

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.014

# 工艺参数对选择性激光烧结 PS/SBS/纳米 $\text{CaCO}_3$ 制件弯曲强度影响

宋娟<sup>1</sup>, 杨来侠<sup>2</sup>, 高波<sup>1</sup>

(1. 榆林职业技术学院, 陕西榆林 719000; 2. 西安科技大学机械工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 针对聚苯乙烯 (PS) 粉末选择性激光烧结 (SLS) 成型件强度较低的问题, 采用机械混合法制备了 PS/苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SBS)/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末, 通过单因素实验分析了 SLS 工艺参数对成型件弯曲强度的影响, 并通过正交试验和极差分析获得了最优工艺参数组合。实验结果表明, 烧结件的弯曲强度随着激光功率的增大而升高, 随着扫描速度、扫描间距和分层厚度的增大而降低; 激光功率对 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响最大, 分层厚度对弯曲强度的影响最小, 扫描速度和扫描间距的影响介于两者之间; 最佳工艺参数组合为: 激光功率 27 W, 扫描速度 1300 mm/s, 扫描间距 0.24 mm, 单层厚度 0.22 mm。在此工艺参数组合下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度为 13.38 MPa; 改性纳米  $\text{CaCO}_3$  与 PS 和 SBS 的相容性较好, 能有效起到增强的作用。

**关键词:** 聚苯乙烯; 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物; 纳米  $\text{CaCO}_3$ ; 复合粉末; 选择性激光烧结; 工艺参数; 弯曲强度

中图分类号: TQ322.2, TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2021)02-0080-06

## Effects of Process Parameters on Bending Strength of PS/SBS/Nano $\text{CaCO}_3$ Parts Made by Selective Laser Sintering

Song Juan<sup>1</sup>, Yang Laixia<sup>2</sup>, Gao Bo<sup>1</sup>

(1. Yulin Vocational and Technical College, Yulin 719000, China;

2. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low strength of polystyrene (PS) powders forming parts based on selective laser sintering (SLS), PS/styrene butadiene styrene block copolymer (SBS)/nano  $\text{CaCO}_3$  composite powders were prepared by mechanical mixing method. The influences of SLS process parameters on the bending strength of the parts were analysed by single factor experiment. The optimal combination of process parameters was obtained by orthogonal test and range analysis. The experimental results show that the bending strength of sintered parts increases with the increase of laser power, and decreases with the increase of scanning speed, scanning distance and delamination thickness. The influence of laser power on the bending strength of PS/SBS/nano  $\text{CaCO}_3$  composite powder formed parts is the largest, the influence of delamination thickness on the bending strength is the smallest, and the influences of scanning speed and scanning distance are between the two. The optimal process parameters are: laser power 27 W, scanning speed 1300 mm/s, scanning spacing 0.24 mm, single layer thickness 0.22 mm. The results show that the bending strength of the sintered parts is 13.38 MPa under the combination of the optimal process parameters. The modified nano  $\text{CaCO}_3$  have good compatibility with PS and SBS, which can effectively play a role in strengthening.

**Keywords:** polystyrene; styrene butadiene styrene block copolymer; nano  $\text{CaCO}_3$ ; composite powder; selective laser sintering; process parameter; bending strength

**基金项目:** 榆林职业技术学院 2018 年度院级重点在研科研项目 (K201805)

**通信作者:** 宋娟, 硕士, 讲师, 主要从事机械制造技术和快速成型技术研究 E-mail: 29083485@qq.com

**收稿日期:** 2020-11-12

**引用格式:** 宋娟, 杨来侠, 高波. PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末选择性激光烧结工艺参数对制件弯曲强度影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 80-85, 91.

Song Juan, Yang Laixia, Gao Bo. Effects of process parameters on selective laser sintering of PS/SBS/Nano  $\text{CaCO}_3$  composite powders on bending strength of forming parts[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 80-85, 91.

选择性激光烧结(SLS)技术是一种基于离散堆积原理,利用激光的热作用有选择性地使固体粉末材料层层粘结堆积,最终成型出零件原型或功能零件的快速成型技术<sup>[1]</sup>,具有工艺简单、用材广泛、制造成本低、材料利用率高等特点<sup>[2]</sup>,已成为目前应用最广泛、发展最迅速且已商业化的快速成型制造方法之一<sup>[3]</sup>。高分子基粉末是SLS工艺中应用最早和最广泛的材料,其中聚苯乙烯(PS)流动速率低、黏度大,其成型件呈现低致密性、低强度和多孔隙的特点<sup>[2]</sup>。为了提高PS成型件的力学性能,使其能够满足一般功能件的要求,很多学者在PS基体中加入无机填料、有机弹性体、纳米粒子等进行改性,研究PS二元或三元复合材料的制备及性能,其制件的力学性能都得到一定提高。但是还未见将纳米CaCO<sub>3</sub>和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)协同改性PS后,再研究其SLS成型件力学性能的报道。

SBS是一种具有橡胶和热塑性塑料特性的高分子材料<sup>[4]</sup>,已大量应用于塑料改性。SBS和PS在界面处能互相扩散,相容性较好,可选用不充油、线型、苯乙烯和丁二烯的质量比为40:60的YH-792型SBS<sup>[5]</sup>。纳米CaCO<sub>3</sub>的粒径小,比表面积大,表面原子处于高度活化状态,经表面处理后可对聚合物同时进行增韧增强,与聚合物有很强的界面相互作用<sup>[6]</sup>。同时由于其表面能较高,极易出现团聚现象,故采用硬脂酸改性纳米CaCO<sub>3</sub>(含量在5%左右)与PS粉共混,能够有效提高PS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合材料的力学性能,且纳米CaCO<sub>3</sub>粒子在复合材料中仍呈纳米单分散状态<sup>[7]</sup>。弹性体一般可提高聚合物体系的韧性,刚性粒子可提高体系的强度,两者并用可获得综合性能优异的材料<sup>[8]</sup>。同时使用SBS和纳米CaCO<sub>3</sub>,其协同效应可实现对PS的同时增强增韧,且当SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>质量比为2:1时效果最好<sup>[9]</sup>。

基于以上特征,笔者用机械混合的方式制备了PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末,初步探索其SLS工艺参数与成型件弯曲强度的关系。结合前期研究经验,在预热温度75℃、XYSTA扫描方式、4层网格支撑下,分别研究了激光功率、扫描间距、扫描速度和分层厚度对PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末烧结件弯曲强度的影响,并通过正交试验和极差分析获得了最优工艺参数组合,以便为改性PS的SLS研究提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PS粉:530 J,粒径125 μm,江苏常州荣晟新材料科技有限公司;

SBS粉:YH-792型,粒径120 μm,东莞市锦恒塑料有限公司;

硬脂酸改性纳米CaCO<sub>3</sub>粉:FC-NCA500,粒径0.8 μm,东海县富彩矿物制品有限公司。

### 1.2 主要设备与仪器

激光快速成型机:XJRPSLS300型,陕西恒通智能机器有限公司;

微机控制电子万能力学试验机:CMT4304型,深圳市新三思计量技术有限公司;

冷场发射扫描电子显微镜(SEM):SU8010型,天美(中国)科学仪器有限公司;

分析天平:SF-400型,石家庄市鑫盛化工有限公司;

电动振筛机:YCHH0301型,宜昌市华恒设备制造厂;

高速混合机:SHR-10A型,张家港市宏基机械有限公司。

### 1.3 试样制备

#### (1) 复合粉末的制备。

首先将SBS粉和改性纳米CaCO<sub>3</sub>粉按照质量比2:1进行手工机械混合30 min;再用电动振筛机筛选出平均粒径为120 μm的PS粉末;最后将PS粉:SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>粉按照质量比为8.5:1.5的比例,放入高速混合机中,以1500 r/min的转速混合30 min,制得实验用PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末。

#### (2) 试样的制备。

利用激光快速成型机,在预热温度75℃、4层网格支撑、XYSTA扫描方式下,调节激光功率(21,23,25,27,29 W)、分层厚度(0.18,0.20,0.22,0.24,0.26 mm)、扫描间距(0.22,0.24,0.26,0.28,0.30 mm)、扫描速度(1200,1300,1400,1500,1600 mm/s),每次等间距同时烧结5个80 mm×10 mm×4 mm的标准弯曲强度测试件,总计20组。试样烧结成型后待冷却至室温再取出,去除试样支撑和表面多余浮粉并标号。

### 1.4 性能测试

弯曲强度测试:按照GB/T 9341-2008,用电子万能力学试验机对试样进行3点弯曲强度测试,

加力速度为 2 mm/min,跨度 64 mm。实验结果取每组 5 个试样的弯曲强度均值。

SEM 分析:将所选试样随机折断,对断面进行真空喷金处理,在 5 kV 加速电压下,观察其断面微观形貌、粉末粘结情况以及 SBS 和纳米  $\text{CaCO}_3$  在 PS 基体中的分散情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素烧结实验及分析

在 PS 粉末烧结过程中,预热温度的设定值常常略低于其玻璃化转变温度,这样既可保证在预热过程中粉末不会发生粘连,同时只需要较低的能量吸收便可熔融,减小了成型前后温差引起的热变形,也利于精度的保持<sup>[10]</sup>。PS 的玻璃化转变温度为 110℃,SBS 的玻璃化转变温度为 80℃,故选择预热温度为 75℃。

用制备的 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末进行 SLS 实验,将激光功率、扫描速度、分层厚度和扫描间距 4 个参数作为单因素进行试验,讨论工艺参数对 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响。

(1) 激光功率对 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响。

激光功率决定了作用在粉体表面激光能量的大小,在 SLS 成型过程中有着极其重要的地位,是主要工艺参数,直接决定着烧结件的成型质量。结合前期烧结实验<sup>[11-13]</sup>,在扫描速度 1400 mm/s、分层厚度 0.22 mm、扫描间距 0.26 mm 恒定不变的情况下,分别选取激光功率 21,23,25,27,29 W 进行烧结实验,不同激光功率对烧结件弯曲强度的影响如图 1 所示。

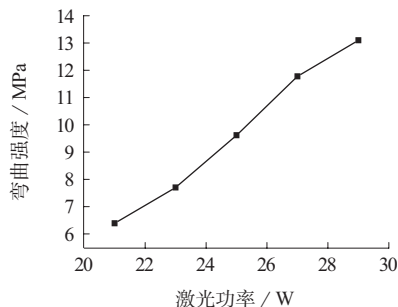


图 1 不同激光功率下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度

从图 1 可以看出,随着激光功率的增加,PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度逐渐增大。这是因为在扫描速度、扫描间距、分层厚度都

一定的情况下,激光功率越大,粉体所接收的能量越多,烧结密度和深度都增加,熔融得也越充分,形成更大的烧结颈,层与层之间的粘结性也越好,致密度增大,弯曲强度就升高。激光功率过高会出现过深烧结,影响烧结件精度。激光功率过小,粉体接收的能量有限,粉末表面微熔粘结,层与层之间粘结不牢,易掉粉,弯曲强度降低。实验发现,当激光功率为 21 W 时,成型件的弯曲强度较低;当激光功率为 29 W 时,成型件存在过烧结情况,成型件翘曲变形较大,故激光功率选取 23,25,27 W 作为正交试验的 3 个水平值。

(2) 扫描速度对 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响。

扫描速度决定了激光束对粉末照射和加热时间的长短。在激光功率 25 W、分层厚度 0.22 mm、扫描间距 0.26 mm 恒定不变的情况下,分别选取扫描速度 1200,1300,1400,1500,1600 mm/s 进行烧结实验,不同扫描速度对烧结件弯曲强度的影响如图 2 所示。

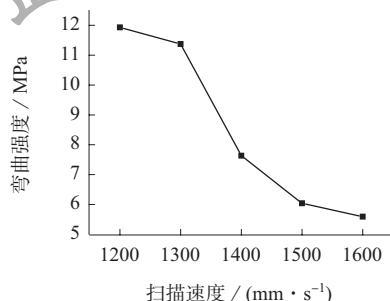


图 2 不同扫描速度下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度

从图 2 可看出,随着扫描速度的增加,PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度逐渐降低。这是因为在激光功率一定条件下,扫描速度的大小决定了粉末单位时间内接收激光能量的大小。扫描速度越小,粉体接收的激光能量就会越大,可使粉体充分熔融粘结,弯曲强度就会越大。同时有部分热量通过传导方式传向其周围的松散粉末,使得这些粉末温度升高,发生粘接甚至结块,出现“次级烧结层”<sup>[14]</sup>。随着扫描速度的增加,粉体接收的激光能量变小,粉末的熔合致密化程度降低,弯曲强度越小。实验发现,当扫描速度低于 1300 mm/s 时,次级烧结层致密度及厚度较大,导致烧结件清粉困难,同时为了兼顾成型精度,扫描速度选取 1300,1400,1500 mm/s 作为正交试验的 3 个水平值。

(3) 扫描间距对 PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响。

扫描间距的大小影响着粉末接收激光能量密度的大小,激光光斑中间温度高,边缘温度低,扫描过程中粉体的中间部分接收激光能量密度高而边缘接收的低,会导致粘结不牢固。扫描间距过大,还可能使得扫描线之间的区域完全不发生烧结。在激光功率 25 W、分层厚度 0.22 mm、扫描速度 1400 mm/s 恒定不变的情况下,分别选取扫描间距 0.22,0.24,0.26,0.28,0.30 mm 进行烧结实验,不同扫描间距对烧结件弯曲强度的影响如图 3 所示。

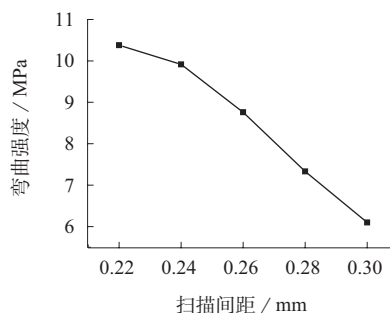


图3 不同扫描间距下 PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度

从图3可以看出,随着扫描间距的增加,PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度逐渐减小。这是因为激光能量呈高斯分布,当扫描间距较小时,扫描线的重叠量增大,作用在单位面积粉体上的激光能量就变大,可使烧结件的二次烧结率增大,会出现“过烧结”现象<sup>[15]</sup>,并且多余粉末清理困难;当扫描间距较大时,相邻扫描线之间的重叠量变小,作用在单位面积粉体上的激光能量变小,这样复合粉末颗粒就会出现微融或者未融的情况,导致粉末层与层之间的粘结性降低,致密度降低,从而弯曲强度降低。由于所用激光快速成型机的激光光斑直径是 0.30 mm,为了保证同一层的粉末都能够接收到激光能量,同时又有较好的粘结性,扫描间距应小于 0.30 mm,但是在 XYSTA 扫描方式下,一条扫描线的烧结宽度一般大于 0.30 mm,扫描间距应选在 0.30 mm 附近<sup>[9]</sup>,所以取 0.24,0.26,0.28 mm 作为正交试验的 3 个水平值。

(4) 分层厚度对 PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响。

基于 SLS 成型机理,从理论上来说,分层厚度越小烧结件的精度越高,但是也并非越小越好,因为分层厚度过小会大大增加层数,从而降低成型效率,

还会造成辊子无法正常铺粉或铺粉精度误差过大等问题<sup>[16]</sup>。在综合考虑成型件精度的情况下,结合前期烧结经验,分层厚度小于 0.18 mm 时,错层现象明显,烧结件不能正常成型。在激光功率 25 W、扫描间距 0.26 mm、扫描速度 1400 mm/s 恒定不变的情况下,分别选取分层厚度 0.18,0.20,0.22 mm、0.24,0.26 mm 进行烧结实验,不同分层厚度对烧结件弯曲强度的影响如图4所示。

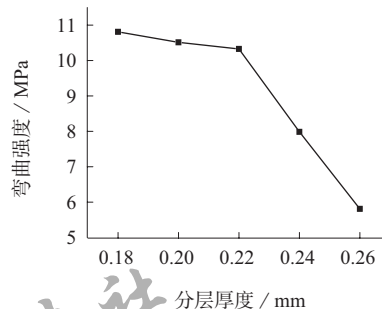


图4 不同分层厚度下 PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度

从图4可以看出,随着分层厚度的增加,PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度呈现递减规律。这是因为烧结件的弯曲强度与粉末材料的熔化程度有着密切的关系。在激光功率、扫描速度和扫描间距一定的情况下,单位时间单位面积粉体接收到的激光能量密度是一定的,而随着分层厚度的增加,单位体积粉料所接收的激光能量密度减小,相同的激光能量密度无法穿透较大的层厚,使得复合粉末熔融不充分,烧结件各层之间的结合较为疏松,进一步增大分层厚度有可能造成烧结件的层间剥离,导致 PS/SBS/ 纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度逐渐降低。实验发现,当分层厚度为 0.18 mm 和 0.20 mm 时,单位体积粉料所接收的激光能量较大,使得已烧结成型的前几层发生变形,在成型机辊子下一次铺粉过程中会拉动已成型部分,使其移位,最终导致烧结件出现如图5所示的错层现象,所以为了兼顾成型质量选取 0.22,0.24,0.26 mm 作为正交试验的 3 个水平值。

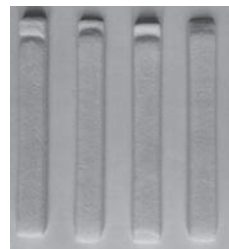


图5 成型件错层图

## 2.2 工艺参数优化及分析

### (1) 正交试验。

通过单因素实验,得出了激光功率、扫描间距、扫描速度和分层厚度四个 SLS 工艺参数对 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的影响规律,为了减少实验次数,快速有效选出最优工艺参数组合,将上述四个工艺参数作为四个因素,分别取 3 个水平值设计正交试验。正交试验因素水平表列于表 1,正交试验方案与结果列于表 2。由表 2 可得出 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度为 5.07 ~ 11.65 MPa。

表 1 正交试验因素水平表

| 水平 | 因素            |                                   |                |                |
|----|---------------|-----------------------------------|----------------|----------------|
|    | 激光功率<br>(A)/W | 扫描速度(B)/<br>(mm·s <sup>-1</sup> ) | 扫描间距<br>(C)/mm | 分层厚度<br>(D)/mm |
| 1  | 23            | 1 300                             | 0.24           | 0.22           |
| 2  | 25            | 1 400                             | 0.26           | 0.24           |
| 3  | 27            | 1 500                             | 0.28           | 0.26           |

表 2 正交试验方案与结果

| 实验<br>组号       | 因素  |                         |      |      | 弯曲强<br>度/MPa |
|----------------|-----|-------------------------|------|------|--------------|
|                | A/W | B/(mm·s <sup>-1</sup> ) | C/mm | D/mm |              |
| 1 <sup>#</sup> | 23  | 1 300                   | 0.24 | 0.22 | 11.65        |
| 2 <sup>#</sup> | 23  | 1 400                   | 0.26 | 0.24 | 7.94         |
| 3 <sup>#</sup> | 23  | 1 500                   | 0.28 | 0.26 | 5.07         |
| 4 <sup>#</sup> | 25  | 1 300                   | 0.26 | 0.26 | 10.14        |
| 5 <sup>#</sup> | 25  | 1 400                   | 0.28 | 0.22 | 9.34         |
| 6 <sup>#</sup> | 25  | 1 500                   | 0.24 | 0.24 | 9.63         |
| 7 <sup>#</sup> | 27  | 1 300                   | 0.28 | 0.24 | 11.65        |
| 8 <sup>#</sup> | 27  | 1 400                   | 0.24 | 0.26 | 11.34        |
| 9 <sup>#</sup> | 27  | 1 500                   | 0.26 | 0.22 | 11.16        |

### (2) 极差分析。

采用极差法对上述四因素三水平正交试验的结果进行分析,找出一组最优工艺参数组合。将同一因素下相同水平的 3 个弯曲强度实验值相加得到该因素的  $K_i$  值 ( $i=1,2,3$ )。极差是各因素在不同水平下  $K_i$  的最大值与最小值之差。实验过程中极差最大的因素就是影响最大的因素,极差最小的因素就是影响最小的因素,其余因素居中,弯曲强度极差分析结果列于表 3。

表 3 弯曲强度极差分析结果

| 项目             | A     | B     | C     | D     |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| $K_1$          | 24.66 | 33.44 | 32.62 | 32.15 |
| $K_2$          | 29.11 | 28.62 | 29.24 | 29.22 |
| $K_3$          | 34.15 | 25.86 | 26.06 | 26.55 |
| $K_{\text{总}}$ | 87.92 | 87.92 | 87.92 | 87.92 |
| 极差             | 9.49  | 7.58  | 6.56  | 5.6   |
| 最优水平           | $A_3$ | $B_1$ | $C_1$ | $D_1$ |

将正交试验中各因素作为横坐标,以每个因素水平下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度各自的  $K_i$  作为纵坐标,得出各因素与  $K_i$  的

变化趋势,结果如图 6 所示。

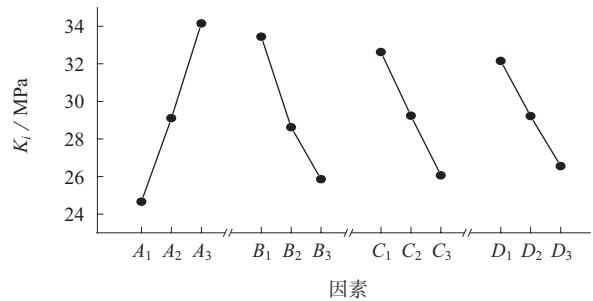


图 6 不同因素下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的弯曲强度

### (3) 工艺参数优化。

由表 3 可得,各因素影响烧结件弯曲强度极差大小的顺序为:  $A > B > C > D$ ,即激光功率对弯曲强度的影响最大,分层厚度对弯曲强度的影响最小,扫描速度和扫描间距的影响介于两者之间。

结合表 3 和图 6 可知,激光功率选  $A_3$  最好,因为激光功率越大,粉体接收的激光能量密度就越高,熔融也越充分,致密化程度越高,弯曲强度也就越高。扫描速度选  $B_1$  最好,因为扫描速度越小,激光对粉体照射和加热的时间就越长,粉末吸收的能量也就越多,弯曲强度也就越高。扫描间距选  $C_1$  最好,因为此时可以使扫描线充分重叠,使粉末充分烧结,弯曲强度也就越高。分层厚度选  $D_1$  最好,当其它工艺参数一定时,分层厚度越小,单位体积粉料所接收的激光能量体密度越大,弯曲强度也就越高。因此 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件弯曲强度的最佳工艺参数组合为  $A_3B_1C_1D_1$ ,即激光功率 27 W、扫描速度 1 300 mm/s、扫描间距 0.24 mm、单层厚度 0.22 mm。在此工艺参数组合下再次进行烧结实验,测得试样的弯曲强度为 13.38 MPa,成型件试样如图 7 所示。

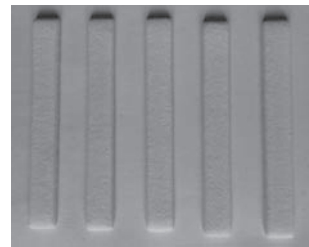
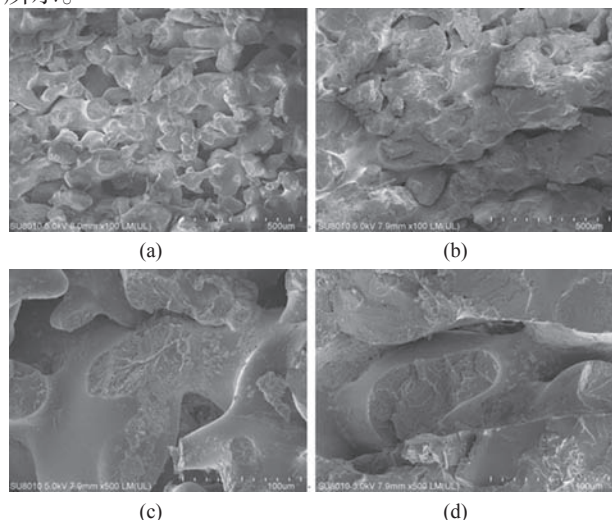


图 7 最优工艺参数下 PS/SBS/纳米  $\text{CaCO}_3$  复合粉末烧结件的图片

## 2.3 SEM 表征

在一般工艺参数 (激光功率 25 W、扫描速度 1 400 mm/s、扫描间距 0.26 mm、分层厚度 0.22 mm) 和最优工艺参数 (激光功率 27 W、扫描

速度 1300 mm/s、扫描间距 0.24 mm、分层厚度 0.22 mm)下,PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末烧结试样放大100倍和500倍断面的SEM照片如图8所示。



a——一般工艺参数, ×100; b——最优工艺参数, ×100;  
c——一般工艺参数, ×500; d——最优工艺参数, ×500

图8 不同工艺参数下PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末烧结件断面的SEM照片

从图8可明显看出,在最优工艺参数下,PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末熔融的更加充分,粉末颗粒互相接触粘结形成的烧结颈更大,孔隙率较小,烧结件致密度较高,弯曲强度也就越大。同时也可以看出,经过硬脂酸改性的纳米CaCO<sub>3</sub>团聚现象不明显,在基体中的分散性较好,可以较好地填充空隙,而且与PS粉和SBS的相容性也较好,能有效地起到增强作用。

### 3 结论

按照PS、SBS与纳米CaCO<sub>3</sub>的质量比8.5:1:0.5的比例,采用机械混合法制得PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末,再进行SLS烧结实验,在预热温度75℃、XYSTA扫描方式下,通过单因素法分别研究了激光功率、扫描速度、扫描间距和分层厚度对烧结件弯曲强度的影响,并通过正交试验和极差分析法对烧结工艺参数进行了优化选择,最后结合烧结试样断面SEM照片分析了烧结件内部结构变化,得出以下结论:

(1) 烧结件的弯曲强度随着激光功率的增大而升高,随着扫描速度、扫描间距和分层厚度的增大而降低。

(2) 激光功率对PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub>复合粉末烧结件弯曲强度的影响最大,分层厚度对弯曲强

度的影响最小,扫描速度和扫描间距的影响介于两者之间。

(3) 最佳工艺参数组合为:激光功率27 W、扫描速度1300 mm/s、扫描间距0.24 mm、单层厚度0.22 mm。在此工艺参数组合下烧结件的弯曲强度为13.38 MPa。

(4) 改性纳米CaCO<sub>3</sub>与PS和SBS的相容性较好,能有效地起到增强的作用。

### 参考文献

- [1] 史玉升,闫春泽,魏青松,等.选择性激光烧结3D打印用高分子复合材料[J].中国科学:信息科学,2015,45(2):204-211.  
Shi Yusheng, Yan Chunze, Wei Qingsong, et al. Polymer composites for 3D printing by selective laser sintering[J]. Science in China: Information Sciences, 2015, 45(2):204-211.
- [2] 文世峰,季羨泰.激光选区烧结技术的研究现状及应用进展[J].苏州市职业大学学报,2018,29(1):26-31, 71.  
Wen Shifeng, Ji Xiantai. Review on research and application of selective laser sintering technology[J]. Journal of Suzhou Vocational University, 2018, 29(1):26-31, 71.
- [3] 刘景博,刘世峰,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.  
Liu Jingbo, Liu Shifeng, Liu Quanming, et al. Research progress in powder materials for selective laser sintering[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(4):111-116.
- [4] 刘钰馨,莫羡忠,李建鸣,等.CaCO<sub>3</sub>对SBS/PS共混体系的增强增韧研究[J].塑料科技,2014,42(2):42-44.  
Liu Yuxin, Mo Xianzhong, Li Jianming, et al. Study on reinforcement and toughness of CaCO<sub>3</sub> for SBS/PS blend system[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(2):42-44.
- [5] 李炳海,张桂云,王华清,等.SBS改性聚苯乙烯的性能与形态[J].塑料,1990(2):2-7.  
Li Binghai, Zhang Guiyun, Wang Huaqing, et al. Property and morphology of polystyrene modified by SBS[J]. Plastics, 1990(2):2-7.
- [6] 杜素梅,任凤梅,周正发,等.纳米CaCO<sub>3</sub>及其对塑料改性的研究[J].塑料制造,2006(11):46-48.  
Du Sumei, Ren Fengmei, Zhou Zhengfa, et al. Nano CaCO<sub>3</sub> and its modification on plastics[J]. Plastics manufacturing, 2006(11):46-48.
- [7] 袁绍彦,吕军,罗勇,等.纳米碳酸钙/弹性体/聚苯乙烯体系的力学性能及形态[J].复合材料学报,2005,22(3):25-29.  
Yuan Shaoyan, Lyu Jun, Luo Yong, et al. Morphology and mechanical properties of nano-CaCO<sub>3</sub>/SBS/PS blends[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2005, 22(3):25-29.
- [8] 袁绍彦,杜玲玉,郑刚,等.PS/SBS/CaCO<sub>3</sub>共混物体系脆韧转变[J].高分子学报,2004(4):478-482.  
Yuan Shaoyan, Du Lingyu, Zheng Gang, et al. Studies on the brittle-ductile transition of PS/SBS/CaCO<sub>3</sub> systems[J]. Acta Poly-

- Li Qinghua, Zhu Yunpeng, Ji Jingqi, et al. Study on thermal conductivity of PVC/MgO composite sheets prepared by mechanical activation[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(7):6–11.
- [13] 沈芳,余聪,李庆华,等. 基于机械球磨法的茂金属 PE/石墨/碳纳米管导电复合材料的制备及性能研究[J]. *应用化工*, 2019, 48(05):1 106–1 109.
- Shen Fang, Yu Cong, Li Qinghua, et al. Preparation and properties of metallocene PE/graphite/carbon nanotube conductive composites based on mechanical ball milling[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(5):1 106–1 109.
- [14] 玉澜,黄祖强,胡华宇,等. 机械活化强化硅烷改性竹粉/PVC 复合材料制备[J]. *应用化工*, 2018, 47(3):460–463.
- Yu Lan, Huang Zuqiang, Hu Huayu, et al. Study on mechanical activation strengthened silane modified bamboo/PVC composites[J]. *Applied Chemical Engineering*, 2018, 47(3):460–463.
- [15] 黄祖强,梁兴唐,高利,等. 机械活化甘蔗渣与丙烯酸(钠)的接枝共聚反应[J]. *化工学报*, 2009, 60(6):1 573–1 580.
- Huang Zuqiang, Liang Xingtang, Gao Li, et al. Graft co-polymerization of mechanically activated sugarcane bagasse and acrylic acid(sodium acrylate)[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2009, 60(6):1 573–1 580.
- [16] 陈渊,黄祖强,杨家添,等. 机械活化预处理甘蔗渣制备醋酸纤维素的工艺[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9):374–380.
- Chen Yuan, Huang Zuqiang, Yang Jiatian, et al. Preparation technology of cellulose acetate from sugarcane bagasse by mechanical activation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9):374–380.
- [17] 杨梅,丁琳,张燕娟,等. 机械活化/氢氧化钙协同作用对甘蔗渣的影响[J]. *广西大学学报:自然科学版*, 2016, 41(6):1 976–1 981.
- Yang Mei, Ding Lin, Zhang Yanjuan, et al. Synergistic effect of mechanical activation and calcium hydroxide on sugarcane bagasse[J]. *Journal of Guangxi University:Natural Science Edition*, 2016, 41(6):1 976–1 981.
- [18] 黄祖强,高利,梁兴唐,等. 机械活化甘蔗渣的结构与表征[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2009, 37(12):75–80.
- Huang Zuqiang, Gao Li, Liang Xingtang, et al. Structure and characterization of mechanically activated bagasse[J]. *Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition*, 2009, 37(12):75–80.
- [19] 郭洪武,刘毅,付展,等. 乙酰化处理对樟子松木材耐光性和热稳定性的影响[J]. *林业科学*, 2015, 51(6):135–140.
- Guo Hongwu, Liu Yi, Fu Zhan, et al. Effect of acetylation treatment on light fastness and thermal stability of pinus sylvestris var. mongolica wood[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(6):135–140.
- ~~~~~
- (上接第 85 页)
- merica Sinica, 2004(4):478–482.
- [9] 袁绍彦. 聚苯乙烯基复合材料形态、结构与性能的研究[D]. 成都:四川大学, 2004.
- Yuan Shaoyan. Study on morphologies, structures and properties of polystyrene composites[D]. Chengdu:Sichuan University, 2004.
- [10] 刘旭. 基于选取激光烧结的聚苯乙烯成型工艺及改性研究[D]. 西安:西安科技大学, 2016.
- Liu Xu. Research on molding process and modification of polystyrene based on Selective Laser Sintering[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [11] 杨来侠,陈梦瑶,宋娟. GF/碳酸钙复合改性 PS 选择性激光烧结实验[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(8):44–49.
- Yang Laixia, Chen Mengyao, Song Juan. Selective laser sintering experiment of polystyrene modified by calcium carbonate and glass fibre[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(8):44–49.
- [12] 杨来侠,周文明. 选择性激光烧结 PS/ABS 复合粉末成型件精度的实验研究[J]. *塑料工业*, 2017, 45(8):35–38.
- Yang Laixia, Zhou Wenming. Study on precision of PS/ABS composite powders formed parts based on selective laser sintering[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(8):35–38.
- [13] 杨来侠,周文明,王勃,等. PS/ABS 复合粉末选择性激光烧结工艺参数的实验研究[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(5):57–62.
- Yang Laixia, Zhou Wenming, Wang Bo, et al. Experimental study on process parameters of PS/ABS composite powders based on selective laser sintering[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(5):57–62.
- [14] 齐迪. 用于选择性激光烧结高分子材料的制备与成形研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2016.
- Qi Di. Research on the preparation of selective laser sintering polymer materials and its forming process[D]. Qingdao:Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [15] 徐超,王勃,杨来侠. 选区激光烧结工艺参数对 PS/PE 混合粉末成型精度的影响[J]. *塑料工业*, 2018, 46(8):64–68, 127.
- Xu Chao, Wang Bo, Yang Laixia. Effect of selective laser sintering process parameters on the forming precision of PS/PE hybrid powder[J]. *China Plastics Industry* 2018, 46(8):64–68, 127.
- [16] 杨来侠,杜康,桂玉莲,等. PS/PMMA 复合粉末选择性激光烧结成型精度工艺参数的研究[J]. *塑料工业*, 2019(8):47–50.
- Yang Laixia, Du Kang, Gui Yulian, et al. Study on process parameters of forming precision of PS/PMMA composite powder by selective laser sintering[J]. *China Plastics Industry*, 2019(8):47–50.