

文章编号 1004-924X(2016)增-0484-09

## 激光选区熔化直接成型高致密锡青铜零件

白玉超, 杨永强\*, 王迪, 王安民

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了获取高致密度激光选区熔化锡青铜成型件, 直接制造出具有典型曲面、薄壁、圆孔特征的锡青铜功能零件, 对激光功率、扫描速度和扫描间距三个关键因素对致密度的影响进行研究。以激光选区熔化成型锡青铜成型件为研究对象, 以成型件致密度为评价指标, 设计三因素四水平正交实验。根据正交实验结果, 通过BP神经网络和遗传算法对成型工艺参数进行优化。采用MicroCT技术和阿基米德排水法研究优化后的成型件致密性, 并通过超景深立体成像技术研究其表面形貌, 最后采用优化工艺参数成型具有典型结构特征的风轮模型。实验结果表明: 激光功率、扫描间距、扫描速度对致密度均具有重要的影响, 影响程度依次减弱; 最优工艺参数为: 激光功率 177W, 扫描速度 327mm/s, 扫描间距 0.082mm, 该工艺下样品实际测量致密度 99.07%与预测值 99.12%基本符合; MicroCT 图像显示优化后样品内部致密性良好, 无明显夹杂、间隙等缺陷; 可直接成型出具有曲面、薄壁、圆孔典型特征的风轮模型, 表面无球化、裂纹、悬垂物等缺陷。以正交实验为基础, 采用BP神经网络与遗传算法对成型工艺参数优化是可行的, 成型致密度满足要求。

**关键词:** 激光选区熔化; 锡青铜; 正交实验; 神经网络; 遗传算法

**中图分类号:** TN249; TG146.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0484

## High relative density tin bronze parts directly manufactured by selective laser melting

BAI Yu-chao, YANG Yong-qiang\*, WANG Di, WANG An-min

(College of Mechanical and Automobile Engineering,  
South China University of Technology, Guangdong 510640, China)

\* Corresponding author, E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

**Abstract:** In order to obtain high density tin bronze parts and functional components with typical curved, thin-walled, round features manufactured by Selective Laser Melting, the influence of three key factors of laser power, scanning speed and scanning distance on the density of tin bronze parts manufactured by selective was researched. Design a three factors and four levels orthogonal experiment. And according to the results of experiment, the process parameters of parts are optimized by the method of BP neural network and genetic algorithm. The density of optimized parts has been researched by MicroCT and Archimedes drainage, and the surface topography of optimized parts has been studied by the technology of digital stereo imaging. Then a wind turbine model with typical structure characteristics has been manufactured by the optimized process parameters. The experimental results show that the laser power, scanning distance and scanning speed have important influence

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51275179)

on the density of the laser, and the degree of the influence is weakened in turn. Optimum parameter is laser power of 177W, scanning speed of 327mm/s and scanning pitch of 0.082mm. under the process, the density that measured by experiment is 99.7%, which is nearly the same as the theoretical optimization results of 99.12%. So the error of the two results is very small. The MicroCT image shows that there is no obvious inclusions, gap and other defects inside the parts. The wind turbines model with the typical characteristics of curved surface, thin wall and round hole can be directly manufactured, and the surface of the part have no ball, crack, and other defects. Therefore, the method for optimizing molding process parameters, which is based on the orthogonal experiment and combined with BP neural network and genetic algorithm, is feasible. The relative density of parts meets the requirement.

**Key words:** selective laser fusion; tin bronze; orthogonal experiment; neural network; genetic algorithm

## 1 引言

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是一种基于激光熔化金属粉末的增材制造技术<sup>[1]</sup>,基于“化整为零”、“逐层堆积”的思想,借助计算机辅助设计三维模型,通过切片软件转化为离散的二维数据,最后在增材制造设备中逐层堆积成三维金属零件<sup>[2]</sup>。与传统制造工艺相比,SLM 技术并不需要原胚和模具,节省了原材料,制造出具有复杂几何空间结构的功能金属零件<sup>[3]</sup>。基于误差反向传播(Back propagation)算法的多层前馈网络(Multiple-layer feed-forward network)(BP 网络),可以任意精度逼近任意的连续函数,被广泛应用于非线性建模、函数逼近、模式分类等方面<sup>[4]</sup>。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一类借鉴生物界的进化规律(适者生存,优胜劣汰遗传机制)演化而来的随机化搜索方法,也是计算机科学人工智能领域中用于解决最优化的一种搜索启发式算法,通过选择、交叉、变异,最终获得最优结果<sup>[5]</sup>。BP 神经网络与遗传算法结合可以较好地解决基于离散数据的最优寻值问题。

铜合金具有优良的导热导电性和耐磨性,广泛应用于各个领域,越来越多的国内外学者对铜合金的增材制造技术开展研究。铜合金具有较高的导热性和反光率,但通过改变工艺参数可以获得高致密度的铜合金模型<sup>[6]</sup>。Pogson S R 等对直接金属激光熔化技术成型铜零件工艺进行研究,制备出简单的三维铜质结构。研究表明熔化已成型层基体上的粉末比熔化基板上较厚粉末需

要更多的能量密度,基板的导热特性对熔池尺寸和冷却速率有重要影响<sup>[7]</sup>。程大伟等<sup>[8]</sup>等采用配备 Nd:YAG 激光器的 DiMetal 240 设备对铜磷合金粉末进行了工艺试验。实验结果表明,通过设定合适的工艺参数,铜磷合金粉末激光选区熔化技术可以直接制造金属零件。

目前国内外对 SLM 成型高致密度锡青铜合金的工艺研究较少,而对直接成型具有复杂空间结构的功能性零件的研究尚未见报道。本文研究激光选区熔化成型具有高反光率锡青铜成型件的能力,以成型致密度为评价指标,创新性的通过正交实验获取优化区间,并结合 BP 神经网络和遗传算法优化致密度成型工艺参数,然后通过 MicroCT 技术与超景深立体像技术,验证优化工艺的可行性,并采用优化后的工艺参数直接成型具有典型曲面、薄壁、圆孔特征的风轮模型,为 SLM 直接制造锡青铜合金零件及其应用提供依据。

## 2 实验过程

### 2.1 实验设备

实验采用 DiMetal-100 激光选区熔化成型设备,其成型原理如图 1 所示。系统包括:波长为 1.075  $\mu\text{m}$  的光纤激光器;高速高精度的振镜扫描单元和进口  $f-\theta$  透镜,扫描速度 10~5 000 mm/s,光斑聚焦直径为 70  $\mu\text{m}$ ;402 不锈钢薄片作为铺粉刷的柔性铺粉机构;精度达  $\pm 5 \mu\text{m}$  的精密铺粉系统,铺粉层厚可在 5~100  $\mu\text{m}$  内自由调整;带有负反馈的气体循环净化装置,可根据成型

过程自动调节净化强度。由于金属熔化后很容易发生氧化,特别是铝合金、纯钛等金属,所以整个成型过程在系统的密封成型室进行,并不断通入氩气等惰性气体进一步提供无氧制造环境。

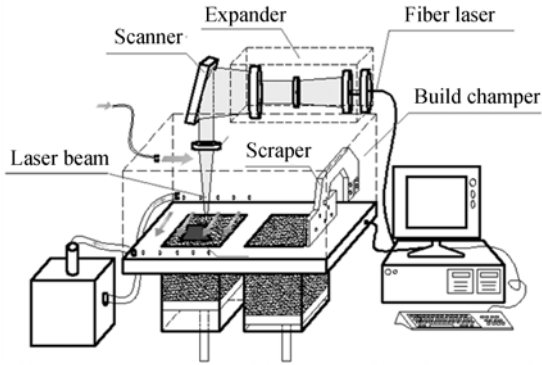


图 1 DiMetal-100 设备结构图

Fig. 1 SLM manufacturing principle

实验中用到的其他设备为赛多利斯 BS224S 电子分析天平, VHX-1000 超景深三维显微镜, SKYSCAN1172 高分辨率 MicroCT 系统。

## 2.2 实验材料

实验材料使用 500 目水雾化法 QSn 6.5-0.1 锡青铜合金粉末, 平均粒径  $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 。QSn 6.5-0.1 为含磷锡青铜, 具有良好的耐蚀性、耐磨性以及导热导电性, 广泛应用于工业领域。图 2 为铜合金混合粉末在扫描电子显微镜下观察的图像, 可知粉末整体为球形粉, 具有良好的流动性。表 1 为 QSn 6.5-0.1 锡青铜的化学成分与粒度分布。

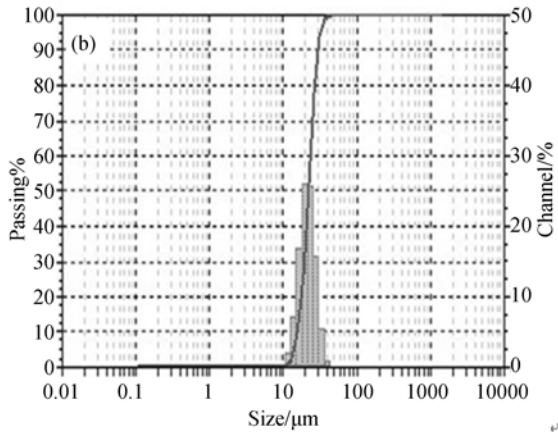
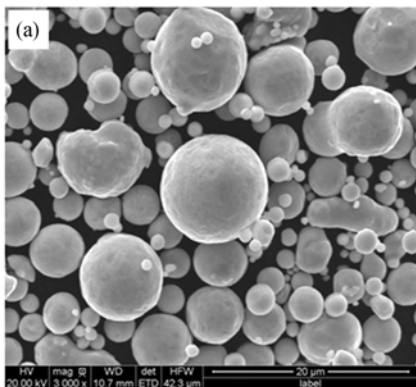


图 2 锡青铜粉末的 SEM 图像(a)与粒径分布(b)

Fig. 2 Observation of tin bronze alloy powder morphology by SEM (a) and particle size distribution(b)

表 1 铜合金混合粉末的成分含量

Tab. 1 Chemical composition of Tin bronze copper alloy powder

化学成分	Cu	Sn	P	Zn	Fe	Ni	其他
含量	余量	6.74%	0.12%	0.17%	0.02%	0.1%	0.08%

## 2.3 正交实验

### 2.3.1 实验因子与水平

影响激光选区熔化过程的因素很多, 主要有激光参数、机械运动参数、扫描参数、粉末特性以及实验环境等<sup>[9]</sup>。本文研究激光选区熔化成型 QSn6.5-0.1 锡青铜粉末工艺优化, 因此粉末的物理化学特性已经确定; 激光器选择英国 SPI 公司的 1 075 nm 掺镱双包层连续式 200 W 光纤激光器, 激光模式为高斯模, 光束质量稳定; 实验用机械机构经过反复实验和优化升级, 运动状态优良; 本实验在同一实验室环境下进行; 因此, 主要研究扫描参数对激光选区熔化成型锡青铜合金质量的影响, 具体包括激光功率、扫描速度和扫描间距 3 个影响因子<sup>[10]</sup>。正交实验如表 2 所示, 正交标头设计选用 3 因素 4 水平。其中因素激光功率对成型质量影响较大, 其数值的大小直接影响到锡青铜粉末的熔化状态; 根据线能量密度公式  $p = P/v$  ( $P$  为激光功率,  $v$  为扫描速度), 扫描速度大能量密度小, 扫描速度小能量密度大, 会影响单位时间单位面积内能量大小, 从而对熔池的凝固时间

和熔化深度有着直接影响;根据公式  $\mu = \frac{D-s}{D} \times 100\%$  ( $\mu$  为搭接率,  $D$  为熔池宽度,  $s$  为扫描间距), 在熔池宽度一定的情况下, 搭接率与扫描间距成负相关, 而扫描间距的大小直接影响到熔道之间的冶金情况, 对成型件的强度和致密度都有着显著影响。

表 2 正交实验表设计

Tab. 2 Design of orthogonal experiment table

Level	Laser power/W	Scan speed/mm. s <sup>-1</sup>	Scan space/mm
1	120	100	0.06
2	140	200	0.07
3	160	300	0.08
4	180	400	0.09

### 2.3.2 正交实验方案

根据实验因子和实验水平个数, 选择  $L_{16}(4^3)$  正交实验方案, 如表 3 所示。致密度对成型件的宏观与微观性能有着决定作用, 是衡量成型件质量的重要属性之一<sup>[11]</sup>, 反应了零件的夹杂、空隙、裂纹、熔合程度等情况, 直接决定了成型件的机械力学性能。选择锡青铜合金激光选区熔化成型后的致密度  $\rho_r$  作为正交实验的评价指标, 研究实验因素对成型质量的影响, 致密度越高表明成型质量越好。致密度采用阿基米德排水法原理<sup>[12]</sup>, 使用精度为 0.001 g 的 BS224S 电子天平进行测量。致密度为:

$$\rho_r = \frac{\rho_{Cu1}}{\rho_{Cu0}} \times 100\% = \frac{m_{air} \times \rho_{H_2O}}{\rho_{Cu0} \times (m_{can} - m_{H_2O})} \times 100\%, \quad (1)$$

其中:  $\rho_{Cu1}$  为测量锡青铜合金方块样品的密度;  $\rho_{Cu0}$  为锡青铜合金的密度, 为  $8.9 \text{ g/cm}^3$ ;  $m_{air}$  为在空气中使用电子天平测量的质量;  $\rho_{H_2O}$  为所用蒸馏水的密度, 为  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ;  $m_{can}$  为样品封蜡后在空气中的质量;  $m_{H_2O}$  为样品封蜡后在水中的质量。

### 2.3.3 正交实验结果分析

分析表 3 可知, 激光功率为 180 W, 扫描速度 200 mm/s, 扫描间距为 0.08 mm 时, 锡青铜合金的致密度最高达到 97.86%。对表 3 实验方案进行数据处理, 计算出致密度评价指标  $\rho_r$  值, 通过极

差分析和 F 检验得到 3 个因素的影响均为显著水平, 计算结果如表 4 所示。得出最优水平为激光功率水平 4, 扫描速度水平 3, 扫描间距水平 3, 与表 2 对比可知, 此时的工艺参数为激光功率 180 W, 扫描速度 300 mm/s, 扫描件间距 0.08 mm, 而该参数组合在正交实验没有直接体现出来, 这也说明正交实验可以预测出实验因素对评价指标的影响趋势, 但并不能包含所有实验, 包括最优工艺参数组合实验<sup>[13]</sup>, 因此需要基于正交实验进一步进行优化。激光功率的极值  $R_i$  最大, 扫描间距次之, 扫描速度的极值最小。根据表 4 中极值  $R_i$  的大小可以发现, 激光功率对激光选区熔化成型锡青铜合金的致密度影响最大, 扫描间距影响较小, 扫描速度影响最小。

表 3 三因素正交实验方案

Tab. 3 Scheme of orthogonal experiment with three factors

Experiment No.	Laser power/W	Scan speed/mm. s <sup>-1</sup>	Scan space/mm	Relative density/%
1	120	100	0.06	92.88
2	120	200	0.07	95.54
3	120	300	0.08	97.51
4	120	400	0.09	96.29
5	140	100	0.07	96.52
6	140	200	0.06	96.69
7	140	300	0.09	96.85
8	140	400	0.08	96.37
9	160	100	0.08	97.52
10	160	200	0.09	96.36
11	160	300	0.06	97.50
12	160	400	0.07	97.35
13	180	100	0.09	97.79
14	180	200	0.08	97.86
15	180	300	0.07	97.50
16	180	400	0.06	96.88

使用 Origin 软件对表 4 中的数据进行处理, 可以得出激光功率、扫描速度、扫描间距 3 个因素对成型致密度的影响, 如图 3 所示。可以看出, 在设定的参数范围内, 锡青铜的致密度随着激光功率的增加呈上升趋势, 表明随着激光功率的增加, 锡青铜粉末吸收的能量增多, 粉末逐步开始趋向于完全熔化, 与周围已成型部分形成致密的冶金结合效果, 致密度显著提升。然而, 并不是激光功

率越大越好,激光功率过大会导致部分液体金属汽化形成气孔、飞溅以及表面凹坑<sup>[14]</sup>,同时引起熔体汇聚和增大内应力<sup>[15]</sup>,从而影响成型质量和致密度。可以发现低激光功率时,致密度明显较低,这是因为能量输入不足,导致锡青铜粉末无法完全熔化,部分粉末处于多孔隙的烧结状态,而熔化的粉末在表面张力的作用下成圆球状分布,导致球化现象的产生,因此,致密度显著降低。

表 4 正交实验分析数据

Tab. 4 Analysis data of orthogonal experiment

Level	Laser power/ W	Scan speed/ mm, s <sup>-1</sup>	Scan space/ mm
1	95.55	96.18	95.99
2	96.61	96.61	96.48
3	96.93	97.34	97.31
4	97.51	96.47	96.82
Excellent level	4	3	3
R <sub>i</sub>	1.96	1.16	1.32
Primary and secondary order	1	3	2

随着扫描速度的增加,致密度先上升后明显下降。根据线能量密度公式  $p = P/v$ ,扫描速度低意味着线能量密度  $p$  较高,则激光在粉末局部停留时间较长,粉末熔化越充分,但是过高的温度也会导致部分金属汽化、飞溅现象,而且已熔化部分形成的熔池会将周围的粉末吸收并熔化,造成成型过程中局部出现无粉末的真空状态,导致成型件出现熔体汇聚而成的较大圆球和宏观较大的间隙<sup>[16]</sup>。另外熔化凝固时间过长也会增加氧化倾向,产生较多残余应力。所以扫描速度过低会造成致密度偏低。但是,高扫描速度会明显降低成型致密度。因为此时的能力输入偏低,不能充分熔化锡青铜粉末,熔道之间以及层与层之间没有形成致密的冶金结合,成型件内部残留大量大孔隙率的烧结态金属,因此成型致密度明显降低。而且,线能量输入过低,锡青铜粉末熔化时会在表面张力的作用下收缩成球装,从而造成成型件表面质量较差。

随着扫描间距,锡青铜的致密度呈现先上升后下降的趋势,在 0.06~0.08 mm 内逐渐上升,

在 0.08~0.09 mm 内逐渐下降。根据搭接率公式  $\mu = \frac{D-s}{D} \times 100\%$  可知,当熔道跨度一定时,随着扫描间距的增大致密度降低。然而,图 3 中出现先增加后降低的转折现象,这是因为扫描间距过低时,熔道之间的重叠率增大,则激光产生的温度场重叠率增大,会引起熔体汇聚现象而出现大量空隙缺陷,并增加成型件内应力而出现裂纹,从而降低了成型致密度。扫描间距过大时,根据搭接率公式可知,搭接率可能为负值(此时扫描间距大于熔道宽度  $s > D$ ),导致熔道之间无冶金结合,而是残留大量为熔化的锡青铜金属粉末,导致成型致密度迅速下降。因此,扫描间距的设定要合适,过大或过小都将对成型致密度产生不良影响。

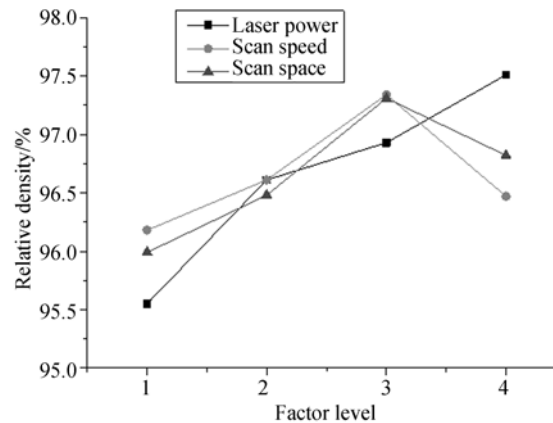


图 3 正交实验因素对成型致密度的影响

Fig. 3 Effects of orthogonal experiment factors on density of samples

## 2.4 工艺参数优化

正交实验可以显著减少实验次数,但最佳水平的选择被局限于初始制定的 5 个水平之内,该范围内的实验只代表了特殊工艺参数的实验条件,因此并不一定是最优的参数组合。本文针对正交实验的不足,基于 Matlab 平台以正交实验数据为基础,训练 BP 神经网络,把训练后的 BP 神经网络预测结果作为个体适应度值,通过选择、交叉和变异操作,寻找激光选区熔化成型锡青铜合金的最优工艺参数组合及最优值<sup>[17]</sup>。

### 2.4.1 BP 神经网络模型建立

正交实验只获取了 16 组孤立的输入输出数据,无法直接提取出输入输出之间的函数关系。

BP 神经网络具有极强的非线性拟合能力,随机抽取正交实验中的 12 组数据作为神经网络的训练样本,4 组数据作为测试网络拟合性能的样本。本文研究激光功率、扫描速度和扫描间距 3 个工艺参数因素对锡青铜成型致密度的影响,即 3 输入 1 输出的形式,为了简化模型,提高运算速度,选择选择含一个隐含层的 3-15-1 型 BP 神经网络结构。

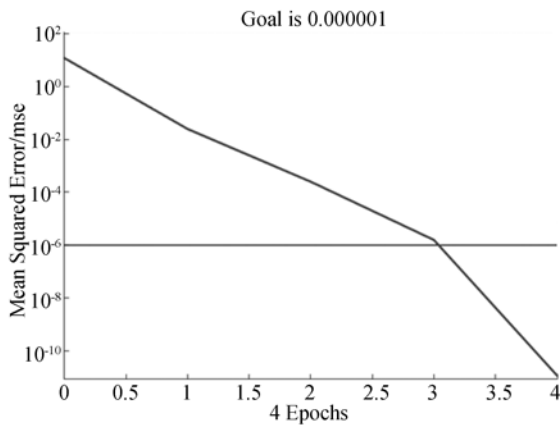


图 4 BP 神经网络训练误差变化曲线

Fig. 4 Compare of predicted value of BP neural network and expected value

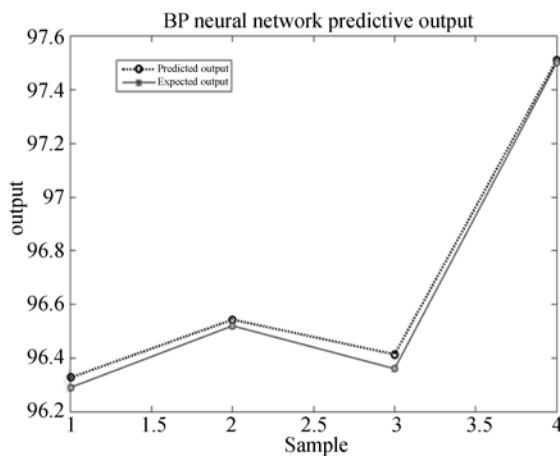


图 5 BP 神经网络预测与期望输出比较

Fig. 5 Error change curve of BP neural network training

将激光功率、扫描速度和扫描间距作为网络输入量,致密度评价指标  $\rho_c$  作为网络输出量,对输入量进行归一化处理。选择 S 型正切函数 (tansig) 作为第一层和第二层传递函数, BP 网络训练函数选择训练速度较快的 trainlm, BP 网络学习函数选择梯度下降动量学习函数 learngdm, 均方

误差性能函数选择默认的 mse。因此,建立 BP 神经网络: net = newff (inputn,outputn, 15, {'tansig','tansig'}, 'traingdm','learngdm','mse')。经过 4 次迭代,系统均方误差即达到  $1.0 \times 10^{-6}$ , 神经网络训练误差曲线图如图 4 所示,可见训练速度非常快。图 5 为网络训练预测与期望输出之间的关系,虚线部分表示训练好的 BP 网络预测输出结果,实线部分表示期望输出的结果,直观分析可以看到相对误差值最大为 0.05%, BP 神经网络能够准确预测致密度变化结果,因此可以把网络预测输出近似为实际结果。

### 2.4.2 遗传算法优化选择

遗传算法是模拟自然界遗传机制和生物进化论而成的一种并行随机搜索最优化方法,具有简单通用、鲁棒性强的特点。以激光功率、扫描速度和扫描间距作为设计变量,取值范围在所取正交设计变量水平的最大值和最小值之间,选择致密度评价指标  $\rho_c$  作为优化目标,显然目标值越大越好。

BP 神经网络训练结束后,随机选取生成规模为 20 的初始种群,采用二进制编码形式,个体长度为 10。交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05,最大迭代数为 100。将 BP 神经网络预测结果作为个体适应度函数对最大致密度进行控制。经过 100 次的迭代后种群目标函数均值和最优解的变化如图 6 所示。输出最优工艺参数结果为:激光功率 177 W,扫描速度 327 mm/s,扫描间距 0.082 mm。此时致密度达到 99.12%。

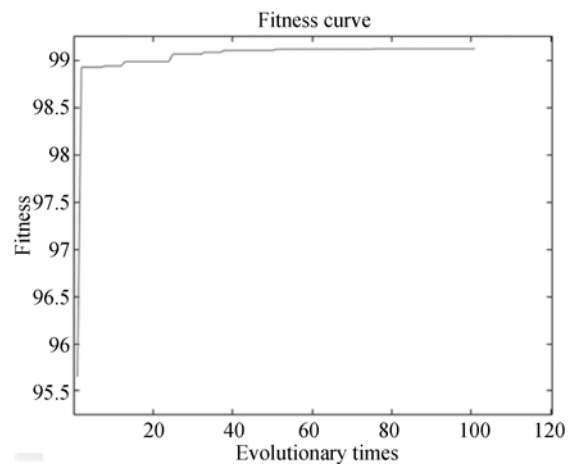


图 6 种群目标函数最优解变化

Fig. 6 Changes in the optimal solution of population objective function

### 3 实验结果验证与分析

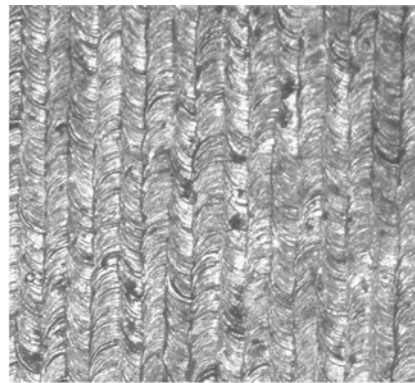
采用遗传算法优化后确定的工艺参数,在相同的实验条件下成型出新的块体样品,采用阿基米德排水法对成型致密度进行测量,测量结果为致密度达到 99.07%,与优化模拟结果 99.12%相比,相对误差为 0.05%,实际值与理论值之间误差极小,可以忽略不计。

使用 VHX-1000 超景深显微镜研究锡青铜块体成型试样表面形貌,如图 7 所示。图 7(a)所示为采用未优化时工艺参数:激光功率为 120W,扫描速度为 400 mm/s,扫描间距为 0.09 mm 成型的方形试样表面形貌,由于功率较低,而扫描速度较高,因此锡青铜粉末吸收的能量小,单条熔道中的粉末无法充分熔化,相邻熔道之间也没有充分润湿结合,综合导致试样表面出现“沙散状”形貌。图 7(b)所示为采用优化后工艺参数:激光功率 177 W,扫描速度 327 mm/s,扫描间距 0.082 mm 成型的方形试样表面形貌。可以明显看出清晰的熔道,且熔道之间搭接良好,表面较为平整。因为足够高的激光功率保证了锡青铜粉末的充分熔化并与相邻熔道良好润湿,同时合适的扫描速度使熔化的金属液体获得事宜的冷却速度,而优化的扫描间距保证了同一成型层内部熔道之间搭接良好,综合以上因素,可使成型件表面质量达到良好的效果。

使用 MicroCT 技术对上述图 7(a)和图 7(b)所对应的锡青铜方形试样内部缺陷进行研究,研究其内部成型质量。图 8(a)所示为对应于未优化时的内部 CT 图,其中白色点状物与淡灰色点



(a)优化前  
(a)Not optimized

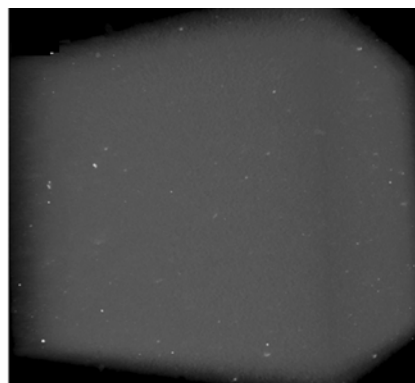


(b)优化后  
(b)Optimized

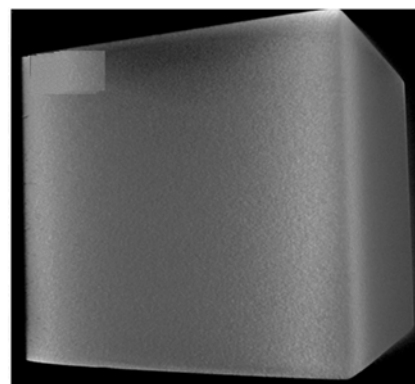
图 7 方形试样表面形貌

Fig. 7 Surface appearance of square samples

状物为样品内部的夹杂与空隙缺陷,样品致密度仅为 96.29%,与采用优化工艺成型的方形试样 8(b)相比,其内部缺陷较多。8(b)所示试样实测致密度达到 99.07%,内部致密性较高,几乎无夹



(a)优化前  
(a)Not optimized



(b)优化后  
(b)Optimized

图 8 方形试样 MicroCT 图

Fig. 8 MicroCT figures of square samples

杂和空隙等缺陷。对比图 8(a)和(b)可知,采用基于正交实验的 BP 神经网络和遗传算法获取优化工艺,具有良好的效果,可以获得内部致密性较高的锡青铜零件。

以上实验均建立在方形试样实验的基础上,为验证激光选区熔化能够成型出具有复杂空间结构的锡青铜零件的能力,选用局域典型曲面、薄壁和圆孔结构特征的风轮模型为成型对象,采用优化后的工艺参数:激光功率 177 W,扫描速度 327 mm/s,扫描间距 0.082 mm,在相同的实验条件下制造实物模型。如图 9 所示为成型的锡青铜模型,表面成型质量较好,没有出现明显的球化、裂纹、悬垂物等缺陷,进一步验证了使用激光选区熔化成型锡青铜零件的可行性,为

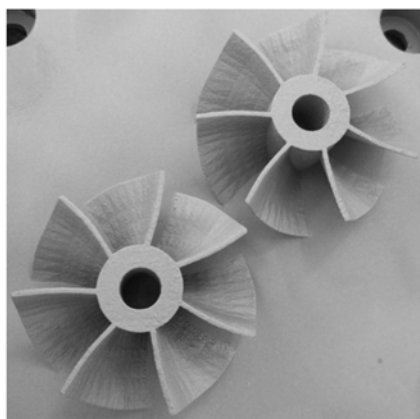


图 9 激光选区熔化成型锡青铜风轮模型

Fig. 9 Three-dimensional wind-round model of tin bronze alloy manufactured by SLM

#### 参考文献:

- [1] 杨永强,王迪,吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J]. 中国激光,2011,38(6):54-64.  
YANG Y Q, WANG D, WU W H. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011,38(6):54-64. (in Chinese)
- [2] 苏海军,蔚凯晨,郭伟,等. 激光快速成型技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. 中国有色金属学报,2013,23(6):1567-1574.  
SU H J, WEI K CH, GUO W, *et al.*. New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6): 1567-1574.
- [3] 曾光,韩志宇,梁书锦,等. 金属零件 3D 打印技术的应用研究[J]. 中国材料进展,2014, 33(6): 376-382.  
ZENG G, HAN ZH Y, LIANG SH J, *et al.*. Application of metal parts by 3D printing technology [J]. *Materials China*, 2014, 33(6): 376-382.
- [4] DAM M, SARAF D N. Design of neural networks using genetic algorithm for on-line property estimation of data mining applications[J]. *Computer and Chemical Engineering*, 2006,30(4):722-729.
- [5] ZAREI J, POSHTAN J. Bearing fault detection u-

后续成型具有复杂结构的锡青铜零件及其应用提供借鉴价值。

## 4 结 论

本文以激光功率、扫描速度和扫描间距作为可调整工艺参数,通过正交试验对激光选区熔化成型锡青铜合金的工艺参数进行优化设计,以块体样品的成型致密度为评价指标,得到各参数对成型致密度的影响程度为:激光功率>扫描间距>扫描速度。并分析了各个参数对成型致密度的影响规律。

在正交实验的基础上,通过 BP 神经网络训练预测和遗传算法优化得到的工艺参数:激光功率 177 W,扫描速度 327 mm/s,扫描间距 0.082 mm。通过阿基米德排水法进行实验验证,看出实际测量致密度为 99.07% 与数值模拟值 99.12% 相比误差极小。采用超景深三维扫描技术和 MicroCT 系统研究表面形貌和内部致密性,对比发现优化后的试样表面质量优良,内部几乎无明显缺陷。表明优化方式合理,优化工艺参数是可信的、有价值的。

最后采用优化后的工艺参数直接成型具有典型曲面、薄壁和圆孔结构特征的锡青铜风轮三维模型,验证激光选区熔化技术直接成型锡青铜合金零件的可行性。实验结果显示,模型表面质量较好,没有明显的球化、裂纹、悬垂物等缺陷。这为激光选区熔化成型锡青铜零件的应用提供了依据,具有重要的实际应用价值。

- sing wavelet packet transform of induction motor stator current[J]. *Tribology International*, 2007, 40(5):763-769.
- [6] LODES M A, RALFGUSCHLBAUER R, *et al.*. Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting [J]. *Materials Letters*. 2015,143:298-301.
- [7] POGSON S R, FOX P, SUTCLIFFE C J, *et al.*. The production of copper parts using DMLR[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2003,9(5):334-343.
- [8] 程大伟,杨永强,王池林,等.铜磷合金粉末选区激光熔化成型研究[J].*激光技术*,2009,33(1):63-66.  
CHENG D W, YANG Y Q, WANG CH L, *et al.*. Study on copper-phosphorus alloy powder formed by selective laser melting [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 63-66. (in Chinese)
- [9] 王迪,杨永强,吴伟辉,等.光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J].*中国激光*,2009,36(12):3233-3239.  
WANG D, YAGN Y Q, WU W H, *et al.*. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 32(12):3233-3239. (in Chinese)
- [10] 孙婷婷,杨永强,苏旭彬,等.316L 不锈钢粉末选区激光熔化成型致密化研究[J].*激光技术*,2010,34(4):443-446.  
SUN T T, YANG Y Q, SU X B, *et al.*. Research on 316L stainless steel powder relative density by selective laser melting [J]. *Laser technology*, 2010, 34(4):443-446. (in Chinese)
- [11] MORGAN R, SUTCLIFFE C, ONEILL W. Destiny analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives [J]. *Journal of Materials Science*, 2004,39:1195-1205.
- [12] 闫岸如,杨恬恬,王燕灵,等.变能量激光选区熔化 IN718 镍基超合金的成形工艺及高温机械性能 [J]. *光学 精密工程*,2015,23(6):1695-1704.  
YAN A R, YANG T T, WAGN Y L, *et al.*. Forming process and high-temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 super alloy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1695-1704. (in Chinese)
- [13] 王赞达,杨永强,宋长辉,等.基于响应面法优化激光选区熔化成型 CoCrMo 合金工艺及其电化学反应行为[J].*中国有色金属学报*,2014,24(10):2497-2505.  
WANG Y D, YANG Y Q, SONG CH H. Process optimization and electrochemical behavior of CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting based on response surface method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(10): 2497-2505.
- [14] LIU Y, YANG Y Q, MAI SH ZH, *et al.*. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of ALSI 316L stainless steel powder[J]. *Materials&Design*. 2015,87(15):797-806.
- [15] LOUVIS E,FOX P,SUTCLIFFE C J, *et al.*. Selective laser melting of aluminium components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011 (211):275-284.
- [16] SUN Z, TAN X, TOR S B, *et al.*. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates [J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 197-204.
- [17] 闫盖,郑艳萍,张文彦,等.基于正交实验的板料冲压成形工艺参数优化[J].*热加工工艺*,2013,42(17):94-97.  
YAN G, ZHENG Y P, ZHANG W Y, *et al.*. Process parameters optimization of sheet stamping forming based on orthogonal experiment [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(17): 94-97. (in Chinese)

#### 作者简介:



白玉超(1988—),男,河南永城人,博士研究生,2013年于华南理工大学获得学士学位,主要从事激光3D打印及激光快速成型方面的研究。E-mail: 1101085661@qq.com

#### 导师简介:



杨永强(1961—),男,河北定州人,博士,教授,博士生导师,1982年、1987年、1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位。主要从事激光3D打印快速成型技术方面的研究。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn