

选区激光熔化 316L 粉末过程数值模拟研究

邱云基¹ 申梦清¹ 牛晓峰¹ 焦晋峰²

(1.太原理工大学材料科学与工程学院; 2.太原理工大学土木工程学院)

摘 要 采用光滑粒子流体动力学方法建立了单次选区激光熔化(SLM)的三维数学模型,耦合了流动场、温度场、表面张力以及润湿作用对选区激光熔化 316L 不锈钢粉末过程进行数值模拟研究。分析了不同激光功率对熔池长度和宽度的影响以及表面张力对 SLM 过程的影响,并与有限元模拟软件的模拟结果以及试验结果进行对比。结果表明,熔池的长度与宽度随着激光功率的增大而增大,同时也验证了马兰戈尼力是 SLM 过程的主要驱动力。

关键词 选区激光熔化;光滑粒子流体动力学;表面张力;数值模拟

中图分类号 TG402;TP311

文献标志码 A

DOI10.15980/j.tzzz.2021.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of the Melting Process of Selective Laser
Melting 316L Powders

Qiu Yunji¹, Shen Mengqing¹, Niu Xiaofeng¹, Jiao Jinfeng²

(1.College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology;

2.College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: A single SLM three-dimensional mathematical model was established using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The flow field, temperature field, surface tension and wetting action were coupled to simulate the SLM 316L stainless steel powder. The influence of different laser power on the length and width of molten pool and the influence of surface tension on SLM process were analysed, and compared with the simulation and the experimental results of finite element simulation software. The results indicate that the length and width of the molten pool are increased with the increase of laser power, verifying that Marangoni is the driving force of SLM process.

Key Words: Selective Laser Melting, Smoothed Particle Hydrodynamics, Surface Tension, Numerical Simulation

选区激光熔化成形金属粉末(SLM)是由选择性激光烧结演变而来的一种快速成形技术。其是将平铺在底板上的金属粉末通过计算机控制激光器有选择性地

进行扫描,金属粉末熔化形成熔池,经过冷却后与底板相连接。这种加工方法相比于传统的成形工艺具有:①节约资源,成本可控;②力学性能与锻造工艺相当;③可

收稿日期:2021-01-27;**修改稿收到日期:**2021-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874209);山西省科技重大专项资助项目(20191102007)

第一作者简介:邱云基,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:1796025459@qq.com

通信作者:牛晓峰,男,1982 年出生,教授,太原(030024),E-mail:niuxiaofeng@tyut.edu.cn

引用格式:邱云基,申梦清,牛晓峰,等. 选区激光熔化 316L 粉末过程数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 092-1 096.

QIU Y J, SHEN M Q, NIU X F, et al. Numerical simulation of the melting process of selective laser melting 316L powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 092-1 096.

[15] 毛卫民,杨宏,余永宁,等. 微量 Mg 对高压电子铝箔腐蚀结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1 057-1 060.

[16] JIN H O, SAIMOTO S. The role of specific impurities in the evolution of deformation textures[J]. Scripta Metallurgica, 2001, 46(4): 275-279.

[17] 刘楚明,张新明,周鸿章. 微量铍对高压阳极电容铝箔再结晶组织形成的影响[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(6): 15-18.

[18] 邓运来,张新明,刘楚明,等. 微量稀土对高压阳极电容铝箔组织演变的影响[J]. 功能材料, 2002, 33(1): 60-62.

[19] 刘楚明,张新明,陈志永,等. 微量元素对高纯铝箔立方织构的影响[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(2): 176-179.

[20] 左宏,李新芳,刘春明. 微量 Ga 对电容器阳极用铝箔组织及比电容的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(10): 1 400-1 403.

[21] 刘建才. 痕量元素和预处理对高压铝箔立方织构和发孔性能的影响[D]. 长沙:中南大学, 2011.

[22] 宋婧波,毛卫民,孟利,等. 高压阳极含锡铝箔再结晶织构的EBSD 分析[J]. 中国体视学与图像分析, 2007, 12(4): 258-262.

[23] 路璐,李文学. Ce 对铝箔再结晶织构演变规律的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(22): 69-71.

(编辑:栗万仲)

以加工各种不同形状的零件。因此,SLM 引起越来越多研究者的关注。

SLM 过程涉及到非常复杂的物理冶金过程,仅依靠经验来改进和了解 SLM 过程非常耗时费力。采用数值模拟的方法来为试验分析以及参数优化提供了一种有效的手段。目前 SLM 的模拟研究大多数是基于有限元方法。MATSUMOTO M 等^[1]采用有限元分析方法对单层选择性激光熔化金属粉末过程进行分析,模拟出了 SLM 过程的温度场及熔池尺寸大小。但是,大变形以及计算过程中的网格重构会导致计算精度降低。光滑粒子流体动力学方法(Smoothed Particle Hydrodynamics,SPH)是一种无网格的数值模拟方法,其不受网格的限制,可以在问题域任意分布粒子,提高计算精度,因此,SPH 方法对于解决有限元法这些限制具有巨大的优势^[2]。HU H Y 等^[3,4]采用了 SPH 方法模拟了激光点焊铝的熔化过程。RUSSELL M A 等^[5]采用 SPH 方法来研究 SLM 过程,其研究结果也表明了马兰戈尼力就是 SLM 过程的主要驱动力。因此,本课题基于 SPH 方法,建立了 SLM 过程的数学模型,模拟了三维单道次 SLM 过程,旨在为选区激光熔化 316L 粉末过程研究提供参考。

1 数学模型

1.1 SPH 基本方程

采用 SPH 方法对 SLM 过程进行数值模拟研究,需要精确计算离散后粒子的物理量,不可压缩流体粒子的运动由 Navier-Stokes 方程来控制,即:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \eta \nabla^2 v + F^{(s)} \quad (2)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; $\nabla \cdot v$ 为速度散度; v 和 P 分别为速度和压力; η 为运动粘度系数; x 为位移; t 为时间。

将式(1)~式(3)进行粒子近似,其完整的 SLM 多相粘性流 SPH 离散方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \\ dv_i = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mu_i + \mu_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij} \left(\frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_i}{\partial r_{ij}} \right) + F^{(s)} \\ \frac{dx_i}{dt} = v_i \end{array} \right. \quad (4)$$

式中, μ 为动力粘度; r 为距离; W 为光滑核函数, $W_{ij} = W(r_i - r_j, h)$; $F^{(s)}$ 为表面张力。

1.2 表面张力模型

在 SLM 过程中,表面张力起着至关重要的作用,提出连续表面张力模型对 SLM 过程中的张力进行数值模拟研究。

$$F^{(s)} = -\sigma \kappa n \delta_f \quad (5)$$

式中, σ 为表面张力系数; n 为界面法向; κ 为曲率; δ_f 为 δ 函数。

一般采用颜色函数 c 用来计算界面的位置与特征^[6]:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ 粒子与 } j \text{ 粒子同相,} \\ 0, & i \text{ 粒子与 } j \text{ 粒子不同相.} \end{cases} \quad (6)$$

界面的法线方向 n 以及曲率由色函数来计算得到^[7]:

$$n = \nabla c / |\nabla c| \quad (7)$$

$$\kappa_i = -\nabla^2 c_i = -\nabla \cdot n_i \quad (8)$$

通过对密度进行加权求和来计算颜色函数的梯度 ∇c :

$$\nabla c_i = \sum_{j=1}^N (V_i^2 + V_j^2) \left(\frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_j} \right) \frac{m_i}{\rho_j} \nabla W_{ij} \quad (9)$$

由于熔池中,由于固相,液相与气相之间的表面张力,会产生与底板之间的润湿作用。由 Young-laplace 方程得到多相之间的扩展力:

$$\gamma_{lv} \cos \theta_{eq} + \gamma_{sl} - \gamma_{sv} = 0 \quad (10)$$

$$F^{(s)} = \gamma_{lv} (\cos \theta_{eq} - \cos \theta) \quad (11)$$

式中, γ_{sl} 为固液表面张力; γ_{sv} 为固气表面张力; θ_{eq} 为平衡接触角; θ 为接触角。对三相区粒子的方向进行修正得^[8]:

$$n_{tl} = n_t \sin \theta_{eq} - n_w \cos \theta_{eq} \quad (12)$$

$$n_{w,i} = \frac{\sum_{j=1}^N \nabla W_{ij}}{\left| \sum_{j=1}^N \nabla W_{ij} \right|} \quad (13)$$

$$n_{t,i} = \frac{n_i - (n_i \cdot n_{w,i}) n_{w,i}}{\left| n_i - (n_i \cdot n_{w,i}) n_{w,i} \right|} \quad (14)$$

式中, n_t 是与接触线相切垂直的方向; n_w 是与 n_t 相互垂直的单位法向。

假设表面张力系数与温度之间为线性关系,则表面张力系数可以定义为:

$$\sigma(T) = \sigma_0 + \gamma(T - T_m) \quad (15)$$

式中, σ_0 为熔点的表面张力系数; γ 为表面张力系数梯度; T_m 为材料的熔点。

通过下式来得到马兰戈尼力:

$$F_{Marangoni} = \frac{d\sigma}{dT} [\nabla T - n (n \cdot \nabla T)] \quad (16)$$

1.3 热模型

温度场在整个 SLM 模拟过程中十分重要,由热力学定律导出系统能量方程:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\nabla \cdot q + P(\nabla \cdot v) + (\tau : \nabla T) + q_{laser} \quad (17)$$

式(17)右侧前 3 项分别表示热传导引起的能量变化,压力变化引起的能量变化以及粘性耗散引起能量的减少。其中 e 与 τ 分别为能量与剪切应力; q_{laser} 为激光能量。

对式(17)热传导项进行基于 SPH 方法的数值离散^[9,10]:

$$-\frac{\nabla \cdot q}{\rho} = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \frac{4\lambda_i \lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j} (T_j - T_i) \frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (18)$$

式中, λ_i 和 λ_j 分别为*i*粒子的传热系数和*i*粒子影响域内并与之相互作用的*j*粒子的传热系数; T_i 和 T_j 分别为*i*粒子的温度以及*i*粒子影响域内并与之相互作用的*j*粒子的温度; r_{ij} 为两粒子间距。

同样,对第 2 项和第 3 项进行基于 SPH 方法的离散,可以得到:

$$\frac{P(\nabla \cdot v)}{\rho} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (19)$$
$$\frac{(\tau : \nabla T)}{\rho} =$$

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j [\beta (\frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \varphi^2})^2 - \\ &\alpha c_{ij} \frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \varphi^2}] \cdot v_{ij} \frac{\partial W_{ij}}{\partial v_i} \quad (v_{ij} \cdot x_{ij} < 0) \\ &0 \quad (v_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0) \end{aligned} \right. \quad (20)$$

表 1 316L 不锈钢主要的热物性参数与加工参数^[12]

Tab.1 Key thermophysical parameters and processing parameters of 316L stainless steel ^[12]									
液相线 温度/K	固相线 温度/K	潜热/ (J·kg ⁻¹)	表面张力/ (N·m ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)		导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		密度/(kg·m ⁻³)	
				固态	液态	固态	液态	固态	液态
1 723	1 658	2.7×10 ⁵	1.6	711.2	937.4	9.248+0.015 71 T	12.41+0.003 279 T	7 560	6 870

表 2 SPH 法选区激光熔化模拟参数

Tab.2 SLM simulation parameters by SPH method							
激光 功率/ W	激光 宽度/ μm	扫描速 度/(m· s ⁻¹)	不锈钢 粉末半 径/μm	时间 步长/ s	SPH 粒 子半 径/μm	粒子 总数	模拟 时间/ h
50,150,300	52	0.12	25	1.0×10 ⁻⁶	2.5	334 400	72

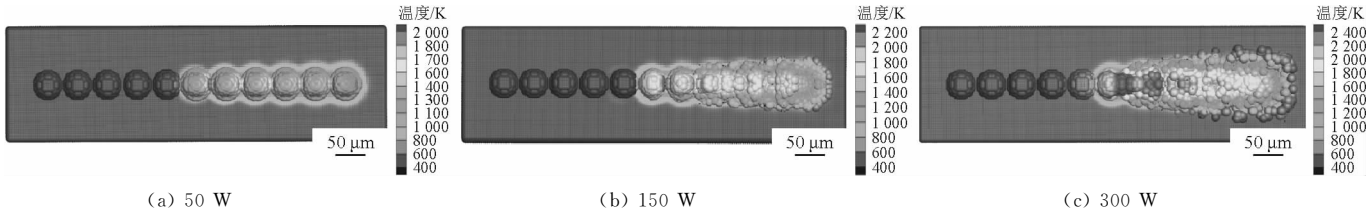


图 1 $t=0.05$ ms 时 SPH 法模拟不同激光功率下熔池的温度分布以及熔体流动状态

Fig.1 Temperature distribution and melt flow of molten pool under different laser power at $t=0.05$ ms by SPH method

$$\begin{cases} c_{ij} = \frac{c_i + c_j}{2} \\ \rho_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \\ h_{ij} = \frac{h_i + h_j}{2} \end{cases} \quad (21)$$

式中, α 和 β 为标准常数; $\varphi=0.1 h_{ij}$ 是用来防止产生粒子发散的; c 为声速。

激光热源的模型对 SLM 数值模拟过程中具有较大的影响,本课题采用高斯分布热源模型对金属粉末进行加热处理,激光热源三维高斯能量分布的定义如下:

$$q_{laser}(x,y,z) = \frac{2AP}{\pi\omega^2\eta} \exp(-\frac{2r^2}{\omega^2}) \exp(-\frac{|z|}{\eta}) \quad (22)$$

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (23)$$

式中, A 与 P 分别为激光吸收率和激光功率; ω 和 η 分别为激光半径以及激光穿透深度; r 和 (x_0,y_0,z_0) 分别为光斑半径和激光初始位置。

2 数值模拟结果与分析

2.1 SPH 模拟结果

根据 SPH 基本理论对 SLM 过程进行数值模拟研究,其中,激光扫描速度为 0.12 m/s,激光功率分别为 50、150、300 W^[11]。316L 不锈钢金属粉末的热物性参数和 SPH 法选区激光熔化模拟参数分别见表 1 和表 2。当 $t=0.05$ ms 和 $t=0.1$ ms 时的激光单线扫描模拟计算结果分别见图 1 和图 2,模拟结果主视图见图 3。

由图 1~图 3 可以看出,固体金属粉末不是激光直

接加热熔化的,而是由于未熔化的金属粉末在马兰戈尼力的作用下和已经熔化的熔体接触而开始熔化的,马兰戈尼力推动着熔体向扫描方向运动,同样在激光照射条件下的马兰戈尼力也推动着熔体向后运动,因此,在靠近熔池的地方,这些流动就形成了图 3 中的再循环漩

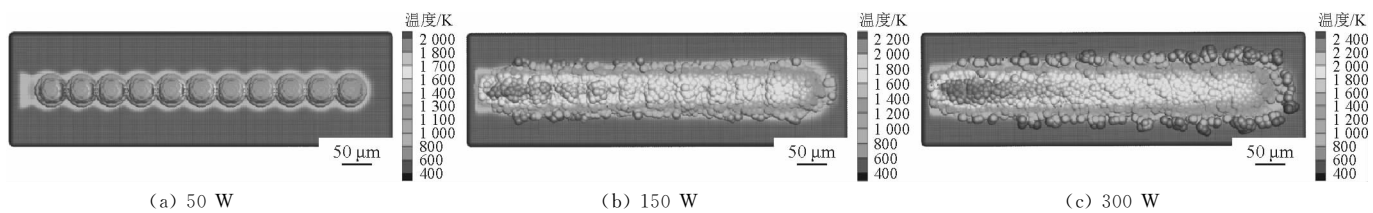


图 2 $t=0.1$ ms 时 SPH 模拟不同激光功率下熔池的温度分布以及熔体流动状态

Fig.2 Temperature distribution and melt flow of molten pool under different laser power at $t=0.1$ ms by SPH method

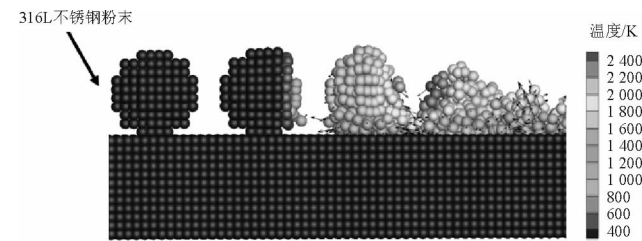


图 3 $P=150$ W 时 SPH 方法模拟计算结果主视图

Fig.3 Main view of simulation results by SPH method when $P=150$ W

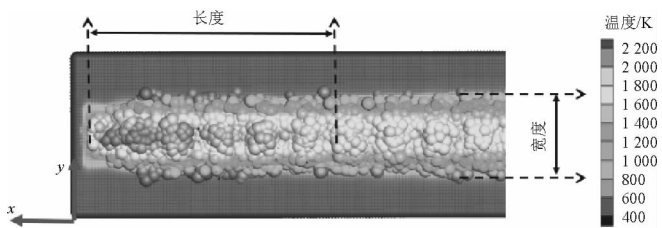


图 4 SPH 方法模拟得到的熔池的宽度与长度示意图

Fig.4 Width and length of molten pool simulated by SPH method

表 3 不同激光功率下熔池的长度和宽度

Tab.3 Length and width of molten pool under different

laser power		
激光功率/W	熔池长度/ μm	熔池宽度/ μm
50	140	55
150	220	88
300	275	115

涡,这些漩涡通过增加流体对流来扩展熔池的尺寸。因此,验证了马兰戈尼力是 SLM 过程的主要驱动力。

当功率为 50 W 时,激光能量并不能使金属粉末完全熔化,同样也不能使得激光穿透基底实现与基底的结合;当功率为 150 W 时,较高的激光能量会使得熔体温度升高产生较大的马兰戈尼力,使其能够与底板实现较好的熔合;当功率为 300 W 时,巨大的能量导致更大的熔体流动,过高的马兰戈尼力对流导致高度不稳定的熔池以及非常不稳定的液面。

为了得到模拟结果熔池尺寸的数据,根据 SPH 方法模拟得到的温度场分布图以及 316L 不锈钢熔点温度,SLM 过程熔池的宽度与长度的示意图见图 4。

SPH 数值模拟熔池尺寸的测量是通过激光沿扫描路径行进到模拟刚刚结束位置瞬时记录的温度分布图来实现的。根据以上模拟结果,可以得到 3 种不同激光功率下熔池的长度以及宽度,见表 3。

2.2 有限元模拟结果以及试验结果验证

为了验证 SPH 方法模拟 SLM 过程熔池尺寸的正确性,采用有限元模拟软件以及试验结果分别对 SLM 过程进行对比分析。在有限元模拟软件的分析模块中创建热力学瞬态分析模块,建立基于 SLM 过程的有限元模型,本方法同样采用高斯移动热源模型对底板进行加热。扫描速度为 0.12 m/s 时,激光功率分别为 50、150 以及 300 W 下的熔池尺寸模拟结果见图 5。KA-MATH C 等^[13]通过试验的方法测量出在不同的激光功率下熔池的宽度见表 4。

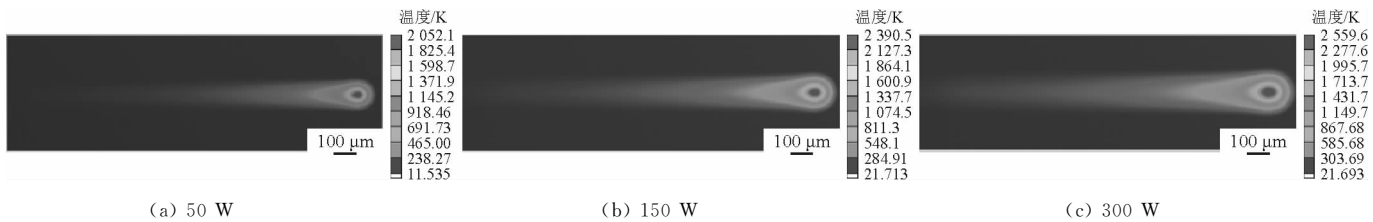


图 5 有限元数值模拟结果示意图

Fig.5 Schematic diagram of finite element numerical simulation results

表 4 不同激光功率下 SLM 过程试验数据^[13]

Tab.4 Experimental data of SLM process under different

laser power		
激光功率/W	扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	熔池宽度/ μm
150	1 200	79
300	1 200	111

2.3 模拟结果分析

根据试验数据以及两种不同的模拟方法所得到熔池宽度尺寸见图 6。可以看出,在扫描速度为 0.12 m/s 时,随着激光功率增大,熔池的宽度逐渐增大。其中 SPH 方法与有限元数值模拟方法相比较,其模拟结果

更接近试验数据,这也进一步表明了 SPH 方法对于 SLM 过程的模拟具有显著的优势。激光加热金属粉末形成液态熔池,液态金属在气态以及固态底板的作用下会产生表面张力的作用,液态熔池在表面张力的作用下形成马兰戈尼对流效应,驱动着高温熔融金属向前运动^[14]。在较低的激光功率下,熔池的温度梯度小,在低激光功率作用下熔池的冷却速度较快,熔池也较为稳定^[14,15]。

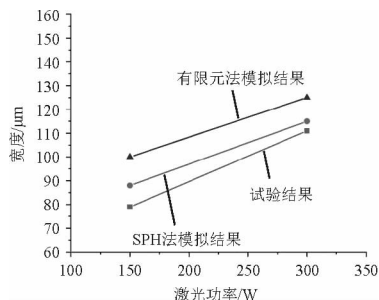


图6 SPH方法与有限元方法模拟结果与试验数据熔池宽度对比图

Fig.6 Comparison of molten pool width between simulation and experimental results by SPH method and finite element method

但是,数值模拟结果也出现了一定的偏差,如在较高的功率作用下,通过 SPH 方法数值模拟结果相对于低激光功率作用下熔池尺寸模拟结果要更加接近试验结果,产生这一现象的主要原因有:①忽略了激光辐射造成的能量损失;②本课题采用的是金属粉末均匀地平铺在底板之上,而 SLM 过程金属自由分布则会产生一些自然偏差;③忽略了熔池的飞溅以及液化的影响。

3 结 论

(1)随着激光功率增大,SPH 模拟熔池长度从 140 μm (50 W)增加到 275 μm (300 W),宽度从 55 μm (50 W)增加到 115 μm (300 W),同时也验证了马兰戈尼力就是 SLM 过程的主要驱动力。

(2)SPH 方法计算结果与有限元方法计算结果相比更加接近于试验数据,这也进一步表明,SPH 方法对于模拟 SLM 过程具有显著的优势。熔池的尺寸随着激光功率的增高逐渐增大,而过高的激光功率也会导致熔池表面品质下降。

参 考 文 献

- [1] SHIOMI M, OSAKADA K, NAKAMURA K, et al. Residual stress within metallic model made by selective laser melting process[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(4): 195-198.
- [2] 强洪光.光滑粒子流体动力学新方法及应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [3] HU H Y, EBERHARD P. Thermomechanically coupled conduction mode laser welding simulations using smoothed particle hydrodynamics[J]. Computational Particle Mechanics, 2016, 4(4): 40-571.
- [4] HU H Y, FETZER F, BERGER P, et al. Simulation of laser welding using advanced particle methods[J]. GAMM-Mitteilungen, 2016, 39(2): 149-169.
- [5] RUSSELL M A, SOUTO-IGLESIAS A, ZOHD I T. Numerical simulation of laser fusion additive manufacturing processes using the SPH method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 341(1): 163-187.
- [6] ADAMI S, HU X Y, ADAMS N A. A new surface-tension formulation for multi-phase SPH using a reproducing divergence approximation[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(13): 5 011-5 021.
- [7] HU X Y, ADAMS N A. A multi-phase SPH method for macroscopic and mesoscopic flows[J]. Comput. Phys., 2006, 213: 844-861.
- [8] BRACKBILL J, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Comput. Phys., 1992, 100(2): 335-354.
- [9] ROOK R, YILDIZ M, DOST S. Modeling transient heat transfer using SPH and implicit time integration[J]. Numer. Heat Transf., 2007, 51: 1-23.
- [10] CLEARY P W, MONAGHAN J J. Conduction modeling using smoothed particle hydrodynamics[J]. J. Comput. Phys., 1999, 148: 227-264.
- [11] LIU S, LIU J, CHEN J, et al. Influence of surface tension on the molten pool morphology in laser melting[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 146: 106 075.
- [12] YUAN W H, CHEN H, et al. Effects of laser scanning speeds on different states of the molten pool during selective laser melting: Simulation and experiment[J]. Materials and Design, 2020, 189: 108 542-108 550.
- [13] KAMATH C, EI-DASHER B, GALLEGOS G F, et al. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1-4): 65-78.
- [14] GUAN K, WANG Z, GAO M, et al. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel[J]. Mater. Des., 2013, 50: 581-586.
- [15] KHAIRALLAH S, ANDERSON A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder[J]. Mater. Process Technol., 2014, 214(11): 2 627-2 636.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com