

选区激光熔化激光能量在 TC4 粉末中分布特性研究

黄智, 贾卫博, 王颢铭, 李超, 梁杰, 钟岳

(电子科技大学机械与电气工程学院, 611731, 成都)

摘要: 为了研究粉末分布对选区激光熔化过程中能量吸收的影响, 提出具有更高精度的热源模型, 通过最速下降和坐标轮换相结合的方法获取粉末颗粒的分布, 依据射线追踪原理统计粉末床对激光能量的吸收情况, 分析了粉末分布对激光能量吸收的影响, 并按照能量分布特性, 提出了考虑粉末影响的新热源模型。结果表明: 通过最优化方法构建的粉末模型, 避免了物理参数估计的误差, 与实验结果仅有 4% 的误差; 能量吸收在深度方向有减弱的趋势, 在水平方向近似满足正态分布, 由此构建的热源模型应用于熔池预测, 熔池宽度误差为 6.4%, 连接处宽度误差为 9.6%。该文提出的基于粉末分布的热源模型更准确地描述了能量的分布, 提高了温度场的仿真精度, 可对后续更精确的温度场仿真技术研究提供一定的参考。

关键词: 选区激光熔化; 有限元温度场仿真; 射线追踪; 热源模型

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jxtxb202204012 **文章编号:** 0253-987X(2022)04-0109-10



OSID 码

Study on Distribution Characteristics of Laser Energy in TC4 Powder in Selective Laser Melting Process

HUANG Zhi, JIA Weibo, WANG Haoming, LI Chao, LIANG Jie, ZHONG Yue

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

Abstract: To study the effect of powder distribution on the energy absorption in the selective laser melting process, a heat source model with higher accuracy is proposed. In this paper, the distribution of powder particles is obtained by combing the method of steepest descent and univariate search technique, while the absorption of laser energy by the powder bed is counted according to the ray-tracing principle. This paper analyzes the effect of powder distribution on laser energy absorption and proposes a new heat source model considering the effect of powder according to the energy distribution characteristics. The results show that: the powder model constructed by the optimization method can avoid the error estimated by physical parameter and has only 4% error with the experimental results; The energy absorption tends to weaken in the depth direction and approximately satisfies the normal distribution in the horizontal direction. The heat source model constructed therefore is applied to the melt pool prediction, with the melt pool width error of 6.4% and the joint width error of 9.6%. The heat source model based on powder distribution proposed in this paper describes the energy distribution more accurately and improves the simulation accuracy of the temperature field, which can provide a reference for the further research of more accurate temperature field simulation technology.

Keywords: selective laser melting; FEM temperature field simulation; ray-tracing; heat source model

选区激光熔化技术(SLM)是一种增材制造技术,具有生产周期短、材料利用率高的优点,被越来越多地应用于航天、医疗等诸多领域。SLM制备件的优劣受工艺参数的影响较大,但传统的实验试错法确定工艺参数费时、费力且花费较大,所以研究者采用仿真的方法对 SLM 过程进行研究,减少试错的次数以节省制造成本^[1]。目前的研究大多集中在温度场、应力应变及金相组织仿真 3 个方面。温度场是应力应变及金相组织研究的基础,提升温度场的仿真精度对整个 SLM 的仿真至关重要。温度场的精度受热源模型的影响最大,所以热源模型的改进和优化是 SLM 仿真精度提高的关键所在。

常用于 SLM 熔池温度场仿真的方法有有限元法和有限体积法。在有限元仿真中,Goldak 于 1984 年提出了双椭球热源模型^[2],该模型由前后两个四分之一椭球组成,在实际应用中,需要通过观察熔池形貌调整双椭球前后两个半椭球的尺寸,得到合适的热源模型,该模型在增材制造领域应用广泛^[3-7]。圆柱形热源模型也是一种适用广泛的热源模型,其在圆柱截面上满足高斯分布,在轴向方向上按照某一规律逐渐衰减^[8-9]。上述仿真模型都具有一定的适用性,但是没有考虑粉末排布对热源模型的影响。

在有限体积法 SLM 熔池温度场仿真过程中,通常会考虑粉末的影响,将粉末视为球体,研究激光作用下粉末熔化汽化、熔池流动及凝固过程中温度场的变化,粉末颗粒的假设状态对热源的分布有着重要的影响。起初有些研究者将粉末模型视为大小一致,按照简单立方堆积方法排布的粉末层^[10-11]。Galati 等提出用多种尺寸球体均匀堆积的方式,来近似模拟粉末状态^[12]。Wu 等采用离散单元法模拟随机粉末的生成,并按区域统计颗粒分布的均匀性^[13]。Tang 等采用 LIGGHTS 开源代码,在考虑了重力、摩擦力的情况下模拟粉末状态^[14]。Khairallah 等使用 ALE3D 代码的“粒子包”、以设定的堆积密度为目标,实现粉末的随机排布^[15]。学者不断尝试完善模型,使粉末状态更趋近于真实情况,提升仿真的精度。有限体积法计算精度高,但是其计算量大,难以进行大尺寸仿真计算^[16]。

Gusarov 等结合有限元法的高效与有限体积法的高精度两种优点,考虑激光能量在假设的均匀排列粉末中的吸收情况建立仿真模型^[17]。Tran 等考虑了粉末颗粒的排布对能量吸收的影响,通过统计粉末层中每层的能量吸收率构建模型,提出了一种应用于 SLM 有限元仿真的新热源模型,将该热源

模型用于 SLM 熔池温度场仿真,既具有较快的分析速度又具有较高的精度^[18]。然而,Tran 等只分析了能量分布在深度方向的变化,水平方向直接沿用了传统的平面高斯能量分布情况,并未深入分析水平方向能量分布的变化。本文对 Tran 等^[18]研究的不足之处进行改进,深入分析水平方向能量分布的变化,进行函数拟合,提出新的热源模型。

综上所述,本文对考虑粉末影响的热源模型进行了深入分析,研究其在水平方向上的能量分布情况,改进热源模型并提升温度场预测精度。首先采用 Python 编程得到粉末模型,将得到的粉末模型与激光进行交互作用,计算、统计热源在粉末中的分布情况;然后对统计结果进行深度方向和水平方向的拟合,获得热源的分布规律,得到完整的热源模型,并将其用于有限元温度场仿真;最后进行实验检验仿真结果。

1 SLM 热源模型建立

1.1 SLM 粉末模型建立

实际生产过程中,在重力和刮刀(或辊筒)挤压作用下,粉末具有向着势能最小的方向运动的趋势。因此,采用 Python 软件对粉末的堆积移动过程进行模拟,粉末粒度分布如图 1 所示。粉末的堆积移动限制在由基底表面和刮刀移动平面之间,移动过程由最速下降法和坐标轮换法控制完成,最终得到的铺粉层 TC4 粉末模型如图 2 所示。

粉末模型的相对密度可用来表征粉末模型的分布信息。粉末模型的相对密度计算方法如下

$$\eta = \frac{4/3 \sum r_k^3}{r_0^2 h_{\text{top}}} \quad (1)$$

式中: r_k 为所有到圆心距离小于 r_0 的粉末; h_{top} 为粉层厚度。

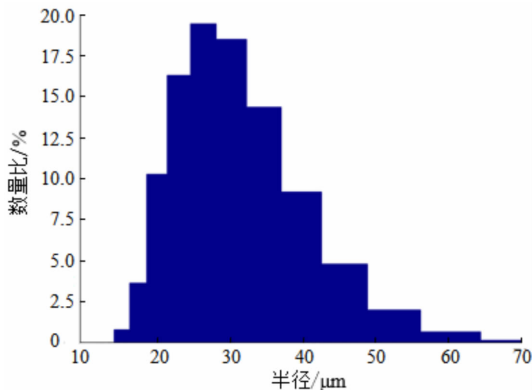


图1 粉末粒度分布

Fig. 1 Powder radius

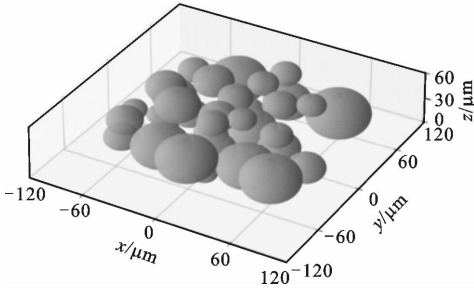


图 2 铺粉层 TC4 粉末模型
Fig. 2 Powder model

1.2 热源能量追踪记录方法

SLM 过程中,照射在粉末上的激光一部分被吸收,一部分被反射出去,反射出的能量可能又被其他粉末吸收,整个能量吸收过程很复杂。为了探究激光能量在粉末床中的分布情况,本节将激光离散为若干细小的激光束,光束在粉末中的反射路径示意图如图 3 所示,记录并统计能量的吸收情况,最终得到粉末床中的能量分布。

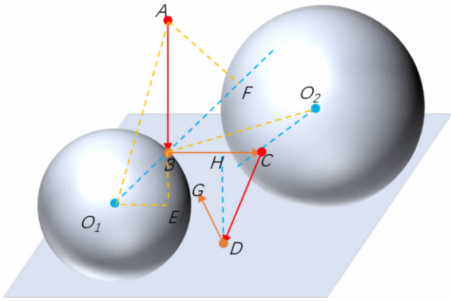


图 3 光束在粉末中的反射路径示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the reflection path of the light beam in the powder

1.2.1 光束功率计算方法

本文中假设激光由 n 束小光束组成,每束小光束由一条直线来表示。激光的能量密度分布公式^[19]为

$$q(x, y) = \frac{2P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

式中: P 为激光功率; r_0 为激光的束腰半径; (x_0, y_0) 为激光中心位置坐标。每条光束的功率为

$$P(x, y) = q(x, y)s \quad (3)$$

$$s = \frac{2\pi r_0}{n} \quad (4)$$

式中: n 为假设的小光束数; s 为假设的每条光束截面积。

1.2.2 光束在球面上的反射路径计算方法

入射光的初始点为 A , $\mathbf{l}_{AB}$ 为向量, $\mathbf{e}_{AB}$ 为单位向量,光束在球面上反射的起始点 B 和方向 $\mathbf{e}_{BC}$ 的求法如下

$$\mathbf{l}_{AE} = \mathbf{e}_{AB} \cdot \mathbf{l}_{AO_1} \quad (5)$$

$$|\mathbf{l}_{O_1E}| = \sqrt{|\mathbf{l}_{AO_1}|^2 - |\mathbf{l}_{AE}|^2} \quad (6)$$

$$|\mathbf{l}_{BE}| = \sqrt{|\mathbf{l}_{BO_1}|^2 - |\mathbf{l}_{O_1E}|^2} \quad (7)$$

$$|\mathbf{l}_{AB}| = |\mathbf{l}_{AE}| + |\mathbf{l}_{BE}| \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} + |\mathbf{l}_{AB}| \cdot \mathbf{e}_{AB} \quad (9)$$

$$\mathbf{l}_{BF} = \mathbf{e}_{O_1B} \cdot \mathbf{l}_{BA} \cdot \mathbf{e}_{O_1B} \quad (10)$$

$$\mathbf{e}_{BC} = \frac{\mathbf{l}_{AB} + 2\mathbf{l}_{BF}}{|\mathbf{l}_{AB} + 2\mathbf{l}_{BF}|} \quad (11)$$

1.2.3 光束在基体顶面上的反射路径计算方法

入射光的初始点为 C , $\mathbf{e}_{CD}$ 为单位向量,光束在基体顶面上反射的起始点 D 、方向 $\mathbf{e}_{DG}$ 计算式为

$$\mathbf{D} = \mathbf{C} + \lambda \cdot \mathbf{e}_{CD} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{z_c}{\mathbf{e}_{CD} \cdot (0, 0, -1)} \quad (13)$$

$$\mathbf{e}_{DG} = \frac{\mathbf{l}_{CD} + 2\mathbf{l}_{DH}}{|\mathbf{l}_{CD} + 2\mathbf{l}_{DH}|} \quad (14)$$

1.2.4 光束传播结束的条件

光束每传播一次剩余的能量由下式确定,即

$$P_{i+1} = (1 - \epsilon)P_i \quad (15)$$

式中 ϵ 为吸收率,假定为 0.3^[20]。当剩余激光能量低于 1%,或者激光射出统计范围时,结束当前光束传播的追踪。采用 Python 进行编程,单束激光在粉末中的传播路径如图 4 所示。

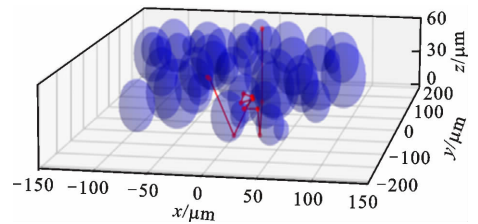


图 4 激光束在粉末中传播路径
Fig. 4 Schematic diagram of laser beam propagation in powder

1.2.5 热源能量统计分析

将粉末所在空间拆分为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的立方体空间,计算每个立方体内的能量总和。采用 Python 进行编程,一次计算后激光能量的分布如图 5 所示,图 5 中红点代表该位置所在立方体区域内所吸收的能量,说明该区域的能量越多可以明显看出能量集中分布在粉末的上半球轮廓,说明粉末上半球吸收的能量较多,而且分布情况严格依赖

于粉末的排布情况,能量分布不均匀。为了提高能量分布的均匀性,应多次计算求取能量分布的平均值。经多次测试,重复计算1 000次后,能量分布结果基本保持恒定。重复1 000次计算,能量在深度方向统计结果如图6所示。由图6可知,基体表面吸收的能量为总吸收能量的9.6%,与文献[18]中的吸收率11.1%相近。

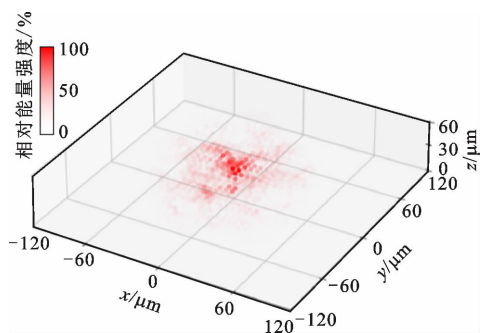


图5 一次计算激光能量的分布

Fig. 5 Calculate the distribution map of laser energy at one time

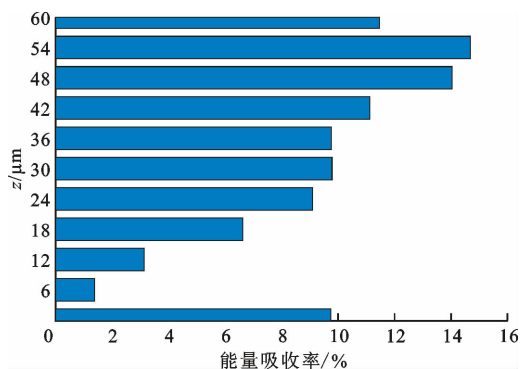


图6 能量在深度方向统计结果

Fig. 6 Statistical results of energy in the depth direction

研究能量在深度方向的分布。由于仿真模型当中粉末层的厚度等于原始粉末的厚度乘以相对密度(相对密度的测量方法和结果由后文给出),相对密度约为50%,故用于温度场分析的粉末模型厚度为30 μm 。采用五次多项式对深度方向分布进行拟合,功率密度与深度之间关系曲线如图7所示,可知最顶层能量分布略低,可能是因为最上层球形粉末颗粒的顶部面积较小且不能吸收到反射回来的激光能量所致。能量在 $z=27 \mu\text{m}$ 、 $z=15 \mu\text{m}$ 处有两个局部较大的值,由图7可知,能量多分布在粉末颗粒的上半球,而受粒度和粉层厚度的影响,粉末颗粒在高度方向上多以两层进行交错分布,在 $z=27 \mu\text{m}$ 、 $z=15 \mu\text{m}$ 处大致是两层粉末上半部的位置,所以出现了能量分布峰值。在基底表面能量分布陡然升

高,这是因为一部分初射激光束通过粉末间的缝隙直接照射到基底表面,而初射光束未经反射蕴含的能量较多,所以基底表面能量较高。

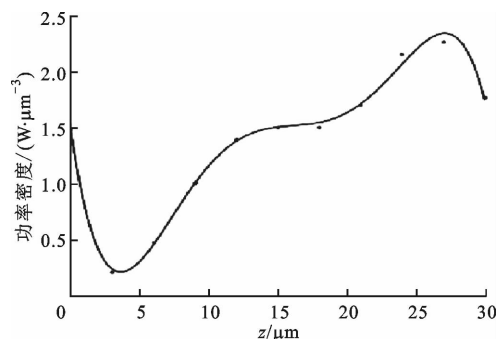
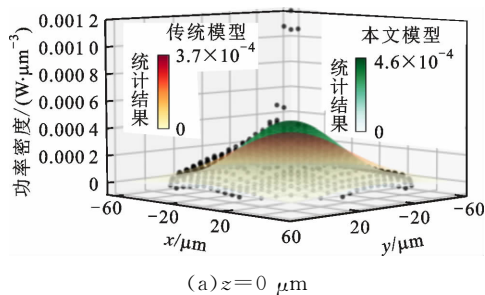


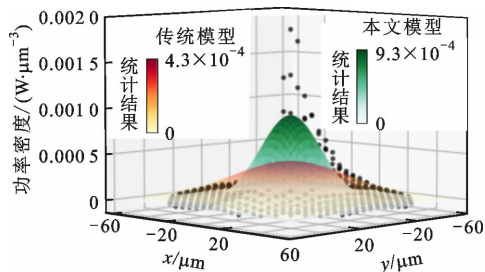
图7 功率密度与深度之间关系曲线

Fig. 7 The relationship between layer energy density and depth

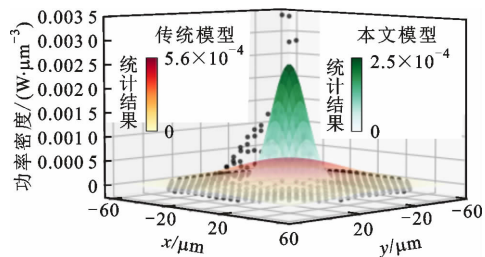
研究能量在水平方向的分布情况,每层能量的分布情况如图8中黑点所示,可知能量分布大致满



(a) $z=0 \mu\text{m}$



(b) $z=15 \mu\text{m}$



(c) $z=30 \mu\text{m}$

图8 传统热源模型和本文热源模型在不同深度水平方向上能量分布对比

Fig. 8 Comparison of energy distribution between new and old models in horizontal directions at different depths

足高斯分布。文献[18]中提出的能量分布公式为

$$q_0(x,y,z)=f_0(z)\cdot\exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{r_0^2}\right)\tag{16}$$

式中 $f_0(z)$ 由最小二乘法求出,传统热源模型如图 8 中红色图形所示,可知传统的热源模型因为忽略了粉末对能量分布在水平方向的影响,得出的热源峰值较小,有待进一步改进。

为缩小模型与实际分布之间的误差,对热源模型重新拟合,即

$$q_1(x,y,z)=f_1(z)\cdot\exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{g_1(z)^2}\right)\tag{17}$$

式中 $f_1(z)$ 、 $g_1(z)$ 由最小二乘法求出。式(17)所表达的热源模型如图 8 中绿色图形所示,可知新提出的分布函数能量更为集中。

采用损失函数描述热源模型的误差,损失函数为

$$e=\sum(q(x,y,z)-q_1(x,y,z))^2\tag{18}$$

式中 $q(x,y,z)$ 为原始数据。两种方法的损失函数对比如图 9 所示,可知两种方法的损失函数变化趋势与层能量密度变化趋势(如图 7 所示)大致相同,且本文提出的函数拟合结果具有更小的误差,能更好地表征热源分布情况。

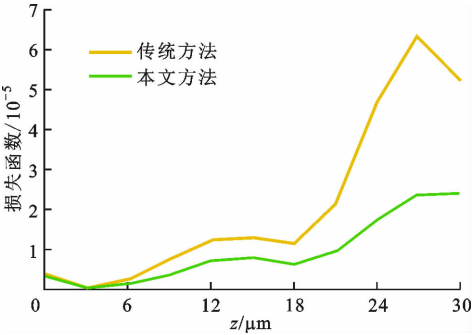


图 9 两种方法的损失函数对比
Fig. 9 Loss function comparison chart

1.3 热源模型

结合上文热源的分析 and 函数的拟合结果,提出新的热源模型,该热源模型在深度方向和水平方向的分布情况随深度而变化。对 $f_1(z)$ 、 $g_1(z)$ 进行 5 次多项式拟合, $f_1(z)$ 、 $g_1(z)$ 与 z 之间的关系如图 10 所示。

最终得到的热源模型为

$$q_1(x,y,z)=f_1(z-z_0)\cdot\exp\left(-\frac{2((x-x_0-v_x t)^2+(y-y_0-v_y t)^2)}{g_1(z-z_0)^2}\right)\tag{19}$$

式中: v_x 、 v_y 分别为热源在 x 、 y 方向的移动速度; t

为热源移动时间。

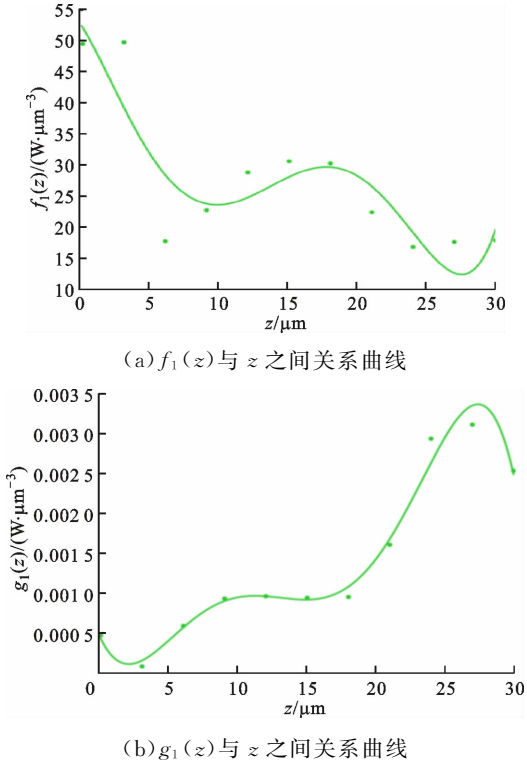


图 10 $f_1(z)$ 、 $g_1(z)$ 与 z 之间的关系

Fig. 10 The relationship between $f_1(z)$, $g_1(z)$ and z

1.4 温度场仿真

1.4.1 零件模型

采用 ABAQUS 软件建立有限元模型。基体部分尺寸为 $1\text{ mm}\times0.5\text{ mm}\times0.27\text{ mm}$,粉末层尺寸为 $1\text{ mm}\times0.5\text{ mm}\times0.03\text{ mm}$ 。为提高仿真计算的精度同时减少计算量,粉末层采用均匀的正六面体网格进行分网,基体采用偏置的方式进行分网,距离加工区域越远,分网的密度越小。采用 Delux 子程序加载本文提出的热源模型。

1.4.2 材料参数

本研究所用材料为 TEKNA 公司的 TC4 粉末。采用大汉机械公司的筛粉机在氮气保护下由 300 目的筛网筛粉。使用型号为 Malvern Masterizer2000 的激光粒度仪检测粉末粒度分布,粉末粒度分布如表 1 所示。

TC4 材料的密度 ρ 为 $4\,450\text{ kg/m}^3$,随温度变化的热导率和比热容如图 11 所示。

1.4.3 假设条件

粉末和基底以及环境温度均为 $118\text{ }^\circ\text{C}$,考虑熔池上表面对流对温度场的影响,对流系数取 $24\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ [23]。考虑熔池上表面辐射对温度场的影响,忽略马兰戈尼对流和汽化反冲压力的影响。

表 1 TC4 粉末化学成分表

Table 1 TC4 powder chemical composition table

元素	Al	V	Fe	Y	C	O	N	H	Ti
质量分数/%	6.41	4.02	0.14	0.001	0.007	0.075	0.016	0.003	余量

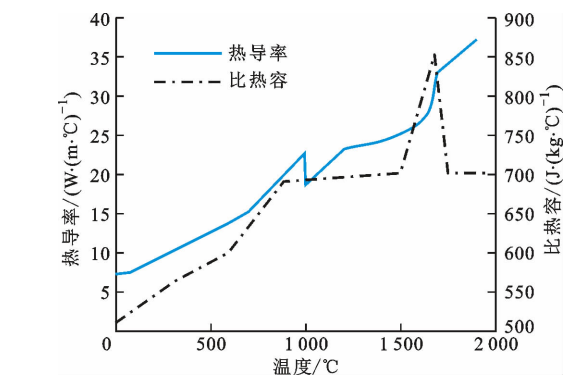


图 11 Ti-6Al-4V 热导率和比热容^[21-22]

Fig. 11 Thermal conductivity and specific heat capacity of Ti-6Al-4V

2 实验验证

2.1 测量粉末层相对密度

为测量粉层的相对密度,需要进行铺粉实验。铺粉实验在如图 12 所示的治具上进行。治具由 3 片厚度 60 μm 的塞尺组成,1、2 号塞尺堆叠在 3 号塞尺上,1、2 号塞尺充当刮刀的导轨,保证了粉层的厚度为 60 μm 。1、2 号塞尺之间的区域为铺粉区域,体积 V 为 82.8 mm^3 。使用刮刀以大约 200 mm/s 的速度模拟铺粉。治具的质量 $m_1=2.887\text{ g}$,铺粉后的质量为 m_2 , (m_2-m_1) 即为粉末层的质量。相对密度的计算公式为

$$\eta = \frac{m_2 - m_1}{V\rho} \quad (20)$$

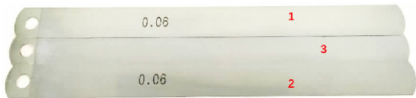


图 12 粉层密度测量治具实物图

Fig. 12 Physical image of powder density measurement tool

2.2 制备样件

为了验证温度场仿真模型的准确性,制作单道熔池观测样件。采用易加三维公司的型号为 EP-M250 的选区激光熔化金属三维打印机按照表 2 工艺参数进行样件制备。

对样件进行处理,分别依次采用 200、400、800、1 600、3 000、5 000、7 000 目的砂纸对垂直于样件扫

描方向的截面进行打磨。采用光学显微镜对处理后的截面进行观测。

表 2 样件所用工艺参数

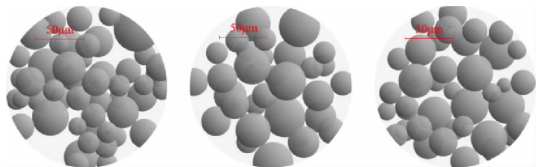
Table 2 Process parameters

序号	功率/W	速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	160	1 000
2	170	1 000
3	180	1 000
4	190	1 000
5	200	1 000
6	180	800
7	180	900
8	180	1 000
9	180	1 100
10	180	1 200

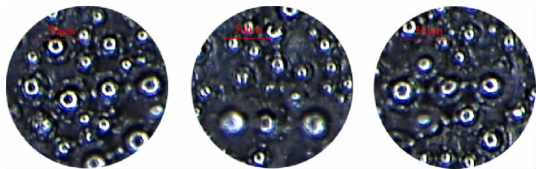
3 实验结果分析

3.1 粉末模型验证

TC4 粉末模型与铺粉实验结果对比如图 13 所示,图 13(a)为依照前文所述方法生成的 3 个粉末模型,图 13(b)为三次铺粉实验显微镜观测照片。



(a) 粉末模型



(b) 显微镜观测照片

图 13 TC4 粉末模型与铺粉实验结果对比图

Fig. 13 Comparison of TC4 powder model and experimental

由图 3 可以看出,TC4 粉末模型与实验结果相似,由编程计算得粉末模型的平均相对密度为 47.3%。实验测量粉层的相对密度实验结果如表 3 所示,可知实验所得粉末层的平均相对密度约为 51.2%,本文取相对密度为 50%,实验结果表明粉

末模型和实际的 TC4 粉末具有较好的一致性。

表 3 铺粉层相对密度测量结果

Table 3 Measurement results of relative density of powder

测试序号	m_2/g	$\eta/\%$
测试 1	3.062 7	47.5
测试 2	3.091 2	55.3
测试 3	3.074 6	50.1
平均值	3.076 2	51.2

3.2 仿真结果与分析

使用本文提出的模型和表 2 中的参数进行温度场仿真,仿真结果如图 14、图 15 所示,熔池宽度实验结果与仿真结果统计如表 4 所示,连接处宽度实验结果与仿真结果如表 5 所示。

表 4 熔池宽度仿真结果统计表

Table 4 Simulation results of molten pool width

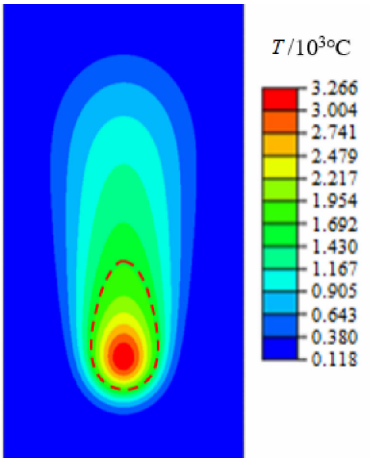
样品序号	熔池宽度实验值/ μm	仿真值/ μm	相对误差/ $\%$
1	125.7	136	8.2
2	131.6	140	6.4
3	135.3	144	6.4
4	139.7	146	4.5
5	143.4	149	3.9
6	164.7	160	2.9
7	158.1	152	3.9
8	132.4	144	8.8
9	129.4	140	8.2
10	122.8	136	10.7

表 5 连接处宽度实验结果与仿真结果统计表

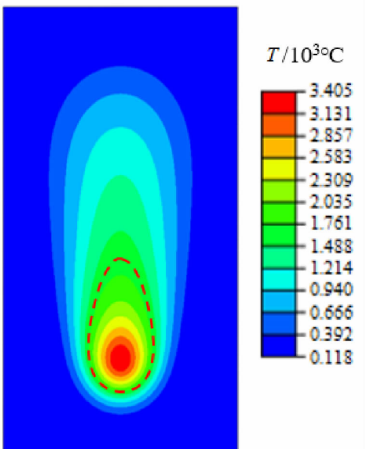
Table 5 Experimental results and simulation results of joint width

样品序号	连接处宽度实验值/ μm	仿真值/ μm	相对误差/ $\%$
1	121.3	108	11.0
2	125.0	113	9.6
3	136.8	120	12.3
4	139.7	121	13.4
5	154.4	124	19.7
6	142.6	139	2.6
7	132.4	130	1.8
8	125.7	120	4.6
9	124.3	112	9.9
10	121.3	108	11.0

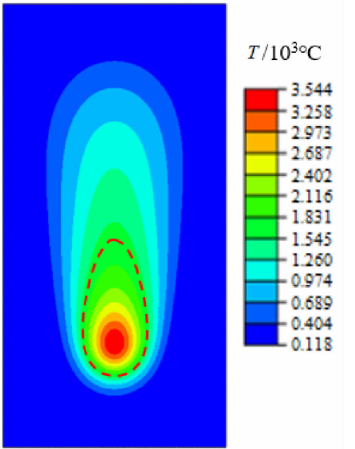
数相同,随着功率由 160 W 增大到 200 W,熔池最高温度由 3 266 ℃ 逐渐升高至 3 821 ℃,熔池宽度由 136 μm 增大到 149 μm ,连接处宽度由 108 μm 增大到 124 μm 。模拟所得的熔池最高温度高于 TC4 粉末的汽化温度^[24],会发生熔液飞溅的情况。由于未考虑熔池的流动,熔池表面蒸发和汽化等对温度的影响,所以本模型的最高温度高于实际温度^[25]。



(a)160 W

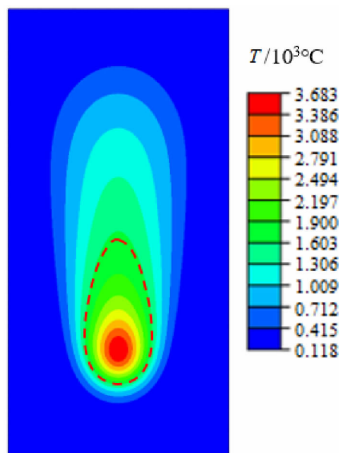


(b)170 W

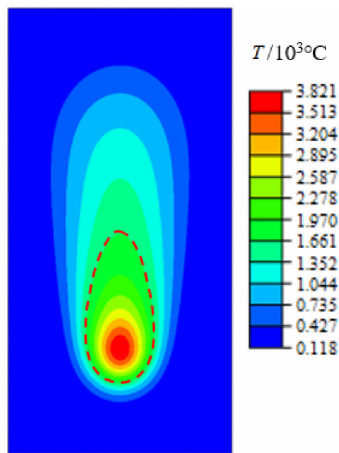


(c)180 W

由图 14(a)、14(b)和表 4、表 5 可知,当其他参



(d)190 W



(e)200 W

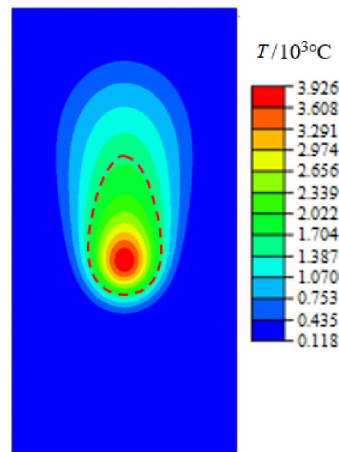
图 14 在速度 1 000 mm/s 不同功率下的熔池仿真结果
Fig. 14 Simulation results of the molten pool under different powers at a speed of 1 000 mm/s

由图 15(a)、15(b)和表 4、表 5 可知,当其他参数相同时,随着速度由 800 mm/s 增大到1 200 mm/s 的过程中,熔池最高温度由 3 926 °C 降低至 3 251 °C,熔池宽度由 160 μm 减小到 136 μm ,连接处宽度由 139 μm 减小到 108 μm 。

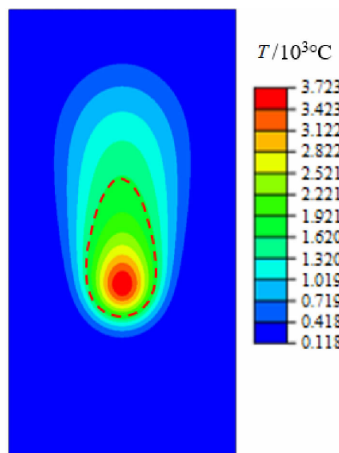
由图 14(c)、图 15(c)可以看出,单道熔池的两侧存在着很多镶嵌在熔池内的球状粉末,熔池顶部发现少量的球状粉末,可能是由于熔池流动将两侧未熔化的粉末带到了熔池顶部。另外还可以发现在基体表面粗糙度较小的部位,熔池形貌较均匀,而在基体表面粗糙度较大的区域熔池形貌变化大。这是由于基体表面粗糙度较大时,峰谷之间落差较大,导致波峰波谷上分布的粉末数量差异较大,继而波峰波谷处经激光照射后形成的熔液体积相差较大,再加上波峰波谷之间较大的高度差促进了熔液向波谷处流动,最终致使新形成的熔池均匀性差。

由图 14(d)、图 15(d)可以看出,熔池与基底连接处多为“坡道”连接,这可能是由于熔池的流动造成的。这一原因也造成了实验测得的连接处的宽度大于仿真预测宽度。

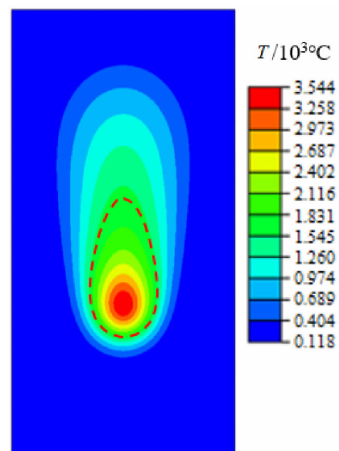
本研究与 Gusarov^[17] 和 Tran^[18] 的预测误差对比情况如表 6 所示。由表 6 可以看出,本研究中仿真结果与实验结果的熔池宽度平均误差为 6.4%,



(a)800 mm/s



(b)900 mm/s



(c)1 000 mm/s

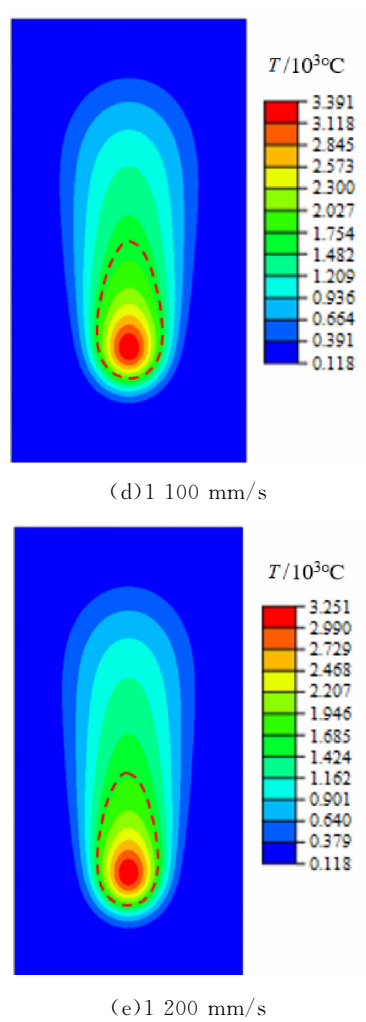


图 15 在功率 180 W 不同速度下的熔池仿真结果
Fig. 15 Simulation results of the of the molten pool under the power of 180 W at different speeds

连接处宽度平均误差为 9.6%。Gusarov 预测的熔池宽度平均误差为 4.6%，连接处宽度平均误差为 17.8%，Tran 预测的熔池宽度平均误差为 6.6%，连接处宽度平均误差为 14%。可知本研究所提模型在熔池连接处的预测优于 Gusarov、Tran 所提模型。

表 6 本文与 Gusarov 和 Tran 的预测误差对比表
Table 6 Comparison of prediction errors between this study and Gusarov' and Tran' studies

对比项目	Guasarov ^[17]	Tran ^[18]	本文
材料	316L	316L	TC4
激光半径/ μm	50	50	60
粉层厚度/ μm	30	30	30
熔池宽度平均误差/%	4.6	6.6	6.4
连接处宽度平均误差/%	17.8	14.0	9.6

尽管本文提出的热源模型提升了温度场仿真的精度,但文章并没有分析金属粉末表层熔化后形成的金属液膜对热源能量分布的影响,后续将对这一问题进行进一步的研究。

4 结 论

本文采用光束追踪法计算得到热源在粉末中的分布情况,分别对深度方向和水平方向的热源分布进行分析。结果表明,在深度方向热源能量随着深度的增加而逐渐减少热源分布的峰值与粉末尺寸有关。在水平方向热源能量分布近似满足高斯分布,但与激光束腰截面处的能量密度分布相比更为集中。本文将该热源模型用于 SLM 熔池轮廓预测实验,仿真结果与实验结果相一致,证明了热源模型的有效性。

参考文献:

[1] 郭鑫鑫,陈哲涵. 激光增材制造过程数值仿真技术综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(10): 227-239.
GUO Xinxin, CHEN Zhehan. Numerical simulation of laser additive manufacturing process: a review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 (10): 227-239.

[2] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions; B, 1984, 15(2): 299-305.

[3] 段成红,郝晓杰,罗翔鹏. 选区激光熔化 316L 温度场研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(5): 748-753.
DUAN Chenghong, HAO Xiaojie, LUO Xiangpeng. Study on temperature field of selective laser melting 316L [J]. Applied Laser, 2018, 38(5): 748-753.

[4] 赵先锐,左敦稳,张强勇,等. 304 不锈钢 TIG 焊接工艺及数值模拟 [J]. 电焊机, 2021, 51(5): 49-55.
ZHAO Xianrui, ZUO Dunwen, ZHANG Qiangyong, et al. TIG welding process and numerical simulation of 304 stainless steel [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(5): 49-55.

[5] 张天雷,徐刚,沈艳涛,等. 基于 MIG 的电弧增材制造熔池行为的数值模拟 [J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(5): 251-256.
ZHANG Tianlei, XU Gang, SHEN Yantao, et al. Numerical simulation of molten pool behavior of MIG-based additive manufacture [J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(5): 251-256.

[6] 杨海欧,王健,王冲,等. 电弧增材制造 TC4 钛合金宏观晶粒演化规律 [J]. 材料导报, 2018, 32(12): 2028-2031, 2046.

- YANG Haiou, WANG Jian, WANG Chong, et al. Macrostructure evolution of TC4 Titanium alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing [J]. *Materials Review*, 2018, 32(12): 2028-2031, 2046.
- [7] 陈丽, 邱威, 赵伟, 等. T2 铜与 Q235 钢异种材料焊接温度场模拟研究 [J]. *铸造技术*, 2018, 39(7): 1541-1544.
- CHEN Li, QIU Wei, ZHAO Wei, et al. Simulation study on welding temperature field of different materials of T2 copper and Q235 steel [J]. *Foundry Technology*, 2018, 39(7): 1541-1544.
- [8] ALI H, GHADBEIGI H, MUMTAZ K. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5): 2621-2633.
- [9] CHEN Qiang, GUILLEMOT G, GANDIN C A, et al. Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 124-137.
- [10] QIU Chunlei, PANWISAWAS C, WARD M, et al. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting [J]. *Acta Materialia*, 2015, 96: 72-79.
- [11] PANWISAWAS C, QIU Chunlei, SOVANI Y, et al. On the role of thermal fluid dynamics into the evolution of porosity during selective laser melting [J]. *Scripta Materialia*, 2015, 105: 14-17.
- [12] GALATI M, IULIANO L, SALMI A, et al. Modeling energy source and powder properties for the development of a thermal FE model of the EBM additive manufacturing process [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 14: 49-59.
- [13] WU Yuche, SAN C H, CHANG C H, et al. Numerical modeling of melt-pool behavior in selective laser melting with random powder distribution and experimental validation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 254: 72-78.
- [14] TANG C, TAN J L, WONG C H. A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126, Part B: 957-968.
- [15] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2627-2636.
- [16] LIU Binqi, FANG Gang, LEI Liping, 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.
- [17] GUSAROV A V, YADROITSEV I, BERTRAND P, et al. Model of radiation and heat transfer in laser-powder interaction zone at selective laser melting [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2009, 131(7): 072101.
- [18] TRAN H C, LO Y L. Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 411-425.
- [19] KUNDAKCIOGLU E, LAZOGLU I, RAWAL S. Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1): 493-501.
- [20] GE P, ZHANG Z, TAN Z J, et al. An integrated modeling of process-structure-property relationship in laser additive manufacturing of duplex titanium alloy [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 140: 329-343.
- [21] ZHANG Baicheng, FENINECHE N E, LIAO Hanlin, et al. Microstructure and magnetic properties of Fe-Ni alloy fabricated by selective laser melting Fe/Ni mixed powders [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2013, 29(8): 757-760.
- [22] 王宗园. 基于 CA 法钛合金激光快速成形晶粒生长模拟研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017.
- [23] NING Jinqiang, MIRKOOHI E, DONG Yuanzhe, et al. Analytical modeling of 3D temperature distribution in selective laser melting of Ti-6Al-4V considering part boundary conditions [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 319-326.
- [24] MISHRA A K, KUMAR A. Numerical and experimental analysis of the effect of volumetric energy absorption in powder layer on thermal-fluidic transport in selective laser melting of Ti6Al4V [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 227-239.
- [25] 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.

(编辑 赵炜 亢列梅)