

# 包覆不锈钢粉末激光烧结深度的影响因素

白培康<sup>1</sup>, 方明伦<sup>2</sup>

- (1. 中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030051;
2. 上海大学 机械与自动化学院, 上海 200436)

**摘要:** 制备一种用于激光烧结成形的包覆不锈钢粉末。应用数值模拟预测结合实际测量方法, 研究激光功率、激光束扫描速度、预热温度及铺粉密度等参数对激光烧结深度的影响。结果表明, 随着预热温度、铺粉密度与激光功率增加, 烧结深度增加; 随着扫描速度增加, 烧结深度降低。但当扫描速度不超过 2 mm/s 时, 烧结深度随扫描速度的增加反而增大。提出一种利用数值模拟预测结果进行激光烧结工艺参数选择的方法。

**关键词:** 包覆 1Cr18Ni9Ti 粉末; 选择性激光烧结; 烧结深度; 数值模拟  
**中图分类号:** TN 249; TQ 174      **文献标识码:** A

## Effects of laser processing parameters on sintering depth of polymer-coated stainless steel powder

BAI Pei-kang<sup>1</sup>, FANG Ming-lun<sup>2</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Mechanical and Automation, Shanghai University 200436, China)

**Abstract:** A type of polymer-coated stainless steel powder used in selective laser sintering technology was prepared. The effects of laser power, scanning velocity, preheating temperature and powder spreading density on sintering depth were studied, by the using of numerical simulation and practical measurement method. The results show that the sintering depth increases with the enhancement of preheating temperature, powder spreading density and laser power. The sintering depth decreases with the increase of scanning velocity. When the scanning velocity is less than 2mm/s, the sintering depth increases with the decrease of scanning velocity. How to select laser-sintering parameters of polymer-coated stainless steel powder was discussed based on the numerical simulation results.

**Key words:** polymer-coated 1Cr18Ni9Ti powder; selective laser sintering; sintering depth; numerical simulation

包覆金属粉末选择性激光烧结技术是目前国际上快速成形技术领域的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>, 该项技术根据三维实体的CAD模型, 利用激光束对包覆金属粉末进行扫描烧结, 逐层成形, 再结合必要的后处理工艺(高温烧结或渗金属), 可以方便快捷地制造出形状复杂的金属零件或模具, 特别适用于传统方法难以成形的复杂零件的多品种、小批量生产。

国内外研究结果表明<sup>[3-4]</sup>, 激光烧结深度是直接影

响烧结成形质量的重要因素之一, 合适的烧结深度是获得良好烧结成形质量的前提。烧结深度必须大于铺粉厚度, 才能保证激光能量能够熔透当前层使相邻两层产生烧结, 否则就会产生分层, 导致成形强度和精度变差, 甚至无法成形。因此, 对烧结深度的影响因素进行研究, 通过合理选择工艺参数来控制烧结深度, 具有十分重要的意义。

美国的 Bourell 等<sup>[5]</sup>以 PMMA 包覆的铜粉为成形

材料, Nelson 等<sup>[6]</sup>以聚碳酸酯包覆的陶瓷粉为成形材料, 对上述材料的激光烧结成形工艺进行了实验, 研究了激光能量参数与铺粉工艺参数对烧结深度的影响规律, 但并未根据实验结果进行工艺参数的优化选择。

本文作者采用表面处理结合物理改性的方法, 制备了一种用于激光烧结成形的多组分树脂体系包覆的不锈钢粉末材料, 利用数值模拟预测结合实际测量的方法, 研究了激光功率、激光束扫描速度、预热温度及铺粉密度等 4 个主要因素对烧结深度的影响作用, 并提出一种利用数值模拟预测结果进行激光烧结工艺参数选择的方法。

## 1 实验

### 1.1 包覆不锈钢粉末材料的制备

本实验所用包覆金属粉末由有机树脂包覆不锈钢(1Cr18Ni9Ti)颗粒制成, 其主要配方列于表 1。制备工艺方法为:

1) 用稀碳酸钠溶液清洗不锈钢粉末表面油脂, 再用稀盐酸清洗表面氧化物, 最后用润湿剂进行表面处理;

2) 将增滑剂、润湿分散剂、增脆剂以及不同熔点的有机树脂按一定比例在卤代烃中加热溶解制成包覆溶液;

3) 将包覆溶液和表面处理后的金属粉按一定比例在双锥回转真空干燥机中混合、烘干、回收溶剂, 然后进行冷冻粉碎, 经筛分, 得到一定粒度分布的粉末, 一般要求其最大粒径不超过 56  $\mu\text{m}$ 。

表 1 包覆不锈钢粉末材料的主要配方

Table 1 Composition of polymer-coated 1Cr18Ni9Ti powder (volume fraction, %)

1Cr18Ni9Ti	Wax	Colloid	PS
72	12	13	3

### 1.2 烧结深度数值模拟预测方法

利用文献<sup>[7]</sup>中温度场的数值模拟方法, 计算出粉末内部各点的温度, 温度峰值超过有机树脂熔点的区域即为熔化区域。据此可以估算出不同工艺参数时的烧结深度。

### 1.3 烧结深度实验测量方法

在激光烧结成形设备上, 采用不同工艺参数进行烧结试验, 把烧结后的薄试样片仔细清除未烧结粉末

后, 放在光学显微镜下进行测量, 可以得到相应的烧结深度测量值<sup>[8]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 预热温度对烧结深度的影响

预热温度对烧结深度的影响如图 1 所示。

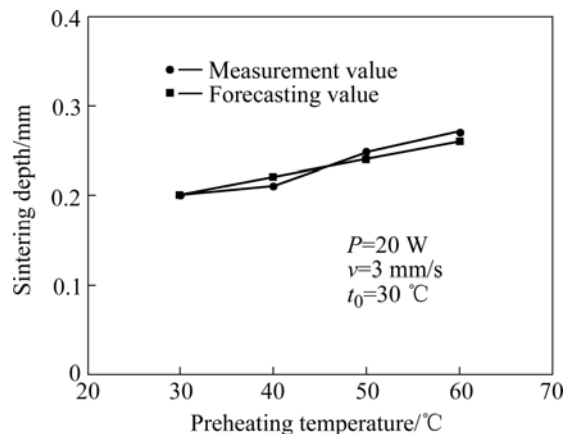


图 1 预热温度对烧结深度的影响

Fig.1 Effect of preheating temperature on sintering depth

由图可见, 随预热温度的提高, 烧结深度增加, 数值模拟预测值与实验测量结果的趋势是一致的, 吻合很好, 说明了利用数值模拟方法来预测烧结深度是合理和准确的。

预热温度对温度梯度的影响如图 2 所示。从图 2 可知, 预热温度提高, 粉末材料的热导率增加, 通过热传导向粉层内部传递的热量增大, 使粉末熔化区域向下部扩展, 从而增大熔透深度。提高预热温度, 还

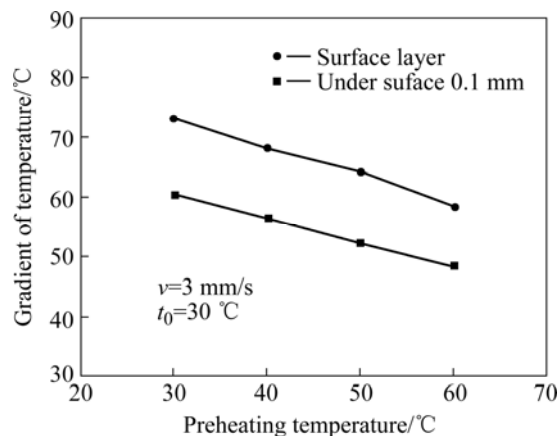


图 2 预热温度对温度梯度的影响

Fig.2 Effect of preheating temperature on gradient of temperature

具有如下优点:

1) 粉末内部各点的温度梯度减小,有利于消除内应力,避免产生卷边、翘曲等缺陷。

2) 在保证获得合格的烧结成形质量的前提下,还有利于节省激光能量,延长激光器寿命,或增大扫描速度,提高成形效率;但预热温度值也不宜太高,一般选择在低于粉末材料熔点 10~30 °C 的范围内。

## 2.2 铺粉密度对烧结深度的影响

铺粉密度对烧结深度的影响如图 3 所示。由图可见,随铺粉密度增加,烧结深度增加。数值模拟预测值与测量值存在一定误差。主要原因可能是因为测量时烧结薄片的粉末未清理干净,造成测量值高于预测值。由于数值模拟预测的烧结深度值精度为 0.025 mm,而实验测量时一个未清除干净的颗粒可能带来的误差为 0.056 mm(因为粉末最大粒径为 56 μm),所以可认为数值模拟预测值是比较准确的。

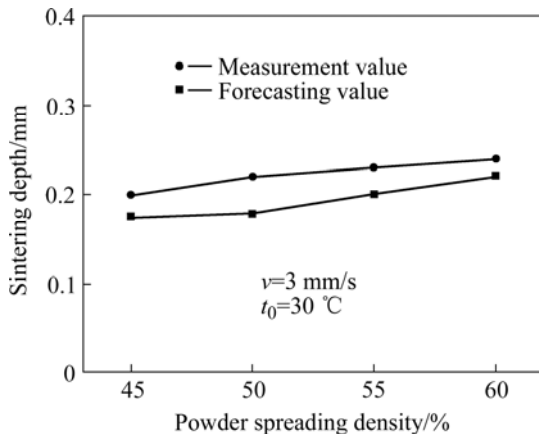


图 3 铺粉密度对烧结深度的影响

Fig.3 Effect of powder spreading density on sintering depth

由热导率计算公式可知<sup>[9]</sup>,粉末材料的热导率与空隙率成反比。若铺粉密度增加,空隙率减小,会导致热导率增加,从而使烧结区域向粉末层下部扩展,烧结深度相应有所增加。由于在一定的粉末条件(颗粒度及其分布等),铺粉密度的增加十分有限,所以想通过提高铺粉密度来较大地增加烧结深度的方法是不可行的。

但是铺粉密度增加,会使粉末颗粒间接触变得紧密,烧结时熔化的有机树脂在其间形成的粘结桥截面积增大。粘接强度的计算式为<sup>[10]</sup>

$$\sigma_f = S_q \sigma_q \quad (1)$$

式中  $\sigma_f$  为粘结强度;  $S_q$  为粘结桥截面积;  $\sigma_q$  为树脂

粘结桥强度(跟树脂粘结性能有关)。

可见,  $S_q$  增加,  $\sigma_f$  提高。所以,通过提高铺粉密度可以显著提高成形强度。

## 2.3 激光功率对烧结深度的影响

激光功率对烧结深度的影响如图 4 所示。由图可见,预测和测量结果均表明,随激光功率增加,烧结深度增大。激光加热时的功率密度  $q_1$  由激光功率  $P$  和激光加热面积  $S_1$  决定:

$$q_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{l_1 \times b_1} \quad (2)$$

式中  $l_1$  为激光光束长度;  $b_1$  为线束宽度。

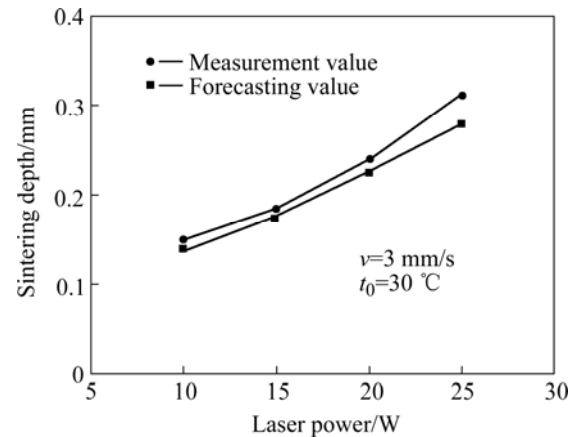


图 4 激光功率对烧结深度的影响

Fig.4 Effect of laser power on sintering depth

当激光功率大于 30 W 时,烧结深度略有下降,主要原因是输入热量太大,导致部分低熔点有机物的碳化和烧损。所以在一定的扫描速度下,对应于特定的激光功率有一最大烧结深度。

## 2.4 激光束扫描速度对烧结深度的影响

扫描速度对烧结深度的影响如图 5 所示。可以看出,当激光功率为 10 W 时,随扫描速度的升高,烧结深度显著降低,数值模拟及实验测量结果呈现相同的规律,二者之间数值也比较吻合;当激光功率较大时,如  $P=30$  W,当扫描速度较低时,随扫描速度增加烧结深度增加,到 2 mm/s 时可达最大值,然后随扫描速度增加,烧结深度将迅速降低。由图 6 数值模拟结果可以知道,在这种情况下,由于激光束输入能量太大,试样表面峰值温度超过了 300 °C,使部分低熔点有机物碳化和烧损。

## 2.5 工艺参数选择方法

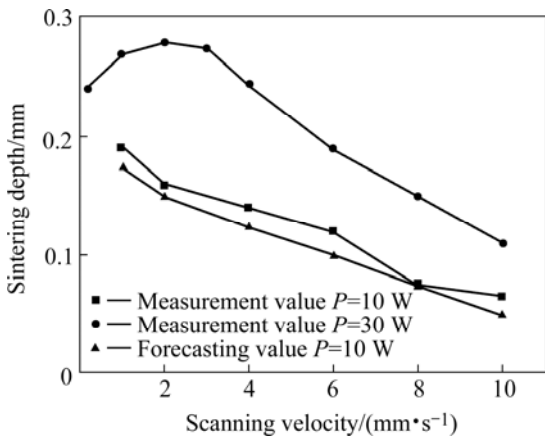


图5 扫描速度对烧结深度的影响

Fig.5 Effect of scanning velocity on sintering depth

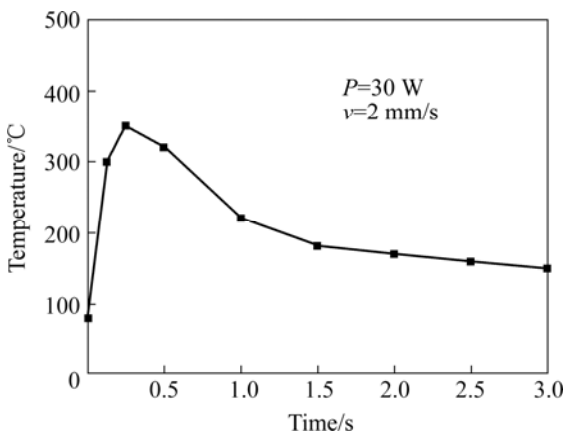


图6 试样表面温度与激光加热时间的关系

Fig.6 Relationship between surface temperature of sample and time of laser sintering

激光烧结成形过程是激光束由线成面、逐层叠加烧结而形成三维实体的,粉末通过激光烧结作用形成实体结构必须满足两个条件<sup>[11-13]</sup>:

1) 激光扫描线束之间要有一定程度的能量覆盖,即在一定的功率密度下,扫描速度不能太快,以保证足够的能量输入使当前层面内粉末粘接在一起,形成无松散粉末的二维面结构;

2) 铺粉厚度小于最大烧结深度,即激光能量必须保证熔透当前层使相邻两层产生粘接,形成三维的体结构。

从上面的研究分析可以知道,数值模拟的预测结果能够较好地反映工艺参数对烧结深度的影响关系。因此,可以应用数值模拟预测的方法来进行烧结成形工艺参数的优化选择,来满足烧结成形质量对烧结深度的要求。

当粉末材料的特征参数(对激光的吸收率、熔点、比热、颗粒尺寸及分布等)及激光束尺寸(长度及宽度)一定时,从烧结成形质量的基本要求(不产生分层)出发<sup>[14-17]</sup>,可按下述步骤来选择工艺参数:

1) 从成形精度及成形效率出发选择合适的铺粉厚度。选择较小的铺粉厚度,可以提高成形精度,但加工层数增多,效率降低;选择较大的铺粉厚度,可以提高加工效率,但成形精度降低。因此,应在综合考虑成形精度与加工效率的前提下,合理选择铺粉厚度。

2) 铺粉厚度选定后,根据粉末材料特点,进行铺粉参数优化实验,保证得到尽可能高的铺粉密度。

3) 根据粉末材料的熔点选择预热温度。预热温度以比粉末材料中低熔点组分物质的熔化温度低10~30 °C为宜。

4) 根据选定的铺粉厚度、铺粉密度及预热温度,利用数值模拟方法来优选激光功率及扫描速度,二者要合理匹配,保证既要得到良好的层内及层间烧结质量,又要尽可能地选择较大的扫描速度来提高加工效率。

### 3 结论

1) 采用表面处理结合物理改性的方法制备了一种适合于激光烧结成形的包覆不锈钢粉末。

2) 应用数值模拟预测结合实际测量方法,研究了激光工艺参数对烧结深度的影响作用。随着预热温度、铺粉密度与激光功率的增加,烧结深度增加;随着扫描速度的增加,烧结深度变小。但当扫描速度小于2 mm/s时,随着扫描速度增加,烧结深度反而增大。

3) 提出了一种依据数值模拟预测结果进行激光烧结工艺参数选择的方法。

### REFERENCES

- [1] Agarwala M, Bourell D L, Beman J. Direct selective laser sintering of metals[J]. Journal of Rapid Prototyping, 1995(1): 26-31.
- [2] Tolochko N K, Mozharov S E, Yadroitsev I A, et al. Selective laser sintering and cladding of single-component metal powders [J]. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(2): 88-97.
- [3] King D, Tansey T. Alternative materials rapid tooling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(2/3): 313-317.
- [4] ZHANG Ren-ji, SUI Guang-hua, LIANG Guang. Selective laser sintering and its materials[C]//Proceedings of the First

- International Conference on Rapid Prototyping Manufacturing'98. Beijing: Tsinghua Press, 1998: 506-514.
- [5] Bourell D L, Marcus H L, Barlow J W. Selective laser sintering of metals and ceramics[J]. *The International Journal of Powder Metallurgy*, 1992, 28(4): 369-381.
- [6] Nelson C J, Vail N K, Barlow J W. Selective laser sintering of polymer-coated silicon carbide[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1995(34): 1641-1651.
- [7] BAI Pei-kang, Cheng Jun. Numerical simulation of temperature field during laser sintering of polymer-coated molybdenum powder[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16: s603-607.
- [8] 白培康, 程 军. 树脂基复合成形材料激光烧结过程温度场数值模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2002, 10(1): 68-72.  
BAI Pei-kang, Cheng Jun. Numerical simulation of temperature field during laser sintering of resin-based composites powder[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2002, 10(1): 68-72.
- [9] Gusarov A V, Laoui T, Froyen L. Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(6): 1103-1109.
- [10] DENG Qi-lin, HU De-jin, XU Li-ming. Mechanism analysis and experimental research on forming parts by laser sintering ceramic powders[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(5): 57-59.
- [11] Sun M M, Nelson J C, Beaman J J, Marcus H L. A model for partial viscous sinter [J]. *Journal of Powder Metallurgy*, 1992(2): 46-50.
- [12] Kumar S, Chatterjee A N, Saha P. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel[J]. *Journal of Materials Processing Technique*, 2003, 136(1/3): 151-157.
- [13] Tolochko N K, Mozzharov S E, Yadroitsev I A. Selective laser sintering and cladding of single -component metal powders [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, 10(2): 88-97.
- [14] Syvenkyy Y, Kotlyarchuk B, Zaginey A, Sahraoui B. Laser-induced properties modification of CdTe:Cl and (Cd, Hg)Te: Computer simulation and experimental investigation[J]. *Optics Communications* 2005(256): 342-346.
- [15] Stampfl J, Seyr M. M, Luxner M H. low density cellular structures-rapid prototyping, numerical simulation, mechanical testing[C]//*Biological and Bioinspired Materials and Devices in San Francisco*. US: Warrendale Press, 2004: 823.
- [16] 杨 森. 激光快速成形金属零件的新方法[J]. *激光技术*, 2001, 25(4): 254-257.  
YANG Shen. New laser rapid prototyping method for metal parts[J]. *Laser Technology*, 2001, 25(4): 254-257.
- [17] Vail N K, Mozzharov S E, Yadroitsev I A. Balling process during selective laser sintering of powders[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, 10(1): 78-87.

(编辑 陈爱华)