



Research
Additive Manufacturing—Article

用于介观模拟电子束选区熔化的数据挖掘技术

钱亚^{a,b}, 闫文韬^c, 林峰^{a,b,*}

^a Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Biomanufacturing and Rapid Forming Technology Key Laboratory of Beijing, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^c Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 January 2019

Revised 31 May 2019

Accepted 6 June 2019

Available online 5 July 2019

关键词

电子束选区熔化

介观模拟

数据挖掘

摘要

在电子束选区熔化技术 (EBSM) 工艺中, 制造部件的性质受到每一道熔道沉积质量的影响。然而, 熔道的形成受到各种物理现象和工艺参数的支配, 这些参数之间的相关性十分复杂, 难以通过实验得出。近来, 介观建模技术已成为模拟电子束 (EB) 熔化过程以及揭示特定熔道形貌的形成机制的手段。尽管如此, 人们对工艺参数与熔道特征之间的相关性尚未有定量的理解。本文从介观模拟的结果出发, 研究了熔道的形态特征, 同时引入了熔道宽度和高度等关键性描述指标, 以便从数值上评估沉积质量。本文还定量研究了各种工艺参数的影响, 从而导出了工艺条件和熔道特征之间的相关性。最后, 本文提出了一种由介观建模和数据挖掘技术组成的仿真驱动优化框架, 并讨论了框架的潜力和局限性。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

电子束选区熔化 (EBSM) 是一种代表性的粉末床熔融技术, 使用离散的粉末颗粒来构造零件。与传统制造方法相比, EBSM 的优势包括: 逐层构建方式 [1] 实现了较大的几何自由度, 能够定制微观结构 [2,3], 以及对某些合金的成形具有适应性等。然而, 这种技术也带来了许多挑战。例如, 完成件受到孔隙缺陷、表面粗糙等的影响 [4,5]。造成这些缺陷的主要原因之一是复杂的粉末床熔融过程受到多种工艺因素的影响, 包括电子束能量状态、扫描策略和粉末床配置 [3,5–7]。为了研究这些

因素的影响, 本文开发了包含多物理场和多工艺参数的高分辨率数值模型, 并研究了不同条件下单熔道的形成过程 [8–10]。

粉末级介观模拟模型, 采用尺寸小至 2 μm 的细网格和先进算法 [9–13] 实现了对离散化的颗粒的多物理场作用的描述。当应用于粉末床熔融工艺中, 可以揭示球化效应等基本机制和典型的表面形貌 [9–11]。此外, 为了进一步验证介观模型, 高速相机和高能 X 射线被用于对粉末床熔融过程进行实时观察 [14–16], 实验中沉积熔道与模拟结果进行比较, 总体一致性比较明显 [9,13,17]。

* Corresponding author.

E-mail address: linfeng@tsinghua.edu.cn (F. Lin).

当使用介观模拟方法来研究熔道沉积过程时，在不同的工艺条件下，将产生不同的熔道形貌。一般来说，可根据模拟结果明显的几何特征，将这些形态分成几种可视化的类型，如连续型熔道、半球滴型熔道、分离型熔道等[13]。然而，定性分类不能精确地描绘熔道的多样性，也不能建立工艺参数与熔道形态之间的数值关系。因此，需要一种能够体现大多数几何特征，并在相似的工艺参数下可以区分边缘差异的信息表征方法。一种简单而有效的方法是将可视化的分类转换为量化几何指标。

本文首先提出了用于定义和提取模拟的熔道形貌特征几何参数的方法。借此方法，获取了熔道几何参数，并将其与特定表面形貌关联起来。此外，本文还研究了工艺参数与所提取的熔道几何参数之间的定量关系，并验证了以提取的熔道参数推测不同工艺条件下可能存在的成型缺陷。最后，本文提出了一种基于介观模拟、数据提取和机器学习技术的仿真驱动优化框架，该框架可以智能地探索符合要求的工艺参数窗口。

2. 方法和设定

2.1. 介观模拟

我们已经在之前的工作中开发了EBSM的介观建模[9,18]。在粉末颗粒尺度下，求解了包括关键物理现象如表面张力与反冲压力的粉床在电子束(EB)辐照下的能量方程。关于多物理场介观模拟数值实现的细节可以在相关文献中找到。本文重点研究了仿真结果中几何数据的量化。不同工艺条件下的单道扫描沉积过程得到模拟。所研究的工艺参数，包括能量功率(P)、扫描速度(v)和层厚度，列于表1中。能量功率有5个取值，扫描速度值有3个取值，层厚度有3个取值，因此共有45种成型条件。

使用离散元法在基板上产生40~100 μm 的Ti-6Al-4V粉末颗粒[图1(a)]，考虑到预热效应，将粉末床的初始温度设定为900 K。模拟域为3000 μm \times 800 μm \times 600 μm ，并划分成8 μm 的均匀网格，这样设置可在不

表1 功率、速度和层厚度取值集

Parameters	Values
Power (W)	60, 120, 240, 360, 480
Speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.25, 0.5, 1
Layer thickness (μm)	100, 150, 200

明显降低精度的情况下有效地降低计算量。Ti-6Al-4V的材料参数在参考文献[9]中有说明。

2.2. 识别熔道

完成单道介观模拟后，可以得到包含固化熔道的粉末床形态，如图1(b)所示。采用流体体积(VOF)法计算熔池的自由边界流动时，引入变量体积分数 F 来表示流体($F = 1$)和空隙($F = 0$)的界面，如图2(a)所示[19]。因此，通过检测每个单元及其相邻单元中的 F 值，就可以得到粉末床的几何边界，即表面形貌。在当前模型中，模拟域被离散化为 $l \times m \times n$ 个网格单元[图2(b)]，对应一个三维(3D) $l \times m \times n$ 的 F 矩阵。通过构造 F 矩阵的等值面，就可以得到沉积粉末床的表面形貌，如图1(b)所示。

为了更好地理解熔道特性，我们修改 F 值，使其仅

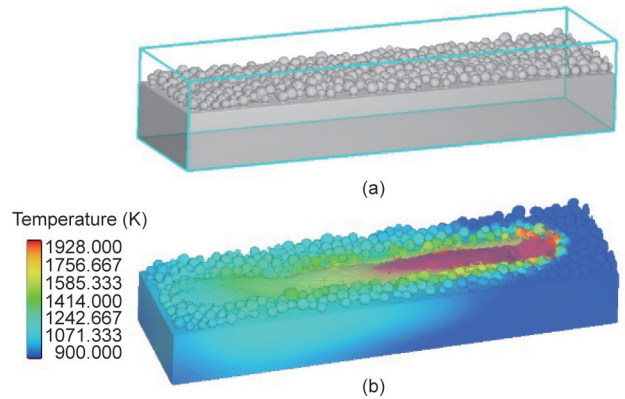


图1. (a) 初始设置; (b) 粉末床熔化过程的模拟结果。

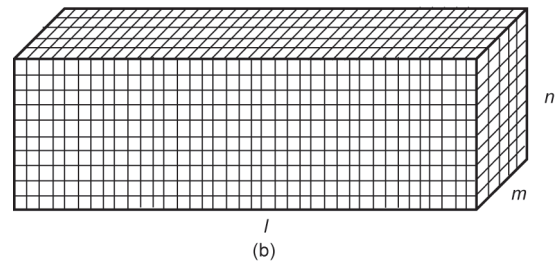
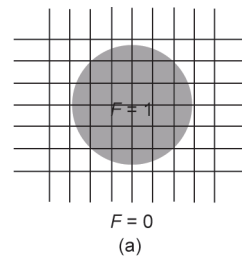


图2. (a) 自由边界维度 F 矩阵; (b) 模拟域3D F 矩阵。

显示沉积熔道，而不是整个粉末床。为了提取熔道轮廓，我们将未熔化的部分（即网格单元）的 F 值设置为0，将其排除。单元是否熔化，取决于其历史温度：如果温度从未超过熔点，那么设置单元因子为0，熔化则设置为1。将 F 矩阵与每个单元因子相乘得到最终的3D F 矩阵。通过这种方式，构建了提取的熔道的等值面，如图3（b）所示。

2.3. 定义几何特征

基于图3中提取的熔道形貌，可以测量宽度和高度等几何尺寸。如上所述， $l \times m \times n$ 的 F 矩阵代表每个单元中材料的分布情况。因此，通过计算非零 F 值的单元的数量，可以测量熔道的宽度和高度。具体而言，首先将矩阵投影到水平和垂直平面，分别对应于 $l \times m$ 和 $l \times n$ 矩阵。接下来，连接最外面的非零单元，构造出几何边界，如图4所示。熔道的宽度定义为左（ w_L ）、右（ w_R ）边界到电子束中心的距离之和[图4（a）]。熔道的高度定义为上边界和基板上表面之间的距离。熔道的深度定义为下边界和基板上表面之间的距离[图4（b）]。这些几何特征沿着熔道长度方向逐个单元地测量，并存储在数组中，通过数组变换计算可以反映熔道几何特征的波动。

3. 结果和讨论

3.1. 几何描述与量化

为了验证前文量化熔道几何特征方法的有效性，从表1的模拟工况中选择3种代表性熔道形态——窄线、粗线和波状线。图5展示了这3种熔道的粉末床。图5和图6分别展示了提取的熔道和测量的宽度分布。

将图5中的沉积后的粉末床与图6中提取的熔道和

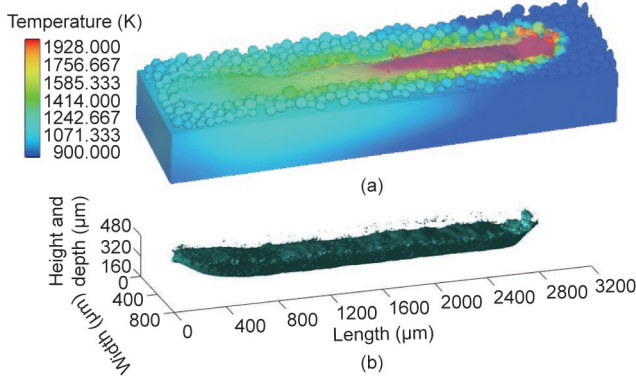


图3. 从粉末床中提取熔道。(a) 熔化后的粉末床；(b) 所提取的熔道。

图7中测量的宽度进行比较，结果总体一致，除了图5(c)中的起伏型熔道。图5（c）中的熔道具有颈缩形貌，没有体现在图7（c）中。在这种情况下，前文测量宽度的方法无法准确地表示熔道的实际形貌。为了解释这种现象，我们截取垂直于熔道长度的平面来说明熔道在宽度方向上的形貌，如图8所示。黄色部分表示熔道材料。

根据前文定义，图8中的宽度 w_0 对应于水平方向上的最外边界。该定义过高估计了熔道宽度，因为很少有材料沉积在基板上表面的两端（图8中的水平线）。一种更合理的策略是定义有效宽度为沉积在基板上表面材料的宽度（图8中的 w_1 ）。修改后的宽度分布如图9所示，与图5（c）中的形貌大致匹配。

通过对测量尺寸值的统计分析，所提取的熔道信息可以定量地描述其几何特征，如表2所示。表2中的变量 w 、 h 和 d 分别代表熔道的宽度、高度和深度，如图4中所示。缩写ave和std表示平均值和标准差，用于描述几何尺寸和波动水平。3种工况下深度的标准差很小，因此省略。为了排除熔道起始端和尾端不连续性的影响，仅测量中心部分（1000~2000 μm ）。

如所预期的，表2第七列中的值与图5中所示的表面形貌一致，因此可被视为沉积质量的评判标准。如 $P = 60 \text{ W}$ ， $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下，熔道深度 d 为负值，表示没有发生熔合，此时宽度也很窄，如图5（a）所示；另外， $P = 480 \text{ W}$ ， $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下，std w 和std h 较大，表示流动的不稳定，在图5（c）中表现为缩颈形态。这种一致性证明了所定义的定量方法是有效的，为随后基于数据的分析和优化铺平了道路。

3.2. 实验验证

实验验证工作在天津清研智束科技有限公司

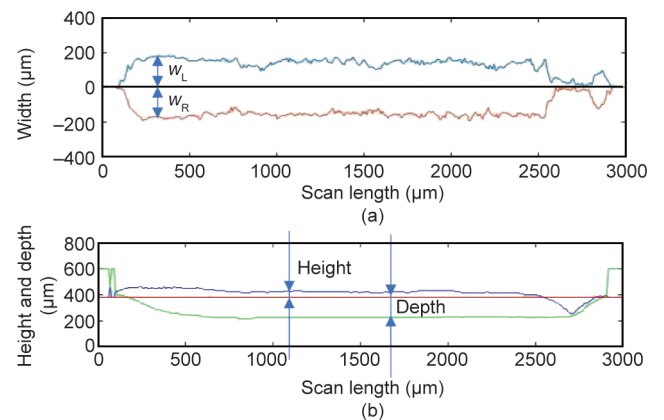


图4. 熔道几何特征的定义。

(QBEAM) 自行开发的EBSM机器上进行。使用表1列出的参数进行单道沉积。所用的粉末颗粒是尺寸40~100 μm 的Ti-6Al-4V，粉末层厚度是75 μm 。实验未采用在基板表面直接沉积单层熔道，而是先成形一矩形块以保证粉末层厚度收敛到稳定值。两种典型的熔道沉积形貌实验结果及相应的模拟结果如图10所示。

实验结果与仿真结果基本一致。功率和扫描速度较大时 ($P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)，由于流体不稳定性，熔道的宽度变得不规则并可观察到颈缩现象；相比之下，

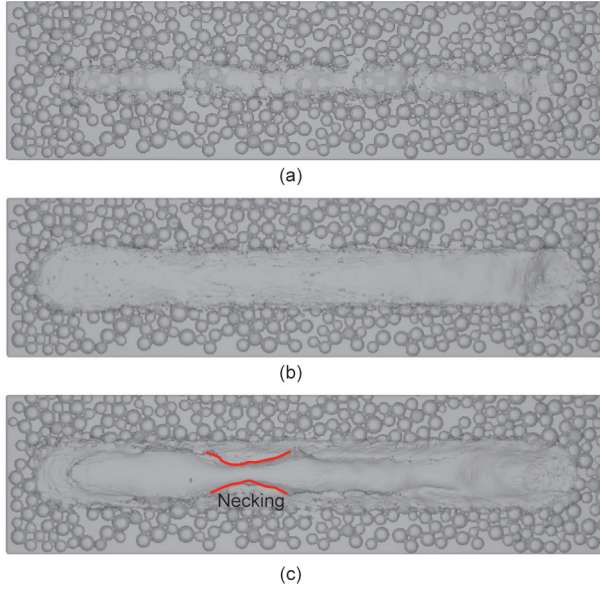


图5. 不同工艺条件下的粉末床: (a) $P=60\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $P=240\text{ W}$, $v=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

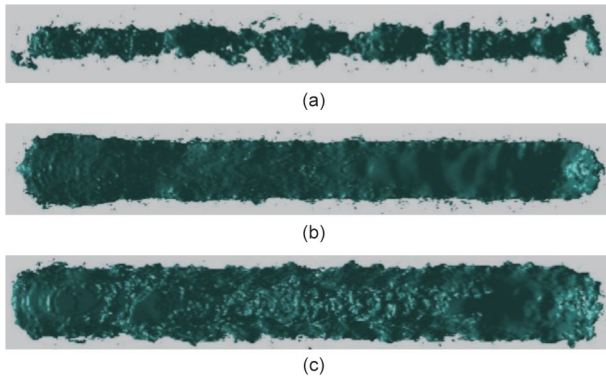


图6. 不同工艺条件下提取的熔道: (a) $P=60\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $P=240\text{ W}$, $v=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表2 不同加工条件下的几何尺寸 (单位: μm)

Conditions	Ave w	Std w	Ave w_L	Ave w_T	Ave h	Std h	Ave d
$P=60\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	156.19	23.07	75.94	80.25	33.97	15.11	-1.78
$P=240\text{ W}$, $v=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	298.67	21.96	146.54	152.13	44.38	5.15	154.16
$P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	235.94	49.66	112.00	123.94	49.40	22.37	138.41

在中等功率和速度 ($P=240\text{ W}$, $v=0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 条件下，形成了粗直的熔道。考虑到实验中存在的不确定条件，如粉末堆积条件、电子束的大小和形状、粉末床温度等与模拟时设置不同，介观模拟的结果可被认为能够准确地反应不同工艺条件下的复杂的熔道形貌。

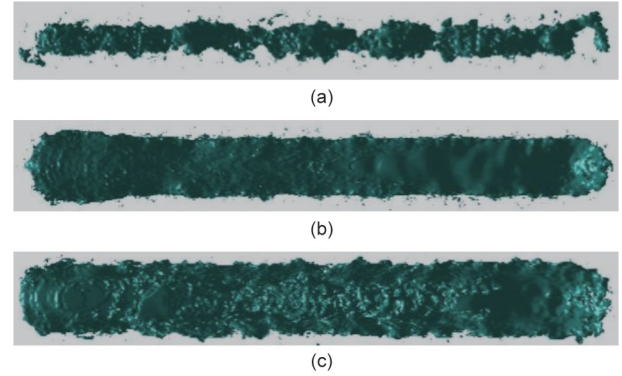


图7. 不同工艺条件下熔道的宽度: (a) $P=60\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $P=240\text{ W}$, $v=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

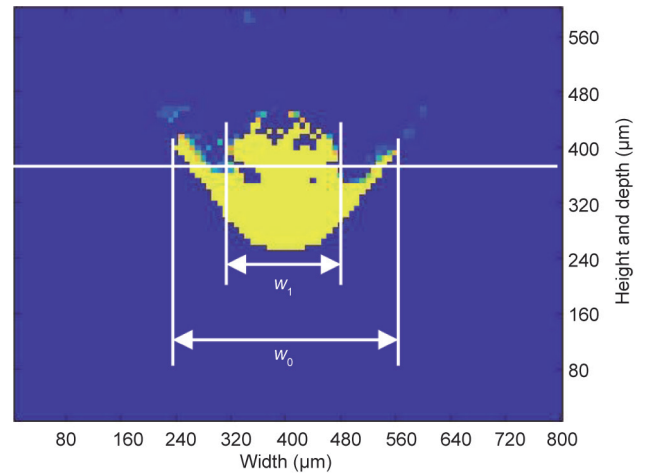


图8. 垂直于扫描方向的熔道形状。

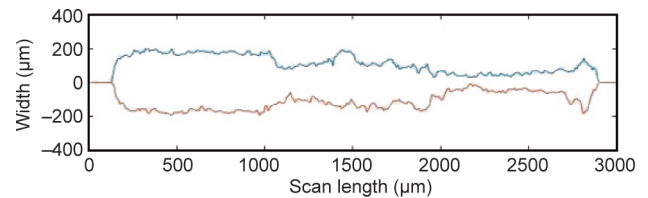


图9. 使用 w_1 作为方向的新熔道宽度。

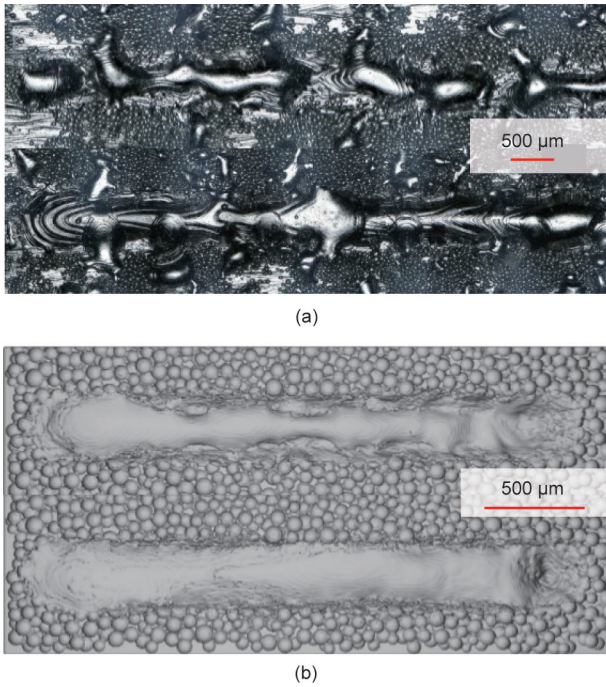


图10. $P=480\text{ W}$, $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (上) 以及 $P=240\text{ W}$, $v=0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (下) 条件下的实验 (a) 和模拟 (b) 结果。

3.3. 数据分析

工艺参数对熔道形貌的作用关系是EBSM质量控制的关键。现在，基于提取的熔道的几何数据，可以定量地确定这些关系。本文研究了3个主要参数——能量功率、扫描速度和层厚度，如表1所示。对于不同的参数条件，提取了表2所列7个描述指标中的4个，即 $\text{ave } w$ 、 $\text{ave } h$ 、 $\text{std } w$ 和 $\text{std } h$ ，如图11所示。

图11中有12个单独的图，4行分别对应于熔道的 $\text{ave } w$ 、 $\text{ave } h$ 、 $\text{std } w$ 和 $\text{std } h$ ，3列分别对应于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、 $150\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的层厚。每个图中， x 轴表示不同的功率值，3种颜色表示不同的速度。为便于比较，对于不同的层厚， y 轴取值范围不变。一些数据点，如工况 $P=480\text{ W}$, $v=0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 由于能量输入太高，计算出的熔池深度超过了几何边界 ($3000\text{ }\mu\text{m} \times 800\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$) 被视为“熔化过度”而未在图中绘出。对于这种情况，测得深度有误，因此被排除在外。此外，一些点例如图11 (g) 中 $P=360\text{ W}$, $v=0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 由于 $\text{std } w$ 值超过 y 轴范围而未出现。

图11中的灰色部分用来标识具有可接受的熔道宽度与深度的数据点。一种判断熔化轨迹质量的基本原则是， $\text{ave } w$ 和 $\text{ave } h$ 越大越好， $\text{std } w$ 和 $\text{std } h$ 越小越好，因为这样可以加强相邻熔道重合，减少熔道的波动。因此，对于区域外的数据点，如图11 (a) 中的点P1和图11 (d)

中的P2，可以认为熔道的质量较低，工艺参数选择不适宜。以这种方式，能够使用所提取熔道的几何特征，指导选择出合适的工艺参数。

进一步观察数据点的分布可以发现，随着层厚的增加，工艺参数的窗口向着更大能量输入偏移，因为更多数据点停在了灰色区域的右侧 (图11)。这种趋势可以简单地解释为：层厚越大，粉末越多，因此需要更多的能量来熔化。改变功率或扫描速度，能量密度 (功率与速度之比 P/v) 将会影响熔道的几何形状：考虑图11 (a~f) 中不同颜色的线/速度，当扫描速度增加时，熔道宽度减小，高度增加；考虑不同功率下的同色线，当能量功率增加时，熔道宽度和高度先增加后减小，层厚减小。可以发现熔道的几何形状不仅仅受能量密度的影响，还受特定参数的影响。

熔道的形成遵循熔池动力学原理。通常，能量密度越高，熔池尺寸越大，因此宽度和高度越大。但这种关系不适用于某些条件。层厚较小时，功率增加 (即能量密度增加) 超过一定值后，宽度会变小，如图11 (a) 所示。高能量水平下宽度减小的潜在机制可以归因于流体流动和蒸发，如图12所示。通常，EB下的熔池表面下凹，然后由向后流动的熔体重新填充，如图12 (a~c) 所示。然而，当能量密度非常大时，蒸发和反冲压力会导致更大的下凹深度，在熔道的边界固化之前，不能被完全填充。在这些情况下，测得的熔道宽度会减小，如图12 (d~f) 所示。

除了熔池动力学，层厚对熔道的几何形状有明显影响。图13显示了不同功率下熔道的轮廓，层厚分别为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出，对于较大层厚，熔道高度未随能量输入增加；相反，高度随着输入功率的增加而略微下降，图11 (f) 展示了这种趋势。出现这种趋势是因为在较大的层厚下，较低的输入功率不足以使靠近基板的粉末熔化，因此，固化的熔道沉积在未熔化的粉末上方。然而，随着输入功率的增加，基板附近的粉末会完全熔化，加剧层的收缩，导致高度变小。对于较小的层厚，输入功率足够大，熔道下方没有未熔化的粉末。当输入功率值增加时，更多的材料被熔化，熔道的表面的曲率增大，导致熔道高度增加 [图13 (c)]。然而，在高输入功率的情况下，熔道的宽度出现如图12 (f) 所示的减小。

目前，我们已经说明了能量密度和层厚 (分别对应于热量和材料) 对于熔道形貌的影响。然而，与热传导和耗散时间相关的扫描速度是另一个有待研究的重要因

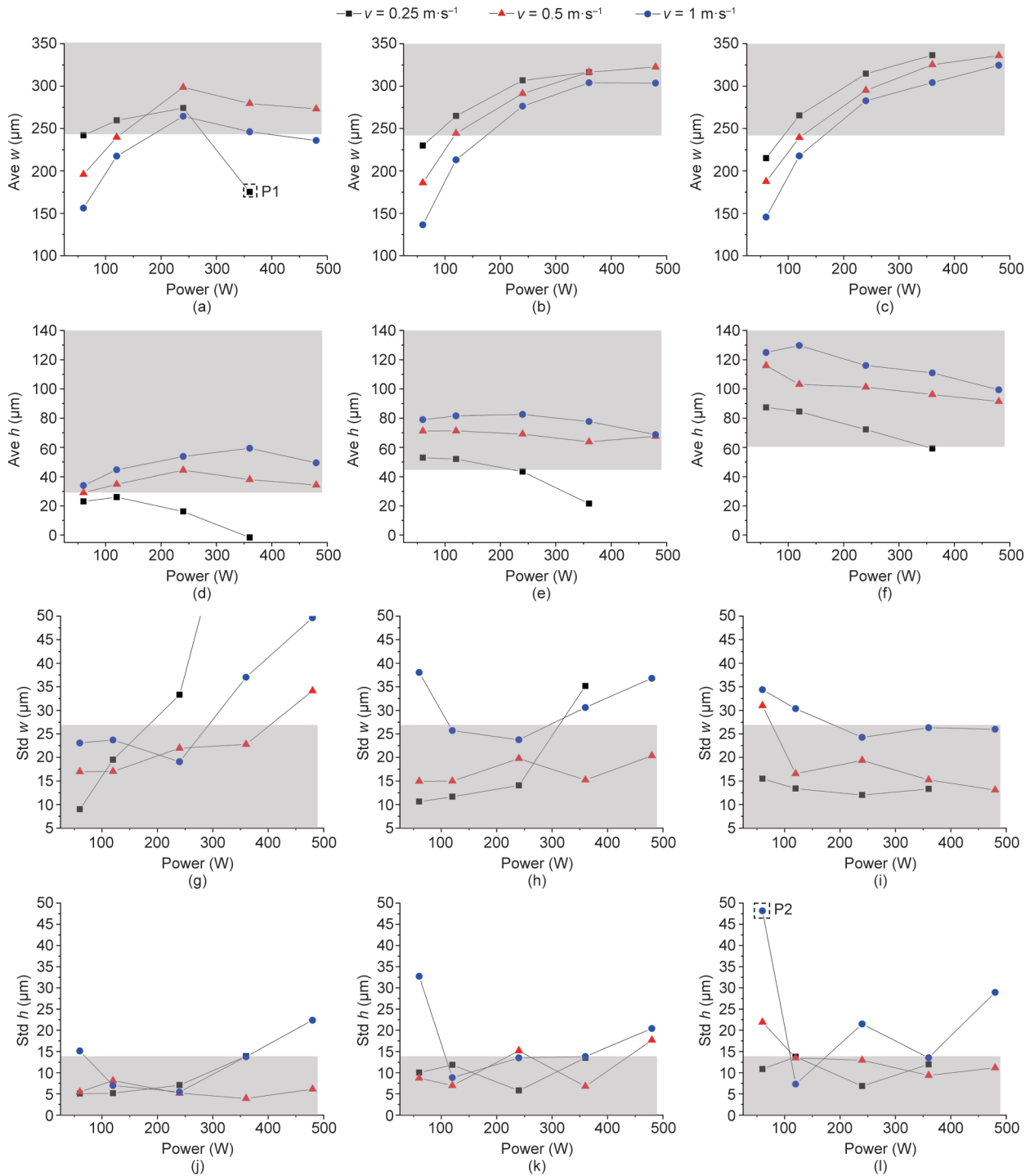


图11. 不同扫描速度和功率下的熔道尺寸。熔道宽度(a~c)和高度(d~f)的平均值；宽度(g~i)和高度(j~l)的标准差，其中层厚度分别是100 μm (a、d、g、j)、150 μm (b、e、h、k)和200 μm (c、f、i、l)。

素。为了说明扫描速度在恒定能量密度下的影响，取图11中具有相同能量密度、不同扫描速度的点，重新绘制成图14。除了不同的颜色线代表不同的能量密度之外，内容与图11类似。可以观察到，对于同色线，即相同的能量密度，几乎每个图都表明，速度和几何变量之间呈现正相关。这一趋势可以从3个方面来理解：①对于宽

度和高度的标差值，较高的扫描速度可能导致流动不稳定，最终形成流体的熔道形态。②能量密度恒定，速度越高功率越大。尽管相互作用时间减少，但电子束仍然可以瞬间熔化粉末床。考虑到电子束功率的高斯分布，功率越大，能量阈值（足以熔化粉末床）以上的区域越大，如图15所示。③即使能量密度保持不变，扫描速

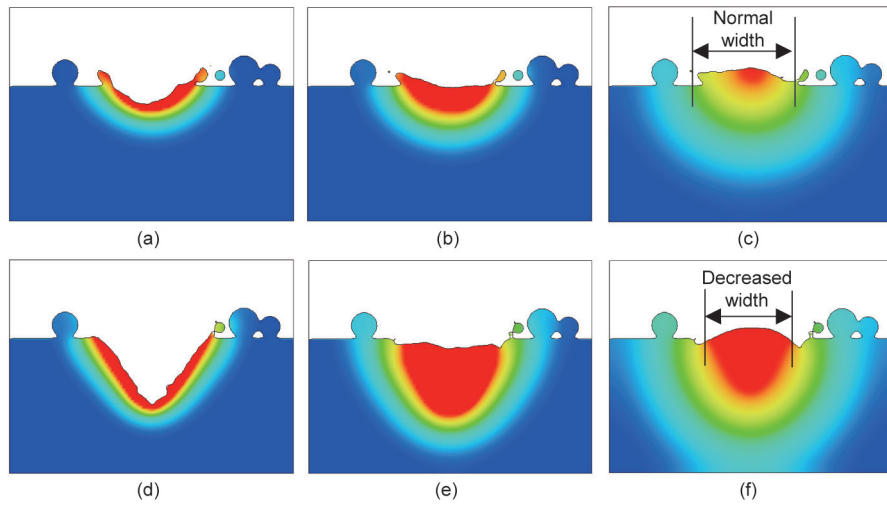


图12. 能量增加，熔道宽度减小。(a~c) 普通熔道宽度演化；(d~f) 缩减的熔道宽度演化。

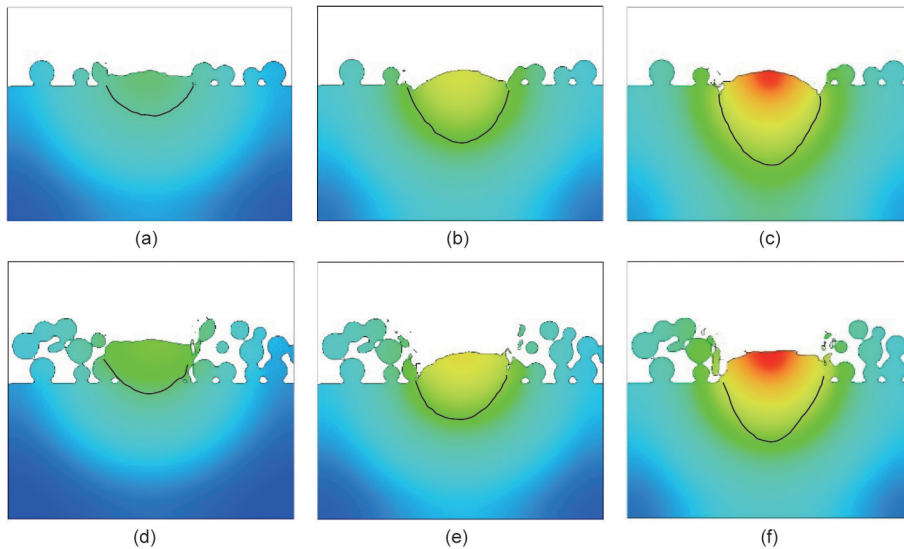


图13. 不同层厚和功率下的熔道形貌。(a~c) 层厚为100 μm，功率分别为120 W、240 W、360 W的熔道；(d~f) 层厚为200 μm，功率分别为120 W、240 W、360 W的熔道。黑线：熔池的边界。

度降低，沉积的能量更可能传递到已经沉积的粉末层上，导致熔化粉末的能量转换效率降低，因此熔道尺寸变小。

最后，对上述3个参数与熔道几何尺寸之间的关系进行简要的数据敏感性分析，以评估每个参数的重要性。使用单因素（OFAT）方法[20,21]，通过计算相邻两点间熔道尺寸的相对变化与工艺参数的相对变化的比率，求得敏感度值（ S ），如下式所示：

$$S = \sum \text{abs} \left[\frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_i}{(X_{i+1} - X_i)/X_i} \right]$$

式中，abs表示计算方括号中表达式的绝对值； Y 表示熔

道几何特征； X 表示工艺参数； i 表示样本点编号。我们研究了3个参数：功率、速度和层厚度，每个参数取3个值（60 W和480 W功率省去），因此一共有27个样本点，结果如表3所列。

由于本验证样本点数量有限，仅作为不同工艺参数敏感度水平的初步探索。推断得知，能量功率是决定熔道宽度的最主要因素，层厚是决定高度的最主要因素。扫描速度的影响相对不重要。考虑能量密度 P/v 的贡献，分子 P 与能量密度呈线性关系，分母 v 与能量密度成反比，扫描速度较大时不太敏感。如前所述，熔道高度受熔化聚合和收缩等若干机制控制。能量功率和扫描速度的重要性对于ave h 和std h 各不相同，这

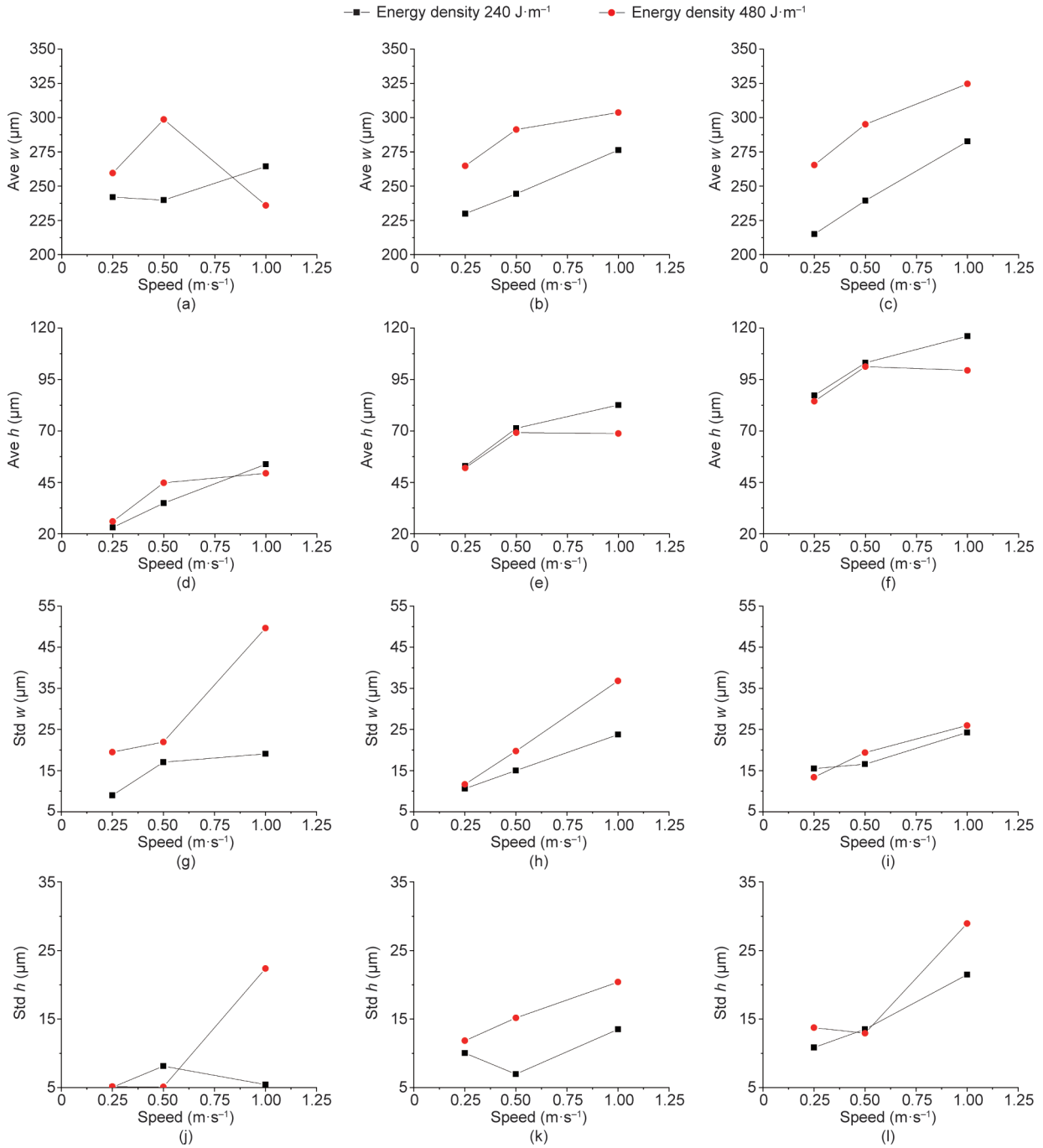


图14. 不同扫描速度和能量密度下的熔道大小。熔道宽度(a~c)和高度(d~f)的平均值；宽度(g~i)和高度(j~l)的标准差，其中层厚分别是100 μm (a, d, g, j), 150 μm (b, e, h, k) 和200 μm (c, f, i, l)。

仍有待进一步研究。

3.4. 仿真驱动优化框架

至此，我们将介观模拟模型与数据量化方法相结合，研究了功率、速度和层厚对熔道形貌的影响。利用高精度仿真模型和熔道几何形貌的代表性描述指标，可以高效地评估熔道的质量。在此基础上，提出了一

种仿真驱动的优化框架，原理如图16所示。由于大多数模拟和数据处理工作都可以在预定的设置下执行，可以批量设置样本模拟，并构建不同工艺条件下的大型数据库。一旦准备好了这些数据，就可以利用机器学习和数据挖掘技术来揭示工艺输入（功率、速度等）和输出（熔道宽度、高度等）之间的关系。利用获得的关系，可以在仿真和实验之前预测各种工艺条件下

的成型结果，构建出优化的处理参数窗口，节省大量的时间和工作。进一步地，建立了单道成形情况下输入输出之间关系后，可以引入该方法来指导涉及多熔道和多层间相互作用的真实情况，这些情况与缺陷的生成更加密切相关。

图16所示的构想仍处于早期阶段，但因为它用计算机自动进行探索，取代了大量试错实验，表现出了很大的潜力。然而，仍有一些问题需要解决，包括：①当前仿真模型的准确性和可信度仍缺乏详细的实验验证；②熔道几何信息的标准化，如几何特征的定义和测量；③计算成本大，目前这是一项巨大挑战，限制了工程应用。在不久的将来，本文描述的工作将进行扩展，涵盖不同工艺条件，丰富框架数据库，展现

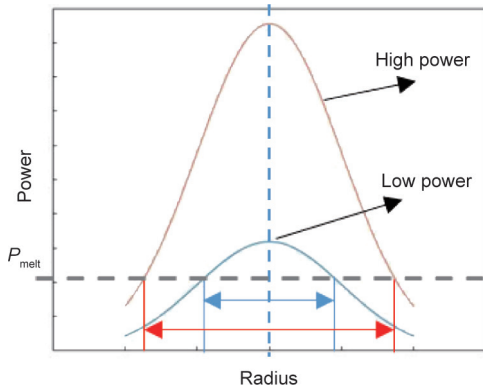


图15. 能量功率增加，熔道宽度增加。

出更高的实用价值。

4. 结论

本文开发了一种模拟和评估EBSM过程的数值方法。介观模型和结果量化方法一起使用，可以在不同的工艺条件下反映沉积的熔道形貌。使用数值方法，研究了能量功率、扫描速度和层厚对熔道几何形貌的影响。基于以上尝试本文提出了一个模拟驱动优化框架，能够通过计算探索合适的工艺窗口。

致谢

钱亚和林峰感谢中国国家重点研发计划(2017YFB1103303)和苏州-清华特殊创新领导行动(2016SZ0216)的财政支持。闫文韬感谢新加坡教育部学术研究基金第一层的支持。

表3 工艺参数与熔道几何形貌之间的数据敏感度

Parameter	Sensitivity			
	ave w	ave h	std w	std h
Power	3.80	5.88	12.30	17.74
Speed	1.83	32.49	8.35	10.95
Layer thickness	3.44	59.06	9.42	20.37

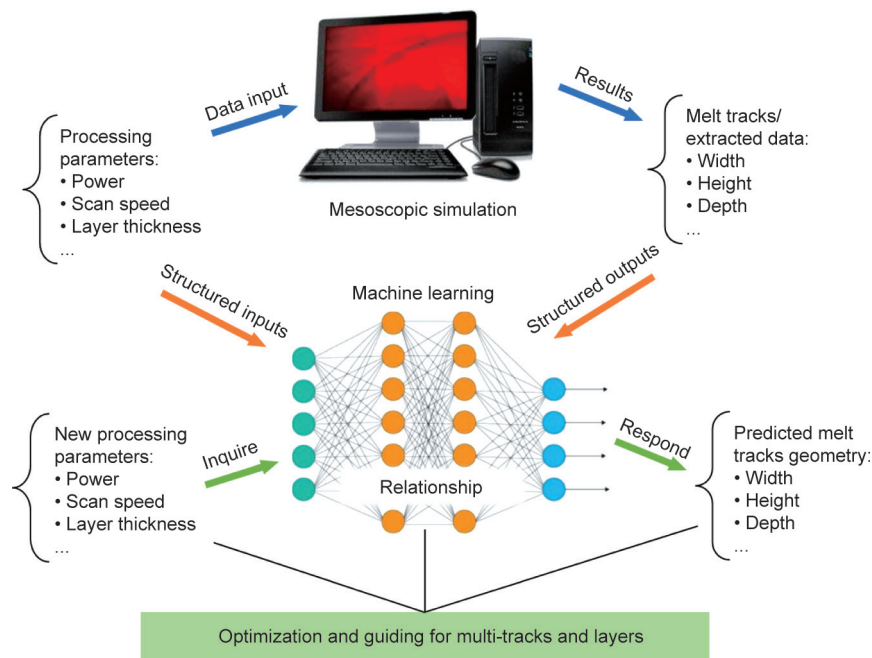


图16. 仿真驱动优化框架发展路线图。

Compliance with ethics guidelines

Ya Qian, Wentao Yan, and Feng Lin declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Cansizoglu O, Harrysson O, Cormier D, West H, Mahale T. Properties of Ti-6Al-4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. *Mater Sci Eng A* 2008;492(1-2):468-74.
- [2] Körner C, Helmer H, Bauereiß A, Singer RF. Tailoring the grain structure of IN718 during selective electron beam melting. In: Guedou JY, editor. *Proceedings of the 2nd European Symposium on Superalloys and Their Applications*; 2014 May 12-16; Giens, France. Les Ulis: EDP Sciences; 2014. p. 117-22.
- [3] Guo C, Ge W, Lin F. Effects of scanning parameters on material deposition during electron beam selective melting of Ti-6Al-4V powder. *J Mater Process Technol* 2015;217:148-57.
- [4] Bauereiß A, Scharowsky T, Körner C. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting. *J Mater Process Technol* 2014;214(11):2522-8.
- [5] Safdar A, He H, Wei LY, Snis A, Chavez de Paz LE. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping J* 2012;18(5):401-8.
- [6] Scharowsky T, Juechter V, Singer RF, Körner C. Influence of the scanning strategy on the microstructure and mechanical properties in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *Adv Eng Mater* 2015;17(11):1573-8.
- [7] Rausch AM, Markl M, Körner C. Predictive simulation of process windows for powder bed fusion additive manufacturing: influence of the powder size distribution. *Comput Math Appl*. In press.
- [8] Jamshidinia M, Kong F, Kovacevic R. Numerical modeling of heat distribution in the electron beam melting of Ti-6Al-4V. *J Manuf Sci Eng* 2013;135(6):061010.
- [9] Yan W, Ge W, Qian Y, Lin S, Zhou B, Liu WK, et al. Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting. *Acta Mater* 2017;134:324-33.
- [10] Körner C, Bauereiß A, Attar E. Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. *Model Simul Mater Sci Eng* 2013;21(8):085011.
- [11] Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE. Laser powder-bed fusion additivemanufacturing: physics of complexmelt flowand formationmechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *ActaMater* 2016;108:36-45.
- [12] Markl M, Körner C. Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing. *Annu Rev Mater Res* 2016;46:93-123.
- [13] Körner C, Attar E, Heini P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *J Mater Process Technol* 2011;211(6):978-87.
- [14] Leung CLA, Marussi S, Atwood RC, Towrie M, Withers PJ, Lee PD. In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing. *Nat Commun* 2018;9(1):1355.
- [15] Guo Q, Zhao C, Escano LI, Young Z, Xiong L, Fezzaa K, et al. Transient dynamics of powder spattering in laser powder bed fusion additive manufacturing process revealed by in-situ high-speed high-energy X-ray imaging. *Acta Mater* 2018;151:169-80.
- [16] Ly S, Rubenchik AM, Khairallah SA, Guss G, Matthews MJ. Metal vapor microjet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Sci Rep* 2017;7(1):4085.
- [17] Yan W, Qian Y, Ma W, Zhou B, Shen Y, Lin F. Modeling and experimental validation of the electron beam selective melting process. *Engineering* 2017;3(5):701-7.
- [18] Yan W, Qian Y, Ge W, Lin S, Liu WK, Lin F, et al. Meso-scale modeling of multiple-layer fabrication process in selective electron beam melting: interlayer/ track voids formation. *Mater Des* 2018;141:210-9.
- [19] Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys* 1981;39(1):201-25.
- [20] Czitrom V. One-factor-at-a-time versus designed experiments. *Am Stat* 1999;53(2):126-31.
- [21] Saltelli A, Chan K, Scott EM. *Sensitivity analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2000.