

电子束选区熔化热行为数值模拟的研究现状

杨鑫¹, 王风辉¹, 谷文萍², 赖杨凯¹, 孙晨峰¹, 刘世锋³, 汤慧萍⁴

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

(2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

(3. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(4. 浙大城市学院 工程学院, 浙江 杭州 310015)

摘要: 电子束选区熔化成型件经历了复杂热历史, 从而产生多尺度微观结构, 热历史数据对于分析微观组织形成有重大作用。复杂的微熔池冶金行为导致温度-时间-空间数据难以通过实验手段获得, 数值模拟技术作为一种新的技术手段, 为解决该问题提供了新思路。本文从温度场数学理论基础、仿真流程、热-力耦合模拟、熔池热力学模拟、及热缺陷机制几个方面综述了电子束选区熔化热行为数值模拟的研究现状, 对电子束选区熔化热行为数值模拟存在的挑战和未来前景展开了论述。

关键词: 电子束选区熔化技术; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TP391.73

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)06-2278-09

增材制造(3D打印)是一种根据数字模型逐层打印三维零件的颠覆性技术, 具有设计/制造自由度大、生产周期短的优点, 因此, 在工业4.0时代, 增材制造为智能制造提供了巨大的帮助^[1-4]。多年来, 根据原材料及能量源的不同, 开发了多种增材制造工艺用于制造金属零部件^[5-7], 可分为2类: 粉床增材制造和定向能量沉积。对于粉床增材制造而言, 原材料为金属粉末, 而定向能量沉积技术的原材料为粉末或金属丝。应用较为广泛的2种粉床增材制造技术是激光选区熔化(selective laser melting, SLM)和电子束选区熔化(selective electron beam melting, SEBM)^[8]。与SLM技术相比, 一方面, SEBM技术具有更高的功率密度, 且SEBM技术的成形效率高于快于SLM技术^[9]; 另一方面, SEBM技术具有高温自回火(600~1200℃)的优点, 可获得残余应力较低的零件^[10]。

SEBM是一种基于金属粉末层选区固结的增材制造工艺^[11-13], 该技术使用电子束作为能量源熔化粉末床, 整个过程在真空室中进行^[14]。在真空环境中, 电子束对金属粉末进行扫描加热熔化并快速凝固, 逐层实现三维零件的制造。SEBM一个最大的特点是为了防止单个粉末颗粒的负电荷积聚和由此产生的“粉末爆炸”, 在打印之前需要对基板和粉末层进行预热, 以使粉末颗粒烧结并使电荷消散^[15-16]。SEBM过程极高

的冷却速度和温度梯度远远超过了铸造、锻造技术, 从而可以形成更细小的微观组织^[17-18]。

在逐层循环的淬火和高温自回火的共同作用下的热历史会导致SEBM零部件多尺度微结构的产生^[19-21]。研究表明, 温度梯度和冷却速度是影响最终微观结构的关键热力学因素^[20, 22], 然而, 熔池中的温度场分布导致这些因素发生重大变化, 从而打印件不同区域的微观结构有明显的差异, 因此通过热循环预测微观结构是很有必要的。由于SEBM过程涉及加热、熔化、凝固和固态相变, 以及熔融区几何形状、微观结构、晶粒结构、缺陷、力学性能、残余应力和变形的演变, 因此想要通过试验测量获得详细温度-时间-空间数据具有极大的挑战。从本质上讲, 电子束选区熔化过程是一个多尺度问题, 材料在短时间内以局部方式发生变化, 为解决上述问题, 研究人员已经进行了许多SEBM过程的建模和模拟研究以获取原位热量信息。本文综述了电子束选区熔化过程热行为的数值模拟, 主要分为以下几个方面: 温度场分析数学理论基础、仿真流程、热-力耦合模拟、熔池热力学模拟以及SEBM过程物理机制的研究。

1 SEBM温度场基本理论

1.1 传热传质机制

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(52104341, 51874115); 国家重点研发计划(2021YFB3701903-03, 2021YFB3701802-03); 西安市科技计划项目(21XJZZ0051); 西安理工大学研究生科研资助基金(252062101, 252062102)

作者简介: 杨鑫, 男, 1981年生, 博士, 副教授, 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048, 电话: 029-86231117, E-mail: yangx@xaut.edu.cn

SEBM 过程中电子束扫描金属粉末, 形成的熔池不断移动, 因此热量在金属粉末层间、粉末与基板间不断传递且累积, 该过程涉及相变潜热, 从而造成粉末床温度不断上升, 最高可达数千摄氏度, 因此 SEBM 过程是一个非线性瞬态传热过程^[23]。在 SEBM 成形过程中传热方式主要包括: 热传导^[24]、热对流^[25]、热辐射^[26], 假设凝固过程中的熔体流动可忽略不计, SEBM 过程中的传热控制方程为^[27]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中, t 为时间, T 为 t 时刻的温度, c 为比热容, ρ 为密度, k 为导热系数, Q 为热流密度。为求解该方程, 需要一定的初始条件和边界条件, 在 1.3 节介绍。

在 SEBM 过程中, 高功率密度电子束作用在粉末床的顶部表面, 局部加热并熔化一层粉末, 质量守恒定律表明, 在封闭域中, 质量不能凭空产生也不会凭空消失, 在目前的研究中, 没有额外质量进入成型区域, 因此整个过程存在质量守恒^[28]。

1.2 热源模型

热源模型是温度场模拟的基础, 它直接决定了整个仿真过程的准确性。为了模拟温度场分布, 电子束的模型通常选择锥形移动热源^[29], 其在水平方向及垂直方向的强度服从高斯分布。在过去的许多年里, 研究人员^[30-36]建立了诸多热源模型, 其中应用较为广泛的是表面高斯模型^[37]、双椭球模型^[38]、旋转高斯体模型^[39], 各热源模型对应的数学表达式分别如公式(2)~(5)所示, 其模型图如图 1 所示。

$$q(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}r} \exp \left(-\frac{y^2 + (x - vt)^2}{2r^2} \right) \quad (2)$$

式中, q 为电子束能量密度, Q 为电子束功率, v 为电子束扫描速度, t 为时间, x 、 y 为电子束束斑位置, r 为电子束束斑半径。

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z + v(\tau - t)}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{x + v(\tau - t)}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

式中, f_1 为前半椭球的热源分布系数, f_2 为后半椭球的热源分布系数, τ 是用来定义 $t=0$ 时热源位置的滞后因子, a 、 b 、 c 分别表示椭球体在 x 、 y 、 z 方向上的半轴长。其中 $f_1 + f_2 = 2$, 式(3)为双椭球模型的前半椭球表

达式, 式(4)为双椭球模型的后半椭球表达式。

$$q(x, y, z) = \frac{9Q}{\pi h r_0^2} \exp(\beta I_f z) \exp \left[9 \frac{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}{r_0^2 \cdot \lg \left(\frac{z}{h} \right)} \right] \quad (5)$$

式中, x_s 、 y_s 为电子束束斑坐标; r_0 为电子束束斑半径; h 为电子束的有效穿透深度; β 为峰值功率密度系数; I_f 为聚焦线圈电流; 其中 $z \in (0, h)$ 。

电子束的能量传递是电子束的电子与材料的原子发生碰撞, 将电子的动能转化为原子振动能量的过程。传统热源模型大多数只是基于熔池形貌的观测而获得, 在 SEBM 过程中, 熔池形状不仅由热源的能量分布决定, 还受到表面张力和重力等多种力驱动的液态金属流的强烈影响, 基于该原因, Yan 等人^[34]基于电子-材料相互作用的蒙特卡罗模拟建立了一种具有物理基础的新热源模型(图 1), 其一般形式为:

$$q(x, y, z) = Q \left[\frac{1}{\delta \cdot \int_{-z_0/\delta}^{+\infty} \exp(-t^2) dt} \exp \left(-\frac{(z - z_0)^2}{\delta^2} \right) \right] \cdot \left[\frac{N}{\pi R_b^2} \exp \left(-N \cdot \frac{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}{\pi R_b^2} \right) \right] \quad (6)$$

式中, q 为电子束能量密度; Q 为电子束功率; z_0 为最高能量密度位置, δ 为特征深度位置; N 为电子束的能量密度系数, R_b 为电子束束斑半径, x_s 、 y_s 为电子束束斑坐标。Criales 等人^[33]对电子束加热固体基板进行了热模拟, 比较了新热源模型、传统高斯面、体热源模型的差异, 模拟结果表明, 新的热源模型可以解释高斯面、体热源模型不能解释的现象, 如 SEBM 过程中的吹粉和“爆炸”。

1.3 边界条件和初始条件

SEBM 成形过程的仿真边界条件主要包括热传导、热对流、热辐射及潜热。在已有的关于传热研究^[23,40-42]中, 主要有以下初始条件和边界条件:

在电子束扫描打印成形之前, 需要对基板和粉末进行预热, 因此该过程存在一个初始条件^[43], 即:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (7)$$

式中, T_0 为初始温度。

除底面外, 每个面的净传热量^[44]表示为:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h_c (T - T_0) + \varepsilon_\theta \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

式中, k 为导热系数, $\partial T / \partial n$ 为温度梯度, h_c 为对流系数, T_0 为初始温度, ε_θ 为热辐射系数, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$; 该式右半部分的 $h_c (T - T_0)$ 表示对流引起的传热量^[44], $\varepsilon_\theta \sigma (T^4 - T_0^4)$ 表示辐射引起的传热量^[45]。

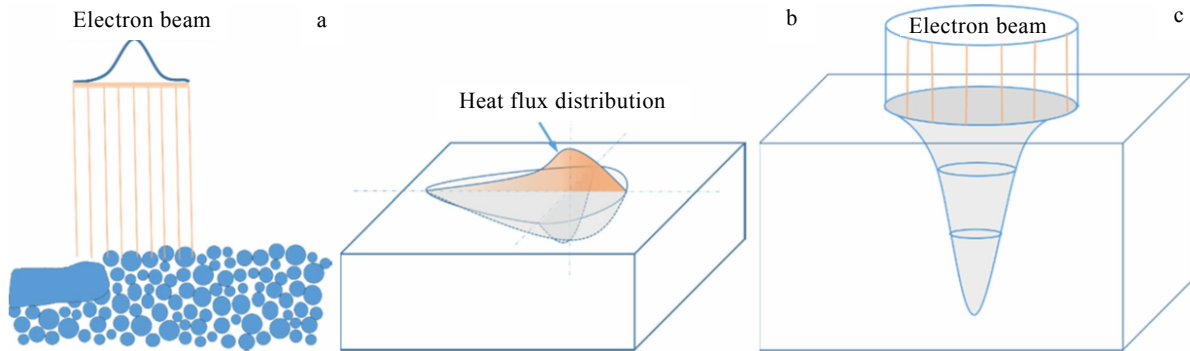


图 1 传统热源模型

Fig.1 Traditional heat source models^[34]: (a) Surface Gaussian model, (b) double ellipsoidal model, and (c) rotatory Gaussian body model

在 SEBM 过程中,粉末层经历熔化和凝固的过程,因此该过程存在相变潜热,复杂的相变模型会影响计算的收敛性,因此可引入热焓来计算材料内部的相变潜热,可通过式(9)计算^[43]:

$$H = \int \rho(T)C(T)dT \quad (9)$$

式中, H 为热焓值, ρ 为材料密度, T 为温度。

1.4 基本假设

为了简化模型,提高计算效率,通常在进行温度场数值模拟时作出一些假设^[30, 45-47]。(1)材料是各向同性的,忽略相变和体积变化对温度场结果的影响;(2)材料的热物性参数(如热膨胀系数、密度、热导率等)随温度呈非线性变化;(3)材料的电子束吸收率与温度无关;(4)忽略蒸发造成的热量损失。

在电子束选区熔化过程中,存在由蒸发造成的热量损失,然而进行数值模拟时,损失的这部分热量被忽略不计,因此该假设会影响仿真精度,在以后的研究中,应建立精确的传热方程及热传递边界条件。热源模型决定了温度场数值模拟的最终结果,电子束选区熔化过程是电子与金属粉末粒子的相互作用过程,其加热方式与激光不同,因此为了进一步提高仿真结果的准确性,应建立与真实过程更为接近的热源模型。

2 SEBM 过程仿真流程

2.1 几何建模

零件的几何模型决定了网格的生成和后续计算分析的区域,由于在对一个零件进行网格划分时需要大量的单元,并且对于一个具有复杂几何形状的粉末层需要数百个扫描轨迹,需要很大的计算成本,因此大多数三维模型和二维模采用简单的几何形状模拟温度和热应力的演变,对温度场仿真而言,通常采用基于连续体假设的宏观建模方法^[30],沉积部分的尺寸从几毫米到几厘米不等^[48]。然而,即使对于 6 mm×6 mm

的扫描域,温度场的模拟时间也可能需要 92 h^[49]。因此,在模拟电子束选区融化过程之前,需要仔细考虑零件和基板的尺寸。

2.2 材料属性

材料的属性尤其是热物性,是精确进行 SEBM 过程仿真的基础,由于该工艺的热特性,因此材料性能与温度以及材料从粉末到液体再到固体的转变密切相关。密度、热导率和比热容是显著影响 SEBM 过程演化的参数,其他材料特性,如杨氏模量、剪切模量、屈服强度和热膨胀系数也可以被认为与温度相关,这些属性在进行力学性能分析时使用并与热分析耦合,因此它们的温度依赖性影响残余应力和变形结果^[50]。

2.3 网格划分

网格特性严重影响着数值模拟的结果,网格质量较差可能导致不稳定或不准确的计算结果^[51],此外,网格的划分质量对模拟的计算效率和分析所需的时间有显著影响^[52, 53]。在模拟研究中,一种常用的网格划分技术是对模型的不同区域采用不同的网格密度,在某些区域尤其是靠近热源的区域会出现温度梯度,为了进行精确的分析需要在这些区域使用更密集的网格^[50]。为此,根据上述需要,采用网格局部细化的方法来改变每个加载步骤中的网格密度,在一些研究中^[54],对于电子束直接加热的区域及周围区域,通常采用较细的网格,而网格随着电子束束斑的远离而变粗。

2.4 热源加载

在 1.2 节中介绍了常见的热源模型,在进行温度场仿真时,热源模型作为载荷施加在建立好的粉床模型上,一般可根据扫描策略来定义热源移动的方向。热源加载正确与否决定了仿真结果真实性,热源加载时需要结合实际打印时的电子束扫描。由于热源是关于速度-时间-位置的方程,因此可根据计算机语言编写移动热源程序,从而实现热源的加载和移动。

3 SEBM 热行为数值模拟的研究现状

3.1 热-力耦合数值模拟

粉末层和凝固层的瞬态温度场对打印件的热应力分布和最终残余应力的计算至关重要。对热-力耦合分析而言,在获得温度场结果之后进行瞬态应力分析,获得的温度场结果作为热载荷进行应力场仿真。使用有限元法模拟温度场和应力场的流程如图 2^[54]所示,在前处理阶段定义零件几何形状、网格、初始/边界条件、载荷和材料属性,在处理阶段,控制系统的偏微分方程被离散成每个单元的方程,然后所有的方程被组合成一个整体方程,方程的解可用于后处理阶段,以便可视化零件几何形状上的温度场,为了近似模拟残余应力和变形,按照类似的工作流程进行力学分析,通过热分析获得的温度场结果在力学分析中用作载荷。

为了减小 SEBM 过程中的残余应力和变形,进一步揭示 SEBM 过程中应力和应变的形成特征,Tadano^[55]等人开发了一个具有明确热源的三维有限元模型,该模型采用光栅式扫描方式(见图 3)^[55];为了验证热源模型的有效性,研究人员使用高速摄像机观察了试验过程中的温度分布。模拟中得出的熔池宽度和长度分别为 0.34 和 1.3 mm,与试验的差值分别为-0.24 mm (-40%误差)和+0.3 mm(+30%误差),验证了所定义的热源模型的有效性;熔化过程中的内应力分布从预热温度到熔化温度单调增加,呈现出各向异性,即电子束扫描方向的应力高于其他方向的应力。Galati^[41]等人开发了一个热-力耦合模型来模拟 SEBM 过程中单道熔化轨迹的形成,对固体材料在加热和冷却过程中的热膨胀和收缩以及应力形成进行了数值分析,试验结果和模拟结果之间的最大偏差分别为熔化线高度的 15%、宽度的 5%,验证了模型的可靠性。

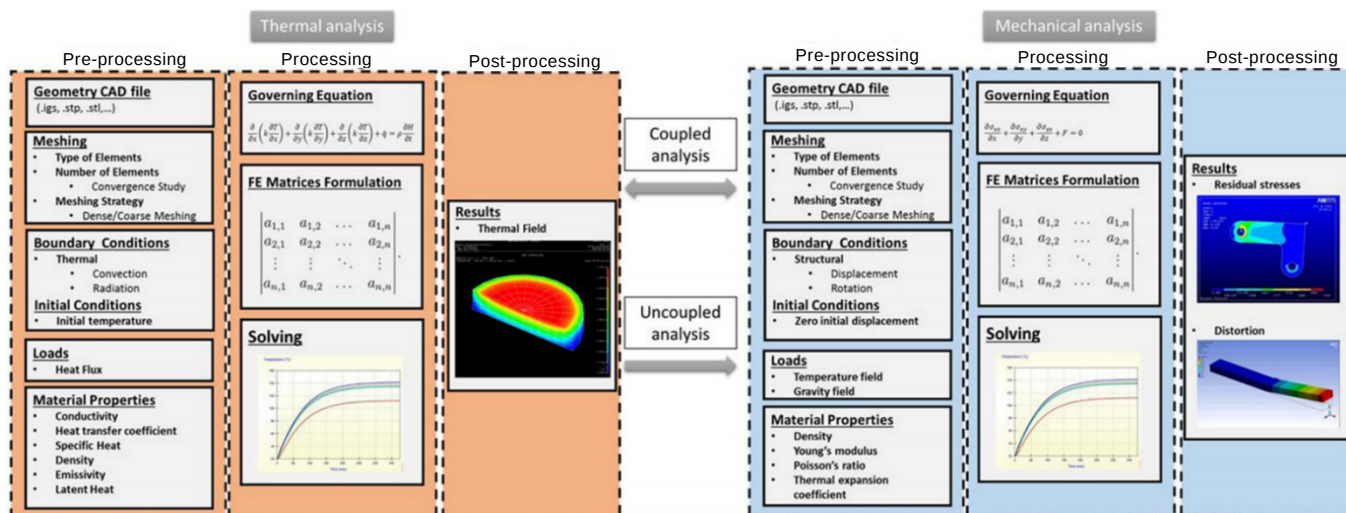


图 2 热-力耦合有限元分析工作流程

Fig.2 Finite element analysis workflow^[54]

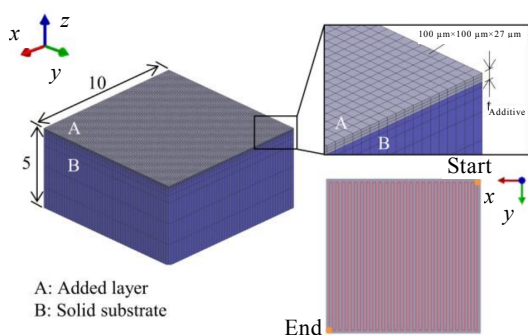


图 3 有限元模型和扫描模式

Fig.3 Finite element model and scanning mode^[55]

许多研究^[23, 45, 56-57]都是在宏观尺度上进行的,即单个粉末颗粒没有明确建模,而是被视为具有均匀特性的连续体。Riedlbauer 等人^[50]开发了一个非线性热力学模型来计算 SEBM 过程中的瞬时温度分布和应力,模拟了单道扫描路径,分析了预测的温度和应力,并比较了整体法和绝热分裂法 2 种算法的性能,结果表明,模拟方法与试验结果基本吻合,并在数值上代表了 SEBM 过程,包括能量输入、粉末熔化和相变。

现有研究主要集中在 SLM 过程热-力耦合的数值模拟研究,而 SEBM 的研究甚少,这是因为 SEBM 工艺包含预热工艺,微熔池内发生复杂的现象。因此,受计算成本的限制,SEBM 温度场及应力场的模拟也

仅限于单道、单层或单道多层。

3.2 熔池热力学数值模拟

在 SEBM 成形过程中, 熔池的几何形状和动态特性强烈地影响打印件的性能^[58]。Zäh 和 Lutzmann^[59]对不同电子束功率和扫描速度下熔池的长宽比进行了数值模拟, 模拟结果显示, 当扫描速度为 50 mm/s 时, 长宽比始终低于 2:1, 此外, 对于给定的电子束功率, 熔池的形状随扫描速度显著变化, 通过数值模拟得到的最优参数组合可为实验研究进行理论指导。Shen^[29]等人建立了一个有限元模型研究 SEBM 过程中气孔率和电子束束斑尺寸对熔池尺寸的影响, 在 SEBM 过程中, 粉末烧结需要预热, 从而会导致不同程度的孔隙率, 显著影响金属粉末的热性能, 因此开发了一个用户子程序以考虑熔化潜热、固体或粉末材料的温度和孔隙率热特性以及材料状态的变化, 孔隙率的增加意味着粉末表观密度的增加, 导致温度升高和熔池深度增加、宽度减小 (图 4a)。较大的电子束束斑直径会降低最高温度, 从而导致较低的冷却速率 (图 4b)。

Chou^[60]等人为了进一步了解扫描速度、电子束功率和束斑直径对熔池尺寸的影响, 对 SEBM 过程进行了仿真研究, 根据工艺参数对熔池长宽比和截面积的影响给出了仿真结果。发现 3 个工艺参数对熔池的截面积都有显著影响, 电子束功率和扫描速度对熔池长宽比有显著影响, 如图 5^[60]所示, 为了保持恒定的束斑直径的长宽比恒定, 电子束功率和扫描速度必须同时增大或减小, 而光束功率和速度必须分别变化以保持截面面积恒定。此外, 为了预测熔池的长宽比和截面积, 将数值结果拟合到回归模型中, 模拟结果和回归模型之间的比较表明, 长径比的平均误差约为 13.13%, 最大误差为 57.35%, 而截面面积的平均误差为 29.02%。

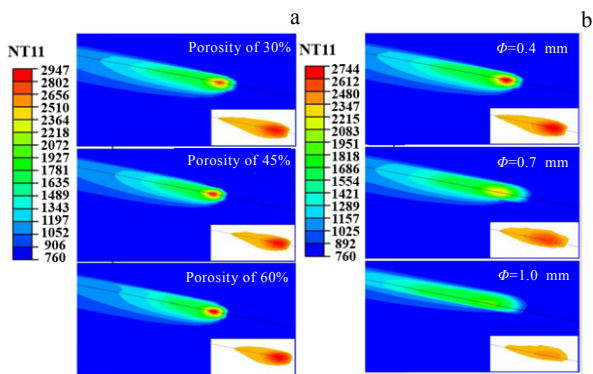


图 4 不同孔隙率下的温度场和熔池几何形状及不同束斑尺寸下的温度场和熔池几何形状

Fig.4 Temperature fields and melt pool geometries under various levels of porosity (a) and various beam sizes (b)^[29]

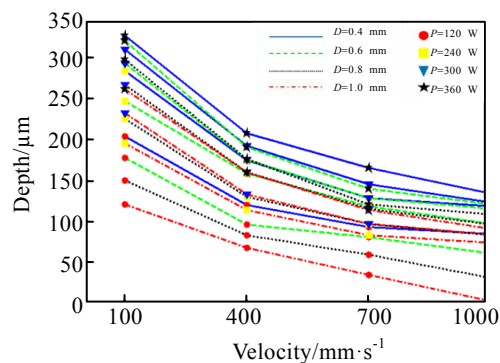


图 5 工艺参数对熔池尺寸影响

Fig.5 Influences of process parameters on the size of the molten pool^[60]

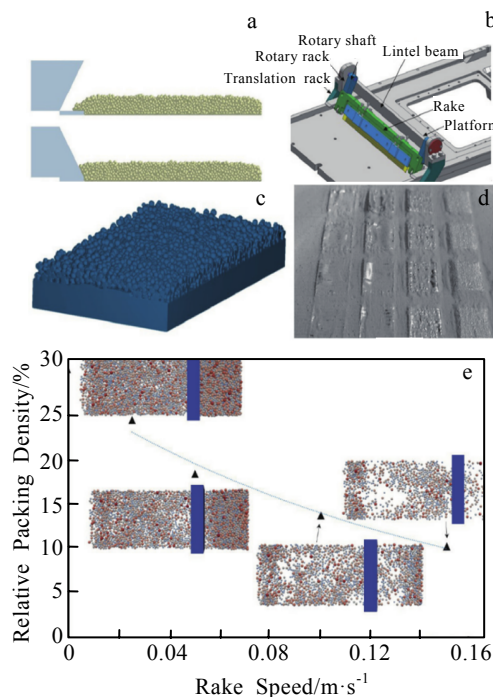


图 6 粉末扩散的试验和模拟结果

Fig.6 Experimental and simulation results of powder spreading^[61]: (a) powder spreading; (b) powder rake; (c) simulation result; (d) experimental result; (e) relative packing density vs rake speed

3.3 SEBM 过程粉末烧结熔化数值模拟研究

Yan 等人^[61]为了全面了解 SEBM 过程中的物理机制, 采用粉末扩散的离散元模型、粉末烧结的粒子滤波模型、粉末熔化的有限体积模型等 3 个模型对 SEBM 过程中粉末床内的粉末颗粒堆积、颗粒之间的烧结颈形成进行了数值模拟, 并进行了试验验证。如图 6 所示, 模拟结果可以为刮刀 (图 6b) 的设计和 optimization 提供指导, 包括刮刀的形状及其移动速度, 并预测平坦基底或前几层波动表面上的相对堆积密度 (图 6c), 然后与试验进行比较 (图 6d), 如果平移速度相对较低,

刮刀形状不会影响堆积密度, 且堆积密度随着刮刀移动速度的增加而减小, 如图 6e 所示。

粉末烧结模型主要为 2D 模型, 给出了 2 种模拟情况: (1) 2 种不同尺寸的粉末颗粒; (2) 2 种相似尺寸的粉末颗粒(图 7)。在图 7a 和图 7c 中, 红色部分表示充满材料的区域, 蓝色部分表示没有材料的区域, 过渡色表示界面。该模型仍有不少改进, 试验观察(图 7b 和图 7d)已被定性再现, 证明了模型的真实性和

为了确定主要单轨缺陷的潜在物理机制, 包括球化效应和单轨不均匀性, Yan 等人^[62]使用有限体积法(FVM)建立了一个三维粉末尺度的多物理模型来预测离散粉末粒子的演化过程, 研究了一些关键因素的影响, 为避免球化效应和减小单道不均匀性的方法提供了依据。采用直径在 40~80 μm 之间的球形粉末, 铺粉层厚为 0.1 mm, 当电子束功率为 30 W, 扫描速度为 0.5 m/s 时, 出现球化效应, 如图 8 所示, 表示出现球化效应的原因是熔融颗粒下的基底缺乏熔化, 如果熔融颗粒下面的基底也被熔化, 则熔融颗粒将散布在

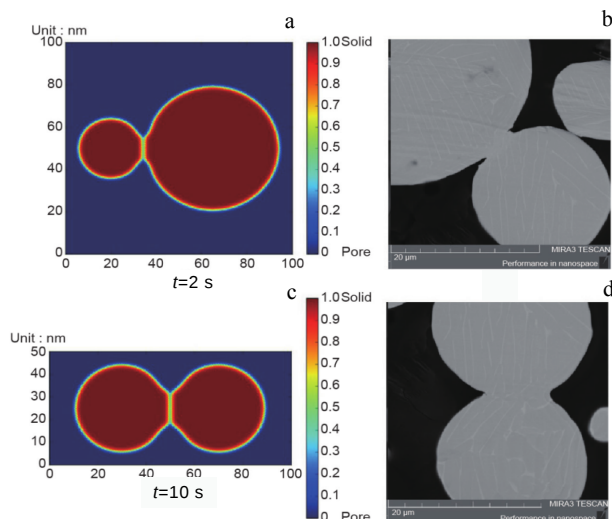


图 7 粉末烧结的试验和模拟结果

Fig.7 Experimental and simulation results of powder sintering: (a-b) two powder particles with different sizes; (c-d) two powder particles with similar sizes^[61]

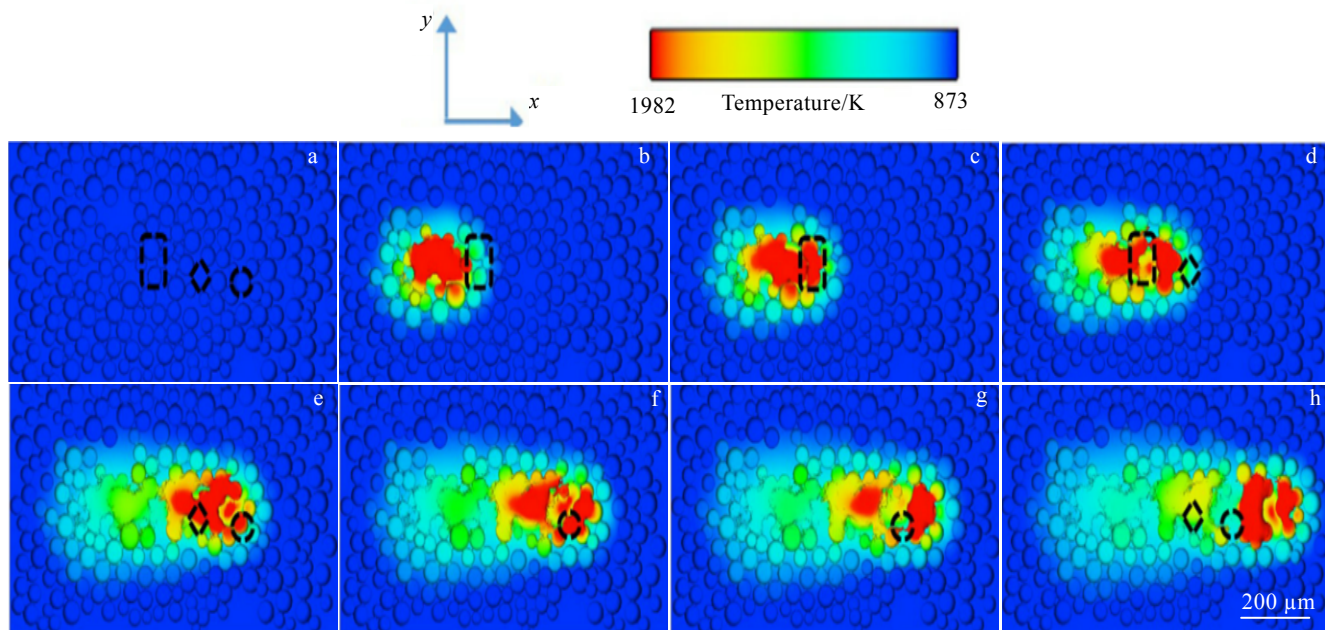


图 8 不同工艺参数的熔池尺寸

Fig.8 Sizes of the molten pool under different process parameters^[62]: (a) $t=0$ ms, (b) $t=0.54$ ms, (c) $t=0.72$ ms, (d) $t=0.96$ ms, (e) $t=1.48$ ms, (f) $t=1.62$ ms, (g) $t=1.72$ ms, and (h) $t=2$ ms

熔化基底上, 表面积和表面能将最小化, 从而避免球化效应。

将电子束功率增加到 60 W, 球化效应被消除, 形成连续但不完全笔直的轨迹, 如图 9 所示, 在电子束轨迹的左侧, 熔池边界附近的颗粒被完全熔化,

然后被拖入衬底的熔化区域, 而不是扩散在未熔化的衬底区域的表面上; 在右侧, 边界附近的粒子部分熔化, 在表面张力的驱动下, 颗粒的熔化部分保持与熔池的紧密接触, 然后形成固化连接改变熔化轨迹的形状。

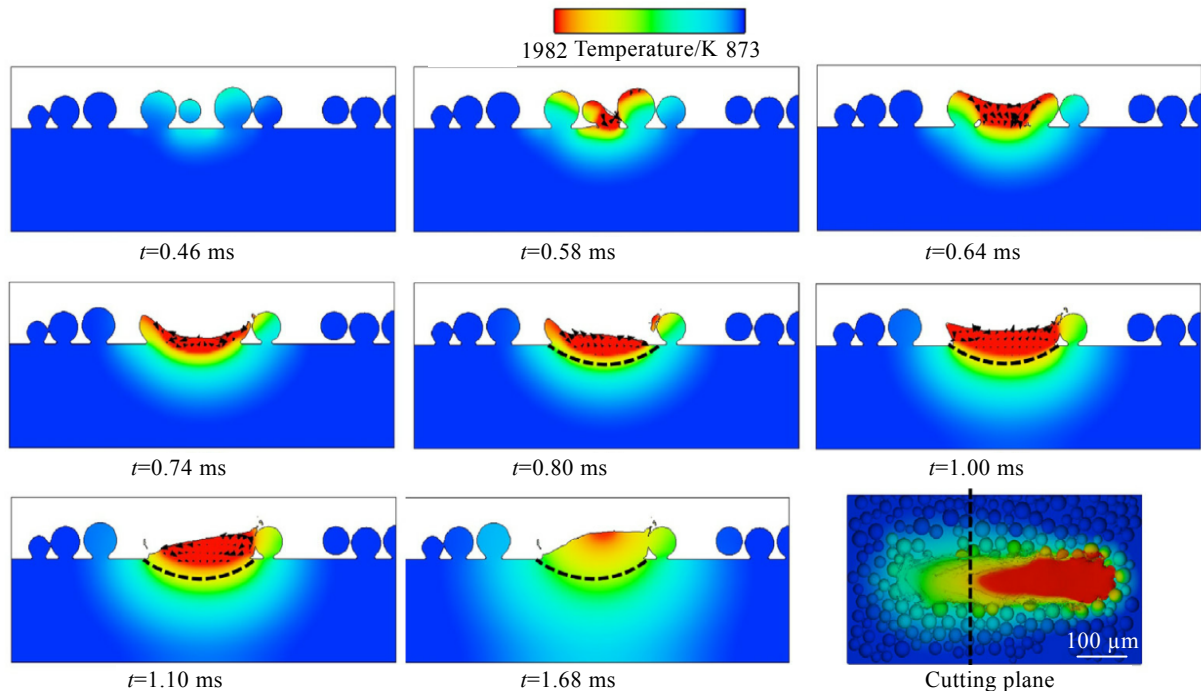


图 9 非均匀单轨形成过程的模拟结果(黑色虚线表示基底中熔化区域的底部边界, 箭头是速度矢量)

Fig.9 Simulation results of formation process of non-uniform single track (cross section view) (the black dashed curve represents the bottom boundary of melted region in the substrate; the arrows are velocity vectors)^[62]

4 结果与展望

本文从热分析的数学理论基础、仿真流程、热-力耦合模拟、熔池热力学模拟、及缺陷机制几个方面综述了 SEBM 热分析数值模拟研究现状, 主要得出以下结论:

1) 关于 SEBM 热分析数值模拟的数学理论基础, 国内外学者做了许多研究, 其中包括传热机制、热源模型、边界条件, 正确的理论数学理论是进行数值模拟的前提。

2) 对于热-力耦合而言, 大多采用有限元法, 且模型是基于连续性假设建立。在温度场计算结果的基础上进行应力场的仿真, 从而实现了温度-应力之间的耦合, 该方法研究范围较小, 存在较大误差。

3) 熔池的研究目前大多停留在工艺参数层面, 主要是工艺参数对熔池形貌、尺寸和温度场的影响, 且仅限于很少的几层或几道, 很少有考虑粉末颗粒之间的相关作用、电子束-粉末之间的相互作用, 因此与实际打印过程有较大出入。

4) 数值模拟技术的出现为阐明 SEBM 技术的内在热力学机制提供了可能。目前可通过数值模拟技术探究 SEBM 过程的物理机制以及成形过程中的缺陷机

制, 包括微观尺度上的电子-原子相互作用, 介观尺度上的粉末熔化、凝固, 宏观尺度上的温度场以及成形过程中球化效应和单轨不均匀性。

尽管数值模拟技术发展迅速, 但 SEBM 过程的建模和模拟仍然面临多方面的挑战, 复杂的材料行为、相变、残余应力和变形、高温温度梯度、不同长度和时间尺度都在一定程度上阻碍了模拟的进一步发展。一方面, 在 SEBM 过程中, 电子束的电子与金属粉末原子相互作用产生热量, 大多数的热分析并未考虑该边界条件, 因此需要建立优化的模型考虑该边界条件; 另一方面, 由于实际打印过程中零件尺寸较大, 在数值模拟时采用相同尺寸的模型会大大增加计算时间从而增加计算成本, 采用局部模型进行数值模拟又会降低真实性, 因此需要从数学理论方面寻找更加高效的计算方法, 探索出简洁的计算方程, 从而在保证真实性的前提下提高计算效率降低计算成本; 最后, SEBM 过程具有高的温度梯度和冷却速度, 较大的过冷度和过热度, 因此导致微观组织的仿真充满了挑战性, 在以往的数值模拟中, 并未过多考虑 SEBM 过程的过冷度和过热度, 从而仿真结果与实际有一定的差别, 然而该因素并不可忽略, 因此在以后的工作中也应将这些因素考虑进去。

参考文献 References

- [1] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 100: 224
- [2] Yin Y, Tan Q, Bermingham M *et al.* *International Materials Reviews*[J], 2021, 67
- [3] Tofail S, Koumoulos E P, Bandyopadhyay A *et al.* *Materials Today*[J], 2018, 21(1): 22
- [4] Dilberoglu U M, Gharehpapagh B, Yaman U *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2017, 11: 545
- [5] Levy G N, Schindel R, Kruth P J. *CIRP Annals*[J], 2003, 52(2): 589
- [6] Zhang D, Qiu D, Gibson M A *et al.* *Nature*[J], 2019, 576(7785): 91
- [7] Hou H L, Simsek E, Ma T *et al.* *Science*[J], 2019, 366: 1116
- [8] Luo Z B, Zhao Y Y. *Additive Manufacturing*[J], 2018, 21: 318
- [9] Gajapathi S S, Mitra S K, Mendez P F. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2011, 54(25-26): 5545
- [10] Sochalski-Kolbus L M, Payzant E A, Cornwell P A *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2015, 46(3): 1419
- [11] Körner C, *International Materials Reviews*[J], 2016, 61(5): 361
- [12] Smith C J, Tammas-Williams S, Hernandez-Nava E *et al.* *Nature*[J], 2017, 7(1): 10 514
- [13] Förner A, Giese S, Arnold C *et al.* *Nature*[J], 2020, 10(1): 15 153
- [14] Tamayo J A, Riascos M, Vargas C A *et al.* *Heliyon*[J], 2021, 7(5): e06892
- [15] Ellis E A I, Sprayberry M A, Ledford C *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2021, 555: 153 041
- [16] Yamanaka K, Shiratori H, Mori M *et al.* *npj Materials Degradation*[J], 2020, 4(1): 24
- [17] Forner A, Giese S, Arnold C *et al.* *Nature*[J], 2020, 10(1): 15 153
- [18] Raplee J, Plotkowski A, Kirka M M *et al.* *Nature*[J], 2017, 7(1): 43 554
- [19] Li C, Liu Z Y, Fang X Y *et al.* *Procedia CIRP*[J], 2018, 71: 348
- [20] Damon J, Koch R, Kaiser D *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2019, 28: 275
- [21] Jägle E A, Sheng Z D, Wu L *et al.* *JOM*[J], 2016, 68(3): 943
- [22] Vecchiato F L, Winton H D, Hooper P A *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101 401
- [23] Raghavan N, Dehoff R, Pannala S *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 112: 303
- [24] Neiva E, Chiumenti M, Cervera M *et al.* *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 2020, 168: 103 343
- [25] Zhao B, Li KY, Wang Y W *et al.* *International Journal of Thermal Sciences*[J], 2022, 171: 107 264
- [26] Teng T L, Chang P H, Tseng W C. *Computers & Structures*[J], 2003, 81(5): 273
- [27] Ezekoye O A. *Physics Today*[J], 1962, 15(11): 74
- [28] Romanova V, Balokhonov R, Zinovieva O *et al.* *Computers & Structures*[J], 2021, 244: 106 412
- [29] Shen N G, Chou K. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*[J], 2012, 7253: 287
- [30] Ding D H, Zhang S M, Lu Q H *et al.* *Materials Today Communications*[J], 2021, 27: 102 430
- [31] Irwin J, Michaleris P *et al.* *J Manuf Sci Eng*[J], 2016, 138(11): 111 004
- [32] Erik E R, Denlinger P *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2016, 12: 51
- [33] Criaes L E, Arisoy Y M, Lane B *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2016, 13: 14
- [34] Yan W T, Smith J, Ge W J *et al.* *Computational Mechanics*[J], 2015, 56(2): 265
- [35] Cheng B, Chou K. *Computer-Aided Design*[J], 2015, 69:102
- [36] Ma L, Bin H Z. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2007, 34(9-10): 898
- [37] Körner C, Attar K, Heinel E *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(6): 978
- [38] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. *Metallurgical Transactions B*[J], 1984, 15(2): 299
- [39] Luo Y, Liu J H, Ye H. *Vacuum*[J], 2010, 84(6): 857
- [40] Cook P S, Murphy A B. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 31: 100 909
- [41] Galati M, Snis A, Iuliano L. *Additive Manufacturing*[J], 2019, 30: 100 897
- [42] Hussein A, Liang H, Yan C Z *et al.* *Materials & Design*[J], 2013, 52: 638
- [43] Huang W B, Zhang Y M. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 42: 139
- [44] Samantaray M, Sahoo S, Thatoi D. *Comptes Rendus-Mécanique*[J], 2018, 346(11): 1043
- [45] Ma R L, Peng C Q, Cai Z Y *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2021, 31(10): 2922
- [46] Baiges J, Chiumenti M, Moreira C A *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 37: 101 650
- [47] Yang Z Y, Fang Y C, He J S. *Vacuum*[J], 2020, 175: 109 256
- [48] Luo Z B, Zhao Y Y. *Additive Manufacturing*[J], 2018, 21: 318

- [49] Cheng B, Shrestha S, Chou K. *Additive Manufacturing*[J], 2016, 12: 240
- [50] Riedlbauer D, Steinmann P, Mergheim J. *Computational Mechanics*[J], 2014, 54(1): 109
- [51] Parthasarathy V N, Kodiyalam S. *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 1991, 9(4): 309
- [52] Dimitris V, Wipperf J, Papadarakakis M *et al.* *Finite Elements in Analysis and Design*[J], 2013, 66: 36
- [53] Smit M S, Bronsvort W F. *Engineering with Computers*[J], 2009, 25(4): 327
- [54] Schoinochoritis B, Chantzis D, Salonitis K. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*[J], 2016, 231(1): 96
- [55] Tadano S, Hino T, Nakatani Y. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 257: 163
- [56] Abdelgawad A, Al-Athel K, Albinmoussa J. *Ceramics International*[J], 2021, 47(23): 33 140
- [57] Francois M M, Sun A, King W E *et al.* *Current Opinion in Solid State and Materials Science*[J], 2017, 21(4): 198
- [58] Rouquette S, Guo J, Masson P L. *International Journal of Thermal Sciences*[J], 2007, 46(2): 128
- [59] Zäh M F, Lutzmann S. *Production Engineering*[J], 2010, 4: 15
- [60] Bo C, Chou K. *24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-an Additive Manufacturing Conference* [C]. Austin, USA: ISFFS, 2013
- [61] Yan W T, Qian Y, Ma W X *et al.* *Engineering*[J], 2017, 3(5): 701
- [62] Yan W T, Ge W J, Qian Y *et al.* *Acta Materialia*[J], 2017, 134: 324

Research Status of Numerical Simulation of Electron Beam Selective Melting Thermal Behavior

Yang Xin¹, Wang Fenghui¹, Gu Wenping², Lai Yangkai¹, Sun Chenhao¹, Liu Shifeng³, Tang Huiping⁴

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2. College of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

(3. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

(4. College of Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Electron beam selective melting parts experienced complex thermal history, resulting in multi-scale microstructures. Thermal history data play an important role in microstructure formation analysis. The complex metallurgical behavior of micro-melting pool makes it difficult to obtain the temperature-time-spatial data by experimental means. As a new technical method, numerical simulation technology provides a new idea to solve this problem. In this paper, the research status of numerical simulation of electron beam selective melting thermal behavior was reviewed from the aspects of mathematical theory of temperature field, simulation process, thermal-mechanical coupling simulation, thermodynamic simulation of molten pool and thermal defect mechanism. The challenges and future prospects of numerical simulation of electron beam selective melting thermal behavior were discussed.

Key words: selective electron beam melting; temperature field; numerical simulation

Corresponding author: Yang Xin, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China, Tel: 0086-29-82312504, E-mail: yangx@xaut.edu.cn