

竹塑复合粉末激光烧结件在熔模铸造中的应用

李健, 郭艳玲, 赵德金

东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040

摘要 选用竹粉作为植物纤维粉末, 研究竹粉与热塑性树脂热粘结理论。选择合适的热熔胶粉末, 分析了竹粉颗粒与热塑性树脂热作用结合机理; 竹粉与热塑性树脂粉末混合后, 研究了竹粉/热塑性树脂复合粉末的激光烧结特性、SLS成型件的平均力学性能。利用竹粉和热塑性树脂粉末混合物制造复杂零件的熔模铸造件, 研究了熔模铸造工艺和SLS成形件、渗蜡件和铸件的尺寸精度传递特性。

关键词 竹粉/聚酯热熔胶; 激光烧结; 熔模铸造

选择性激光烧结技术(Selected Laser Sintering, SLS)是增材制造技术的一种重要的粉末分层制造方法, 采用无压力通过粉末自支撑完成零件的成型加工。加工过程中, 用料节省, 可加工复杂结构零件。目前, 利用SLS制造加工的粉末材料主要有高分子及其复合粉末、金属粉、陶瓷粉、金属高分子覆膜粉等多种粉末。SLS成型件应用比较广泛, 可应用于熔模铸造的模型、生产塑料功能件、金属功能件、牙科用模型、航天和汽车用零件等加工制造领域。

在过去的10年, 由于工程上使用的原材料及塑料价格的上涨, 塑料与天然生物质纤维复合材料研究受到了广泛的重视^[1-4], 研究人员从天然植物中提取出了各种纤维用于增强塑料, 形成不同的复合材料^[5,6]。随着林业资源的匮乏, 天然植物纤维, 农作物茎秆, 稻壳同木竹制品的废弃物都已经成为树脂和塑料等复合材料研究对象。竹纤维作为一种生物质, 机械性能好, 纤维易提取, 使其在复合材料的研究和应用上具备很好的前景^[7-9]。将适当目数的竹粉与热塑性树脂混合, 得到竹粉/热塑性复合粉末, 研究其激光烧结特性和应用, 将为竹粉的应用开拓新领域, 具有实用价值。

本课题组在天然植物纤维粉末和塑料粉末混合物选择性激光烧结方面做了大量研究, 先后研究了杨木粉, 桉木粉、稻壳粉与热塑性树脂粉末混合后, 激光烧结成型件的力学特性和成型机理^[10-12]。由于天然植物纤维粉末和塑料粉末的混合物作为激光烧结材料是一个新的领域, 目前, 木塑复合激光烧结粉末的SLS成型件存在力学强度低以及植物粉末与热

塑性树脂粘结效果差等问题^[13]。本研究选用竹粉作为植物纤维粉末, 探析竹粉与热塑性树脂热粘结理论。

1 竹塑选择性激光烧结理论

选择性激光烧结的加工如图1所示。SLS利用CO₂激光器加热熔化粉末材料制造实体零件。首先将材料粉末床预先加热到略低于熔点的一定温度, 然后铺粉辊子在加工区域铺非常薄的一层粉, 激光束根据CAD模型的横截面数据信息在加工区域有选择的烧结将粉末融合在一起, 完成一层的加

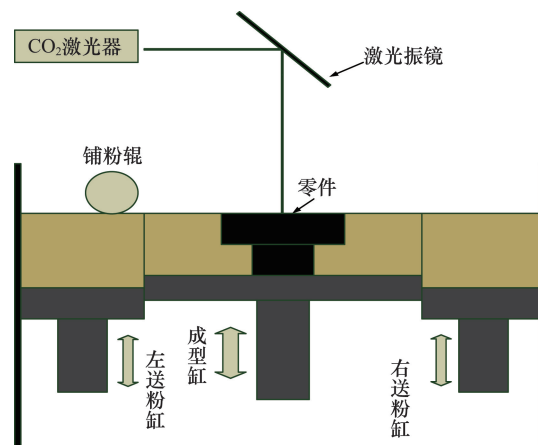


图1 SLS烧结原理

Fig. 1 Schematic diagram of SLS in selective laser sintering

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2015-12-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (2572015BB05); 国家自然科学基金项目 (51075067); 高等学校博士学科点专项科研项目 (博导类) (20130062110006)

作者简介: 李健, 讲师, 研究方向为选择性激光烧结件后处理, 电子信箱: lijian499@163.com; 郭艳玲 (通信作者), 教授, 研究方向为增材制造技术, 电子信箱: guo.yl@hotmail.com

引用格式: 李健, 郭艳玲, 赵德金. 竹塑复合粉末激光烧结件在熔模铸造中的应用[J]. 科技导报, 2016, 34(19): 96-100; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.19.016

工,再铺另一层粉,激光束再根据CAD模型的下一层数据信息选择烧结,连续一层一层烧结加工,直到整个零件加工完毕。

本研究所采用的激光烧结材料为竹粉/聚酯热熔胶复合粉末,该复合粉末在激光热作用下的粘结是一个极其复杂的过程,不仅包括物理和化学变化,还包括胶黏剂的液化、流动、润湿竹粉和固化等过程。聚脂与竹粉颗粒界面结合力的形成主要取决于聚脂熔融态和竹粉之间的界面的润湿性、接触角、临界表面张力,以及聚酯热熔胶液态的表面张力,同时还取决于聚酯热熔胶的熔融指数、化学构造、粘附力、液态流变性,固化速度等因素。

竹粉与聚酯热熔胶的界面结合效果还与竹粉本身的特性有关,例如竹粉颗粒的粒径大小、聚酯热熔胶的熔融程度、竹粉的表面粗糙程度,以及聚酯热熔胶对竹粉的浸润性等。机械混合法制备的竹粉/热塑性树脂复合粉末激光烧结特性与热塑性树脂和竹粉的配比方案、聚酯热熔胶材料预热温度、熔化温度和固化温度等有关。竹粉/聚酯热熔胶复合粉末材料成型过程中经历从铺粉过程的固-固和固-气到激光烧结过程的液-固、固-固和液-液,从及最后的冷却过程的固-固和固-气的转变过程。

竹粉和聚酯热熔胶粉末都是不规则形状,为了研究竹粉/聚酯热熔胶复合粉末激光烧结机理,假设聚酯热熔胶颗粒是球形,竹粉为片状矩形形状。为了描述聚酯热熔胶对竹粉湿润机理,建立激光烧结聚酯热熔胶粘结竹粉模型时,矩形板的长度为球形直径的2.5倍,宽度为球直径的1.2倍。建立竹粉和聚酯热熔胶粉固-固接触模型如图2(a)所示。在激光烧结过程中,聚酯热熔胶发生由固相向液相的转变,相邻聚酯热熔胶颗粒之间由于吸收激光的热量熔化粘结聚合形成烧结颈,聚酯热熔胶颗粒吸收激光热量熔化并对邻近固相竹粉颗粒湿润扩散粘结的效果如图2(b)所示。复合粉末材料中能够离散分开具有独立的个体形态的颗粒称为单颗粒,通过物理化学方法使多组分颗粒之间结合形成二次颗粒。通过激光烧结作用,聚酯热熔胶颗粒之间、聚酯热熔胶和竹粉之间从固-固转变为液-液和液-固形成二次颗粒,如图2(c)、(d)所示的黏结形式。实际激光烧结中,颗粒熔化发生重排,聚酯热熔胶/竹粉的黏结过程和形式是复杂的。二次颗粒是竹粉和聚酯热熔胶颗粒激光辐射的热作用下形成的团状结合体。同时二次颗粒与二次颗粒也发生着黏结作用并粘附

于已加工层表面。

由于竹粉颗粒表面粗糙,当聚酯热熔胶熔化粘结竹粉形成复合结构时,其力学性能增强符合黏结的机械结合理论,这种理论主要强调对于表面具有不规则轮廓的粗糙表面,液态胶黏剂渗入材料表面的孔隙或填充到不规则表面的凹坑处,固化后,胶黏剂和被粘结固体互相咬合形成一体,一般将这种黏结作用称为锚固作用。机械结合理论是由McBain和Hopkis在胶接技术领域提出的最早的理论。机械结合理论的结合力与摩擦力有关,其公式可表达为:

$$F = WH/\lambda \quad (1)$$

式中, F 为摩擦力,N; W 为法向压力,N; H 被黏结表面凸凹高度,mm; $1/\lambda$ 单位长度的凸凹程度。

机械结合理论对于植物纤维和粉末黏结尤为重要,木竹纤维和粉末的表面粗糙,另外木材和竹材本身就是多孔性材料,木材和竹材表面纹理及竹材维管束分布在竹壁的组织结构中,这些结构都是形成竹粉和聚酯热熔胶界面结合的因素。据研究机械结合理论在套接强度研究中得到了验证,但是这一理论不具有普遍性,往往较强的胶接都出现在表面粗糙度较好的连接中。后来,Wake将多种因素合并,认为胶接力的强度是机械互锁结合理论与热动力学界面相互作用的结果^[18],描述为:

$$G = KMI \quad (2)$$

式中, G 为胶接强度,N; K 为与表面粗糙度相关的常数; M 为机械互锁强度,N; I 为界面强度,N。

1.1 复合粉末材料的制备

竹粉/聚酯复合粉末的制备方法采用机械物理混合的方法,利用安装160目筛网的超声波振动筛筛分竹粉,将竹粉利用高速混合机进行干燥处理,然后将干燥的粒径在100 μm以下的竹粉冷却后与聚酯粉末按照表1配比方案要求,利用高速混合机在700~800 r/min的转速下高速混合。为了保证聚酯材料不结块,混合时物料的温度要保持聚酯材料的玻璃化转变温度以下。一般利用高速混合机混合物料6 min中就能达到物料的较好分散度。为了使竹粉在聚酯中具有更好的分散性,将物料在高速混合机中混合15 min,并且塑封保存,准备激光烧结实验。根据材料的堆积密度测试方法测出干燥后的竹粉和聚酯的堆积密度分别为0.37、0.68 g/cm³。利用高速混合机依次按照表1质量配比方案制备出相对应竹粉/聚酯复合粉末,利用材料的堆积密度计算出对应的体积比

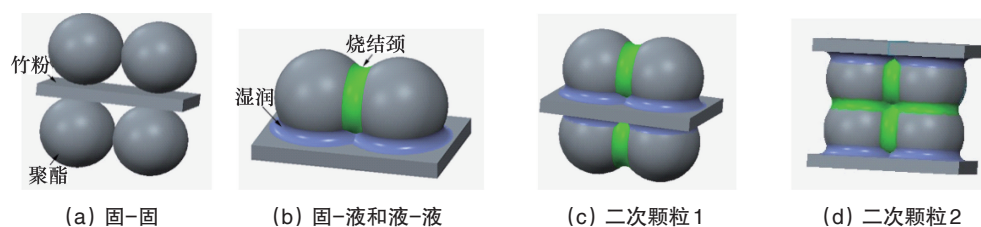


图2 竹粉/聚酯热熔胶复合粉末激光烧结理论三维模型

Fig. 2 3D model of laser sintering theory for bamboo powder/polyester composite powder

如表1所示。图3是竹粉/聚酯按照质量比25:75混合的复合粉末,可以看出竹粉较均匀地分散在聚酯颗粒中。

表1 竹粉和聚酯的配比方案

Table 1 Mixing proportion of bamboo powders and polyester

| 序号 | 质量比 | 体积比 | 堆积密度/(g·mm ⁻³) |
|----|-------|-------|----------------------------|
| 1 | 20:80 | 32:68 | 0.62 |
| 2 | 25:75 | 38:62 | 0.56 |
| 3 | 30:70 | 44:56 | 0.49 |
| 4 | 35:65 | 49:51 | 0.43 |

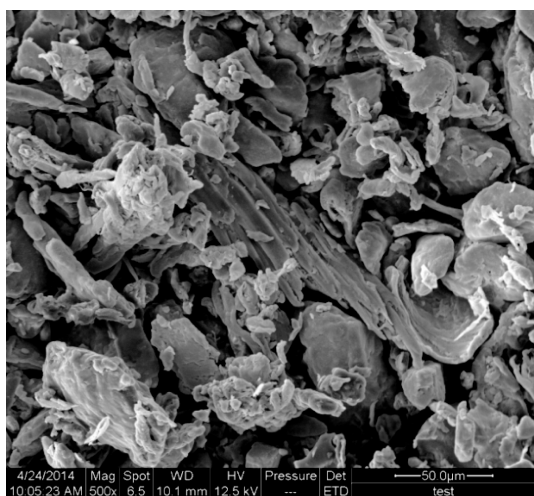


图3 竹粉/聚酯复合粉末

Fig. 3 Bamboo powder/polyester composite powder

1.2 选择性激光烧结工艺参数

聚酯属于非晶态聚合物,在激光烧结过程中,主要存在熔固收缩和温致收缩现象。由于非晶态聚合物熔化过程是一个缓慢的过程,在激光扫描过程中,由于激光对聚酯粉末热作用时间较短,聚酯颗粒熔化黏结过程一般为不完全熔化黏结,熔固收缩小。在激光烧结高分子材料时,比较常见的材料成型变形现象是翘曲变形,通过热分析和实验方法可以找到恰当的粉末床预热温度避免翘曲现象,表2为不同预热温度和激光功率下的实验结果。

表2 竹粉/聚酯复合粉末激光成形特性

Table 2 The forming characteristics of laser sintering of bamboo powder/polyester composite powder

| 预热温度/℃ | 激光功率/W | | | |
|--------|---------------|------|------|------|
| | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 70 | 翘边 | 翘边 | 翘边 | 翘边 |
| 80 | 效果好 | 轻微翘边 | 轻微翘边 | 翘边 |
| 85 | 效果好 | 效果好 | 效果好 | 轻微翘边 |
| 89 | 效果好 | 效果好 | 效果好 | 效果好 |
| 91 | 效果好 | 效果好 | 效果好 | 效果好 |
| 93 | 激光烧结过程中铺粉出现结块 | | | |

为了使竹粉/聚酯复合粉末SLS成形件具有较好的激光烧结特性,参考表2激光烧结成形特性的数据,选用粉末床预热温度为89℃、激光功率为11 W、烧结间距为0.2 mm,铺粉层厚为0.1 mm,扫描间距为0.2 mm对竹粉/聚酯复合粉末进行激光扫描加工,激光烧结竹粉/聚酯复合粉末的情况及烧结加工的拉伸件如图4所示,可以看出,竹粉/聚酯复合粉末铺粉平整,测试件在激光烧结过程中表面平整,没有发生翘曲变形现象。采用选择性激光所示,成型件表面和侧面轮廓清晰,说明竹粉/聚酯复合激光烧结成型特性较好。

实验研究了不同质量配比下竹粉/聚酯复合粉末SLS成型件的抗拉伸能力,试样的平均拉伸强度测试结果如图5所示。竹粉/聚酯复合粉末SLS成型件的平均力学性能随着竹粉的添加量的增大而减小,说明竹粉添加量的增加会导致聚酯颗粒相对减少,按照竹粉/聚酯复合粉末激光成型机理,聚酯颗粒在竹粉/聚酯复合粉末中成团相遇的概率减少,很难形成大面积的聚酯基体,故力学性能下降。

为了研究粉末粒度对烧结件性能的影响,选用粉末床预热温度为89℃、激光功率为11 W、烧结间距0.2 mm,铺粉层厚为0.1 mm作为烧结的工艺参数,分别加工4种不同尺度竹粉/聚酯(质量比25:75)复合粉末(60、80、100、120 μm),烧结机的拉伸力学性能测试结果如图6所示,曲线横坐标竹粉粒径尺度值取各竹粉尺度最大粒径值。通过曲线可知,力学强度随竹粉尺度增大而增强。从曲线可以看出,竹粉粒径尺度



图4 激光加工竹粉/聚酯复合粉末及所烧结的拉伸测试件

Fig. 4 Laser sintering of bamboo powder/polyester composite powder and tensile specimens

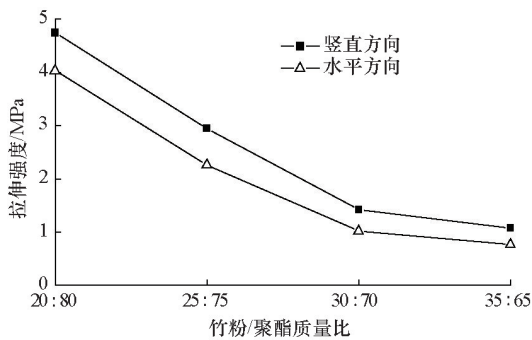


图5 组分对烧结件性能的影响

Fig. 5 Influence of different mass mixing ratios on mechanical properties

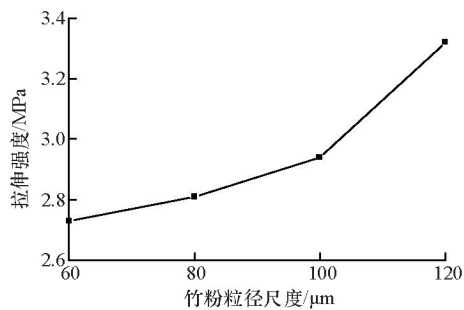


图6 颗粒尺度对烧结件性能的影响

Fig. 6 Influence of granule size on mechanical properties

在前3种粒径范围时,竹粉/聚酯复合粉末SLS成型件平均力学性能增长平稳。当竹粉粒径尺度为120 μm时,SLS平均力学性能增强趋势显著。

1.3 烧结件在熔模铸造中的应用

从微观形貌上看,竹粉/聚酯复合粉末SLS成型件断面具有多孔隙的结构,故可采用渗蜡或渗环氧树脂后处理工艺提高其成型件的力学性能,渗蜡件可应用于熔模铸造工艺。图7为竹粉/聚酯热熔胶复合粉末SLS成型件、渗蜡件和采用熔模铸造的零件的图片。观察激光烧结零件(图7(a)),激光烧结件具有较好的成型质量,在零件曲面特征出现较明显的阶梯状台阶,这是选择性激光烧结分层加工出现的主要特征,影响了零件的曲面的成型质量,通过渗蜡处理后(图7(b)),表面的分层的缺陷被基本修复,可以通过打磨表面的方式进一步提高表面质量。

根据熔模铸造工艺,使用竹粉/聚酯复合粉末的SLS成型的渗蜡处理件进行熔模铸造。首先将渗蜡件进行制型壳并烘干处理,然后将型壳在100℃(低于聚酯熔点105℃温度)进行失蜡处理1 h。为了保证熔模铸造质量,根据热重分析结果,竹粉/聚酯复合粉末的灰分较大,为了避免灰分影响铸件的铸造质量,在失蜡过程后,应使竹粉/聚酯热熔胶粉末SLS成型件的材料在分解前排出。竹粉/聚酯热熔胶复合粉末在306℃几乎没有分解,但是聚酯热熔胶在306℃已经完全熔化成黏流态,因此将制好的型壳在远高于聚酯热熔胶熔点的温度300℃保温2 h,发现大部分竹粉/聚酯热熔胶复合物都已从型壳排出,然后继续升温850℃进行焙烧处理1 h,型壳焙烧完成后应进一步使用高压气体或高压水清理焙烧残余物,然后再将型壳升温到850℃焙烧1 h。最后进行灰铸铁铁水浇注。实验发现,虽然聚酯热熔胶和竹粉复合粉末的灰分较高,观察熔模铸造件表面(图7(c)),零件表面质量较高,没有发现有竹粉/聚酯热熔胶材料残留物对铸件表面造成较大质量缺陷。

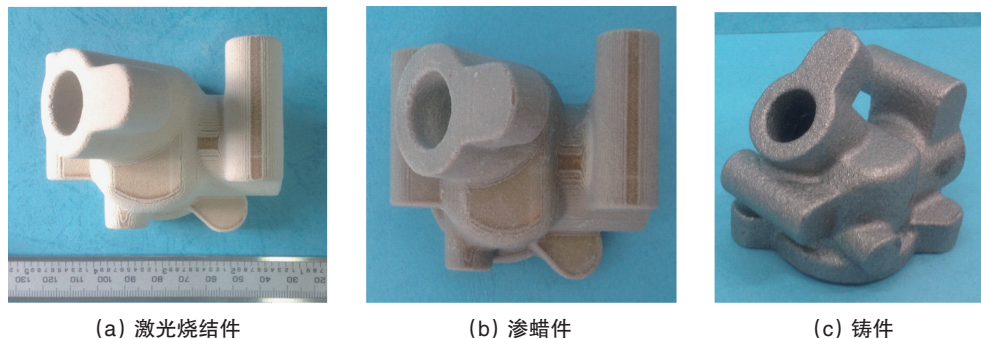


图7 激光烧结件、渗蜡件和铸件

Fig. 7 Laser sintered part, wax-infiltrated part and casting

2 结论

从烧结机理、材料制备、烧结参数等方面,研究了竹塑复合材料应用于选择性激光烧结的可行性,探讨了烧结机在熔模铸造上的应用。

1) 竹塑复合材料能够在保证精度的情况下进行选择性激光烧结,且翘曲比较小。

2) 随着竹粉比例的增加,烧结件强度有所下降,而竹粉粒度在一定范围内增加可以增强烧结件的力学强度。

3) 烧结件在渗蜡后用于熔模铸造工艺,实验表明,具备较好的精度传递性。

借助选择性激光烧结的成型优势和竹粉材料的高性价比,为其在熔模铸造上的应用开辟了新的思路。

参考文献 (References)

- [1] Shih Y F, Cai J X, Kuan C S, et al. Plant fibers and wasted fiber/epoxy green composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(7): 2817-2821.
- [2] Zakikhani P, Zahari R, Sultan M T H, et al. Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 820-828.
- [3] Wu Q, Chi K, Wu Y, et al. Mechanical, thermal expansion, and flammability properties of co-extruded wood polymer composites with basalt fiber reinforced shells[J]. *Materials & Design*, 2014, 60: 334-342.
- [4] Misnon M I, Islam M M, Epaarachchi J A, et al. Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications[J]. *Materials & Design*, 2014, 59: 359-368.
- [5] Liu D, Song J, Anderson D, et al. Bamboo fiber and its reinforced composites: Structure and properties[J]. *Cellulose*, 2012, 19(5): 1449-1480.
- [6] Kuranska M, Prociak A. Porous polyurethane composites with natural fibres[J]. *Composites Science and Technology*, 2012, 72(2): 299-304.
- [7] Porras A, Maranon A. Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(7): 2782-2788.
- [8] Nirmal U, Hashim J, Low K O. Adhesive wear and frictional performance of bamboo fibres reinforced epoxy composite[J]. *Tribology International*, 2012, 47: 122-133.
- [9] Li M F, Sun S N, Xu F, et al. Microwave-assisted organic acid extraction of lignin from bamboo: Structure and antioxidant activity investigation[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(3): 1392-1398.
- [10] Guo Y, Zeng W, Jiang K. Preparation and selective laser sintering of wood-plastic composite powders and post processing[J]. *Digest Journal of Nanomaterials And Biostructures*, 2011, 6(3): 1435-1444.
- [11] 姜凯译. 木塑复合材料选择性激光烧结实验与后处理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学机电工程学院, 2011.
Jiang Kaiyi. Study on the experiment and the post processing of the wood plastic composite based on selective laser sintering[D]. Harbin: College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, 2011.
- [12] 郭艳玲, 姜凯译, 辛宗生, 等. 木粉/PES 复合粉末选择性激光烧结成形及后处理技术研究[J]. *电加工与模具*, 2011(6): 29-32.
Guo Yanling, Jiang Kaiyi, Xin Zongsheng, et al. Selective laser sintering prototyping and post processing techniques for wood-flour/PES composites[J]. *Electromachining & Mould*, 2011(6): 29-32.
- [13] 郭艳玲, 姜凯译, 于志祥, 等. 选择性激光烧结木塑复合材料的制备工艺及成型机理[J]. *上海交通大学学报*, 2011(9): 1327-1331.
Guo Yanling, Jiang Kaiyi, Yu Zhixiang, et al. The preparation technology and forming properties of wood-plastic composite powder used in selective laser sintering[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011(9): 1327-1331.

Selected laser sintering characteristics of bamboo/plastic composite powders and application in investment casting

LI Jian, GUO Yanling, ZHAO Dejin

College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract With the bamboo powder as a typical plant fiber powder, this paper studies the thermal bonding theory for the bamboo powder and the thermoplastic resin. With the appropriate hot melt adhesive powder, a theoretical analysis of the thermal effect of the thermoplastic resin bonding mechanism is made for the bamboo powder particles. The experimental study of the laser sintering characteristics of bamboo powder/thermoplastic resin composite powder is made for the bamboo powder mixed with the thermoplastic resin powder, focusing on the average mechanical properties of the SLS parts. The mixture of the bamboo powder and the thermoplastic resin powder is used to manufacture complex casting parts and SLS forming member. The infiltration wax casting dimensional accuracy of parts and transfer characteristics are studied.

Keywords bamboo/plastic composite powders; selected laser sintering; investment casting

(编辑 傅雪)