨粉末的成型工艺性,需要将适量的粘接剂(如酚醛树脂)加入其中与之混合,在激光能量的作用下,酚醛树脂粉末受热固化将鳞片石墨连接在一起。前期实验研究表明,石墨/酚醛树脂混合粉末具有一定的导热性能(导热系数为 $0.789 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),必然会对石墨原型件的成型精度产生影响。为此,本文对石墨/酚醛树脂混合粉末的 SLS 石墨原型件的尺寸精度及变化规律进行了研究,获得了最优工艺参数组合,并制订了合理的工艺策略。

2 实验研究

将含碳量(质量分数)为 99.5% 的 $74 \mu\text{m}$ 鳞片石墨粉末与 $67 \mu\text{m}$ 热固性酚醛树脂粉末按质量比 6:4 分批放入球磨机中,充分搅拌使之混合均匀,然后将其置入武汉华科三维科技有限公司的 HK S500 型 SLS 快速成型机中快速制备试样。该成型机最大激光功率为 55 W,且功率控制连续可调,激光光斑直径为 0.4 mm,最大扫描速率为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,分层厚度范围为 0.08~0.3 mm。

在预热温度($25 \text{ }^\circ\text{C}$)一定的条件下,分别调节激光功率(10~30 W)、扫描速率($1000\sim 3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)、扫描间距(0.10~0.30 mm)、分层厚度(0.08~0.25 mm),利用 HK S500 型 SLS 快速成型机制备多个试样,试样直径为 50 mm,厚度为 2 mm。利用数显游标卡尺(精度为 0.01 mm)测量石墨原型件 X、Y、Z 方向的实际尺寸,约定 X、Y、Z 方向分别为与铺粉辊运动方向平行、垂直的方向以及混合粉末累加成型的方向,并计算其尺寸偏差(实测尺寸与基本尺寸之差)与尺寸相对误差(尺寸偏差与基本尺寸的比值),研究不同烧结成型工艺参数对 X、Y、Z 方向尺寸精度的影响;选取激光功率(18, 23, 28 W)、扫描速率($1000, 1500, 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)、扫描间距(0.12, 0.18, 0.24 mm)、分层厚度(0.10, 0.14, 0.18 mm)设计正交实验方案,快速制备试样,以 Z 方向尺寸的相对误差为精度评价指标,以获得最佳成型工艺参数组合。

3 结果与讨论

3.1 激光能量密度对石墨原型件尺寸精度的影响

图1~3所示分别为激光功率、扫描速率与扫描间距对试样X、Y、Z方向的尺寸精度的影响。由图1可知,与基本尺寸相比,试样X、Y方向的实测尺寸均偏大,并且随着激光功率的增加而线性增加。当激光功率在10~30 W范围内变化时,试样Z方向上的尺寸偏差呈现先减小后增大的趋势。当激光功率为15 W时,Z方向的尺寸偏差最小,为 (0.65 ± 0.04) mm,即其实际尺寸为 (2.65 ± 0.04) mm,而后随着激光功率的增大而增大。由图2、3可知,试样X、Y方向的实测尺寸均大于基本尺寸,且随着扫描速率、扫描间距的增加而减小;而试样Z方向上的尺寸偏差均呈现先减小后增大的变化规律。

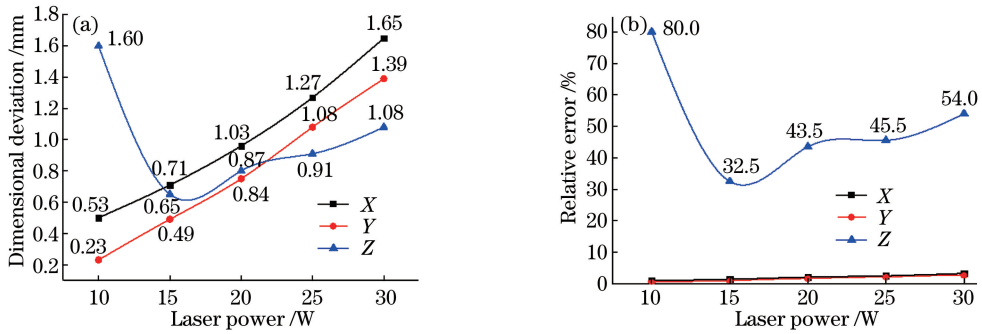


图1 激光功率对试样的尺寸精度影响。(a)尺寸偏差;(b)相对误差

Fig. 1 Influence of laser power on dimensional precision of specimen. (a) Dimensional deviation; (b) relative error

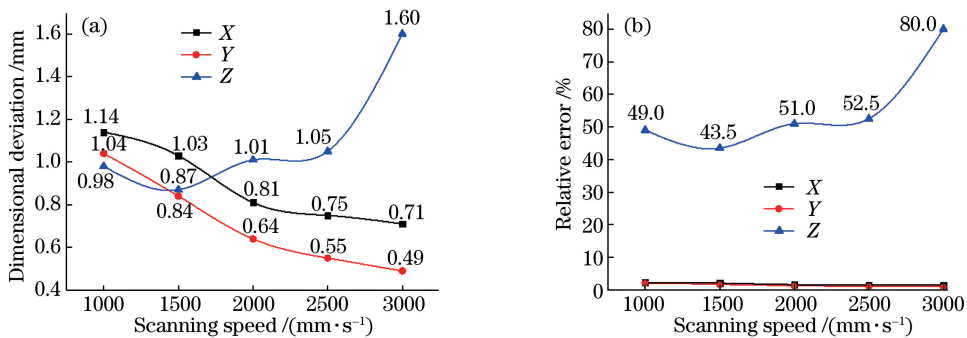


图2 扫描速率对试样尺寸精度的影响。(a)尺寸偏差;(b)相对误差

Fig. 2 Influence of scanning speed on dimensional precision of specimen. (a) Dimensional deviation; (b) relative error

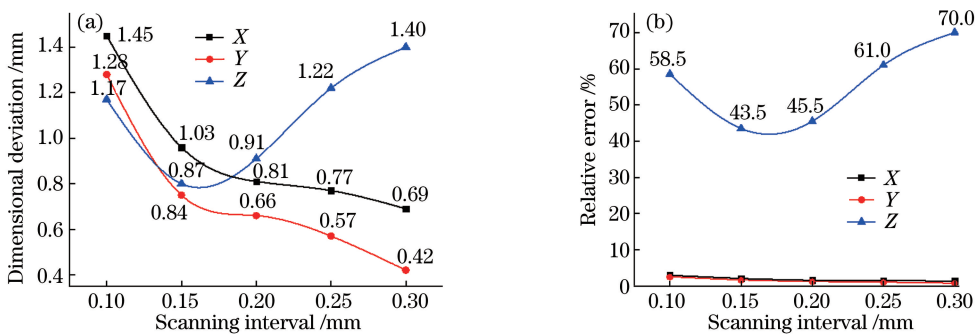


图3 扫描间距对试样尺寸精度的影响。(a)尺寸偏差;(b)相对误差

Fig. 3 Influence of scanning interval on dimensional precision of specimen. (a) Dimensional deviation; (b) relative error

在SLS成型过程中,粉末所吸收的能量大小可用激光能量密度来描述,研究表明,激光能量密度与激光功率 P 成正比,而与扫描间距 L 、扫描速率 V 成反比^[11]。图4所示为次级烧结示意图,由于石墨/酚醛树脂混合粉末的导热性好,该混合粉末所吸收的能量除一部分散失到上方空气中(如图4中 Q_{sg} 所示)外,大部分激光能量以热量形式通过传导方式传向周围的松散粉末(如图4中 Q_{ss} 所示),使其温度升高。当其温度达

到粉末结块温度时,会在烧结件表面粘接一层非理想烧结层,从而形成次级烧结区,致使 X、Y 方向的尺寸偏大;激光功率越大,能量密度越大,形成的次级烧结区越大,尺寸偏差也越大。当激光功率为 30 W 时,X、Y 方向尺寸偏差分别为 (1.65 ± 0.04) mm 和 (1.39 ± 0.04) mm,且试样的 X 方向的尺寸偏差略大于 Y 方向的,这是因为在铺粉辊往复移动下,部分石墨/酚醛树脂混合粉末沿着 X 轴方向产生了位置“漂移”,如图 5 所示。

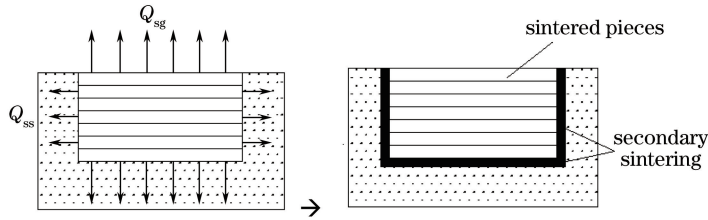


图 4 次级烧结示意图

Fig. 4 Diagram of secondary sintering

试样 Z 方向实测尺寸的大小不仅与石墨/酚醛树脂混合粉末的层间连接致密度相关,还会受到次级烧结和 Z 轴盈余等现象的影响。当激光功率、能量密度较小时,石墨/酚醛树脂混合粉末的烧结固化程度相对较低,层间连接相对较为疏松,试样致密度、导热系数偏低,热量不易沿着 Z 轴向下传递,此时试样 Z 轴方向的实测尺寸主要取决于混合粉末的层间堆积状况,因而 Z 方向的尺寸偏差较大。随着激光功率、能量密度不断增大,石墨/酚醛树脂混合粉末层间的连接致密度逐渐增加,试样 Z 轴方向的实际尺寸偏差逐渐减小。当激光功率超过 17 W 左右时,层间的连接状况进一步改善,导热性能变好,这为热量沿着 Z 轴负方向的传递提供了条件,此时试样 Z 轴方向的尺寸精度主要取决于次级烧结和 Z 轴盈余。激光功率越大,激光能量密度越大,更多的热量沿着 Z 轴负方向传递,导致次级烧结区变大。此外,激光穿透深度随着激光功率的增加而增大,在分层厚度一定的情况下,激光功率越大,Z 轴盈余现象越明显,在上述两种现象的综合作用下,Z 轴方向的尺寸偏差不断增大。

在激光功率给定的前提下,扫描速率和扫描间距对石墨原型件成型精度的影响也是通过改变激光能量密度大小来实现。激光能量密度随着扫描速率或扫描间距的增大而减小,而激光能量密度越小,形成的次级烧结区也越小,因此 X、Y 方向的尺寸偏差也减小。如前所述,试样 X 方向的尺寸偏差略大于 Y 方向的尺寸偏差,这是由铺粉过程中的扰动所致,而试样 Z 方向实测尺寸的变化曲线也可用次级烧结、Z 轴盈余以及层间连接状况来解释。

进一步比较 X、Y、Z 方向的尺寸相对误差大小,发现当激光功率为 30 W 时,X、Y 方向的尺寸最大相对误差分别为 3.3% 和 2.78%,而 Z 方向的尺寸相对误差达到 54%;当激光功率为 10 W 时,Z 方向的尺寸相对误差值最大,达到 80%。可以从两个方面解释,首先,由于 Z 轴盈余现象,Z 方向产生了误差积累;其次,与周边松散的混合粉末相比,烧结固化成型后的混合粉末堆积更加致密,其导热性能更好,因此较多的热量更易沿着 Z 轴负方向向下传递,致使次级烧结区、Z 轴方向的尺寸偏差更大。可见,与 X、Y 方向相比,Z 方向的尺寸相对误差很大,应予以重点关注。

总之,当激光功率选取较小值时,有利于保证石墨原型件 X、Y 方向的尺寸精度,但当激光功率过小时,混合粉末之间的连接过于疏松,Z 方向的尺寸精度不佳;而当激光功率取较大值时,有更多热量沿着 Z 轴负方向向四周传递,从而产生了较为严重的次级烧结和 Z 轴盈余现象,导致试样 X、Y、Z 方向的尺寸偏差均较大。此外,在大功率激光照射下,酚醛树脂会被烧蚀,这会影响到石墨/酚醛树脂混合粉末的成型工艺性。图 6 所示为试样 Z 轴盈余图片。因此,激光功率取值应在一个相对合理的范围内,建议激光功率在 18~30 W 范围内选取。增加扫描速率或增大扫描间距有助于提高石墨原型件 X、Y 方向的尺寸精度,却使 Z 方向的尺寸偏差显著增加。考虑到石墨原型件 Z 轴方向的尺寸相对误差远大于 X、Y 方向的,建议扫描速率和扫描



图 5 试样扰动图

Fig. 5 Diagram of sample perturbation



图 6 试样 Z 轴盈余图片

Fig. 6 Photo of Z-axis bonus in sample

间距尽可能选取相对较小值。对于扫描间距,考虑到激光光斑直径为 0.4 mm,扫描间距应在 0.10~0.25 mm 范围内选取;而由于过高的扫描速率会影响激光振镜的寿命,扫描速率建议不要超过 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.2 分层厚度对石墨原型件尺寸精度的影响

图 7 所示为分层厚度对试样尺寸精度的影响曲线,在激光能量密度一定的前提下 ($0.089 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$),试样在 X、Y 方向的尺寸误差较小,而在 Z 方向上的尺寸误差相对较大,且均为正值,它们均随着分层厚度的增加而减小。这是因为当分层厚度较小时,对于同一石墨原型件,激光烧结次数更多,造成了更多的热量堆积,使次级烧结与 Z 轴盈余现象更加明显;反之,随着分层厚度的不断增大,制备相同原型件所需的烧结次数减少,传入石墨/酚醛树脂混合粉末中的激光能量也减小,因此次级烧结区会减小,Z 轴盈余现象不明显,石墨原型件的尺寸偏差也会减小。研究表明,当分层厚度大于 0.25 mm 时,层与层之间的粘结极为松散,难以获得形状完整的石墨原型件。

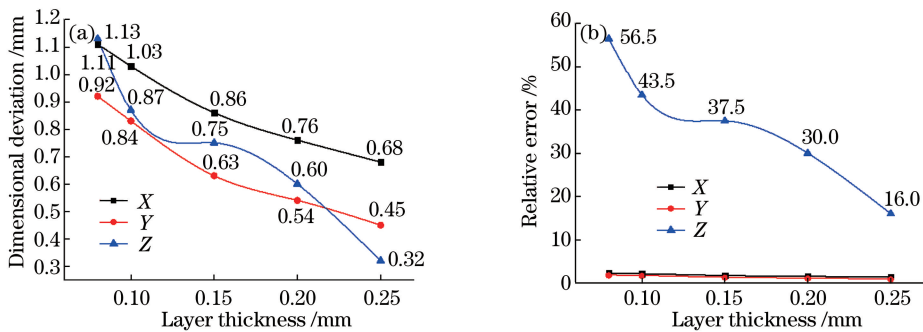


图 7 分层厚度对试样的尺寸精度影响。(a)尺寸偏差;(b)相对误差

Fig. 7 Influence of layer thickness on dimensional precision of specimen. (a) Dimensional deviation; (b) relative error

Z 轴盈余的示意图如图 8 所示,当激光固化深度 d 小于分层厚度 D 时,层与层之间无粘连,烧结后在 Z 方向会得到离散的烧结层片;当 d 等于 D 时,层与层之间虽有粘连,但粘接强度不够,容易出现片层剥离;只有当 d 大于 D 时,激光会使前一已烧结层上表面的材料重新熔融、软化,与随后的扫描层粉末粘结成整体,使层与层之间能很好地粘结在一起。正因如此,烧结件在 Z 轴方向的尺寸增大,大小为 d 与 D 之差,这个在 Z 轴方向上增加的尺寸称为 Z 轴盈余。综上所述,考虑到石墨/酚醛树脂混合粉末的粒径大小以及所选用 SLS 成型系统的 Z 轴运动精度,为了保证铺粉均匀,建议分层厚度在 0.08~0.25 mm 范围内选取。

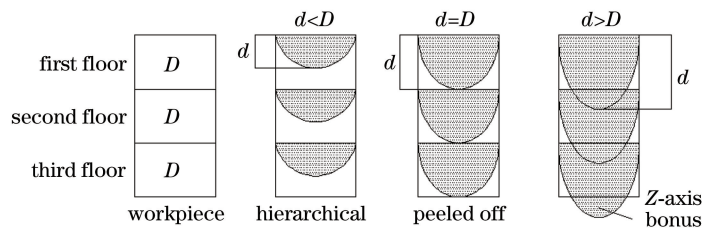


图 8 Z 轴盈余形成示意图

Fig. 8 Diagram of Z-axis bonus formation

3.3 最优工艺参数组合的确定

正交实验的实测数据及采取极差分析法计算的结果见表 1,其中 K 值为同一因素、不同水平的实测值的加权平均值;1、2、3 表示三种实例;表中括号内数据为实际数据;A1、A2、A3 分别代表激光功率取 1、2、3 实例中的情况;B1、B2、B3 分别代表扫描速率取 1、2、3 实例中的情况;C1、C2、C3 分别代表扫描间距取 1、2、3 实例中的情况;D1、D2、D3 分别代表分层厚度取 1、2、3 实例中的情况;极差 R 为某一因素的最大 K 值减去最小 K 值之差, R 越大,说明该因素对 Z 方向尺寸的影响越大。由表 1 可知,在 9 组正交实验中,X、Y 方向的尺寸相对误差较小,X 方向的最大尺寸相对误差为 4.44%,最小为 0.86%;而 Y 方向的最大尺寸相对误差为 3.82%,最小为 0.44%,它们均远小于 Z 方向的尺寸相对误差(最小为 35.5%)。因此,利用 SLS 成型

技术快速制备石墨原型件时,为了保证尺寸精度,应重点控制 Z 方向的尺寸偏差。

极差分析结果如图 9 所示。由图可知,影响 Z 方向尺寸相对误差的因素按影响程度从大到小排序依次为扫描间距、分层厚度、激光功率、扫描速率。由图 9 可知,各工艺参数均会对 Z 轴方向的尺寸精度产生一定的影响,当选取激光功率为 23 W(A2)、扫描速率为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (B1)、扫描间距为 0.18 mm(C2)、分层厚度为 0.14 mm(D2)时,Z 轴方向的尺寸相对误差最小。此时,X、Y、Z 方向的尺寸相对误差分别为 2.4%、2.1%、33.5%。

表 1 正交实验实测数据及计算结果

Table 1 Measured data in orthogonal experiment and calculated results

Experiment number	Laser power /W	Scanning speed/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Scanning interval / mm	Layer thickness / mm	Relative error in X direction /%	Relative error in Y direction /%	Relative error in Z direction /%
1	18 (A1)	1000 (B1)	0.12 (C1)	0.10 (D1)	3.16	2.42	51.5
2	18 (A1)	1500 (B2)	0.18 (C2)	0.14 (D2)	1.62	0.90	36.5
3	18 (A1)	2000 (B3)	0.24 (C3)	0.18 (D3)	0.86	0.44	42.0
4	23 (A2)	1000 (B1)	0.18 (C2)	0.18 (D3)	2.66	2.02	36.0
5	23 (A2)	1500 (B2)	0.24 (C3)	0.10 (D1)	1.58	1.10	45.0
6	23 (A2)	2000 (B3)	0.12 (C1)	0.14 (D2)	2.14	1.64	40.0
7	28 (A3)	1000 (B1)	0.24 (C3)	0.14 (D2)	2.64	1.96	35.5
8	28 (A3)	1500 (B2)	0.12 (C1)	0.18 (D3)	4.44	3.82	91.5
9	28 (A3)	2000 (B3)	0.18 (C2)	0.10 (D1)	2.24	1.70	46.5
K1	43.33	41.00	61.00	47.67			
K2	40.33	57.67	39.67	37.33			
K3	57.83	42.80	40.83	56.50			
R	17.50	16.67	21.33	19.17			

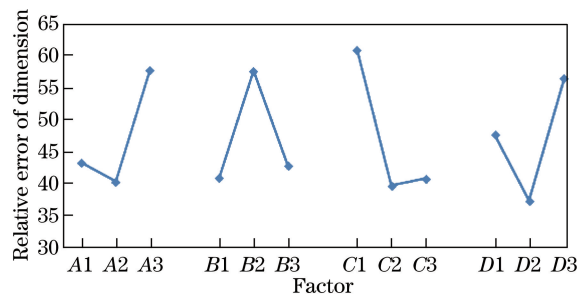


图 9 Z 轴方向的尺寸相对误差与四因素关系

Fig. 9 Relationship between relative error of dimension and four factors in Z-axis direction

文献[12]表明,利用 SLS 成型技术制备 PS 原型件时,其 X、Y 方向的尺寸相对误差也明显小于 Z 方向的,这与本文的研究结论一致。但 PS 原型件 Z 方向的尺寸最大相对误差仅为 3.96%,而石墨原型件在 Z 方向尺寸相对误差的最小值为 33.5%,后者数值明显偏大,对比两者在 X、Y 方向的尺寸偏差,石墨件的也略为偏大。这是因为与 PS 粉末相比,石墨/酚醛树脂混合粉末的导热系数更高,在 SLS 成型过程中产生了更为明显的次级烧结和 Z 轴盈余现象,导致石墨件的成型精度不佳,Z 轴方向因同时受到次级烧结和 Z 轴盈余的影响,其尺寸偏差更大。因此,在快速制备石墨原型件时,重要尺寸应尽可能放置在 X、Y 平面内。

4 结 论

利用 SLS 成型石墨原型件,发现其 X、Y 方向的尺寸偏差随着激光能量密度的增加而增大、随着分层厚度的增加而减小,而 Z 方向的尺寸偏差随着激光能量密度、分层厚度的增加先减小后增大。与 X、Y 方向的尺寸相对误差相比,Z 方向的尺寸相对误差受工艺参数的影响较大。在 SLS 成型过程中,次级烧结、Z 轴盈

余现象的共同作用,导致石墨原型件在 Z 轴方向产生了较大尺寸误差。

研究表明,影响石墨原型件 Z 方向尺寸相对误差的因素按影响程度从大到小排序依次为扫描间距、分层厚度、激光功率、扫描速率;在预热温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,当激光功率为 23 W 、扫描速率为 $1000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描间距为 0.18 mm 、分层厚度为 0.14 mm 时, Z 方向的尺寸相对误差最小,其值为 33.5% 。该研究为后期制造复杂的器件提供了参考,但还有许多不足之处,如未涉及基本尺寸与成型角度变化对石墨成型件精度的影响,这些还有待后期进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Li Hongxia, Yang Bin. Overview of China's graphite resources and industry[C]. Symposium on Refractory Materials, 2011, 4.
李红霞, 杨彬. 中国石墨资源和产业状况概述[C]. 耐火原料学术交流会, 2011, 4.
- [2] Wei Tong, Fan Zhuangjun, Liu Lang. Preparation and high temperature oxidation of ceramic/graphite composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(s1): 823-825.
魏彤, 范壮军, 刘朗. 陶瓷/石墨复合材料的制备及高温氧化性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(s1): 823-825.
- [3] Chen S. Fabrication of PEM fuel cell bipolar plate by indirect selective laser sintering[J]. Strength of Materials, 2006, 20(10): 1356-1362.
- [4] Alayavalli K, Bourell D L. Fabrication of modified graphite bipolar plates by indirect selective laser sintering (SLS) for direct methanol fuel cells[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 48(4): 175501-175516.
- [5] Wu Haihua, Li Tengfei, Xiao Linnan, *et al.* Research on forming process of flake graphite powder by selective laser sintering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101409.
吴海华, 李腾飞, 肖林楠, 等. 鳞片石墨粉末选择性激光烧结成型工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101409.
- [6] Yang Xiongwen, Yang Yongqiang, Liu Yang, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- [7] 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.
- [8] Xiong Xu. Study on dimensional accuracy and transmission law of SLS rapid investment casting[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2012.
熊旭. 基于SLS快速熔模精铸的尺寸精度及传递规律研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [9] Yan Chunze. Preparation of polymer and its composite powders and their selective laser sintering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
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.
- [10] Ke Fan. Study on the precision of selective laser sintering prototype[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
柯帆. 选择性激光烧结原型精度的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [11] Nelson J C. Selective laser sintering: A definition of the process and an empirical sintering model[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 1993.
- [12] Yang Laixia, Liu Xu. Experimental study on selective laser sintering process of PS powder[J]. Plastic, 2016, 45(1): 100-103.
杨来侠, 刘旭. PS粉的选择性激光烧结成型工艺实验[J]. 塑料, 2016, 45(1): 100-103.