

微型器件选区激光熔化成形温度场的有限元分析

陈冠宇, 黄传真

山东大学; 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室

摘要: 为选择合适的工艺参数实现微型器件的选区激光熔化直接成形, 利用 ANSYS 有限元软件对成形过程的温度场进行了分析。结果表明, 温度场的形貌大致呈椭圆形, 熔池位置滞后于激光光斑位置, 粉末层最高温度、熔池最大宽度和深度均随着扫描速度的增加而减小、随着激光功率的增加而增大。根据分析结果选择合适的工艺参数, 当光斑直径为 $50\mu\text{m}$ 、粉末层厚为 $30\mu\text{m}$ 、激光功率为 200W 、扫描速度为 800mm/s 和扫描间距为 $100\mu\text{m}$ 时, 成形的效果最好, 制备出了具有较高精度和物理性能的微型钻头。

关键词: 选区激光熔化; 温度场分析; 熔池尺寸; 微型器件

中图分类号: TG115; TG61; TH161.3

文献标志码: A

Finite Element Analysis on Temperature Field of Micro Device Forming by Selective Laser Melting

Chen Guanyu, Huang Chuazhen

Abstract: The temperature field of forming process is analyzed by the finite element analysis software ANSYS, in order that the suitable process parameters are chosen for directly forming of micro devices with selective laser melting. The results show that the temperature field is oval-shaped, and the location of the molten pool lags behind the laser spot. The maximum temperature of the powder layer, the maximum width and depth of the molten pool are decreased with the increase of the laser scanning speed, while increased with the increase of the laser power. A set of suitable process parameters is obtained; the laser power is 200W , the scanning speed is 800mm/s , the scanning pitch is $100\mu\text{m}$, the diameter of laser spot is $50\mu\text{m}$ and the thickness of powder layer is $30\mu\text{m}$. Based on the work, a microdrill with a high accuracy and physical properties is formed successfully.

Keywords: selective laser melting; temperature field analysis; molten pool dimension; micro device

1 引言

选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 是根据三维 CAD 模型, 采用层层叠加的方式直接成形特定零件的金属器件成形技术。在成形过程中金属粉末完全熔化, 产生冶金结合的金属实体, 致密度接近 100% , 尺寸精度小于 0.1mm ^[1]。在微型器件的直接成形过程中, 由于激光光斑直径和粉末层厚小, 功率密度大, 激光作用时间短, 温度变化快, 不易采用试验测定的方法来确定 SLM 过程的温度场分布规律。因此, 微型器件 SLM 成形过程中温度场分布和变化规律的揭示, 对于选择合适的 SLM 工艺参数、指导微型器件 SLM 直接成形具有重要意义。

对 SLM 温度场的分析主要是研究不同工艺参数下零件成形过程中的温度变化规律。Roberts I. A. 等^[2]通过建立 SLM 有限元模型研究不同粉末层之间的温度场分布规律。姜献峰等^[3]对 316L 不锈

钢粉末 SLM 瞬态温度场进行分析, 研究不同熔道之间的温度场分布和不同搭接率下的温度变化规律。陈德宁等^[4]和 Saprykin A. A. 等^[5]通过温度场分析研究了扫描策略对温度变化的影响规律。而对于微型器件 SLM 成形过程中熔池尺寸的预测以及通过预测熔池尺寸而优化工艺参数的研究较少。章文献等^[6]和董明明等^[7]分别对铁粉和镍基合金的 SLM 成形过程温度场进行分析, 预测了熔池尺寸, 但由于样本数量太少, 未能获得合适的工艺参数范围。

本文采用 ANSYS 有限元分析软件, 建立微型器件 SLM 成形过程的温度场分析模型对温度场分布规律进行研究, 优化 SLM 成形的工艺参数范围, 并根据分析结果指导 SLM 试验, 制备出了微型器件。

2 建立有限元模型

2.1 几何模型

图 1 为选区激光熔化几何模型。激光束照射到金属粉末层上, 以恒定的速度沿 Z 轴移动, 金属粉末在激光束的照射下吸收能量, 温度迅速升高, 达到

金属粉末的熔点时金属粉末熔化形成熔池,随后金属粉末迅速冷却凝固,导致熔池尺寸较小且存在时间极短。

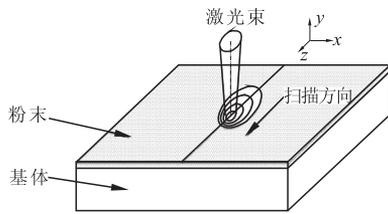


图1 选区激光熔化几何模型

该过程采用经典热传导方程可表示为^[8]

$$\lambda_e \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_c + q_g = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, λ_e 为粉末有效的导热系数 ($W/m \cdot K$); T 为温度 (K); t 为时间 (s); ρ 为粉末压实密度 (kg/m^3); C 为材料比热容 ($J/kg \cdot K$); q_c 为材料向空气散失的热量 (W/m^3); q_g 为激光功率密度 (W/m^3)。

2.2 基本假设

考虑到 SLM 成形过程中的实际情况,并权衡计算量和计算精度,对上述传热几何模型作如下假设:①材料密度为常数,其它所有热物性参数与温度有关;②忽略材料的汽化作用;③对流传热和辐射传热仅发生在外边界和气体之间,且对流系数和辐射系数均随温度变化;④不考虑微小熔池内部的化学反应和熔池的流动性;⑤激光功率密度服从高斯分布。

3 温度场的有限元分析

3.1 材料的热物性参数

基体材料为 316L 不锈钢,密度 $7.93 \times 10^3 kg/m^3$ 。表 1 和表 2 是 316L 不锈钢和粉末材料 CL20ES 不锈钢在不同温度时的热物性参数^[9]。

表 1 316L 不锈钢的热物性参数

温度 $T(K)$	20	200	400	600	800	1000
比热容 $C(J/kg \cdot K)$	472	488	505	527	562	628
导热系数 $\lambda(W/m \cdot K)$	13.07	14.59	16.30	18.18	20.54	23.95

表 2 粉末材料 CL20ES 不锈钢的热物性参数

温度 $T(K)$	20	200	400	600	800	1000
比热容 $C(J/kg \cdot K)$	472	488	505	527	562	628
导热系数 $\lambda(W/m \cdot K)$	12.48	13.93	15.57	17.36	19.61	22.87

粉末材料为 CL20ES 不锈钢,密度为 $3.97 \times 10^3 kg/m^3$,其导热系数为^[8]

$$\lambda = 6\rho\lambda_e/\pi \quad (2)$$

式中, λ_e 为合金材料的导热系数 ($W/m \cdot K$); p 为铺粉相对密度(此处取 0.5)。

3.2 相变潜热的处理

在 SLM 成形过程中,金属粉末材料经历了固—液—固状态的转变,存在相变过程,所以需要考虑相变潜热对温度场的影响。在 ANSYS 中通过定义材料在不同温度时的焓值来考虑相变潜热。焓值可定义为密度与比热容的乘积并对温度进行积分^[10],有

$$H = \int \rho C(T) dT \quad (3)$$

式中, H 为热焓 (J/m^3); ρ 为材料密度 (kg/m^3); C 为材料的比热容 ($J/kg \cdot K$); T 为温度 (K)。

表 3 是基体材料和粉末材料在不同温度时的焓值。

表 3 基体材料和粉末材料的焓值

温度 $T(K)$	0	1300	1400	1500	1600
基体焓值 $H_1(\times 10^9/J \cdot m^{-3})$	0	5.8	6.2	9.1	9.4
粉末焓值 $H_2(\times 10^9/J \cdot m^{-3})$	0	2.9	3.1	4.5	4.7

3.3 网格划分

SLM 成形过程的模型主要由基体(模型下方部分)和粉末层(模型上方部分)两部分组成,尺寸分别为 $2mm \times 1mm \times 3mm$ 和 $2mm \times 0.03mm \times 3mm$ 。由于模型具有对称性,取其一半建立有限元模型(见图 2)。采用 Solid70 八节点实体单元进行网格划分,其中激光扫描熔化区采用 $0.005mm \times 0.01mm \times 0.03mm$ 的较小单元网格,其它区域网格逐渐变大。该处理方式既能保证足够的计算精度,也能提高计算效率。

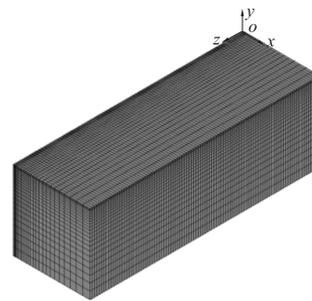


图 2 有限元模型

3.4 初始条件和边界条件

设 $t = 0$ 时、金属粉末的初始温度值为 T_0 ,可得初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (4)$$

当 $t > 0$ 时,在任意时间段内金属粉末表面单位面积所吸收的激光热量,应等于该表面向金属粉末内部传入的热量、表面对流换热和辐射换热的热量之和。故自然边界条件可表述为^[11]

$$\lambda_e \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_0) + \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (5)$$

式中, λ_0 为金属粉末有效导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); T 为 t 时刻的材料表面温度 (K); T_0 为初始温度 (K); h 为对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$); σ 为 Stefan-Boltzmann 常量 (其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$); ε 为热辐射系数。

在 ANSYS 中, 不能在同一边界上同时施加两种载荷 (边界条件)。为计算方便, 统一考虑对流换热和辐射换热, 得到表 4 的总对流系数^[12]。

表 4 随温度变化的总对流系数

温度 $T(\text{K})$	20	100	300	600	750	900
总对流系数 $\beta(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	6	18	30	60	84	120
温度 $T(\text{K})$	1000	1200	1300	1500	1800	2000
总对流系数 $\beta(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	147	200	251	352	400	500

通过 ANSYS 将模型的初始温度设为环境温度 (25°C), 模型的对称面施加对称条件, 基体底面施加绝热边界条件, 其它各面均施加对流边界条件。

3.5 高斯热源的加载

高斯激光热流密度分布为^[13]

$$I = \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) \quad (6)$$

式中, A 为材料热吸收率; P 为激光功率 (W); r_b 为有效激光半径 (m)。

在 SLM 成形过程中, 高斯激光束处于运动状态, 在 ANSYS 中可以用 APDL 语言编程实现这一动态过程。由建模过程可知, 激光热流密度分布在 XOZ 平面内, 沿 Z 轴移动的距离与时间成正比, 因此可以定义一个与 X 轴、 Z 轴和时间 t 相关联的函数 Q 为

$$Q(x, z, t) = \begin{cases} \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left\{-\frac{2[x^2 + (z-ut)^2]}{r_b^2}\right\}, & x^2 + (z-ut)^2 \leq r_b^2 \\ 0, & x^2 + (z-ut)^2 > r_b^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, A 为材料热吸收率 (取 0.4); P 为激光功率 (W); v 为扫描速度 (m/s); r_b 为有效激光半径 (m)。

通过函数 $Q(x, z, t)$ 将热流密度以载荷形式施加到 XOZ 平面上, 实现了高斯激光束的移动, 解决了激光热流密度在金属粉末层平面上的分布。

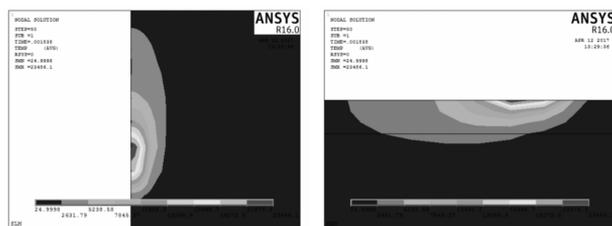
4 试验结果分析

4.1 温度场典型形态特征

针对微型器件进行温度场分析, 需要选取尽可能小的光斑直径 ($d = 50\mu\text{m}$) 和层厚 ($h = 30\mu\text{m}$), 研究激光功率 P 和扫描速度 v 对温度场的影响规律。

图 3 是加工参数 $P = 200\text{W}$ 、 $v = 800\text{mm}/\text{s}$ 时、模

型 XOZ 平面和 YOZ 平面的温度分布图。由图可见, 温度场的形貌大致呈椭圆形, 且等温线在熔池前部比在熔池后部密集得多。产生这种区别的原因: ①移动热源使其在扫描线上产生了热量积累; ②熔化区域高的导热系数有利于热量传递, 导致熔池最大宽度和最大深度滞后于激光光斑的位置。



(a) XOZ 平面

(b) YOZ 平面

图 3 温度分布图

4.2 工艺参数对熔池深度的影响规律

基体材料的熔点在 1400°C 左右。熔池深度是指在 YOZ 平面内、温度达到 1400°C 以上且离 Z 轴最远的垂直熔化距离。

图 4 显示了激光功率和扫描速度对熔池深度的影响规律。由图可见, 随着扫描速度的增加, 熔池存在时间变短, 热传导时间变短, 故熔池深度减小, 但减小的幅度越来越小; 随着激光功率的增加, 功率密度增加, 单位时间内吸收的热量增加, 所以熔池深度增大, 但增大的幅度越来越小。

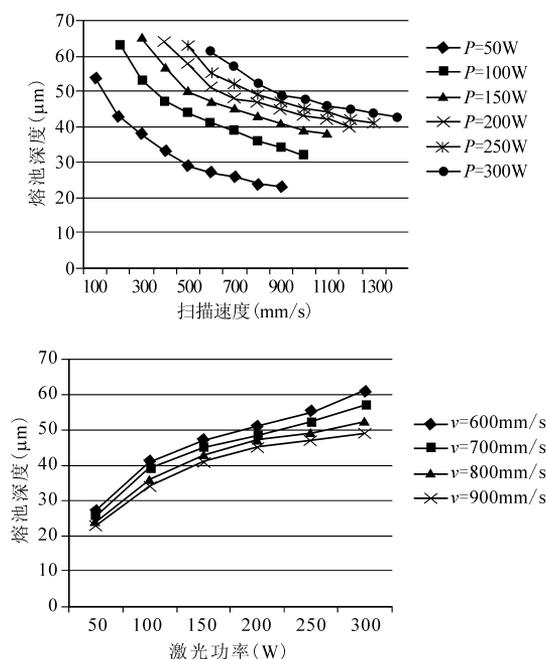


图 4 激光功率和扫描速度对熔池深度的影响

温度场分析时采用的层厚 $h = 30\mu\text{m}$, 为保证层与层之间的紧密结合, 熔池深度至少要达到 $30\mu\text{m}$, 而熔池深度最合适的范围为 $40 \sim 50\mu\text{m}$ 。根据对熔

池深度的预测,选取合适的激光功率和扫描速度(见图5),即 $h_2 = 40\mu\text{m}$ 和 $h_3 = 50\mu\text{m}$ 之间区域为合适的激光功率和扫描速度范围。

4.3 工艺参数对熔池半宽度的影响规律

粉末材料的熔点在 1400°C 左右。熔池半宽度是指在 XOZ 平面内、温度达到 1400°C 以上且离 Z 轴最远的垂直熔化距离。

图6为激光功率和扫描速度对熔池半宽度的影响规律。由图可知,与熔池深度的变化规律相似,随着扫描速度的增加,熔池半宽度减小;随着激光功率的增加,熔池半宽度增大。

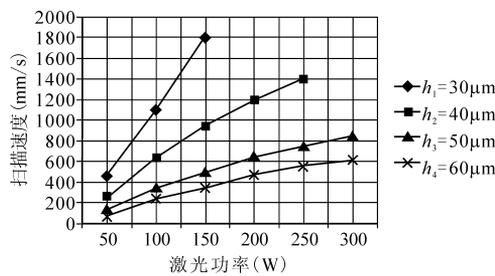


图5 合适的激光功率和扫描速度

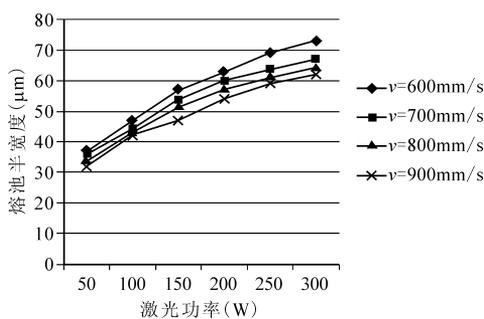
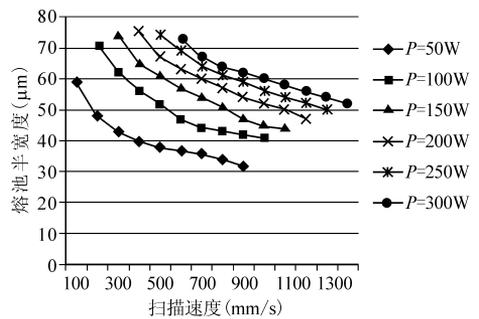


图6 激光功率和扫描速度对熔池半宽度的影响

4.4 温度变化规律

图7为粉末最高温度随激光功率和扫描速度的变化规律。由图可见,随着扫描速度的增加,最高温度减小,且大致呈线性关系;随着激光功率的增加,最高温度增大,也呈线性关系。

图8为加工参数 $P = 200\text{W}$ 、 $v = 800\text{mm/s}$ 时、在激光扫描路径 $Z = 1.5\text{mm}$ 处、温度和温度变化速率随时间的变化情况。由图可见,随着激光束扫描时

间的延长,粉末温度迅速升高,尔后迅速下降,导致熔池存在时间极短,约为 0.2ms ;而温度变化速率极大,冷却速率高达 $3 \times 10^8^\circ\text{C/s}$ 。在极短的时间内,粉末迅速熔化和凝固,可以得到细化的材料组织,有利于改善制件的性能。

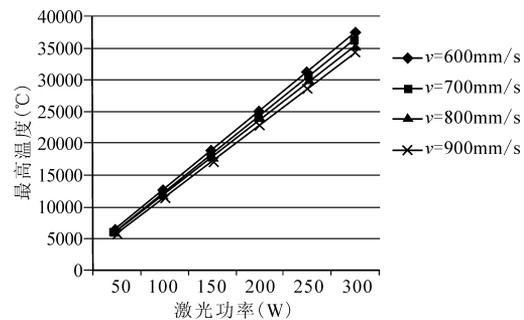
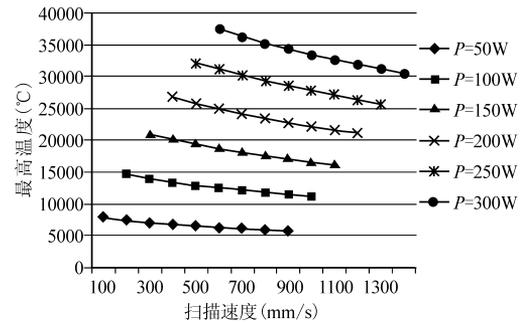
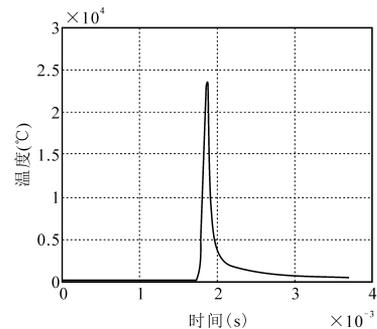
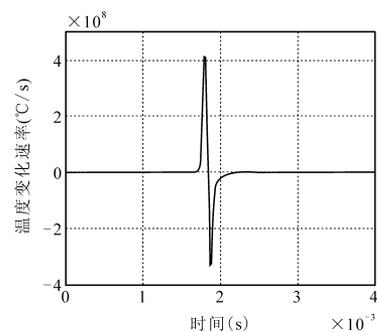


图7 激光功率和扫描速度对粉末最高温度的影响



(a) 温度



(b) 温度变化速率

图8 温度和温度变化速率随时间的变化情况

5 试验验证

采用德国 EOS 金属 3D 打印机 EOS M280,光斑

直径 $d = 50\mu\text{m}$, 层厚 $h = 30\mu\text{m}$, 与温度场分析参数相同。根据图 5 选取合适的激光功率 $P = 200\text{W}$ 和扫描速度 $v = 800\text{mm/s}$, 根据图 6 选取在上述激光功率和扫描速度下的熔池宽度 $b = 57 \times 2 = 114\mu\text{m}$ 。为保证熔道之间的紧密结合, 选择合适的扫描间距 $s = 100\mu\text{m}$ 。采用上述 SLM 工艺参数, 成功制备了直径 $d = 3\text{mm}$ 的微型钻头(见图 9)。由图可见, 通过 SLM 制备的微型钻头, 其基本结构如横刃、后刀面和螺旋槽等都有较好的成形形貌。测量可知, 微型钻头的直径为 3.02mm , 材料的致密度为 99.5% , 硬度为 240HV , 表面粗糙度 R_a 为 $2.9\mu\text{m}$, 具有较高的加工精度和物理性能。



图 9 SLM 制备的微型钻头

6 结语

采用 ANSYS 有限元软件对微型器件的 SLM 成形温度场进行了分析, 研究了激光功率和扫描速度对温度场的影响规律。

(1) 在不同成形参数下, 温度场的形貌大致呈椭圆形, 位于熔池前部的等温线比熔池后部密集, 导致具有最大宽度和最大深度的熔池位置滞后于激光光斑位置。

(2) 粉末层最高温度、熔池最大宽度和深度随扫描速度的增加而减小, 随激光功率的增加而增大, 实现了对特定熔池尺寸的合理工艺参数范围的选择。

(3) 当激光功率 $P = 200\text{W}$ 、扫描速度 $v = 800\text{mm/s}$ 时, 熔池的存在时间极短, 约 0.2ms ; 而温度变化速率极大, 冷却速率高达 $3 \times 10^8\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。在此工艺参数下制备出了具有较高精度和物理性能的微型钻头。

参考文献

[1] 王广春. 增材制造技术及应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 59 - 62.
 [2] Roberts I A, Wang C J, Esterlein R, et al. A three - dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2009, 49(12 - 13): 916 - 923.

[3] 姜献峰, 宋荣伟, 熊志越, 等. 316L 金属粉末选择性激光熔化瞬态温度场的模拟[J]. 应用激光, 2015(6): 648 - 651.
 [4] 陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响[J]. 中国激光, 2016(4): 68 - 74.
 [5] Saprykin A A, Ibragimov E A, Babakova E V. Modeling the temperature fields of copper powder melting in the process of selective laser melting[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016, 142(1): 012061.
 [6] 章文献, 史玉升, 李佳桂, 等. 选区激光熔化成形温度场模拟与工艺优化[J]. 应用激光, 2008, 28(3): 185 - 189.
 [7] 董明明, 王立强. 选择性激光熔化 IN718 合金温度场分析[J]. 中国科技信息, 2017(2): 78 - 80.
 [8] 李佳桂. 金属粉末选择性激光熔化成形模拟及试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
 [9] 谭真, 郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 127 - 128.
 [10] 李雅莉. 选区激光熔化 AlSi10Mg 温度场及应力场数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
 [11] Neela V, De A. Three-dimensional heat transfer analysis of LENS TM, process using finite element method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 935 - 943.
 [12] 应丽霞, 王黎钦, 陈观慈, 等. 3D 激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场的有限元仿真与计算[J]. 金属热处理, 2004, 29(7): 24 - 28.
 [13] Li Y, Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder[J]. Materials & Design, 2014, 63(2): 856 - 867.

第一作者: 陈冠宇, 硕士研究生, 山东大学机械工程学院, 250061 济南市

First Author: Chen Guanyu, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

通信作者: 黄传真, 教授, 山东大学机械工程学院, 250061 济南市

Corresponding Author: Huang Chuazhen, Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China