

# 激光选区熔化致密度预测模型建立与工艺验证

张金禹<sup>1,2</sup>, 杨家林<sup>2</sup>, 许崇海<sup>1</sup>, 刘宁昭<sup>2</sup>, 王国伟<sup>2</sup>, 秦煜<sup>2</sup>, 沈显峰<sup>2</sup>, 刘禹<sup>3</sup>

(1. 齐鲁工业大学 机械工程学部, 山东 济南 250353)

(2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

(3. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 致密度是评价增材制造成型件性能的重要参数之一, 而高致密度成型件对应的工艺参数需要大量实验研究获得。针对该问题, 建立了基于工艺参数的熔池致密度预测模型, 能够有效地预测熔合不良引起的孔隙, 进而为激光选区熔化工艺参数的选择和优化提供更多的参考。模型采用有限元分析和数值计算软件获得熔池尺寸以及模拟多层多道次的熔池拼接形貌, 并预测工艺参数对应的致密度。同时在熔池预测模型中引入了波动系数、偏转角度以及层间扫描转角, 以此兼顾熔池尺寸波动、熔池倾斜以及层间扫描转角对熔池模拟结果的影响。最终, 通过 HR-2 不锈钢选区激光熔化试验对预测模型的可行性进行验证。结果表明, 模型预测结果与成型件熔池试验结果吻合较好, 致密度预测结果与实测偏差在 2% 以内。

**关键词:** 激光选区熔化; HR-2 不锈钢; 熔池尺寸; 致密度预测

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)09-3239-11

激光选区熔化是实际生产中广泛应用的金属增材制造技术之一<sup>[1]</sup>。主要通过激光快速熔化金属粉末, 逐层凝固, 层层叠加的方式得到金属成型件<sup>[2-4]</sup>。相较于传统金属铸造, 激光选区熔化更加灵活、经济、废料更少, 同时利于大规模生产性质相似的金属成型件。所以激光选区熔化广泛应用于航空航天关键零部件、生物、精密模具等领域<sup>[5-6]</sup>。然而, 由于熔池搭接不良<sup>[7]</sup>、球化现象<sup>[8]</sup>、凝固时存在气孔<sup>[9]</sup>等问题导致试件中产生孔隙, 使试件的致密度无法满足工程要求。

孔隙的出现对成型件的机械性能造成不利的影响<sup>[10-11]</sup>。所以致密度作为评价金属成型件中孔隙数量以及对机械性能影响程度的重要参数, 广泛的应用于成型件性能检测以及参数改良中。为提高成型件的致密度, 国内外研究者从不同方面相继进行研究。研究者通过选择合适的能量密度<sup>[12]</sup>、降低粉层厚度<sup>[13]</sup>、成型前对粉末进行预热<sup>[14]</sup>、通入保护气体、降低金属粉末粒径<sup>[15]</sup>、采用激光重熔<sup>[16]</sup>以及采用合适的扫描方式<sup>[2,17]</sup>等方法有效地降低了成型件的孔隙率。综上, 提高致密度的最有效的方法为选择合适的工艺参数, 但目前对于参数调试往往采用正交试验或者参考相似材料的参数, 估算合适工艺参数的大致范围, 然后利用多次反复的正交试验制成增材样品, 通过光学显微镜<sup>[9]</sup>观察孔隙数量以及阿基米德排水法的方式对密度进行测量, 并通过公式<sup>[18]</sup>计算出材

料致密度, 以此来获得致密度最高的工艺参数。为更加精确的观察孔隙生成位置以及数量, Dadbakhsh 等<sup>[19]</sup>采用计算机断层扫描 (CT) 系统 (X-Tek Benchtop CT 160Xi) 在三维显示孔隙形成并评估其致密度。Roehling 等<sup>[20]</sup>通过铸造箱外添加一个高速摄影机, 拍摄和观察打印过程中熔池变化, 以及对试件的密度进行初步估算。综上, 目前研究中多集中于对致密度测量方式进行改进。但是对于材料致密度测量以及工艺参数改良过程的周期过长, 且由于激光选区熔化温度场较为复杂且多因素产生的孔隙位置及大小难以预测, 导致致密度预测的研究报道较为缺乏。

实际上, 对于熔池搭接不良产生的孔隙, 数值计算与模拟软件有着良好的模拟效果<sup>[21-22]</sup>。所以为消除优化工艺参数过程中的多次反复试验, 本研究提出了一种通过模拟熔池排布的方法, 建立链接工艺参数、熔池尺寸、致密度三者之间关系的模型。利用有限元分析软件模拟不同工艺参数的熔池尺寸, 输入熔池拼接的模拟程序中, 产生成型件的二维截面模拟图及其致密度。可以根据此程序分析因熔池搭接引起熔合不良所产生的孔隙。

## 1 致密度预测及验证方法

### 1.1 熔池尺寸计算模型

采用离散元素法 (discrete element method, DEM) 建

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (52101057); 中国工程物理研究院创新发展基金 (CX20210005)

作者简介: 张金禹, 男, 1997 年生, 硕士生, 齐鲁工业大学机械工程学部, 山东 济南 250353, E-mail: a709824766a@163.com

立随机分布的三维数值模型，如图 1 所示。数值模拟的计算区域为 0.6 mm×0.2 mm×0.2 mm。基板采用不锈钢，高为 0.15 mm。金属粉末采用 HR-2 不锈钢材料，材料热物性参数见表 1，粉末粒径为 15~53 μm。同时为节省计算时间，熔化区域采用细网格、熔道两侧未熔化区域采用粗网格划分。熔池模拟设定 x 轴正方向为初始激光扫描方向。

在自由界面上，主要考虑激光能量加热，对流散热，蒸发以及辐射散热损失。所以熔池自由界面上的温度边界条件方程<sup>[23]</sup>为：

$$q_{in} = q - h_c(T - T_0) - \epsilon_r \sigma_s(T^4 - T_0^4) - q_{evp} \quad (1)$$

式中， $q_{in}$  是熔池自由界面上的热流变化， $q$  为激光热源的热流密度， $q_{evp}$  为蒸发散热， $h_c$  为自然热对流传热系数， $\epsilon_r$  为发射率， $\sigma_s$  为 Stefan-Boltzmann 常数。 $T$  为温度， $T_0$  为环境温度。

热源采用旋转体热源形式施加于模型中，且体热源符合高斯分布。最终热源方程<sup>[24]</sup>为：

$$q = q(x, y, z) = \frac{3c_s Q}{\pi H(1 - \frac{1}{e^3})} \exp[-\frac{3c_s}{\lg(\frac{H}{z})}(x^2 + y^2)] \quad (2)$$

$$C_s = \frac{3}{R_0^2} \quad (3)$$

式中， $Q$  为热输入率， $R_0$  为激光半径， $C_s$  为热源开口半径， $H$  为热源高度。

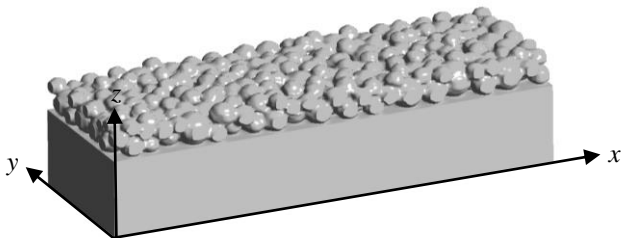


图 1 三维数值模型

Fig.1 3D numerical model

表 1 粉末的热物性参数

Property	Value
Molar mass/kg mol <sup>-1</sup>	0.055 14
Density/kg m <sup>-3</sup>	6607
Specific heat/J (kg K) <sup>-1</sup>	848
Thermal conductivity/W (m K) <sup>-1</sup>	36.7
Viscosity/kg (m s) <sup>-1</sup>	0.006 42
Liquidus temperature/K	1640
Solidus temperature/K	1691.2
Boiling temperature/K	3083
Latent heat of fusion/J kg <sup>-1</sup>	247 000
Latent heat of evaporation/J kg <sup>-1</sup>	6 520 000

当温度达到金属的蒸发温度时，蒸发会造成热量损失。金属蒸发的热量损失方程<sup>[25]</sup>为：

$$q_{evp} = 0.82 \frac{\Delta H^*}{\sqrt{2\pi MRT}} P_0 \exp(\Delta H^* \frac{T - T_{lv}}{RTT_{lv}}) \quad (4)$$

式中， $\Delta H^*$  为逸出金属蒸气焓， $M$  为摩尔质量， $R$  为理想气体常数， $P_0$  为环境压力， $T_{lv}$  为金属沸点。

在激光选区熔化模拟中，熔池主要受蒸气反冲压力、表面张力、热浮力的作用。其中蒸气反冲压力方程<sup>[26]</sup>为：

$$P_r = 0.54 P_0 \exp(L_{lv} \frac{T - T_{lv}}{RTT_{lv}}) \quad (5)$$

式中， $P_r$  为蒸气反冲压力， $L_{lv}$  为金属的蒸发潜热。

熔池尺寸模拟中激光功率采用 340 W，扫描速度分别为 1250、1550、1850 以及 2250 mm/s。具体工艺参数如表 2 所示。

### 1.2 熔池致密度计算模型

致密度预测模型基于数值计算软件建立，主要包括 4 个模块：参数输入模块、运算及循环模块、识图模块以及输出模块。其中，输入模块用于用户所提供的工艺参数、熔池参数、自定义参数等。其中需要输入的详细参数见表 3。模型根据用户输入的相关参数，利用数值计算软件中绘图与填色功能获得单个熔池形貌。通过运算与循环模块配合用户输入的单层熔池个数以及熔池层数，获得完整熔池排布。本模型中熔池排布层数与单层熔池个数作为本预测模型中可输入变量，理论上可以为无限。最后将预测图导入识图模块并从输出模块中获得致密度预测值。

经过以上 4 个模块可通过输入熔池尺寸，建立基础致密度预测模型。根据此模块输出的排布图，可以确定在实际的成型过程中，熔池的搭接情况以及孔隙容易出现的位置，并大致确定工艺参数是否合理。

根据已有文献的计算和试验结果可知，熔池截面的形状可近似处理为抛物线。并且，由于熔池形貌与大小受到马兰戈尼对流与蒸气反冲压力的作用，热传导熔池由于温度相对较低，反冲压力较小，熔池形状与大小主要受马兰戈尼力的影响，所以热传导熔池多为宽而浅的熔池，匙孔模式熔池由于温度积累，熔池形状与大小受

表 2 模拟使用的工艺参数

Sample No.	Laser power/W	Scanning speed/mm s <sup>-1</sup>	Energy density/J mm <sup>-3</sup>
1#	340	2250	36.0
2#	340	1850	51.1
3#	340	1550	73.1
4#	340	1250	113.3

表 3 致密度预测模型所需参数

Table 3 Parameters required in the model for predicting relative density

Parameter	Scanning space	Layer thickness	$B$	Width of melting pool	Depth of melting pool	Number of layers	$N$
Sign	$d$	$s$	$\theta$	$l$	$h$	$n$	$m$

Note:  $B$ —angle of scan vectors rotation between layers;  $N$ —number of single layer's molten pools

反冲压力马兰戈尼对流的双重作用形成窄而深的熔池。所以，模型中为准确模拟不同模式熔池形貌与大小，引入熔池宽度 ( $l$ ) 和熔池深度 ( $h$ ) 作为可输入变量，基准熔池抛物线方程表示为：

$$y = \frac{4h}{l^2} x^2 \quad (6)$$

打印中多层多道熔池主要是以扫描间距以及层厚为基础的有规律的堆砌。数学方程中可近似为基础抛物线在二维平面的  $x$ 、 $y$  2 个反向的移动与叠加。所以多个熔池方程为：

$$y = \frac{4h}{l^2} (x - m_i)^2 + n_k - s \quad (7)$$

$x$ 、 $y$  方向循环次数要分别大于熔池层数与单层熔池个数。其中  $m_i$  为每层第  $i$  个熔池抛物线与基准熔池抛物线在横向上的距离， $n_k$  为第  $k-1$  层熔池与基准熔池抛物线在纵向上的距离。

$$i \geq n \quad (8)$$

$$k \geq m \quad (9)$$

$$m_i = m_{i-1} + d \quad (10)$$

$$n_k = n_{k-1} + s \quad (11)$$

1.2.1 熔池形貌尺寸优化

实际打印中，激光能量高且能量分布不稳定，导致各熔池形貌与尺寸并不能完全一致，而且熔池会向不同方向倾斜。这些因素很容易导致模型预测的熔池致密度严重失真。所以在本预测模型中，将熔深、熔宽的尺寸波动转化为熔池抛物线在  $x$ 、 $y$  轴 2 个方向的伸缩。由于熔池尺寸波动在试验中的随机性，模型中采用随机函数对熔池方程进行调节。所以二维熔池方程为：

$$y = r_0 \frac{4h}{l^2} (x - m_i)^2 + n_k - s + rs \quad (12)$$

式中， $r_0$  为熔池尺寸波动系数， $r$  为熔池纵向位移系数。

$r_0$  与  $r$  为可输入参数，可根据实际情况和试验目的对其进行修改，同时通过随机函数达到熔池尺寸及纵向位置的随机波动。

熔池产生的倾斜，在模型中可以看作熔池抛物线位置绕熔池平顶顶线中点  $(x_0, y_0)$  随机旋转。则可利用坐标转换公式将熔池抛物线方程进行随机偏转。

$$x = (x_1 - x_0) \cos \alpha - (y_1 - y_0) \sin \alpha \quad (13)$$

$$y = (y_1 - y_0) \cos \alpha + (x_1 - x_0) \sin \alpha \quad (14)$$

式中， $\alpha$  为熔池的最大随机偏转角度。

$\alpha$  作为模型中的可输入参数，用户可根据实际情况与实验目的输入任意角度。同时通过随机函数达到熔池的随机偏转。

1.2.2 层间扫描转角引入

以上方程可以对二维熔池拼接形貌进行有效地预测与模拟。但是在实际的成型中，为了扩大工艺参数的选择窗口并拥有更好的性能，通常采取“交叉成型”<sup>[27-29]</sup>。交叉成型中，相同转角层有着相似的形貌以及相似的机械性能；在不同层的熔池就由于层间扫描转角的存在，其形貌尺寸在二维投影中发生改变。在二维投影中，熔池的熔深没有发生改变，熔宽由于投影作用，存在如公式 (15) 的转换关系，而当  $\cos \theta$  等于零时，熔池横置。同时由于层间扫描转角的作用下，在二维平面上投影的熔道间距也随之发生变化。

$$l_0 = \frac{l}{\cos \theta} \quad (15)$$

式中， $l$  为无层间扫描转角时的熔池宽度， $l_0$  为有层间扫描转角时投影到二维平面的熔池宽度， $\theta$  为层间扫描转角。

二维熔池预测模型经过引入层间扫描转角，模型可预测三维投影下的熔池形貌。则三维熔池抛物线方程最终为：

$$y_{\text{down}} = r_0 \frac{4h \cos^2(\theta)}{l^2} (x - m_i)^2 + n_k - s + rs \quad (16)$$

式中， $\theta$  为层间扫描转角，作为可输入参数可根据实际成型参数进行选择。

在实际情况中，由于熔体回流以及表面张力的作用下，上半熔池多为倒扣的抛物线形状，所以与下半熔池相似，同时考虑熔池尺寸波动、偏转角以及层间扫描转角后，上半熔池模拟方程为：

$$y_{\text{up}} = -0.5r_0 \frac{4h}{l^2} (x - m_i)^2 + n_k - s + rs + 1.5r_0h \quad (17)$$

1.3 试验验证方法

材料成型采用德国 EOS M290 选区激光熔化打印机，最大激光功率为 400 W，最大扫描速度为 7 m/s。实验材料选取 HR-2 不锈钢。HR-2 不锈钢是一种奥氏体不

锈钢，具有优异的抗腐蚀与抗氢脆性能，其在高压储氢容器等能源工业及相关领域被广泛应用<sup>[30-31]</sup>。粉末具体化学成分见表 4。

试验过程中，许多因素容易导致成型件产生孔隙。所以为尽量减少其他因素导致成型件产生孔隙干扰试验，采取试验前对 HR-2 粉末进行预热、试验中充分洗气并通入氮气作为保护气体、干燥粉末 2 h 以及降低铺粉层厚等措施以防止其他因素影响试验验证的准确度。试验中采用扫描速度、扫描间距作为主要变量，试验的主要成型参数如表 5 所示。初始成型方向（如图 2）沿  $x$  轴正方向，采用 67°层间扫描转角成型。

将打印成型后的样品沿垂直方向通过线切割 2 组样品。一组切割样品采用“金相法”测量致密度。“金相法”为样品打磨抛光，经超声波清洗后，利用 OLYMPUS GX53 倒置光学显微镜观察成型情况并拍下成型表面曲线形貌图，最后利用灰度分析垂直平面多点位置缺陷形貌图，多点位置获得的致密度平均后获得成型件的致密度。

切割后垂直方向的另一组样品经打磨、抛光、清洗

表 4 HR-2 不锈钢粉末化学成分

Table 4 Chemical composition of HR-2 stainless steel powder (wt%)

Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	C	Fe
0.24	9.07	0.0056	0.001	7.54	20.11	0.21	0.033	Bal.

表 5 试验使用的工艺参数

Table 5 Process parameters for experiment

Sample No.	Laser power/W	Scanning speed/mm s <sup>-1</sup>	Scanning space/mm	Layer thickness/mm	Energy density/J mm <sup>-3</sup>
1#	340	2250	0.14	0.03	36.0
2#	340	1850	0.12	0.03	51.1
3#	340	1550	0.10	0.03	73.1
4#	340	1250	0.08	0.03	113.3

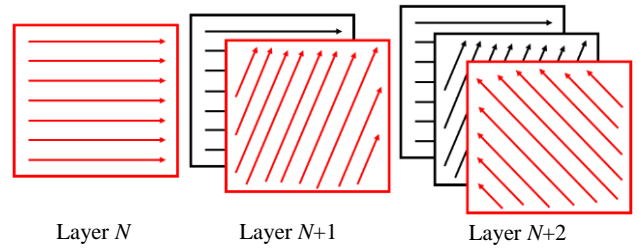


图 2 激光选区熔化的扫描策略

Fig.2 Scanning strategy of selective laser melting

后放入沸腾的腐蚀液（1 g 高锰酸钾+90 mL 水+10 mL 浓硫酸混合）中腐蚀 10 min。利用光学显微镜观察腐蚀后的截面样品，并获得垂直方向的试验熔池切面图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型效果及预设参数的影响测试

模型中，熔池波动系数、偏转角以及层间扫描转角等模型中的预设参数对孔隙的生成及最后的致密度的测量有着很大的影响。所以为观察模型预测的效果以及不同预设参数对熔池预测致密度的影响，以熔深为 40 μm、熔宽为 100 μm、扫描间距为 70 μm、层厚为 30 μm 等输入参数为例，对预测模型中熔池波动、偏转角以及层间扫描转角进行测试。将测试的预设参数输入模型，获得初始致密熔池排布。根据预测模型中识图模块的测量初始致密熔池截面致密度为 100%。

#### 2.1.1 熔池尺寸及纵向位移波动的致密度测试

模型中，熔池的尺寸波动设置为熔池抛物线在  $x$ 、 $y$  2 个方向的随机伸缩，熔池纵向位移波动则设置为熔池在  $y$  方向的整体上下波动。试验中熔池尺寸与纵向位移的随机波动测试范围设置为 0%、±20%、±30%、±40%，层间扫描转角与最大偏转角为 0°。可以获得如下熔池排布图（图 3）。

图 3a 为标准无孔隙熔池排布，其致密度为 100%。随着熔池尺寸及纵向位移波动系数的增加。图 3b 中

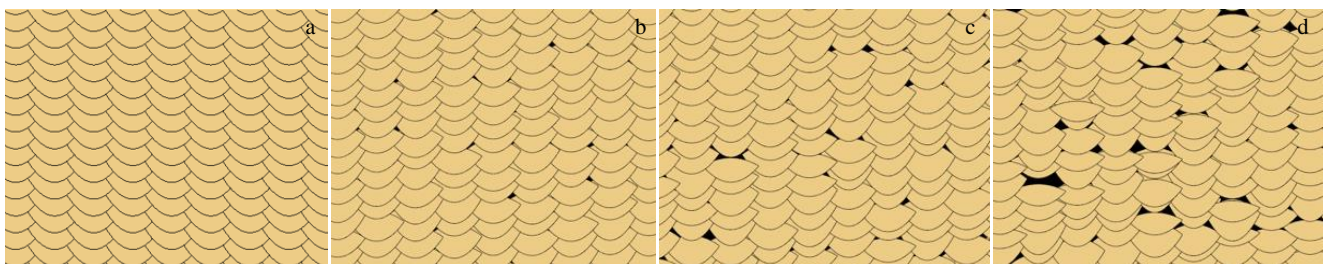


图 3 熔池尺寸波动对孔隙数量及位置影响的排布图

Fig.3 Patterns of the influence of the size fluctuation of the melting pool on the number and position of pores: (a) ±0%, (b) ±20%, (c) ±30%, and (d) ±40%

±20% 的熔池截面出现孔隙，致密度为 99.93%，相较于图 3a 中无波动熔池，±20% 的熔池致密度有所下降。±30% 及 ±40% 的熔池致密度分别为 99.56% 和 99.22%。从图 3c 可以看出熔池截面图中随着熔池尺寸及纵向位移波动越加明显，熔合不良导致±30%波动系数的孔隙数量继续增加，一些微小的孔隙逐渐增大，致密度下降。在图 3d 中，相较于初始熔池排布形貌的差别则更为明显，在波动系数为±40%时，熔合不良导致的孔隙继续扩大，并且孔隙相连形成更大孔隙。而成型件中不规则大孔隙的形成会严重影响增材样品的机械性能。

2.1.2 熔池偏转角的致密度测试

模型中熔池的随机偏转设置为熔池抛物线绕平顶熔池顶线中点随机旋转。试验中熔池最大偏转角度设置为 0°、20°、30°以及 40°；层间转角设置为 0°，熔池尺寸及纵向位移波动系数设置为 0%。可以获得如下熔池排布图（图 4）。

在波动系数为 0% 及其他参数与熔池尺寸及纵向位移波动测试一致时，图 4a 标准无空隙致密度同样为 100%。图 4b 最大偏转角度为 20° 时熔池拼接处孔隙较小且形状较为一致，相较于标准无孔隙熔池截面，致密度下降为 99.5%。图 4c 中最大偏转角度增大为 30° 时熔池拼接处孔隙大小增大，孔隙形状不一且上下层孔隙有连接在一起形成大孔隙的趋势，致密度相较于图 4a 和图 4b 进一步下降，为 98.65%。40° 则为 98.26%，其孔隙大小继续增大，分布更为集中，这种情况极易影响成型件的机械性能。根据多角度熔池偏转熔池拼接图可以看出，

随着倾斜角的增大，熔池拼接不良产生的孔隙也随之增多。在无层间扫描转角的简单模型中，相较于熔池尺寸波动，熔池偏转对于致密度的下降有着更明显的影响。

2.1.3 层间扫描转角的致密度测试

实际生产与试验中，经常采用 0°、45°、67°以及 90° 作为层间扫描转角。多角度层间扫描转角的引入是为了消除残余应力及提高工艺参数的选择空间。而层间扫描转角的引用不可避免地致密度产生影响。同时上文中提到实际生产中，熔池不可避免地产生熔池尺寸及纵向位移波动、熔池偏转使致密度下降。所以在三维致密度预测模型中以尺寸及纵向位移波动为±30%，熔池偏转 20°为基础，层间扫描转角设置为 0°、45°、67°以及 90°，可以获得如图 5 所示的熔池形貌。

测试中，未加入层间扫描转角时，熔池截面形貌如图 5a 所示，熔合不良导致的孔隙广泛分布于熔池边缘，其中大部分孔隙为小孔隙，经过测量，图 5a 的致密度为 99.33%。模型中添加层间扫描转角后，从图 5b、5d 的熔池形貌图可以观察到，熔合不良产生的孔隙大多数出现于 0°层与 90°层熔池之间，相较于 45°层间扫描转角，90°层间扫描转角的孔隙更加集中，面积更大。图 5c 中 67°层间扫描转角的孔隙数量有所减少，0°层间扫描转角中的大孔隙也被控制。通过识图模块测量 45°、67°以及 90°的致密度分别为 98.91%、99.52%和 98.35%。根据测量的预测致密度以及可以观察到 45°以及 90°层间扫描转角预测致密度相较于无层间扫描转角都有不同程度的下降，其中 90°的预测致密度下降程度最大，而 67°层间

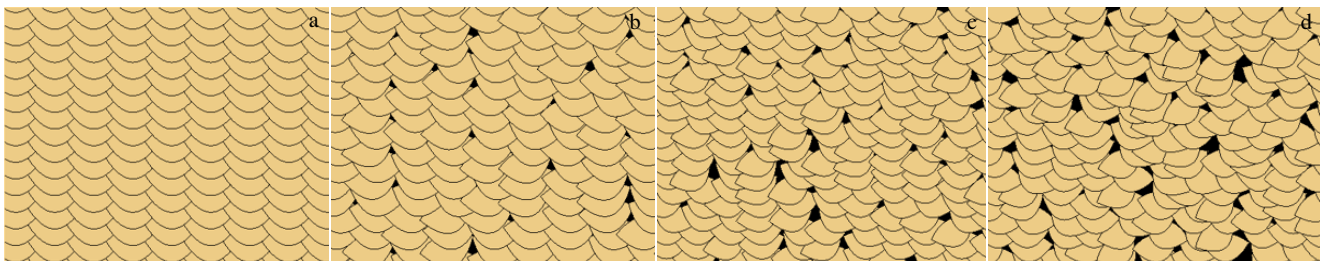


图 4 熔池偏转角对孔隙数量及位置影响的排布图

Fig.4 Patterns of the influence of melting pool deflection angle on the number and location of pores: (a) 0°, (b) 20°, (c) 30°, and (d) 40°

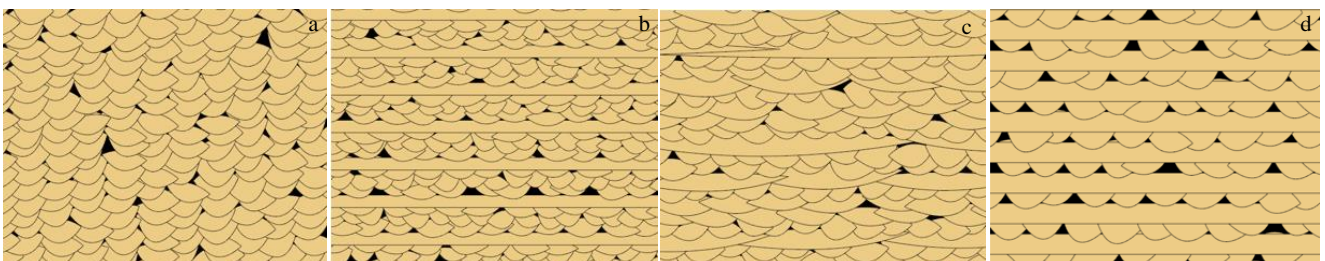


图 5 熔池层间扫描转角对熔池孔隙数量及位置的影响

Fig.5 Influence of angle of scanning vectors rotation between layers on the number and location of pores in the melting pool: (a) 0°, (b) 45°, (c) 67°, and (d) 90°

扫描转角相对于无层间扫描转角预测致密度上升了 0.19%，所以在层间扫描转角的测试中，67°的预测致密度最高。

### 2.2 熔池尺寸预测

熔池形貌主要受马兰戈尼对流以及反冲压力的影响。而匙孔熔池的形成则主要受反冲压力的作用。根据公式(5)，反冲压力为熔池温度的函数，当材料吸收的能量较大时，能量使得材料快速气化并在熔池中产生蒸气压力，这股压力使熔池中心形成匙孔并促使熔池向下扩展。根据模拟，熔池在初始阶段由于材料气化而产生的蒸气压力未达到形成匙孔的程度，初始阶段的熔池还呈现宽而浅的形貌。随着时间的延长，能量不断积累使熔池中蒸气压力不断升高，当蒸气压力达到某一临界值时，匙孔出现，并随着时间增长而增大。增大到一定程度后，匙孔熔池趋于稳定。所以熔池尺寸选择在熔池形貌稳定后进行测量。

在模拟中发现，由于表面粉末并不是完全致密，熔液凝固后熔池高度会有不同程度的下降。在对熔池测量时选择根据粉末的松装密度下降一定高度进行测量。所以通过后处理软件的测量，具体的熔池形貌及尺寸参数见图 6 及表 6。

### 2.3 熔池致密度预测

根据致密度预测模型，将工艺参数对应的熔池尺寸参数以及 67°层间扫描转角代入。同时本次预测中熔池波动选取±30%，最大的熔池偏角选取 20°，可以得到熔池形貌预测图(图 7)。

根据熔池形貌预测图，通过模型中识图模块得出各工艺参数对应的预测致密度。1#致密度为 94.4%，2#致密度为 98.62%，3#致密度为 99.92%，4#致密度为 100%。同时从图 7 中可以发现，4#工艺参数的熔池拼接较为严密，基本无空隙。3#到 1#参数，由于扫描速度增加，熔池的形貌尺寸减小的同时扫描间距增加，导致打印上下

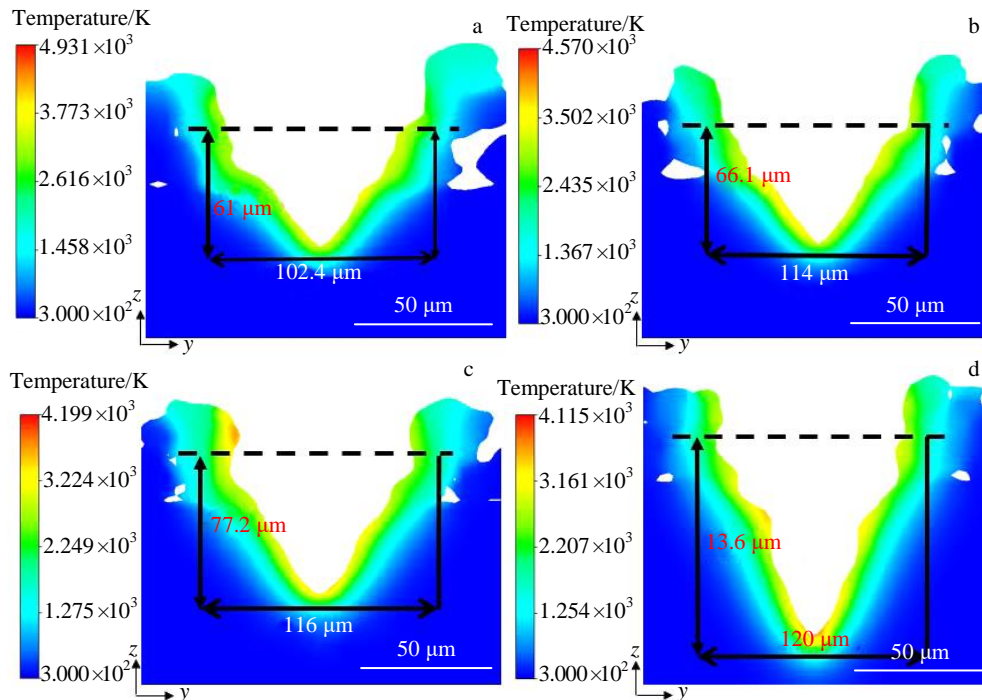


图 6 不同工艺参数所对应的温度分布以及熔池的尺寸

Fig.6 Temperature distributions and melting pool sizes corresponding to different process parameters: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

表 6 不同工艺参数下模拟熔池尺寸

Table 6 Simulated melting pool sizes under different process parameters

Sample No.	Width/ $\mu\text{m}$	Depth/ $\mu\text{m}$
1#	109.4	61
2#	114	66.1
3#	118	77.2
4#	120	113.6

层搭接不良，产生大量孔隙。而这种情况随着扫描速度与扫描间距的增加，更加严重。到 1#时，孔隙已经广泛的分布于熔池形貌预测图中。

### 2.4 试验结果与模型验证

#### 2.4.1 熔池尺寸实验验证

4 组样品经线切割成 2 份样品，对其中一份样品打磨抛光并腐蚀后，经 OLYMPUS GX53 倒置光学显微镜对试验熔池尺寸观察并测量。由于打印中层间扫描转角

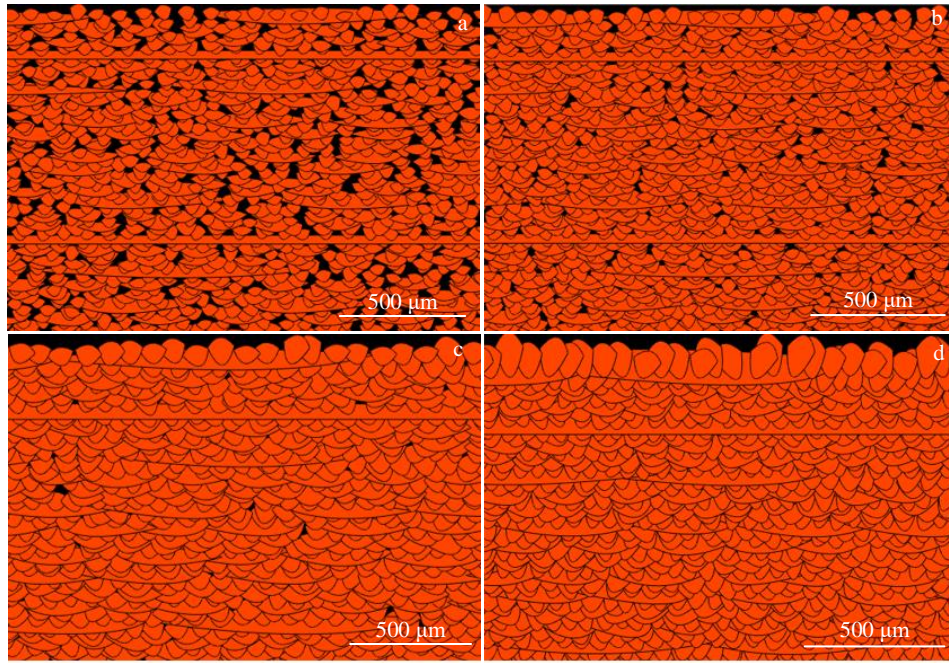


图 7 熔池形貌预测图

Fig.7 Predicted morphologies of melting pool: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

的存在，所以在对试验中熔池尺寸测量时，仅对表层熔池进行测量。表层熔池形貌如图 8 所示。观察腐蚀后金相图可以发现表层熔池尺寸大小不一，并且一些熔池存在一定倾角，说明了预测模型中添加熔池尺寸波动系数与熔池偏转角的必要性。为获得较为准确的熔

池形貌尺寸，对多个熔池尺寸平均后作为试验熔池尺寸对预测熔池尺寸进行验证。具体试验中平均熔池尺寸见表 7。

图 9 为模拟与试验熔池形貌尺寸对比。从图中可以发现，模拟的熔池尺寸与试验基本吻合，1#与 4#中熔宽相较于试验数值有所缩小，但 4 组样品形貌尺寸数据基本在误差范围内。

2.4.2 熔池致密度模型验证

通过实验金相图（图 10）可以观察到，1#中孔隙广泛存在于熔池截面形貌中。这些孔隙基本沿着熔池边界存在，而且形状不规则，多为熔合不良产生的孔隙。一些熔合不良孔隙跨越上下多个熔池，形成更大的孔隙，这些孔隙周围易产生应力集中，使试件的机械性能下降，严重时会使成型件产生裂纹。这种孔隙在实际生产中是要着重避免的。2#由于扫描间距以及扫描速度的

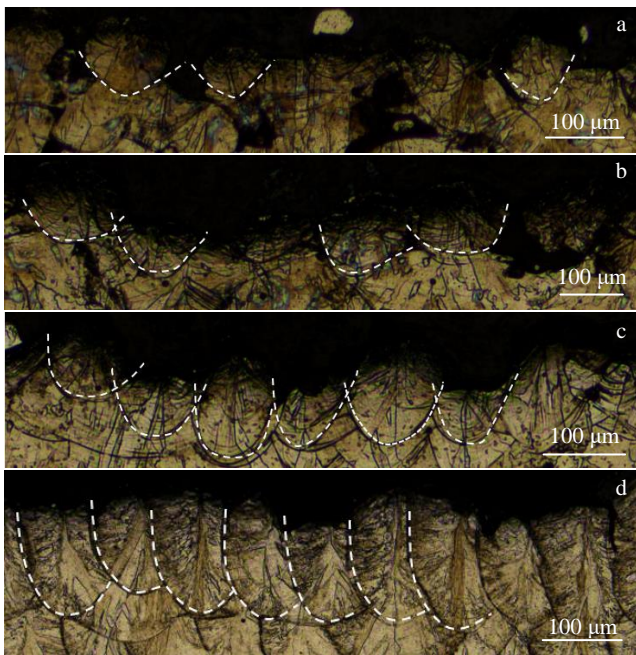


图 8 表层熔池 OM 形貌

Fig.8 OM morphologies of surface melting pool: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

表 7 不同工艺参数下试验熔池尺寸

Table 7 Experimental melting pool sizes under different process parameters

Sample No.	Width/ $\mu\text{m}$	Depth/ $\mu\text{m}$
1#	112.9	57.96
2#	116.05	67.95
3#	118.78	78.98
4#	123.15	114.39

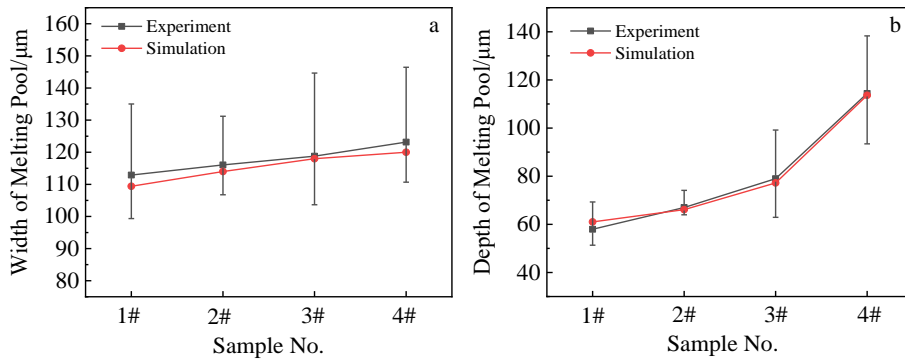


图 9 不同工艺参数条件下试验与模拟熔池尺寸对比

Fig.9 Size comparisons of melting pool between experiment and simulation under different process parameters: (a) width and (b) depth

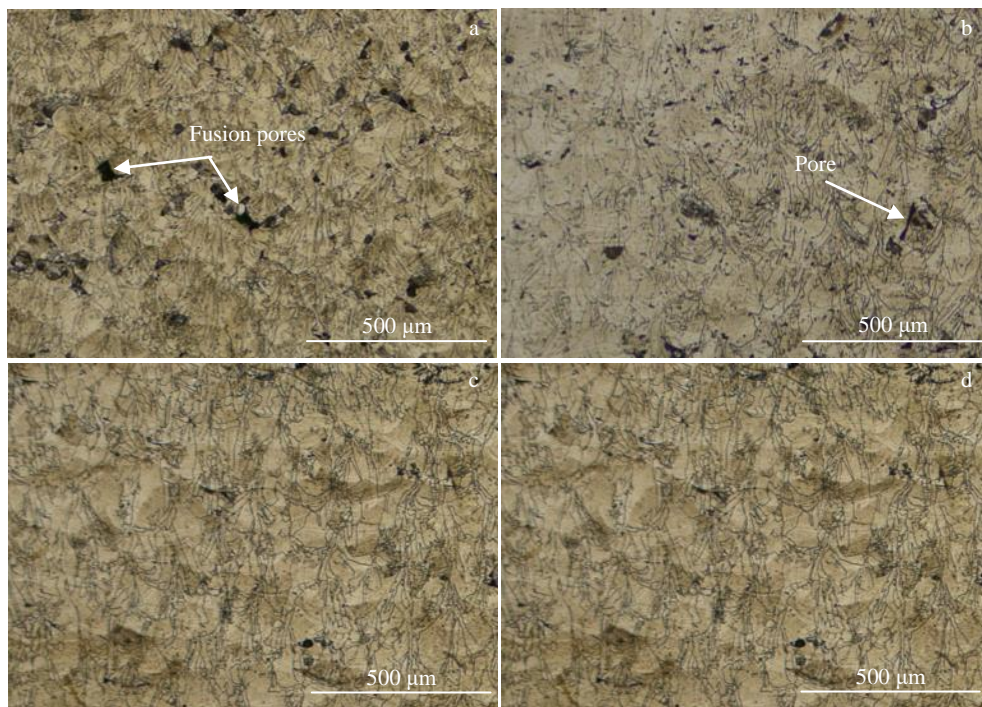


图 10 不同工艺参数样品的 OM 形貌

Fig.10 OM microstructures of samples: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

下降，熔合不良孔隙的数量和大小相较于 1#减小了很多，而且 2#形貌中上下贯通的大孔隙大量减少。3#中基本没有大面积的孔隙，而是在熔池边缘存在小孔隙。4#中熔池基本可以达到致密。

将未腐蚀的成型件打磨抛光后，通过灰度分析金相照片测量成型件的致密度。经测量，1#试验致密度为 96.68%，2#致密度为 98.5%，3#致实测致密度为 99.0%，4#实测致密度为 99.81%。2#、3#、4#与预测模型预测相差误差不到 1%。而 1#相对试验误差则为 2%左右。

通过对预测模型进行调色等操作，可获得与试验未腐蚀的熔池截面形貌相似的预测照片（图 11）。预测模型可以有效地模拟出熔池形貌，而且可以通过预测图可

以直观地观察孔隙的数量以及熔池截面中孔隙可能出现的位置。如图 11 所示，与试验对比预测模型对于孔隙数量及位置的预测较好。可以达到提高致密度测量及工艺参数改良效率的作用。

图 12 为不同工艺参数条件下模拟与试验致密度对比。由图 12 可以看出预测模型对于致密度的预测效果较为良好，与试验中测量的致密度相比，误差在 2% 以内。同时在图 12 中发现 1#样品中，预测致密度相较于试验测量值要小。这主要是由于能量密度低以及扫描间距偏大导致熔池之间产生大面积的熔合不良孔隙，在实际情况中，这些熔合不良孔隙中会如图 13c 存在大量未熔化的粉末<sup>[18,32-33]</sup>。同时从图 13 中可以观察到，图 13a 中由



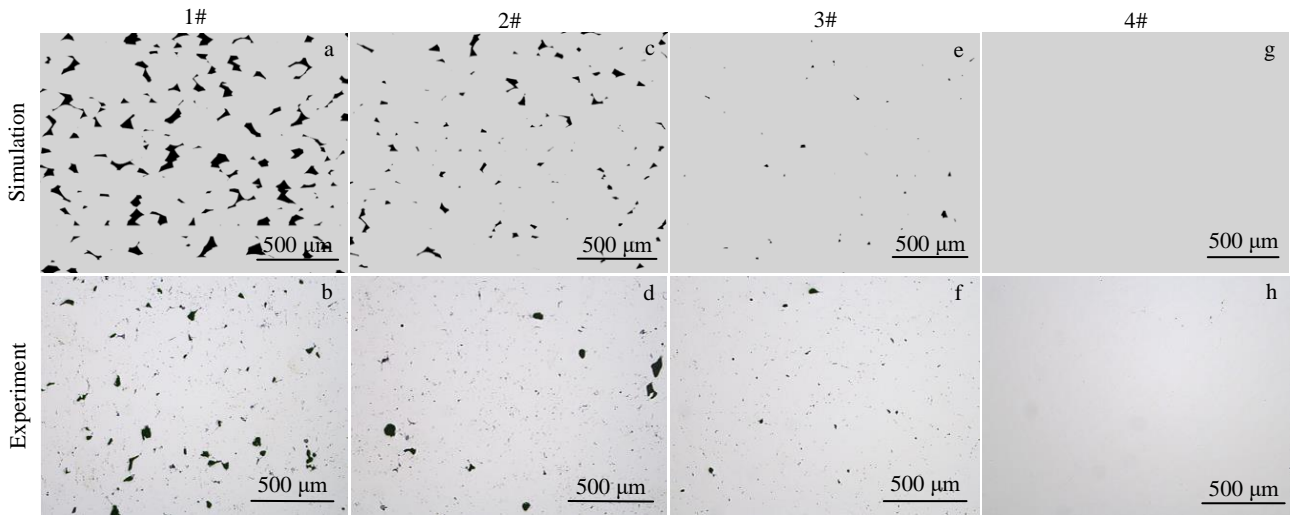


图 11 不同工艺参数条件下模型的模拟效果验证

Fig.11 Verification of simulative effect of the model under different process parameters

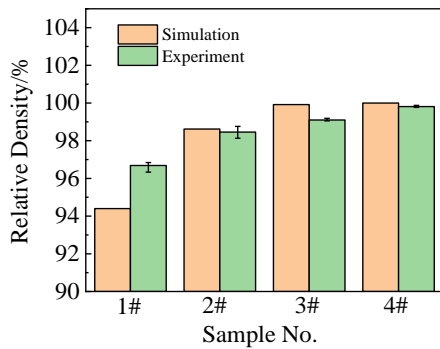


图 12 不同工艺参数条件下模拟与试验致密度对比

Fig.12 Comparison of relative density between the experiment and simulation under different process parameters

于模型限制, 暂时无法在预测熔合不良产生的孔隙中添加粉末(图 13b)。这就导致了 1#中预测致密密度要小于试验致密度测量值。

在图 12 的 2#、3#、4#样品中, 相对于试验测量值, 致密度预测值要大。同时在图 11 的预测形貌中也可以观察到相较于模型预测的截面形貌, 试验所得的截面形貌存在一些微小的孔隙。这主要是由于随着能量密度的增加以及扫描间距减小造成的重熔现象使得熔池中最高温度增加, 使成型件中低熔点组分挥发导致成型件中产生微小的气孔<sup>[34]</sup>。而预测模型中暂时无法对这种微小的气孔进行有效地模拟。所以, 这种微小气孔的产生使致密度预测值要大于试验测量的致密度。

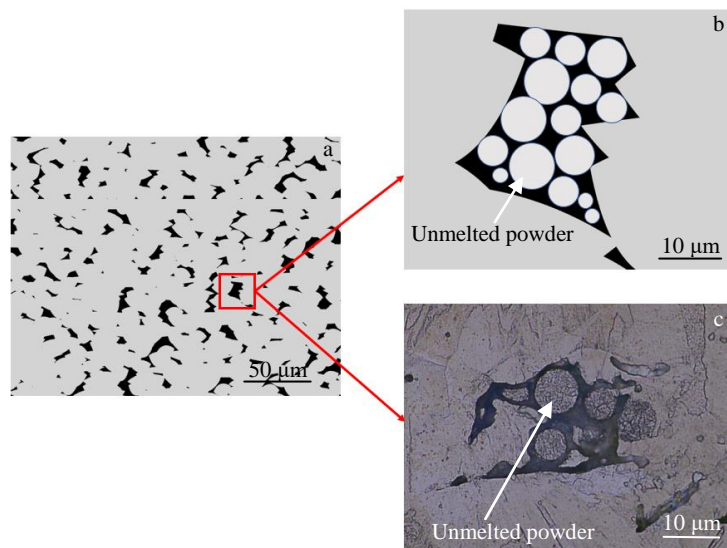


图 13 未熔化粉末对致密度预测准确性的影响

Fig.13 Effects of unmelted powder on prediction accuracy of relative density: (a, b) simulation and (c) experiment

### 3 结 论

1) 根据熔池形貌尺寸模拟, 获得熔池形貌及尺寸数据。模拟尺寸与实验熔池形貌尺寸之间误差在  $10\ \mu\text{m}$  之内。误差较小, 尺寸预测模型可以有效地获取单个熔池的形貌尺寸。

2) 根据建立的熔池致密度预测模型对模型运用范围进行了探索以及预设参数的测试。主要利用熔池波动系数、偏转角以及层间扫描转角的预设参数对模型进行了测试。测试发现随波动程度以及偏转角的提升, 熔池致密度有着不同程度的下降。在层间扫描转角的测试中发现,  $45^\circ$  以及  $90^\circ$  层间扫描转角相较于  $0^\circ$  分别下降了  $0.42\%$  和  $0.98\%$ , 而  $67^\circ$  相较于  $0^\circ$  上升了  $0.19\%$ 。

3) 根据预测模型, 结合 HR-2 不锈钢的 4 组工艺参数对 4 组致密度进行验证。并通过试验对预测模型的准确度进行验证。根据预测模型进行验证, 2#、3# 以及 4# 的误差在  $1\%$  之内, 而 1# 样品的误差在  $2\%$  左右, 主要原因是扫描间距扩大及能量密度较小导致有未熔化粉末存在于熔合不良的孔隙中影响了试验致密度的测量。同时通过调色等操作, 对比了未腐蚀的微观形貌, 发现熔池形貌与试验情况比较相似。所以以上情况证明了模型的可靠性。

#### 参考文献 References

- [1] Chen Keyu(陈柯宇), Xu Limin(许莉敏), Gan Jie(甘杰) et al. *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2021, 58(13): 347
- [2] Xu Jingang(徐锦岗), Chen Yong(陈勇), Chen Hui(陈辉) et al. *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2018, 55(4): 283
- [3] Ke Yu(柯宇), Ma Pan(马盼), Ma Yongchao(马永超) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2019, 39(2): 198
- [4] Ke Linda(柯林达), Yin Jie(殷杰), Zhu Haihong(朱海红) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(3): 374
- [5] Liu Yang(刘洋). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [6] Shi Yusheng(史玉升), Lu Zhongliang(鲁中良), Zhang Wenxian(章文献) et al. *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2006(S1):150
- [7] Kempen K, Thijs L, Yasa E et al. *Solid Freeform Fabrication Symposium*[C]. Texas: University of Texas at Austin, 2011: 22
- [8] Zou Yatong(邹亚桐), Wei Zhengying(魏正英), Du Jun(杜军) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2016, 36(6): 656
- [9] Shi Zhenwei(史振伟). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021
- [10] Vrancken B, Cain V, Knutsen R et al. *Scripta Materialia*[J], 2014, 87(1): 29
- [11] Read N, Wang W, Essa K et al. *Materials & Design*[J], 2015, 65: 417
- [12] Xu Jiayu(许佳玉), Ding Yutian(丁雨田), Hu Yong(胡勇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(11): 3727
- [13] Wu Weihui(吴伟辉), Yang Yongqiang(杨永强), Wang Di(王迪). *Journal of South China University of Technology*(华南理工大学学报)[J], 2010, 38(5): 110
- [14] Yuan Xuebing(袁学兵), Wei Qingsong(魏青松), Wen Shifeng(文世峰) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(4): 91
- [15] Jiang Wei(姜炜). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009
- [16] Yu W H, Sing S L, Chua C K et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 792: 574
- [17] Yadroitsev I, Smurov I. *Physics Procedia*[J], 2010, 5: 551
- [18] Wang Lei(王磊), Guo Kai(郭铠), Cong Jiaqi(丛佳琦) et al. *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2022
- [19] Dadbakhsh S, Hao L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 541: 328
- [20] Roehling J D, Khairallah S A, Shen Y Y et al. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 1 022 186
- [21] Promopattum P, Srinivasan R, Quek S S et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2022, 300: 117 426
- [22] Liu B Q, Fang G, Lei L P et al. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2022, 228: 107 478
- [23] Xiang Yu(向羽), Zhang Shuzhe(张树哲), Li Junfeng(李俊峰) et al. *Journal of Zhejiang University*(浙江大学学报)[J], 2019, 53(11): 2102
- [24] Gu Jingchen(谷京晨), Tong Lige(童莉葛), Li Lei(黎磊) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2014, 28(1): 143
- [25] Semak V, Matsunawa A. *Journal of Physics D Applied Physics*[J], 1999, 30(18): 2541
- [26] Klassen A, Scharowsky T, Kärner C. *Journal of Physics D Applied Physics*[J], 2014, 47(27): 275 303
- [27] Wang Shuo(王硕), Liu Yude(刘玉德), Qi Bin(祁斌) et al. *Applied Laser*(应用激光)[J], 2017, 37(6): 801
- [28] Zong Xuewen(宗学文), Liu Wenjie(刘文杰), Zhang Shuzhe(张树哲) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(9): 3182
- [29] Xu Jiayu(许佳玉), Ding Yutian(丁雨田), Hu Yong(胡勇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工

- 程)[J], 2019, 48(11): 3727
- [30] Shang Fulin(尚福林), Chen Yan(陈雁), Zhang Yongmei(张永梅) *et al.* *China Sciencepaper*(中国科技论文)[J], 2016, 11(22): 2589
- [31] Teng Wenhua(滕文华). *Modern Manufacturing Engineering*(现代制造工程)[J], 2004(12): 67
- [32] Bbytan Z. *Archives of Metallurgy and Materials*[J], 2017, 62(4): 2125
- [33] Cherry J A, Davies H M, Mehmood S *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 76(5-8): 869
- [34] Galy C, Guen E L, Lacoste E *et al.* *Additive Manufacturing* [J], 2018, 22: 165

## Prediction Model and Experimental Verification of Density in Laser Selective Melting

Zhang Jinyu<sup>1,2</sup>, Yang Jialin<sup>2</sup>, Xu Chonghai<sup>1</sup>, Liu Ningzhao<sup>2</sup>, Wang Guowei<sup>2</sup>, Qin Yu<sup>2</sup>, Shen Xianfeng<sup>2</sup>, Liu Yu<sup>3</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China)

(2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A prediction model of the relative density based on the process parameters was established, which can effectively predict the pores caused by lack of fusion, and provide more reference for the selection and optimization of laser selective melting process parameters. The finite element analysis and numerical calculation software were used to obtain sizes of the melting pool and to simulate the splicing morphology of the melting pool with multiple layers and traces, and thus to predict the relative density under different process parameters. At the same time, the fluctuation coefficient, the deflection angle and the angle of scan vectors rotation between layers were introduced into the prediction model of melting pool to account for the influence of the size fluctuation of the melting pool, the inclination of the melting pool, and the angle of scan vectors rotation between layers on the simulation results of the molten pool. Finally, the feasibility of the prediction model was confirmed by the selective laser melting experiments of HR-2 stainless steel. The results show that the predicted results of the model are in good agreement with the experimental ones of the melting pool of the samples, and the relative density deviation between prediction and the experiment is within 2%.

**Key words:** laser selective melting; HR-2 stainless steel; melting pool size; prediction of relative density

---

Corresponding author: Yang Jialin, Ph. D., Senior Engineer, Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-2484292, E-mail: 261164382@qq.com