

文章编号: 1001-3806(2008)04-0410-03

选区激光熔化快速成型过程温度场数值模拟

师文庆^{1,2}, 杨永强^{1*}, 黄延禄¹, 程大伟¹

(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广州 510640; 2. 广东海洋大学 理学院, 湛江 524088)

摘要: 为了优化铜磷合金粉末选区激光熔化快速成型的工艺参量, 采用有限元分析软件 ANSYS 对其温度场进行了模拟, 经理论分析和实验验证, 获得了其温度场分布的数据。对材料未知温度范围内的热特性参量用插值法近似获得, 采用不等网格剖分方式, 用热焓去处理相变潜热问题。结果表明, 其温度场的等温线分布为椭圆形, 用模拟遴选的工艺参量 (在铺粉厚度为 0.22mm 时, 选用激光功率为 100W、扫描速度为 0.25m/s 和激光束半径为 0.1mm) 能实现选区激光熔化快速成型。这一结果对其它粉末材料的选区激光熔化快速成型也是有帮助的。

关键词: 激光技术; 选区激光熔化; 模拟; ANSYS 温度场

中图分类号: TF124 **文献标识码:** A

Simulation of the temperature field in rapid prototyping of selective laser melting

SHI Wen-qing^{1,2}, YANG Yong-qiang¹, HUANG Yan-lu¹, CHENG Da-wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. College of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract In order to implement rapid prototyping of Cu-P alloy powder based on selective laser melting, the temperature field was simulated by the finite element analysis software—ANSYS before fabrication so that its distribution could be obtained. During the process of simulation, the thermal physical parameters of material at certain temperature were obtained through interpolation method, an unequal meshing method was adopted and the thermal enthalpy could be used to replace the latent heat of fusion. It shows that the temperature field distribution likes an ellipse and the parameters selected by simulation (a laser power of 100W, a scanning speed of 0.25m/s and a beam spot radius of 0.1mm) were selected when the layer thickness was 0.22mm can be used in selective laser melting.

Key words laser technique; selective laser melting; simulation; ANSYS; temperature field

引 言

选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 是最近十年来才发展起来的一种先进制造技术。用 SLM 技术可得到冶金结合的、相对密度接近 100% 的金属实体, 适合于成型各种复杂形状的工件^[1]。不同材料的热物理特性不同, 加工过程中的温度场分布不同, 而温度场的分布对其成型结果起决定性的作用^[2-3]。所以, 针对不同材料 SLM 的工艺参量较难选择的问题, 在加工前对其温度场进行模拟^[4-6], 通过模拟反过来调整其工艺参量以得到更好的加工结果, 如此以达到通过模拟来指导实际加工的目的。

ANSYS 是一种通用有限元分析软件, 它可用于计算温度场分布。作者用 ANSYS 的热分析对 SLM 过程

进行数值模拟, 通过模拟反过来指导 SLM 加工。

1 实验方法与材料参量

实验是在 50mm × 30mm × 0.5mm 的不锈钢板上铺上厚度为 0.22mm 铜磷合金粉末进行的, 激光扫描速度 v 分别以 0.10m/s、0.25m/s、0.50m/s 进行扫描, 激光功率 P 分 30W、100W、200W 3 档, 光斑半径 r 取 0.5mm 和 0.1mm 两种情况。对扫描速度、激光功率、光斑半径 3 个参量组合为各种加工可能进行模拟。所用铜磷合金粉末 (质量分数分别为: $w_{Ni} = 0.010$, $w_P = 0.075$, $w_{Sn} = 0.065$, 其余是 Cu), 其粒度为 200 目, 熔点 $T_m = 740^\circ\text{C}$ 。用混合的氮气和氩气作为保护气体, 初始温度为 25°C 。用半导体抽运 Nd:YAG 激光器 ($\lambda = 1.06\mu\text{m}$), 输出高斯光束。通过给定不同的激光功率、光斑半径和扫描速度, 对 SLM 过程进行计算机数值模拟。

按照 Kopp-Neumann 定律, 合金材料的物理特性如密度、热导率、比热容、热焓由组元的物理特性按比例相加得出, 即:

$$x = \sum_n Y_n x_n \quad (1)$$

作者简介: 师文庆 (1971-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事物理电子和激光技术的教学与研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: mecyqiang@scut.edu.cn

收稿日期: 2007-05-30; 收到修改稿日期: 2007-07-12

式中, x 是合金材料的某种物理特性, y_n, x_n 分别为某组元的浓度和相应的物理特性^[7]。

对于材料未知温度范围内的热特性参量用插值法近似获得。尽管此法得到的值与实际值还不能完全相同, 但对分析此类问题不失为一种有效的方法。

2 模型与模拟

2.1 控制方程

在 SIM 加工中的温度场满足下面的微分方程:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \quad (2)$$

式中, $\kappa(T)$, $\rho(T)$, $c(T)$ 分别是粉末材料的热导率、密度和比热容, Q 是内热源的值, T 是温度。

2.2 初始边界条件

假设粉末的初始温度与周围环境温度相同为均匀的 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 。粉末上表面为保护气体, 基板下表面和周围认为绝热。其上表面边界条件可表示为:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T_s - T_0) \quad (3)$$

式中, h 为对流换热系数, T_s 为表面温度, T_0 为初始温度, $z = 0$ 的面为加工面。其坐标如图 1 所示。

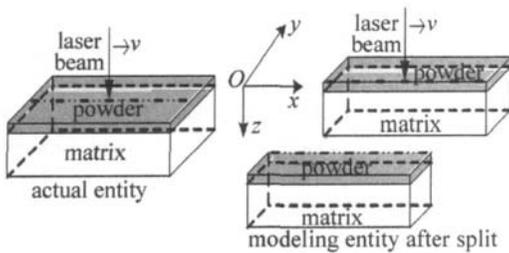


Fig 1 Actual entity and modeling entity

在对铜磷合金粉末进行 SIM 加工时, 由于粉末整体的热特性为各向同性, 且选用输出高斯光束的激光器进行加工, 故激光束的功率密度可表示为^[8]:

$$P(R_r) = P_0 \exp(-0.6R_r/R_b)^2 \quad (4)$$

式中, R_b 为束腰半径; R_r 为光束照射到工件表面的光

斑半径; P_0 是光斑的峰值功率密度, 单位为 W/m^2 。

2.3 相变问题的处理

在 SIM 加工中存在的材料相变问题可以通过引入热焓来考虑。热焓的变化用公式表示为:

$$\Delta H = \int (T) c(T) dT \quad (5)$$

式中, ΔH 为热焓的变化。为保证非线性相变计算结果的准确, 宜采用低阶的单元 SOLID70 在相变点附近的时间步长应选得足够小, 求解前应打开自动时间步长。在设置瞬态积分参量时, 为采用欧拉向后差分法, 应将 THETA 的值由默认的 -1 改为 1^[9-10]。

2.4 网格划分

采用不等的网格划分方式。在激光束加热处附近的小范围内, 温度梯度非常大, 网格划分密集; 在离激光束稍远处, 温度梯度大大减小, 网格划分相对稀疏很多。如图 2 所示, 考虑到有表面热对流问题, 故用

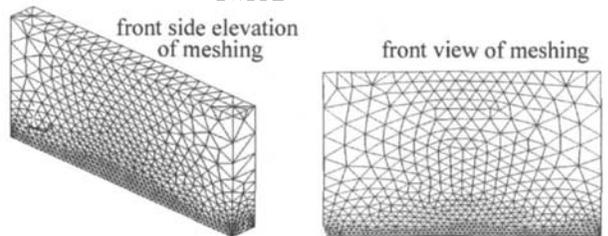


Fig 2 Meshing of model

SOLID70 和 SURF152 单元。在模拟时, 由于问题的对称性, 选其中一半进行建模, 如图 1 所示。

2.5 加载和求解

激光束沿 x 轴方向扫描一次所需要的时间分别为 0.5s, 0.2s, 0.1s 对应于扫描速度 0.1m/s, 0.25m/s, 0.5m/s 时间步长分别为 10ms, 4ms, 2ms 每步移动距离为 1mm, 共 50 步。

3 结果分析

在给定不同的工艺参量下, 由 ANSYS 模拟 SIM 过程中的温度场, 当激光束移到 30 步, 即在 $x = 30\text{mm}$ 处时, 对激光功率 $P = 100\text{W}$ 、光斑半径 $r = 0.1\text{mm}$, 在不同扫描速度下的温度场分布如图 3 所示。

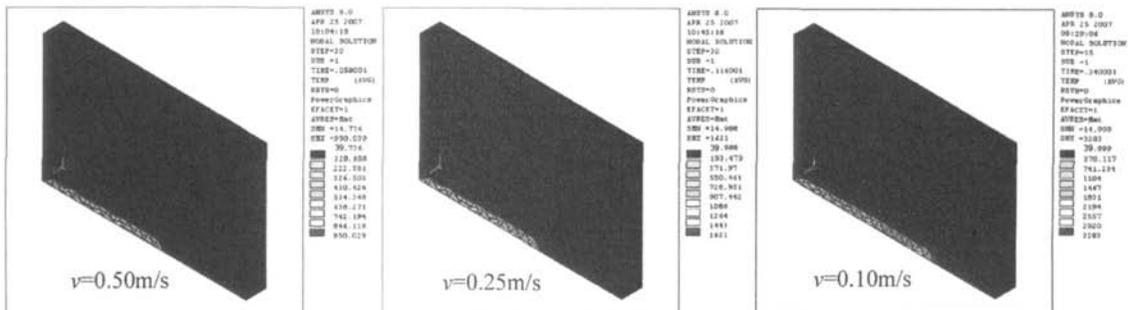


Fig 3 The temperature field at different scanning velocity when $P = 100\text{W}$, $r = 0.1\text{mm}$

由模拟的结果得知, 尽管在扫描速度、光斑半径和激光功率都不同的情况下, 其温度场分布的形貌大致都呈椭圆形。但其中心点所能达到的最高温度 T_{high} 不同 (用 T_{high} 表示当激光束移动到 $x = 30\text{mm}$ 处所能达到的最高温度)。在光斑半径 $r = 0.5\text{mm}$ 时, 当激光功率 P 和扫描速度 v 在一定范围内 (P 为 30W , 100W , 200W ; v 为 0.10m/s , 0.25m/s , 0.50m/s) 变化, 其 T_{high} 值普遍很低 (如在 $P = 200\text{W}$, $v = 0.1\text{m/s}$ 时, $T_{\text{high}} = 283^\circ\text{C}$; 在 $P = 100\text{W}$, $v = 0.25\text{m/s}$ 时, $T_{\text{high}} = 85^\circ\text{C}$), 不能达到使铜磷合金粉末熔化的温度, 即这种工艺参量不能用于 SLM 加工。在激光光斑较小 ($r = 0.1\text{mm}$) 的情况下, 其 T_{high} 值较高, 模拟出在激光光斑较小 (半径 $r = 0.1\text{mm}$) 时的 T_{high} 值, 如图 4 所示。

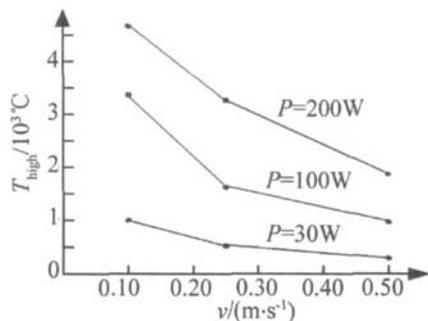


Fig 4 The value of T_{high} at different circumstances when $r = 0.1\text{mm}$

由图 4 知, 在激光功率较低 ($P = 30\text{W}$) 时, 在一定范围改变扫描速度 v , 尽管在 v 较低时 T_{high} 的值能达其熔点 T_m 以上, 但太低的扫描速度 v 会增大 SLM 加工过程中球化的可能性。而在扫描速度较大 ($v = 0.50\text{m/s}$) 时, 在一定的范围改变激光功率 P , 尽管在 P 较大时 T_{high} 的值也能达到 T_m 以上, 但太高的激光功率要求无疑增加了设备成本。综合考虑, 在激光光斑半径 $r = 0.1\text{mm}$ 时选激光功率为 100W , 扫描速度为 0.25m/s 进行 SLM 加工, 能得到满意的加工效果^[11]。

另外, 对固定扫描速度的 SLM 加工过程, 在激光束移到基板终端边缘时得到的 T_{high} 比在非边缘处时的要高, 这是由于在边缘处参与散热的不锈钢基板比在非边缘处相对减少所致。在激光聚焦光斑周围的很小范围内, 其温度梯度很大, 温度急剧下降, 由材料的熔点可大致得出激光加热过程中熔池的大小。改变 SLM 的加工参量, 可得到不同的温度场分布, 相应的就有不同的熔池。而熔池的大小及形态直接与成型结果有关, 通过模拟 SLM 加工过程中的温度场进而研究其熔池, 这有利于研究 SLM 加工过程中极易出现的

球化等问题。

4 结论

对 SLM 加工过程中的温度场进行了数值模拟, 结果显示, 随着激光束的前移, 温度场分布呈椭圆形。

模拟得知, 在扫描速度一定的情况下, 不同位置处得到的最高温度不同, 激光束移到终端边缘处时的值最高。这是因为在终端边缘处参与散热的材料比在非边缘处相对较少所致。

在不同的扫描速度下, 其温度场分布不同, 熔池中心处的最高温度不同, 选出较好的加工参量 (如在铺粉厚度为 0.22mm 时, 选用激光功率 $P = 100\text{W}$, 激光光斑半径 $r = 0.1\text{mm}$, 扫描速度 $v = 0.25\text{m/s}$), 成功地进行了 SLM 加工^[11], 说明此方法是可行的, 有一定的实用价值。

参考文献

- [1] YANG Y Q, ZHANG C H. Synthesis of TiN/Ti gradient coating by hybrid method of laser cladding and laser nitriding [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals 2006, 16(2): 213-218 (in Chinese).
- [2] GUSAROV A V, LAOURIT, FROYEN L, et al. Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2003, 17(46): 1103-1109.
- [3] SHI W Q, YANG Y Q. Laser beam's focused properties and its transmission and transformation in selective laser melting [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 308-311 (in Chinese).
- [4] ZHAO B J, SHI F Z. Modeling of selective laser sintering for PC powder [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2002, 28(6): 660-663 (in Chinese).
- [5] WILLIAMS J D, DECKARD C R. Advances in molding the effects of selective parameters on the SLS Process [J]. Rapid Prototyping Journal 1998, 4(2): 90-100.
- [6] BAI P K, HUANG S H, CHENG J. Numerical simulation of temperature field during laser sintering of resin-based prototyping composites [J]. Journal of Basic Science and Engineering 2002, 10(1): 68-72 (in Chinese).
- [7] SHEN X F. Numerical simulation and sintering zone prediction of direct laser sintering of multi-component metal powders [D]. Chengde: Sichuan University, 2005, 78 (in Chinese).
- [8] SONG L S, SHI G Q, LI Z H. Simulation of laser drilling temperature field by using ANSYS [J]. Acta Metallurgica 2006, 27(5): 879-882 (in Chinese).
- [9] ZHANG C H. ANSYS 8.0 thermal analysis tutorial [M]. Beijing: China Railway Press, 2005: 81-85 (in Chinese).
- [10] HAN G M, ZHAO J L, LI J Q. Dynamic simulation of the temperature field of stainless steel laser welding [J]. Materials & Design 2007, 15(28): 240-245.
- [11] WU W H, YANG Y Q, HUANG Y L. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting [J]. Chinese Optics Letters 2007, 5(1): 37-40.