

316L 不锈钢的激光选区熔化多道成形数值模拟研究

申梦清 苗秉希 牛晓峰
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 通过对 FLOW-3D 软件的二次开发,实现了三维多道次的选区激光熔化(SLM)过程的数值模拟。对过程中熔池的速度场、温度场和形貌特征进行了分析,并与有限元方法和光滑粒子流体动力学方法的模拟结果进行了对比。对不同激光功率对熔池深度和宽度的影响进行了研究。结果表明,经过二次开发的 FLOW-3D 软件能精确模拟 SLM 过程中温度场;马兰戈尼对流对 SLM 过程中熔池形貌的形成有重要作用,并且熔池的长度与宽度随着激光功率的增大而增大。

关键词 选区激光熔化;316L 不锈钢;数值模拟

中图分类号 TG402;TG142.71 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Numerical Simulation of Multi-pass Laser Selective Melting Forming of 316L Stainless Steel

Shen Mengqing, Miao Bingxi, Niu Xiaofeng
(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: Through the secondary development of the Flow-3D software, the numerical simulation of the three-dimensional multi-pass selective laser melting (SLM) process was realized. The velocity field, temperature field and morphological characteristics of the molten pool were analyzed and compared with the simulation results of the finite element method and the smooth particle hydrodynamics method. The effects of different laser power on the depth and width of the molten pool were also investigated. The results indicate that the simulation of temperature field in the SLM process by secondary-developed Flow-3D software present accurate. Marangoni convection plays an important role in the formation of the molten pool morphology during the SLM process, and the length and width of the molten pool is increased with laser power increase.

Key Words: Selective Laser Melting, 316L Stainless Steel, Numerical Simulation

与传统的减材加工方法相比,由计算机辅助的增材制造技术 SLM 引起了广泛的关注^[1],通过优化结构使构件品质和力学性能达到最优,并且力学性能与锻造工艺相当,满足了航天、医疗等领域对构件性能的高要求^[2,3]。

目前 SLM 过程的模拟研究方法很多,RUSSELL M A 等^[4]采用无网格的光滑粒子立体动力学方法来研究 SLM 过程,验证了马兰戈尼对流为 SLM 过程的主要驱动力,但是光滑粒子流体动力学方法难以准确模拟密度差值较大的两相。周建^[5]、池敏^[6]利用有限元方法对 316L 不锈钢的 SLM 过程热-力耦合场进行模拟,探究了 SLM 过程的工艺参数,但受网格的限制,大变形及计算过程中的网格重构导致计算精度较低。

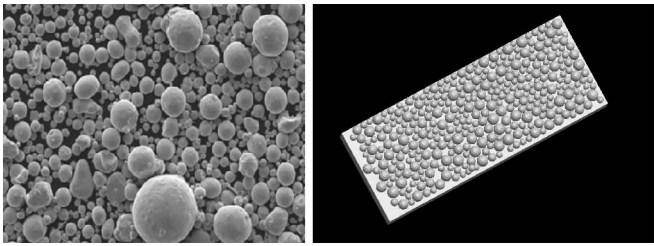
收稿日期:2021-11-22;修改稿收到日期:2022-01-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874209);山西省科技重大专项资助项目(20191102007)
第一作者简介:申梦清,男,1996 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:18729317591@163.com
通信作者:牛晓峰,男,1982 年出生,教授,太原(030024),E-mail:niuxiaofeng@tyut.edu.cn
引用格式:申梦清,苗秉希,牛晓峰. 316L 不锈钢的激光选区熔化多道成形数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):894-897.
SHEN M Q, MIAO B X, NIU X F. Numerical simulation of multi-pass laser selective melting forming of 316L stainless steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):894-897.

本课题采用 FLOW-3D 软件,并对其部分源程序进行了二次开发。以 316L 不锈钢为粉末材料,进行了三维多道次的 SLM 过程的数值模拟,旨在为其应用提供参考。

1 数学模型

1.1 粉床模型

实际生产中常用气雾化法制备 316L 不锈钢粉末,粉床模型与粉末显微形貌见图 1。从图 1a 可以看出,球形粉末颗粒分散性较好。利用离散元素法建立的粉床模型见图 1b。可以看出,所建模型能较好地模拟实际的粉床模型。



(a) 粉末微观形貌 (b) 粉床模型

图1 粉末颗粒形貌及模拟粉床模型^[5]

Fig.1 Morphologies of powder particles and the model diagram of simulated powder bed

1.2 移动高斯热源模型

激光与材料的相互作用是一个包括了宏观与微观机制的复杂过程,在此仅考虑激光的热作用。对于SLM过程,高斯分布的热源模型较符合连续光纤激光器的能量分布^[6],且激光照射粉末颗粒时具有一定的穿透深度,故舍弃高斯面热源,将激光对粉末的热效应视为三维高斯体热源模型^[7,8],表达式如下:

q_{laser}(x,y,z)= $\frac{2AP}{\pi\omega^2\eta}\exp(-\frac{2r^2}{\omega^2})\exp(-\frac{|z|}{\eta})$ (1)

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

式中,A与P分别为激光吸收率和激光功率;ω和η是激光半径以及激光穿透深度;r和(x₀,y₀,z₀)分别代表光斑半径和激光中心位置。

1.3 反冲压力模型

在SLM过程中,高能激光束照射粉床时,熔池温度上升,一部分金属蒸发,这个过程会使熔池损失热量,并且随之产生的蒸气层会驱动熔池运动,金属热量蒸发的表达式为^[9]:

q_{ev}=0.82 $\frac{\Delta H^*}{\sqrt{2\pi MRT}}p_0\exp(\Delta H^*\frac{T-T_{lv}}{RTT_{lv}})$ (3)

式中,M为摩尔质量;R为理想气体常数;p₀为环境压力;T为熔体温度;T_{lv}为金属沸点;ΔH*为逸出金属蒸气焓。

由金属蒸气产生的蒸气薄层对熔池的反冲压力的表达式为^[10]:

p_r=0.54p₀exp($L_{lv}\frac{T-T_{lv}}{RTT_{lv}}$) (4)

式中,p_r为反冲压力。

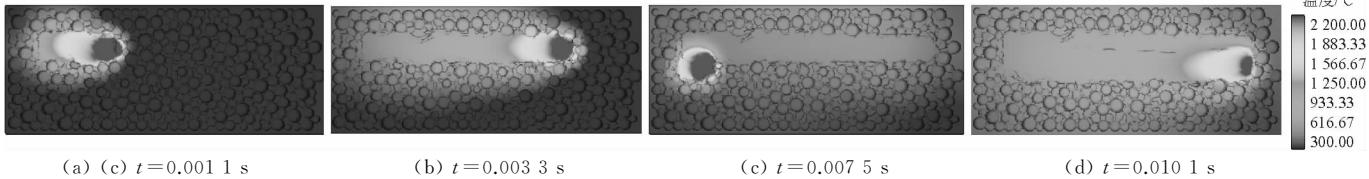


图2 在200 W时不同时刻的Flow-3D软件模拟结果示意图

Fig.2 Simulation results of Flow-3D software at different moment and 200 W

2 数值模拟结果与分析

2.1 模拟结果

为了准确模拟SLM过程中的热物理机制,在FLOW-3D软件中,要对重力、热流量、凝固、表面张力、流动、外部环境等模块进行恰当地设置,除此之外,还要对其热源以及与力相关的源程序进行二次开发。在求解器设置部分,考虑到温度对于整个熔池形貌的重要性,heat transfer求解器采用隐式方法求解。为了简化模拟,做如下假设:①假定熔池中的流体是层流和不可压缩的牛顿流体;②将固相和液相之间的流体定义为糊状区域;③仅考虑激光的热作用。

316L 不锈钢金属粉末的热物性参数选用JMatPro软件的计算结果^[6]。316L 不锈钢金属粉末的热物性参数和模拟参数见表1和表2。

表1 316L 不锈钢粉床的物性参数

Tab.1 Physical parameters of 316L stainless steel powder bed					
温度/ K	密度/ (g· cm ⁻³)	比热容/ (J·g ⁻¹ · K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ · K ⁻¹)	热膨胀系 数/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	杨氏 模量/ GPa
300	7.791 93	0.485 96	18.125 06	11.717 24	213.314 3
500	7.733 45	0.576 65	20.539 91	7.733 450	201.574 53
700	7.669 57	0.733 55	22.972 43	13.227 94	184.199 57
900	7.600 16	0.770 79	25.400 2	13.970 91	161.847 32
1 100	7.525 66	0.674 83	27.795 30	14.705 62	136.406 56
1 300	7.446 50	0.708 09	30.214 22	15.432 07	110.040 78
1 568.38	7.333 72	—	33.464 45	16.393 94	77.240 83
1 700	7.271 70	1.613 48	34.985 30	17.005 20	59.363 96
1 900	6.953 69	0.845 49	32.620 32	25.078 10	1.260 61×10 ⁻¹²

表2 模拟参数

Tab.2 Simulation parameters					
激光功 率/W	激光宽 度/μm	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)	不锈钢粉末 半径/μm	输出步 长/s	总模拟 时间/h
50,150, 200,300	52	1 200	10~30	5.0×10 ⁻⁵	100

图2是激光功率为200 W时不同时刻的SLM过程的形貌。可以看出,在0.001 1 s时,金属粉末逐渐被激光熔化,形成熔池,并缓慢向前推移,见图2a;当0.003 3 s时,第一道激光走到尽头,熔池尾端熔化区域开始降温凝固,见图2b;在0.007 5 s时,激光转到了第二道,并且部分已凝固的熔池再次熔化,在0.010 1 s时两道激光行走结束,见图2d。整个过程中除去在两道

激光交界处的凸起,基本平稳地熔化和凝固,这说明在多道激光的 SLM 模拟过程中要考虑激光之间的搭接距离。

在熔池底部,过度不均匀的温度分布,致使表面张力梯度减小,金属液和溶质从表面张力较低的地方向较高的地方移动,表面张力梯度引起的熔池流体流动的不稳定性会导致表面不够平整,从而引起流体的波动和熔池宽度增加。选取了 FLOW-3D 软件模拟结果的 X-Z (此时 $y = -0.067\ 5\ \text{mm}$, 见图 3) 和 Y-Z (此时 $x = 0.392\ 5\ \text{mm}$, 见图 4) 面进行研究。可以看到,熔池处的金属液有同激光扫描方向相反的速度,且越靠近熔池速度越大,最大速度达到了 $1.32\ \text{m/s}$,而在熔池边缘的金属液存在回流。这是因为马兰戈尼对流驱动熔体从激光照射点的高温处向着后方温度较低的地方流动^[11]。这有助于增加熔体深度,使熔体回流,从而冷却激光光斑的位置,在该过程中低粘度的液态金属会从表面喷射出去,这些都会对熔池形貌产生极大的影响。从图 4 可以看出,在马兰戈尼对流驱动下飞溅的金属,同时熔池底部高温金属液向下运动,最大速度为 $3.94\ \text{m/s}$,这是因为反冲压力给液体表面一个向下的速度,造成熔池表面凹陷。通过马兰戈尼对流和反冲压力的结合,熔体深度和表面积显著增加,同时额外的表面蒸发和辐射又会进一步降低熔池的温度。正是在马兰戈尼对流和反冲压力的作用下,才形成了熔池形貌(见图 2)。这验证了写入软件的反冲压程序的正确性以及马兰戈尼对流对 SLM 过程中熔池的形貌起着重要的作用。

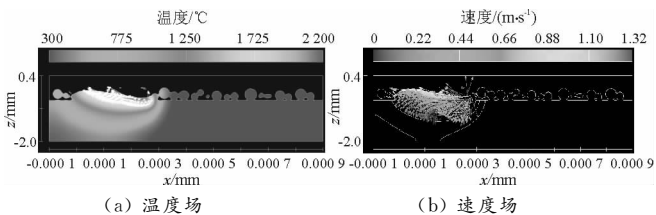


图 3 $P=200\ \text{W}$ 时马兰戈尼对流(主导)对熔池形貌的影响
Fig.3 Influence of Marangoni convection (mainly) on morphologies of the molten pool when $P=200\ \text{W}$

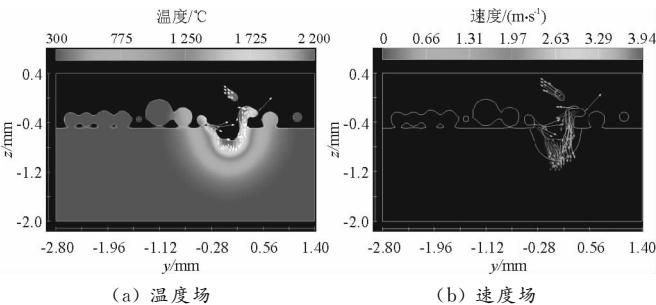


图 4 $P=200\ \text{W}$ 时反冲压力(主导)对熔池形貌的影响
Fig.4 Influence of recoil pressure (mainly) on morphologies of the molten pool when $P=200\ \text{W}$

2.2 结果验证

为验证 FLOW-3D 模拟结果的准确性,采用 3 种方

式:①采用有限元软件的瞬态分析模块进行模拟,热源为高斯热源,激光功率为 $200\ \text{W}$,扫描速度为 $1\ 200\ \text{mm/s}$;②利用实验室自主编写的基于光滑粒子流体动力学方法的流体仿真程序进行模拟。热源为高斯热源,激光功率为 $200\ \text{W}$,扫描速度为 $1\ 200\ \text{mm/s}$;③与 KA-MATHC 等^[12]通过试验测量出的在不同的激光功率下熔池的尺寸进行对比。

在 SLM 过程中,熔池的形状由多种因素共同决定,而这些因素大多是温度变化和不均匀导致的。图 5 和图 6 分别为在 $200\ \text{W}$ 时有限元方法模拟和光滑粒子流体动力学方法模拟结果。对比图 2 可以发现,金属粉末颗粒在激光辐照下完全熔化,在光斑处形成高温熔池,呈椭圆状。与之相邻的周边粉末较低的初温和较少激光能量的吸收形成了很大的温度梯度^[13],随着激光扫描时间增加,热传导效应使周围粉末和基板的温度逐渐升高,热影响区域逐渐扩大。在激光移动路径上,激光头部的等温线密集,尾部的等温线稀疏。在激光扫描路径相同位置上选取一点(在基板上),利用 3 种模拟方法得到该点处温度随时间的变化图,见图 7。可以看出,3 种模拟方法从 $300\ \text{K}$ 开始,在 $0.003\ \text{s}$ 左右时温度达到最大值,分别为 $2\ 246.72$ 、 $2\ 203.61$ 和 $2\ 146.15\ \text{K}$,之后温度开始降低,且降低幅度逐渐变小。3 种模拟方法得到的升温 and 降温趋势基本相同,这可以从侧面证明 3 种模拟方法在激光扫描路径上温度梯度的变化相似。基于有限元和光滑粒子流体动力学方法的两种模拟结

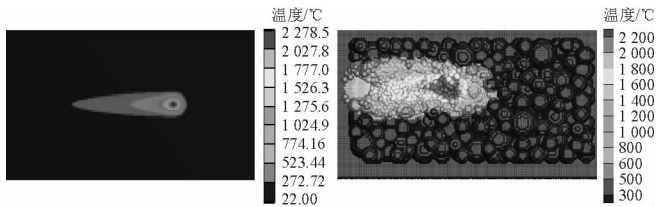


图 5 $P=200\ \text{W}$ 时有限元方法模拟结果示意图
Fig.5 Schematic diagram of simulation results of finite element method when $P=200\ \text{W}$

图 6 $P=200\ \text{W}$ 时光滑粒子流体动力学方法模拟结果示意图
Fig.6 Schematic diagram of simulation results of smooth particle hydrodynamics method when $P=200\ \text{W}$

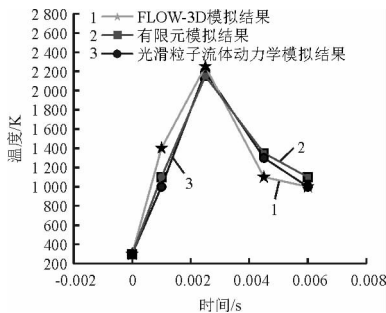


图 7 不同模拟方法下基点温度变化对比图
Fig.7 Comparison of temperature variation at a point under different simulation methods

果验证了热源及温度梯度的正确性。同时有限元方法难以模拟自由流动,而光滑流体动力学方法由于大密度差问题的存在,使两相界面处的表面张力计算的准确度不高,综合来看,三者中,基于有限差分的 FLOW-3D 软件更适合 SLM 过程的模拟。

用 50、150、200 和 300 W 的激光功率进行 SLM 过程的数值模拟见图 8。可以看出,熔池的深度和宽度随

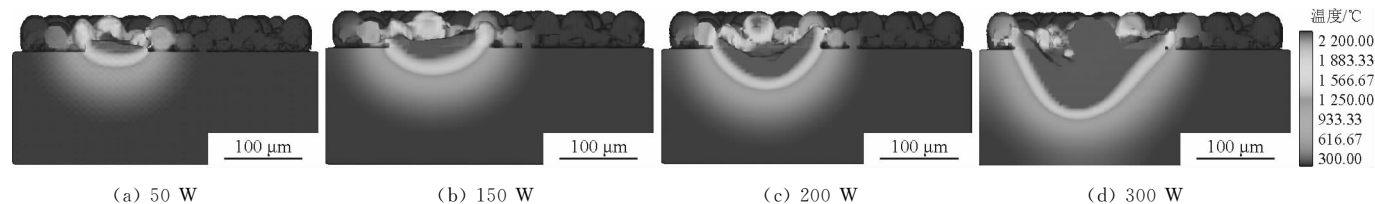


图 8 不同功率下熔池的深度和宽度

Fig.8 Depth and width of molten pool at different powers

粗糙,最终影响构件的成型品质。

图 9 为 FLOW-3D 软件模拟熔池深度和宽度的结果与试验结果。可以看出,激光功率在 150 W 时,熔池的宽度和深度最小,分别为 86 μm 和 30 μm 。在功率为 300 W 时,熔池的宽度和深度达到最大值,分别为 160 μm 和 11 μm 。模拟结果与试验结果^[12]的数值上升趋势总体上接近,但也存在一定偏差,即模拟结果的数值都大于实际结果。这可能是熔池边界的选择和过分理想化的物理模型(仅考虑热传导的传热模型、忽略流体的可压缩性、真实粉床与粉床模型的差异性等)造成的。

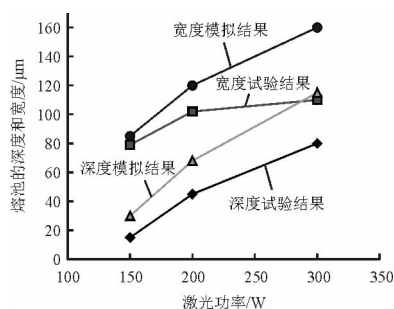


图 9 FLOW-3D 软件模拟熔池深度和宽度的结果与试验结果对比图

Fig.9 Simulation and experimental result comparison of depth and width of the molten pool by the FLOW-3D software

3 结 论

(1)通过对 FLOW-3D 软件源程序的二次开发,加入了移动的高斯热源和反冲压力,实现了三维多道次的 SLM 过程的数值模拟。

(2)通过与有限元方法和光滑粒子流体动力学方法模拟的 SLM 过程的结果进行对比,证明了 FLOW-3D 软件在模拟 SLM 过程中温度场的正确性。

(3)通过与试验数据的对比和对熔池形貌和速度场的观察,验证了马兰戈尼对流和反冲压力为影响熔池形貌的重要因素。

激光功率的增大而逐渐增大。在较低的激光功率下,熔池的温度梯度小,熔池的冷却速度较快,熔池也较为稳定^[14,15]。这可能会导致粉末和基板的润湿性太差,出现球化现象和不连续的凝固熔体。而当功率到达 300 W 时,熔池体积极大地扩张,此时马兰戈尼对流对熔池形貌有显著影响,熔池受到反冲压力的扰动产生剧烈波动,产生飞溅。这会降低构件的致密度,造成构件表面

参 考 文 献

- [1] LIU B A, FANG G B, LEI L A, et al. A new ray tracing heat source model for mesoscale CFD simulation of selective laser melting(SLM)[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 79: 506-520.
- [2] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5-7.
- [3] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013(4): 1-4.
- [4] RUSSELL M A, SOUTO-IGLESIAS A, ZOHD T I. 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.
- [5] 周建. 选择性激光熔化 316L 不锈钢粉末数值模拟及实验研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2020.
- [6] 池敏. 金属激光选区熔化增材制造数值模拟与实验研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- [7] JIE Y, ZHU H, KE L, et al. Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering[J]. Computational Materials Science, 2012, 53(1): 333-339.
- [8] 杜洋, 乔风斌, 郭立杰, 等. AlSi10Mg 粉末激光选区熔化温度场的数值模拟[J]. 电焊机, 2018, 48(8): 42-51.
- [9] SEMAK V, MATSUNAWA A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing[J]. Journal of Physics, 1999, D30(18): 2 541.
- [10] KLASSEN A, SCHAROWSKY T. Evaporation model for beam based additive manufacturing using free surface lattice Boltzmann methods[J]. Journal of Physics, 2014, D47(27): 275 303.
- [11] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.
- [12] KAMATH C, EL-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.
- [13] 姚化山. 金属粉末选择性激光熔化成形过程模拟与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [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: 581-587.
- [15] KHAIRALLAH S, ANDERSON A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder[J]. Mater. Process. Technol., 2014, 6(1): 2 627-2 636.

(编辑:刘卫)